
탄소중립 시대 양식산업 대응전략 연구

- 육상 어류양식을 중심으로 -

A Study on Strategies for Achieving Carbon Neutrality
in the Aquaculture Industry
- Focusing on Land-based Fish Aquaculture -

마창모 · 최순 · 윤미경 · 김철현 · 이채령



한국해양수산개발원
KOREA MARITIME INSTITUTE

저자	마창모, 최순, 윤미경, 김철현, 이채령		
내부연구진	연구책임자	마창모 한국해양수산개발원	수산연구본부 연구위원
	공동연구원	최 순 한국해양수산개발원	수산연구본부 전문연구원
	공동연구원	윤미경 한국해양수산개발원	수산연구본부 전문연구원
	공동연구원	김철현 한국해양수산개발원	수산정책사업본부 전문연구원
	공동연구원	이채령 한국해양수산개발원	수산연구본부 연구원

연구기간 2022. 1. 1. ~ 2022. 10. 31.

보고서 집필내역

연구책임자	마창모 연구총괄, 제1장 제1절, 제2절, 제3장 제3절, 제4장 제1절, 제4절, 제5장, 제6장		
내부연구원	최 순	제2장 제2절, 제3절, 제4장 제2절 1, 제3절	
	윤미경	제2장 제1절, 제3장 제1절, 제2절	
	김철현	제4장 제2절 2	
	이채령	제1장 제3절	

산·학·연·정 연구자문위원	장태욱 ㈜퀀텀 대표
	최상진 ㈜AQA 전무
	김봉태 부경대학교 교수
	이봉주 공주대학교 교수
	이상준 에너지경제연구원 연구위원
	조성균 한국전자통신연구원 책임연구원
	박명래 해양수산부 사무관

※ 순서는 산·학·연·정 순임

발간사

세계적으로 탄소중립 달성을 위한 실천적 계획이 발표되고, 국가별 이행 노력도 강화되고 있다. 국가 탄소중립 도달 시기를 2050년에서 2040년으로 앞당기면서 적극적으로 대응하는 국가도 나타나고 있다. 민간기업은 탄소중립을 달성하지 못하면 기업 생태계 내에서 퇴출까지 될 수 있는 상황에 직면해 있다. 점차 탄소중립 여부는 국가 경쟁력이 되고, 상품 경쟁력이 되고 있다.

탄소 경쟁력이 국가 경쟁력 및 상품 경쟁력이 되는 시기에 양질의 단백질 공급원 역할을 하는 양식산업도 이러한 흐름에 따라 변화해야 할 시점이다. 양식산업은 어선 어업과 함께 수산물 생산에서 매우 중요한 위치에 있지만, 탄소중립과 관련된 정책연구는 주로 화석연료 사용이 많은 어선어업을 대상으로 탄소 직접배출을 절감하는 방향의 연구가 주를 이루었다. 양식산업의 중요성에도 불구하고 탄소중립 실천을 위한 분석과 정책 방향 설정에 관한 연구가 부족한 상황이다. 탄소중립 시대에 우리나라 양식산업 성장전략에 대한 고민이 거의 없었다고 해도 과언이 아니다.

세계적으로 대형 첨단양식장과 플랜트형 양식장이 만들어져 에너지 사용의 증가가 예상되면서 미국 등의 국가에서는 대형 플랜트 양식장 등에 대한 탄소제로를 권고하고 있다. 우리나라도 넙치, 뱀장어 등 대표 양식어류 생산을 위한 육상양식장 전기사용량이 증가하였고, 스마트양식 클러스터 사업 등을 통해 육상에서의 첨단화, 대형화가 시작되고 있다. 향후 간접배출량 증가라 하더라도 전기사용량의 증가가 예상된다. 국가적으로 국가온실가스감축목표를 이행하는 과정에서 수산업 전체의 탄소 배출량 감소를 위한 신규사업들이 도출되어야 할 상황에서 양식산업 탄소중립 대응 전략 마련을 위한 연구는 의미가 있다.

이에 본 연구에서는 탄소중립 시대를 준비하기 위해 양식산업 중 에너지 사용이 많은 육상양식의 탄소 배출량 및 구조 분석을 통해 대응 방안을 모색하였다. 육상양식장을 대상으로 탄소 배출량 및 배출원을 추정하고 그동안 시행된 탄소중립 정책의 효과를 분석하였다. 이를 통해 추진전략과 정책과제들을 제안하고 지원체계 및 중장기 추진 로드맵을 마련하였다. 본 연구가 세계적으로 빠른 성장을 이어 나가는 양식산업이 탄소중립 시대에는 어떻게 생존하고 성장해야 하는지 방향성을 설정하고, 성장 방향에 맞는 정책을 마련하는 계기가 되기를 기대한다.

본 연구는 수산연구본부 마창모 연구위원이 연구책임을 맡았으며, 최순 전문연구원, 윤미경 전문연구원, 이채령 연구원, 수산정책사업본부 수산업관측센터 김철현 전문연구원이 연구진으로 참여하였다. 양식산업의 탄소중립 관련 정책연구는 선행 연구가 부족하고, 상대적으로 타 산업에 비해 관심이 부족한 분야임에도 연구를 제안하고 수행한 연구진의 노력에 감사를 전한다. 또한 연구의 발전을 위해 자문과 조언을 아끼지 않으신 모든 자문위원께도 깊은 감사를 드린다.

2022년 12월
한국해양수산개발원
원장 김 종 덕

목차

정책제안 _ i

요약 _iii

Executive Summary_xiii

01	서론 _1	
	제1절 연구 필요성 및 목적	1
	1. 연구 필요성	1
	2. 연구 목적	4
	제2절 연구 내용 및 방법	8
	1. 연구 범위	8
	2. 연구 내용	10
	3. 연구 방법	11
	제3절 선행연구 검토 및 본 연구의 차별성	14
	1. 선행연구 검토	14
	2. 본 연구의 차별성	20
02	탄소중립 논의 및 정책 동향 _23	
	제1절 논의 배경 및 산업 동향	23
	1. 논의 배경	23
	2. 산업 동향	26
	3. 농업 동향	29
	제2절 국내외 수산업 정책 동향	31
	1. 해외 동향	31
	2. 국내 동향	34
	제3절 시사점	46

03	양식산업 동향과 양식산업 탄소 경쟁력_49	
	제1절 양식산업 동향	49
	1. 세계 양식산업 동향	49
	2. 국내 양식산업 동향	56
	제2절 양식산업 탄소배출 현황 및 탄소 경쟁력	62
	1. 양식산업 탄소배출 현황	62
	2. 양식산업 탄소 경쟁력	67
	제3절 시사점	73
04	육상양식 탄소배출 및 정책효과 분석_79	
	제1절 개요	79
	제2절 육상양식 품종별 탄소 배출량 및 배출원 분석	81
	1. 육상양식 품종별 탄소 배출량 추정	81
	2. 육상양식 탄소 배출원 분석	86
	제3절 육상양식 탄소중립 정책효과	93
	1. 개요	93
	2. 분석 방법	93
	3. 분석 자료	95
	4. 분석 결과	99
	제4절 시사점	102
05	육상양식 탄소중립 추진전략과 정책과제_107	
	제1절 기본방향	107
	제2절 추진전략	110
	제3절 정책과제	113
	1. 육상양식장 탄소배출 통합관리	113

2. D.N.A 기반 육상양식장(치어, 성어) 탄소 저감	121
3. 탄소 저감 양어용 사료 개발	125
4. 양식어류 유통 비효율 개선	129
5. 재생에너지 공급 다양화	131
제4절 지원체계 및 중장기 추진 로드맵	135
1. 지원체계	135
2. 중장기 추진 로드맵	137
3. 사회경제적 기대효과	138

06

결론 및 정책제언_145

제1절 요약 및 결론	145
1. 요약	145
2. 결론	148
제2절 정책제언	151
1. 저탄소 수산물인증제도 도입 방향	151
2. 양식장용 사용 후 배터리 기반의 재사용 ESS 구축	154
3. 친환경에너지 절감 사업 현행 보조율 유지·지원 확대	158
4. 양식산업 탄소배출 인벤토리 구축	160

참고문헌_165

부록_177

표 목차

〈표 1-1〉 선행연구 검토	19
〈표 1-2〉 선행연구와 본 연구의 차별성	21
〈표 2-1〉 교토의정서와 파리협정 비교	26
〈표 2-2〉 주요 수출국 대상 탄소 국경세 전망치	27
〈표 2-3〉 국제 수산물 인증제별 탄소배출 기준 및 내용	33
〈표 2-4〉 해양수산업 탄소배출 감축	34
〈표 2-5〉 2050 탄소중립 로드맵 5대 부문 추진 목표	36
〈표 2-6〉 친환경에너지 보급사업 추진 경과	37
〈표 2-7〉 친환경에너지 보급사업 보조 비율(%)	38
〈표 2-8〉 연도별 지원 건수 및 사업비	40
〈표 2-9〉 친환경에너지 보급사업 유형별 보급 실적	41
〈표 2-10〉 친환경에너지 보급사업 유형별 사업 실적	41
〈표 2-11〉 지역별 사업비 투입 비중	42
〈표 2-12〉 해수열 히트펌프 보급 여가	43
〈표 2-13〉 해수열 히트펌프 사업비	43
〈표 2-14〉 인버터 보급 여가	44
〈표 2-15〉 인버터 사업비	44
〈표 2-16〉 탄소중립 관련 정책 시사점	48
〈표 3-1〉 주요 양식 방법별 사료 사용량	60
〈표 3-2〉 주요 양식 어종별 사료 사용량	61
〈표 3-3〉 양식생산 단계별 온실가스 배출원	65
〈표 3-4〉 양식장 녹화 방법별 탄소격리량	71
〈표 3-5〉 양식 방법 및 에너지 사용 방법에 따른 온실가스 배출량	72
〈표 3-6〉 양식산업 온실가스 배출 관련 선행연구 결과 종합	74
〈표 4-1〉 품종별 평균 탄소 배출량	83
〈표 4-2〉 품종별 단위 생산당 탄소 배출량	84
〈표 4-3〉 양식어류 단계별 온실가스 배출 여부	86
〈표 4-4〉 업스트림 단계 탄소 배출량	89
〈표 4-5〉 유수식 육상넙치 양식장 생산단계 연간 탄소 배출량	90
〈표 4-6〉 생산 후 단계 탄소 배출량	92

〈표 4-7〉 DID 추정을 위한 데이터 구조	94
〈표 4-8〉 표본 어가 품종별 분포	95
〈표 4-9〉 조사 대상 어가의 품종별·양식 방법별 현황	96
〈표 4-10〉 조사 대상 어가의 기초통계량	97
〈표 4-11〉 2020년 대비 2021년 연간전력비 변화분	98
〈표 4-12〉 평균 탄소 배출량 변화 비교	99
〈표 4-13〉 DID 추정 결과(고정효과 패널)	101
〈표 4-14〉 탄소배출량 상위 어종(2021년 기준)	102
〈표 4-15〉 육상양식장(넙치) 주요 탄소 배출원	104
〈표 4-16〉 친환경에너지 보급사업 정책 평가	105
〈표 5-1〉 국내 어종별 배합사료 생산량 및 주요 배합사료의 어분 함량	126
〈표 5-2〉 육상양식장 제원 및 전력 사용량(사례)	133
〈표 5-3〉 육상양식장 소수력발전 사업의 경제적 타당성(사례)	134
〈표 6-1〉 저탄소 수산물인증제도 지원 사업(안)	153
〈표 6-2〉 사용 후 배터리 ESS와 신품 배터리 ESS 비교	157
〈표 6-3〉 양식장용 사용 후 배터리 기반의 재사용 ESS 구축 사업(안)	158
〈표 6-4〉 탄소배출 인벤토리 구축 사업(안)	163

그림 목차

〈그림 1-1〉 연구 범위	9
〈그림 1-2〉 연구추진체계	13
〈그림 2-1〉 기후변화 요인 분석	24
〈그림 2-2〉 해양수산분야 탄소중립 시나리오에 따른 2050년 목표배출량	35
〈그림 2-3〉 친환경에너지 보급사업 수행 절차	39
〈그림 3-1〉 세계 수산물 생산량 동향(2011~2020)	50
〈그림 3-2〉 생산어업별 세계 어류 수급 비중	50
〈그림 3-3〉 생산 방법별 세계 수산물 생산량 비중	51
〈그림 3-4〉 생산 방법별 주요 생산 국가(2020년 기준)	52
〈그림 3-5〉 세계 수산물 교역 동향(2021년 기준)	54
〈그림 3-6〉 미국 주요 수산물 수입 규모 변동	55
〈그림 3-7〉 중국 주요 수산물 수입 규모 변동	55
〈그림 3-8〉 2021년 어업별 총생산량	56
〈그림 3-9〉 2021년 품종별 해면 양식수산물 생산 비중 (1)	58
〈그림 3-10〉 2021년 품종별 해면 양식수산물 생산 비중 (2)	59
〈그림 3-11〉 2021년 어종별 양식방법별 생산 비중	59
〈그림 3-12〉 주요 수산 및 축산 생산 품종별 GHG 배출량 및 배출 강도	63
〈그림 3-13〉 양식생산 부류별 총 GHG 배출량 비교	64
〈그림 3-14〉 양식생산 단계 및 양식 방법별 총 GHG 배출량 비교	66
〈그림 3-15〉 주요 단백질 공급원별 GHG 배출량(2013년 기준)	67
〈그림 3-16〉 주요 농축수산물의 단백질 소비량당 토지 사용량 및 GHG 배출량	68
〈그림 3-17〉 단백질 g당 온실가스 배출량	69
〈그림 3-18〉 양식산업 동향 및 탄소 경쟁력 시사점	77
〈그림 4-1〉 육상양식 탄소배출 및 정책효과 분석 추진 방법	80
〈그림 4-2〉 품종별 단위 생산당 탄소 배출량	85
〈그림 4-3〉 업스트림 단계(종자) 탄소 배출원 비중	89
〈그림 4-4〉 생산단계 탄소 배출원 비중	91
〈그림 4-5〉 생산 후 단계 탄소 배출원 비중	92
〈그림 4-6〉 2020년 대비 2021년 연간전력비 변화분 분포	98
〈그림 5-1〉 육상양식 탄소중립 추진전략	112

〈그림 5-2〉 탄소배출 통합관리를 위한 프레임워크 개요	116
〈그림 5-3〉 D.N.A 기반 탄소배출 통합관리를 위한 프레임워크 기능 구조도	117
〈그림 5-4〉 히트펌프 가변 제어 기술	118
〈그림 5-5〉 양식장 ESS 시스템 적용 사례	119
〈그림 5-6〉 육상 스마트양식장의 스마트화 요구 사항	121
〈그림 5-7〉 제주 스마트양식 클러스터 사업 대상지 조감도	123
〈그림 5-8〉 근육 내 총 아미노산 비율(흰색, 어류; 회색, 새우)	125
〈그림 5-9〉 탄소가스를 이용한 단세포 단백질 생산공정도	128
〈그림 5-10〉 국내 넙치 공급망 구조	130
〈그림 5-11〉 육상양식장 탄소중립 대응 지원체계	136
〈그림 5-12〉 육상양식장 탄소중립 대응 중장기 추진 로드맵	137
〈그림 5-13〉 양식어류 탄소중립 및 경쟁력 확보	139
〈그림 5-14〉 육상양식과 어선어업의 탄소배출 영향 비교	140
〈그림 5-15〉 탄소배출 외부효과를 고려한 최적 수산물 생산량 비교	142
〈그림 5-16〉 탄소배출 저감 기술개발에 따른 효과	143
〈그림 6-1〉 육상양식 탄소중립 추진전략과 정책제언 연계성	151
〈그림 6-2〉 상시 전원과 비상 발전기 구성(안)	155
〈그림 6-3〉 신재생에너지와 재사용 배터리 활용 ESS 구성(안)	156
〈그림 6-4〉 양식수산물 생산과정 개념도	161
〈그림 6-5〉 양식수산물 생산시스템 흐름도	161

약어 목록

- ASC(수산양식관리협의회) : Aquaculture Stewardship Council
- CBAM(탄소국경조정제도) : Carbon Border Adjustment Mechanism
- DR(수요반응자원) : Demand Response
- GHG(온실가스) : Greenhouse Gas
- IPCC(기후변화에 관한 정부 간 협의체) : International Panel on Climate Change
- LCA(전과정평가) : Life Cycle Assessment
- NDC(국가온실가스감축목표) : Nationally Determined Contribution
- UNCED(유엔환경개발회의) : United Nations Conference on Environment and Development
- UNFCCC(유엔기후변화협약) : United Nations Framework Convention on Climate Change

정책제안

■ 분석 내용 및 방법

1. 탄소중립 정책 동향 분석: 국제기구 발간 문헌, 주요 국가 정책 등 국내외 문헌과 전문가 자문을 통해 탄소중립 관련 정책을 국가와 산업 관점에서 분석함
2. 양식산업의 탄소배출 현황 및 탄소 경쟁력 분석: FAO와 국가통계포털의 통계 자료를 활용하여 양식산업의 탄소배출 현황을 파악하고, 해외 보고서 및 논문에서 발표한 동물성단백질 공급원별, 수산물 생산방식별, 공급망별 탄소 배출량을 비교하여 탄소 경쟁력을 분석함
3. 육상양식장 탄소 배출량 및 배출원 분석: 육상양식장의 사료, 전력, 유류 사용량 설문조사와 전문가 자문을 통해 가치사슬별 에너지 사용량을 추정하고, 각 항목에 해당하는 탄소배출 계수를 반영하여 주요 탄소 배출원과 탄소 배출량을 분석함
3. 친환경에너지 보급사업 효과 분석: 친환경에너지 보급사업 지원 어가 60개, 비지원 어가 120개를 대상으로 실태를 조사하여, 평균 탄소 배출량 변화를 비교하고 이중차분분석을 수행함. 분석 결과를 토대로 양식·종자 단계에서 탄소배출량이 높은 품종과 주요 탄소 배출원을 추정하여 정책 평가를 실시함

-
4. 양식산업 탄소 저감을 위한 신규 탄소 저감 이행계획 마련: 양식, 기술, 유통 등 분야별 전문가 자문을 통해 신규 탄소 저감 수단을 발굴하고, 정책협의체 의견을 반영하여 수단의 우선순위 및 시급성을 고려한 이행 계획을 수립함

■ 정책제안

1. 저탄소 수산물 인증제도 도입: 양식장 에너지 소비량 모니터링과 데이터 검증이 필요하며, 향후 가치사슬 전 과정의 탄소 저감을 달성하기 위한 LCA 기반의 공급망 데이터 검증과 원활한 수출입을 위해 국내외 표준 방법론 검토가 필요함
2. 배터리 기반 에너지 재사용 ESS 구축: 에너지 효율 및 비용적 측면을 고려하여, 양식장용 사용 후 에너지저장장치를 개발하는 것이 필요함. ESS는 양식장 전력의 보관 및 사용부터 상시 전원관리, 신재생에너지 장비 관리 등 양식장 에너지의 효율성을 높일 수 있음
3. 에너지 절감 사업 보조율 유지·지원 확대: 어업인의 양식산업 에너지 절감 사업 참여를 독려하고 탄소중립 수용성을 제고하기 위해 현행 보조율을 유지하고, 온실가스 감축 실적을 인센티브화한 지원 확대 정책을 마련함
4. 양식산업 탄소배출 인벤토리 구축: 양식산업 환경전과정평가(LCA)에 대비한 전 과정에 걸친 투입물과 배출물에 대한 정량적 데이터를 목록화한 LCI 데이터 구축이 필요하며, 주요 품종, 지역, 배출 요소를 고려하여 특성을 반영해야 함

요 약

탄소중립 시대 양식산업 대응전략 연구 - 육상 어류양식을 중심으로 -

마창모 · 최순 · 윤미경 · 김철현 · 이재령

1. 연구의 목적

- 세계적으로 탈탄소 경제로의 재편 시기가 빨라지면서 탄소 경쟁력이 국가 경쟁력 및 상품 경쟁력이 되는 시기로 접어들고 있음
- 양식산업의 경쟁력은 수온 등 기후조건에 의해 좌우되는 경향이 높음
 - 동남아시아의 온수성 어종, 북유럽의 냉수성 어종 등은 수온의 변화가 적어서 추가 에너지 투입을 줄일 수 있어 경쟁력이 높아짐
 - 우리나라는 사계절의 영향으로 수온이 일정하지 않아 대규모 양식에 한계가 있어 이를 극복하기 위해 육상양식이 확대되고 있음
 - 일정한 환경을 유지하기 위해 에너지를 많이 사용하는 육상양식장의 확대는 양식산업의 에너지 사용량을 증가시킴
 - 따라서 육상양식장을 중심으로 탄소 배출량과 배출원을 추정하고 이에 대한 효과적인 저감 방안을 마련할 필요가 있음
- 이에 본 연구의 목적은 에너지를 과다 사용하는 육상양식을 대상으로 현재 추진되고 있는 양식산업 탄소중립 대책의 실효성을 검증하고,

양식어류 생산과 유통과정에서 발생하는 탄소 배출량과 배출원을 추정하여 양식산업의 탄소중립 실현을 위한 방안 및 제도를 마련하는 것임

2. 연구의 방법 및 특징

1) 연구의 방법

- 국내외 문헌 및 통계 조사 분석, 전문가 자문을 통해 탄소중립 관련 논의 배경 및 세계 산업 동향을 파악하고, 국내 양식산업 동향을 분석하여 양식수산물의 탄소 경쟁력을 도출함
- IPCC, 세계기상기구, 유엔환경계획, EU, 미국 등의 탄소중립 대응 동향과 미국의 행정명령 제14008호, EU의 그린 딜 정책 등 양식산업 관련 탄소중립 정책 현황을 파악함
- 이를 이용하여 관련 부처의 탄소중립 계획을 수집하고, 전문가 세미나, 서면 자문 등을 통해 우리나라 탄소중립 동향과 NDC 계획 등 세부 추진 계획 및 동향을 파악함
- FAO 통계와 국내 양식 통계를 이용하여 양식산업 생산 및 교역 현황을 분석하고, 양식산업 전 과정의 탄소 배출분석 및 양식 방법별 탄소배출을 분석하여 양식산업 탄소배출 현황 및 탄소 경쟁력을 도출함
- 국내 양식산업 통계자료 및 양식어가 설문조사자료를 기반으로 탄소 배출량과 배출원 분석, 친환경에너지 보급사업의 효과를 분석하고 대응전략을 제시함
- 180개 어가를 대상으로 히트펌프 등 친환경에너지 보급사업을 지원받은 어가와 지원받지 않은 어가를 대상으로 이중차분분석을 통해 정책사업의 효과를 추정함

- 양식산업 탄소배출 현황 및 탄소 경쟁력 분석, 양식수산물 공급망 분석 등을 통해 육상양식장에 대한 선제 대응 필요성을 도출하였으며, 양식 단계별 신규 탄소 저감 수단을 도출함
- 이를 통해 탄소배출 통합 운영시스템 구축, D.N.A 기반 육상양식 활성화, 저탄소 양식장 운영, 탄소 저감 양어용 사료 개발, 양식어류 유통단계 탄소 저감, 신재생에너지 활용 등의 추진전략을 세움
- 구체화를 위해서 정책협의체를 활용하여 신규 탄소 저감 수단의 우선순위 및 이행계획을 마련함

2) 연구의 특징

- 현재 연구가 활발하지 않은 양식산업을 대상으로 탄소중립을 위한 양식산업 정책 방향 설정 관련 연구를 최초로 시도함
- 지금까지 수산분야에서 탄소배출과 관련된 연구는 주로 어선어업을 대상으로 이루어지고 있으며, 대부분 자연과학적 방법론으로 수행되고 있음
- 양식산업을 대상으로 진행된 연구가 일부 있으나, 실험 양식장을 대상으로 분석하여 그 결과를 품목 전체로 확대하기에는 한계가 있음
- 사료부터 양성, 생산 후 운송까지 전 과정에 걸친 탄소 배출원을 파악하고 배출량을 추정함
- 기존 국내 선행연구에서는 양식단계별 구분 없이, 양식장에서 배출하는 온실가스를 추정함
- 양식산업은 종자, 성어 양성, 유통 및 운송 등 여러 단계가 복합적으로 구성되어 있어 단계별 분석과 개선방안 도출이 필요함
- 친환경에너지 보급사업의 효과를 사회과학방법론으로 추정함
- 친환경에너지 보급사업을 지원받은 어가와 비지원 어가를 대상으로 친환경 에너지 보급사업의 효과를 이중차분분석으로 도출함

3. 연구 결과

1) 결과 요약

- 2021년 우리나라는 국제사회 환경변화를 고려하여 국가 온실가스 감축 목표(NDC)를 상향하는 안을 제출함. 2018년 수산·어촌분야 온실가스 배출량 304.5만 톤(CO₂eq)의 96%를 감축하여 2050년 배출량을 11.5만 톤(CO₂eq)으로 줄이는 목표를 설정함
- 수산물 양식산업에서 패류, 해조류보다 어류의 탄소 배출량이 많음. 어류양식은 가두리보다 육상양식이, 육상양식 중 순환여과식 양식 시스템의 탄소 배출량이 많음. 스마트양식으로 대표되는 육상 순환여과식 양식 시스템은 첨단화, 규모화 경향을 보이면서 가두리 양식보다 탄소 배출량이 많고, 해외 연구에 따르면 사육수 여과 과정에서 에너지 소비가 많아 트롤 어업의 탄소 배출량보다 많은 것으로 분석됨. 탄소 중립 이슈는 기존 재래식 양식보다 탄소배출이 많은 첨단양식 시스템으로의 전환에 부정적 영향을 미칠 수 있음
- 우리나라 양식산업의 성장성을 고려한 탄소중립 대응 전략 마련을 위해서는 종자, 사료 등 업스트림 단계, 양성단계, 수출입, 유통 등 다운스트림 단계 등에 대한 종합적인 고려를 통해 탄소중립 관점에서 양식산업의 성장전략 재조정이 필요함. 또한 NDC 목표 달성을 위해 양식산업 생산방법을 개선하고, 추가적인 감축 수단을 발굴하는 등 선제적 정책 대응이 필요함
- 품목별 탄소 배출량 추정에는 친환경에너지 보급사업 지원 효과 분석을 위해 180개 어가를 대상으로 한 설문조사 자료를 활용함. 설문 문항으로 2020년과 2021년 연간 전력비, 유류 사용량, 사료 투입량, 생산량 등을 조사하였으며, 이를 바탕으로 각 어가의 탄소 배출량을

추정함. 추정 결과, 어류 중 단위 생산당 탄소배출이 높은 육상양식 품종은 쏘가리로 1kg 생산 시 평균적으로 21.3kgCO₂/kg의 온실가스를 배출하는 것으로 분석되었으며, 다음으로 넙치 19.4kgCO₂/kg, 뱀장어 13.8kgCO₂/kg, 강도다리 10.3kgCO₂/kg 순으로 나타남

- 넙치의 경우, 2021년 기준 넙치 성어 탄소 배출량은 19.4kgCO₂/kg이었으나 넙치 종자의 단위 생산당 탄소 배출량은 32.9kgCO₂/kg로 넙치 양성 과정보다 더 많은 단위당 탄소를 배출하는 것으로 분석됨
- 육상양식에서 생산 전, 생산, 생산 후 단계별로 탄소배출원을 분석하였음. 설문조사를 통해 생산 전 단계 시설의 탄소 배출량을 분석한 결과, 해수를 끌어 올리는 양수 펌프의 전력 사용과 탄소배출이 전체의 50%로 비중이 가장 큼. 가온을 위한 히트펌프(지열)와 히트펌프(공조)의 전력 소비 비중도 28%와 19%에 달하여 두 번째로 큰 탄소 배출원으로 작용하는 것으로 분석되었으며, 다음으로 산소공급 blower, 저압 산소 용해기의 비중이 높았음
- 생산단계인 유수식 넙치 양식장에서 전기 사용 비중이 가장 큰 항목은 해수를 끌어들이는 양수 펌프로 전체 전기사용량의 약 70~78%를 차지하며, 다음으로 오존발생기와 산소공급 블로워(blower)의 전기 사용량이 많았음. 양식시설별 전력 사용량에 환경부의 국가 승인 탄소 배출 계수(0.4781kgCO₂/kwh)를 곱하여 최종 탄소 배출량을 추정함. 탄소배출은 전력 사용량에 비례하기 때문에 양수 펌프가 가장 큰 탄소 배출원으로 나타남. 다음으로 오존발생기, 산소공급 blower, 사료 보관용 냉동실, 사료 제조기 순서로 탄소를 많이 배출하는 것으로 분석됨
- 생산 후 단계에서는 중형화물차의 탄소배출을 기준으로 계산한 차량 운송 비중이 71.02%로 가장 높게 나타남. 다음으로 넙치 신선도를

유지하기 위한 냉동 장비 16.30%, 생사료 등의 신선도 유지를 위한 냉동 장비 10.87%, 포장 장비 1.81%로 나타남

- 육상양식의 탄소중립 정책효과 분석을 위해서 2020년 친환경에너지 보급사업을 지원받은 어가와 비지원 어가에 대해 설문조사를 실시함. 사용된 표본은 지원 어가 60개소, 비지원 어가 120개소로 총 180개 어가를 대상으로 함. 조사 항목으로 생산량, 사료량, 전력비, 유류비 등 자료를 수집하였으며, 그밖에 양식어종과 양식 방법(유수식, 순환 여과식, 지수식 등)을 조사하고 친환경 보급사업에 대한 지원 어가에 대해 실태를 조사함
- 표본통계분석 결과 2020년 지원 어가의 평균 탄소 배출량은 20.1kg CO₂/kg로 비지원 어가의 15.9kgCO₂/kg보다 높은 것으로 나타나 전력과 유류 등 에너지 소비가 많은 어가에서 주로 지원받았음을 알 수 있음. 지원 사업 이후 변화를 보면, 지원 어가의 평균 탄소배출은 18.8kgCO₂/kg로 6.1% 감소하였고, 비지원 어가는 15.9kgCO₂/kg에서 16.0kgCO₂/kg로 0.4% 증가함. 지원 사업에 참여한 어가가 탄소를 적게 사용하는 탄소 효율적 생산방식으로 전환된 것으로 나타남. 특히, 지원 어가의 생산량은 6.2% 증가하였지만, 비지원 어가는 1.4% 증가에 그친 것으로 분석됨
- 친환경에너지 보급사업 정책효과는 이중차분분석을 통해 추정하였으며, 그 결과 탄소배출 저감뿐만 아니라 생산성 향상이 동시에 발생한 것으로 나타남. 친환경에너지 보급사업으로 1kg 생산당 탄소배출이 평균 5.09kgCO₂eq 만큼 감소하였으며, 친환경에너지 보급사업 지원 어가에 대한 효과는 비지원 어가 대비 13% 추가 감소함. 사업이 탄소 효율적으로 생산방식의 변화에 따른 효과가 있었음

2) 정책 대안 제시 내용 및 정책화 활동

- 본 연구의 결과를 기반으로 육상양식장 탄소배출 통합관리, D.N.A 기반 육상양식장 탄소 저감, 탄소 저감 양어용 사료 개발, 양식어류 유통 비효율 개선, 재생에너지 공급 다양화 등 다섯 가지의 정책제언을 제시함
- 육상양식장 탄소배출 통합관리 부분은 육상양식장 탄소 배출량 데이터 수집, 양식장 탄소 배출량 측정 알고리즘, 시뮬레이션 및 검증, 양식장 탄소 배출량 관리 통합운영, 양식장 제어기술 적용 확대, 양식장 에너지 환원 기술 적용으로 구분하여 제안함
 - 육상양식장의 탄소 배출원에 대하여 탄소 배출량에 대한 정보를 직·간접적으로 수집하고, 분석을 위해 가공할 수 있는 기술이 필요함
 - 양식장의 탄소배출은 간접배출의 비중이 높으므로 먼저 탄소배출에 영향을 미치는 다양한 요소들을 문헌조사와 현장 방문을 통해 파악하고, 해당 배출원이 탄소배출에 미치는 다양한 요인들을 분석하여 적절한 지표를 도출함
 - 육상양식장에서 수집된 데이터와 배출량 측정에 대한 알고리즘을 체계적으로 연동, 운영하고 사용자에게 관련 서비스를 확장성 있게 제공하기 위해서는 이를 통합적으로 관리하고 운영할 수 있는 프레임워크가 필요함
 - 양식장의 특성을 고려한 히트펌프의 고효율화 및 제어 기술 등 적용을 확대해야 함
 - 양식장 건축 및 구조 설계는 특정 기준과 관리를 받지 않는데, 육상양식장의 경우 에너지 절감 및 효율적인 양성을 위해 에너지 환원 기술을 고려한 시설 설계 기준 마련이 필요함
- D.N.A 기반 육상양식장(치어, 성어) 탄소 저감 부분은 저탄소 양식 모델팜 구축, 저탄소 양식장 확산을 제시함

-
- 육상양식장 에너지 절감을 위해 운영 방법을 개선해야 하며 정밀한 투입 산출이 가능한 스마트양식으로의 전환이 필요함. 스마트양식은 데이터(Data), 네트워크(Network), 인공지능(AI) 기반의 디지털 양식체계를 구축하여 데이터 기반의 양식을 위한 모델팜을 우선 구축해야 함
 - 탄소 저감 양어용 사료 개발 부분은 주요 양식품종별 필수아미노산 요구량 규명, 사료 자원개발을 통한 온실가스 배출 저감을 제시함
 - 탄소중립에 대응하기 위한 양식산업 구조개선을 위해서는 사료 내 사용 비중이 가장 높은 어분에 대해 상대적으로 탄소 배출량이 적은 원료로 대체가 이루어져야 함. 이는 어종별로 사료 내 아미노산 적정 요구량에 대한 데이터를 구축할 경우, 적정 사료배합을 통해 경제적이고 친환경적인 사료 생산이 가능함
 - 곤충, 팽생이모자반 등 대량생산과 안정적 공급이 가능하거나 폐자원을 이용하여 배합사료를 생산할 수 있다면 친환경 사료 자원 확보가 가능함
 - 활어회 위주의 소비문화가 선어회 소비로 개선될 경우, 운송에 의한 탄소배출이 저감될 것이며, 태양광, 소수력, 수소전지 등 다양한 재생 에너지를 공급하여 에너지 공급구조를 개선해야 함

3) 정책적 기여 등 기대 효과

- 세계적으로 기후 온난화 위기 극복을 위한 요구가 강화되고, 국가별, 산업별로 구체적인 목표를 설정하고 이를 이행하기 위한 실천적 노력이 요구되고 있는 상황에서 미래 국가와 산업의 경쟁력은 탄소중립 달성 여부가 될 가능성이 큼. 수산업 부문도 탄소중립 방향을 재설정하고, 신규 감축 수단을 찾는 노력이 필요한 시점임
- 직접 배출량이 많은 어선어업은 우선적인 탄소배출 저감을 위한 대상이지만, 간접 배출이 많은 육상 양식산업은 재생에너지원 활용 여부에

따라 신속한 탄소중립이 가능한 산업임. 기존 성장 속도를 유지하면서 생산량을 확대하여 어선어업 생산량을 대체하면, 수산물 1kg당 탄소 경쟁력은 향상되고, 이는 축산물 대비 경쟁력 향상으로 양식산업의 지속가능 성장을 유지하고, 소비자의 선택을 받을 수 있음

- 탄소중립 실천 요구가 더욱 강화되는 상황에서 생산 현장부터 수산물의 탄소배출 저감을 위한 자율적 노력을 지원하여, 생산자들을 저탄소 노력에 동참하게 하기 위한 대책으로 저탄소 인증제 등을 도입할 필요가 있음
- 에너지 저장 장치를 도입할 경우, 전력을 단순히 보관하고 사용하는 것에만 국한하지 않고, 비상 발전 대체, 신재생에너지 장비의 관리 및 발전량 관리, 양식장 내 에너지 보급 및 관리 측면에서 에너지 효율을 높일 수 있고 신재생에너지로의 전환에 도움이 됨
- 양식산업 탄소배출 인벤토리를 구축한다면 양식산업의 전후방에서 탄소 배출량을 분석할 수 있는 환경 전과정평가 분석 실시로 생산과정별 탄소배출 저감 전략을 마련할 수 있음

EXECUTIVE SUMMARY

A Study on Strategies for Achieving Carbon Neutrality in the Aquaculture Industry

– Focusing on Land-based Fish Aquaculture –

Chang-Mo Ma · Soon Choi · Mi-Kyeong Yoon · Cheol-Hyun Kim ·
Chae-Ryeong Lee

1. Purpose

- As the transition into the zero-carbon economy has become increasingly fast across the world, we are now entering an era where low carbon competitiveness becomes the competitiveness of a nation as well as a product.
- The aquaculture industry is highly dependent on weather conditions such as water temperature etc.
 - Warm water fish species in Southeast Asia and cold water species in northern Europe have a higher competitiveness in terms of energy consumption because fish farmers don't have to spend additional energy keeping water temperature constant.
 - In contrast, the seawater temperature of South Korea is not

constant as the country has four seasons, posing limitations in large-scale aquaculture. Therefore, land-based aquaculture has been expanded to address this.

- The expansion of land-based aquaculture grounds that consume a lot of energy to maintain a stable environment increases the energy consumption of the aquaculture industry.
- Therefore, it is necessary to estimate carbon emissions and sources of emissions mainly in land-based aquaculture grounds and devise effective measures for reduction.
- Under these circumstances, this study aims to present strategies and institutional measures to realize carbon neutrality in the aquaculture industry. To achieve this goal, this study verified the effectiveness of carbon-neutral strategies currently implemented in the aquaculture industry targeting a high energy-consuming land-based aquaculture while estimating the amount of carbon emissions as well as the sources of emissions in the production and distribution process of farmed fish.

2. Methodology and features

1) Methodology

- Based on the review of domestic and foreign literature, the analysis of statistical surveys and consultations with experts, this study examined the background of carbon neutrality

discussions and global industrial trends. With these analyses, the carbon competitiveness of farmed seafood was analyzed.

- More specifically, the present status of carbon neutrality policies related to the aquaculture industry was investigated including the response trends of the IPCC, the World Meteorological Organization, the United Nations Environment Program, together with the US's Executive Order 14008 and the EU's Green Deal.
- With this information, this study identified the trend of Korea's carbon neutrality and specific implementation plans such as the NDC plan by collecting carbon neutrality plans of relevant departments and utilizing expert seminars and consultations in writing.
- Moreover, FAO statistics and domestic aquaculture related statistics were utilized to analyze the production and trade status of the aquaculture industry. The present status of carbon emissions and carbon competitiveness in the aquaculture industry was examined by analyzing carbon emissions and the emissions by farming method taking into account the whole process of the aquaculture industry.
- Based on the statistical data of Korea's aquaculture industry and survey data, this study analyzed the amount of carbon emissions and sources of emissions as well as the effect of the Eco-friendly Energy Distribution program while suggesting countermeasures.
- The effect of the program was estimated with a Difference in Difference (DID) analysis by classifying the 180 land-based

aquaculture households into the households that were subsidized for the Eco-friendly Energy Distribution program and those without the subsidy.

- This study Concluded that we need to plan ahead to reduce carbon emissions in the field of land-based aquaculture through the analysis of the present status of carbon emissions and carbon competitiveness of the aquaculture industry as well as the analysis of the supply chain of farmed seafood.
- Through these efforts, implementation strategies were established including the construction of an integrated operational system of carbon emissions, the invigoration of DNA-based land aquaculture, the operation of low-carbon aquaculture farms, the development of aquaculture feeds that reduce carbon emissions, the reduction of carbon emissions in the distribution process of farmed fish and the utilization of renewable energy.
- In order to specify these strategies, a policy consultative body was utilized to prioritize new carbon reduction measures along with implementation plans.

2) Features

- Targeting the aquaculture industry in which active research has not been conducted, this study was the first attempt to establish the policy direction for achieving carbon neutrality in aquaculture.
- Until now, studies relevant to carbon neutrality in the fisheries sector have been targeting capture fishery with most of them being carried out by natural science-based methodologies.

- While a few studies were conducted on the aquaculture industry, the analysis of these studies targeted lab-scale fish farms, which made the result difficult to be applied to different species.
- This study identified the sources of carbon emissions through the whole process from feeding, cultivation, production and transportation and then estimated the amount of emissions.
- Preceding studies have estimated the GHG emissions from aquaculture grounds regardless of the stage of aquaculture.
- The aquaculture industry consists of a number of different stages such as being breeds, cultivation of adult fishes, distribution and transportation, which requires a phased analysis and improvement measures.
- A social science methodology was utilized to estimate the impact of the Eco-friendly Energy Distribution program.
- This study conducted a Difference in Difference (DID) analysis to estimate the impact of the Eco-friendly Energy Distribution program targeting subsidized and non-subsidized households.

3. Result

1) Summary

- Considering environmental changes in the international community, Korea proposed a plan to revise upward the Nationally Determined Contributions (NDC) in 2021. The target was set to reduce 96% of 3.045 million tons (CO₂eq) of GHGs by the fisheries sector and fishing villages in 2018 to achieve the emission target of 115,000 tons (CO₂eq) by 2050.
- In the aquaculture industry, fish farming generates more carbon emissions than shellfish and seaweed farming. As for fish farming, cage aquaculture contributed to carbon emissions less than land-based aquaculture, of which recirculating aquaculture generates more carbon emission than others. The land-based recirculating aquaculture system, represented by smart aquaculture, tends to be advanced and scaled up, generating more carbon emissions than cage aquaculture, and consumes a lot of energy in the process of filtering breeding water, generating more carbon emissions than trawl fisheries, according to overseas research. The carbon neutrality issue could have a negative impact on shifts toward an advanced system with more carbon emissions than the conventional aquaculture.
- In order to prepare a strategy to deal with carbon neutrality

considering the growth potential of Korea's aquaculture industry, readjustment of the growth strategy of the aquaculture industry is required from the perspective of carbon neutrality in comprehensive consideration of the upstream stages such as breeds and feeds and the downstream stages such as the cultivation stage, import and export as well as distribution. In addition, in order to achieve the NDC target, proactive policy measures are required, including improving the production method of the aquaculture industry and developing additional emission reduction tools.

- The data from the survey for 180 fishery households were used for the estimation of carbon emissions by species, in order to analyze the effect of support by the Eco-friendly Energy Distribution project. As for questionnaire items, annual electricity costs, oil consumptions, feed inputs and outputs, etc. in 2020 and 2021 were surveyed, based on which carbon emissions were estimated for each fishery household. As a result of the estimation, mandarin fish was the land-based aquaculture breed with the highest carbon emission per unit production among fishes, generating 21.3kgCO₂/kg of GHGs on average when producing 1 kg, followed by halibut with 19.4 kgCO₂/kg, eel with 13.8 kgCO₂/kg and starry flounder with 10.3 kgCO₂/kg.
- In case of halibut, it was analyzed that the production of

adult fishes generated 19.4 kgCO₂/kg of carbon emissions as of 2021. However, carbon emissions per the unit production of the halibut breed amounted to 32.9 kgCO₂/kg, indicating more carbon emissions per unit than the halibut cultivation stage.

- As for the land-based aquaculture, the sources of carbon emissions were analyzed for each stage of pre-production, production and post-production. As a result of the analysis on carbon emissions from the pre-production facilities through the survey, the electricity consumption and carbon emission from lift pumps used to pump up seawater accounted for 50% of the total, which was the highest share. It was analyzed that the electricity consumption by the two types of heat pumps to raise the temperature (one for geothermal heat and another for air conditioning) also accounted for 28% and 19%, respectively, which served as the second largest sources of carbon emissions, while the air-supply blower and low-pressure oxygen dissolution device followed their lead.
- In the flow-through aquaculture farm of the production stage, lift pumps that draw in seawater, were accounted for about 70~78% of the total electricity consumption, the largest share of the electricity consumption, followed by ozone generators and oxygen blowers. The final carbon emission was estimated by multiplying the electricity

consumptions of each aquaculture facility by the nationally approved carbon emission factor ($0.4781\text{kgCO}_2/\text{kwh}$) of the Ministry of Environment. As carbon emissions were proportional to electricity consumptions, the lift pumps were found to be the largest source of carbon emissions, followed by ozone generators, air-supply blowers, freezers for feed storage and feed makers.

- In the post-production stage, the share of emissions from transportation calculated based on the carbon emissions of medium-sized trucks were the highest at 71.02%, followed by freezers for maintaining the freshness of halibut (16.30%), freezers for maintaining the freshness of raw feeds (10.87%) and packaging equipment (1.81%).
- In order to analyze the effect of the carbon neutrality policy in land-based aquaculture, a survey was carried out on fishery households supported by the 2020 Eco-friendly Energy Distribution program and those without such support. Samples used were a total of 180 households engaging in land-based aquaculture, consisting of 60 with subsidy from the program and 120 without the support. As for questionnaire items, data were collected, including production, the amount of feed, electricity costs, and oil costs, and cultured fish species and farming methods (flow-through, recirculating, static, etc.) were surveyed. In addition, a factual survey was carried out on fishery

households who received the support of the Eco-friendly Energy Distribution program.

- According to the result of the sample statistics analysis, it was found that the average carbon emission of the fishery households with the support in 2020 were 20.1 kgCO₂/kg, higher than that of the fishery households with no support (15.9 kgCO₂/kg). This result indicates that the fishery households consuming more energy such as electricity and oil received the support. Looking into changes after the support project, the average carbon emission of the supported fishery households was reduced by 6.1% to 18.8 kgCO₂/kg, while that of the fishery households without support increased by 0.4% from 15.9 to 16.0 kgCO₂/kg. It was shown that the fishery households participating in the support project were shifted toward carbon-efficient production methods through which less carbon was consumed. Specifically, it was analyzed that the production of the supported fishery households increased by 6.2%, whereas those with no support registered the production increase of a mere 1.4%.
- The policy effect of the Eco-friendly Energy Distribution project was estimated through the Difference-in-Difference, showing that the effect of carbon emission reduction and the productivity improvement took place at the same time. The Eco-friendly Energy Distribution project helped reduce carbon emissions per 1kg of production by an average of

5.09kgCO₂eq, and the effect on the fishery households with the support from the project led to an additional 13% emission reduction compared to those without support. That is, the project is effective as the production method was changed into a more carbon-efficient one.

2) Policy suggestions and policy-making activities

- Based on the result of this study, five policy suggestions were presented as follows: the integrated management of carbon emissions from land-based aquaculture farms; carbon reduction in DNA-based land-based aquaculture farms; the development of low-carbon feed for cultured fishes; the improvement of inefficiency in the distribution of farmed fish; and the diversification of renewable energy sources.
- For the integrated management of carbon emissions from land-based aquaculture farms, suggestions include carbon emission data collection from land-based aquaculture farms, the development of an algorithm for measuring carbon emissions from aquaculture farms, simulation and validation, the integrated operation of carbon emission management in aquaculture farms, the expansion of farm control technology application, and the application of the energy reduction technology in aquaculture farms.
- In regard to the sources of carbon emissions in land-based aquaculture farms, it is necessary to develop technology to

directly and indirectly collect and process the data of carbon emissions for analysis.

- As indirect emissions accounted for the higher share of carbon emissions from aquaculture farms, it is required to identify a variety of elements influencing carbon emissions through literature survey and field research first, and then analyze a variety of impact that the relevant emission sources have on carbon emissions to derive appropriate indicators.
- In order to systematically link and operate the data collected from land-based aquaculture farms and the algorithm for emission measuring and provide the related services for users with expandability, a framework should be in place that can manage and operate it in an integrated way.
- It is necessary to expand the application of highly-efficient heat pumps and control technologies that take the characteristics of aquaculture farms into consideration.
- Although the architecture and structural design of aquaculture farms are not subject to specific criteria and management, the design criteria for facilities considering the energy reduction technology should be established in order to save energy and carry out efficient cultivation in land-based aquaculture farms.
- In terms of carbon reduction in D.N.A-based land-based aquaculture farms (juvenile and adult fish), the establishment of a low-carbon aquaculture model farm and the spread of low-carbon aquaculture farms were suggested.
- It is required to improve the operation method for energy

reduction in land-based aquaculture farms, and a shift toward smart aquaculture is needed so that precise inputs and outputs would be allowed. For smart aquaculture, a model farm for data-based aquaculture should be constructed first, by establishing the D.N.A(data, network, and AI)-based digital aquaculture system.

- As for the development of low-carbon feed for cultured fishes, suggestions include identifying the requirement of essential amino acids by cultured fish species and reducing greenhouse gas emissions through the development of feed resources.
- In order to improve the structure of the aquaculture industry to deal with carbon neutrality, fish meal, which accounts for the highest share of feed, should be replaced with ingredients with relatively low carbon emissions. If data on the appropriate amount of amino acid within feed by fish species are established, it would be possible to produce economical and eco-friendly feed through an appropriate feed mix.
- It would be possible to secure eco-friendly feed resources, if the mass production and stable supply of insects and sargassum horneri are made possible and a mixed feed can be produced by using wasted resources.
- If the consumption pattern centering on raw fishes is improved to the consumption of fresh fishes, carbon emissions from transportation would be reduced. In addition, the structure of energy supply should be improved

by providing a variety of renewable energy sources such as solar photovoltaic power, small hydro power, and hydrogen cells.

3) Expected benefits including policy contributions

- As nations are under increasing pressure to address global warming, practical efforts are required to implement specific targets established by nations and industries. Against this backdrop, the competitiveness of a nation as well as an industry is likely to depend on whether to achieve carbon neutrality. Therefore, it is time for the fisheries industry to reestablish the direction of carbon neutrality while striving to find new methods for carbon reduction.
- Directly emitting a large amount of emissions, capture fishery is a easy target for reducing carbon emissions. However, the land-based aquaculture industry, which emits a large amount of indirect emissions, is rather swiftly able to become carbon neutral depending on the utilization of renewable energy sources. If the land-based aquaculture industry is able to expand its production, and replace the production of capture fishery, while maintaining its growth rate, the carbon competitiveness per 1kg of seafood would increase. It would lead to a higher competitiveness of farmed seafood compared to livestock products, able to maintain the

sustainable growth of the aquaculture industry and be chosen by consumers.

- Under the increasing pressure to practice carbon neutrality, it is necessary to introduce a low carbon certification system. The certification system intends to support voluntary efforts to reduce carbon emissions of seafood from production fields and encourage producers to participate in the efforts to go low-carbon.
- If energy storage facilities are introduced, the impact would not be limited to the storage and use of electricity. It would improve energy efficiency in terms of replacing emergency power generation, managing renewable energy equipment as well as maintaining generation quantity and energy distribution and management within aquaculture grounds. Furthermore, it will contribute to the transition to renewable energy.
- If a carbon emission inventory is established in the aquaculture industry, it will allow us to formulate carbon emission reduction strategies in each production stage by conducting lifecycle-based environmental assessment capable of analyzing the carbon emissions in the upstream and downstream of the aquaculture industry.

01

서론

제1절 연구 필요성 및 목적

1. 연구 필요성

세계적으로 탈탄소 경제로의 재편 시기가 빨라질 전망이다. 지구 평균온도 상승 속도가 예상보다 빠르게 진행¹⁾되면서 탄소배출 저감을 위한 국제 사회 협력이 강화되고 있다. 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC)를 상향한 국가는 미국, 독일, 영국, 일본 등 22개 국가(21개국 + EU(27개국))에 달한다.²⁾ 2020년 12월 우리나라도 2050 탄소중립을 선언했고, 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」을 시행하면서 전 세계 14번째로 탄소중립 비전을 법제화한 나라가 되었다.³⁾

EU는 2021년 탄소국경조정제도(CBAM) 입법안 공개 후, 단계적인 추진 계획을 제시하였으며, 집행위는 “제품 생산단계 탄소배출에서 공급망 전체까지 확대할지, 직접배출뿐만 아니라 전기 사용으로 인한 간접배출까지 포함할지 결정할 예정”이다.⁴⁾

1) 2050 탄소중립녹색성장위원회(검색일: 2022.6.7.)

2) Climate Action Tracker(검색일: 2022.6.8.)

3) KDI 경제정보센터, 경제정책자료(검색일: 2022.6.7.)

4) 임소영·양주영(2021), p.10.

국가 차원의 탄소중립 대응 외에도 애플, 구글 등 대기업들은 RE100 선언에 동참⁵⁾하고 있으며, 기업 투자에 있어 비재무적 항목을 고려하는 ESG(환경, 사회, 지배구조) 투자가 확대되고 있다. 국가, 기업 구분 없이 온실가스 배출 감소를 위한 노력이 전방위적으로 확대되고 있다.

탄소 경쟁력이 국가 경쟁력이고, 상품 경쟁력이 되는 탄소중립 시대로 접어들고 있다. 탄소중립 달성은 몇몇 국가의 노력만으로 해결될 수 없고, 화석연료를 많이 사용하는 특정 산업의 온실가스 배출을 줄인다고 해결될 수 있는 사안도 아니다. 이는 탄소중립이 국경 없는 지구적 과제이고, 탄소배출량의 단순 저감이 아닌 모든 에너지원의 변경을 의미하기 때문이다.

탄소중립은 전 산업 분야에서 달성해야 할 중요한 과제이다. 우리나라도 농·축·수산 부문 온실가스 배출량 감축을 상향⁶⁾하였다. 세계적으로 온실가스 배출량 감축을 상향하면서 탄소중립 시기는 빨라질 전망이다. 탄소중립 시계가 빨라지면서, 이를 달성하기 위한 규제 및 유인제도, 탄소배출권 활성화 등이 예상된다. 이는 향후 수산업에도 영향을 미칠 수 있다.⁷⁾

세계적으로 양질의 단백질을 제공하는 식량 산업인 수산업의 유지, 존속을 위해서는 탄소중립 이슈에 적극적인 대응이 필요하다. 양식산업 탄소배출량은 수산물 판로확보 및 품질 경쟁력에도 영향을 미칠 것으로 예상된다. 기업의 ESG 경영, MZ세대의 가치소비 움직임에 맞물려, 대형 유통업체에서는 저탄소 제품으로 납품 대상을 제한하려는 움직임이 있다. 또한 최근 주요 선진국은 탄소국경세 도입을 검토하고 있다. 처음에는 철강 등 대표 탄소배출 산업에 집중되겠지만, 점차 탄소중립 이행 여부가 산업 전반에 영향을 미치고, 향후 수산물 생산과 수출에도 영향을 미칠 것으로 보인다.

5) The Science Times(2022.3.31.)(검색일 : 2022.10.7.)

6) 농림축산식품부 보도자료(2021.10.8.)(검색일: 2022.10.8.)

7) 정규희·윤찬식(2021), p.6.

그동안 국내 수산업 탄소중립 이슈는 화석연료 사용이 많은 어선어업에 집중되어 온실가스 직접배출을 줄이기 위한 정책과 연구가 중요하게 다뤄져 왔다. 세계적으로 수산업이 어선어업에서 양식산업으로 전환되면서 수산업에서 양식산업이 차지하는 비중이 절반에 달하게 되었다. 이런 환경변화에도 양식산업 탄소배출과 관련된 국내 연구는 김종현 외(2014), 양용수 외(2015) 등 일부 연구를 제외하고는 다뤄진 적이 거의 없다.

반면, 해외에서는 양식산업의 탄소중립 관련 연구가 활발하게 진행되고 있다. 양식산업의 온실가스 배출 추정과 저감(MacLeod et al. 2019), 온실가스 배출 LCA 분석을 활용한 양식산업 환경평가(Biniam, Samuel-Fitwi, 2012), 글로벌 양식산업의 온실가스 배출 추정(Macleod et al. 2020), 온실가스 배출 저감을 위한 양어용 사료 전환율 개선(Hasan et al. 2017), 양식산업의 온실가스 배출량 저감을 위한 방법 등 관련 연구가 다수 진행되었고, 현재에도 많은 연구가 진행 중이다.

세계적으로 양식산업은 직접적인 식량안보 기여와 경제성장 등 간접적 기여에 있어 중요한 산업으로 인정받고 있다. 따라서 주요 양식수산물 생산국들은 양식산업의 지속적 성장의 관점에서 탄소중립 정책을 수립하고 있다. 미국, EU 등은 탄소배출 저감 및 탄소중립 시대 양식산업 활용을 위한 정책을 마련하여 추진하고 있다.

미국은 육상양식과 대규모 상업적 어류양식 등에서 탄소배출 제로 채택을 권고⁸⁾하고 있으며, EU는 단백질 생산에 있어 축산업 대비 탄소 경쟁력을 갖춘 양식산업에 주목하고 성장을 위한 전략 지침⁹⁾을 마련한 바 있다. EU는 양식산업 성장전략 지침을 통해 패류, 해조류의 탄소흡수 및 격리 기능을 인지하고 장려하는 방향으로 정책 방향을 설정하였다.

8) Cucuzza, Sagar, & Griffis(2021), p.79.

9) European Union(검색일 : 2022.6.8.)

그러나 최근 발표된 우리 정부의 탄소중립 시대 양식산업 대책은 육상양식장 히트펌프, 인버터 등 일부 에너지 효율성을 위한 사업만 제시¹⁰⁾되어 있고, 그간 추진했던 히트펌프 보급사업 등 양식산업 관련 탄소중립 정책들에 대해서도 정책효과 점점 없이 추진되고 있다. 농업과 같은 저탄소 농축산물 인증제 등의 사업도 추진되지 않고 있다.¹¹⁾

정부가 발표한 일부 에너지 효율화 대책만으로 양식산업의 탄소중립 시대를 대비할 수 없다. 양식산업이 갖는 탄소 경쟁력을 충분히 활용하면서, 향후 양식산업 확대를 통해 발생할 수 있는 탄소 배출량 증가에 대응할 필요가 있다. 이를 위해서는 우리나라도 EU 등과 같이 양식산업의 탄소 경쟁력 등을 고려하여 탄소중립 시대 양식산업이 나아갈 방향성을 제시해야 할 시점이다. 특히, 자연 의존도가 높은 산업인 양식산업은 기후변화에 취약한 산업으로 기후변화를 억제하여 양식산업을 유지하고, 존속시키기 위한 국제사회의 노력에 적극적으로 동참할 필요가 있다.

2. 연구 목적

세계적으로 양식산업의 국가 경쟁력은 수온 등 기후조건에 의해 좌우되는 경향을 보여왔다. 동남아시아의 온수성 어종, 북유럽의 냉수성 어종 등은 수온 조건의 변화가 적어서 추가 에너지 투입을 줄여 대규모 양식이 가능했고, 가격 경쟁력을 높일 수 있었다. 반면, 사계절이 뚜렷하여 일정 수온이 일정 기간 유지되지 않는 환경을 갖는 우리나라와 같은 국가의 양식은 대규모 양식에 한계가 있다. 이러한 이유로 재해 및 수온 조건 등 기후환경을 극복하기 위해 육상양식이 확대되는 추세이다.

10) 해양수산부(2021b), p.11.

11) 농업에서는 약 60여 종에 대해 저탄소 농산물 인증을 하고 있다.(농림축산식품부 보도자료(2022.3.8.) (검색일: 2022.12.21.))

그 결과, 육상양식장 전기 사용이 증가하여 온실가스 간접배출량은 1990년 4.3만 톤에서 2018년 50.4만 톤으로 증가했다.¹²⁾ 그리고 최근 5년 동안 전력을 주동력으로 사용하는 육상양식 경영체 비중 증가 및 경영체 당 생산량과 양식 수면적이 증가하는 등 양식장 전력 사용이 증가하고 있다.¹³⁾ 농사용(을) 전력 소비 실태에 따르면, 양식 및 서비스업은 고객 수 비중이 1%지만, 판매량과 판매금액은 각각 20.5%, 18.7%를 차지¹⁴⁾하고 있어 육상양식에서 전기사용량이 많은 것을 확인할 수 있다.

특히, 일정한 수온 유지를 위해 에너지를 사용하는 육상양식장(넙치, 뱀장어 등)과 수조 내 수질 안정화를 위해 해수를 회전시키는 육상양식장(넙치 등)은 타 품종의 양식 방법에 비해 에너지 사용이 많아 우선적인 탄소저감 노력이 필요한 상황이다. 따라서 현재 추진되고 있는 양식산업 탄소중립 대책(히트펌프 지원 사업 등)의 실효성을 검증하고, 국내 양식수산물 중 탄소배출이 상대적으로 많은 품종(넙치 등)의 양식 방법(육상양식)을 개선하기 위한 대안이 필요하다.

양식수산물 생산을 위해 배출되는 온실가스는 많은 경로를 통해 발생한다. 양식산업에 있어 온실가스 배출은 양식생산을 위한 사료 생산 등 업스트림 과정과 공급망의 운반과정 등 다운스트림 과정에서도 많이 발생하고 있다.¹⁵⁾ 항공기 운송은 육로 운송 대비 3~5배, 해상 운송 대비 31배 더 많은 온실가스를 배출한다.¹⁶⁾ 특히, 양식산업 다운스트림 과정의 온실가스 배출은 어디에서 어떤 운송 수단으로 시장에 도달하는지에 따라 크게 달라지기 때문에 온실가스 배출량 추정치는 상황별로 매우 다른 값이 도출된다.¹⁷⁾ 따라서 양식산업의 새로운 탄소배출 저감 수단을 마련하기 위해서는 생산단계뿐만 아니라 전방, 후방산업까지 고려한 분석이 필요하다.

12) 해양수산부(2021b), p.6

13) 국가통계포털 「어류양식동향조사」 5개년(2017~2021년) 자료를 바탕으로 작성(검색일: 2022.5.7.)

14) 정연제 외(2017) p.22.

15) Pelletier & Tyedmers(2007), pp.339~416.

16) Jones et al.(2022), p.126

17) 위의 책, p.126.

올해 2022년은 국가적으로 국가 온실가스 감축목표(NDC)를 변경하는 시점이다. 이미 발굴된 수산업 탄소배출 저감 수단들이 기술개발 지체, 업계 수용성이 저하되는 등의 저항에 직면한다면, 해양수산업 탄소중립 목표 달성에 실패할 가능성이 크다. 따라서 수산업 탄소 감축에 있어 대안적 수단이 필요한 상황이다. 이미 화석연료 사용이 많아 감축 논의의 핵심인 어선어업의 탄소 감축 수단 외에도 수산물 생산을 절반 이상 담당하는 양식 분야에서도 새로운 탄소배출 감축 수단을 발굴하여 사전적인 탄소중립 대응이 필요하다.

국제사회의 합의 및 기술개발이 필요해서 시간이 오래 걸리는 패류, 해조류의 탄소흡수 및 격리 기능에 대한 부분은 장기적 추진과제로 하더라도, 탄소 배출량이 많은 육상양식을 대상으로 탄소 저감이 가능한 새로운 정책 수단을 발굴하여 추진해 나갈 필요가 있다. 향후 NDC 변경은 전체 산업의 구조와 생산방식의 변화를 가져올 정도로 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 특히 관련 업계의 수용성, 기술개발 성숙도 등에 따라 이행경로의 변화도 예상된다. 이 과정에서 기존 탄소배출 감축 수단 외 신규 감축 수단에 대한 요구가 높아질 것이다. 수산업의 탄소중립 목표 달성과 양식산업의 지속적 성장을 위해서는 양식산업의 탄소 감축 수단의 다양화가 필요한 시점이다.

본 연구는 세계 양식산업 동향과 양식산업 탄소배출 실태를 살펴보고, 탄소 배출량이 상대적으로 많은 어류를 생산하는 육상양식장의 탄소 배출량과 배출원을 추정하여 육상양식업에 있어 탄소배출 감축 수단과 관련 정책 도출을 목적으로 한다. 또한 현재 추진하고 있는 양식산업 탄소중립 대책의 실효성 검증을 통해 사업의 지속성 여부를 결정하는 데 필요한 분석 결과를 제시하는 것도 이번 연구의 중요한 목적 중 하나이다.

현재 양식산업의 온실가스 배출량 추정을 위한 관련 라이브러리가 구축되어 있지 않고, 가용할 공식 데이터가 없어 업스트림 부문, 양식장 운영

부문(양성), 다운스트림 부문 등 세 가지 부문을 모두 고려한 온실가스 배출량 분석은 한계가 있다. 공식 데이터를 활용하지 않은 감축 수단은 자료의 신뢰성을 확보하기 어려워 추가적인 탄소 감축 수단으로 국제사회에 인정받기 어렵다는 한계도 존재한다. 양식산업 탄소배출 관련 분석의 어려움과 한계에도 불구하고 본 연구의 결과는 국제사회에서 인정받을 수 있는 새로운 감축 수단을 마련하고, 이를 검증할 수 있는 데이터의 공식화 및 라이브러리 구축의 계기가 될 수 있을 것이다.

제2절 연구 내용 및 방법

1. 연구 범위

수산업은 어선어업, 양식업, 가공업, 유통업 등으로 구분할 수 있다. 탄소 중립 이행 과정에서 가장 우선되는 탄소중립 정책은 직접배출이 많은 어선어업 부분이다. NDC 이행 과정에 어선어업의 탄소배출 저감을 위해 포함된 사업은 감척, 기관교체, 전기 어선 또는 하이브리드 어선 기술개발 등으로, 어가 수용성과 기술개발 성숙도 등을 고려하면 이행경로의 달성이 순탄한 것만은 아니다. 간접배출이 많은 양식산업 탄소중립 사업은 히트펌프, 인버터 지원 등 양식장 친환경에너지 보급사업에 머물러 있다.¹⁸⁾

수산물 생산방식은 어선어업과 양식산업이 다르지만, 탄소중립 시대에서는 생산된 수산물 자체의 단위당 탄소 저감이 중요하다. 이를 위해서는 생산방식의 차이와는 별개로 전체 국내 수산물 kg당 탄소 배출량을 줄일 필요가 있다. 더 크게는 인류의 식량문제에서 중요한 단백질 공급원인 농·축·수산물 중 수산물의 탄소 경쟁력 향상이 상대적으로 중요하다. 이는 수산업의 지속 가능한 성장에 있어 더 중요해질 전망이다. 그러나 어선어업은 과다하게 화석연료를 사용하고, 기술 성숙을 통한 에너지원을 대체하는 일은 단기간에 이행되기 어려울 것으로 전망된다. 따라서 전체 수산물의 생산단계에서 어선어업만큼 양식산업에서의 탄소중립 노력이 필요한 상황이다.

세계적으로 수산물 생산방식이 어선어업에서 양식산업으로 대체되고 있다. 수산물의 탄소 경쟁력은 양식산업을 통해 달성될 가능성이 크다. 세계적으로 양질의 단백질을 확보하기 위해 양식산업의 성장은 필연적이어서, 그 결과 전체 양식산업의 탄소 배출량을 증가시킬 수밖에 없다.

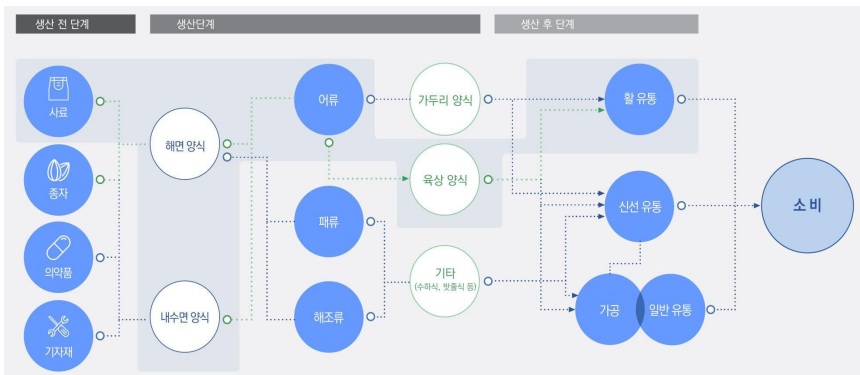
18) 해양수산부(2021b), p.11.

결국 어선어업 수산물을 양식으로 대체하면서 탄소를 저감하고, 양식산업 성장의 과정에서 단위당 탄소배출을 줄여가는 노력이 필요하다. 따라서 우선 해야 할 일은 기존 양식산업에서 가장 적은 비용으로 손쉽게 탄소배출을 줄이는 수단을 찾아내는 일이다.

이를 위해 본 연구에서는 양식수산물의 탄소 저감에 목표를 두고, 양식 산업 중 탄소 배출량이 많은 육상양식을 대상으로 한다. 육상양식장에 대해서는 친환경에너지 보급사업을 통해 탄소중립 정책이 시행되고 있으며, 향후 확대될 예정이므로 관련 정책을 평가하여 탄소중립 기여를 위한 지원 방법을 개선하거나 신규로 탄소 저감을 위한 수단을 발굴할 필요가 있다.

따라서 본 연구의 범위는 육상양식장을 대상으로 하고, 육상양식 중 에너지 사용이 가장 많은 어류를 대상 품목으로 한다. 즉 육상양식장을 대상으로 하되, 양식산업 전후방산업에서 탄소배출이 많은 사료의 에너지 절감과 유통에 따른 과다한 에너지 사용을 고려하여 양식산업 유통과정 까지를 본 연구의 범위로 한다.

〈그림 1-1〉 연구 범위



자료: 저자 작성

2. 연구 내용

본 연구는 제1장 서론, 제2장 탄소중립 논의 및 정책 동향, 제3장 양식 산업 동향과 양식산업 탄소 경쟁력, 제4장 육상양식 탄소배출 분석과 정책 효과, 제5장 육상양식 탄소중립 추진전략과 정책과제, 제6장 결론 및 정책 제언 등 모두 6개의 장으로 구성되어 있다.

제1장은 본 연구의 필요성 및 목적, 연구 내용 및 방법, 선행연구 검토 및 본 연구의 차별성 등 연구 개요에 관한 것이다.

제2장에서는 탄소중립 논의 배경과 탄소중립 산업 동향 등 탄소중립 시대 환경변화를 살펴보고, 탄소중립 정책에 있어 정책 방향성을 참고할 수 있는 농수산부문 정책 동향을 검토하여 시사점을 도출하였다.

제3장에서는 국내외 양식산업 동향을 살펴보고, 국내외에서 연구된 자료를 활용하여 양식산업 탄소배출 현황과 양식산업의 탄소 경쟁력을 분석하였다. 이를 통해 양식수산물의 어선어업과 농축산물 대비 탄소 경쟁력 수준을 확인하였고, 그 시사점을 도출하였다.

제4장에서는 육상양식 탄소 배출원과 탄소 배출량을 추정하고, 양식업에 유일한 탄소중립 정책인 친환경에너지 보급사업의 효과를 분석하였다. 탄소 배출량 분석은 육상양식장을 대상으로 한 설문조사 결과를 활용하여 탄소 배출량을 추정하였다. 육상양식에 있어 생산 전 단계, 생산단계, 생산 후 단계 배출원 분석은 자료 확보의 한계로 육상양식의 대표 어종인 넙치를 중심으로 분석하였으며, 이를 통해 탄소 배출원을 줄일 필요가 있는 부분들을 파악하였다. 또한 친환경에너지 보급사업 지원 어가와 지원을 받지 못한 어가의 비교를 통해 정책효과를 분석하였다.

제5장에서는 육상양식 탄소중립 추진전략과 정책과제를 제시하였다. 탄소중립 시대를 대비하기 위한 추진전략으로 탄소배출 통합 운영시스템 구축,

D.N.A 기반 육상양식 활성화, 저탄소 양식장 운영 확대, 탄소 저감 양어용 사료 개발, 양식어류 유통단계 탄소 저감, 신재생에너지 활용 등을 제시하였으며, 추진전략에 맞춰 필요한 추진과제들을 제시하였다.

제6장 결론에서는 저탄소 인증 수산물 제도 도입 방향, 양식장용 사용 후 배터리 기반의 재사용 ESS 구축, 친환경에너지 절감 사업 현행 보조율 유지 및 지원 확대, 전 과정 인벤토리 구축 등 탄소중립 시대 준비를 위한 정책을 제안하였다.

3. 연구 방법

탄소중립 논의 배경과 탄소중립 산업 동향 파악을 위해 IPCC, 유엔환경 계획 등에서 발간하는 문헌을 조사하였고, EU, 미국 등의 농·축·수산 부문 탄소중립 대응 동향을 조사하였다. 양식산업 관련 탄소중립 정책 동향은 미국의 행정명령 제14008호, EU의 그린 딜 정책 등을 참고하였다. 이를 보완하여 관련 부처의 탄소중립 계획을 수집하고, 전문가 세미나, 서면 자문 등을 통해 우리나라 탄소중립 동향과 NDC 계획 등 세부 추진계획 및 동향을 파악하였다.

양식산업 탄소배출 현황과 양식산업의 탄소 경쟁력 분석을 위해 FAO 통계와 국내 양식 통계를 기준으로 양식산업 생산 및 교역 현황을 분석하였다. 양식산업 탄소배출 현황 및 탄소 경쟁력을 파악하기 위해 축산물과 양식수산물의 탄소 배출량을 비교하는 해외 보고서 및 논문을 분석하였다. 이외에도 치어 생산, 사료, 양식장 운영 등 양식산업 전 과정의 탄소 배출 분석 및 양식 방법별 탄소배출을 비교하는 다수의 연구를 참고하였다.

양식어류 전 과정의 공급망 파악을 위해 Henriksson et al.(2014)의 연구를 참고하여 해외 양식수산물 공급망을 파악하였으며, 국내 넙치의 경우

에는 국립수산물과학원(2021)의 주요 양식 품목의 가치사슬 연구를 참고하여 국내와 해외 양식수산물 공급망을 비교하였다.

육상양식 탄소 배출원 분석은 온실가스 배출량이 가장 많은 넙치 육상양식장을 대상으로 한 넙치 양식장 에너지 사용 설문조사 결과를 활용하여 추정하였다.

또한 정부의 탄소배출 저감을 위한 대표 사업인 친환경에너지 보급사업의 정책효과 분석을 위해 180개 어가를 대상으로 히트펌프 등 친환경에너지 보급사업 지원을 받은 어가와 지원받지 않은 어가를 대상으로 지원받기 전과 후 시기를 고려한 이중차분분석을 통해 그 효과를 분석하였다.

탄소중립 동향, 양식산업 탄소배출 현황 및 탄소 경쟁력 분석, 양식수산물 공급망 분석 등을 통해 육상양식장에 대한 선제 대응 필요성을 도출하였으며, 육상양식장 배출원 분석과 배출량 분석을 통해 탄소 저감을 위한 단계별 신규 탄소 저감 수단을 도출하였다.

이를 통해 도출된 추진전략인 탄소배출 통합 운영시스템 구축, D.N.A 기반 육상양식 활성화, 저탄소 양식장 운영 확대, 탄소 저감 양어용 사료 개발, 양식어류 유통단계 탄소 저감, 신재생에너지 활용 등 전략의 구체화를 위해 분야별 전문가를 대상으로 한 자문회의 및 서면 자문 방법을 활용하였다.

분야별 핵심 과제는 NDC 이행계획 수정안을 마련하는 환경부, 해양수산부 등의 TF 작업반과 공유하여 수용성, 기술성숙도, 제도적 기반 등을 고려하여 신규 탄소 저감 수단의 우선순위 및 시급성에 맞춰 이행계획을 마련하였다.

〈그림 1-2〉 연구추진체계



자료: 저자 작성

제3절 선행연구 검토 및 본 연구의 차별성

1. 선행연구 검토

1) 해외 연구

세계적으로 양식산업의 성장 속에 양식수산물 생산과정 전반의 환경 영향에 관심이 높아지고 있다. 양식산업의 지속 가능한 성장과 기후변화 대응을 위해 양식산업의 온실가스 배출량 추정을 위한 연구가 다수 진행되었다. 2004년 이후 LCA 분석이 다양한 산업과 양식산업 부문에 적용되면서 양식수산물 생산시스템의 온실가스 배출량 추정에 LCA 적용 사례가 늘고 있다. LCA 적용 시 다양한 국가의 품종별 양식 시스템과 방식이 상이하더라도 ISO 표준을 따르는 LCA 분석 방법을 사용하여 상호 비교가 가능하다는 장점이 있어서 널리 사용되고 있다.

Henriksson et al.(2012)은 양식생산시스템의 온실가스 배출량 분석과 관련된 논문 10여 편을 검토하여 서로 다른 양식생산시스템의 상호 비교가 가능한 LCA 적용 방법론을 제시하였다. 수산업, 양식업, 축산업, 종자 및 사료 생산, 가공, 소비, 폐기, 재활용 등 양식생산시스템 경계의 확대 필요성과 신뢰할 만한 데이터 확보 필요성을 제시하였다. Henriksson et al.(2014)의 연구에서는 설문조사 기반으로, 유럽으로 수출되는 개도국의 틸라피아, 메기, 민물새우를 양식하는 아시아 양식 시스템에 LCA를 적용하여 분석하였다.

Robb et al.(2017)은 방글라데시 나일 틸라피아, 인도 잉어, 베트남 메기 등 3개국의 주요 품종 1개에 대한 LCA 분석으로, 온실가스 배출량을 추정하고 상호 비교하였다. LCA 모델로는 ‘양식 LCA 모델 버전 1.1’이 사용되었으며, 사료의 구성 원료와 사료의 생산 및 운반, 양식장 운영, 토지이용 변화(Land-use change) 등 각각에 대한 온실가스 배출량을 추정하고 비교하였다.

MacLeod et al.(2020)은 세계 양식산업의 온실가스 배출량을 추정한 바 있다. 양식수산물 중 해조류를 제외한 전체 수산물 생산량 93% 정도를 차지하는 품종들을 대상으로 하였다. 온실가스 배출량 추정 결과, 세계 양식산업에서 배출되는 온실가스 배출량은 2017년 기준으로 0.49%¹⁹⁾ 수준이며, 양식산업 전체 온실가스 배출량은 축산업 중 양고기 생산에서 나오는 배출량과 비슷한 것으로 추정되었다.²⁰⁾

양식산업의 탄소중립 관련 연구가 다른 품종 중 상당수가 개도국에서 EU지역으로 수출되는 품목이 많은 것으로 조사되었다. 유럽 시장에서 윤리적 소비가 강조되면서 ‘지속가능한 윤리적 양식무역(SEAT, Sustainable Ethical Aquaculture Trade)’가 EU의 지원을 받으면서 관련 연구들이 다수 추진되었다. 터봇(Aubin et al. 2006), 육식성 어류(Aubin et al. 2009), 메콩강 메기(Bayart et al. 2010), 중국 수출용 새우(Cao et al 2011), 태국 새우(Mungkung, RT., 2005), 인도네시아 틸라피아(Pelletier & Tyedmers 2010) 등이 대표적이다.

선진국 내 무역이 주로 이뤄지는 무지개송어와 연어에 대한 LCA 연구도 다수 진행되었다. 대표적 연구로는 프랑스 무지개송어(Papatryphon et al. 2004), 연어(Ayer & Tyedmers 2009) 등을 LCA 분석 방법으로 연구하였다.

양식수산물 생산에 있어 사료는 온실가스 배출에 있어 중요하게 다뤄졌으며, 연어 사료 관련 연구(Papatryphon et al. 2004, Pelletier & Tyedmers, 2007), 사료 전환율 개선에 관한 연구(Hasan et al, 2017) 등이 추진된 바 있다. 양식산업에서 탄소 배출량이 많은 양어용 사료를 연구한 Hahan,

19) 세계 양식 수산물 생산량 중 분석 대상 수산물(전체의 93% 수준)의 온실가스 배출량은 263MtCo2e으로 전체 53.5GtCo2e(UNEP, 2017)의 0.49%임(MacLeod, M.J. et. al, 2020, pp. 1-8)

20) 토지이용 변화의 전환 관점에서 양고기 생산을 위한 온실가스 배출량이 축산업 중 가장 높게 나오는 자료도 있다.(WRI 홈페이지, 검색일 : 2022.8.11.)

et al.(2017)은 양식산업의 온실가스 발생량 저감을 위한 방안으로 사료 효율성 개선을 제안하였다. FAO는 양식업 탄소발자국 저감을 위해 사료 전환율(FCR) 저감 및 기술개발을 위한 전문가 세미나를 개최하여 양식산업의 온실가스 기여도 평가 및 측정 방법, 사료 전환율 저감을 위한 국제 공동 조치, 연어양식의 사료효율 개선 사례 확산 등에 대해 논의하였다.

세계적으로 양식산업 규모가 가장 큰 중국의 연구로는 Yuan et al. (2019)의 연구가 있으며, 중국에서 양식업 규모화에 따른 온실가스 배출 증가량 분석을 통해 메탄 배출량 증가를 규명하였다. 연구를 통해 산소를 공급하는 시설이 갖춰진 양식장에서의 온실가스 배출량 저감 사실에 착안하여 농지의 양식장 전환 시 폭기(aeration) 시설 필요성을 제시하였다.

육류를 양식 패류로 대체하는 경우, 온실가스 배출량을 줄일 수 있다는 Ray et al.(2019)의 연구에서는 굴 양식업의 온실가스 배출량을 추정하여 축산업과 비교 분석하였다. 굴 양식장에서 아산화질소, 이산화탄소가 소량 발생하고 메탄은 발생하지 않는다는 사실을 확인하였다. 굴 양식장 퇴적물에 의한 이산화탄소 발생은 양식장 운영 4~6년 사이 증가하였지만, 대조군과는 유의미한 차이는 없는 것으로 확인되었다. 육류 섭취량의 10%를 굴로 대체하는 경우, 온실가스 절감 효과는 자동차 1,080만 대를 줄이는 효과가 있다는 점을 제시하였다.

기후변화가 양식산업에 미치는 잠재적 영향을 분석한 Sahya Maulu et al.(2021)의 연구는 축산업을 대체하는 단백질 공급원으로서 양식산업의 중요성을 제기하였다. 양식산업은 온실가스를 배출하는 축산업을 대체하는 지속 가능한 단백질 공급원으로서 기후변화 대응책으로 양식산업 확대가 필요하다는 의견을 제시하였다. 기후변화로 인한 기온 상승, 해수면 상승, 질병 및 적조, 강수량 변화, 해수 염도 변화 등으로 인해 양식산업이 영향을 받을 것으로 예상되므로, 단기적으로 예측되는 변화에 대응하고, 장기적으로는 양식산업의 지속가능성을 위해 기후변화 완화를 위한 조치 필요성을 제시하였다.

2) 국내 연구

국내 최초의 수산업 부문 ISO 기반 LCA 평가는 어선어업을 대상으로 한 이지훈(2013)의 연구가 있다. 국내 양식산업 관련 연구로는 뱀장어 양식장에서 발생하는 온실가스 배출량을 추정한 김종현 외(2014)의 연구와 넙치 양식장의 온실가스 배출량을 추정한 양용수 외(2015)의 연구가 있다.

양용수 외(2015)는 넙치 양식장에서 발생하는 온실가스 배출량을 산정하였다. 넙치 1kg당 생산단계에서 발생하는 CO₂ 배출량 산정 결과, 남해안과 제주도에서 각각 36.83kg·CO₂/년, 24.33kg·CO₂/년으로 조사되었으며, 제주도는 수온 조건으로 인해 생산성이 좋아 탄소 배출량이 남해안보다 적은 것으로 나타났다. 양용수 외(2015) 연구에서는 사료, 전기, 유류, 고정자산, 어류 호흡 등으로 구분하여 CO₂ 배출량을 추정하였다. 연구 결과, 전력 사용에 의한 간접배출량이 가장 많았으며, 대규모 양식장(4,951~8,250 m²)의 경우 남해안과 제주도 양식장은 각각 1,048.8t·CO₂/년, 1,525.8t·CO₂/년에 달한다. 이는 수온 조건의 이점으로 생산성이 높아 제주도의 총 에너지 사용은 줄어들었지만, 폐사 등의 영향으로 수질을 맞추기 위해 회전수를 늘리면서 입수, 배수를 위한 펌프 사용 증가로 인한 전기 사용이 늘었기 때문으로 추정할 수 있다.²¹⁾

김종현 외(2014)는 뱀장어 양식장에서 발생하는 온실가스 배출량을 산정하였다. 뱀장어 1kg당 생산단계에서 발생하는 CO₂ 배출량 산정 결과, 18.03kg·CO₂/년으로 조사되었다. 뱀장어 양식장은 넙치 유수식 양식장과 달리 종자, 사료, 연료, 전기 등에서 생산되는 CO₂ 배출량이 지수식 대규모 양식장(8,000m²) 기준으로 각각 449.11, 1,048.8t·CO₂/년, 616.71, 1,048.8t·CO₂/년, 519.61, 1,048.8t·CO₂/년, 428.61, 1,048.8t·CO₂/년 등 총 2,057.6t·CO₂/년으로 순환여과식 양식장(1,000m²)과 유사한 결과가 도출되었다.²²⁾

21) 양용수 외(2015)

22) 김종현 외(2014)

대표적인 연구인 양용수 외(2015), 김종현 외(2014)의 연구에서는 지역별 수온 조건에 따라 넙치 생산 시 발생하는 탄소 배출량에 차이가 있었으며, 폐사가 많은 양식장에서 양식장 수질 유지를 위한 회전수 증가로 인해 양식장의 탄소 배출량이 많아진 것으로 조사되었다. 뱀장어의 경우에는 전기뿐만 아니라 가온을 위한 유류 사용, 투입물인 종자와 사료의 탄소 배출량도 유사한 수준으로 탄소배출이 많아 전반적인 가치사슬 관리가 필요한 것으로 나타났다.

이들 연구는 국내 양식장 온실가스 배출량 추정범위를 실험 양식장(생산)에 한정하고, 양식표준지침서의 데이터와 온실가스 산정표의 계수를 활용하여 탄소 배출량을 추정하였다. 국내 양식장 에너지 구조 분석은 기술 개발 및 효과 추정을 위해 실험시설에 한정하여 진행하였다는 한계가 있다.

양식산업의 온실가스 배출량을 추정한 연구 외에도 양식장 에너지 사용량을 추정한 연구는 이규태 외(2018), 최현석 외(2020) 등의 연구가 있다. 이규태 외(2018) 연구에서는 넙치 육상양식장의 양식장 운영 장비의 연간 전기사용량에서 펌프가 차지하는 비중이 69.9%~77.7%(약 300만 Kw/년)에 달하여 펌프에서의 에너지 절감이 필요한 것으로 나타났다. 또한 뱀장어 순환여과식 양식장에서 가온 전기사용량은 수 면적당 716.5Kw/m²에 달하고, 기타 전기사용량은 1678.8Kw/m²인 것으로 나타났다.

최현석 외(2020)는 수조식 양식장의 신재생에너지 대체를 위한 전력 사용 실태를 조사하였다. 전력 소비의 주요소는 수온 조절, 산소공급, 해수 공급을 위한 펌프 사용이며, 해수 공급을 위한 양수펌프 사용이 상당 비중 차지하는 것으로 조사되었다. 일 평균 전력 소비량은 4,185kWh이고 산소 펌프, 여과 작업장(배합기), 작업관리동의 1일 전력 소비량은 일 평균 4,185kWh 미만으로 일정한 패턴을 유지하는 것으로 조사되었다. 동 연구에서 지붕형 태양광 시스템을 이용한 신재생에너지 시스템을 설계하여 전력 사용량을 신재생에너지로 전환하는 것이 합리적이라는 안을 제시하였다.

〈표 1-1〉 선행연구 검토

구분	선행연구 검토		
	연구 목적	연구 방법	주요 연구 내용
1	• 과제명: Final LCA case study report • 연구자(연도): Henriksson P.J.G. et al.(2014) • 연구 목적: 양식생산시스템의 LCA 적용 방법론 도출	• LCA 적용 방법론을 통한 양식생산시스템 온실가스 배출량 분석	• 양식생산시스템의 경계 확대 필요성 • 신뢰할 만한 데이터 확보 필요성 제시
2	• 과제명: Greenhouse gas emissions from aquaculture • 연구자(연도): Robb, David H.F. et al.(2017), FAO • 연구 목적: 온실가스 배출구조 분석, 양식 시스템 개선, 비용 효율적인 방법을 모색하기 위함	• 현장조사, 설문조사 (양식장, 사료공장) • 시스템 범위에서 LCA 모델 구축 • 양식 가치사슬, 원료공급, 사료 생산 등 분석	• GHG 배출량이 사료 생산이 주요 원인 • 사료의 원료, 생산기술, 효율성(FCR)이 중요 • 생산의 단계별 개선방안 제시
3	• 과제명: Quantifying greenhouse gas emissions from global aquaculture • 연구자(연도): MacLeod, M. J. et al.(2020) • 연구 목적: 세계 양식업의 온실가스 배출량 정량화	• 문헌조사(데이터 활용) • FAO 생산 데이터를 이용하여, 주요 어종에 대해 대륙별로 배출량 계산 • 시스템 경계를 “cradle to farm-gate”로 하고, 온실가스 계산 범주 설정	• 2017년 어류와 패류 총 배출량 263 MtCO₂e (연간 배출량의 0.49% 차지) • 사료 유형 따라 배출량 상이, 사료가 전체 배출량에서 가장 높은 비율을 차지함
4	• 과제명: 뱀장어 양식장 온실가스 배출량 산정 • 연구자(연도) : 김종현 외 (2014), Fisheries technology • 연구 목적 : 유수식 육상양식장 온실가스 배출량 산정	• IPCC TIER 1	• 양식장 규모별 탄소 배출량 산정(4단계) • 종묘, 사료, 전기, 유류, 전기, 고정자산, 어류 호흡, 기타로 배출 요소 분류
5	• 과제명: 넙치 양식장 온실가스 배출량 산정 • 연구자(연도) : 양용수 외 (2015), Fisheries technology • 연구 목적: 유수식 육상양식장 온실가스 배출량 산정	• IPCC TIER 1	• 양식장 규모별 탄소 배출량 산정(4단계) • 사료, 전기, 유류, 고정자산, 어류 자체, 기타로 배출 요소 분류

자료: 저자 작성

2. 본 연구의 차별성

탄소배출 관련 연구는 수산업의 경우, 어선어업(이지훈, 2013 등)에 집중되어 있다. 양식산업 탄소배출 연구는 배출량 추정과 표준적인 배출량 추정 방법론(Henriksson et al. 2014, MacLeod et al. 2020), 타 산업 비교, 양식산업 생산방식 차이에 대한 비교연구(Robb et al. 2017)가 주를 이루고 있다.

대부분의 연구가 자연과학적 분석연구이고, 관련 정책연구는 우리나라 탄소중립 추진 방향(박영석 외, 2021), 수산업 전반의 기후변화 대응 및 탄소 저감을 위한 연구(김은주, 2019) 등이 있으나 본 연구와 같이 탄소중립을 위한 양식산업 정책 방향 설정을 위한 연구는 국내외 연구에서는 선행 연구가 없었던 것으로 확인되었다.

기존 국내 양식 탄소중립 관련 연구인 김종현 외(2014)와 양용수 외(2015)의 연구는 자연과학 분야의 육상양식 온실가스 배출량 추정 연구로 넙치, 뱀장어 등 육상양식장을 대상으로 탄소 배출량을 추정하였다는 점에서 공통점이 있다. 그러나 두 연구는 실험 양식장에 한정하여 추정한 결과이지만, 본 연구는 육상양식장 대상 설문조사와 현장 조사 결과를 토대로 탄소 배출량을 추정한 점에서 차이가 있다.

또한 국내 연구에서는 양식산업의 업스트림, 양식장 운영, 다운스트림 등에 대한 구분 없이 양식장 온실가스를 추정하였지만, 본 연구는 사료, 양식장 운영, 생산 후 운송 부분까지를 포함하여 탄소 배출원을 파악하고 배출량을 추정하였다.

그 외에도 양식산업 탄소 저감을 위한 친환경에너지 보급사업의 효과에 대한 분석을 위해 보급사업을 지원받은 어가와 비지원 어가로 구분하여 분석한 연구는 처음이다.

〈표 1-2〉 선행연구와 본 연구의 차별성

구분	선행연구	본 연구의 차별성(2022)
탄소배출 및 에너지 소모	• 전 과정 평가 방법을 통한 한국 대형선망의 온실가스 배출량 정량적 분석, 이지훈(2013) • 뱀장어 양식장에서 발생하는 온실가스 배출량 산정, 김종현 외(2014) • 넙치 양식장에서 발생하는 온실가스 배출량 산정, 양용수 외(2015) • 국내 양식장 온실가스 배출량 추정범위를 양식장(생산)에 한정하고, 양식표준 지침서(2006년, 2009년)의 데이터와 온실가스 산정표의 계수(2008년)를 활용하여 탄소 배출량을 추정함 • 넙치, 뱀장어 등 육상양식장을 대상으로 실험 양식장에 한정하여 탄소 배출량을 추정함	• 본 연구는 육상양식장 대상 설문조사와 현장 조사 결과를 토대로 탄소 배출량을 추정함 • 사료, 양식장 운영, 생산 후 운송 부분까지를 포함하여 탄소 배출원을 파악하고 배출량을 추정함 • 양식산업 탄소 저감을 위한 친환경에너지 보급사업의 효과에 대한 분석을 위해 보급사업을 지원받은 어가와 비지원 어가를 구분하여 분석한 연구임
탄소중립 정책연구	• 우리나라 탄소중립 추진 방향, 박영석 외(2021) • 수산업 전반의 기후변화 대응, 탄소 저감을 위한 연구, 김은주(2019) • 우리나라 탄소중립 추진 방향, 수산업 전반의 기후변화 대응 탄소 저감 연구로 우리나라 전체 또는 수산업 전체를 대상으로 한 탄소중립 연구를 수행함	• 탄소중립을 위한 양식산업 정책연구 방향 설정을 위한 연구는 본 연구가 유일하며, 국내외 연구에서는 선행연구가 없음

자료: 저자 작성

02

탄소중립 논의 및 정책 동향

제1절 논의 배경 및 산업 동향

1. 논의 배경

세계적으로 기상이변과 재난의 빈번한 발생, 해수면 상승 등 기후 위기 현실화로 위기감이 커지고 있다. IPCC에 따르면,²³⁾ 1950년부터 이상 고온, 폭염, 폭우, 열대성 저기압의 발생 빈도가 증가하였다. 산업화 이전 대비 육지의 극한 고온 현상의 발생 빈도는 50년 사이 4.8배나 증가하였고, 평균온도는 약 1.2℃ 증가하였다.²⁴⁾ 기후변화로 인해 남태평양 연안국은 해수면 상승이라는 직접적인 피해가 발생하고 있다.²⁵⁾ 최근 유럽, 미국, 호주 등 선진국에서도 기후변화로 인한 자연재해 피해가 늘어나고 있다.²⁶⁾ 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 등 온실가스는 지구온난화의 원인²⁷⁾이 되고 있으며,

23) IPCC(2021), pp. 8-9.

24) 위의 책, p. 4.

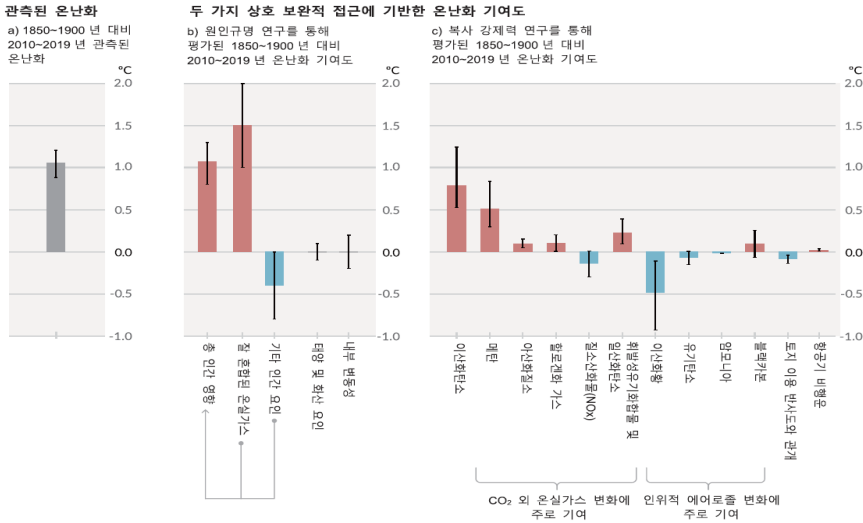
25) 2100년까지 탄소 배출량을 줄이지 않는다면, 피지와 바누아투 등 남태평양 도서국이 해수면 상승으로 인해 침수될 것이라고 분석했다(Guardian, 2021.8.9.), 2021년 개최된 제26차 유엔기후변화협약 당사국회의에서 투발루 외무장관이 수중에서 연설하며 남태평양 도서국이 처한 기후변화 위기를 알리기도 했다(한겨레(2021.11.10.)(검색일: 2022.6.20.))

26) BBC News 코리아(2022.1.15.)

27) IPCC(2021), p. 7.

인간에 의한 GHG(Greenhouse Gas, 온실가스) 배출의 영향이 지구온난화의 주요 원인이 되고 있다.

〈그림 2-1〉 기후변화 요인 분석



자료: 기상청(2021), p. 8.

1988년 세계기상기구(World Meteorological Organization, 이하 WMO)와 유엔환경계획(United Nations Environmental Program, 이하 UNEP)은 기후변화에 관한 정부 간 협의체인 IPCC(Inter-governmental Panel on Climate Change)를 설립하였다. IPCC가 1990년 제1차 기후 변화 평가보고서를 발표하였으며, 이는 1992년 브라질 리우데자네이루에서 개최된 유엔환경개발회의(이하 UNCED)에서 유엔기후변화협약(이하 UNFCCC)이 채택되는 기반이 되었다. 그러나 UNFCCC는 강제성이 없는 비교적 약한 수준의 합의였다. 협약 체결국을 대상으로 의무적인 감축목표를 부여하기 위한 논의가 이어졌고, 그 결과 2005년 교토의정서가 발효되었다.

교토의정서는 UNFCCC 부속서 I에 등재된 선진국에 배출량 감축목표를 의무화했다.²⁸⁾ 국가에 온실가스 감축 의무를 부여한 첫 번째 합의였다. 교토의정서에 따라 각국은 1990년 배출량을 근거로 2008~2012년 5년간 온실가스 배출량을 1990년 대비 -8%~+10% 수준으로 감축해야 했다.²⁹⁾ 부속서 I에 등재된 국가에서 목표를 달성하였으나 전 세계적으로는 온실가스 배출량이 증가했다. 또한 제2차 교토의정서 협약 시 미국, 캐나다, 러시아, 일본, 뉴질랜드가 참여하지 않아 교토의정서 참여국의 배출량이 전 세계 배출량의 15% 수준으로 낮아졌다. 이에 따라 개도국을 비롯하여 많은 국가가 참여할 수 있는 새로운 체제가 필요했다.

새로운 체제의 필요성 증가로 2015년 제21차 기후변화 당사국총회(Conference of Parties, 이하 COP)에서 파리협정(Paris Agreement)을 채택했다. 파리협정을 통해 선진국과 개도국이 참여하는 온실가스 배출 저감 목표가 다시 설정되었다. 협정문에는 산업화 이전 대비 지구 평균온도 상승 폭을 2℃보다 아래 수준으로 유지하고, 거기에 더해 1.5℃를 넘지 않도록 노력한다는 합의 사항이 담겼다.

이후 IPCC는 2018년 『지구온난화 1.5℃ 특별보고서(Global warming of 1.5℃)』를 발표하면서 지구 평균온도 상승 목표로 1.5℃를 권고하였으며,³⁰⁾ 2050년까지 전 세계 탄소 순 배출량을 제로까지 줄이는 탄소중립 달성을 제안했다.³¹⁾ 이를 위해 2030년까지 탄소 배출량을 2010년 대비 45% 수준으로 줄여야 한다.³²⁾ 2019년 UN이 개최한 ‘기후 행동 정상회의(Climates Action Summit)’ 이후 세계 각국에서 탄소중립을 선언했고, 우리나라는 2020년 10월 2050년까지 탄소중립을 달성할 것을 선언하였다.

28) 온실가스 감축의무 부담국(OECD 회원국, 유럽경제공동체(EEC), 동유럽 시장경제전환국가 등 43개국)
(자료: UNFCCC 홈페이지(검색일: 2022.10.25.))

29) 한국교통연구원(2008), pp. 16~17.

30) IPCC(2018), p.3.

31) 위의 책, p.15.

32) 위의 책, p.15.

〈표 2-1〉 교토의정서와 파리협정 비교

구분	교토의정서	파리협정
감축의무국	주로 선진국	모든 당사국
범위	온실가스 감축에 초점	온실가스 감축 외에도 기후변화 적응, 투명성, 이행 수단 등 포괄
지속가능성	공약 기간 설정 1차: 2008~2012 2차: 2013~2020	종료 시점 미 규정 (매 5년 이행점검)
목표 설정	의정서에서 규정	자발적으로 설정
행위자	국가 중심	다양한 행위자의 참여 독려

자료: 관계부처 합동(2022), p. 126.

2021년 10월 영국 글래스고에서 개최된 제26차 COP(이하, COP26)에서 글래스고 기후 합의(Glasgow Climate Pact)가 채택되었다. 글래스고 기후 합의에는 파리협정 달성을 위해 각 국가의 감축목표를 재검토하고 상향하는 방안에 대한 논의가 담겨있다. 또한 개도국이 기후변화에 적응할 수 있도록 2025년까지 지원 재원을 2019년 대비 두 배 이상 확대할 것을 촉구하는 내용과 더불어 석탄과 화석연료에 대한 의존도를 축소할 것을 권고하는 사항이 반영되었다.³³⁾ 이처럼 탄소중립은 기후변화 대응을 위한 국제기구와 국가 간 논의 과정에서 등장했으며, 온실가스 저감 목표 달성을 위한 수단이자 주요 해결책으로서 많은 국가에서 채택되고 있는 개념이다.

2. 산업 동향

탄소중립을 둘러싼 국제 질서와 규범의 변화를 주도하기 위하여 주요 선진국을 중심으로 포괄적·선제적 대응체계를 구축하기 시작했다. 국제사회

33) 대외경제정책연구원(2021), p. 4.

의 탄소중립 관련 요구 강화는 무역의존도가 높은 우리나라에 부정적인 영향을 미칠 것으로 예상된다. 미국과 EU, 중국 등에서 탄소국경세가 부과되면, 2030년 우리나라가 지급해야 하는 탄소국경세는 최소 약 6,100억 원에서 최대 1조 8,700억 원으로 추정된다.³⁴⁾

〈표 2-2〉 주요 수출국 대상 탄소 국경세 전망치

단위: 억 원

구분	2023	2030
EU	2,900	7,100
미국	1,100	3,400
중국	2,100	8,200
합계	6,100	18,700

자료: EY한영회계법인(2021), p. 35.

글로벌 선도기업들도 급변하는 탄소중립 관련 국제 질서를 위협요인으로 판단하고, 탄소중립 중심의 지속 가능한 경영전략 수행으로 기업의 생존을 위해 노력하고 있다.³⁵⁾ 대기업을 중심으로 탄소중립을 위해 선제적으로 경영전략을 추진하고 있으며, 대표적인 사례로 RE100이 있다.

RE100(Renewable Energy 100)은 “기업이 필요한 전력을 2050년까지 전량 재생에너지 전력으로 구매 또는 자가 생산으로 조달하겠다는 자발적 캠페인”³⁶⁾이다. 테스코(Tesco), 월마트(Walmart), 타겟(Target), 이케아(IKEA) 등 대형 유통체인을 비롯한 372개 기업이 참여하고 있다.³⁷⁾

처음 RE100이 논의되었을 때는 본사와 자회사에서 직접 사용하는 에너지만을 대체하는 것이었다. 그러나 글로벌 공급망 관리의 중요성이 높아지며 RE100에 가입한 기업들이 선언에만 그치지 않고 공급망 전반에 걸쳐

34) EY한영회계법인(2021), p. 35.

35) 그린포스트코리아(2022.5.6.)(검색일: 2022.12.21.)

36) 대한민국 정책브리핑, [탄소중립 용어사전] RE100이란?(검색일: 2022.5.24.)

37) RE100 홈페이지(검색일: 2022.6.4.)

협력 업체의 참여 및 구체적인 조치를 유도하고 있으며, 이는 국내 관련 기업에 직간접적인 영향을 미칠 것으로 예상된다.³⁸⁾

또한 미국 증권거래위원회(U.S. Securities and Exchange Commission, 이하 SEC)는 미국 상장 기업에 대해 탄소 배출량 공시 기준을 확대할 계획이다. 2022년 3월 21일 SEC는 경영공시에 온실가스 배출량에 대한 전 과정 평가 결과를 공시하도록 하는 규정을 발표했다.³⁹⁾ 제품 생산 과정에서 발생하는 직접 온실가스 배출량은 물론 전기, 에너지 사용에 따른 간접배출량을 공개해야 한다. 평가 범위는 Scope 3⁴⁰⁾까지를 포함하고 있어, 미국 상장 기업과 공급망 참여자가 포함된다. 현재 규정 초안이 제안된 상황이며, 의견 수렴을 거쳐 2024년부터 적용할 계획이다. 규정이 적용되면 미국의 상장 대기업은 경영공시에 제품 생산 전 과정에 걸친 온실가스 배출량을 포함해야 하므로 온실가스 배출량과 저감 노력 등을 고려해 공급망을 재편할 것으로 예상된다.

최근 세계적으로 데이터 산업이 빠르게 성장하면서 글로벌 데이터 기업을 중심으로 탄소 저감을 위한 노력이 가시화되고 있다. 세계 데이터센터는 2012년 50만 개에서 2021년 800만 개로 약 16배 증가하였다.⁴¹⁾ 데이터 센터는 중단 없이 운영해야 하므로 과다하게 에너지를 소비할 수밖에 없다. 국제에너지기구(IEA)는 2020년 기준 데이터센터의 전력 소비량이 전 세계 소비량의 1%에 달한다고 분석했다.⁴²⁾ 구글의 경우에는 서버용 신소재 개발, 기계학습 프로그램으로 열펌프 가동을 통한 효율적 시간 예측으로 데이터 센터 냉각에 활용⁴³⁾하고 있고, 마이크로소프트는 해저나 극지방에 데이터 센터를 건설하는 등의 실험을 진행하고 있다.⁴⁴⁾

38) 장우석 외(2021), pp. 1~24.

39) SEC 홈페이지, <https://www.sec.gov/news/press-release/2022-46>(검색일: 2022.6.28.)

40) Scope3 범위는 “직접적인 제품 생산 외에 협력업체와 물류는 물론, 제품 사용과 폐기 과정에서 발생하는 총 외부 탄소 배출량을 의미한다.”(연합인포맥스, 시사금융용어, 스코프3(검색일: 2022.6.24.))

41) 전자신문(2022.4.28.)(검색일: 2022.9.8.)

42) KDB산업은행(2022), p.1.

43) IT DAILY(2022.4.14.)(검색일: 2022.9.8.)

44) 녹색경제신문(2022.6.23.)(검색일: 2022. 9.8.)

3. 농업 동향

국내 농업 분야는 탄소 저감을 위하여 관개, 질소질비료 저감, 바이오차, 가축분뇨 자원순환 확대, 저메탄 사료, 저단백질 사료, 축산생산성 향상, 대체 식품 등 다양한 탄소 감축 수단을 발굴하여 이행계획을 마련한 바 있다. 특히, 축산업은 탄소배출이 많은 분야로 온실가스 저감을 위해 저탄소 사양관리와 가축분뇨 친환경 처리 등 수단을 마련하여 추진하고 있다.

농림축산식품부는 2022년 2월 국가 온실가스감축목표(NDC) 상향 안과 연계하여 축산환경개선 대책을 마련하였으며, 최초로 축산 환경개선을 위한 법정 기본계획을 수립했다.⁴⁵⁾ 동 계획에는 2050년 농식품 탄소중립 추진전략의 축산분야 온실가스 감축을 위한 구체적인 이행방안이 담겨있다. 중점 추진 분야는 1) 저탄소 사양관리, 2) 가축분뇨 적정 처리, 3) 축산악취 개선, 4) 축산환경개선 기반 구축 등을 포함하고 있다.⁴⁶⁾

저탄소 인증제를 시행하고 있는 농산물의 경우, 저탄소 인증 면적이 광범위하게 확대되지는 않고 있다는 점과 전 과정 평가 없이 저탄소 농산물을 인증하면서 포장, 유통과정에서 온실가스 발생을 고려하지 않은 인증이라는 문제점도 제기⁴⁷⁾되고 있지만, 저탄소 인증 농산물 확대를 위한 노력은 계속되고 있다. “친환경 농산물 및 GAP 인증 면적은 5% 미만으로 과수 일부 품목에 집중”⁴⁸⁾되어 있고, 친환경 농산물이 포장, 유통과정 등 고려 없이 제품 자체의 탄소배출만 고려한다는 비판이 있음에도 환경부가 녹색 제품에 농산물을 포함하는 정책⁴⁹⁾을 추진하는 등 저탄소 농산물의 확대가 예상된다.

45) 농림축산식품부 보도자료(2022.2.6.)(검색일: 2022.12.21.)

46) 농림축산식품부(2021), pp. 22-28.

47) 조선일보(2021.7.20.)(검색일: 2022.6.18.)

48) 이춘수·양훈민(2021), p.363.

49) 조선일보(2022.6.10.)(검색일: 2022.6.10.)

농림축산식품부 저탄소 농축산물 인증제 사업은 “저탄소 농업기술을 활용하여 생산 전 과정에서 온실가스 배출을 줄인 농축산물에 저탄소 인증을 부여하는 제도”⁵⁰⁾이다. 지원내용은 “농업인 대상으로 인증 교육, 온실가스 산정보고서 작성을 위한 컨설팅 및 인증취득 지원, 그린카드 연계 및 인증 농산물 유통지원 등 소비자가 그린카드로 저탄소 농산물 구매 시 최대 9% 포인트 적립”⁵¹⁾하게 된다. 신청기준은 “친환경·GAP 인증을 받은 농산물을 대상으로 저탄소 농업기술을 적용하여 생산한 농산물이며 온실가스 배출량 산출이 가능한 품목”⁵²⁾이어야 한다. 인증기준은 “해당 품목의 전국 평균(5년간) 온실가스 배출량과 비교하여 배출량이 적은 경우로 농산물 온실가스 배출량 산정 기초 자료 등 데이터가 축적된 후 인증기준 강화 여부를 검토”⁵³⁾할 예정이다.

50) 농림축산식품부, 저탄소 농축산물 인증제 사업(검색일: 2022.6.18.)

51) 위의 자료.

52) 위의 자료.

53) 위의 자료.

제2절 국내외 수산업 정책 동향

1. 해외 동향

수산 분야 탄소 저감을 위한 각국 정부의 정책을 살펴보면, 미국과 유럽이 가장 앞서나가고 있다. 먼저 미국 정부는 기후 위기 대응을 위한 행정명령 제14008호를 발표하여 수산 부문과 관련하여 화석연료에 대한 직접 보조금을 중단하고, 바이오연료 사용을 지원하도록 하고 있다.

동 행정명령에 대해 미국 국립해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)은 기후 변화 대응 관련 수산업의 이행 사항들을 제시하고 있는데, 상업적 어업의 탄소발자국 감축, 탄소격리 등이 포함되어 있다. 특히, 육상양식장과 대규모 어류 양식장은 탄소 배출량이 높은 편이므로, 탄소 저감을 위한 조치 이행을 권고하고 있다.⁵⁴⁾

한편 유럽의 경우, EU 집행위원회는 2050년 탄소중립 달성을 위한 실행 방안으로 2019년 12월 그린딜(Green Deal)을 발표하였다.⁵⁵⁾ 그린딜 정책에서는 양식업을 저탄소 단백질 생산의 중요한 공급원으로 보고 있다. 지속가능한 양식산업을 위해 1) 회복탄력성과 경쟁력 강화, 2) 녹색 전환 참여, 3) 사회적 수용과 소비자 정보 보장, 4) 지식과 혁신 증진 등 4개 분야에 대해 지침을 마련하고 있다. 또한, 탄소중립을 위한 양식업을 위해 공간 계획과 물 사용 계획 수립 시 기후변화 대응을 고려하도록 하고 있다.⁵⁶⁾

수산양식관리협의회(Aquaculture stewardship council, ASC) 등 국내에 잘 알려진 해외 수산물 인증 외에도 저탄소 수산물 인증이 포함된 것

54) Cucuzza, Sagar & Griffis(2021), p.79.

55) 김수현·김창훈 외(2020), p.1

56) European Commission(2020)

으로는 KRAV label⁵⁷⁾, Friend of the Sea, Carbon Trust, Princes Group, Grieg Seafood, Leroy Seafood 등이 있다. 양식의 품종별 인증을 다루고 있는 ASC를 제외하고는 대부분의 인증이 어선어업에 대한 탄소 저감 인증을 다루고 있다.

ASC 인증의 경우에는 품목별로 인증기준을 제시하고 있다. 굴, 해조류의 경우에는 에너지 사용량 모니터링을 통해 생산에 필요한 에너지 사용량을 파악하고 효율성 개선을 위한 지속적인 노력을 요구하고 있다. 또한 장비의 유지·관리 관련 데이터 갱신이 필요하다.⁵⁸⁾ 넙치의 경우에는 양식장 에너지 소비 검증 및 에너지 사용 평가, 온실가스 배출 기록 및 연간 온실가스 평가, 생산주기 동안 사용된 사료의 온실가스 배출 문서화, 단위 생산당 온실가스 저감을 위한 문서로 된 전략 등을 요구한다.

KRAV는 어선어업의 연료와 냉매의 요구 사항을 구체적으로 명시하고 있다. Friend of the Sea는 에너지 관리기준에 탄소발자국 계산에 대한 권고 사항을 포함하고 있으며, 에너지 관리기준은 최소 1년에 한 번 갱신된 모든 에너지원과 사용기록을 요구하고 있다. 기록부에는 최소 유입에너지원의 재생가능 여부, 어업, 가공, 운송에서의 공정라인당 소비량을 기록하도록 하고 있다.

이외에도 Carbon Trust는 호주 어선에서 배출되는 온실가스 정량화, Princes Group의 모리셔스 가공공장 탄소 저감 계획 등을 위해 인증기관별로 노력하고 있다.

57) 생산자, 가공업자, 수출업자, 소비자 등 환경과 동물복지에 관심 있는 기관 27개가 연합한 덴마크 인증임 (FIS, KRAV(검색일: 2022.6.18.))

58) ASC & MSC(2018), p. 35.

〈표 2-3〉 국제 수산물 인증제별 탄소배출 기준 및 내용

인증명	내용
KRAV	• 바닥 트롤링은 에너지 소비 과다로 일부 예외를 제외하고 허용 불가, 연료 및 냉매와 연관된 어선의 기술적 요구 사항이 있음 - 연료 요구 사항 : 황 함량 최대 0.05, 최대 연료 사용은 해산물 종류에 따라 0.01~0.35L/kg - 냉매 요구 사항 : 오존 및 탄소중립 냉매만 허용 가능(HFC 허용 불가), 승인된 냉매에 CO₂, NH₃, 부탄, 프로판 포함
Friend of the Sea	• 제품당 탄소 배출량을 계산해서 매년 탄소 배출량 저감 권고, 에너지 관리 기준은 탄소 발자국 계산에 대한 권고 사항 포함 - 최소 1년에 1회 갱신된 모든 에너지 원가 사용 내역 기록 - 기록부에는 유입에너지원(재생가능 여부), 공정라인당 소비량(어업, 가공 운송 등) 등 매개변수 포함 필요
Carbon Trust	• 탄소중립을 위해 제품 및 조직에서 배출되는 GHG 정량화, 내부 감소 및 상쇄 가능 (어선에서 연소 되는 연료와 같이 조직에서 발생한 배출물, 구입한 전력에서 나오는 배출량, 제3의 배출원에서 발생하는 배출량) • 탄소중립을 위해 국제 풍력 발전 프로젝트의 자발적 배출 감소(VERs) 구매를 통해 배출량 상쇄
Princes Group	• EDM과 파트너십을 맺고 모리셔스 참치 가공공장의 이산화탄소 배출을 80% 감축 계획(폐기물 처리 및 부산물 활용) • 가공시설 조명 LED 교체, 자체 열병합발전소 설치, 태양광 패널 설치, 친환경 포장 전환
Grig Seafood	• 디젤 엔진 대체 기술개발, 냉각 포장재 교체, 트럭 운송 대체 등 공급망 내 온실가스 저감 방안 검토 등
Leroy Seafood	• 온실가스 배출범위, 범위 1) 기업이 직접 운영 및 소유하는 제조설비 배출 감소, 범위 2) 기업이 구매한 전기, 열 이용 과정 등에서 감소, 범위 3) 제품 사용을 포함한 전체 가치사슬에서 배출 감소 등을 2019년 대비 2030년까지 46% 감소 목표
ASC	• (납치) 양식장 에너지 소비 검증 및 에너지 사용 평가, 양식장 온실가스 배출 기록 및 연간 GHG 평가, ASC에 보고된 생산주기 동안 사용된 온실가스 배출 문서화, 단위 생산 당 온실가스 감축을 위한 문서화된 전략 마련 • (굴, 해조류) 에너지사용량 모니터링, 장비 유지관리 기록

자료: Gabriell & Jafarzadeh(2020), pp. 20~22 내용을 정리하여 저자 작성

2. 국내 동향

1) 해양수산분야 탄소중립 계획

2021년 12월 우리나라 정부는 해양수산분야 탄소중립 실현을 위해 ‘해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵’을 수립했다. 이 로드맵에 따르면, 2018년 현재 406.1만 톤인 해양수산분야 온실가스 배출을 2050년 42.2만 톤으로 324만 톤(90%) 감축하겠다는 목표를 설정하였다.

2018년 우리나라 온실가스 배출량 총 7억 2,760만 톤에서 수산업 배출량은 304.2만 톤으로 비중은 약 0.42%이다.⁵⁹⁾ 2018년 기준으로 우리나라 수산·어촌 온실가스 배출량은 304.2만 톤(CO₂eq)이고, 직접 배출량은 253.8만 톤(CO₂eq), 간접배출량은 50.4만 톤(CO₂eq)이다.⁶⁰⁾

수산·어촌분야에서는 2018년 배출량인 304.2만 톤에서 96% 감축하여 2050년 11.5만 톤으로 줄이겠다는 계획이다. 30년 안에 탄소배출을 96% 감소시키기 위해서는 저탄소형 생산구조로의 대대적인 패러다임 전환이 요구된다.

〈표 2-4〉 해양수산업 탄소배출 감축

단위: 만톤

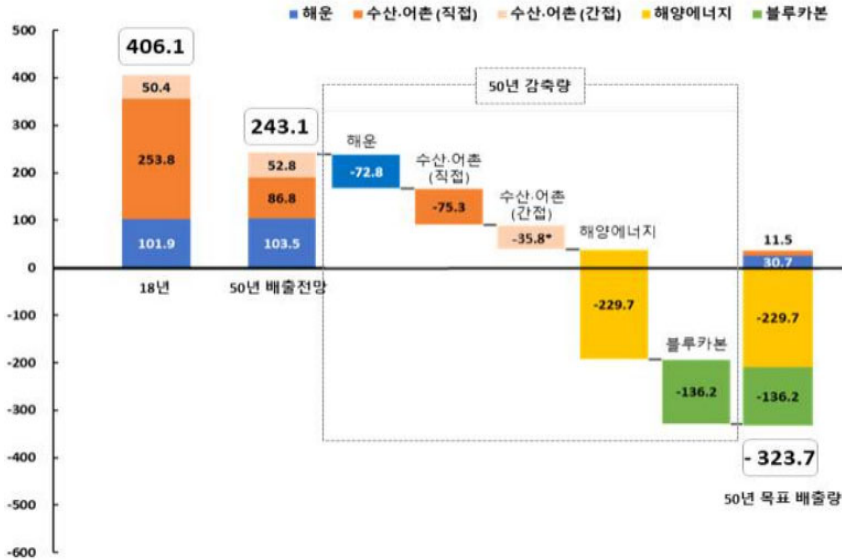
구분	2018 배출량	2050 목표배출량	감축률
해양수산업 전체	406.1	42.2	90%
-해운	101.9	30.7	70%
-수산·어촌	304.2	11.5	96%

출처: 해양수산부 보도자료(2021.12.16.)(검색일: 2022.6.30.)

59) 해양수산부(2021b), pp. 5-6.

60) 앞의 자료, p.6.

〈그림 2-2〉 해양수산분야 탄소중립 시나리오에 따른 2050년 목표배출량



자료: 농어업·농어촌특별위원회(2022), p.4.

간접배출에 포함된 업종은 주로 양식업 등으로 2050년까지 목표배출량을 제로(0)로 하고 있다.⁶¹⁾ 전기 사용에 따른 간접배출량 제로 목표의 달성을 위해서는 간접배출이 가장 많은 육상양식장부터 탄소중립이 실현될 때 가능하다.

해양수산부는 온실가스 목표를 달성하기 위한 세부적인 계획을 수립하였다. 이 중 양식산업 분야의 정책 수단을 살펴보면, 에너지 절감장치인 히트펌프와 인버터 보급을 통한 탄소 저감형 양식업 구축, 태양광, 소수력 등 친환경 재생에너지 활용 확대가 탄소배출 감축 방안으로 포함되어 있다.

61) 수산·어촌부문 전력 사용에 따른 간접배출량 17만 톤이 남지만, 2050년 국가적인 전력 친환경에너지 생산 등 추가적인 절감 노력으로 목표배출량 제로(0)로 설정(해양수산부(2021b), p.9)

〈표 2-5〉 2050 탄소중립 로드맵 5대 부문 추진 목표

단위: 만 톤 CO₂eq

부문	'18년 배출량	감축·흡수 수단	'50년 목표 배출
국내 해운	101.9	저탄소(LNG, 하이브리드, 혼합연료) 선박	+30.7
		무탄소(전기, 수소, 암모니아) 선박	
		에너지 효율기술 적용 및 운항효율 개선	
		저탄소·무탄소 관공선 보급*	
수산 · 어촌	304.2	어선어업 효율화(어선 노후기관 교체, 대체건조, 감척 등)	+11.5
		저탄소·무탄소(LNG, 전기, 하이브리드) 어선	
		양식장·수산가공공장 에너지절감 장비보급	
		양식장 친환경 에너지 생산 지원 (태양광, 소수력 발전설비 등)	
해양 에너지	-	조력발전 보급 확대	△229.7
		조류·파력·복합발전 등 기술개발·상용화	
블루 카본	-	연안습지 식생 복원	△136.2
		비식생습지 보호·복원	
		바다숲 조성	
		신규 블루카본 발굴(굴패각 재활용 등)	
항만	('19) 30	유류사용 장비 동력 전환(전기), 수소 하역장비 상용화	0
		조명탑 등 항만 시설 에너지 사용 효율화	
		유희공간 활용 친환경 에너지 생산시설 구축	
합계	406.1		△323.7

자료: 해양수산부(2021b), p. 17.

양식 분야의 탄소중립 관련 세부 정책으로는 2011년부터 수행되고 있는 친환경에너지 보급사업이 대표적이다. 고효율 에너지 설비인 히트펌프와 인버터를 양식 어가에 보급하여 에너지 비용을 절감하고, 탄소배출이 많은 유류 보일러를 탄소배출이 적은 히트펌프로 대체해 양식장의 탄소배출을 줄일 수 있다.

2) 육상양식산업 탄소중립 관련 사업

(1) 친환경에너지 보급사업 내용

친환경에너지 보급사업은 양식업 탄소배출 저감을 위해 에너지 절감 시설인 히트펌프와 인버터를 양식 어가에 보급하는 사업이다. 2011년 시작되었으며 2015년부터 인버터가 지원 품목에 추가되었다. 이후 점차 지원 품목이 확대되는 추세다.

〈표 2-6〉 친환경에너지 보급사업 추진 경과

- '10.3. : 제3차 수산진흥종합대책 중점 추진과제(히트펌프 보급 결정)
- '11.1. : 양식장 에너지절감 시설(히트펌프) 신규 지원
- '11.6. : 히트펌프 성능 기준 정립 및 시행
- '15.1. : 양식장 에너지절감 시설(인버터) 신규 지원
- '18.1. : 양식장 태양광 시범사업 신규 시행
- '19.1. : 복합열원 히트펌프 신규 지원
- '20.1. : 수산가공분야 에너지절감 시설(히트펌프식 김 건조기) 신규 시행

자료: 리서치랩(2020), p. 11.

친환경에너지 보급사업의 사업비 지원 비율은 국비 보조 80%, 어가 자부담 20%의 구조이다. 국비 보조 80% 중 국고는 60%, 지방비는 20%이며, 지방비는 대부분 시도비로 충당된다. 해수열 히트펌프의 경우 어가당 평균 보급용량은 378 kw이고, 평균 사업비는 약 2억 원, 자부담금은 20%인 약 4천만 원인 것으로 나타났다. 인버터의 평균 사업비는 약 6천만 원, 자부담은 1,200만 원인 것으로 조사되었다.⁶²⁾

62) 리서치랩(2020), p. 30.

〈표 2-7〉 친환경에너지 보급사업 보조 비율(%)

구분	국고	지방비	자부담
지열·(해)수열원 히트펌프	60%	20%	20%
인버터	60%	20%	20%

자료: 해양수산부(2021a), p. 7을 참고하여 저자 재구성

히트펌프의 지원 요건은 해수 및 담수를 이용하는 양식장으로 100m³/일 이상의 수조 환수량 또는 300m² 이상의 수 면적을 보유해야 한다. 인버터 시스템은 해수 이용 양식장으로 1,000m² 이상 수 면적 또는 전체 용량 150kW 이상의 취수 펌프를 보유한 시설을 요건으로 한다.⁶³⁾

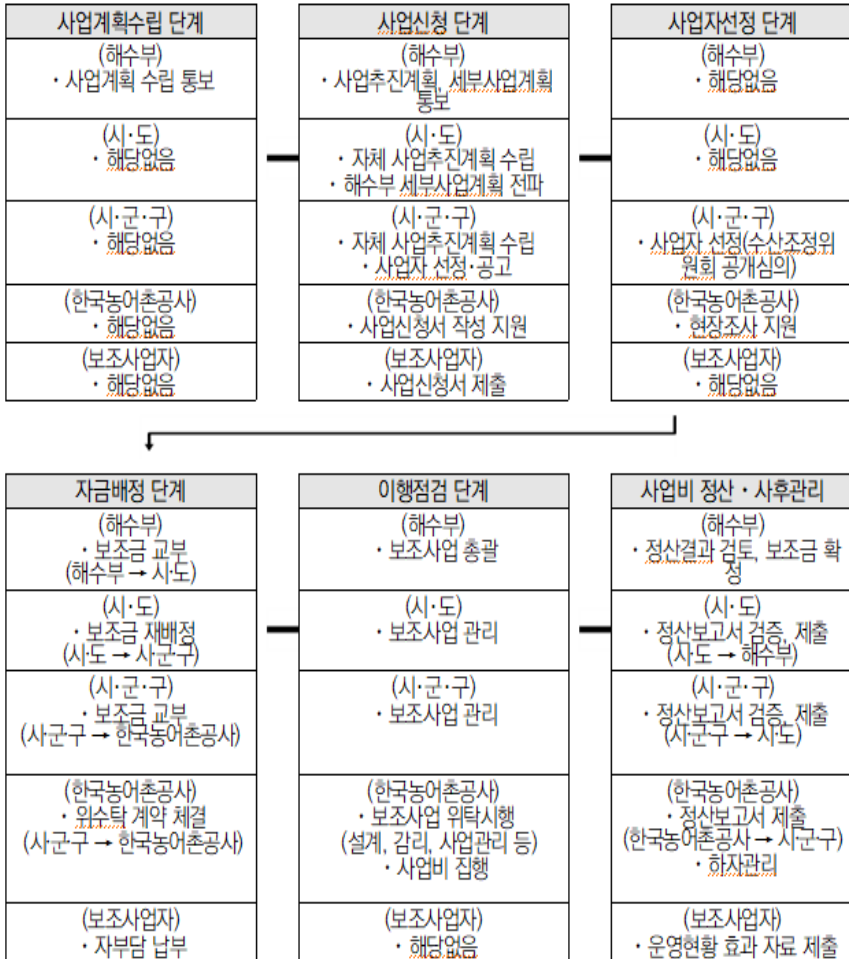
이는 상당히 낮은 자격 조건으로 대다수의 양식 어가가 지원 대상에 해당한다. 시행지침에 따르면 지원 우선순위를 두고 있는데, 히트펌프의 경우 전년도에 예산이 부족하여 필요 규모를 충족하지 못한 경우, 우선순위가 주어진다. 인버터의 경우 전년도 신청자 중에 조수간만의 차가 클수록 선정에 있어 우선 고려 대상이 된다.

(2) 친환경에너지 보급사업 수행 절차

친환경에너지 보급사업은 한국농어촌공사가 지자체장으로부터 사업을 수탁받아 수행하는 형식을 취하고 있다. 사업비 집행은 한국농어촌공사에서 사업비 교부를 받아 집행하며, 시설 준공 후 해당 지자체에 완료 보고를 한다.

63) 해양수산부(2021a), p. 5.

〈그림 2-3〉 친환경에너지 보급사업 수행 절차



자료: 해양수산부(2021a), pp. 9-10.

친환경에너지 보급사업의 사업수행 절차를 살펴보면, 해양수산부가 전년도 12월 사업 시행지침을 한국농어촌공사 및 시·도에 통지 후 시·군은 확정된 예산의 한도 내에서 별도의 자체 평가 기준을 마련하여 시·군·구별 사업량 및 예산 배정을 통보한다. 2월 시·군·구는 어가의 사업 신청 자료를

접수하고 한국농어촌공사에 지원을 의뢰하여 현장 조사를 시행하며, 현장 조사 결과를 바탕으로 사업성 검토 후 사업자를 선정한다. 시장·군수·구청장은 해양수산부가 지원하는 국고 보조금과 어가에서 예치한 자부담을 한국농어촌공사로 이체하고, 위탁시행자인 한국농어촌공사에서 본 사업비를 집행한다.⁶⁴⁾

(3) 친환경에너지 보급사업 수행 실적

2011년 사업 도입 이후 2021년도까지 1,531개 어가에 574MW(사업비 2,988억 원) 규모의 에너지 절감 시설 보급을 완료한 것으로 나타났으며, 어가당 평균 보급용량은 374.9kW, 평균 사업비는 1억 9,500만 원으로 집계됐다.

〈표 2-8〉 연도별 지원 건수 및 사업비

단위: 어가, MW, 억 원

구분	계	'11	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21
어가수	1,531	181	133	131	119	118	115	115	115	147	194	163
보급용량	574	52	46	42	43	47	45	46	55	58	75	65
사업비	2,988	355	241	232	222	214	246	235	297	293	346	307

주: 전남지역의 경우 동일 어가가 여러 해에 걸쳐 나누어 지원받는 경우가 있어, 수혜 어가 수는 이보다 적음
자료: 한국농어촌공사 내부 자료

유형별 보급 실적은 해수열 히트펌프가 1,326건으로 압도적인 비중을 차지하며, 다음으로 인버터가 157건 지원되었다. 지열 히트펌프는 2017년 이후 지원실적이 없으며, 소수력은 2016년 1회 보급되었다. 인버터는 지원 건수가 늘어나는 추세에 있다.

64) 해양수산부(2021a), pp. 9-18.

〈표 2-9〉 친환경에너지 보급사업 유형별 보급 실적

단위: 건 수

구분		히트펌프				소수력	태양광	인버터
		지열 (개방형)	지열 (밀폐형)	해수열	복합열			
계	1,531	17	7	1,326	18	1	5	157
2011년	181	12	3	166	-	-	-	-
2012년	133	2	-	131	-	-	-	-
2013년	131	1	1	129	-	-	-	-
2014년	119	-	1	118	-	-	-	-
2015년	118	1	1	101	-	-	-	15
2016년	115	1	1	106	-	1	-	6
2017년	115	-	-	97	2	-	-	16
2018년	115	-	-	100	-	-	1	14
2019년	147	-	-	119	7	-	3	18
2020년	194	-	-	141	9	-	1	43
2021년	163	-	-	118	-	-	-	45

자료: 한국농어촌공사 내부 자료

〈표 2-10〉 친환경에너지 보급사업 유형별 사업 실적

구분	계	히트펌프				소수력	태양광	인버터
		지열 (개방형)	지열 (밀폐형)	해수열	복합열			
실적 (여가수)	1,531	17	7	1,326	18	1	5	157
보급용량 (KW)	574,722	4,779	1,043	521,645	7,536	50	650	39,019
사업비 (백만원)	298,752	6,017	1,454	275,464	4,739	700	1,625	8,754

자료: 한국농어촌공사 내부 자료를 참고하여 저자 정리

지역별 히트펌프 보급 현황을 살펴보면 사업이 시작된 2011년부터 2021년까지 전체 사업비는 2,987.5억 원이며 이 중 양식 어가가 집중되어 있는 전남지역에 51%의 사업비가 투입되었다. 2021년 사업비는 306.5억 원이며 이 중 약 64%가 전남지역에서 사용된 것으로 나타났다.

〈표 2-11〉 지역별 사업비 투입 비중

구분	합계(2011년~2021년)			2021년		
	어가	사업비 (백만 원)	사업비 비중	어가	사업비 (백만 원)	사업비 비중
계	1,531	298,752	100%	163	30,650	100%
인천	22	4,265	1.4%	-	-	
울산	2	1,450	0.5%	1	616	2.0%
부산	9	1,084	0.4%	-	-	
경기	5	1,185	0.4%	-	-	
강원	29	7,245	2.4%	3	565	1.8%
충북	9	1,617	0.5%	-	-	
충남	135	38,732	13.0%	5	1,415	4.6%
전북	53	22,886	7.7%	2	849	2.8%
전남	861	152,985	51.2%	115	19,580	63.9%
경북	31	6,939	2.3%	7	1,610	5.3%
경남	289	42,062	14.1%	20	4,860	15.9%
제주	86	18,302	6.1%	10	1,155	3.8%

자료: 한국농어촌공사 내부 자료 이용하여 저자 재구성

해수열 히트펌프의 보급 실적을 보면, 최근 5년간 총 578개 어가에 해수열 히트펌프가 보급되었으며, 지역별로는 전남이 절반 이상인 349개로 가장 많이 보급되었다.

〈표 2-12〉 해수열 히트펌프 보급 어가

단위: 어가 수

사업 연도	계	강원	경기	경남	경북	부산	울산	인천	전남	전북	제주	충남	충북
계	578	8	1	109	20	2	1	5	349	20	21	41	1
2017년	97	1	-	21	3	2	-	-	52	5	4	9	-
2018년	100	3	-	25	-	-	-	-	50	9	2	11	-
2019년	119	1	1	21	8	-	-	2	69	2	5	9	1
2020년	141	-	-	23	2	-	-	3	100	2	4	7	-
2021년	121	3	-	19	7	-	1	-	78	2	6	5	-

자료: 한국농어촌공사 내부 자료

해수열 히트펌프 보급사업 사업비도 마찬가지로 최근 5년간 총 1,352억 원의 사업비 중 절반이 넘는 746.9억 원이 전남지역에 집행된 것으로 나타났다.

〈표 2-13〉 해수열 히트펌프 사업비

단위: 억 원

사업 연도	계	강원	경기	경남	경북	부산	울산	인천	전남	전북	제주	충남	충북
계	1,352	16.3	1.2	202.0	43.5	4.0	6.2	9.8	746.9	129.7	50.6	140.8	1.1
2017년	217.9	1.8	-	29.0	9.1	4.0	-	-	91.9	44.4	9.2	28.5	-
2018년	282.5	6.7	-	40.3	-	-	-	-	129.6	58.6	9.0	38.4	-
2019년	263.2	2.1	1.2	33.5	15.7	-	-	3.1	152.4	6.0	13.2	35.0	1.1
2020년	293.9	-	-	50.8	2.6	-	-	6.7	187.9	12.2	8.9	24.8	-
2021년	294.5	5.7	-	48.4	16.1	-	6.2	-	185.2	8.5	10.4	14.2	-

자료: 한국농어촌공사 내부 자료

최근 5년간 인버터 지원 사업은 135개 어가에게 지원되었으며, 이 중 전남이 119개 어가로 압도적으로 많은 보급 실적을 나타냈다. 사업비 역시 지난 5년간 예산 총 73.7억 원 중 68.3억 원이 전남지역에 집행되어 전남 지역 사업 보급 실적이 가장 높다. 전남지역에 사업보급 실적인 높은 이유는

양식 어가가 집중되어 있고, 수온 유지를 위해 가온이 필요하다는 지리적 특성에 의한 것으로 보인다. 제주는 수온이 일정한 지하 해수 이용이 가능하여 히트펌프의 보급이 상대적으로 많지 않았던 것으로 나타났다.

〈표 2-14〉 인버터 보급 어가

단위: 어가 수

사업 연도	계	강원	경기	경남	경북	부산	울산	인천	전남	전북	제주	충남	충북
계	135	-	-	1	-	3	-	2	119	-	10	-	-
2017년	16	-	-	-	-	-	-	-	14	-	2	-	-
2018년	14	-	-	-	-	1	-	-	12	-	1	-	-
2019년	18	-	-	-	-	1	-	2	13	-	2	-	-
2020년	42	-	-	-	-	1	-	-	40	-	1	-	-
2021년	45	-	-	1	-	-	-	-	40	-	4	-	-

자료: 한국농어촌공사 내부 자료

〈표 2-15〉 인버터 사업비

단위: 억 원

사업 연도	계	강원	경기	경남	경북	부산	울산	인천	전남	전북	제주	충남	충북
계	73.7	-	-	0.2	-	1.3	-	0.3	68.3	-	3.6	-	-
2017년	12.6	-	-	-	-	-	-	-	11.7	-	0.9	-	-
2018년	9.2	-	-	-	-	0.5	-	-	8.1	-	0.6	-	-
2019년	7.9	-	-	-	-	0.5	-	0.3	6.5	-	0.6	-	-
2020년	19.9	-	-	-	-	0.3	-	-	19.3	-	0.3	-	-
2021년	24.1	-	-	0.2	-	-	-	-	22.7	-	1.2	-	-

자료: 한국농어촌공사 내부 자료

향후 정부는 친환경에너지 보급사업을 계속 확대하여 2022년부터 2025까지 연간 343억 원의 예산을 투입할 계획이며, 2022년도에는 히트펌프 305억 원, 인버터 37억 원을 지원할 계획이다.⁶⁵⁾

65) 한국농어촌공사 내부자료

히트펌프의 사업 효과는 주로 가온 방식의 효율화에서 찾을 수 있다. 히트펌프는 새우, 전복, 다금바리, 넙치 등 다양한 어종으로 보급이 되었는데 새우, 전복, 넙치(종자) 등 냉난방이 필요한 어종의 경우 기존에 사용하던 유류보일러, 전기보일러를 히트펌프로 대체하여 가온비를 절감하고 있는 것으로 나타난다. 인버터의 사업 효과는 양수펌프의 효율화로 볼 수 있다. 인버터는 넙치 양식장에 주로 보급되었다. 넙치 유수식 양식장은 해수 취수 펌프 가동시간이 길어, 조수간만의 차를 이용한 인버터를 설치하여 전력 절감 효과를 보인 것으로 조사되었다.

제3절 시사점

탄소중립은 기후변화 이슈에 대응한 국제기구와 국가 간의 오랜 논의 과정에서 결정된 사안이다. 2019년 UN의 ‘기후 행동 정상회의’ 이후로 우리나라를 포함한 주요국은 탄소중립을 선언하였고, 기후 위기의 심각성으로 탄소중립 이행시기를 앞당기는 국가들도 늘어나고 있다. 탄소중립을 선도하는 주요국은 포괄적·선제적 대응체계를 구축하며, 탄소국경세를 도입할 가능성이 크다. 무역의존도가 높은 우리나라의 탄소중립 대응체계 구축이 시급한 상황이다. 탄소중립 이슈는 국제기구 및 국가 간의 문제를 넘어 기업 차원의 대응 노력도 커지고 있다. 기업 사용 전력의 100%를 재생에너지로 대체하는 국제적 기업 간 협약 프로젝트인 RE100은 세계적으로 이미 372개 기업이 참여하고 있다. RE100 평가 범위가 기업 생태계에 포함된 협력 업체, 물류까지를 포함하고 있다. RE100 프로젝트에 참여하지 못하는 기업은 산업 생태계 내에 존재하기 어려운 상황이 되어 기업 생존에 문제가 발생할 수 있다. 탄소중립의 이행은 국제사회에서 국가적 차원뿐만 아니라 산업 생태계에서 기업의 생존에도 영향을 미칠 것으로 보인다.

우리나라는 이미 탄소중립 이행을 위한 NDC를 설정하고, 이행경로를 마련하였다. 현재는 정책변화에 따라 기술성숙도, 제도적 기반, 수용성 등을 고려하여 이행경로를 수정하는 작업을 하고 있다. 우리나라 탄소중립 목표 달성을 위해 전 산업 분야가 참여하고 있으며, 농수산부문도 포함되어 있다. 농업에서 탄소배출이 많은 축산부문에서는 가축분뇨 자원순환 확대, 저메탄 사료, 저단백질 사료, 축산생산성 향상, 대체 식품 등 다양한 탄소 감축 수단이 발굴되어 이행계획을 세우고 있다.

반면, NDC 상의 수산업 탄소 감축 수단은 노후 어선 대체 건조, 하이브리드 어선 건조, 어선 감척 등이 주요한 수단이 되고 있으며, 양식산업의

경우에는 양식장 친환경 전환지원 사업(친환경에너지 보급사업) 등만 있다. 농업에서는 저탄소 농수산물 인증제 사업을 추진하고 있어 제도적 기반을 마련하여 운영하고 있지만, 저탄소 수산물을 위한 제도적 기반이 마련되어 있지 않은 상황이다.

국내에서는 제도적으로 저탄소 수산물에 대한 인증은 없지만, 국제적으로 활성화된 ASC 등 다수의 인증기관에서 저탄소 인증 이슈를 다루고 있어 수산물 교역에 있어 탄소중립 이슈가 중요해질 전망이다. 저탄소 수산물 인증을 위해서는 온실가스 배출량과 기술개발 및 적용을 통한 온실가스 배출량 저감을 증명할 수 있어야 하고, 관련 라이브러리 및 통계가 구축되어야 한다.

수산업에 대한 탄소중립 이행 관련 정책들이 미국, EU 등에서 이미 추진 중이다. 특히, 해외 주요국은 양식산업의 저탄소 단백질 생산의 중요성을 인지하고 정책을 개발하고 이행하기 위해 노력하고 있다. 반면, 대규모 플랜트형 양식과 육상양식장에서의 탄소배출 제로를 권고하고 있다.

양식산업의 성장 속에 전통적인 재래식 양식이 아닌 규모화된 양식 생산 시스템이 출현하면서 양식산업의 성장과 지속가능성을 위한 탄소중립 정책 방향 설정이 필요한 상황이다.

〈표 2-16〉 탄소중립 관련 정책 시사점

구분	국가	산업
해외	- 탄소중립 선도 - 포괄적·선제적 대응 체계 마련 - 탄소국경세 도입(EU) - 대규모 플랜트형 양식 및 육상양식 탄소배출 제로 권고	- RE 100 확산 - 공급망 관리 중요성 확대 - 양식수산물 인증(ASC)의 탄소 이슈
국내	- 국가온실가스감축목표(NDC) 설정 - 농수산부문 탄소중립 이행계획 수립	양식산업의 규모화·산업화 추진
시사점	▼ 농업 대비 제도적 기반 미흡 (저탄소 농산물 인증, 사료 개선, 대체 식품 개발 등)	▼ 인증취득, 공급망 관리를 위한 GHG 라이브러리 및 통계 미비
	▼ 양식산업의 성장 및 지속가능성을 위한 정책 방향 설정 필요	

자료: 저자 작성

03

양식산업 동향과 양식산업 탄소 경쟁력

제1절 양식산업 동향

1. 세계 양식산업 동향

1) 생산현황

2020년 기준 전 세계 수산물 생산량은 약 2억 1,400만 톤⁶⁶⁾이며, 해조류를 제외하면 약 1억 7,780억 톤⁶⁷⁾이다. 최근 10년간 수산물 총생산량은 연평균 약 1.8% 증가했으나, 어업 생산량은 같은 기간 0.2% 감소했다.⁶⁸⁾ 반면, 양식 생산량은 연평균 4.3%씩 증가하고 있다.⁶⁹⁾ 양식산업이 전 세계 수산물 생산 및 공급을 견인하고 있음을 알 수 있다. 특히 2016년부터는 양식수산물이 주요 어류 공급원으로 떠오르고 있다. 1950년에는 전체 어류 소비량의 4%만이 양식 어류였으나, 2016년을 기점으로 어업 생산량을 넘어섰다.⁷⁰⁾ 2018년에는 전체 어류 소비량의 52%가 양식으로 생산되었다.⁷¹⁾

66) FAO(2022c)

67) FAO(2022b)

68) 위의 자료

69) 위의 자료

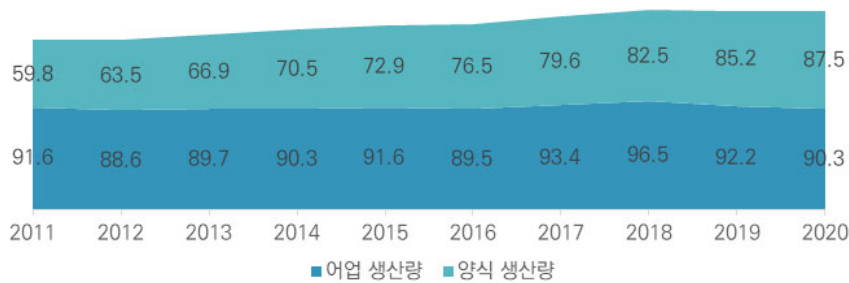
70) FAO(2022e), p. 72.

71) 위의 자료

세계적으로 양식산업은 주요 수산물 단백질 공급원임과 동시에 수산물 공급원 역할을 하고 있다.

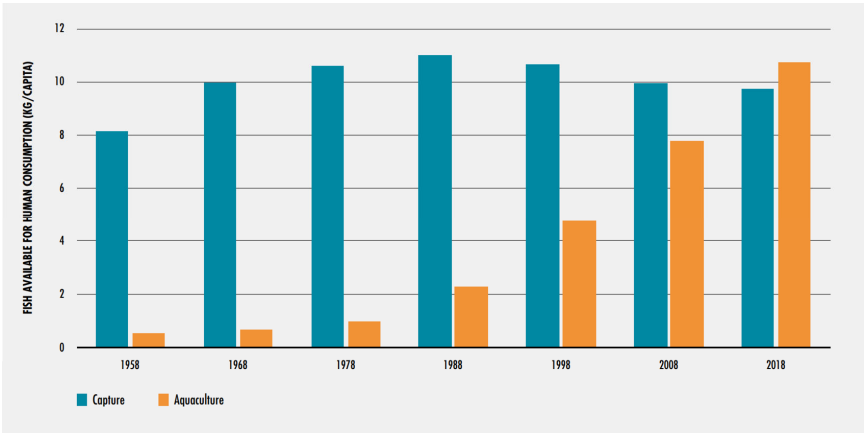
〈그림 3-1〉 세계 수산물 생산량 동향(2011~2020)

단위: 백만 톤



자료: FAO(2022b)

〈그림 3-2〉 생산어업별 세계 어류 수급 비중

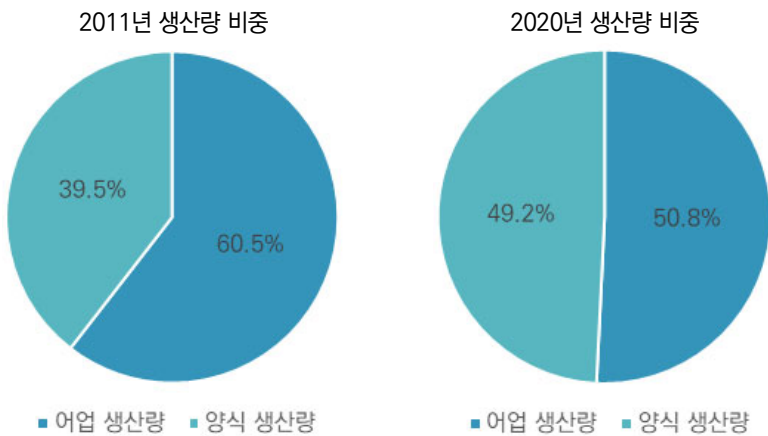


자료: FAO(2022e), p. 72.

양식산업이 빠른 증가세를 보이며 생산량이 확대됨에 따라 전체 생산에서 양식산업이 차지하는 비중이 늘어나고 있다. 2011년 생산량에서 어업이

차지하는 비중은 60.5%, 양식업은 39.5%였다.⁷²⁾ 그러나 2020년에는 어업 생산량 비중이 50.8%, 양식업 비중은 49.2%로 격차가 좁혀지고 있다.⁷³⁾ 해조류 생산량을 포함한다면, 2013년에 이미 양식 생산량이 어업 생산량을 초과했다.⁷⁴⁾

〈그림 3-3〉 생산 방법별 세계 수산물 생산량 비중



자료: FAO(2022a)

2020년 기준 수산물 총생산량이 가장 많은 국가는 중국으로 약 6,280만 톤을 생산했다.⁷⁵⁾ 이는 전 세계 생산량의 35.4%에 해당⁷⁶⁾한다. 중국에 이어 인도가 1,410만 톤, 인도네시아가 1,220만 톤을 생산했으며, 베트남, 페루가 그 뒤를 이었다.⁷⁷⁾ 어업 생산량 역시 중국이 가장 많았으나, 그 비중이 14.7%로 낮아졌으며, 인도네시아, 페루, 인도, 러시아 등이 주요 어업

72) 위의 자료

73) 위의 자료

74) FAO(2022c)

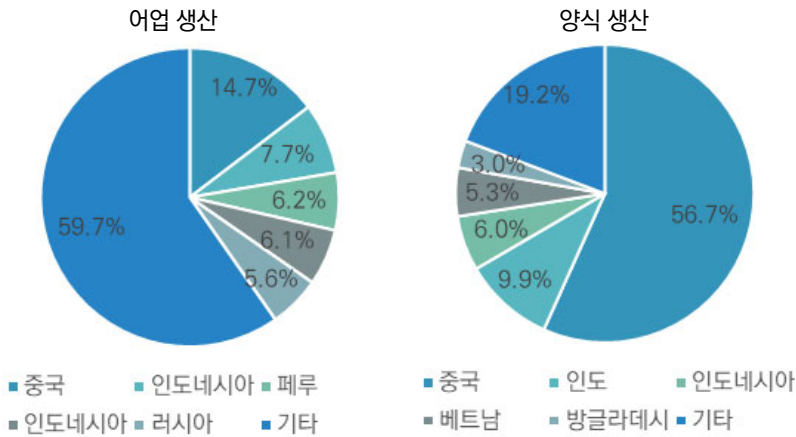
75) FAO(2022a)

76) 위의 자료

77) 위의 자료

생산국이었다.⁷⁸⁾ 반면 중국의 양식 생산량은 4,960만 톤으로 전 세계 양식 생산량의 56.7%를 생산하여 가장 높은 비중을 차지했다.⁷⁹⁾ 중국 다음으로 는 인도, 인도네시아, 베트남, 방글라데시 등의 양식 생산량이 많았다.⁸⁰⁾

〈그림 3-4〉 생산 방법별 주요 생산 국가(2020년 기준)



자료: FAO(2022b)

2019년 기준 해면 어류생산량이 6,910만 톤, 내수면 어류생산량이 5,850만 톤으로 어류생산량이 전체의 71.8%를 차지했다.⁸¹⁾ 어업 생산량에서는 해면 어류생산량이 72.7%⁸²⁾로 가장 많았다. 내수면 어류 어업 생산량은 1,030만 톤으로 11.4%⁸³⁾에 불과했다. 반면 양식에서는 내수면 어류생산량이 4,810만 톤으로 전체 양식 생산량의 55.0%를 차지⁸⁴⁾했으며, 연체동물(패류 포함)이 20.3%, 갑각류가 12.8% 수준⁸⁵⁾이었다. 이는 주요

78) 위의 자료

79) 위의 자료

80) 위의 자료

81) FAO(2022d)

82) 위의 자료

83) 위의 자료

84) 위의 자료

85) 위의 자료

양식 국가인 중국의 영향이다. 중국이 잉어, 향어, 초어 등 민물 어류 중심으로 내수면 양식에 강세를 보이고 있기 때문이다. 또한 인도, 베트남, 에콰도르 등지에서 생산되는 흰다리새우 역시 세계 주요 양식 품목이다.

2) 교역 현황

수산물 수요가 증가함에 따라 2021년 수산물 교역규모는 약 1,640억 달러로 수산물은 세계에서 가장 많이 거래되는 동물성단백질 중 하나이다.⁸⁶⁾ 수산물의 교역규모는 동 기간 세계 소고기 무역 규모의 3.6배, 돼지고기의 5배, 가금류의 8배에 달한다.⁸⁷⁾ 수산물 교역규모는 최근 10년간 연평균 2.4% 증가⁸⁸⁾하며 빠르게 확대되고 있다. 선진국에서는 인도, 에콰도르, 칠레 등 개발도상국으로부터 수산물 수입을 확대해 그 의존도가 증가⁸⁹⁾하고 있음을 알 수 있다. 주요 수입 품목은 새우, 연어⁹⁰⁾ 등 주로 양식 품목이다. 예외적으로 노르웨이에서 EU 27개국 및 영국으로 수출되는 연어가 세계 수산물 교역 시장에서 차지하는 비중이 높은 것으로 나타났다. 노르웨이에서 수출되는 연어는 주로 양식산으로 그 가치만 약 87억 달러가 넘는다.⁹¹⁾

미국, 중국, EU, 영국의 수산물 수입 규모는 약 800억 달러로 전 세계 수산물 교역량의 약 50%에 달한다.⁹²⁾ 특히 최근 5년간 전 세계 수산물 교역규모가 연평균 2% 증가한 데 반해, 같은 기간 미국은 6%, 중국은 10% 증가해⁹³⁾ 수입 규모가 타 국가에 비해 가파르게 증가함을 알 수 있다.

86) Seafood Source 홈페이지(검색일: 2022.6. 26.)

87) Rabobank(2022), p. 1.

88) Seafood Source 홈페이지(검색일: 2022.6. 26.)

89) Rabobank(2022), p. 1.

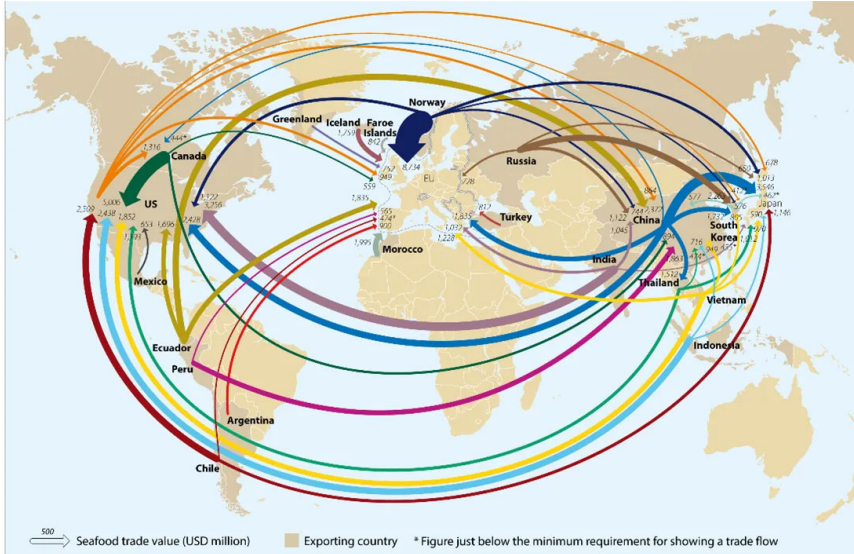
90) 위의 책, p. 1.

91) 위의 책, p. 1.

92) Seafood Source 홈페이지(검색일: 2022.6. 26.)

93) Rabobank(2022), p. 2.

〈그림 3-5〉 세계 수산물 교역 동향(2021년 기준)



자료: Rabobank(2022), Seafood Trade Keeps Growing From Strength to Strength, p. 1.

2021년 기준 미국의 수산물 수입 규모는 약 281억 달러로 2016년 대비 86억 달러 증가했다.⁹⁴⁾ 새우, 연어, 게, 랍스터 등 고부가가치 품목이 수입 규모의 91%를 차지하고 있다.⁹⁵⁾ 이 중 새우와 연어는 주로 양식에서 생산된다.

중국의 수산물 수입 규모는 2021년 기준 약 172억 달러였다.⁹⁶⁾ 2013년부터 2021년까지 수산물 수입량은 연평균 4.4% 증가한 데 반해, 수입금액은 10.1% 증가해 고부가가치 품목의 수입 비중이 증가⁹⁷⁾하였음을 알 수 있다. 주요 수입 품목은 새우, 연어 등 양식 대상 어종이며, 어분 및 어유 등 양어용 사료 원료 수입이 최근 5년간 38% 증가⁹⁸⁾해 중국 내에서 양식 수산물 소비가 증가하고 있음을 미루어 짐작할 수 있다.

94) 위의 책, p. 2.

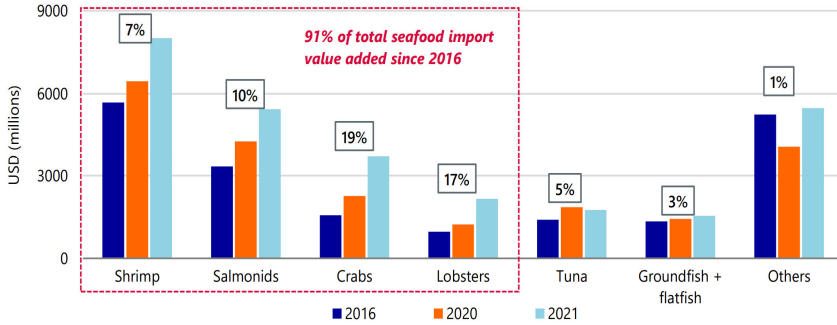
95) 위의 책, p. 2.

96) Seafood Source 홈페이지(검색일: 2022.6. 26.)

97) Rabobank(2022), p. 2.

98) 위의 책, p. 2.

〈그림 3-6〉 미국 주요 수산물 수입 규모 변동

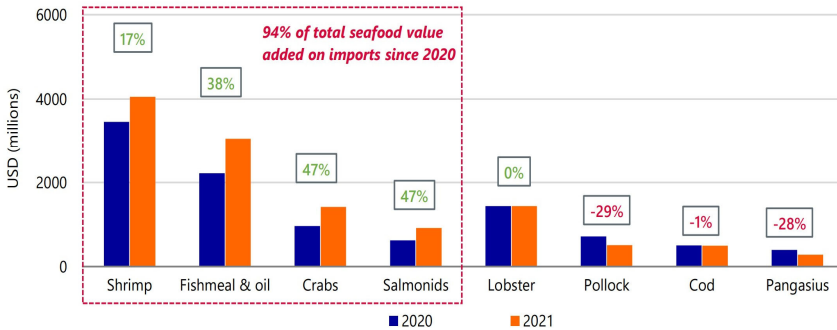


Source: Trade Data Monitor, Rabobank 2022

자료: Rabobank(2022), p. 2.

〈그림 3-7〉 중국 주요 수산물 수입 규모 변동

Figure 3: Demand for salmon and shrimp has rebounded strongly in China



Source: Trade Data Monitor, Rabobank 2022

자료: Rabobank(2022), p. 2.

코로나19 이후 화물 운송⁹⁹⁾ 및 에너지 비용 상승,¹⁰⁰⁾ 중국의 국경 및 도시 봉쇄¹⁰¹⁾ 등으로 인하여 글로벌 수산물 가격이 증가하였으며, 경기침체 장기화¹⁰²⁾가 수산물 수요에 영향을 미칠 것으로 보인다. 여기에 고부가가

99) 아시아타임즈(2022.3.16.)(검색일: 2022.6.26.)

100) 안성배(2022), p. 3.

101) 물류신문(2022.4.28.)(검색일: 2022.6.26.)

102) 조세일보(2022.4.21.)(검색일: 2022.6.28.)

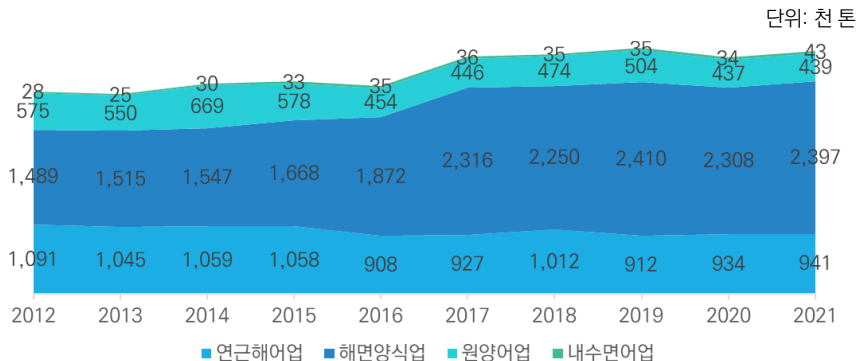
치 양식수산물에 대한 수요 증가가 더해져 전 세계 수산물 가격과 식량안보에 영향을 줄 것으로 분석¹⁰³⁾되며, 식량안보를 위해 생산량 확보가 필요한 상황이다.

2. 국내 양식산업 동향

1) 생산 동향¹⁰⁴⁾

2021년 기준 우리나라 수산물 총생산량은 약 380만 톤으로 최근 10년간 연평균 2.0% 증가했다. 이 중 연근해어업 생산량은 2012년 약 109만 톤에서 2021년 약 94만 톤으로 연평균 1.6% 감소 추세를 보였다. 원양어업 역시 동 기간 생산량이 연평균 3.0% 감소했다. 반면 해면양식 생산량은 2012년 약 149만 톤에서 2021년 약 240만 톤으로 연평균 5.4%씩 증가했다. 내수면어업 생산량은 연평균 4.7%씩 성장률을 보였는데, 이 역시 내

〈그림 3-8〉 2021년 어업별 총생산량



자료: 국가통계포털, 어업생산동향조사, 어업별 품종별 어법별 통계, 2021(검색일: 2022.7.14.)

103) Rabobank(2022), p. 3.

104) 국가통계포털, 어업생산동향조사, 어업별 품종별 어법별 통계, 2012~2021(검색일: 2022.7.14.) 통계 자료를 바탕으로 분석한 내용을 작성함

수면 양식 생산량 증대에 따른 결과다. 자원 감소와 기후변화로 인한 어장 이동의 영향으로 연근해어업 및 원양어업 등 어선어업의 생산량은 감소하고 있지만, 양식수산물 생산량 증대로 우리나라의 수산물 생산량은 지속적인 증가세를 보이는 것으로 나타났다.

해면양식 총생산량 중 해조류의 비중은 2021년 기준 77.0%로 가장 높은 비중을 차지했다. 이는 2012년 대비 8.3%p 늘어난 수준이다. 해조류 생산량은 약 185만 톤으로 최근 10년간 연평균 6.8%씩 증가세를 보였다. 패류는 총생산량의 17.9%를 차지해 해조류 다음으로 생산량이 많았다. 반면 어류양식 생산량은 2021년 8만 9,436톤이다. 이는 총생산량의 3.7% 규모다. 그 외에 기타 수산 동물은 1.0%, 갑각류는 0.4% 등 낮은 비중을 차지했다.

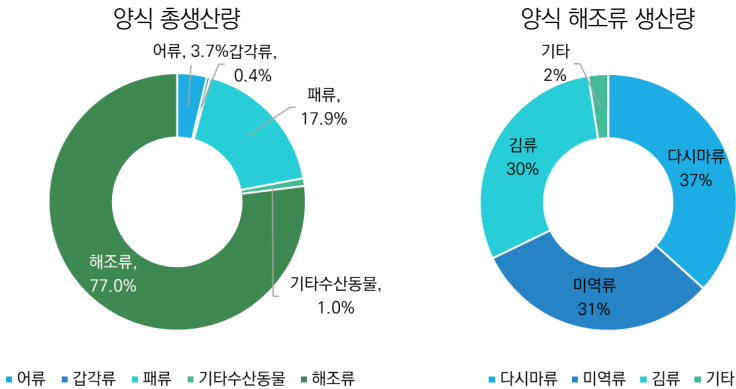
해면양식 총생산금액은 2021년 기준 약 3조 2,905억 원으로 최근 10년간 연평균 5.7%씩 증가했다. 생산금액 기준으로는 어류가 가장 높은 비중을 차지했다. 2021년 어류 해면양식 생산금액은 약 1조 2천억 원으로 해면양식 총생산금액의 36.7% 수준이었다. 패류 생산금액은 어류 다음으로 높았는데, 2021년 해면양식 패류 생산금액은 약 1조 1,140억 원으로 어류와 비슷한 수준이었다. 생산량 비중이 가장 높았던 해조류는 약 7,604억 원을 생산해 세 번째로 높은 비중을 차지했다.

생산량과 생산금액 비중의 차이는 단위당 가격에서 온 것이다. 양식어류의 평균 단위당 가격은 2021년 기준 약 13,488원/kg으로, 패류(2,591원/kg)나 해조류(412원/kg)보다 높았다. 갑각류는 생산량 비중은 가장 낮으나 단위당 가격은 16,112원/kg으로 가장 높았다.

어종별로 살펴보면, 해조류의 경우 다시마, 미역, 김 등 주요 3개 종의 생산량이 전체 해조류 생산량의 약 97.5%에 달했다. 다시마, 미역, 김은 2021년 각 약 68만 톤, 57만 톤, 55만 톤이 생산되었다. 이는 전체 해면양식 생산량과 비교해도 높은 수준이었다. 주요 양식 해조류 3종의 생산량

은 해면양식 총생산량의 75.1%였다. 이를 통해 우리나라 해면양식 생산량은 대부분 다시마, 미역, 김 생산에 따라 증가하고 있음을 알 수 있다.

〈그림 3-9〉 2021년 품종별 해면 양식수산물 생산 비중 (1)

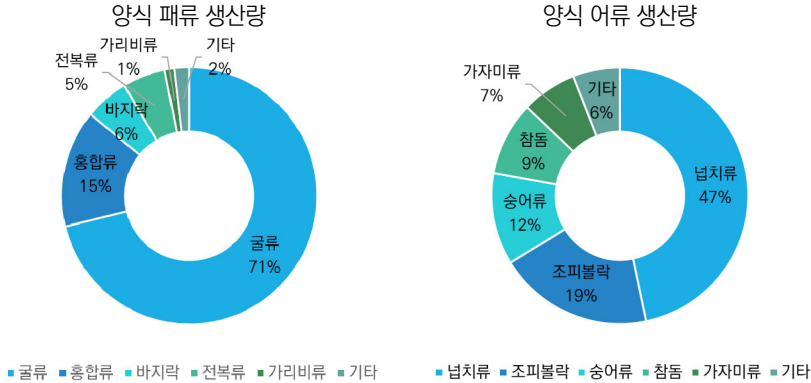


자료: 국가통계포털, 어업생산동향조사, 어업별 품종별 어벌별 통계, 2021(검색일: 2022.7.14.)

패류양식 생산량에서 가장 높은 비중을 차지하는 어종은 굴이었다. 굴은 2021년 한 해 약 30만 톤 생산되었으며, 이는 전체 패류 양식 생산량의 71.2%에 달하는 양이다. 굴 양식 생산량은 2012년 약 28만 톤이었으며, 최근 10년간 큰 변동 없이 생산량이 유지되고 있다. 굴 다음으로 생산량이 많은 양식 패류는 홍합이다. 홍합은 2021년 63,672톤 생산되어 전체 패류 양식 생산량의 14.8% 비중을 차지했다. 그 외에도 바지락, 전복 등이 약 2만여 톤 생산되었으며, 가리비는 약 5천 톤 생산되었다. 패류 중에서도 가리비 양식 생산량이 최근 10년간 약 10배 증가했는데, 이는 2010년대 도입된 남해안 비단가리비 등의 생산량 증가에 따른 것이다.

양식 어류생산량에서 가장 비중이 높은 것은 단연 넙치였다. 2021년 넙치 해면양식 생산량은 41,791톤이다. 이는 전체 어류양식 생산량의 46.7% 수준으로 가장 높은 비중을 차지했다. 다음으로는 조피볼락이 17,473톤, 송어가 10,352톤 생산되었다. 그 밖에도 참돔, 가자미 등의 생산 비중이 높았다.

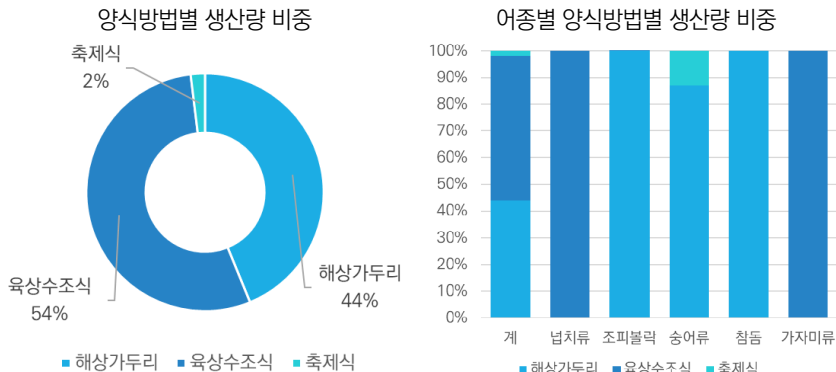
〈그림 3-10〉 2021년 품종별 해면 양식수산물 생산 비중 (2)



자료: 국가통계포털, 어업생산동향조사, 어업별 품종별 어업별 통계, 2021(검색일: 2022.7.14.)

어류양식 방법별로 비교하면, 2021년 기준 육상양식으로 생산된 어류는 48,508톤, 해상가두리는 39,175톤으로 육상에서의 생산 비중이 더 높았다. 이는 어종별 생산량을 비교함으로써 그 이유를 찾아볼 수 있다. 어류 중 양식 생산량이 가장 많은 넙치는 전량 육상수조식 양식장에서 생산된다. 가자미 역시 전량 육상수조식에서 생산되었다. 반면 조피볼락의 99.9%, 송어의 86.9%, 참돔의 100.0%는 해상 가두리에서 생산되고 있다.

〈그림 3-11〉 2021년 어종별 양식방법별 생산 비중



자료: 국가통계포털, 어류양식동향조사, 시도·시군구별 양식방법별 어종별 양식현황(입식, 생산, 사육, 먹이(사료)를 준 량), 2021(검색일: 2022.7.14.)

양식 어류에 대한 사료 투입량은 2012년 약 51만 톤에서 2021년 약 55만 톤으로 연평균 0.8% 증가했다. 같은 기간 생산량은 연평균 1.8% 증가한 것과 비교하면 사료 소비량은 더 적게 증가했다. 이를 통해 사료 전환율 향상을 확인할 수 있다. 2012년 1kg 생산을 위해 사료 6.7kg을 투입했으나, 2021년에는 6.1kg으로 약 9% 감소했다. 이는 배합사료 사용량 증가에 기인한 것이다.

2012년 생사료 사용량은 약 44만 톤으로 전체 사료 사용량의 86.9%에 달했다. 2021년에는 생사료 사용량이 약 46만 톤이었으며, 이는 전체 사료 사용량의 83.8%이다. 같은 기간 배합사료 사용량은 2012년 6.7만 톤에서 2021년 8.9만 톤으로 연평균 3.2% 증가했다.

〈표 3-1〉 주요 양식 방법별 사료 사용량

단위: M/T

어종별	양식 방법별	2012			2021		
		사료 사용량	생사료	배합 사료	사료 사용량	생사료	배합 사료
계	계	510,508	443,382	67,127	548,829	459,651	89,178
	육상수조식	228,971	204,954	24,017	277,670	243,503	34,166
	해상가두리	278,810	237,855	40,955	267,060	214,761	52,299
	축제식	2,728	573	2,154	4,100	1,386	2,713

자료: 국가통계포털, 어류양식동향조사, 시도·시군구별 양식방법별 어종별 양식현황(입식, 생산, 사육, 먹이(사료)를 준 량), 2012, 2021(검색일: 2022.7.14.)

배합사료 사용량이 증가세에 있지만, 사용률은 10%대로 낮았다. 특히 주요 양식 어종인 넙치는 생사료 사용량이 증가했다. 2012년 90.7%였던 생사료 사용률이 2021년 92.6%로 증가했으며, 그 양은 약 24만 톤이었다. 반면 가자미와 송어는 2012년부터 배합사료 사용률이 90%를 상회했다. 배합사료를 주로 사용하는 어종과 생사료를 사용하는 어종에 따라서 사료 효율이 다르게 나타났다. 생사료를 90% 내외로 사용하는 넙치, 조피볼락, 참돔의 경우 1kg 생산을 위해 사료를 6.3~7.7kg 투입해야 했다. 반면 배

합사료를 95% 이상 사용하는 송어, 참돔은 1kg 생산에 2.2~2.6kg의 사료를 사용했다.

〈표 3-2〉 주요 양식 어종별 사료 사용량

단위: M/T

어종별	양식 방법별	2012			2021		
		사료 사용량	생사료	배합 사료	사료 사용량	생사료	배합 사료
계	계	510,508	443,382	67,127	548,829	459,651	89,178
넙치류	계	225,098	204,274	20,823	262,445	243,153	19,292
조피볼락	계	167,103	151,974	15,129	127,712	112,722	14,990
송어류	계	16,310	220	16,090	27,365	1,372	25,993
참돔	계	64,292	58,749	5,543	64,290	59,732	4,558
가자미류	계	1,864	474	1,389	13,625	38	13,587

자료: 국가통계포털, 어류양식동향조사, 시도·시군구별 양식방법별 어종별 양식현황(입식, 생산, 사육, 먹이(사료)를 준 량), 2012, 2021(검색일: 2022.7.14.)

우리나라 수산물 생산에서 연근해어업과 원양어업 등 잡는 어업의 비중은 줄어들고 해면 및 내수면 양식업 등 기르는 어업의 비중이 늘고 있다. 그러나 양식업의 성장은 해조류를 중심으로 이루어지고 있으며, 단백질 공급원인 어류, 패류, 갑각류 등의 비중은 상대적으로 낮았다. 해면양식 어류 생산량은 최근 10년간 증가하고 있으나, 그 증가 폭은 해조류에 비해 낮았다. 부가가치가 상대적으로 낮은 해조류 중심의 성장이 이루어지면서 최근 5년간 양식 해조류의 가격은 16% 감소한 데 반해 양식 어류 가격은 15.5%, 패류는 23.3% 증가했다.

양식 어류생산량 증가와 함께 사료 사용량도 증가하고 있으며, 특히 배합사료 증가율이 생사료에 비해 높았다. 생사료를 주로 먹이로 공급하는 어종은 생산을 위해 더 많은 사료가 필요하지만, 배합사료를 주로 사용하는 경우 생사료 대비 약 1/3의 양으로 같은 양의 수산물을 생산할 수 있었다. 따라서 현장에서 적용할 수 있는 배합사료 기술개발이 필요한 상황이다.

제2절 양식산업 탄소배출 현황 및 탄소 경쟁력

1. 양식산업 탄소배출 현황

전 세계 어류 소비량의 52%를 공급¹⁰⁵⁾하는 중요한 산업인 양식산업은 온실가스 배출량이 적어 탄소중립 시대에 적합한 단백질 공급원이다. 소, 돼지, 닭, 양 등 주요 축산물 대비 양식수산물의 온실가스 배출량과 배출 강도가 낮다. 2017년 기준 양식수산물의 온실가스 총배출 추정량은 245.4 톤이다.¹⁰⁶⁾ 인간 활동으로 발생하는 온실가스 총배출 추정량¹⁰⁷⁾의 0.49% 수준이다. 반면 소고기의 온실가스 총배출량은 3천 톤 이상이고, 돼지고기, 닭고기보다 양식수산물의 온실가스 배출량이 적다.¹⁰⁸⁾

양, 염소 등 육류 생산 시 발생하는 온실가스는 양식수산물과 비슷한 수준이었으나, 발생 강도는 약 30kgCO₂e/kgCW로 양식수산물의 약 4배 수준이다.¹⁰⁹⁾ 패류 양식은 GHG 배출량이 어류에 비해 적다. 굴은 생산과정에서 메탄을 발생시키지 않고, 미미한 양의 아산화질소 및 이산화탄소를 배출한다.¹¹⁰⁾ Ray et al.(2019)은 미국 국민이 소고기로부터 얻는 단백질을 굴에서 추출한 단백질로 대체할 경우, 자동차 1,080만 대를 줄이는 것과 같은 온실가스 감축 효과가 나타날 것이라 분석했다.¹¹¹⁾

양식수산물 중에서도 해조류의 온실가스 배출량이 가장 적으며, 온실가스 흡수원으로서 역할을 하고 있다. 해조류 양식 시 톤당 22kg의 온실가스를 배출하는 반면, 1km² 규모의 해조류 양식장에서 온실가스를 연간 1,110

105) FAO(2022e). p. 72.

106) MacLeod(2020), p. 3.

107) UNEP(2018), p. 5.는 2017년 총 인위적 탄소 배출량을 53.5GtCO₂eq/년으로 추정했다.

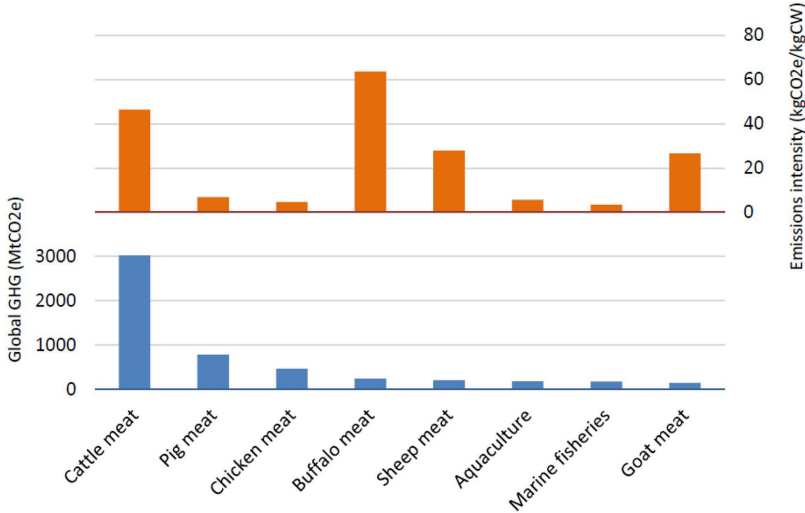
108) MacLeod(2020), p. 3.

109) 위의 책, p. 4.

110) Ray et al.(2019), p. 9118-9123.

111) 위의 자료, p. 9125.

〈그림 3-12〉 주요 수산 및 축산 생산 품종별 GHG 배출량 및 배출 강도



자료: MacLeod(2020), p. 4.

톤 흡수할 수 있다.¹¹²⁾¹¹³⁾ 해조류와 마찬가지로 패류도 탄소 배출량이 낮은 편에 속한다. 패류 양식의 온실가스 배출량은 톤당 392kg이다.¹¹⁴⁾ 반면 패류 대비 8.3배의 온실가스를 배출하는 어류양식은 톤당 최소 3,271kg에서 최대 44,400kg까지 배출한다.¹¹⁵⁾

이러한 차이는 양어용 사료의 사용 여부에 따라 나뉜다. 양식생산은 양성 전(Upstream) 단계, 양성단계, 양성 후(Downstream) 단계를 거친다. 양성 전 단계에서는 양식생산에 필요한 사료와 종자 등 투입 요소의 생산 및 공급이 이루어진다. 양어용 사료에서 발생하는 온실가스는 크게 토지이용 변화(Land-use Change, 이하 LUC)와 원료 생산과정에서 배출된다.

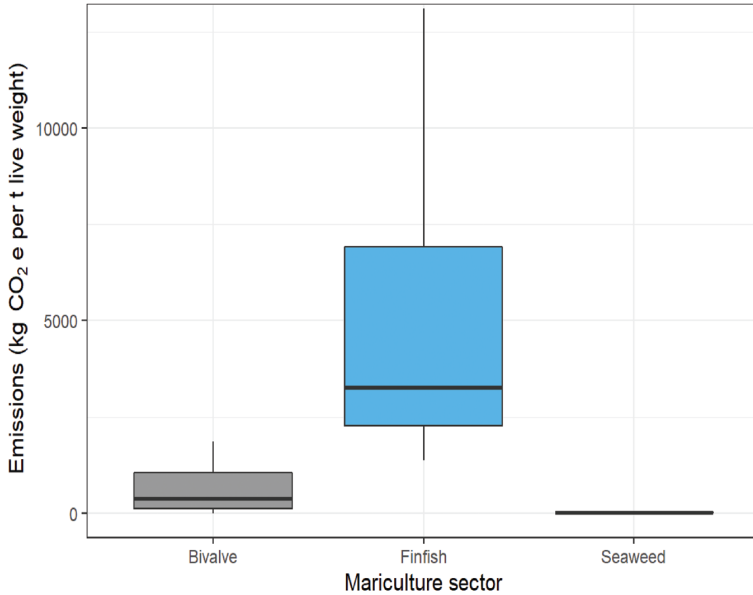
112) Jones et al.(2022), p. 127.

113) Froehlich et al.(2019), p. 3089.

114) Jones et al.(2022), p. 127.

115) 위의 책, p. 127.

〈그림 3-13〉 양식생산 부류별 총 GHG 배출량 비교



자료: Jones et al.(2022), p. 127

LUC는 “인간의 토지이용에 따라 발생하는 배출량을 산정¹¹⁶⁾”하는 것으로 인간의 경제적 이용을 위해 자연 상태의 토지를 농업 및 축산에 맞게 변경하는 과정에서 발생하는 탄소저장량 변화와 온실가스 발생을 포함한다.¹¹⁷⁾ 이는 사료 원료인 농작물과 동물성단백질 생산을 위하여 토지를 농지로 변경하는 과정에서 발생하는 간접적인 온실가스 발생 요인이다.

또한 사료의 주요 원료인 어분을 비롯하여 농축산물 생산과정과 가공공장 가동 시 온실가스가 배출된다. 특히 어분은 어업에서 생산된 수산물을 활용하기 때문에 화석연료 사용, 수산자원 고갈, 해양 오염 등의 부차적인 문제를 발생시켜 온실가스 배출이 증가하는 원인이 된다.¹¹⁸⁾¹¹⁹⁾

116) 박성진 외(2020), p. 1.

117) 홍지형(2012), pp. 1-2.

118) 연합뉴스(2017.9.21.)(검색일: 2022.6.27.)

119) 주간경향(2021.9.3.)(검색일: 2022.6.27.)

해조류, 패류, 어류 등은 수산종자 생산이 필요하다. 해조류와 패류는 일부 자연 채묘가 가능하지만, 어류는 어미로부터 인위적으로 알을 받아 부화장에서 부화시키고 중간 육성한다.¹²⁰⁾ 이 과정에서 패류나 해조류보다 더 많은 양의 온실가스를 발생시킬 수 있다.¹²¹⁾

양성 과정에서는 관리선 등을 운영하기 위한 연료 사용 및 에너지 사용, 기반 시설 설치 및 유지보수가 온실가스 발생원으로서 어종과 관계없이 공통으로 적용된다. 그러나 사료 투입, 폐사 등으로 인해 해양 오염, 부영양화가 발생하고, 오염된 양식 용수 정화를 위한 수처리가 필요하다.¹²²⁾ 이런 이유로 어류양식에서는 타 품종에 비해 온실가스 배출량이 많다.

〈표 3-3〉 양식생산 단계별 온실가스 배출원

생산단계	발생 원인	어류	패류	해조류
양성 전 (upstream)	어란 및 치어 등 종묘 생산 및 공급	○	△	△
	사료 원료 생산을 위한 토지이용 변화(LUC) 및 황폐화	○	X	X
	사료 생산 및 가공(직접배출, 사료 원료 생산)	○	X	X
양성 (on farm)	사료 운송	○	X	X
	연료 사용	○	○	○
	에너지 사용	○	○	○
	기반 시설 및 유지보수	○	○	○
	연안 및 조간대 용도 변경 및 황폐화	○	△	△
	오염 및 부영양화, 수처리	○	△	△
	액화 산소 등 화학물질 사용	○	△	△
양성 후 (downstream)	가공	○	○	○
	포장 및 빙장	○	○	○
	냉동·냉장 보관	○	○	○
	운송	○	○	○

주: 각 부류별로 배출원과 연관관계가 높으면 ○, 낮으면 X, 상황에 따라 변동성이 있으면 △로 표기
자료: Jones et al.(2022), p. 126.

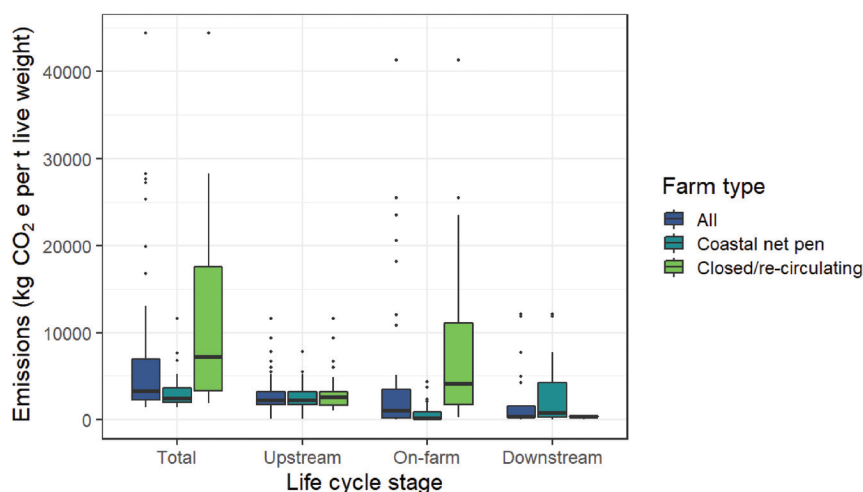
120) 직업백과, 수산종묘생산(검색일: 2022.6.27.)

121) Jones et al.(2022), p. 125, 127.

122) 위의 책, p. 128.

양식어류 양성 방법 중 순환여과식 양식과 같은 폐쇄적인 양식이 양성 과정에서 가두리 양식보다 더 많은 온실가스를 배출한다. 이는 수처리 과정에서 소모하는 에너지와 연료 사용량이 가두리 양식에 비해 높기 때문이다. 우리나라 뱀장어 양식 생산과정에서 발생하는 온실가스는 뱀장어 1kg 당 18.03kg/년¹²³⁾이며, 같은 조건의 넙치 양식에서는 24.33kg/년¹²⁴⁾의 온실가스가 배출되었다. 이는 유통비용을 제외한 배출 규모로, 활어 운송을 위해 활어 트럭과 액화산소, 탄산칼슘(CaCO_3)을 소비해야 하므로 배출량이 증가하게 된다. 8천 m^2 의 대규모 뱀장어 양식장의 경우 활어 운송과정에서 온실가스를 연간 약 3,419톤을 배출한다.¹²⁵⁾

〈그림 3-14〉 양식생산 단계 및 양식 방법별 총 GHG 배출량 비교



자료: Jones et al.(2022), p. 128.

양식수산물은 다른 단백질 공급원에 비해 생산과정에서 더 적은 온실가스를 발생시킨다. 대상 양식어종 중에서도 해조류는 탄소를 저장하는 온실가스를

123) 김중현 외(2014), pp. 60-66.

124) 양용수 외(2015), pp. 616-622.

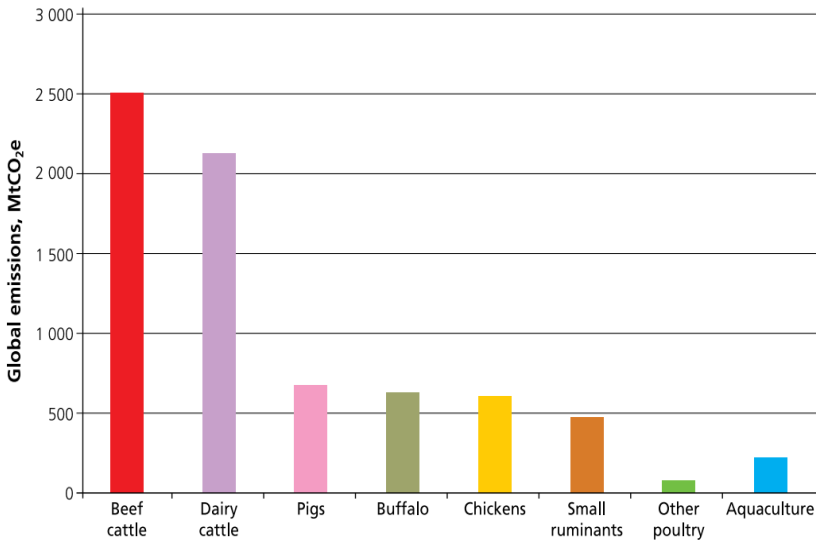
125) 김중현 외(2014), pp. 63-64.

흡수원 역할을 하며, 패류와 더불어 온실가스 발생량이 적었다. 반면 양식 어류는 사료 및 종자 생산, 양성 시설 운영, 유통 등 생산 전 과정에 걸쳐 온실가스 발생량이 다른 양식 어종에 비해 높았다. 특히 순환여과식 양식과 같은 고도화된 폐쇄성 양식장에서 수처리를 위한 에너지 소비가 증가함에 따라 온실가스 배출이 늘어나는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

2. 양식산업 탄소 경쟁력

양식수산물은 축산물 등 다른 동물성단백질 공급원의 생산과정과 비교하면, 더 적은 온실가스를 발생시킨다. 2013년 기준 패류 및 어류 양식업의 총 온실가스 배출량은 인간 활동으로 배출되는 온실가스 총량 대비 0.45% 수준이지만, 축산업은 14.5%의 비중을 차지하고 있다.¹²⁶⁾ 그러나 전 세계 단백질

〈그림 3-15〉 주요 단백질 공급원별 GHG 배출량(2013년 기준)



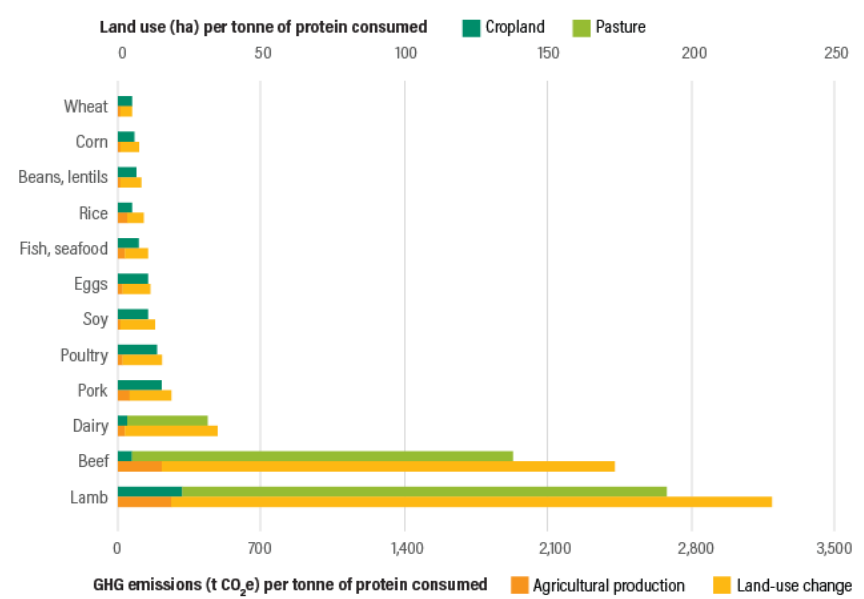
자료: MacLeod et al.(2019), p. 15.

¹²⁶⁾ MacLeod et al.(2019), p. 15.

공급량 중 수산물이 7%,¹²⁷⁾ 축산업이 33%¹²⁸⁾인 점을 고려한다면, 축산업은 단백질 공급량 기준으로 수산업에 비해 6.8배 많은 온실가스를 배출하는 것으로 해석할 수 있다.

특히 소, 양 목축업에는 사료 생산 및 사육을 위한 토지이용이 타 축산업보다 많은데, 이는 토지이용 전환에 따른 탄소배출을 일으킨다. 또한 농경지 및 목축지 사용이 증가하며, 기존에 탄소저장 역할을 하는 숲이 파괴되는 등 온실가스 배출 요인이 된다. 이에 따라 단백질 소비량 당 온실가스 배출량에서 소, 양의 비중이 높다. 양과 소는 각각 약 3,100톤, 약 2,500톤 배출했다.¹²⁹⁾ 이는 150톤을 배출한 수산물¹³⁰⁾에 비해 많은 배출량이다.

〈그림 3-16〉 주요 농축수산물의 단백질 소비량당 토지 사용량 및 GHG 배출량



자료: WRI 홈페이지(검색일: 2022.8.11.)

127) 위의 책, p. 15.

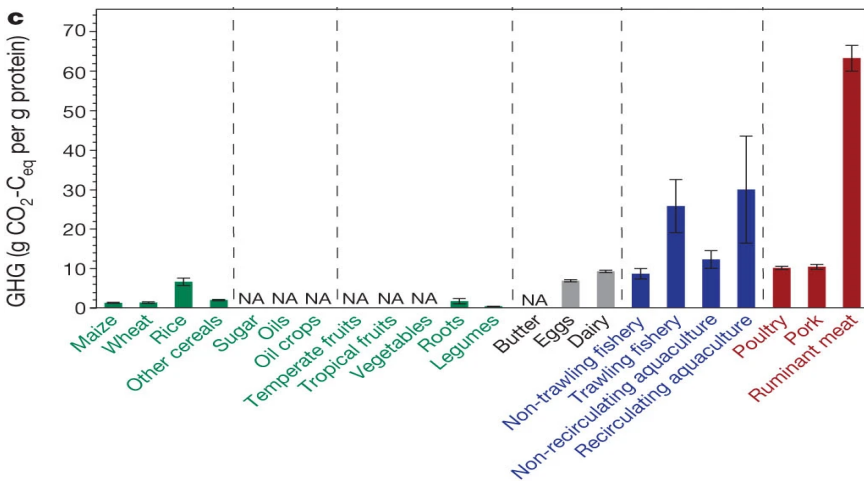
128) 위의 책, p. 15.

129) WRI 홈페이지(검색일: 2022.8.11.)

130) 위의 자료

전 주기 평가를 통해 농·축·수산물 간 온실가스 발생량을 비교한 결과 수산물은 평균적으로 소고기에 비해 적은 양의 온실가스를 배출하는 것을 알 수 있었다. 단백질 1g당 온실가스 배출량 비교에서 소고기는 콩류에 비해 약 250배의 온실가스를 배출하였으며, 수산물의 평균 온실가스 배출량에 비해 4배 가까운 양을 배출하는 것으로 나타났다.¹³¹⁾

〈그림 3-17〉 단백질 g당 온실가스 배출량



자료: Tilman & Clark(2014), pp. 518-522.

수산물 중에서도 어업과 양식업 간 배출량 차이도 나타났다. 어업 생산량 1kg당 이산화탄소 배출량은 1~3kg인데 반해, 양식수산물은 같은 양을 생산하기 위해 2~7kg의 이산화탄소가 배출되었다.¹³²⁾ 트롤 어업과 비트롤 어업 간 탄소 배출량은 약 3배 가량 차이가 났으며, 순환여과식 양식과 비순환여과식 양식 간에도 2배의 배출량 차이를 보였다.¹³³⁾ 어구 인망 과정에서 에너지 소모가 많은 트롤 어업은 해조류, 패류 해면양식 및 가두리, 유수식 양식에

131) Tilman & Clark(2014), pp. 518-522.

132) Global Seafood Alliance 홈페이지(검색일: 2022.8.13.)

133) Tilman & Clark(2014), pp. 518-522.

비해 많은 양의 온실가스를 발생시키지만, 순환여과식 양식에서 더 많은 온실가스가 발생한다. 이는 사육수 여과 과정에서 에너지 소비가 많기 때문이다.

순환여과식 양식은 사육수의 50~95%를 여과하여 재사용하기 때문에 사육수 취수를 위한 에너지 사용이 적은 생산방법이다. 또한 안정적인 수온과 수질을 유지할 수 있고 외부에서 유입되는 질병을 차단할 수 있어 폐사를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 무엇보다 사육수 취수량이 적은 만큼 해상가두리 및 육상수조식에 비해 입지가 자유로워 시장 접근성이 좋고, 물류 과정에서 발생하는 온실가스 배출량을 줄일 수 있다.¹³⁴⁾

육상수조식 양식은 집약적인 기술이 필요하고 초기 투자 비용이 많고, 투자 회수 기간이 길어 장기간 양식장을 유지할 수 있는 자본력이 필요해 널리 보급되지 않았다. 또한 에너지 사용량이 타 양식 방법에 비해 많다는 단점이 있다. 생산량 1kg당 에너지 소비량은 유수식 양식에서 약 10~12kWh인 반면, 순환여과식 양식에서는 적게는 15kWh에서 많게는 30kWh로 약 24~40% 많았다.¹³⁵⁾

양식산업은 지속가능한 단백질 공급원으로 생각되지만, 생산방법에 따라 어선어업보다 많은 양의 온실가스를 배출하고 있다. 특히 첨단양식 방법은 전통적인 양식 방법보다 더 많은 온실가스를 발생시킨다는 우려가 있다. 그럼에도 양식업은 탄소중립 관점에서 어업보다 더 적합한 생산방법일 수 있다. 탄소중립은 온실가스 발생에만 초점을 맞추는 것이 아니라 생산 전 과정에 걸쳐서 온실가스 흡수, 즉 블루 카본 개념도 고려하기 때문이다. 배출량을 놓고 보면 양식산업이 어선어업보다 경쟁력이 낮을 수 있으나 양식수산물이 양성 과정에서 탄소를 흡수하는 역할을 하고 있어 순 배출량은 양식업이 적을 수 있다.

134) Liu et al.(2016), pp. 1-12.

135) Ahmed & Turchini(2021), pp. 1-14.

생태적접근양식(Ecosystem Approach to Aquaculture, EAA), 농수산복합양식(Integrated Aquaculture-Agriculture, IAA), 생태통합양식(Integrated Multi-Trophic Aquaculture, IMTA) 등 다양한 양식 어장 녹화를 통해 연간 약 9,700만 톤의 탄소를 격리할 수 있다.¹³⁶⁾ 이는 2017년 기준 양식 총 온실가스 배출량의 39.5%에 달하는 양이다. 즉, 양식 방법에 따라 탄소 흡수량을 늘려 탄소중립을 실천할 수 있다는 점에서 어선어업보다 탄소 중립적이라 할 수 있다.

〈표 3-4〉 양식장 녹화 방법별 탄소격리량

양식어장 녹화방법	잠재적 면적(ha) 및 생산량(톤/년)	탄소 격리율 ^{주)}	총 탄소격리량 (백만 톤/년)
IAA	450만 ha	21.2	95.4
맹그로브	47만 ha	1.15~1.39	0.54~0.65
해조류	82만 ha	0.54~0.83	0.44~0.68
패류	403만 톤	0.06~0.12	0.24~0.48
총합			97

주: $\text{tha}^{-1}\text{year}^{-1}$ 및 $\text{t/t yield year}^{-1}$

자료: Ahmed et al.(2016), pp. 468-477.

또한 어업은 어장으로의 이동, 인망 및 양망, 수산물 운반과정에서 선박을 이용하기 때문에 화석연료를 사용한다. 반면 양식업은 선박을 이용한 이동 거리가 짧고, 육상양식에서는 전기사용량이 많으므로 전기생산 방법에 따라 온실가스 배출량이 달라질 수 있다. 재생에너지를 사용하는 순환여과식 양식장은 일반 전기를 사용하는 양식장보다 13.3%~53.2% 낮은 수준의 탄소를 배출한다.¹³⁷⁾ 양식산업에서 탄소 배출량이 가장 많은 사료의 사료 전환율(FCR)을 개선하고, 해사가두리 양식보다 사료의 효율이 높은 순환여과식 방식을 채택함으로써 어분 사용량을 줄여 온실가스 배출량을 저감할 수 있다.

136) Ahmed et al.(2016), pp. 468-477.

137) Ahmed & Turchini(2021), pp. 1-14.

〈표 3-5〉 양식 방법 및 에너지 사용 방법에 따른 온실가스 배출량

양식 시스템	국가	어종	배출량 (kgCO ₂ eq/kg)
RAS(수력발전)	미국	연어	3.73
RAS(일반 전기)	미국	연어	7.01
RAS(100% 재생 불가능한 에너지)	스페인	대구	16-27
RAS (재생에너지 50%, 비재생에너지 50%)	스페인	대구	12-18
RAS(전기 및 기름 가열 히터)	캐나다	연어	28
가두리 양식(발전기)	캐나다	연어	2
연못 양식(토지 용도 변경 없음)	방글라데시	나일 틸라피아	1.58
연못 양식(토지 용도 변경 포함)	방글라데시	나일 틸라피아	1.81
연못 양식(토지 용도 변경 없음)	인도	주요 잉어	1.84
연못 양식(토지 용도 변경 포함)	인도	주요 잉어	2.12
연못 양식(토지 용도 변경 없음)	베트남	줄무늬 메기	1.37
연못 양식(토지 용도 변경 포함)	베트남	줄무늬 메기	1.61

자료: Ahmed & Turchini(2021), pp. 1-14.

제3절 시사점

최근 10년간 세계 수산물 생산량 중 어선어업 생산량은 감소하였지만, 양식 생산량은 증가하고 있다. 2016년 이후 양식을 통한 어류생산량이 어선어업을 앞지르고, 2018년에는 전체 어류 소비량의 52%가 양식을 통해 생산되고 있다. 수산물 교역규모는 소고기 교역의 3.6배, 돼지고기의 5배, 가금류의 8배에 달하고, 최근 10년간 연평균 2.4%씩 증가하고 있다.

우리나라 수산물 생산에 있어 연근해어업 생산량이 최근 10년간 연평균 1.6%씩 감소하였지만, 해면 양식업 생산량은 연평균 5.4%씩 성장하였다. 이는 세계적으로 생산이 확대되는 양식어류가 아니라 연평균 6.8%씩 증가한 해조류 생산에 의한 영향이 크다.

2021년 기준 양식어류 생산량은 약 9만 톤 수준으로 총생산량의 3.7%에 불과하다. 양식수산물 생산량 측면에서는 어류양식이 주도하는 해외 양식산업 성장과는 다른 경로이다. 그러나 우리나라 양식어류 생산금액은 약 1조 2천억 원의 규모로 해면양식 총생산금액의 36.7%를 차지하고 있다. 생산금액 측면에서 어류는 양식산업 성장을 이끄는 대표 품종이다.

세계 양식산업의 성장 속에 식량문제 해결에 기여가 가능한 어류양식이 성장하고 있다. 우리나라 어류양식은 해상에서의 빈번한 자연재해 또는 해수 수질 악화 등에 따른 다양한 질병 발생에 의한 폐사 등을 막고, 양식업의 첨단화, 규모화를 위해 육상양식 시스템으로 전환이 필요한 시점이다.

그러나 넙치, 뱀장어 등 육상 어류양식은 농사용(을) 전력 사용량이 상대적으로 매우 높은 것으로 나타났다. 특히 기존 양식의 한계 극복을 위해 전국적으로 스마트양식 클러스터 사업이 추진되면서 육상양식이 순환여과식 양식 방법으로 전환되는 시점에 탄소중립은 중요한 이슈로 부상할 가능성이 크다.

국내외 연구 결과를 종합하면, 축산업보다 양식산업이 탄소 배출량과 탄소 배출 강도는 낮지만, 수산물 양식에서는 패류, 해조류보다 어류의 탄소 배출량이 많다. 어류양식은 가두리보다 육상양식이, 육상양식 중 순환여과식 양식 시스템이 탄소 배출량이 많다.

〈표 3-6〉 양식산업 온실가스 배출 관련 선행연구 결과 종합

선행연구	GHG 배출량 추정범위	비교 대상	연구 결과
MacLeod, M. et al. (2020)	- 투입 요소 생산-출하 중 배출량 - 변수: 사료 원료 생산 및 가공·유통, 에너지 사용, 비료, 사육 생물 배출 - 단위: 비교 대상별 총 GHG 배출량, 도축 후 무게(kgCW) 당 GHG 배출량	- 축산물(소, 돼지, 닭, 양, 염소, 버팔로) - 수산물(해면 어업, 양식)	- 축산물 대비 총 GHG 배출량 적음 - 도축 후 무게(CW) 단위(kg)당 배출 강도는 해면어업, 닭, 양식 수산으로 낮음
Ray et al. (2019)	- 입식-출하 중 배출량 - 변수: 사료, 분뇨, 장내발효 가스 - 단위: 단백질 1g당 GHG 배출량	- 축산물(소, 양, 돼지, 닭) - 수산물(굴)	- 단백질 1kg당 GHG 배출량은 소가 가장 많음 - 굴은 소의 0.1% 수준의 GHG 배출
Jones et al. (2022)	- 투입 요소 생산-유통 등 생산 전 단계 배출량 - 변수: 종자 생산 및 공급, 토지이용 변화, 사료 원료 생산, 사료 가공 및 운송, 연료, 에너지, 시설 유지 보수, 폐수, 수처리, 기타 화학물질, 가공, 포장, 냉장·냉동, 운송 - 단위: 생체 무게(t) 당 GHG 배출량	수산물(어류, 이매패류, 해조류)	- 어류는 패류 및 해조류 대비 많은 GHG 배출 - 어류는 가두리보다 순환여과 등 폐쇄형 양식에서 더 많은 GHG 배출 - 폐쇄형 양식은 입지의 제약이 적어 생산 후 단계(가공, 저장, 유통)에서 더 적은 GHG 발생
MacLeod, M. et al. (2019)	- 투입 요소 생산-출하 중 배출량 - 변수: 사료 원료 생산 및 가공·유통, 에너지 사용, 비료, 사육 생물 배출 - 단위: 비교 대상별 총 GHG 배출량	- 축산물(소, 젓소, 돼지, 버팔로, 닭, 소형 반추동물, 기타 가금류) - 수산물(양식 전체)	- 수산물은 인간 활동으로 배출되는 총 GHG의 0.45% 배출 - 공급량 기준 축산물은 수산물 대비 6.8배의 온실가스를 배출

선행연구	GHG 배출량 추정범위	비교 대상	연구 결과
WRI (검색일: 2022.8.11.)	• 입식-출하 중 배출량 • 변수: 토지이용전환, 장내발효 가스, 분뇨, 사료 유통 경로, 사료 및 비료 사용량, 에너지, • 단위: 단백질 단위 소비량(t) 당 GHG 배출량	• 농산물(밀, 옥수수, 콩, 쌀, 대두) • 축산물(소, 돼지, 양, 닭, 계란, 유제품) • 수산물	• 소, 양 등 반추동물은 재생산성이 떨어지며 목초지 사용이 많아 토지이용전환에 따른 GHG 배출량이 많음 • 수산물은 토지이용 전환에 따른 배출이 농산물 수준으로 적음
Tilman & Clark (2014)	• 전과정평가(LCA) • 변수: 555개의 LCA 분석 선행 연구에서 도출된 82개 품목에 대한 GHG 배출량 • 단위: 칼로리(Kcal), 1회 제공량, 단백질 단위중량(g) 당 배출량	• 농산물(곡물, 설탕, 과일 채소) • 수산물(트롤, 비트롤, 양식, 순환양식) • 축산물(육류, 유제품, 계란)	• 단백질 1g 당 온실가스 배출량은 소, 양 등 반추동물이 가장 많음 • 수산물 중에는 트롤 어업과 순환양식에서 많이 배출

자료: 각 선행연구를 바탕으로 저자 작성

스마트양식으로 대표되는 육상 순환여과식 양식 시스템은 첨단화, 규모화 경향을 보이면서 가두리 양식보다 탄소 배출량이 많다. 해외 연구에 따르면 사육수 여과 과정에서 에너지 소비가 많아 트롤 어업의 탄소 배출량보다 많은 것으로 분석되고 있다. 탄소중립 이슈는 기존 재래식 양식보다 탄소배출이 많은 첨단양식 시스템으로의 전환에 부정적인 영향을 미칠 수 있다.

그러나 육상양식의 탄소배출에 대해 검토해야 할 사항은 국내외에서 진행된 탄소 배출량 추정의 엄밀성이 떨어지고 있어 해상작업에 사용되는 관리선 사용, 배합사료와 생사료 사용, 교역과 유통과정에서의 탄소 배출량 등에 대한 정밀한 비교분석이 필요하다.

가두리 양식의 경우, 해상작업으로 인해 관리선이 필요하다. 관리선이 전기선으로 대체되지 않는 한 관리선을 이용하게 되면 화석연료의 사용으

로 직접 배출량이 증가한다는 문제가 발생한다. 현재 육상양식이 전기 사용에 따른 간접배출이 높은 상황이라서 재생에너지로의 에너지원 전환 시에는 오히려 해상양식보다 빠르게 탄소중립을 달성할 가능성도 크다.

육상에서의 양식 방법이 순환여과식 양식 시스템을 사용하더라도 사료 전환율이 해상보다는 높다는 장점이 있다. 사료 사용에 따른 탄소배출이 과다한 상황에서 사료효율 개선에 따른 탄소 저감의 효과가 클 것으로 예상된다. 여기에 전적으로 배합사료를 사용하게 되는 순환여과식 양식에서는 생사료와 배합사료의 사용에 따른 탄소 배출량 추정이 필수적이다.

배합사료 생산공정은 전기사용량이 많다. 그러나 배합사료에 들어가는 어분의 사용 비중에 따라 탄소배출은 영향을 받게 된다. 어분 생산을 위한 어선어업, 주로 남미에서 수입되는 어분의 수입경로에 따라 다른 탄소 배출량이 계산될 수 있다. 물론 생사료를 전적으로 사용하면 배합사료 사용에 비해 전기 사용은 줄어들겠지만, 어선어업 탄소 배출량과 냉동 생사료 유통 및 수입에 따른 탄소 배출량으로 인해 배합사료 사용과 생사료 사용 중 어떤 것이 탄소 배출량 저감에 유리한지 판단하기 쉽지 않다.

따라서 우리나라 양식산업의 성장성을 고려한 탄소중립 대응 전략 마련을 위해서는 종자, 사료 등 업스트림 단계, 양성단계, 수출입, 유통 등 다운스트림 단계 등에 대한 종합적인 고려를 통해 탄소중립 관점에서 양식산업의 성장전략을 재조정할 필요가 있다. 또한 NDC 목표 달성을 위해서는 양식산업 성장을 위한 생산방식을 설정하고, 추가적인 감축 수단을 발굴하는 선제적 정책 대응이 필요하다.

〈그림 3-18〉 양식산업 동향 및 탄소 경쟁력 시사점



자료: 저자 작성

04

육상양식 탄소배출 및 정책효과 분석

제1절 개요

국제사회 탄소중립 이행 요구가 강화될 전망이다. 탄소중립은 달성해야 할 지구적 과제가 되었다. 탄소중립 이슈를 피해 갈 수 있는 국가, 산업, 기업은 없다. 지금까지 화석연료 사용에 따른 직접배출을 줄이는 노력을 했다면, 전기 사용에 따른 간접배출도 재생에너지 사용 등 감축 수단을 마련하여 탄소를 줄여야 하는 시기로 접어들고 있다. 수산업에서는 화석연료 사용이 많은 어선어업이 탄소중립의 대상이 되었지만, 세계 양식산업이 어선어업을 대체하면서 중요한 탄소중립 대상이 되고 있다. 그 대상 양식은 사료를 사용하고, 전력을 많이 사용하는 양식어류를 생산하는 육상 대규모 양식장이 될 전망이다.

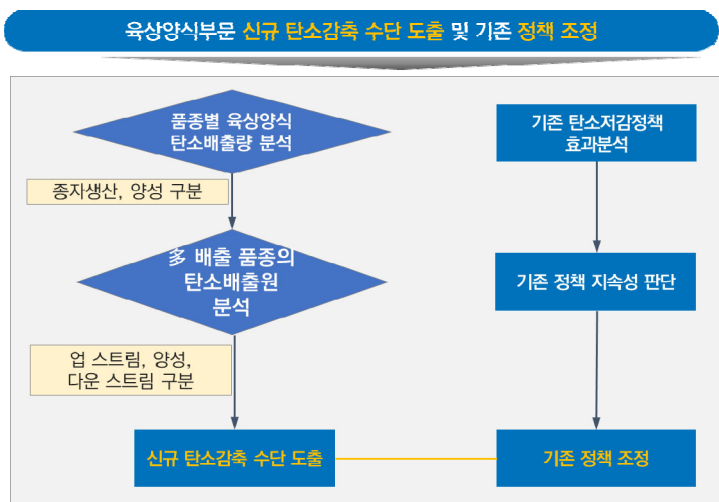
우리나라에서도 양식어류는 생산금액 기준 36.7%를 차지하는 양식산업에 있어 주력 품목이다.¹³⁸⁾ 특히, 탄소 배출량이 많을 것으로 예상되는 어류를 주로 양식하는 스마트양식 클러스터 사업이 확대됨에 따라 기존 양식산업 에너지 절감 사업 외에도 첨단 육상양식 시스템의 탄소 감축 수단 마련을 통한 사전 대응이 필요하다.

138) 본 보고서의 p.60을 참고하여 작성

본 연구에서는 탄소 감축 대상 품종을 선정하기 위해 품종별 육상양식 탄소 배출량을 분석한다. 육상양식장은 종자 생산을 위한 양식장과 성어를 생산하기 위한 양식장으로 구분할 수 있으므로, 육상양식장을 치어 생산과 양성으로 구분하여 분석하였다. 품종별 육상양식장 탄소 배출량 추정을 통해 국내 육상양식 품종 중 우선 감축이 필요한 품종을 선정한다. 선정된 품종을 양식산업 공급망 상에 업스트림 단계, 양성단계, 다운스트림 단계로 구분하여 탄소 배출원을 분석한다.

탄소 배출원 분석을 통해 단계별 공정에서 에너지 사용이 많은 부분을 파악하고, 그 이유를 분석하여 육상양식에 있어 새로운 탄소 감축 수단을 도출한다. 또한 NDC 이행계획에서 주요 탄소 감축 수단으로 계획된 친환경에너지 보급사업의 정책효과를 분석하여 지속 필요성을 평가하고, 효과성 제고를 위한 사업추진 방향성을 조정하기 위한 시사점을 도출한다.

〈그림 4-1〉 육상양식 탄소배출 및 정책효과 분석 추진 방법



자료: 저자 작성

제2절 육상양식 품종별 탄소 배출량 및 배출원 분석

1. 육상양식 품종별 탄소 배출량 추정

1) 분석 방법

본 연구를 위해 친환경에너지 보급사업 지원 효과 분석을 위한 180개 분석 대상 어가의 설문조사 자료를 활용하였다.¹³⁹⁾ 어가 대상 설문 문항으로 2020년과 2021년 연간전력비, 유류 사용량, 사료 투입량, 생산량 등을 조사하여, 이를 바탕으로 각 어가의 탄소 배출량을 추정하였다. 육상양식장에서 배출되는 온실가스 추정은 사료, 전력, 유류 세 가지를 배출원으로 고려하여 추정되었다. 선행연구에서 고려하였던 어류 호흡, 고정자산 등은 비중이 작아 본 연구에서는 고려하지 않았다.

$$CO_2 = Feed + Elec + Oil$$

사료의 탄소배출은 배합사료와 생사료를 구분하여 산정하였다. 배합사료의 경우 Liu et al.(2016)을 참고하여 배합사료 1kg당 2.5kgCO₂eq를 곱하여 계산하였다.¹⁴⁰⁾ 다음으로 생사료의 탄소배출은 크게 세 가지로 나누어 생각할 수 있다. 첫째, 원료가 되는 잡어의 어획 과정에서 발생하는 탄소, 둘째, 습사료 제조과정에서의 전력 사용, 셋째, 냉동보관시설에서 발생하는 전력 사용이다. 이 중 잡어 어획 과정의 탄소배출은 신용민·정겨운

139) 표본 어가의 분포와 기초통계량은 이후 4장 3절 정책효과 분석 부분에서 상세히 설명함. 설문은 전화 면접 방식(CATI)을 통해 이루어짐. 전체 어가 대비 표본수가 작다는 점은 본 연구의 한계임.

140) Liu et al.(2016)은 노르웨이 신테프(SINTEF)에서 대서양 연어 탄소 배출량을 추정한 연구임. 동 연구에 따르면 2012년 노르웨이에서 연어 배합사료의 탄소배출량을 LCA방법으로 추정하여 2.5kgCO₂/kg로 보고함. 다만, 이는 사료 공장 출하단계까지만 고려한 것으로 사료의 운송 단계는 고려되지 않음. 양용수(2015) 등 기존 선행연구에서 참고한 연어 사료의 탄소 계수 3.33kgCO₂/kg(2000년 추정)보다 최신의 연구를 반영한 값임.

(2018)를 참고하여 $1.87\text{kgCO}_2/\text{kg}$ 를 곱하여 계산하였고, 사료 제조기와 생사료 냉동보관시설의 탄소배출은 양식장 전체 전력 간접배출에 포함되는 것으로 보아, 별도 산입하지 않았다. 전력 사용으로 인한 탄소 배출량은 어가가 응답한 전력비를 한국전력에서 발표한 농사용 전기 판매단가¹⁴¹⁾로 나누어 전기 사용량(kWh)을 도출하고, 여기에 환경부에서 발표한 「2021년 승인 국가 온실가스 배출·흡수계수」 중 전력 간접 소비단의 계수인 $0.4781\text{tCO}_2\text{eq/MWh}$ 를 곱하여 구하였다.¹⁴²⁾ 유류는 유류비를 각 연도 지역 면세유 가격으로 나누어 유류 사용량을 구하고, 「2021년 승인 국가 온실가스 배출·흡수계수」에 발표된 경유 CO_2 배출 계수 20.090tC/TJ 와 순발열량 $35.3(\text{MJ/L})$ 을 곱한 후 여기에 $44/12$ 를 곱해 탄소 C를 CO_2 로 변환하여 구했다.¹⁴³⁾

2) 분석 결과

품종별 단위 생산당 탄소 배출량 평균값을 비교·분석해 보면, 전체적으로 2020년 $17.2\text{kgCO}_2/\text{kg}$ 에서 2021년 $16.9\text{kgCO}_2/\text{kg}$ 로 0.3만큼 감소하였다. 어류 중 단위 생산당 탄소배출이 높은 육상양식 품종은 쏘가리로 1kg 생산 시 평균적으로 $21.3\text{kgCO}_2/\text{kg}$ 의 온실가스를 배출하는 것으로 분석되었으며, 다음으로 넙치 $19.4\text{kgCO}_2/\text{kg}$, 뱀장어 $13.8\text{kgCO}_2/\text{kg}$, 강도다리 $10.3\text{kgCO}_2/\text{kg}$ 순으로 나타났다. 어류 이외 품종에서는 자라가 $67.5\text{kgCO}_2/\text{kg}$ 로 가장 높았으며, 새우 $17.2\text{kgCO}_2/\text{kg}$, 전복 $17.1\text{kgCO}_2/\text{kg}$, 순으로 나타났다.

우리나라의 대표적인 양식품종인 넙치의 경우, 2021년 기준 넙치 탄소 배출량은 $19.4\text{kgCO}_2/\text{kg}$ 로 양용수(2015)에서 구한 $24.33\text{kgCO}_2/\text{kg}$ (제주),

141) 2020년 48.45원/kwh, 2021년 45.95원/kwh.(한국전력)

142) 메가-키로 단위 환산

143) 경유의 배출계수는 $2.6\text{kgCO}_2/\text{L}$ (테마-메가 단위 환산)

36.8kgCO₂/kg(납해안)보다 작게 도출되었다. 이는 계산에 이용한 배출 계수의 차이와 표본 어가의 차이에 기인한 것으로 보인다.¹⁴⁴⁾

〈표 4-1〉 품종별 평균 탄소 배출량

어종		2020년			2021년			증감 (B-A)
		탄소배출량 (TCO ₂)	생산량 (Ton)	단위생산당 배출(A) (kgCO ₂ /kg)	탄소배출량 (TCO ₂)	생산량 (Ton)	단위생산당 배출(B) (kgCO ₂ /kg)	
어 류	쏘가리	725.6	38.4	18.9	739.7	34.7	21.3	2.5
	넙치	92,007.1	4,744.5	19.4	93,844.6	4,825.5	19.4	0.1
	뱀장어	15,433.1	1,210.0	12.8	16,331.0	1,185.0	13.8	1.0
	강도다리	9,002.5	720.0	12.5	8,566.9	830.0	10.3	-2.2
	송어	282.7	33.5	8.4	297.2	33.5	8.9	0.4
	기타수산동물	1,691.4	228.0	7.4	1,772.1	231.0	7.7	0.3
	기타어류(해수)	4,611.0	777.0	5.9	4,770.1	756.1	6.3	0.4
	기타어류(민물)	517.8	530.6	1.0	590.0	550.6	1.1	0.1
어 류 외	자라	109.9	1.5	73.3	101.2	1.5	67.5	-5.8
	새우	9,047.1	573.5	15.8	8,171.5	475.4	17.2	1.4
	전복	6,806.9	357.0	19.1	7,361.9	431.0	17.1	-2.0
	해삼	572.9	40.6	14.1	567.6	40.8	13.9	-0.2
	굴, 가리비	1,972.9	168.0	11.7	1,439.4	268.0	5.4	-6.4
종 자	해삼(종자)	703.8	7.5	93.8	741.7	9.4	78.9	-14.9
	굴(종자)	748.0	9.8	76.3	791.3	11.0	71.9	-4.4
	전복(종자)	21,706.3	437.8	49.6	21,412.9	475.7	45.0	-4.6
	넙치(종자)	6,091.9	185.0	32.9	6,406.1	195.0	32.9	-0.1
	기타어류(종자)	2,528.2	80.7	31.3	2,408.9	81.7	29.5	-1.8
총합계		174,559.1	10,143.4	17.2	176,314.4	10,435.8	16.9	-0.3

주 : 동 조사는 육상양식장만을 대상으로 하였음. 굴, 가리비, 전복 등 육상양성장은 극소수에 불과하므로 대표성을 띠기 어려움

자료: 양식 품목별 어가 180개소 대상 탄소배출 설문조사의 결과를 토대로 저자 작성

144) 본 연구에서는 승인 국가 배출 계수를 사용하였고, 양용수(2015)의 선행연구에서는 국가 승인 계수가 없을 때 대안으로 사용하는 IPCC의 기본 배출 계수를 이용하였다. 또한, 양용수(2015)에서는 배합사료의 탄소배출 계수를 사용하였으나, 본 연구에서는 생사료를 주로 사용하는 넙치 어가의 현실을 반영하여 생사료의 원료로 사용되는 잡어 어획 과정의 탄소배출량을 사용하였다.

2021년 넙치 종자의 단위 생산당 탄소 배출량은 32.9kgCO₂/kg로 넙치 양성 과정보다 더 많은 단위당 탄소를 배출하는 것으로 분석되었다. 전복, 굴의 탄소 배출량 역시, 종자 생산이 성패 생산에 비해 훨씬 더 많은 단위 생산당 탄소를 배출하는 것으로 나타났다. 이는 생산량이 적은 종자의 특성에 기인하는 것으로 보인다. 뱀장어 생산의 탄소 배출량은 13.8kgCO₂/kg로 김종현(2014)에서 구한 18.33kgCO₂/kg보다 작게 나타났다.

이상치(outlier)로 인한 왜곡을 피하고 중위값을 중심으로 단위 탄소배출량을 다시 산출하여 비교하였다. 넙치 중위값은 16.5kgCO₂/kg로 평균값 19.4kgCO₂/kg보다 더 작은 값을 나타내었다. 뱀장어 중위값은 13.0kgCO₂/kg으로 평균값 13.8kgCO₂/kg과 거의 같은 값으로 나타났다.

〈표 4-2〉 품종별 단위 생산당 탄소 배출량

단위: kgCO₂/kg

어종		하위 25%	중위값	상위 25%
양성	넙치	10.4	16.5	23.2
	뱀장어	9.1	13.0	23.0
	강도다리	9.9	12.6	14.7
	새우	10.2	14.5	21.2
	전복	6.2	30.3	48.3
	기타 어류(해수)	8.0	10.7	20.0
	굴, 가리비	3.0	6.2	16.4
	기타 수산동물	3.3	13.4	14.8
	해삼	10.5	14.4	62.3
	기타 어류(민물)	3.2	6.6	16.8
	송어	8.3	8.9	9.5
	자라	28.1	35.4	85.1
종자	넙치	17.9	37.0	42.8
	기타 어류	23.7	27.9	64.3
	전복	32.9	52.1	78.9

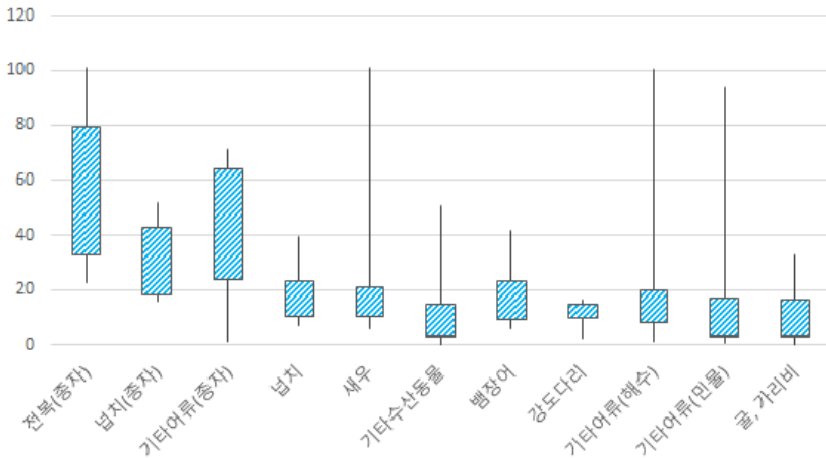
주 : 동 조사는 육상양식장만을 대상으로 하였음. 굴, 가리비, 전복 등 육상양식장은 극소수에 불과하므로 대표성을 띠기 어려움

자료 : 양식 품목별 어가 180개소 대상 탄소배출 설문조사의 결과를 토대로 저자 작성

다만 분석 결과를 해석할 때 주의할 점은 본 조사는 육상양식장만을 대상으로 조사한 결과라는 점이다. 전복과 같은 패류는 일반적으로 해면에서 수하식으로 양식하고, 해조류를 먹이로 하므로 탄소배출이 어류보다 적은 것이 일반적이다.¹⁴⁵⁾ 동 조사에서 단위 탄소배출이 높게 나타난 것은 표본 전복 어가의 양식 방법이 일반적인 수하식 방식이 아니라 순환여과식이나 유수식 등 특수한 경우의 육상양식이기 때문이다. 따라서, 전복, 굴 등의 패류 양식의 경우 위 분석 결과를 품종 전체의 평균적 탄소배출로 일반화할 수 없음에 유의해야 한다. 동 조사에서는 친환경에너지 보급사업이 육상수조 양식장만을 대상으로 하였으며, 육상 수조(순환여과식) 전복 양식장이 포함되면서 높은 배출량을 보였다. 넙치 종자, 기타 어류 종자, 전복 종자 등 종자류는 생산 무게가 적어, 단위 생산당 탄소 배출량이 많은 것으로 분석되었다.

〈그림 4-2〉 품종별 단위 생산당 탄소 배출량

단위: kgCO₂eq/kg



자료: 양식 품목별 어가 180개소 대상 탄소배출 설문조사의 결과를 토대로 저자 작성

145) 패류 중 굴은 수하식으로, 가리비는 채육식으로 식물성플랑크톤을 먹이로 하고, 전복은 해수에서 해조류를 먹이를 공급한다.

2. 육상양식 탄소 배출원 분석

1) 개요

일반적으로 어류 양식어업의 탄소 배출원은 크게 생산 전 단계, 생산단계, 생산 후 단계로 구분할 수 있다. 생산 전 단계는 종자와 사료 등 성어를 양성하기 위한 투입 요소들로 구성되어 있다. 생산단계는 연어나 넙치 등 어류를 직접 양식하는 데 필요한 요소들로 구성되어 있으며, 생산 후 단계는 성어 생산 이후 유통·가공 과정 등으로 구성되어 있다.

해외 연구 결과를 토대로 양식어류의 단계별 온실가스 배출 여부를 살펴보면, 생산 전 단계에는 유생 생산 및 공급, 사료용 경작지 이용, 사료 생산, 사료 운송 항목이 포함되어 있다. 생산단계는 연료, 에너지, 기반 시설, 연안 사용, 유출물, 액화 산소 및 기타 화학물질로 구성된다. 생산 후 단계는 공정, 포장 및 가공, 동결, 운송으로 구성된다.

〈표 4-3〉 양식어류 단계별 온실가스 배출 여부

단계	온실가스 배출 유형	배출 여부
업스트림 단계 (투입재)	유생 생산/공급	○
	사료용 경작지 이용	○
	사료 생산	○
	사료 운송	○
양성 단계	연료	○
	에너지	○
	기반시설	○
	연안 사용	○
	유출물	○
	액화 산소 및 기타 화학물질	○
다운스트림 단계 (유통·가공)	공정	○
	포장/가공	○
	동결	○
	운송	○

자료: Jones et al.(2022)

국내 넙치의 양식단계별 시설을 살펴보면, 종자 단계에는 해수 공급 펌프, 히트펌프(지열), 히트펌프(공조), 저압 산소 용해기, 블로워(Blower) 등이 있다. 시설 운영시간은 거의 모든 시설이 24시간 가동되는 것으로 나타났는데 이는 환경변화에 취약한 치어들의 폐사율을 줄이기 위해서다. 양성(성어 생산) 단계에는 해수 공급 펌프, 히트펌프(지열), 히트펌프(공조), 고압 산소 용해기, 블로워(Blower), 자동 급이기, 사료 통돌이, 배출수 드럼 필터 등이 있다. 종자 단계와 겹치는 시설들이 있지만, 성어를 양성하는 만큼 성어 양성단계에서 전력 사용량이 더 많다. 펌프 계열의 시설 외 사료 공급과 관련된 시설 일부가 사용되고 있다. 판매과정에서는 신선도 유지를 위한 냉동 장비와 포장 장비 등이 주로 이용되고 있으며, 추가로 물차(수조차)의 배출량 추정이 필요하다. 양식어류의 생산단계별 시설 전력 사용량과 사용 시간을 곱하여 전체 사용량을 구한 후 시설별로 비중을 구해 이를 탄소 배출원 비중으로 도출하였다.

2021년 승인 국가 온실가스 배출·흡수 계수를 이용하여 물차(수조차)의 배출량을 추정하였다. 물차의 경우 대부분 넙치 운송 시 4.5~5톤 화물차를 이용하므로 중형화물차가 경유를 이용하는 경우를 적용하여 추정하였다. 도로 수송부문 CO₂ 배출 계수를 이용하여 경유를 이용하는 중형화물차가 65km/h로 운송하는 경우를 가정하여 계산하였다. 이는 화물차의 고속도로 최고 속도가 90km/h로 제한되어 있기도 하고 일반국도에서는 저속으로 운행하기 때문이다. 추정된 시설별 전력 사용량은 국가 온실가스 배출·흡수계수를 이용하여 1kwh 당 0.4781의 kgCO₂ 계수를 적용하였으며 1일 전력 이용량을 기준으로 하여 이를 배출량으로 환산하였다.

탄소배출량 = 해당 시설 전력사용량 × 사용시간 × 배출계수

탄소배출 비중 = 각 시설 탄소배출량 / 전체 탄소배출량

2) 업스트림 단계 탄소 배출원

업스트림 단계는 양식수산물 생산을 위한 투입 요소인 종자와 사료가 있다. 사료는 종자용 사료와 성어용 사료 두 시장이 있고 가공과 냉동 등 전력 소비가 많은 설비들을 이용한다. 사료를 생산지에서 양식장까지 운송하기 위해 차량이나 선박, 항공기 등을 이용해야 하고, 생사료의 경우 부패를 방지하기 위해 냉장이나 냉동시설을 추가로 이용한다. 따라서 사료의 생산과 운송 모든 과정에서 탄소가 배출된다. 본 연구는 탄소 배출원 분석에서 종자를 양식하는 양식장만을 대상으로 하여 분석한다.

종자를 생산할 때 수정란을 부화시키고 종자를 육성하기 위한 양식시설에서 연료와 에너지가 많이 소요된다. 종자는 외부 충격에 약해서 폐사를 방지하기 위해서는 계절에 따라 온도조절 장치나 산소 공급장치 등을 24시간 가동한다. 제주도 양식장에서 주로 구매하는 충청도 지역 넙치 치어 양식장(60개 수조 규모)¹⁴⁶⁾을 대상으로 조사한 에너지 사용실태를 기반으로, 종자 단계의 에너지사용 시설별 전력 사용량과 가동시간을 통해 탄소 배출원 비중을 살펴보았다.

시설의 소비전력 데이터를 확보하여 탄소 배출량을 분석한 결과, 해수를 끌어 올리는 양수펌프의 전력 사용과 탄소배출이 전체의 50% 비중을 차지하는 것으로 조사되었다. 또한 종자 생산 시 가온을 위한 히트펌프(지열)와 히트펌프(공조)의 전력 소비 비중도 28%와 19%에 달하여 두 번째로 큰 탄소 배출원으로 작용하였다. 다음으로 산소공급 블로워(blower), 저압 산소용해기의 비중이 높았다.

146) 에너지 전문기업인 (주)퀀텀에 의뢰하여 충남지역 종자 생산업체를 대상으로 실태조사를 의뢰하여 수집된 자료를 활용하였다.

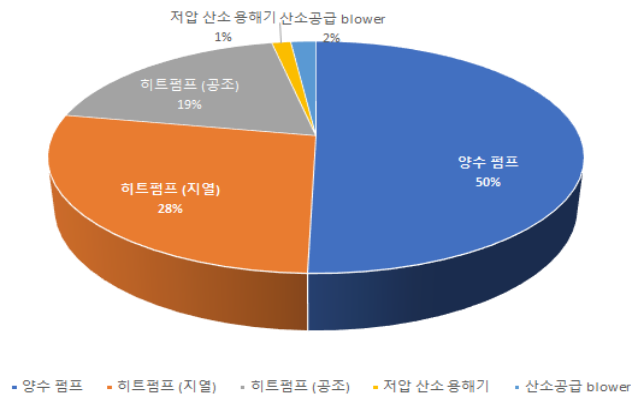
〈표 4-4〉 업스트림 단계 탄소 배출량

시설명	대당 소비전력 (kw)	장비 대수 (대)	연간 전력 사용량(kwh)	연간 탄소 배출량 (kgCO ₂)	비중 (%)
양수 펌프	37	3	972,360	464,885	50
히트펌프 (지열)	220	2	532,224	254,456	28
히트펌프 (공조)	150	2	362,880	173,493	19
산소공급 blower	2	2	35,040	16,753	2
저압 산소 용해기	2	2	26,280	12,564	1
합계			1,928,784	922,152	100

주: 60 수조 규모 종자 생산업체의 자료를 이용함

자료: 2022년 에너지 전문기업 ㈜퀀텀에 조사를 의뢰하여 실제 육상양식장 조사 자료를 활용

〈그림 4-3〉 업스트림 단계(종자) 탄소 배출원 비중



자료: ㈜퀀텀(2022) 현장 조사 자료를 활용하여, 저자 작성

3) 양성단계 탄소 배출원

넙치 성어 양성을 위해서는 연료와 에너지가 이용된다. 양성 과정에서 해수 공급 펌프, 히트펌프, 산소 용해기, 자동 먹이공급기 등을 이용한다. 양식 어가는 성장 및 비만도를 고려하여 생사료를 선호하기 때문에 사료 보관을 위한 냉장 시설도 필요하다. 육상수조 양식장의 특성상 24시간 내

내 인력이 상주하면서 출하 및 선별작업이 이루어지므로 전력 및 에너지 소비가 발생한다.

최근 유수식 넙치 양식장 전기사용량 분석을 한 이규태 외(2018)에 의하면, 유수식 넙치 양식장에서 전기 사용 비중이 가장 큰 항목은 해수를 끌어 올리는 양수펌프로 전체 전기사용량의 약 70~78%를 차지하며, 다음으로 오존발생기와 산소 블로워(Blower)의 전기사용량이 많은 것으로 조사되었다.¹⁴⁷⁾

이를 바탕으로 전력 사용량에 환경부에서 발표한 국가 승인 탄소배출 계수($0.4781\text{kgCO}_2/\text{kwh}$)를 곱하여 탄소 배출량을 추정하였다. 탄소배출은 전력 사용량에 비례하기 때문에 전력 사용량 순서와 마찬가지로 양수 펌프가 가장 큰 탄소 배출원으로 나타났다. 다음으로 오존발생기, 산소 공급 블로워(blower), 사료 보관용 냉동실, 사료 제조기 순서로 탄소를 많이 배출하는 것으로 분석되었다.

〈표 4-5〉 유수식 육상넙치 양식장 생산단계 연간 탄소 배출량

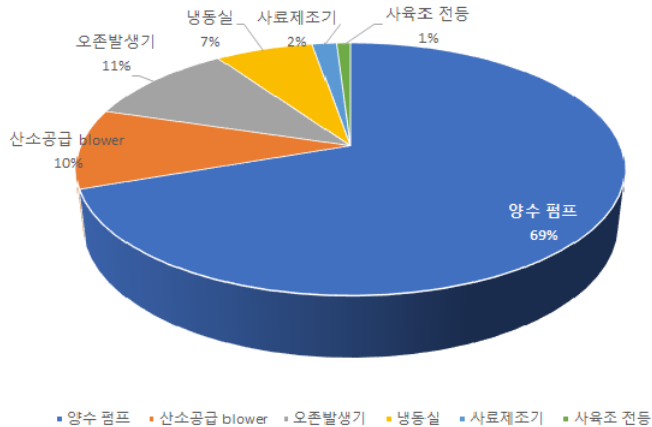
시설명	연간 전력사용량 (kwh)	연간 탄소 배출량 (kgCO_2eq)	비중(%)
양수 펌프	3,342,912	1,598,246	69.90
산소공급 blower	494,064	236,212	10.30
오존발생기	512,460	245,007	10.70
냉동실	328,500	157,055	6.90
사료제조기	82,198	39,298	1.70
사육조 전등	24,966	11,936	0.80
합 계	4,785,100	2,287,756	100.00

주 : 이규태 외(2018)에 조사된 유수식 육상 넙치 양식장의 수치를 이용한 것으로 양식장 특성에 따라 편차가 있을 수 있음

자료: 이규태 외(2018) 참고하여 저자 작성

147) 이규태 외(2018), p. 145.

〈그림 4-4〉 생산단계 탄소 배출원 비중



자료: 이규태 외(2018) 참고하여, 저자 작성

4) 다운스트림 단계 탄소 배출원

다운스트림 단계 탄소배출은 주로 유통 및 가공과정에서 발생한다. 넙치는 대부분 활어 형태 헛감으로 유통되기 때문에 동결과 포장 및 가공공정보다는 유통과정 중에 탄소배출이 발생하게 된다. 우리나라에서 헛감은 신선도가 중요하므로 수조에서 살려서 운송한다. 활어 넙치는 상하차 과정에서 스트레스와 수조 환경변화로 인해 품질이 저하되는 것을 방지하기 위해 빠른 운송이 중요하다.

우리나라에서 가장 넙치를 많이 생산하는 제주도는 섬이라는 지리적 특성상 물차에 넙치를 실어 카페리로 육지로 운송하거나 항공을 필수로 이용할 수밖에 없다. 따라서 우리나라 넙치 양식업은 가공 및 포장과 같은 과정을 대부분 거치지 않고 활어 형태로 유통되기 때문에 유통과정에서는 운송수단을 통한 탄소배출이 필수적으로 이루어질 것이다. 여기에 넙치의 신선도 유지를 위해 냉장 시설을 이용하는 부분에서 탄소가 추가로 배출된다.

다운스트림 단계는 중형화물차의 탄소배출을 기준으로 계산한 차량운송 비중이 71.02%로 가장 높게 나타났다. 다음으로 넉치 신선도를 유지하기 위한 냉동 장비 16.30%, 생사료 등의 신선도 유지를 위한 냉동 장비 10.87%, 포장 장비 1.81%로 나타났다.

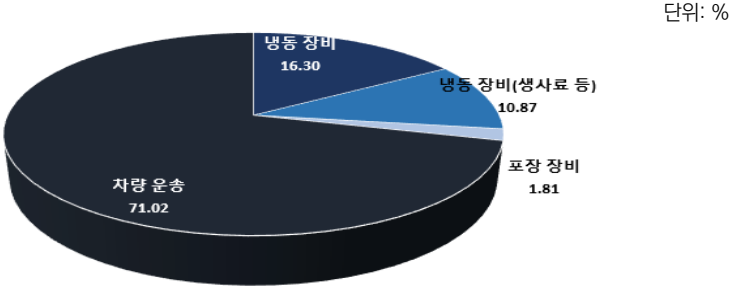
따라서 다운스트림 단계에서 탄소배출을 감축하기 위해서는 친환경 화물차 도입이 우선되거나 활어 유통을 선어회 유통 등으로 유통과 소비 방법의 개선이 필요하다. 횡간을 운송하는 물차(수조차)의 경우 화물차를 개조하여 사용하는 경우가 많아서 친환경 화물차가 보급된다면 업스트림 단계 탄소 배출량 저감이 가능하다.

〈표 4-6〉 생산 후 단계 탄소 배출량

시설명	소비전력 (kw)	대수/사양	탄소 배출량 (kgCO ₂)	비중(%)
냉동 장비	150	3	1,721.16	16.30
냉동 장비(생사료 등)	100	2	1,147.44	10.87
포장 장비	50	20m	191.24	1.81
운송	중형트럭(g/km)		7,497.07	71.02
합계			10,556.91	100.00

주: 제주지역 4개 양식장 조사 자료 활용((주)퀀텀 제공)
 자료: 2022년 에너지 전문기업 (주)퀀텀에 조사를 의뢰하여 실제 육상양식장 조사 자료를 활용

〈그림 4-5〉 생산 후 단계 탄소 배출원 비중



자료: (주)퀀텀(2022) 현장 조사 자료를 참고하여, 저자 작성.

제3절 육상양식 탄소중립 정책효과

1. 개요

우리나라 양식산업 관련 탄소중립 정책으로는 제2장에서 소개한 친환경 에너지 보급사업이 대표적이다. 에너지 절감 효과가 크고, 어가의 만족도가 높은 사업이라고 알려져 있으나, 사업 위탁 수행 기관인 한국농어촌공사의 만족도 조사 외에는 동 정책의 탄소 감축 효과에 대한 분석이 거의 수행된 적이 없다.

특히, 탄소배출 총량뿐 아니라 단위 생산당 탄소배출에 대한 계량적 분석은 찾아보기 힘들다. 이는 우선 양식장에서 발생하는 온실가스 배출량의 측정이라는 것이 범위의 설정이나 측정 방식에 있어 아직 엄밀하게 정해지거나 정형화되지 않았기 때문이다.

본 연구에서는 사료, 전력, 유류에서 발생하는 이산화탄소를 추정하고, 이를 어가당 생산량으로 나누어, 단위 생산당 이산화탄소 발생량을 추정하고자 한다. 이를 통해 동 정책이 양식 어가의 탄소 효율적인 생산에 기여하고 있는지 살펴보고자 한다. 선행연구 결과에서도 살펴보았듯, 양식장 탄소 배출에 대한 선행연구는 배출량 추정까지만 진행되었고, 탄소 저감 정책의 효과 분석까지 수행한 연구는 거의 없다.

본 연구에서는 1kg을 생산하기 위해 배출되는 탄소 배출량을 측정해 양식생산의 탄소 효율 변화를 알아보고자 하며, 정책효과 분석에 있어 대표적인 방법론인 이중차분법을 이용하여, 선택 편의를 제거한 순수한 정책효과를 계측하고자 한다.

2. 분석 방법

본 연구에서는 이중차분법(Difference-in-Difference, DID)을 이용

하여 친환경에너지 보급사업의 탄소저감 효과를 추정한다. 이중차분법은 정책이 적용되는 처치(Treatment)집단과 적용되지 않는 대조집단을 비교하여 정책 성과를 측정하는 방법론으로, Card & Krueger(1993)에서는 이중차분법을 이용하여 최저임금제가 고용에 미치는 효과를 분석한 바 있다.¹⁴⁸⁾ 정책의 효과는 $t = 1$ 시점에서 처리그룹과 대조 그룹의 차이와 $t = 0$ 에서의 두 그룹의 차이를 차분하여 구해진다.

〈표 4-7〉 DID 추정을 위한 데이터 구조

구분	처리전(pre-treatment)	처리후(post-treatment)
처리그룹	Y_0^T	Y_1^T
대조그룹	Y_0^C	Y_1^C

자료: 민인식·최필선(2019)

정책의 효과를 평균 처리 효과(average treatment effect: ATE)라고 정의하면, 정책효과는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} ATE_{DID} &= (Y_1^T - Y_1^C) - (Y_0^T - Y_0^C) \\ &= (Y_1^T - Y_0^T) - (Y_1^C - Y_0^C) \end{aligned}$$

이를 선형회귀모형으로 나타내면 다음과 같은 회귀식으로 나타낼 수 있다.

$$y_i = \alpha + \beta t + \gamma T_i + \theta(t \times T_i) + e_i$$

여기서 t 는 정책 전후 기간 더미변수이다. 즉, 정책 시행 이전이면 $t = 0$ 이고, 정책 시행 이후이면 $t = 1$ 이다. T_i 는 처리그룹 더미변수이다. 처리 그룹이면 $T_i = 1$ 이고, 대조군이면 $T_i = 0$ 의 값을 갖는다. 다음으로는 두 변수의 교차 항이 포함된다. 이때 교차 항의 파라미터 θ 가 정책의 순수한 효과로 계측된다.

148) David Card는 UC버클리대 교수로, 이중차분법을 이용한 이 연구로 2021년 노벨경제학상을 수상하였다.

3. 분석 자료

본 연구를 위해 2020년 친환경에너지 보급사업을 지원받은 어가와 비지원 어가에 대해 설문조사를 실시하였다. 2020년 친환경에너지 보급사업의 지원 대상은 총 194개 어가이며, 이 중 설문에 응답한 어가는 60개였다. 비교를 위해 120개 비지원 어가에 대한 설문도 진행하여, 본 연구에 사용된 데이터는 지원 어가 60개, 비지원 어가 120개로 총 180개 어가를 대상으로 하였다.

〈표 4-8〉 표본 어가 품종별 분포

단위: 어가 수

구분	비지원	지원	합계
강도다리	4	2	6
굴(종자)	1	1	2
굴, 가리비	5	2	7
기타수산동물	5		5
기타어류(민물)	5		5
기타어류(종자)	5		5
기타어류(해수)	8	3	11
넙치	37	14	51
넙치(종자)	2	1	3
뱀장어	10		10
새우	22	4	26
송어	2		2
쏘가리	4		4
자라	3		3
전복	2	8	10
전복(종자)	2	23	25
해삼	3		3
해삼(종자)		2	2
합계	120	60	180

자료: 양식 품목별 어가 180개소 대상 탄소배출 설문조사의 결과를 토대로 저자 작성

어종별 양식 방법을 비교하면 유수식이 79개로 가장 많았고, 순환여과식(RAS)이 69개로 두 번째로 빈도수가 높았다.

〈표 4-9〉 조사 대상 어가의 품종별·양식 방법별 현황

구분	바이오플락	수하식	순환여과	유수식	지수식	합계
강도다리			2	3	1	6
굴(종자)			1		1	2
굴, 가리비		2	2	1	2	7
기타수산동물			4	1		5
기타어류(민물)			2		3	5
기타어류(종자)			2	3		5
기타어류(해수)			2	7	2	11
넙치			16	33	2	51
넙치(종자)			1	2		3
뱀장어			9		1	10
새우	4		8	4	10	26
송어				2		2
쏘가리			2	2		4
자라				1	2	3
전복			4	6		10
전복(종자)			12	13		25
해삼			2		1	3
해삼(종자)				2		2
합계	4	5	69	79	25	

자료: 양식 품목별 어가 180개소 대상 탄소배출 설문조사의 결과를 토대로 저자 작성

조사 항목으로 생산량, 사료량, 전력비, 유류비 등 자료를 수집하였으며, 그 밖에 양식어종과 양식 방법(유수식, 순환여과식, 지수식 등)을 조사하고 친환경 보급사업에 대한 지원 어가의 의견을 설문하였다. 분석 기간은 2020년 대비 2021년으로, 2020년 지원 대상으로 선정되어 히트펌프나 인버터를 지원받은 어가에 대해 지원 전인 2020년과 지원 후인 2021년 사이 단위 생산당 탄소배출이 감소했는지를 분석하였다.¹⁴⁹⁾

149) 한국농어촌공사 문의 결과, 히트펌프, 인버터 설치는 보통 매해 한번기, 양식어가 출하 이후 휴식기에 이루어진다.

〈표 4-10〉 조사 대상 어가의 기초통계량

구분		2020년			2021년		
		평균	최소	최대	평균	최소	최대
생산량 (kg)	지원	52,899	1000	400,000	56,196	1000	400,000
	비지원	58,078	70	500,000	59,200	65	500,000
사료량 (kg)	지원	92,486	0	650,000	94,548	0	650,000
	비지원	106,297	0	1,260,000	106,953	0	126,0000
전력비 (백만 원)	지원	89.4	0	300	84.6	0	300
	비지원	69.6	0	720	67.8	0	600
유류비 (백만 원)	지원	36.8	8	100	36.3	8	100
	비지원	22.8	1	100	22.8	1	100

자료: 양식 품목별 어가 180개소 대상 탄소배출 설문조사의 결과를 토대로 저자 작성

이중차분법에는 처치집단과 통제집단이 동일한 기울기를 가지며 변화했을 것이라는 평행 추세 가정(Parallel Trend Assumption)이 부과된다. 동 사업의 경우 선정 조건이 까다롭지 않아 대부분의 어가가 자격 조건을 충족하며, 지원의 형평성을 위해 고르게 선정된다는 점에서 평행 추세 가정 조건은 만족한다고 전제하였다.

전력비 변화분을 보면 지원 어가, 비지원 어가 모두 큰 변동이 없는 어가가 가장 큰 비중을 차지했다. 지원 어가의 경우 고효율 에너지 설비 도입으로 전력비의 큰 감소를 예상했으나, 예상과 달리 연간전력비가 지원 전에 비해 천만 원 이내로 미미하게 변화했다고 응답한 어가가 44개로 총 60개 어가 중 약 75%에 달했다. 이는 히트펌프, 인버터 지원으로 에너지 효율이 늘어나면서 에너지 비용이 감소하였고, 이에 대해 어가들은 전력 사용을 증가시키면서, 출하 시기 조정, 수온 조절 등 생산성 향상과 생산량을 증가시키는 방향으로 대응했다고 추측할 수 있다.

이러한 대응은 기존 생산 수준을 유지하면서, 전력비용을 감소시키는 것보다 수익 극대화를 목적으로 하는 어가의 입장에서는 더욱 합리적인 선택이라고 볼 수 있다. 또한 한 가지 원인으로 추측되는 것은 2021년 여름 폭염 현황으로 인한 고수온 문제가 발생하면서, 어가들이 이전에는 가동하지

않았던 히트펌프 냉방 기능을 가동하였고 이러한 여름철 냉방이 전력비 추가 사용 요인으로 작용한 것으로 보인다.

〈표 4-11〉 2020년 대비 2021년 연간전력비 변화분

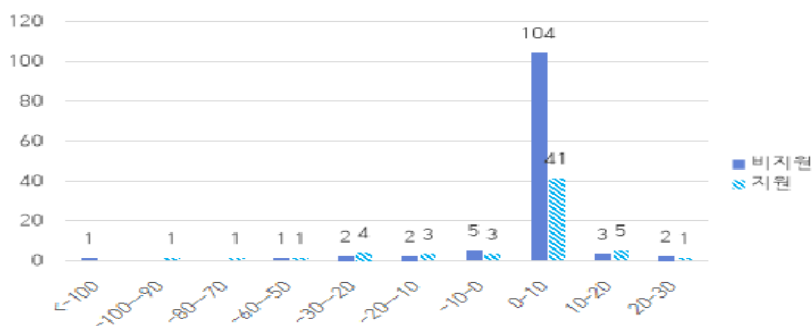
단위: 백만 원

전력비 변화분	비지원	지원	합계
-100 이하	1		1
-100 -90		1	1
-80--70		1	1
-60--50	1	1	2
-30--20	2	4	6
-20--10	2	3	5
-10-0	5	3	8
0-10	104	41	145
10-20	3	5	8
20-30	2	1	3
합 계	120	60	180

자료: 양식 품목별 어가 180개소 대상 탄소배출 설문조사의 결과를 토대로 저자 작성

〈그림 4-6〉 2020년 대비 2021년 연간전력비 변화분 분포

단위: 백만 원



자료: 양식 품목별 어가 180개소 대상 탄소배출 설문조사의 결과를 토대로 저자 작성

4. 분석 결과

본 장에서는 제4장 제2절에서 추정한 어가별 탄소 배출량 데이터를 이용한다. 탄소 배출량과 생산량의 총량 변화를 비교하면, 2020년 당시 지원 어가의 평균 탄소 배출량은 $20.1\text{kgCO}_2/\text{kg}$ 로 비지원 어가의 $15.9\text{kgCO}_2/\text{kg}$ 보다 높은 수준이었다. 전력과 유류 등 에너지 소비가 많은 어가에서 친환경에너지 보급사업으로 히트펌프 등을 지원받았음을 알 수 있다.

지원 이후 변화를 보면, 지원 어가의 평균 탄소 배출량은 $18.8\text{kgCO}_2/\text{kg}$ 로 6.1% 감소하였고, 비지원 어가는 $15.9\text{kgCO}_2/\text{kg}$ 에서 $16.0\text{kgCO}_2/\text{kg}$ 로 0.4% 증가하였다. 지원 어가가 탄소를 적게 사용하는 탄소 효율적 생산방식으로 전환하였음을 알 수 있다. 특히, 지원 어가는 생산량이 6.2% 증가하였지만, 비지원 어가는 1.4% 증가에 그친 것으로 분석되었다.

〈표 4-12〉 평균 탄소 배출량 변화 비교

	항목	비지원	지원
2020년	총 CO ₂ 배출량(톤CO ₂)	110,831.7	63,727.4
	생산량(톤)	6,969.4	3,173.9
	단위생산당 배출량(kgCO ₂ /kg)	15.9	20.1
2021년	총 CO ₂ 배출량(톤CO ₂)	112,774.3	63,540.0
	생산량(톤)	7,064.0	3,371.8
	단위생산당 배출량(kgCO ₂ /kg)	16.0	18.8
총 CO ₂ 배출량 변화율(%)		1.8%	-0.3%
생산량 변화율(%)		1.4%	6.2%
단위생산당 배출량 변화율(%)		0.4%	-6.1%

자료 : 양식 품목별 어가 180개소 대상 탄소배출 설문조사의 결과를 분석하여 저자 작성

이중차분법을 이용해 친환경에너지 보급사업의 정책효과를 계측하였는데, 고정효과(Fixed effect) 패널 회귀를 통해 계수를 추정하였다.¹⁵⁰⁾

150) 고정효과 패널모형과 위 식(2)의 추정은 동일한 결과의 계수값이 도출된다.(민인식·최필선.2019)

$$3 Y_{i,t} = \alpha + \beta Treat_{i,t} + \gamma t + u_i + e_{i,t}$$

세 가지로 나누어 추정을 진행하였는데, 첫 번째는 종속변수 $Y_{i,t}$ 를 어가당 단위 생산당 탄소 배출량으로 두고, 설명변수로 정책지원 더미 $Treat_{i,t}$ 와 연도 더미 t 를 설정한 후 정책 더미의 계수 β 를 추정하였다. α 는 상수항, $e_{i,t}$ 는 오차항이다. 두 번째는 단위 생산당 탄소 배출량에 로그를 취해 종속변수 $Y_{i,t}$ 로 두고 동일한 설명변수를 이용해 추정하였다. 세 번째는 첫 번째와 같은 방법으로 단위 탄소 배출량을 종속변수로 두되, 넓치 어가만 분리하여 추정하였다.

첫 번째 추정 결과, 정책의 효과를 나타내는 지원 더미변수의 계수가 -5.09로 1% 수준에서 유의하게 나타났다. 이는 친환경에너지 보급사업을 통해 히트펌프와 인버터라는 에너지 효율적 기술이 적용됨에 따라 1kg 생산당 탄소 배출량이 평균 5.09kgCO₂eq만큼 감소했음을 의미한다.

두 번째 추정은 비율 변화를 측정하기 위해 로그를 취하여 분석하였는데, 지원 어가 더미 계수는 -0.13으로 1% 수준에서 유의하게 나타났다. 보급 어가의 단위 생산당 탄소배출이 비지원 어가에 비해 13% 추가 감소하였다고 해석할 수 있다.

세 번째 추정은 비교 집단의 이질성을 통제하기 위해 넓치 단일 품종에 대해서만 이중차분법을 적용하여 정책효과를 분석하였다. 전체 표본 중 넓치를 주 품종으로 양식하는 51개 어가에 대해 추정한 결과 지원 더미 계수는 -1.63으로 10% 수준에서 유의하게 나타났으며, 정책 수혜 어가가 비지원 어가에 비해 평균적으로 -1.63kgCO₂eq만큼 단위 생산당 탄소배출이 더 감소했다고 해석할 수 있다.

〈표 4-13〉 DID 추정 결과(고정효과 패널)

구분	전체 품종				넙치	
	단위생산당 CO ₂ 배출량		로그 (단위생산당 CO ₂ 배출량)		단위생산당 CO ₂ 배출량	
	β	s.e	β	s.e	β	s.e
지원 더미	-5.09***	(1.37)	-0.13***	(0.05)	-1.63*	(0.92)
연도 더미	1.23	(0.79)	0.03	(0.03)	0.83	(0.48)
상수	31.39***	(0.46)	2.98***	(0.02)	21.09	(0.29)
F	7.19		4.09		4.03	
$Prob > F$	0.0010		0.0184		0.0170	
패널 수	180		180		51	
관측치수	360		360		102	

주 : 괄호안은 표준오차이며, *는 $p<0.1$, **는 $p<0.05$, ***는 $p<0.01$ 임을 각각 의미함

자료: 양식 품목별 어가 180개소 대상 탄소배출 설문조사의 결과를 분석하여 저자 작성

에너지 효율이 높으면서 탄소배출이 없는 기술을 어가에 보급함으로써 탄소 효율적으로 생산하게 되었다는 점에서 정책은 소기의 성과가 있었다. 그러나 단위 생산당 탄소배출 감소로 탄소 효율적인 생산방식으로서의 변화에 따른 효과는 있었지만, 전체 어가의 탄소 배출량 합계가 감소했는지는 좀 더 검토해 보아야 할 문제이다. 본 설문조사를 진행하면서, 전기세가 그다지 감소하지 않았다는 답변을 한 어가들이 많았는데, 이는 열효율이 높아진 상황에서 오히려 가온을 늘리면서 수익 극대화를 꾀하는 방식의 대응을 한 어가들이 많다고 해석할 수 있다.

제4절 시사점

육상양식 대상 품종 중 탄소 배출량이 많은 품종은 우리나라 주력 양식 어류인 넙치, 뱀장어이고, 최근 넙치 폐사로 인해 강도다리 양식장이 늘어나면서 강도다리 생산량 증가와 함께 탄소 배출량도 증가하고 있다.

어류 양성을 위한 양식장의 탄소배출을 줄이기 위해서는 해수 양식은 넙치, 강도다리, 민물 양식은 뱀장어 등에 대해 탄소 배출량 감소를 위한 노력이 집중되어야 할 것으로 판단된다. 그동안 탄소중립을 위한 정책 대상에서 잘 고려되지 않았던 부분 중 하나는 종자 생산을 위한 육상양식장이다. 육상의 종자 양식장 중 전복, 넙치, 기타 어류 등의 탄소 배출량이 양성을 위한 양식장만큼 탄소 배출량이 많은 것으로 분석되었다.

특히 kg 단위당 탄소 배출량은 전복 치패를 생산하는 육상양식장이 가장 많았으며, 넙치는 일반 양성을 위한 양식장에 비해 치어 생산을 위한 양식장의 단위당 탄소 배출량이 약 1.5배 정도 많은 것으로 조사되었다. 치어 및 치패를 생산하는 육상양식장의 탄소 배출량을 줄이기 위한 정책이 필요한 것으로 나타났다. 또한 해수를 이용한 육상양식장뿐만 아니라 뱀장어, 쏘가리, 송어, 자라 등 민물 어류 양식장의 탄소 저감이 필요한 것으로 나타났다.

〈표 4-14〉 탄소배출량 상위 어종(2021년 기준)

구분	어종	총 배출량(kgCO ₂)	단위당 배출량(kgCO ₂ /kg)
양성	넙치	74,858.20	15.4
	뱀장어	15,648.70	13.2
	강도다리	8,250.70	9.9
종자	전복	20,308.90	42.7
	넙치	6,104.40	31.3

자료 :양식 품목별 어가 180개소 대상 탄소배출 설문조사의 결과를 분석하여 저자 작성

육상양식장 중 어가당 탄소 배출량이 가장 많은 넙치 양식장을 대상으로 탄소 배출원을 분석하였다. 양성단계뿐만 아니라 치어 등 투입재를 생산하는 업스트림 단계, 유통을 포함하는 다운스트림 단계로 구분하여 탄소 배출원을 분석하였다.

종자의 경우, 수정란 부화 및 종자 육성을 위한 연료와 에너지가 많이 소요되고, 외부 충격 최소화를 통한 폐사 방지를 위해 계절에 따른 온도조절과 산소공급을 위해 장치를 24시간 가동한다. 양식수를 끌어 올리는 양수펌프의 전력 사용과 탄소배출이 전체의 50%로 가장 비중이 컸다. 또한 종자 생산 시 가온을 위한 히트펌프(지열)와 히트펌프(공조)의 전력 소비 비중도 28%와 19%에 달하여, 두 번째로 큰 탄소 배출원으로 작용하였다. 다음으로 산소공급 블로워(blower), 저압 산소 용해기의 비중이 높았다.

양성단계에서는 해수 공급 펌프, 히트펌프, 산소 용해기, 자동 먹이공급기, 사료 보관을 위한 냉장·냉동시설, 출하 및 선별작업 등에 에너지가 사용된다. 양수 펌프가 가장 큰 탄소 배출원으로 나타났다. 다음으로 오존발생기, 산소공급 블로워(blower), 사료 보관용 냉동실, 사료 제조기 순서로 탄소를 많이 배출하는 것으로 분석되었다.

넙치 양식장의 경우, 우수식 양식장으로 운영되면서, 해수 오염에 따른 폐사가 늘어나 많은 회전수가 전기사용량 증가의 원인으로 작용하고 있다. 이는 폐사에 의한 입식량 증가, 생사료 사용에 따른 오염도 증가 등의 악순환으로 반복되고 있다. 전반적인 투입량 감소를 통한 사료 사용의 감소, 오염도 저하, 전기 사용 저하 등 양식장 운영 전반에 대한 개선이 필요한 것으로 나타났다.

다운스트림 단계 탄소 배출원 분석에서 운송에서의 탄소 배출량이 많았다. 넙치 등 양식어류는 우리나라의 활어 소비 특성으로 인해 살린 상태로 물차에 의해 운송된다. 이 문제의 해결 방법은 활어차를 친환경 차량으로

변경하는 방법도 있겠지만, 신선회 등의 소비를 통해 가공상태의 선어로 운반되는 국내 환경 조성을 통한 탄소 저감 노력도 고려해 볼 수 있다.

〈표 4-15〉 육상양식장(넙치) 주요 탄소 배출원

구분	양성 전 단계 (upstream)		양성단계	양성 후 단계 (downstream)
주요 탄소 배출원	사 료	• 원료 생산 • 가공 • 운송 • 냉장·냉동	• 양수펌프 • 산소공급장치 • 오존발생기(방역·검역) • 사료(보관, 제조)	• 활어 운송 • 냉장
	종 자	• 양수펌프 • 온도조절(히트펌프)		

자료: 저자 작성

그동안 추진된 친환경에너지 보급사업은 전력과 유류 등 에너지 소비가 많았던 어가들이 지원받아 왔던 것으로 조사되었다. 동 사업으로 지원 어가의 탄소 배출량이 감소하였다. 또한 지원 어가의 생산량은 6.2% 증가하였지만, 비지원 어가는 1.4% 증가한 것으로 분석되어 지원 어가의 생산량 증가가 더 컸던 것으로 나타났다. 이는 친환경에너지 보급사업을 통해 탄소배출 저감뿐만 아니라 생산성 향상이 동시에 이루어진 것으로 판단된다.

이중차분법을 통한 정책효과 계측 결과, 친환경에너지 보급사업으로 1kg 생산당 탄소 배출량이 평균 5.09kgCO₂e_q 만큼 감소하였다. 친환경에너지 보급사업 지원 어가에 대한 효과는 비지원 어가 대비 13% 추가 감소한 것으로 분석되어 친환경에너지 보급사업의 지원 효과는 분명히 있었던 것으로 조사되었다. 따라서 동 사업의 지속적 확대가 필요한 것으로 나타났다.

그러나 분석 결과에서도 설명한 바와 같이, 동 사업이 탄소 효율적인 생산방식으로서의 변화에 따른 효과가 있었지만, 전체 어가의 탄소 배출량의 합계가 감소했는지는 좀 더 검토가 필요하다. 열효율이 높아진 상황에서

가온을 늘리면서 수익을 극대화하는 경우, 단위당 탄소배출은 낮아져도, 전체 탄소 배출량은 증가했을 가능성도 고려해야 한다.

〈표 4-16〉 친환경에너지 보급사업 정책 평가

저감효과	평가	한계
생산량 1kg당 평균 5.68kgCO ₂ eq 감소	• 생산 단위당(kg) 탄소 배출량 감소 • 양식 생산성 향상	• 에너지 효율 증대에 따라 수익 극대화를 위해 생산량 확대 • 총 배출량 증가 가능성

자료: 양식 품목별 어가 180개소 대상 탄소배출 설문조사의 결과를 분석하여 저자 작성

위 분석 결과의 정책적 활용은 우리나라 양식산업 성장전략을 어떻게 설정하는지에 따라 양식산업 탄소중립 대응 방향을 다르게 가져갈 수 있다는 점을 시사한다. 향후 어선어업을 대체하는 양식산업의 빠른 성장을 고려하면, 양식산업 성장으로 인한 탄소 배출량 총량이 증가해도 기술개발을 통해 단위당 탄소 배출량을 줄이는 방안이 세계 양식산업의 성장 속도를 감안하면 합리적인 판단일 수 있다.

특히 직접배출을 통해 생산되는 어선어업에 의한 수산물 생산량을 감소시키고, 전기 사용으로 간접배출량이 많은 양식산업을 성장시키면서 어선어업 수산물을 양식수산물로 대체하면 저탄소 단백질 공급에 기여할 수 있다. 또한 육상양식장에서 사용하는 전기 사용을 위한 에너지를 재생에너지를 활용한 태양광, 소수력 등으로, 에너지를 변경하여 양식산업의 탄소중립을 달성하는 방향으로 정책을 설정하면 충분한 단백질원 공급과 함께 양식산업 성장도 유도할 수 있다. 이는 어선어업을 간접배출(전기 사용)로 변경하고, 이를 재생에너지 사용으로 탄소중립을 달성하는 과정보다는 육상양식처럼 이미 간접배출이 많은 상황에서 신재생에너지를 사용하여 탄소중립을 달성하는 것이 달성 기간과 수용성 면에서 효율적일 수 있다.

05

육상양식 탄소중립 추진전략과 정책과제

제1절 기본방향

세계적으로 양식산업은 기후변화, 남획 등의 영향으로 인한 자원 감소로 생산량이 정체된 어선어업을 대체하고 있다. 양식산업 성장이 빨라지면서 세계 수산물 생산량의 49.2%는 양식 수산물(해조류 제외)로 채워졌다. 화석연료 사용으로 온실가스 직접 배출량이 과다한 것으로 평가받는 어선어업은 탄소중립 시대에 더 큰 도전을 받을 것으로 예상된다. 상대적으로 양식산업은 온실가스 배출량이 전체 축산업 중 양고기 산업 수준으로 평가되는 등 축산업 대비 동물성단백질 생산에 있어 탄소 경쟁력이 높다. 수산물 생산을 어선어업에서 양식산업으로 전환하는 것 자체만으로 탄소 저감의 효과를 가져올 수 있다. 범위를 넓히면 축산물을 양식수산물로 대체하는 것도 세계적으로 탄소 저감의 효과를 가져올 수 있다. 탄소중립의 관점에서, 증가하는 세계 인구에게 단백질을 공급하기 위해서는 양식산업의 성장은 필수적이다.

반면, 전체 수산업의 탄소중립 과정에서 어선어업 탄소중립을 위한 NDC 이행은 감척, 신조 대체, 어선 기관 대체, 친환경 선박 건조 등 도전적인 과제들이 많다. 기술성숙도, 업계 수용성, 인프라 구축 여부 등에 따라 탄소

중립 목표 달성이 어려울 수 있다. 그러나 수산업에 있어 어선어업과 양식 어류 생산은 상호 대체가 가능하다.¹⁵¹⁾ 양식어류 생산은 전력 사용 비중이 높아 신재생에너지 사용 여부에 따라 탄소중립 달성 가능성이 크다. 어선 어업의 탄소 감축 로드맵 이행의 어려움을 고려하여 어선어업 생산량을 줄이고, 양식산업을 통한 생산량을 늘리는 방향으로 전체 수산물 생산에 있어서 탄소 저감을 고려할 필요가 있다.

지금까지 탄소 배출량 비교에서 양식산업이 경쟁우위를 갖는 이유는 세계적으로 양식산업이 수온 등 자연적 조건에 맞는 해상 적지에서 자연 의존적(수온 등) 양식 방법을 사용하고 있고, 축산물 대비 kg당 적은 사료를 사용했기 때문이다. 축산물 대비 물 사용이 적고, 토지이용 변화를 통한 탄소배출 변화가 적다는 장점도 온실가스 배출량에 반영되었다.

그러나 북유럽에서 시작된 육상양식, 대형 해상플랜트 양식 등 규모화된 양식 시스템의 확산이 예상되는 가운데, 대규모 스마트양식장은 전력 사용에 따른 간접배출이 대부분이라고 하더라도, 기존 해상 양식장과 어선어업에 비해 탄소 배출량이 많다는 연구 결과도 있다. 향후 규모화된 첨단시설을 갖춘 양식장이 늘어나면서 양식산업이 외연적으로 더욱 확대되면, 탄소 배출량 증가가 수반될 수밖에 없다. 미국이 대규모 양식장과 육상양식장에 대한 탄소중립을 권고한 이유이다.

패류, 해조류 양식의 탄소흡수 및 탄소격리에 대한 논의들이 있지만, 현재 연구가 진행 중이고, 관련 공신력 있는 데이터를 통한 국제사회 표준안이 마련되어 있지 않다. 특히, 국제사회 합의가 되어 있지 않은 상황이다. 양식산업 탄소중립에 있어 시간이 소요될 것으로 예상되는 해조류, 패류 등 양식의 탄소중립 이슈는 중장기적 과제로 남길 필요가 있다.

151) 현재 시점에서는 우리나라 어류양식이 활어 소비에 한정되어 있어 소비시장 포화로 대량생산이 어려운 구조이다. 그러나 최근 육상양식 대규모화는 가공용 어류 등 어선어업 생산 어류를 대체하는 소비시장 창출이 가능한 어류의 생산이 필요하다. 이를 가정할 때 어선어업 생산 어류와 상호 대체가 가능하다.

따라서 현재 탄소 배출량이 많고, 가까운 미래에 탄소배출 증가로 문제가 될 수 있는 어류를 생산하는 육상양식장의 탄소 감축 전략 마련이 필요한 시점이다. 우리나라도 1980년대 넙치 양식을 시작으로 뱀장어 양식 등 주요 핵심 품목의 양식은 주로 육상에서 이뤄지면서 규모가 커졌고, 최근 정부가 추진하는 스마트양식 클러스터 사업이 확대되고 있어 탄소중립 시대에 대비한 선제 대응이 필요한 상황이다.

우리나라 대표 양식 품목인 넙치와 뱀장어 등 어류 양식장은 수온 조절과 수질의 유지를 위해 육상에서 양식하고 있다. 육상양식장에서 입·배출을 위한 펌프 사용, 수온 조절을 위한 보일러 사용에 에너지를 많이 사용한다. 넙치의 경우에는 폐사를 막기 위한 수질 조절을 위해, 과도한 물을 사용하는 점이 에너지 사용량 증가의 원인이 되고 있다. 적절한 생육 관리를 통한 탄소 저감 노력이 필요하다.

또한 양식산업의 가치사슬과 공급망을 고려한 생태계 전반의 탄소 저감 노력이 병행될 필요가 있다. 이를 위해서는 사료 사용 저감, 저단백질 사료 개발, 종묘 생산관리, 유통방법 개선 등의 새로운 탄소 감축 수단들을 발굴해 나가야 한다. 특히 육상양식은 전력 사용 비중이 높으므로 신재생에너지를 활용하여 탄소중립을 달성하는 방향으로 정책을 추진하고, 탄소 저감을 위한 제도적 기반 마련도 필요하다.

제2절 추진전략

양식산업 탄소중립 달성을 위해 우선 고려할 정책 대상은 어류를 생산하는, 규모가 있는 육상양식장이다. 우리나라 육상양식 중 탄소 배출량이 가장 많은 넙치가 우선 대상이 될 수 있다. 넙치의 경우, 어가 당 탄소 배출량이 약 77tonCO₂이고, 넙치 1kg당 16.2kgCO₂를 배출한다. 다음으로 뱀장어도 어가당 8tonCO₂을 배출하고 있어 탄소배출 저감 노력이 필요하다. 강도다리의 경우, 기존 육상양식장에서 넙치를 대체하여 강도다리를 양식하는 경우가 많다. 넙치와 강도다리는 출하 시기 등 생육에 차이가 있지만, 강도다리도 탄소 저감을 위한 주요 품종에 포함되어야 한다.

품목별 육상양식장 탄소 배출량 분석 결과, 종자를 생산하는 양식장의 단위당 탄소 배출량이 많은 것으로 분석되었다. 전복 치패를 생산하는 어가의 탄소 배출량은 평균 22tonCO₂이다. 성어를 양성하는 넙치 양식장 다음으로 많은 탄소 배출량이다. 전복, 넙치 종자를 생산하는 양식장은 단위당 배출량이 각각 42.7kgCO₂, 31.3kgCO₂로 성어를 양식하는 육상양식장보다 단위당 탄소 배출량이 많다. 따라서 국내 양식산업 탄소중립을 위해서는 국내 양식품종 중 넙치, 뱀장어, 강도다리 등을 사육하는 종자, 성어를 생산하는 육상양식장을 대상으로 한 정책을 우선 시행할 필요가 있다.

육상양식 탄소중립 추진을 위해서는 우선 관련 기반을 체계적으로 구축해야 한다. 육상양식 탄소중립 추진전략은 탄소배출 통합 운영시스템 구축, D.N.A 기반 육상양식장(치어, 성어) 탄소 저감, 탄소 저감 양어용 사료 개발, 양식어류 유통단계 탄소 저감, 신재생에너지 활용 등으로 구분하여 병행 추진할 필요가 있다.

첫째, 육상양식장 탄소 배출량에 대한 정확한 데이터에 기반한 탄소 배출량 측정 알고리즘을 개발하여 탄소 저감을 위한 제어 기술의 적용을 확

대하고, 육상양식장 에너지 환원 기술을 적용할 수 있도록 탄소배출 통합 운영시스템을 구축한다.

둘째, 현재 육상양식장에서 에너지를 과다하게 사용하는 원인을 해소하기 위해 육상양식장을 D(data), N(network), A(AI) 기반의 육상양식장으로 개선한다. 현재 에너지 사용의 가장 큰 원인 중 하나는 폐사를 막기 위한 회전수 증가이다. 따라서 넙치는 적정 사육밀도 유지를 통한 밀도 저감, 사료 투입 저감을 통해 양식 수질을 개선하여, 폐사를 저감하고, 이를 통해 물 회전수 감소, 수처리를 위한 드럼 필터 등 사용 저감, 입·배출수 펌프 운영 저감으로 전반적인 에너지 비용을 절감할 수 있는 양식장 운영이 필요하다. 특히 치어, 사료 등 투입과 생산의 예측이 가능한 시스템을 운영하는 것이 중요하다. 이는 에너지 모델링과 예측 및 분석을 통해 운영 과정에서 낭비되는 에너지 사용량을 줄여야 한다. 이를 위해서는 D.N.A 기반 양식장 운영시스템 모델 구축과 확산 전략을 마련한다.

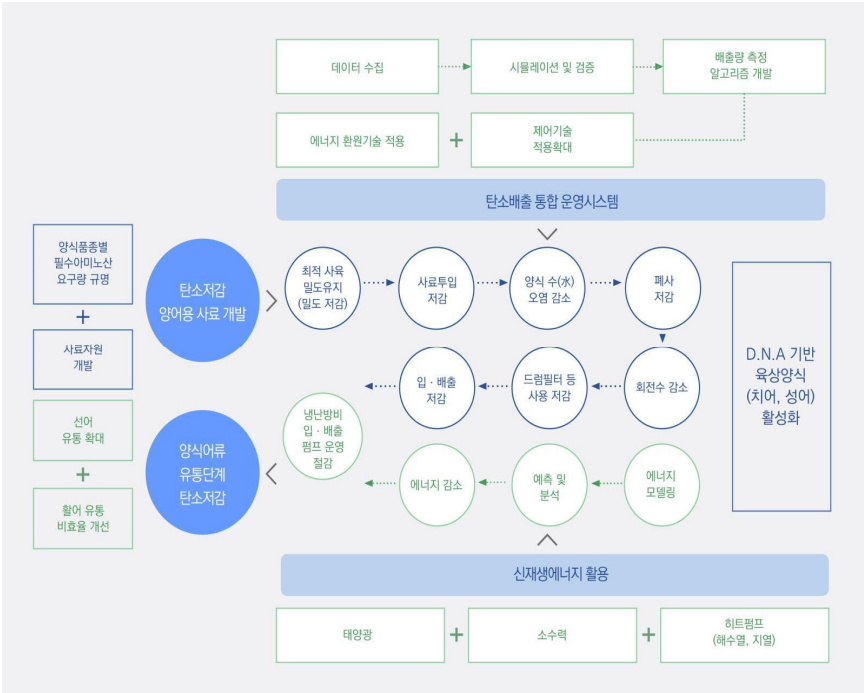
셋째, 전체 공급망의 생태계 내에서 양식수산물 생산을 위해서는 사료가 필요하다. 사료는 배합사료, 생사료 여부에 따라 탄소 배출량이 달라진다. 세계 양식산업의 탄소배출에 있어 사료는 중요한 비중을 차지한다. 배합사료 가공공정에서 가온과 성형을 위한 에너지 사용이 많고, 소형어로 만들어지는 어분의 양도 탄소 배출량에 영향을 미친다. 전적으로 생사료를 사용하더라도 소형어를 어획하고, 유통 또는 수입되는 과정에서 탄소가 상당히 배출된다. 따라서 어분 사용량을 줄이기 위해 양식품종별 필수아미노산 요구량 규명, 곤충 사료 등 사료자원 개발을 통한 어분 사용량 감소로 사료의 탄소 배출량을 저감하는 기술을 개발해야 한다.

넷째, 국내 양식수산물은 소비환경의 특성상, 생산 후 전체 유통경로에서 활어로 유통되는 것이 일반적이다. 물차 등 활어 유통은 물과 수산물을 함께 실어서 유통되므로 비효율이 발생한다. 또한 소비지 인근 유사도매시장으로 유통된 수산물이 전국 횡집, 식당 등으로 물차로 운반된다. 유통 비

효율을 바로잡아 탄소 배출량을 줄이는 방법이 효과적이다. 그 외에도 점차 온라인 유통이 확대되고 있어 산지에서 선어를 유통하여 활어 운반을 줄이는 방법도 운반과정의 탄소 배출량 저감에 효과적이다.

다섯째, 육상양식장은 전기를 주로 사용하여 간접배출의 비중이 높다. 해수열 지열을 이용하는 히트펌프 보급사업을 확대하고, 넙치 양식장의 배출수 낙차를 이용한 소수력발전, 양식장 지붕을 이용한 태양광 발전 등 신재생에너지 사용 계획이 병행될 때 탄소중립 달성이 가능하다.

〈그림 5-1〉 육상양식 탄소중립 추진전략



자료: 저자 작성

제3절 정책과제

1. 육상양식장 탄소배출 통합관리

1) 육상양식장 탄소 배출량 데이터의 수집

육상양식장 탄소배출을 줄이기 위해서는 탄소배출 실태 파악이 우선되어야 한다. 탄소 배출원에 대하여 탄소 배출량에 대한 정보를 직·간접적으로 수집하고, 분석을 위해 가공할 수 있는 기술이 필요하다. 전력을 소비하는 히트펌프, 보일러 등 기기들의 경우, 대상 기기에 전력 사용량을 측정할 수 있는 별도의 미터링 장치를 부착해야 전력 사용에 대한 순시전력, 누적 전력 등 데이터의 수집이 가능하다.

그 외에 직접적으로 전력을 사용하지 않는 탄소 배출원에 대해서는 간접적으로 탄소 배출량 산출을 위해 필요로 하는 수질, 기기 사용 이력, 급이 이력, 실내외 환경 정보, 생육 정보 등 기기의 정보를 수집해서 향후 분석에 활용할 수 있어야 한다. 예를 들어, 양식장에서 사용하는 사료는 탄소를 배출하는 주요 요소로서 온실가스 산정표(Colt et al, 2008)¹⁵²⁾에 의하면 사료 1kg당 탄소 배출량은 약 3,300g으로 제시되어 있으며, 급이 이력 관리를 통해 사료로 인해 발생하는 탄소 배출량을 간접적으로 산출할 수 있다.

직·간접적으로 수집된 탄소배출과 관련된 데이터들은 양식장 내 설치된 유무선 통합 장치에 일시적으로 저장되며, 향후 탄소 배출량 관련 다양한 분석을 위하여 데이터센터로 전송된다. 추가로 양식장에서 발생하는 다양한 탄소 배출원에 대한 데이터를 체계적으로 수집하고 관리하기 위해서는 데이터의 수집에 대한 인터페이스에 모든 양식장에서 활용이 가능한 탄소 배출원 분류기준과 공통화된 규격에 대한 정의가 필요하다.

152) Colt et al, (2008) pp.1-4.

2) 양식장 탄소 배출량 측정 알고리즘, 시뮬레이션 및 검증

양식장 전력 사용량의 경우, 탄소배출 계수($0.443\text{CO}_2\text{kg/kwh}$)를 이용하여 손쉽게 탄소 배출량을 계산할 수 있지만, 대부분의 탄소 배출원은 직접적으로 산출되기보다는 간접적인 방법을 통해 탄소 배출량을 측정해야 한다. 이를 위해서는 먼저 탄소배출에 영향을 미치는 다양한 요소들을 문헌조사와 현장 방문을 통해 파악하고, 해당 배출원이 탄소배출에 미치는 다양한 요인들을 분석하여 적절한 지표를 도출해야 한다.

한 예로 양식장의 시설물은 다양한 소재로 이루어져 있으며, 공기 중 부식과 양식 수와의 직·간접적인 접촉, 양식장 운영에 따른 파손, 노후와 등으로 인해 탄소를 배출하고 있다.¹⁵³⁾ 개별 시설물 소재에 따른 탄소 배출량은 온실가스 산정표를 이용하여 간편적으로 유추할 수 있지만, 시시각각 변하는 양식장 환경과 운영 방식에 따라 실제 배출되는 탄소량은 달라질 수 있다. 콘크리트 구조의 경우 대상 어종에 따라 양식 수 타입이 달라지고, 해수, 담수에 따라 콘크리트의 내구성, 부식 시간, 자기 치유 효과가 달라지기 때문에 이를 단순히 온실가스 산정표를 이용하여 계산하기에는 다소 무리가 있다.

다양한 탄소 배출원에 대한 배출량을 측정하기 위해서는 직접적인 측정보다는 탄소배출에 영향을 줄 수 있는 다양한 요소들을 통하여 이들이 탄소 배출에 영향을 미치는 지표를 선정하고, 간접적으로 배출량을 복합적으로 분석할 수 있는 알고리즘이 필요하다. 실제 양식어류가 양성 과정에서 산소를 소비하고 호흡을 통하여 이산화탄소를 배출하고 있으며, 이는 수질 정보(수온, 용존산소량, 암모니아 등)와 양식장 실내외 환경 조건, 급이 정보 등에 따라 달라지기 때문에 위에 언급된 다양한 요소에 대한 개별적 분석과 요소 간의 상관관계, 중요도 등이 복합적으로 고려돼야 한다.

153) 김종현 외(2014), p.55-66.

최근 전 산업에 걸쳐 AI의 도입이 가속화되고 있으며, 방대한 데이터에 근거한 AI 기반의 다양한 분석 알고리즘이 디지털화를 위한 핵심 원동력이 되고 있다. 미국의 탄소 모니터링 기업인 파차마사(社)는 인공지능으로 짚은 과거, 현재 이미지를 활용해 탄소 흡수량과 바이오매스(특정 시점, 특정 공간에 존재하는 생물의 양)를 파악하여 라이다(light detection and ranging, LIDAR)로 3차원 지도를 만들고, AI를 통해 과거부터 현재까지의 산림 활동을 비교·분석함으로써 탄소 배출량을 산출하는 서비스를 제공하고 있다.¹⁵⁴⁾ 국내의 경우, AI 기반의 영상분석 솔루션 기업인 SIA가 인공위성 영상을 이용하여 탄소 검출량을 정확하게 측정하는 알고리즘을 상용화에 근접한 수준으로 개발이 진행 중이다.¹⁵⁵⁾

위에서 언급한 사례들은 영상, 이미지 기반의 딥러닝을 탄소 배출량 산정에 이용한 사례이지만, 양식장 실내의 환경 요소에 대한 시계열(time series)적 특성과 양식장 구성요소가 탄소배출에 영향을 미치는 정도를 정량화한 탄소배출 지표를 통해서 AI를 이용한 데이터 기반의 탄소배출 알고리즘을 산출할 수 있다. 이러한 알고리즘은 탄소 배출량 예측을 위한 시뮬레이션 엔진으로 활용되며, 양식장의 환경과 운영 조건을 입력 받아 예상되는 탄소 배출량을 산출하는 형태로 제공될 수 있다.

그러나 시뮬레이션은 입력 정보와 알고리즘에 의해서 결과를 도출하기 때문에 실제 양식장 환경, 운영에 따라 그 결과가 달라질 수 있다. 따라서, 탄소 배출량 시뮬레이션 결과의 정확도를 높이기 위해서는 시뮬레이션 수행 환경과 결과에 대한 실제 환경에서의 검증을 통하여 알고리즘에 대한 주기적 업데이트가 필요하다.

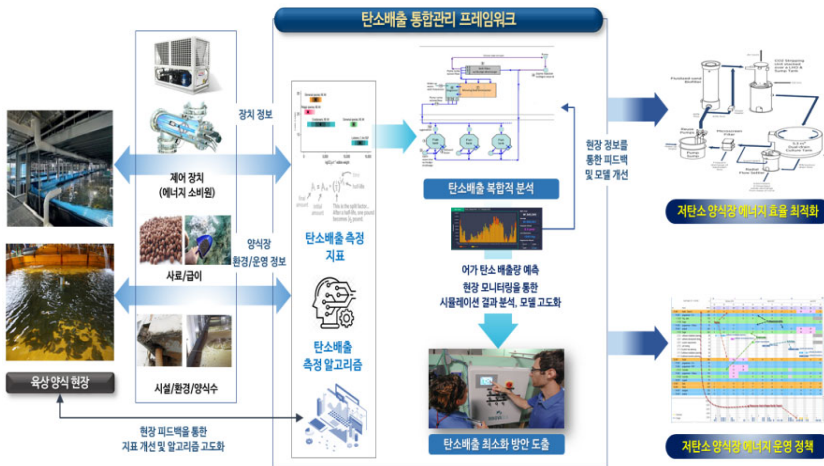
154) ECONOMYChosun(2020.12.14.)(검색일: 2022.12.21.)

155) Ai타임스(2022.3.18.)(검색일:2022.12.21.)

3) 양식장 탄소 배출량 관리 통합 운영

육상양식장에서 수집된 데이터와 배출량 측정에 대한 알고리즘을 체계적으로 연동, 운영하고 사용자에게 관련 서비스를 확장성 있게 제공하기 위해서는 이를 통합적으로 관리하고 운영할 수 있는 프레임워크가 필요하다.

〈그림 5-2〉 탄소배출 통합관리를 위한 프레임워크 개요

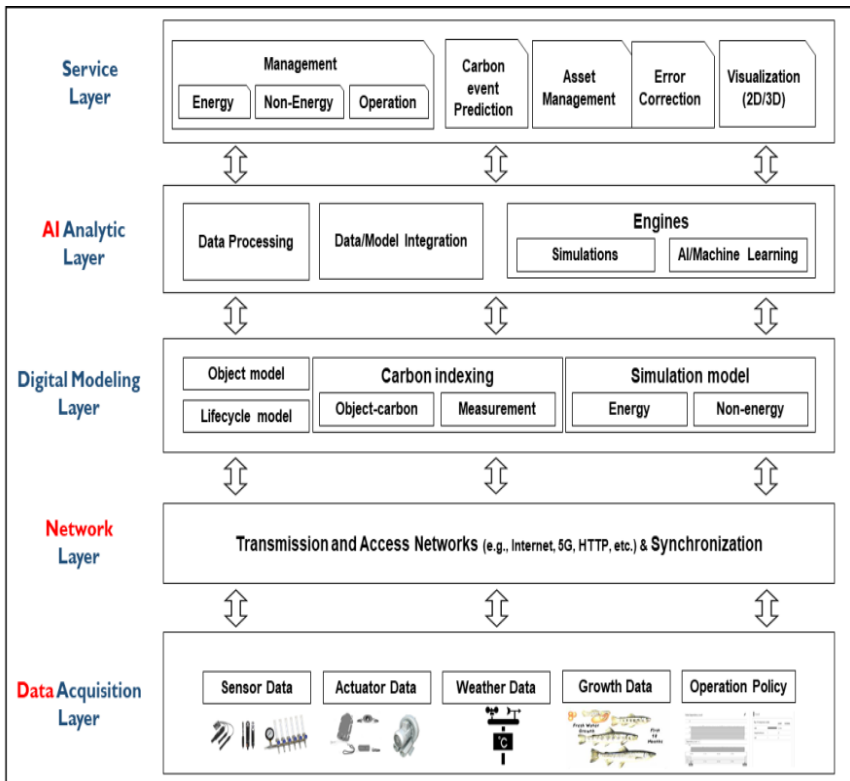


자료: 한국전자통신연구원(2021). p.26 활용, 저자 작성

프레임워크는 탄소배출 통합관리에 대한 기능 구조로서 기능적으로 볼 때, 크게 다섯 가지 계층(Data Acquisition, Network, Digital Modeling, AI Analytic, Service)으로 구성된다. 데이터 수집(Data Acquisition) 계층에서 수집된 다양한 센서, 장비/기기, 외부 기상, 양식어류 생장, 운영 정책 등 현장 데이터는 다양한 방식의 네트워크 계층의 통신망을 이용해서 서버에 수집되고, 수집된 데이터는 디지털 모델링(Digital Modeling) 계층에서 탄소배출을 위한 전처리 과정으로 양식장 구성요소, 탄소배출 주기, 지표 설정 그리고 시뮬레이션을 위한 데이터 모델을 정의, 생성한다.

AI 분석(AI Analytic) 계층에서는 데이터 모델링 결과를 이용하여 다양한 시뮬레이션을 통해 탄소 배출량을 도출하고, 데이터 기반의 AI 기술을 이용하여 탄소 배출량을 산출할 수 있다. 산출된 결과는 최종적으로 서비스(Service) 계층을 통하여 다양한 형태로 사용자에게 제공된다.

〈그림 5-3〉 D.N.A 기반 탄소배출 통합관리를 위한 프레임워크 기능 구조도



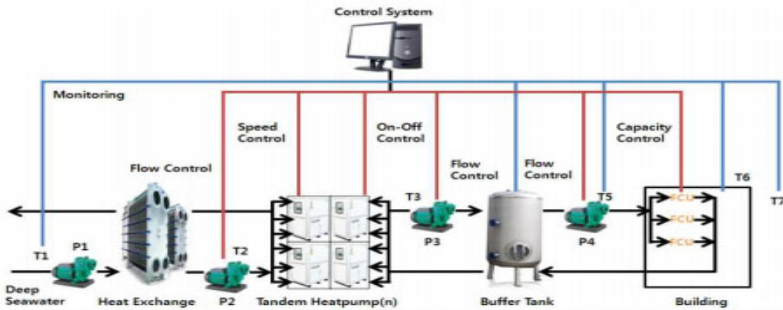
자료: 한국전자통신연구원(2021), p. 22-40. 활용, 저자 재작성

4) 양식장 제어 기술 적용 확대

세계적으로 양식산업의 규모화와 첨단화가 진행되는 과정에서 양식산업 탄소 배출량 증가는 불가피하지만, 양식산업의 부문별 에너지 효율성을 제고하고, 에너지를 신재생에너지로 대체하는 노력을 통해 탄소중립 목표를 달성해야 하는 상황이다. 양식산업 탄소중립을 위한 대표 사업인 히트펌프,¹⁵⁶⁾ 인버터 등을 보급하는 친환경에너지 보급사업에 더해 에너지 절감 장비의 효율성을 높이고, 제어 기술 적용을 통해 불필요한 전력 소모를 줄일 필요가 있다.

육상양식장에서 사용하는 전기는 농사용(을) 전기로 사용료 비용부담이 적은 장점이 있음에도 현재의 민간 보조율 수준에서는 고가의 히트펌프 등 지원 사업에 대한 민간 수요가 높다. 동 사업이 수온 유지를 위해 전력을 많이 사용하는 육상양식장에서는 효과성이 있기 때문이다. 따라서 육상양식장의 특성을 고려한 히트펌프의 고효율화 및 제어 기술 등 적용을 확대할 필요가 있다.

〈그림 5-4〉 히트펌프 가변 제어 기술



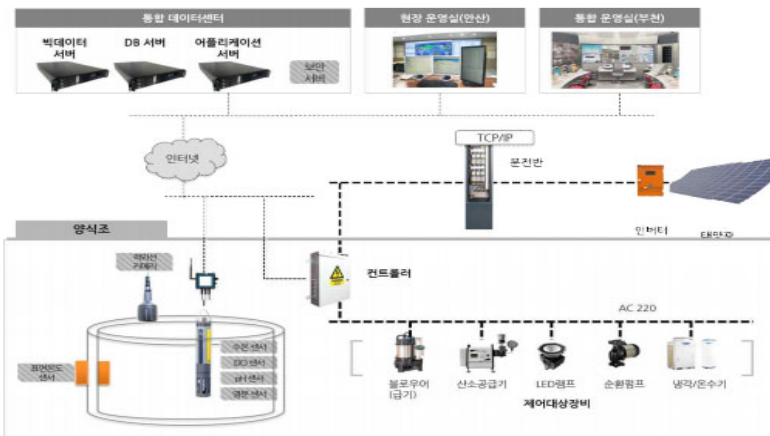
자료: 이규태 외(2018), p. 24.

156) 히트펌프는 Ambient Heat(공기, 수열, 지열, 폐열원 등)인 저온의 열원에서 열을 흡수하여 고온의 열을 생산하는 기기로 적은 구동 에너지(전기, 가스 등)를 이용하여 보다 많은 에너지를 열의 형태로 공급하는 열 변환 기기임(이규태 외, 2018, p.24)

최근 히트펌프의 고효율화와 친환경성 확보를 위해 압축기 기술, 열교환기 개선, 마이크로프로세서 제어 방식 및 솔루션 기술 분야 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 불필요한 전력 소모를 줄이기 위해 단계별 운전주파수를 설정하여 인버터 압축기 등의 회전수 제어, 최대 운전주파수 내에서 운전제어가 가능한 스마트형 운전제어 기술들이 개발되고 있다. 인버터는 모터의 속도를 변화시키는 장치로 에너지 절약, 공정 자동화 및 최적화에 필수적인 장치로서 과거 트랜지스터 방식 대신 현재는 신소자를 사용하여 고정밀 고기능 제어가 가능하다는 장점¹⁵⁷⁾이 있다.

육상양식장의 특성에 맞는 스마트 운전제어 기술 및 고정밀 고기능 제어 등을 활용하여 육상양식장에 적용하는 사업 마련이 필요하다. 동 사업은 새로운 사업으로 추진하기보다는 해양수산부 친환경에너지 보급사업을 히트펌프, 인버터가 설치된 양식 어가에 수산 정보화 사업을 추가하는 방법으로 추진하면 중복성을 피하면서 시너지 효과를 얻을 수 있다.

〈그림 5-5〉 양식장 ESS 시스템 적용 사례



자료: 이규태 외(2018), p. 24.

157) 이규태 외(2018), p. 24.

5) 양식장 에너지 환원 기술 적용

우리나라 육상양식장의 건물 및 구조는 에너지 활용 등을 고려하지 않고, 수처리 기준으로 건설되어 있다. 따라서 육상양식장의 건물 및 구조물의 기준은 수처리 시설을 운영하기에는 적합하지만, 에너지 절감 및 효율적 운영 등에 적용하기는 한계가 있다. 제4장 육상양식장 에너지원별 사용량 조사 결과, 육상양식장의 단계별 에너지 소비 패턴과 구성을 기반으로 전력 에너지를 유량·유속으로 변환하는 펌프·인버터 구동용, 물의 온도를 관리하기 위한 히트펌프 구동용, 공조 등의 펌프 구동용 등이 가장 많은 소비 패턴을 보였다. 어류의 성장에 맞게 온도를 관리하기 위해 전력 에너지를 열에너지로 변환시키고 있으며, 열에너지를 유지하기 위해 양식장에서는 많은 장비를 구축하여 활용하고 있다. 따라서 육상양식장은 양식수산물的高效적인 양성을 위한 수처리 기준에 에너지 절감 및 효율적 운영을 위한 에너지 환원 기술¹⁵⁸⁾을 고려한 시설의 설계 기준 마련이 필요하다.

최근 에너지 환원 기술 도입을 위해서 데이터 기반 양식장 및 자동 제어 시스템 등을 도입하여 실제 양식장의 자동 제어를 진행하는 양식장 등이 생겨나고 있다. 그러나 양식장별 기준 데이터 및 공유 데이터 등이 부족하여 실제 스마트양식 기술의 핵심인 데이터 기반 제어 등 동작은 실제 양식장 인력이 직접 수동 조작하고 있다. 이는 데이터 부재 및 양식 데이터의 수기 기록, 경험 양식, 데이터 공유 인식 부족 등에 기인한다.

현재 다양한 산업 분야에서 추진되는 데이터 바우처 사업 등을 통해 에너지 환원 기술 관점에서 더 많은 외부 데이터 및 건축 데이터 등의 축적 및 활용이 필요하다. 현재 양식장 건축 및 구조 설계는 특정 기준과 관리를

158) "에너지 환원 기술은 고성능 단열재와 고밀성 창호 등을 채택, 에너지 손실을 최소화하는 '패시브 기술'과 고효율 기기와 신재생에너지를 적용한 '액티브 기술' 등으로 건물의 에너지 성능을 높여 사용자가 외부로부터 추가적인 에너지 공급 없이 생활을 영위할 수 있도록 건축한 빌딩에 적용하는 제로 에너지 건축기술이다." 기계설비신문(2022.4.11.) (검색일: 2022.10.8.)

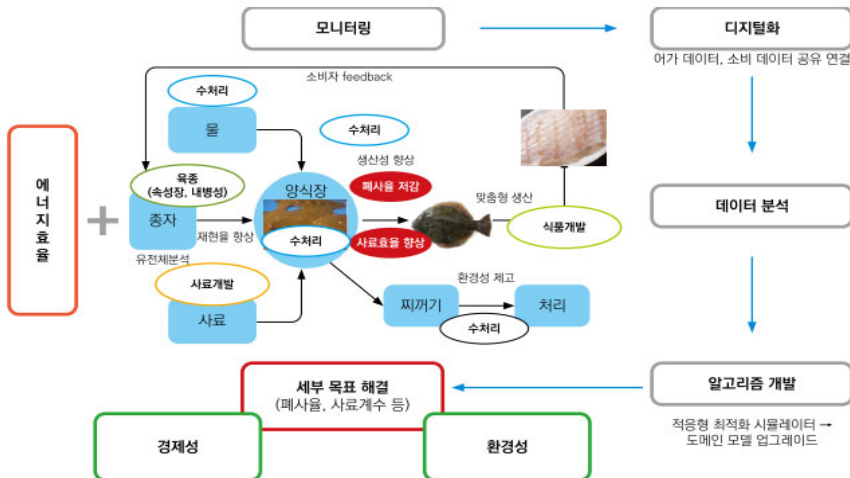
받지 않고 있다. 따라서 양식장의 수조 구조 및 어종에 따른 최초 건축 설계 시 에너지 효율 및 절감을 고려하도록 하는 표준설계 기준 및 지원이 필요하다.

2. D.N.A 기반 육상양식장(치어, 성어) 탄소 저감

1) 저탄소 양식 모델팜 구축

육상양식장 에너지 절감을 위해 우선적으로 해야 할 일은 양식장 운영 방법을 개선하는 일이다. 기존 양식장의 과도한 물 사용, 사료 투입을 줄이면서 동일 수준의 양식 수산물 생산하기 위해서는 정밀한 투입, 산출이 가능한 스마트양식이 필요하다.

〈그림 5-6〉 육상 스마트양식장의 스마트화 요구 사항



자료: 마창모(2021), p. 53.

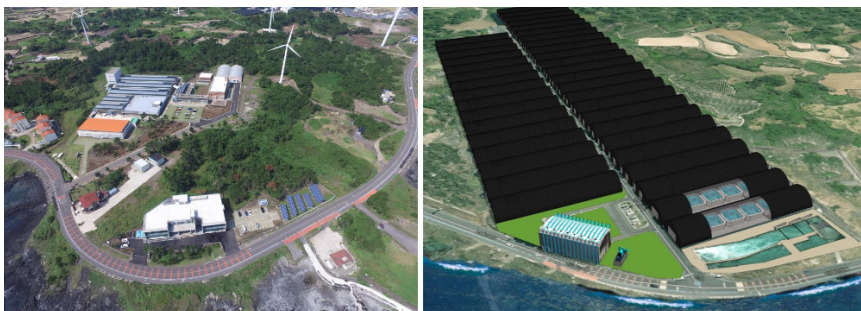
D.N.A 기반 육상양식장은 양식수산물의 치어 투입, 사료 공급, 분조, 출하 등 양성 과정, 입수, 정화, 수조 내 수질 관리, 배출 등 물의 흐름, 펌프, 보일러, 블로워, 사료 공급기, 냉장·냉동 창고 등의 사용에 따른 에너지 흐름에 대한 데이터의 수집, 분석, 알고리즘 개발, 자동 제어 등이 가능한 디지털 기반 양식장이다.

탄소 저감의 관점에서뿐만 아니라 넙치 양식의 정상화를 위해서 폐사를 줄이는 일이 중요하다. 폐사를 줄이기 위해서는 적정 사육밀도를 유지하고, 사료 등 투입을 낮춰, 양식 수(水)의 오염을 감소시키면 회전수 감소, 드럼 필터 등의 사용 감소, 입·배출 펌프 사용 감소 등의 선순환 구조가 형성되어 에너지 사용이 줄어들게 된다. 이러한 일련의 선순환 구조로의 전환을 위해서는 투입, 산출의 정밀성이 요구된다.

스마트양식은 데이터(Data), 네트워크(Network), 인공지능(AI) 기반의 디지털 양식체계를 구축하여 데이터 기반의 양식을 위한 모델팜을 우선 구축할 필요가 있다. 에너지 사용 절감을 위한 D.N.A 기반 모델팜은 별도의 신규 예산사업을 통한 추진보다는 2021년에 선정된 제주지역 스마트양식 클러스터 사업을 활용할 필요가 있다.

넙치 양식의 중심지에 새롭게 조성될 스마트양식 클러스터에 들어갈 테스트베드 마련을 위한 기본계획에 수처리 최소화를 통한 에너지 절감 모델을 적용한다면, 에너지 사용 절감형 양식장의 모델팜 마련이 가능하다. 현재 유수식 양식장의 폐사율 저감은 수처리와 연계되어 있고, 수처리를 통한 에너지 비용을 줄이는 부분은 최근 논란이 되는 농사용 전기료 상승과 연결되어 있어, 양식장에서 스마트 기술을 활용한 에너지 절감은 양식업계의 스마트 기술 수용도 향상에 도움이 될 수 있다.

〈그림 5-7〉 제주 스마트양식 클러스터 사업 대상지 조감도



자료: 해양수산부 공식 블로그(<https://blog.naver.com/koreamof/222836484868>), (검색일 : 2022.12.26.)

2) 저탄소 양식장 확산

정부는 2022년부터 육상양식장 디지털화를 위한 기술개발이 추진 중이다. 해양수산부가 추진 중인 기술개발 사업은 ‘유수식 스마트양식 시스템 개발’, ‘빅데이터 기반 양식 생산성 향상’ 사업으로 빅데이터 확보 및 모델을 개발하게 된다.¹⁵⁹⁾ 이 연구를 통해 육상양식장을 중심으로 디지털 양식생물·생장 관리, 에너지 관리, 수질 관리 등의 연구 결과가 도출될 예정이다.

또한 정부는 2018년부터 스마트양식 클러스터 사업을 추진하고 있으며, 부산, 경남, 전남, 강원, 포항 등에 기술 실증단지과 배후부지를 활용한 스마트양식 기술 확산을 위한 사업을 추진 중이다. 디지털 관련 기술개발 사업과 스마트양식 클러스터 공모사업 외에 소규모 양식 어가에서 신청이 가능한 사업으로는 수산 ICT 융합 지원 사업이라는 공모사업이 있다.

디지털 양식 기술개발을 통해 정밀한 투입, 산출 생산구조로 전환하는 과정에서 과학적 생산 및 관리를 통한 저 투입 생산구조 마련을 통한 에너지 사용 절감이 필요하다. 그러나 스마트양식 기술의 현장 적용 확대를 위해서는 소규모 어가와 스마트양식 클러스터의 참여 주체와는 접근방법을

159) 해양수산부 공고 제2022-97호(2022.18.)

달리할 필요가 있다. 소규모 어가에 대해서는 수산 ICT 융합지원 사업 확대를 통해 최소한의 모니터링과 데이터 축적이 가능하도록 기반을 구축할 필요가 있다. 반면, 스마트양식 클러스터 및 우수식 스마트양식 시스템 기술개발 사업으로 도출된 결과를 소규모 어가에 적용하는 방안 마련도 고려되어야 한다.

제4장의 분석 결과에서 넙치 육상양식장의 경우, 주변 해수의 오염도가 높아지면서 양식 수조 내 수질 악화로 넙치가 각종 질병에 노출되면서 폐사가 많아졌다. 폐사가 많아지면서 더 많은 치어를 투입하고, 투입된 사료 등 오염물 처리와 사육 수의 수질 유지를 위해 회전수를 늘리게 된다. 넙치 양식장의 악순환 구조로 인해 에너지 사용량은 더 증가하는 경향을 보인다. 따라서 실제 양식장 현장에서 입·배출수와 수처리 저감을 위해서는 단계별로 배출수를 줄이는 방향으로 기존 양식장을 리모델링하여 저탄소 양식장을 확산하는 전략을 마련할 필요가 있다.

기존 양식장 확산 전략으로 즉각적인 폐쇄형 양식 시스템인 완전 순환여과식 양식 시스템(RAS) 도입은 양식 시스템 구축 비용이 과다하여 현장 수용성이 크게 떨어질 수 있다. 따라서 기존 우수식 양식장 리모델링을 통해 기존 물 사용량을 절반 이상 줄이는 반순환여과식 양식 시스템으로의 전환이 필요하다. 반순환여과식 양식 시스템의 경우 시스템 전환 시 오염물질 배출 최소화 및 수조 내 수질 개선을 위해 배합사료 사용을 전제로 하는 경우 효과성을 높일 수 있다.¹⁶⁰⁾

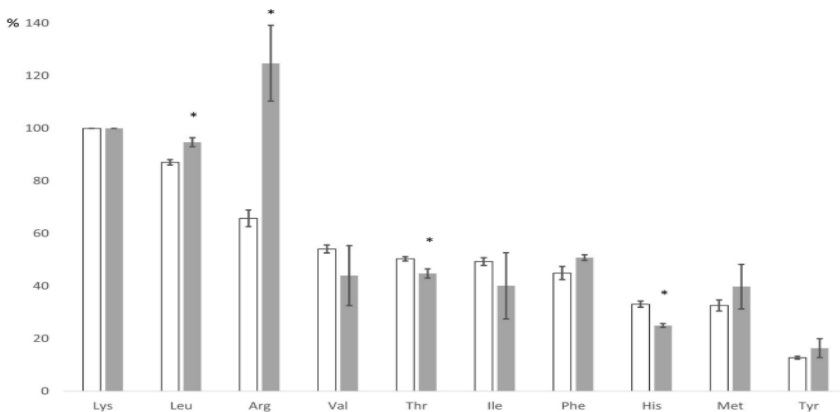
160) 부경대학교 양식 공학 교수 자문 결과(2022.11.17.), 기존 넙치 우수식 육상양식장을 8m 수조 7개, 물량 200t 규모로 1세트씩 구성하여 일간 순환율을 3회전 이하로 떨어뜨리는 실험을 실증하면 입·배출수 및 수처리에 사용되는 전체 에너지 사용량을 줄일 수 있고, 이는 제주도 어가에서 기존 양식장 리모델링을 통해 적용이 가능하다는 의견 제시

3. 탄소 저감 양어용 사료 개발

1) 주요 양식품종별 필수아미노산 요구량 규명

양식산업 탄소 저감에 있어 중요한 부분 중 하나는 투입재인 사료 생산에서 탄소배출을 줄이는 것이다. 어분은 아미노산을 함유하고 있어 양어용 사료의 단백질 원료로 사용된다. 양식 어류마다 성장에 필요한 아미노산 요구량은 차이가 있고, 어종별로 최소한의 아미노산 정량을 사료에 조성한다면 어분의 과다 사용을 줄인 친환경 사료를 생산할 수 있다.

〈그림 5-8〉 근육 내 총 아미노산 비율(흰색, 어류; 회색, 새우)



자료: McLean, Ewen et al.(2022)

국내에서 양식되는 어류는 아미노산 요구량 정보 부족으로 정밀한 사료 조성이 어려워, 주로 어분에 의존하고 있다. 국내에서 생산되는 양어용 배합사료는 주요 양식어류 사료에서 어분을 50% 이상 사용한다. 양식수산물 생산량이 많은 넙치, 조피볼락, 돔류, 뱀장어의 경우 사료 내 어분 사용량이 50~80%에 이른다.

〈표 5-1〉 국내 어종별 배합사료 생산량 및 주요 배합사료의 어분 함량

단위: 톤

구분	2016년	2017년	2018년	2019년	2020년	사료 내 어분 함량
총계	136,910	148,201	155,897	163,354	167,961	
해산어	97,737	98,207	104,789	113,719	108,058	
넙 치	22,381	22,663	23,841	21,674	20,563	60~70%
조피볼락	9,531	10,539	12,441	12,192	9,021	50~60%
돔 류	9,160	9,811	9,556	10,615	12,454	50~60%
새 우	14,926	13,176	14,726	18,126	18,772	
방 어	44	949	986	1567	2,933	
기타 해산어	41695	41069	43239	49545	44,315	
담수어	39,173	49,994	51,108	49,636	59,903	
잉 어	2640	3877	4449	4797	4,796	
송 어	4,876	5,290	5,106	5,775	4,819	
붕 어	13	549	568	577	590	
틸라피아	197	299	259	205	108	
민물장어	18,456	28,899	29,697	24,623	37,452	70~80%
메 기	12,053	10,865	10,683	13,181	11,513	
미꾸라지	938	215	345	478	625	

자료: 농림축산식품부 최근 통계자료, 배합사료 생산실적 통계(2020)를 활용하여 저자 작성

어종별로 사료 내 아미노산 적정 요구량에 대한 데이터를 구축할 경우, 적정 사료배합을 통해 경제적이고 친환경적인 사료 생산이 가능하다. 그러나 국내에서는 넙치를 제외한 대부분의 양식 어류에서는 아미노산 요구량 연구가 일부 수행되었을 뿐이다. 따라서 국내 주요 양식품종별 필수아미노산 요구량 규명을 통한 친환경 저어분 사료 개발 연구가 필요하다. 특히 어분은 수입에 크게 의존하기 때문에 생산공정 및 수송 중에 탄소를 배출하게 되어 수입대체를 통한 탄소 저감도 중요한 이슈이다.

세계적으로 대체 단백질 자원개발 연구가 활발하게 수행되고 있으며, 해조류, 식물단백질, 축·수산 가공부산물, 미생물, 곤충 단백질에서 좋은 결

과들이 보고되고 있다. 산업계에서도 산·학·연 기관 후원을 통해 사료 내 실질적인 어분 사용량 감축 노력이 진행되고 있다. 연구계와 산업계의 대체 단백질 자원개발 연구와 더불어 사료 내 사용 비중이 가장 높은 어분을 상대적으로 탄소 배출량이 적은 원료로 대체하기 위해서는 주요 양식품종의 필수아미노산 규명, 실용 사료 배합비 개선 등의 연구가 필요하다.

2) 사료 자원개발을 통한 온실가스 배출 저감

양식산업의 지속적 성장을 위해서는 사료 자원개발을 통한 온실가스 배출을 줄이는 노력이 필요하다. 이를 위해서는 수입 사료 자원을 대체할 수 있는 국내 사료 자원개발이 필요하다. 특히 곤충 단백질은 국내 사료 자원화가 가능하다. 곤충 단백질은 양어 사료 원료로서 많은 연구가 수행되고 있다. EU는 2017년 곤충 단백질의 사료 사용을 공식 승인하였고, 양어용 사료로 동애등에, 밀웬 등 곤충 단백질 수요가 2030년까지 약 20만 톤에 이를 것으로 전망하고 있다.¹⁶¹⁾ 따라서 양식품종에서도 어분 대체 원료로 동애등에 이용성에 관한 연구가 지속되고 있다. 사료 원료로 사용되기 위해서는 기본적으로 대량생산과 안정적인 공급이 가능해야 하며, 원료의 단가가 낮아야 한다. 동애등에는 먹이원인 남은 음식물이 국내에서 충분히 공급되고 있어 사료 원료로 안정적인 생산이 가능하고, 국내 몇몇 업체에서 자동화 시스템을 구축하여 대량생산이 가능하다. 유충 사육 기간이 10일 내외로 짧기에 타 곤충과 비교하여 생산비용이 상대적으로 저렴해서 사료용 원료로 잠재적 가치가 우수하다.¹⁶²⁾

폐자원을 활용한 사료 자원개발 측면에서 팽생이모자반을 활용할 수 있다. 배합사료 중 전복 사료가 가장 비싸고, 원료로는 다시마 등 해조류를 사용한다. 전복 사료의 필수 원료인 해조류는 대부분 중국 수입에 의존하

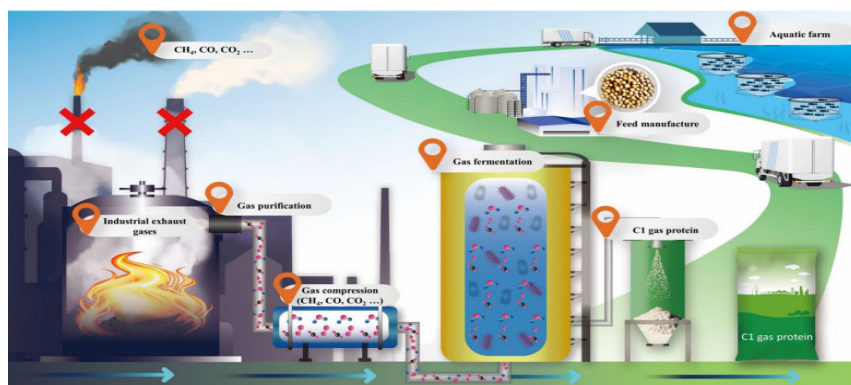
161) 경향신문(2021.9.5.)(검색일 : 2022.10.8.)

162) 위의 자료

고 있다. 따라서 전복용 배합사료 원료 중 미역을 팽생이모자반으로 대체할 수 있다면, 폐자원의 재활용, 수입대체에 의한 탄소배출 저감 등이 가능하다. 2015년부터 우리 연안에는 팽생이모자반이 대량으로 유입되어 양식 시설 훼손, 연안 생태계 파괴, 해안가 퇴적, 부패로 인해 관광지역의 미관을 해치는 등 지역사회에 많은 문제를 야기하고 있다. 따라서 팽생이모자반을 전복 사료 자원으로 개발할 경우, 지역사회 문제 해결뿐만 아니라 사료 자원 확보에도 큰 도움이 될 것으로 기대된다. 현재 국립수산물과학원에서는 2021년부터 팽생이모자반을 이용한 한우 사료 및 전복 사료 개발을 수행하고 있다.

이외에도 신규원료 개발을 통하여 탄소 배출량을 줄일 수 있다. 미국, 유럽 및 중국 등 주요 양식 생산국가에서는 산업시설에서 발생하는 메탄, 메탄올, 일산화탄소, 이산화탄소 등의 탄소를 에너지원으로 하는 미생물 생산 연구가 활발히 진행되고 있다. 이렇게 생산된 단세포 단백질은 기존 단백질 자원의 생산공정과 비교하여 시공간 및 물 사용량을 크게 줄일 수 있으며, 수입에 의존하던 어분 및 대두박을 대체할 수 있다는 점에서 국내 사료 자원 자급률을 높이고, 탄소배출을 직접적으로 줄일 수 있다.

〈그림 5-9〉 탄소가스를 이용한 단세포 단백질 생산공정도



자료: Wang, J. et al.(2022), p. 4.

4. 양식어류 유통 비효율 개선¹⁶³⁾

국내 양식어류 중 대표 품종인 넙치는 양식장 출하 후 산지 수집상이 다음 유통 단계를 맡는다. 일반적인 양식 넙치는 대부분 활어 형태로 유통되며 이는 최종소비자들이 회로 소비하기까지 활어 상태이다. 양식장에서 출하된 넙치는 산지 유통상이 물량을 확보한 후 소비지 유사도매시장까지 운송한다. 이후 유사도매시장(계류장·보관장)에서 활어유통업자들이 소매상(횃집, 일식집)으로 배송한다. 유사도매시장 중 가장 대표적인 곳으로 인천, 부산, 하남을 들 수 있으며, 인천과 부산에서는 제주산 넙치의 유통 비중이 높고, 하남시장은 완도산 넙치의 유통 비중이 높다. 일반적인 양식어류 유통 경로는 생산자에서 유사도매시장, 소매상(횃집, 일식집) 등을 거쳐 소비자에게 이르게 된다.

양식어류는 산지 양식장에서 활어차를 통해 소비지 시장으로 바로 운송되는데, 통상적으로 산지 수집상에 의해 운영되는 활어차는 4.5~5톤 크기의 중형화물차로 1대당 2.5톤의 넙치를 운송한다. 일반적으로 한 곳의 양식장에서 2.5톤 물량을 모두 확보하기는 어려우므로 주 거래 양식장 몇 곳의 물량을 더해서 2.5톤의 물량을 확보하고 이후 육지로 운송한다. 제주항에서 카페리 배편을 통해 활어차를 육지로 운송시키며, 대략적인 항구별 물량 비중은 2020년 기준 목포항 60%, 녹동·여수·부산항 40%이다. 서울, 경기 등 수도권으로 공급되는 물량은 대부분 목포항으로 운반되고, 나머지는 각 지방으로 공급된다. 다음날 새벽에 소비지의 유사도매시장으로 운송된 넙치는 오전에 횃집이나 일식집으로 개별 배송되는 구조가 가장 일반적이다.

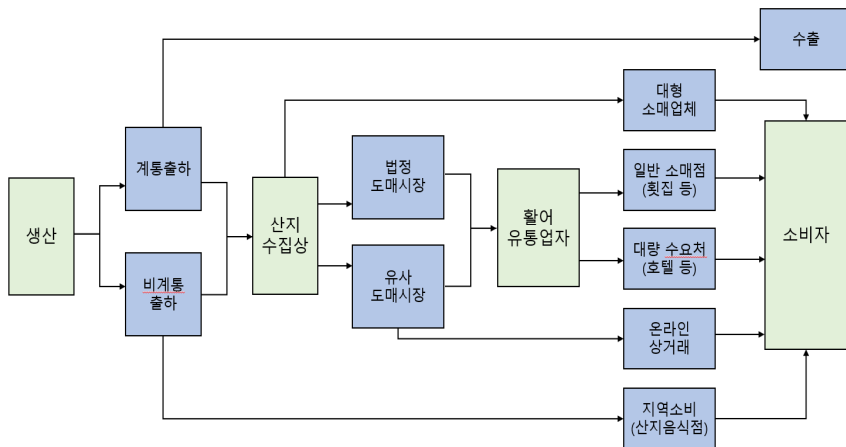
수출은 활어차를 이용하여 일본으로 해상 운송하는 경우와 그 외 지역의 경우, 활어 컨테이너와 항공을 이용하여 운송하는 경우로 구분할 수 있다.

163) 국립수산물과학원(2021), pp. 74-86. 참고하여 작성함

넙치 수출 비중의 90% 정도를 차지하는 일본 수출의 경우 부산으로 활어차를 이용하여 운송한 후 카페리 배편으로 수출된다. 그 외 지역은 인천의 물류센터로 활어차를 이용하여 운송되어 항공을 이용하거나, 부산과 거제에 있는 물류센터로 활어차를 통해 배송된 넙치를 활 컨테이너에 옮겨 화물선을 통해 해상으로 운송된다.

넙치 유통이 일반 수산물 유통과 다른 점은 다음과 같다. 첫째, 계통판매 비중이 다른 품목에 비해 상대적으로 낮다. 계통판매의 비중이 낮은 것은 국내의 양식어류 대부분에서 찾아볼 수 있는 특성이다. 대표적인 넙치 생산지인 제주지역의 경우는 제주어류양식수협을 통해 계통판매 비중이 80% 수준으로 높지만, 완도 등 다른 지역은 계통판매 비중이 5% 이하로 매우 낮다. 둘째, 법정 도매시장을 경유하는 비율이 10% 이하로 매우 낮다. 일반적인 수산물은 법정 도매시장을 경유하는 비중이 높지만, 활어회로 소비되는 어류들은 대부분 법정 도매시장을 경유하지 않고 도·소매업체와 대형소매점 등을 통해 바로 소비자에게 도달된다.

〈그림 5-10〉 국내 넙치 공급망 구조



자료: 국립수산물과학원(2021), pp. 74-86

현재 양식어류 유통구조의 비효율성은 우리나라의 활어회 소비에서 비롯되었다. 활어회 소비문화를 선어회 소비로 전환하면 전국 횡집 등으로 활어를 유통하는 활어차 운반에 따른 탄소 발생량을 상당히 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 소비문화의 급격한 변화를 기대하기는 어렵지만, 코로나19 이후 온라인 판매가 급증하면서 선어회에 대한 소비가 확대되고 있다.

탄소 배출량이 가장 많은 넙치 육상양식장은 제주도와 완도지역에 집중되어 있다. 온라인 플랫폼 등을 활용하여 특정 생산지를 중심으로 선어회로 가공하여 소매상 또는 소비자에게 직접 유통하는 경우, 활어와 물을 같이 실은 활어차로 산지에서 전국으로 유통되는 비효율적인 유통방법을 개선할 수 있고, 생산 후 단계 에너지 사용량의 71%에 달하는 양식수산물 운송 부문 탄소 배출량을 줄일 수 있다.

5. 재생에너지 공급 다양화

육상양식장에서 사용하는 모든 장비가 전력을 에너지원으로 사용하여 구동된다. 현재 한국전력에 대한 의존도가 높아지고는 있지만, 반대로 신재생에너지 보급사업으로 한국전력의 의존도를 줄이려는 시도가 많이 있다. 산업통상자원부 등에서 진행하고 있는 RE100 정책 등은 사용자가 사용하는 전력은 사용자가 만들어서 사용하고, 남는 전력을 판매하도록 ‘소규모 전력거래제도’ 등을 만들어서 시행하고 있다. 이러한 정책에 맞춰 양식장에도 신재생에너지 활용을 확대하여 탄소중립 방안을 마련할 필요가 있다.

현재 많이 보급된 태양광 발전시설을 육상양식장 에너지원으로 교체하는 방법이 고려될 수 있다. 국내 일조량은 오전10시~오후3시까지 발전량을 계산하여 4.5~5시간의 발전량을 추산할 수 있다. 태양광 패널 한 장(2m×2m)은 450W의 출력량이다. 양식장 지붕의 면적과 시간은 발전 용량이 된다. 양식장 상부에 설치하려면 적절한 구조물이 있어야 한다. 특히 신재생에너지공급인증서(Renewable Energy Certificate, REC)의 가중치를 받

으려면 벽체와 지붕을 갖춘 건축물이어야 한다. 발전사업허가는 건물 사용 승인 완료 후 1년 경과 시 신청할 수 있고, 태양광 패널 사용 연한은 30년 이고, 농촌 태양광 사업을 위한 대출이나 일반 대출이 가능하다.

태양광을 사용한 전기생산은 장기간에 걸쳐 이미 확립된 기술이며, 향후 기술 발전에 따라 효율성과 안정성이 더 커질 것으로 예상되므로, 기술적 문제가 없어 양식장의 태양광으로 활용 가능할 것이다. 그러나 태양광 장치 관리 기술의 부재, DC 전력 전문가 부재, 추가 비용(ESS 도입 등) 등의 이유로 선호되지 않는 한계를 극복해야 한다.

넙치 육상 유수식 양식장의 경우 배출구에 높이가 있어 소수력발전을 에너지원으로 교체 사용하는 방법도 고려될 수 있다. 소규모 수력발전은 대규모 수력발전과 같은 원리가 적용된다. 적정한 수량과 낙차가 보장된다면 대규모 수력발전에 사용되는 발전기를 축소하여 그대로 사용할 수 있으며, 규모가 작고 유지비가 저렴하며 환경에 미치는 영향 또한 작으므로 기술적으로 간단하고 환경친화적인 발전방식이다.

다른 재생 가능한 에너지원에 비해 에너지 밀도가 높아서 여러 나라에서 기술개발과 사업을 정부가 지원하고 있다. 그러나 국내의 소규모 수력발전은 유효 낙차가 작고 수량이 적고 매우 불규칙하여 입지 조건이 제한되고 있다. 또한 초기 투자 비용이 많이 들며, 효율성을 갖춘 저 낙차용 수차의 부재 및 규제, 과다한 인건비로 인해 채산성이 악화되어 사업이 정체된 상황이다.

3m 이상의 낙차를 확보한 양식장 소수력발전은 기술적으로 타당하므로 유효 낙차가 3m 이하인 양식장은 소수력발전을 도입하는 데 지형 조건, 수량과 수차에 대한 정밀한 검토가 필요하다. 그러나 제주지역 넙치 양식장의 설계도가 거의 남아 있지 않아서, 낙차를 확인하기 위하여 실제 측량을 한 경우에만 경제성 확인이 가능하다.

영어조합법인 (주)AQA에 의뢰하여 제주지역 사례 양식장에 대한 소수력 발전을 설치했을 때의 타당성 분석을 의뢰한 결과, 순환여과식 양식장은

취수하고 방류하는 유량이 적어서 소수력발전 사용이 불가능하였다. 반면, 제주지역 넓치 유수식 양식장은 유효 낙차가 7m 이상이거나 방류 수량이 52,500㎥보다 많은 경우에만 경제적 타당성이 있는 것으로 나타났다.

이외의 방법으로는 수소 연료전지 활용 방법도 고려해 볼 수 있다. 수소 연료전지는 수소를 연료로 하여 전기와 열에너지를 배출한다. 50% 전기와 50% 열을 배출하고 있어 구조상 열에너지가 필요한 양식사업 등에 적합할 수 있다. 그러나 수소 연료전지를 구성하기 위해서는 주변 장치와 장비를 구축해야 하고, 고압의 수소 가스 라인을 도입해야 한다.

〈표 5-2〉 육상양식장 제원 및 전력 사용량(사례)

양식장 형태	유수식 양식장	순환여과식 양식장
양식 방법	수조에 외부에서 취수된 사육수를 연속적으로 통과시켜 산소를 공급하고 오염물질을 제거하는 방법 (25회전/일)	수조에서 배출된 사육수를 정화하고 산소를 주입하여 다시 수조로 유입시켜 재사용하는 방법 (일환수율 13.2%)
지붕 면적	3,920㎡	3,920㎡
수조 면적	2,100㎡	1,600㎡
유입량	52,500㎥	264㎥
배출조 수위 높이	해수면 +7m	해수면 +7m
유입펌프 양정고	20m	20m
양식장 필수설비	전기사용량	24시간
유입 펌프	4,101 KWh	21 KWh
소독 장치	1,509 KWh	840 KWh
시스템 펌프		2,321 KWh
드럼 필터		46 KWh
Foam Fractionator		930 KWh
Air Blower		888 KWh
먹이공급기, 선별기 등	99 KWh	99 KWh
소계	5,709 KWh	5,145 KWh

주 : 양식전문기업회사법인 (주)AQA에 의뢰하여 실제 양식장 설치 기준으로 도출한 결과임
자료: (주)AQA(2022), pp. 1~4.

〈표 5-3〉 육상양식장 소수력발전 사업의 경제적 타당성(사례)

구분	수량	비고
투자비	278,000,000원	
유지관리 및 운전비	10,425,000원	
발전효율	65%	
발전용량	27 KW	
전기료	150원/KWh	smp +rec
연간발전량	236.5 MWh	
연간매출액	35,478,000원	
B/C	1.00	

주: 양식전문어업회사법인 (주)AQA에 의뢰하여 실제 양식장 설치 기준으로 도출한 결과임
 자료: (주)AQA(2022), pp. 1-4.

제4절 지원체계 및 중장기 추진 로드맵

1. 지원체계

탄소중립 대응체계 수립에 있어 환경부가 국가 온실가스 감축목표를 설정하고, 해양수산부는 해양수산부문 기술성숙도, 수용성 등을 고려하여 양식산업의 온실가스 감축목표 및 탄소 감축을 위한 신규사업을 발굴한다.

우선, 해양수산부는 양식수산물의 탄소 배출량 감소를 위해 저탄소 수산물인증제도를 도입한다. 저탄소수산물인증제도 도입을 위해서는 양식장 탄소 배출량 모니터링이 필요하다. 이를 위해 국립수산물과학원에 탄소배출 통합 운영시스템 구축사업을 지원한다.

국립수산물과학원 통합 운영시스템을 통해 기존 육상양식장 및 종자 양식장, 건립 중인 스마트양식 클러스터 등을 포함한 육상양식장의 전기 사용 및 탄소 배출량 데이터의 수집, 모니터링 등이 가능한 사업을 추진한다. 전력 사용을 줄이기 위해 관련 데이터를 활용한 알고리즘을 개발하고 제어하는 시스템을 구축한다. 기존 육상양식장과 종자 양식장, 스마트양식 클러스터 등에 D.N.A 기반 육상양식 활성화를 통해 정밀 투입, 산출시스템을 구축한다. 관련 기술개발 및 모델팜 등을 만들어 실증한 뒤 단계별 배출수 감소를 통해, 오염수 처리를 위해 사용되는 입·배출수 수량을 줄여 에너지 사용을 감소시킨다. 이 사업의 모델팜은 제주지역에 선정된 스마트양식 클러스터의 테스트베드를 활용하여 신규사업 추진에 따른 추가 비용을 줄일 필요가 있다.

주요 양식산업 투입재에 의한 탄소 배출량을 줄이기 위해 국립수산물과학원은 탄소 저감 양어용 사료를 개발하고 수협사료 등을 통해 양식장에 공급할 수 있도록 한다. 수산종자협회와 함께 양식 수산물 종자 생산단계에

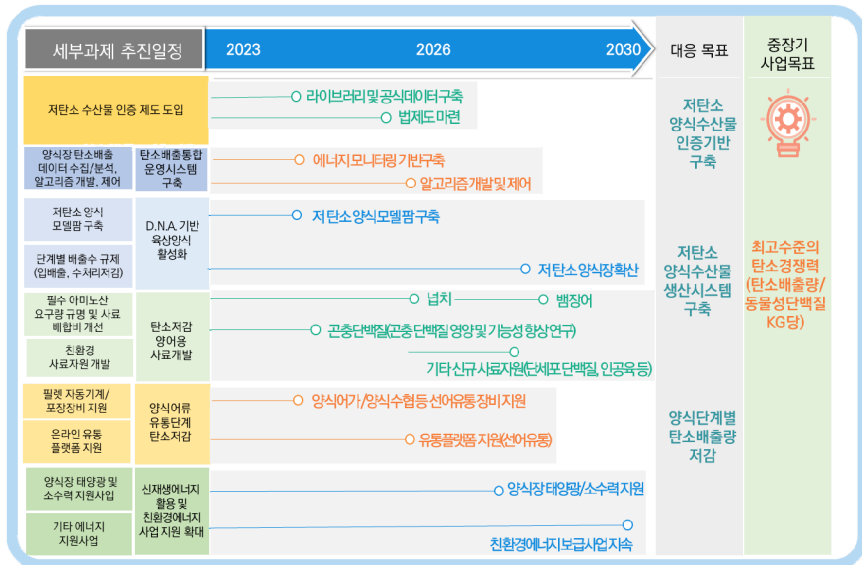
2. 중장기 추진 로드맵

육상양식장 탄소중립 대응 중장기 추진 로드맵은 어선어업 생산 수산물, 축산물 등을 포함한 전체 동물성단백질 kg당 생산에 있어 최고 수준의 탄소 경쟁력을 확보하는 것을 목표로 하였다. 육상양식장 탄소중립 대응 목표로는 첫째, 저탄소 양식수산물 인증 기반 구축, 둘째, 저탄소 양식수산물 생산시스템 구축, 양식단계별 탄소 배출량 저감 등이다.

육상양식장 탄소중립 대응을 위한 추진전략은 i) 저탄소 수산물인증제도 도입, ii) 탄소배출 통합 운영시스템 구축, iii) D.N.A 기반 육상양식 활성화, iv) 탄소 저감 양어용 사료 개발, v) 양식어류 유통단계 탄소 저감, vi) 신재생에너지 활용 및 친환경에너지 사업지원 확대 등이다.

추진전략별 세부 사업과 추진 일정은 <그림 5-12>와 같다.

<그림 5-12> 육상양식장 탄소중립 대응 중장기 추진 로드맵



자료: 저자 작성.

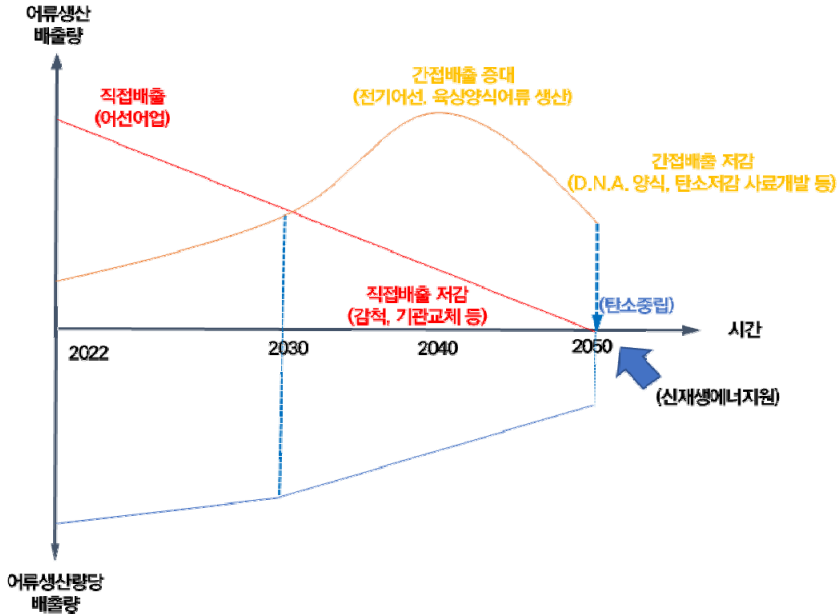
3. 사회경제적 기대효과

세계적으로 기후 온난화 위기 극복을 위한 요구가 강화되고, 국가별, 산업별로 구체적인 목표를 설정하고 이를 이행하기 위한 실천적 노력이 요구되고 있다. 미래 국가와 산업의 경쟁력은 탄소중립 달성 여부가 될 가능성이 크다. 농업, 축산업, 수산업도 식량 생산에 있어 탄소배출 감축 및 탄소중립을 위해 경쟁하고, 수산업 중 어선어업과 양식산업도 탄소중립의 관점에서는 경쟁의 관계이다.

세계적으로 양식산업은 인류 식량문제 해결을 위한 산업으로 그 가치를 인정받고 있다. 수산업을 통한 양질의 동물성단백질 제공방식이 어선어업에서 양식업으로 전환되면서 양식수산물 중 어류 생산이 증가하고 있다. 그러나 어선어업과 양식산업을 탄소중립을 위한 별개의 산업으로 인식하면, 결국 어선어업 생산량과 양식산업 생산량은 재생에너지로 대체되기 전까지는 생산량 증대를 기대하기는 어려운 상황이다. 어선어업 탄소중립 과정은 감척, 하이브리드 어선 및 전기 어선 등으로의 친환경 어선 교체, 어선에 전기를 공급하기 위한 어항에서의 기반 시설 구축 등 시간이 소요될 것으로 보인다.

직접 배출량이 많은 어선어업은 탄소배출 저감을 위한 우선적인 대상이지만, 간접배출이 많은 육상 양식산업은 재생에너지원 활용 여부에 따라 신속한 탄소중립이 가능한 산업이다. 수산업에 있어 실질적인 탄소중립 이행은 양식산업에서 보다 빨리 달성될 수 있다. 따라서 양식수산물 생산량 증대를 위한 기존 성장 속도를 유지하면서 생산량을 확대하고, 어선어업 생산량을 대체하면, 수산물 1kg당 탄소 경쟁력은 향상될 수 있다. 이는 장기적으로 수산물의 탄소 경쟁력 향상으로 소비자의 선택을 받을 수 있어 양식산업의 지속적인 성장에 도움이 될 수 있다.

〈그림 5-13〉 양식어류 탄소중립 및 경쟁력 확보



자료: 저자 작성

육상양식과 어선어업을 통한 탄소 저감의 효과를 이론적으로 살펴보면, 육상양식은 어선어업에 비해 더 적은 최적 감축 비용으로 탄소배출을 줄일 수 있으며, 탄소배출 저감 기술을 통한 육상양식의 생산량 증가 효과가 커질 수 있다는 점을 직관적으로 확인할 수 있다.

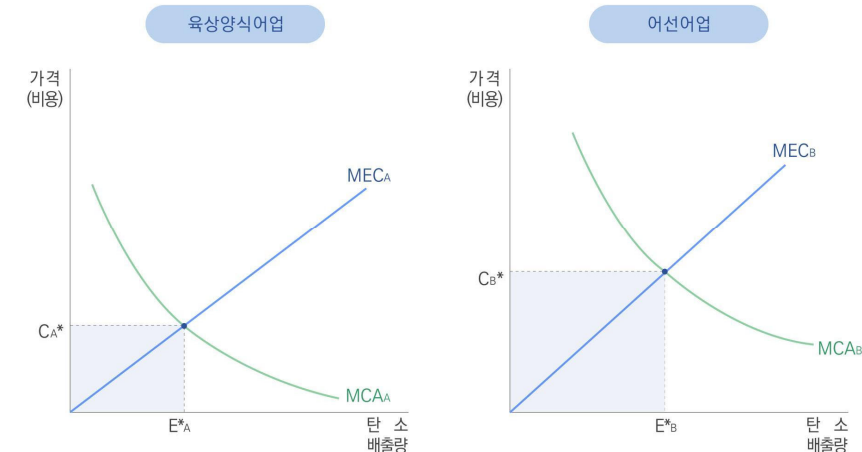
우선 육상양식과 어선어업의 탄소배출 영향을 이론적 측면에서 비교하였다. MCA_A 는 육상양식어업에서 탄소 배출량 감소에 사용되는 한계저감비용(Marginal Cost for Abatement)이며, MCA_B 는 어선어업에서 탄소 배출량을 줄이는 데 드는 한계저감비용(Marginal Cost for Abatement)이다. MEC_A 는 육상양식어업에서 배출한 탄소로 인해 초래되는 한계외부비용(Marginal External Cost)이며, MEC_B 는 어선어업에서 배출한 탄소로 인해 초래되는 한계외부비용(Marginal External Cost)이다. 〈그림 5-14〉

에서 MEC_A 와 MEC_B 는 동일한 수준인 것으로 묘사되어 있다. 그 이유는 한계외부비용은 탄소 1단위에 대해서 발생하는 외부효과 비용이기 때문인데, 배출된 탄소 1단위가 어선어업으로부터 초래된 것이든 육상양식어업으로부터 초래된 것이든 ‘탄소’ 자체는 차이가 없을 것이기 때문이다.

한편 <그림 5-14>에서 MCA_A 가 MCA_B 보다 낮은 수준인 이유는 탄소 배출량 1단위를 줄이기 위해서 사용되는 비용이 어선어업보다 육상어업에서 더 작은 수준으로 나타날 것이기 때문이다. 어선어업의 탄소 배출량을 줄이기 위한 감척 수단은 하이브리드 어선 또는 전기 어선으로의 교체, 대규모 감척, 기관교체 등 비용이 많이 사용되는 반면, 육상양식업은 가온, 수질정화 등 히트펌프, 입·배출수 펌프 등의 비용이 사용되면서 감축 수단의 측면에서 어선어업에 비해 비용이 적게 사용된다.

<그림 5-14>에서 보면 각각의 어업 형태에서 한계저감비용과 한계외부 비용이 만나는 수준에서 결정되는 최적 탄소 배출량은 E_A^* 와 E_B^* 이다. 즉, 육상양식에서의 최적 배출량 E_A^* 는 어선어업에서의 최적 배출량 E_B^* 보다

<그림 5-14> 육상양식과 어선어업의 탄소배출 영향 비교



자료: 저자 작성

낮은 수준이다. 이때 소요되는 단위당 최적 감축 비용은 육상양식어업에서는 C_A^* 이며 어선어업에서는 C_B^* 로 결정될 것임을 유추할 수 있다. 요약하면, 육상양식에서는 어선어업에 비해 더 적은 최적 감축 비용으로 더 적은 탄소 배출량을 달성할 수 있다는 점이다.

〈그림 5-15〉는 탄소배출에서 발생하는 외부효과를 고려한 육상 양식어업과 어선어업에서의 최적생산량을 비교한 것이다. D_A 는 육상양식에서 생산된 수산물의 수요곡선이며, D_B 는 어선어업에서 생산된 수산물의 수요곡선이다. MC_A 는 육상양식의 생산자 차원에서 평가되는 수산물 생산에 따른 한계비용(Marginal Cost)이며, MC_B 는 어선어업의 생산자 차원에서 평가되는 수산물 생산에 따른 한계비용(Marginal Cost)이다. 〈그림 5-15〉에서 MSC_A 는 육상양식어업에서 생산자들의 한계비용 MC_A 와 한계외부비용 MEC_A 를 합산한 사회적 한계비용(Marginal Social Cost)이다. MSC_B 는 어선어업에서 생산자들의 한계비용 MC_B 와 한계외부비용 MEC_B 를 합산한 사회적 한계비용(Marginal Social Cost)이다.

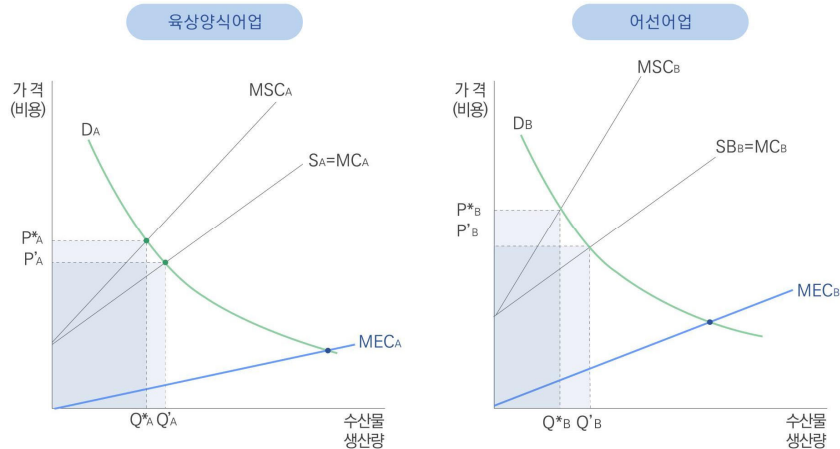
〈그림 5-15〉에서는 〈그림 5-14〉와 달리 한계외부비용이 어선어업에서 더 높은 수준인 것으로 묘사되어 있는데, 이는 〈그림 5-15〉의 가로축이 탄소 배출량이 아니라 수산물 생산량이기 때문이다. 즉, 어선어업에서는 수산물 1단위를 생산하기 위해 배출해야 하는 탄소 배출량이 육상양식보다 많고, 그 결과 수산물 1단위가 초래하는 탄소로부터 발생하는 한계외부비용이 더 높기 때문이다. 단, 이 분석에서는 어선 조업 또는 양식장 운영에 따른 탄소 배출량의 비교로서, 사료 사용에 따른 탄소 배출량은 고려하지 않았다.

〈그림 5-15〉에서 보면, 탄소배출에 따른 외부효과(한계외부비용)를 고려하지 않은 상태에서 생산자들의 이윤 동기에만 맡겨두면 육상양식에서는 한계비용 MC_A 와 수요곡선 D_A 가 만나는 수준에서 균형 물량은 Q'_A , 균형

가격은 P'_A 로 형성됨을 알 수 있다. 또한 어선어업에서는 한계비용 MC_B 와 수요곡선 D_B 가 만나는 수준에서 균형 물량은 Q'_B , 균형가격은 P'_B 로 형성됨을 알 수 있다. 그러나 이와 같은 균형가격과 균형 생산량은 탄소배출에 따른 외부효과가 전혀 반영되지 않은 상태에서 나타난 것이기 때문에 사회적으로 바람직한 수준이 아니다.

사회적으로 바람직한 수준의 생산량과 균형가격은 육상양식에서는 사회적 한계비용 MSC_A 와 수요곡선 D_A 가 만나는 수준에서 형성되는 P^*_A 와 Q^*_A 가 되어야 할 것이다. 어선어업에서는 사회적 한계비용 MSC_B 와 수요곡선 D_B 가 만나는 수준에서 형성되는 P^*_B 와 Q^*_B 가 되어야 할 것임을 알 수 있다. 현재 수준에서 사회적으로 바람직한 수준으로 수산물 생산량을 변화시키고자 한다면, 육상양식에서는 $Q'_A - Q^*_A$ 만큼의 생산량이 감축되어야 할 것이며, 어선어업에서는 $Q'_B - Q^*_B$ 만큼의 생산량이 감축되어야 한다는 것을 알 수 있다. 이를 비교해 보면 어선어업에서의 감축량 $Q'_B - Q^*_B$ 이 육상양식 어업에서의 감축량 $Q'_A - Q^*_A$ 보다 더 많아야 할 것임을 유추해 볼 수 있다.

〈그림 5-15〉 탄소배출 외부효과를 고려한 최적 수산물 생산량 비교

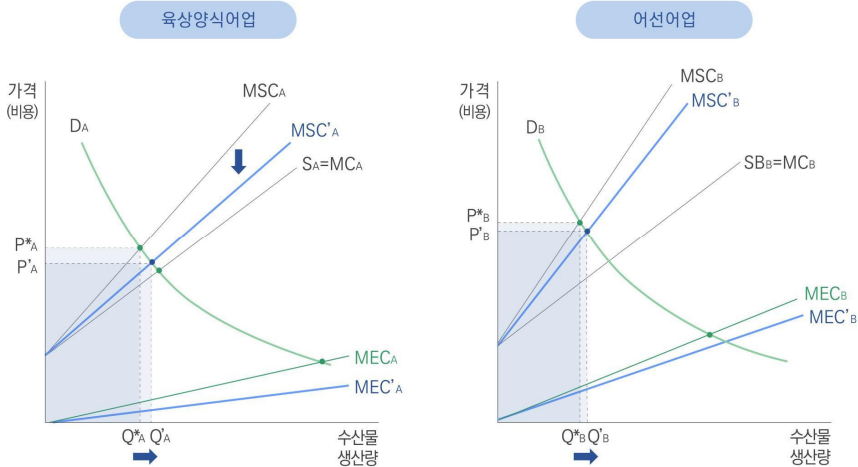


자료: 저자 작성

〈그림 5-16〉은 탄소배출 저감 기술개발이 미치는 효과를 나타낸 것이다. 현재의 여건을 고려해 볼 때, 동일 금액을 투자하더라도 기술개발이나 대체 수단 등을 통해 탄소배출을 줄이는 효과가 더 크게 나타날 수 있는 분야는 어선어업보다는 육상양식이라고 할 수 있다. 육상양식에서 기술개발에 따른 탄소 저감으로 인해 발생하는 한계외부비용 절감 효과는 $MEC_A - MEC'_A$ 로, 어선어업에서는 $MEC_B - MEC'_B$ 로 묘사할 수 있다.

따라서 사회적으로 바람직한 수준의 균형은 육상양식에서는 MSC'_A 와 D_A 가 만나는 P'_A 와 Q'_A 로, 어선어업에서는 MSC'_B 와 D_B 가 만나는 P'_B 와 Q'_B 로 형성될 것임을 짐작할 수 있다. 이와 같은 새로운 균형을 저감 기술 개발 이전의 상황과 비교하면, 저감 기술개발로 인한 육상양식에서의 생산량 증가 효과 $Q'_A - Q^*_A$ 가 어선어업에서의 생산량 증가 효과 $Q'_B - Q^*_B$ 보다 더 큼을 알 수 있다.

〈그림 5-16〉 탄소배출 저감 기술개발에 따른 효과



자료: 저자 작성

06

결론 및 정책제언

제1절 요약 및 결론

1. 요약

2019년 UN의 ‘기후 행동 정상회의’ 이후로 우리나라를 포함한 주요국은 탄소중립을 선언하였고, 이에 따라 국가별 탄소중립 대응을 위한 국가 온실가스감축목표(NDC)를 설정하고 이행할 계획이다. 국제사회의 대응뿐만 아니라 기업 차원의 대응 노력도 커지면서, 기업 사용 전력의 100%를 재생에너지로 대체하는 RE100 협약에 372개 기업이 참여하고 있다. RE100 프로젝트에 참여하지 못하는 기업은 산업 생태계 내에 포함되기 어려운 상황이 되고 있어 탄소중립 달성은 기업 생존의 문제가 되고 있다.

농수산부문에서도 탄소중립 이행을 위한 탄소 감축 방안을 마련하고 이행 중이다. 탄소배출이 많은 축산부문에서는 가축분뇨 자원순환 확대, 저메탄 사료, 축산 생산성 향상 등 다양한 탄소 감축 수단이 발굴되어 시행되고 있다. 반면, NDC 상의 수산업 탄소 감축 수단은 노후 어선 대체 건조, 하

이브리드 어선 건조, 어선 감척 등이 주요한 수단이 되고 있으며, 양식산업의 경우에는 양식장 친환경 전환 지원 사업(친환경에너지 보급사업) 등만 있다.

국내 저탄소 수산물 인증은 없지만, ASC 등 인증기관에서 저탄소 인증 이슈를 다루고 있어 수산물 교역에 있어 탄소중립 이슈가 중요해질 전망이다. 미국, EU 등 주요국은 양식산업의 저탄소 단백질 생산의 중요성을 인지한 정책을 개발하고 있으며, 대규모 플랜트형 양식과 육상양식장에서의 탄소배출 제로를 권고하는 등 적극적으로 대응하고 있다. 우리나라도 수산물 생산의 절반 이상을 차지하는 양식산업의 탄소중립을 위한 구체적인 대응 방안이 나와야 할 상황이다. 양식산업의 품종별 탄소 배출량 파악으로 탄소 배출량이 많은 품종 또는 양식단계에 대해서는 선제적인 탄소 저감 전략이 도출되어야 한다.

국내 육상양식 대상 품종 중 탄소 배출량이 많은 품종은 우리나라 주력 양식어류인 넙치, 뱀장어 등이다. 전복, 넙치, 기타 어류 등 종자 생산 시설이 양성장만큼 탄소 배출량이 많은 것으로 분석되었다.

넙치는 일반 양성을 위한 양식장에 비해 치어 생산을 위한 양식장에서 단위당 탄소 배출량이 2배 이상 많은 것으로 조사되었다. 해수를 이용한 육상양식장뿐만 아니라 뱀장어, 쏘가리, 송어, 자라 등 민물 어류 양식장의 탄소 저감이 필요한 것으로 나타났다. 종자의 경우, 수정란 부화 및 종자 육성을 위한 연료와 에너지가 많이 소요되고 있으며 온도조절과 산소공급을 위해 장치를 24시간 가동한다. 47%가 히트펌프 가동에 사용되는 것으로 조사되었다.

양성단계에서는 해수 공급 펌프, 히트펌프, 산소 용해기, 자동 먹이공급기, 사료 보관을 위한 냉장·냉동시설, 출하 및 선별작업 등에 에너지가 사용된다. 유수식 양식장의 경우, 해수 오염에 따른 폐사가 늘어나 양식수 회전수

가 증가한 것이 전기사용량 증가의 원인으로 작용하고 있다. 폐사에 의한 입식량 증가, 생사료 사용에 따른 오염도 증가 등의 악순환이 반복되는 것으로 조사되었다. 다운스트림 단계 탄소 배출원 분석에서 운송 부문에서의 탄소 배출량이 많은 것으로 조사되었다. 넙치 등 양식어류는 우리나라의 활어 소비 특성으로 인해 살린 상태로 물차에 의해 운송되면서 발생하는 것으로 조사되었다.

양식산업 탄소중립 대응 사업 중 대표 사업인 친환경에너지 보급사업의 사업 성과를 분석한 결과, 그동안 추진된 친환경에너지 보급사업으로 지원 어가의 탄소 배출량이 감소한 것으로 나타났다. 지원 어가의 생산량은 6.2% 증가하였지만, 비지원 어가는 1.4% 증가에 그쳤다. 지원 어가의 생산량 증가가 더 큰 것으로 나타났다. 친환경에너지 보급사업으로 1kg 생산당 탄소배출이 평균 5.09kgCO₂eq 만큼 감소하였다. 친환경에너지 보급사업으로 지원 어가의 단위 탄소배출이 비지원 어가에 비해 13% 추가 감소한 것으로 확인되었다.

위의 분석 결과를 토대로 육상양식 탄소중립 대응 전략을 마련하였다. 육상양식 탄소중립 추진전략으로는 탄소배출 통합 운영시스템 구축, D.N.A 기반 육상양식장(치어, 성어) 탄소 저감, 탄소 저감 양어용 사료 개발, 양식어류 유통단계 탄소 저감, 신재생에너지 활용 등 5개 추진전략을 제시하였다.

첫째, 정확한 데이터에 기반한 육상양식장 탄소 배출량 측정 알고리즘을 개발하여 탄소 저감을 위한 제어 기술 적용을 확대하고, 육상양식장 에너지 환원 기술을 적용하는 등 탄소배출 통합 운영시스템 구축을 위한 세부 사업을 제시하였다. 둘째, 현재 육상양식장에서 에너지를 과다하게 사용하는 원인을 해소하기 위해 육상양식장을 D(data), N(network), A(AI) 기반의 육상양식장으로 발전 방향을 제시하고 기존 사업으로 추진이 가능한 방법을 제시하였다. 셋째, 양어용 사료에 사용되는 어분 사용량 저감을 위해

양식품종별 필수아미노산 요구량 규명, 곤충 사료 등 사료 자원 개발을 위한 세부 사업을 제시하였다. 넷째, 생산 후 전체 유통경로에서 활어로 유통되면서 발생하는 비효율을 개선하기 위해 신선 수산물 유통체계를 구축하여 탄소 배출량을 감소시키는 방향을 제시하였다. 다섯째, 해수열 지열을 이용하는 히트펌프 보급사업을 확대하고, 넙치 양식장의 배출수 낙차를 이용한 소수력발전, 양식장 지분을 이용한 태양광 발전 등 신재생에너지 활용을 확대할 것을 제시하였다.

2. 결론

2021년 우리나라는 국제사회 환경변화를 고려하여 국가 온실가스 감축 목표(NDC)를 상향하는 안을 제출했다. 수산업 부문에서는 2018년 수산·어촌분야 온실가스 배출량 304.5만 톤(CO₂eq)의 96%를 감축하여 2050년 배출량을 11.5만 톤(CO₂eq)으로 줄이는 목표를 설정했다.

수산업 탄소 배출량 중 직접배출은 어선어업 배출량이 대부분이고, 간접배출에는 주로 양식산업이 포함되어 있다. 수산업 탄소 감축 수단에는 화석연료를 사용하여 직접배출이 많은 어선어업 탄소중립이 주요 관심사이며, 어선 감척, 기관 대체, 신조, 하이브리드 어선 등이 주요 탄소중립 사업에 포함되어 있다.

현재 어선어업의 탄소중립 사업들은 어가 수용성, 기술성숙도, 인프라 여부 등을 고려하면 도전적인 목표이다. 2022년 현재 에너지 정책 변화에 따라 국가 온실가스 감축목표(NDC)를 수정 중이며, 신규 감축 수단을 찾는 상황이다. 수산업 전반의 탄소 감축을 위해 양식산업도 선제적으로 탄소중립 방향을 재설정하고, 신규 감축 수단을 찾는 노력이 필요한 시점이다.

현재 탄소중립 달성 경로는 어선어업과 양식산업을 구분하여 마련되어 있

다. 어선어업과 양식산업 등 전체 수산업 생산방법에서 탄소를 감축하게 되면, 수산업 부문 성장전략을 마련하기 힘든 상황이다. 세계적으로 어선어업은 성장이 정체된 상황이지만, 양식산업은 성장하는 산업이다. 해외에서는 어류 양식이 빠르게 성장하면서 수산물을 생산하는 방식이 어선어업에서 양식산업으로 대체되는 상황이다. 양식산업은 양질의 동물성단백질을 공급하는 식량 공급의 측면에서도 중요한 산업으로 인식되고 있다.

세계적으로 축산업과 비교해서 양식산업의 탄소 배출량이 적고, 어선어업에 비해서도 미미한 수준이지만, 외해 플랜트형 양식, 육상에서의 대규모 스마트양식이 성장하고 있다. 스마트양식의 어류 kg당 배출량은 트롤 어업보다 많다는 연구 결과도 있다.¹⁶⁴⁾

세계적으로 외해 플랜트 양식, 육상에서의 대규모 순환여과식 양식이 확대되는 추세여서 탄소 배출량이 증가할 것이다. 우리나라도 스마트양식 확대를 위한 정책을 추진하면서 육상에서 대규모 순환여과식 양식을 추진하는 등 양식산업 성장을 위해 노력하는 상황이다. 양식산업이 성장하는 과정에서 탄소 배출량은 증가할 수밖에 없다. 어선어업의 탄소배출만큼 양식산업의 탄소배출에도 관심을 가져야 할 정도로 그 중요성은 커지고 있다.

여기서 한 가지 주목해야 할 점은 어선어업은 화석연료 사용에 따른 직접배출을 줄여야 하는 상황인데, 어선어업의 탄소배출을 저감하기 위한 전기 어선 또는 하이브리드 어선으로의 전환 또는 감척 등이 쉽지 않다는 점이다. 어가 수용성 등을 고려하면 이행 기간이 길어질 수 있다.

반면, 국내 양식산업 중 양식어류의 생산에 있어 탄소 배출량이 많은데, 전기 사용에 따른 간접배출 비중이 높다. 신재생 에너지원으로의 에너지원 전환 여부에 따라서 목표 달성 기간이 단축될 수 있다는 장점이 있다.

164) Global Seafood Alliance 홈페이지(2013.9.2.)(검색일: 2022.8.13.)

따라서 수산업 탄소중립의 관점에서 어선어업 직접 배출량을 줄이는 대신, 양식산업 성장을 위해 간접배출량은 일정 수준 늘리고, 양식수산물 단위당(kg당) 탄소 배출량을 줄이는 기술개발과 정책을 추진해 나갈 필요가 있다. 탄소배출을 줄이는 과정에서 간접배출 부분을 신재생 에너지원으로 전환하여 육상양식의 탄소중립을 달성하는 경로를 설정하는 것이 합리적이다.

이를 위해 양식산업 중 탄소 배출량이 많은 양식어류를 생산하는 육상양식장을 대상으로 단위당 탄소 배출량을 줄일 수 있는 전략과 추진과제를 제시하였다. 또한 양식산업 탄소중립을 위한 기반을 구축하기 위한 제도, 시스템 등을 제안하였다.

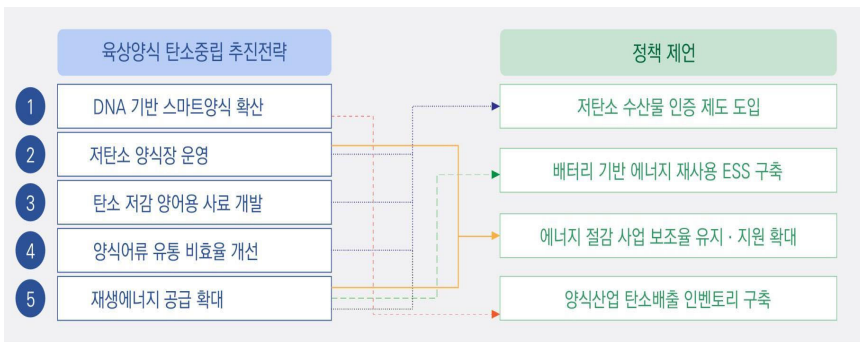
본 연구는 우리나라 수산부문 양식산업 탄소중립 달성을 위한 정책 마련을 위한 첫 번째 정책연구로서 의미가 있다. 특히 수산업 탄소중립 이슈를 어선어업과 양식산업으로 구분하지 않고 단위당 수산물 생산량의 관점에서 접근하여 생산방법에 있어서 상호 대체 관계를 고려하였다는 점에서 의미가 있다.

그러나 탄소중립 시대 대응이 양식수산물 중 해조류, 패류, 어류 등에 따라 달라질 수 있는데, 본 연구에서는 어류를 중심으로 다루고 있어 탄소흡수, 탄소격리 등에 대한 논의를 다루지 못한 한계점이 있다. 또한 신뢰성 있는 공식 데이터 부재로 설문조사에 근거하여 탄소 배출량을 산정하는 등 한계가 존재한다. 특히 탄소중립 달성 과정에서 여러 정책 수단들이 효과를 인정받기 위해서는 신뢰성 있는 통계에 기반한 정책 수단 마련 및 효과 검증이 필요한 것으로 나타났다.

제2절 정책제언

육상양식 탄소중립 추진을 위해 5대 추진전략을 마련하였으며, 이를 이행하는 방안으로서 네 가지 정책을 제안하였다.

〈그림 6-1〉 육상양식 탄소중립 추진전략과 정책제언 연계성



자료: 저자 작성

1. 저탄소 수산물인증제도 도입 방향

세계적으로 친환경 개념이 생태적, 환경적, 윤리적 개념으로 확대되면서 환경 이슈에서 기후 위기 대응을 위한 탄소 저감 노력이 강화되고 있다. 특히, 탄소중립 실천 요구가 더욱 강화되는 상황에서 생산 현장부터 수산물의 탄소배출 저감을 위한 자율적 노력을 지원하여, 생산자들이 저탄소 노력에 동참하게 하는 대책 마련이 필요하다. 그러나 국내법과 제도에서는 수산물의 저탄소 인증이 포함되어 있지 않다. 「해양수산물 소관 친환경농어업 육성 및 유기식품 등의 관리·지원에 관한 법률」 제2조(정의)¹⁶⁵⁾에서 친환경 수산물을 ‘유기 수산물과 무항생제 수산물 및 활성 처리제 비사용 수산물’로 정의하고 있어 저탄소 규정이 포함되어 있지는 않다.

165) 친환경농어업 육성 및 유기식품 등의 관리·지원에 관한 법률 제1조 제2항

넓은 의미의 친환경에 포함된 탄소 저감에 대한 인증은 ASC 등 민간 국제 인증기구에서 다루고 있다. ASC 인증 항목에는 저탄소 관련 기준이 있으며, 이 인증은 에너지 사용의 모니터링 증거를 요구하고 있다. ASC 에너지 관련 항목으로 5.2 기준(Criterion : energy efficiency)에서 5.2.1¹⁶⁶⁾, 5.2.2¹⁶⁷⁾ 등의 기준을 요구¹⁶⁸⁾하고 있다. 탄소 배출량을 줄여 기후 위기를 극복하기 위한 국제사회의 노력은 양식산업에도 적용되고 있다.

저탄소 농축산물 인증제는 친환경·GAP 인증을 받은 농산물을 대상으로 하므로 더 엄격한 적용을 받는다.¹⁶⁹⁾ 이 기준을 수산물에 적용한다면, 친환경 유기 수산물 인증을 받는 업체는 211개에 불과할 것이다.¹⁷⁰⁾

친환경 수산물 인증 확대가 어려운 이유는 “비인증 수산물의 가격 차이가 크지 않아, 인증 승인과 유지에 대한 필요성이 낮다.”¹⁷¹⁾는 데 원인이 있기 때문에, 저탄소 인증 수산물 정책 시행의 결과도 저조할 가능성이 크다. 따라서 저탄소 인증 수산물의 프리미엄화로 제값을 받을 수 있는 여건 조성이 중요하다.¹⁷²⁾

또한 양식수산물 중 품종별 탄소 배출량을 산출할 수 있는 공식 데이터가 없고, 전과정 평가를 위한 신뢰할 수 있는 공식적인 데이터, 라이브러리 등 기반도 구축되지 않은 상황이라, 저탄소 수산물인증제도의 도입은 검토 단계에서부터 한계에 부딪히고 있다. 수산물 저탄소 인증제 도입을 위해서는 양식장 에너지 소비량 모니터링이 필요하다. 양식장은 효율성을 개선하

166) ASC 5.2.1. Evidence of energy use monitoring relative to production and ongoing effort to improve efficiency.

167) ASC 5.2.2. Maintenance records for farm equipment (e.g., boats and generators) are up to data and available)

168) ASC 이매패류 표준 - 버전 1.1, p. 31.

169) 농림축산식품부 저탄소 농축산물 인증제 사업(검색일: 2022.10.8.)

170) 국립수산물품질관리원, 친환경 수산물 인증현황(검색일: 2022.6.18.)

171) 해양수산부(2018), p. 50.

172) 농산물 대표 품목에 대해 저탄소 인증 프리미엄을 지불할 의향이 있는 소비자가 42.4%~48.5%임(이춘수·양훈민(2021), p. 363)

고 에너지원 소비, 특히 제한적인 탄소 기반 에너지의 소비를 줄일 수 있는 기술과 수단을 병행한 인증제 도입이 요구된다.

현재 국제사회, 환경단체, 소비자 등의 저탄소에 대한 요구는 전 산업부문으로 그 대상이 확대되고 있다. 또한 특정 생산품이 아닌 가치사슬 전과정의 탄소 저감을 요구하고 있다. 저탄소 인증을 위해서는 에너지 사용량에 대한 모니터링과 관련 데이터를 활용한 검증이 필요하다. 따라서 수산물에도 저탄소 농산물 인증과 같은 제도를 도입하되, LCA 기반으로 공급망을 고려한 데이터를 통한 검증 가능한 저탄소 수산물 인증제를 도입하고, 이를 위한 기반 마련이 필요하다. 특히 수출입에 있어 저탄소 인증 요구에 미리 대응하기 위해서는 국제적 표준 방법론을 활용한 비교·검증이 가능해야 하므로, 국내외에서 표준 방법론에 대한 동의가 이루어진 제도의 시행이 요구된다.

또한 저탄소 수산물인증제도 도입은 양식 어류만을 대상으로 제도를 시행할 수 없으므로 전체 수산물을 대상으로 하고, 본 연구의 논의에서 제외된 해조류, 패류 등도 포함하여 추진할 필요가 있다. 해조류, 패류의 경우에는 탄소흡수원으로서의 가치를 고려해서 제도를 시행해야 한다. 저탄소 수산물인증제도 지원 사업(안)은 <표 6-1>에 제시하였다.

<표 6-1> 저탄소 수산물인증제도 지원 사업(안)

□ 필요성

- 세계적인 친환경·저탄소 산업 전환이 경쟁적으로 추진되고 있으나, 탄소 배출현황 조사와 감축 기준 등이 마련되어 있지 않아서 산업 전환에 있어 장애 요인으로 작용하고 있으며, 인증·직불제 등 다양한 기존 지원제도 접목에 한계가 존재함
- 향후 양식산업의 저탄소 전환이 지체될 경우, 주요 수출수산물에 대해 해외소비의 심리적 장벽이 작용할 가능성이 크므로, 신속한 양식 수산물 저탄소 전환을 위한 제도적 장치 마련이 필요함

□ 기본방향

- 양식산업의 친환경·저탄소 전환 방향을 명확히 제시하되, 경영비용이 증가하는 탄소 감축보다 탄소흡수원으로서의 가치를 산출·재평가하여 국제사회에 공식 인정 획득

- 국제사회의 공식 인정 결과를 글로벌 마케팅과 연계하여 타 경쟁국 수산물에 대비 관세 장벽 완화 및 친환경 소비 촉진

□ 세부 내용

- 패류·해조류 탄소 흡수량 표준 도출
 - 양식 인허가현황 및 실태조사, 양식 규모별·방법별 표본집단 도출, 단위 면적당 탄소 흡수량 및 소모량 산정
- 육상, 해면어류양식 탄소 사용량 표준 도출
 - 양식 인허가현황 및 실태조사, 양식 규모별·방법별 표본집단 도출, 단위 면적당 탄소 소모량 산정
 - 설비·기자재별 탄소 저감 효율 도출 항목·가중치 등 설정
- 품목별, 양식 방법별 저탄소 표준 도출
 - 탄소 배출량 도출을 위한 양식 탄소 표준 마련, 양식 방법, 품종, 생육 시기, 사용설비 등에 따라 구분
 - 장비 교체, 자동화, 사료효율 향상 등 현실적인 탄소 감축 방향 제시 및 탄소 저감 연관사업 지원 시 의무조건 활용방안 제시
 - 패류, 해조류 탄소흡수 표준의 국제기구, 환경부 인정 및 국가 탄소 배출량 관리 인벤토리 반영 전략 제시
 - 저탄소 인증지원, 탄소 저감 인센티브, 수산직불제, 첨단장비 보급사업 등 환경부, 해양수산부 등의 사업 연계 방안 제시
- 양식수산물 탄소 표준의 법정 표준 정립

□ 예산/기간

- 총 25억(매년 5억) / 24~28년(5년)/ 국비100%
 - (1차년) 육상어류양식 → (2차년) 해면어류양식 → (3차년) 패류·해조류 → (4~5차년) 국가 탄소흡수·감축 목표설정 및 국제표준 신설

자료: 저자 작성

2. 양식장용 사용 후 배터리 기반의 재사용 ESS 구축

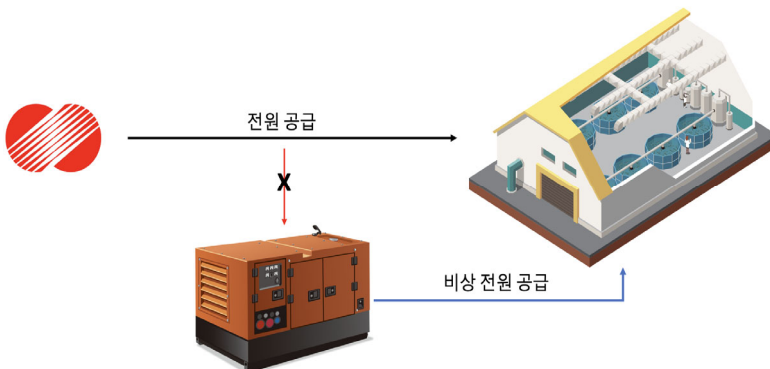
육상양식장은 유속 및 유량 유지, 산소공급 등 양식수산물 생존에 필요한 물과 산소공급을 위해 모터를 사용하고 있다. 양식장 모터 운영을 위한 전원을 외부에서 공급받고 있으나, 정전 등의 상황에 대비해서 내부 전원 공급이 가능한 디젤 비상 발전기를 설치 운영하고 있다. 디젤 연료를 기반

으로 한 비상 발전기는 자주 사용하지 않아 유지관리 소홀로 인해, 화재 사고 등 재해 발생의 원인이 된다. 또한 에너지 보급 및 관리 측면에서 상시 전원 공급 운영이 어려워, 이를 활용한 분산 전원, 수요반응자원(Demand Response, DR) 거래 시장 등의 에너지 정책 등을 구현하기 어려운 장비이다.

대부분의 양식장에서 사용하고 있는 디젤 발전기는 제품 규격 등 다양한 조건의 구매가 가능하고, 배선이 쉬워 일반 전기 기사가 쉽게 설치 운영할 수 있다. 그러나 정전 등 전원 공급에 이상이 있을 때 운영하는 장비로 자주 사용하지 않아 유지·관리가 소홀하기 쉬운 장치이다. 배기 덕트(공기가 흐르는 통로 및 구조물)의 과열 등 주변 장치의 유지·관리 소홀로 화재 발생의 원인이 되고, 비상시 발전기의 이상 작동으로 운영이 어려운 경우가 다수 발생하고 있다.

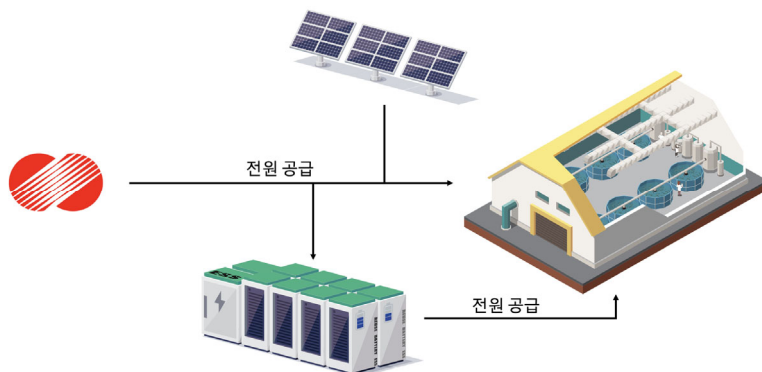
기존 디젤 비상 발전기의 단점을 해결하는 방안으로 양식장용 사용 후 배터리를 기반으로 한 재사용 ESS를 구축하는 안을 고려해 볼 수 있다. 최근 양식장에서도 태양광 등 신재생에너지를 사용하는 어가들이 늘어나고 있지만, 자연에 의존적인 태양광 등 신재생에너지는 날씨의 영향을 받기 때문에 발전량으로 인해 운영에 어려움이 있다. 이를 해결하기 위해 에너지저장장치를 활용할 수 있다.

〈그림 6-2〉 상시 전원과 비상 발전기 구성(안)



자료: (주)퀀텀 자료 제공

〈그림 6-3〉 신재생에너지와 재사용 배터리 활용 ESS 구성(안)



자료: (주)퀀텀 자료 제공

에너지저장장치는 전력을 단순히 보관하고 사용하는 것에만 국한하지 않고, 비상 발전 대체, 신재생에너지 장비의 관리 및 발전량 관리, 양식장 내 에너지 보급 및 관리 측면에서 에너지 효율을 높일 수 있고 신재생에너지로의 전환에 도움이 된다.

에너지저장장치(ESS)는 상시 전원 및 실시간 전원관리 등으로 양식장에서 모터 등을 운영할 수 있고, 사용자가 다양한 방식으로 전원을 공급 및 관리할 수 있으며, 실시간 관리가 가능하다. 그러나 디젤 발전기에 비해 구축 비용이 2배 이상 필요하고, 관련 전기 배선 공사 등이 필요하여, 실제 구축 비용은 2.5배에 달한다. ESS 도입을 위해서는 양식장 전체 전원 관리 시스템을 구축·운영해야 해서 초기 투자 비용이 많이 든다. 에너지저장장치는 그 중요도에 비해 가격 및 구축 비용으로 인해 쉽게 확산·보급이 어려운 실정이다.

이러한 환경에서 전기자동차에서 나온 사용 후 배터리를 활용한 에너지 저장장치가 하나의 대안이 될 수 있다. 사용 후 배터리는 국내의 미래 폐자원 거점 센터(환경부, 4개 센터 운영) 및 제주, 경북의 배터리 재사용 센터

에서 구매할 수 있다. 환경부 고시(2022년)에 따르면 배터리 1kWh당 10만 원의 가격이 책정되어 있으며, 이는 신제품에 비해 반값 정도의 가격이다.¹⁷³⁾ 이를 활용하여 ESS 구축 비용이 디젤 발전기 구매 비용과 비슷해지면, 실제 배선 공사 등의 비용만 추가하면 되므로 양식어가에서 그 활용도를 높일 수 있다.

〈표 6-2〉 사용 후 배터리 ESS와 신제품 배터리 ESS 비교

사용 후 배터리 ESS	신제품 배터리 ESS
	
• 전기 자동차 배터리를 사용하여 충방전 속도 및 용량이 높음	• 저장용 신제품 배터리를 사용하여 충방전 속도 및 용량에 제한이 있음
• 분산 전원 및 DR 등 다양한 용도로 사용 가능	• 피크 제어, 저장 판매, 주파수 관리 등의 용도에 맞게 재제작 필요
• 가격이 저렴하고 보급이 쉬움	• 가격이 높고 배터리 구매가 어려움
• 표준 및 인증 체계가 미흡 (현재 국가기술표준원에서 진행 중)	• 표준 및 인증 체계 구축 완료됨

자료: ㈜원템 자료 제공

양식장용 사용 후 배터리 기반의 재사용 ESS 구축 사업(안)은 〈표 6-3〉에 제시하였다.

173) 환경부 고시(2022)

〈표 6-3〉 양식장용 사용 후 배터리 기반의 재사용 ESS 구축 사업(안)

□ 필요성

- 국내 전기 공공요금 인상과 첨단양식 확대에 따라 전력 사용량과 비용이 추가적으로 증가할 예정으로, 영세 중소 양식어가 경영 안정성을 위해 에너지 효율화 지원
- 현재 에너지 소모형 산업구조의 근본적인 체질 개선이 없을 시 해외 선진 경쟁기업의 첨단화·친환경에너지 전환에 따른 국내 양식수산물의 가격 경쟁력 열위 발생 가능

□ 기본방향

- 전기차 배터리 표준을 기반으로 육상양식장 전자설비를 재설계하여, 장비 호환성, 금융 상품 연계 등으로 시너지 효과 제고
 - 전기차 배터리 표준 활용을 통해 센서 등 첨단장비의 잦은 고장의 원인이었던 불규칙적 전력 급변 방지, 사료공급 등 양식장 관리용 로봇 등 이용형 설비 도입, 태양광 등 친환경 에너지 융합 시 에너지 효율 향상

□ 세부 내용

- 전기차 배터리의 종류별 전력량, 전압 등 육상양식장 활용 적합성 실증·평가
- 현존 첨단양식 설비·기자재·친환경 에너지 장비 간의 호환성 실증
- 사용 후 배터리 양식장 사용 안전기준 및 사용법 가이드라인 제시
- 관련 법령 제·개정 등을 통한 제도 도입방안 제시
- 양식용 사용 후 배터리 활용 확대를 위한 농림축산식품부·해양수산부·산업통상자원부 등 정부 보조·R&D 사업 융합·연계 적합도 사전검토제 도입안 제시
 - 스마트 팜, 아쿠아포닉스, 첨단 농수산장비 신규 개발 등 배터리 활용 연계성 사전검토

□ 예산/기간

- 총 150억 (R&D)/ 24~27년(4년)/ 국비 80%, 민간 20%

자료: 저자 작성

3. 친환경에너지 절감 사업 현행 보조율 유지·지원 확대

양식산업 에너지 절감 사업으로 추진되는 히트펌프, 인버터 보급사업의 총사업비 중 보조금 부담률은 총 80%(국고 60%, 지방비 20%)이다. 최근 타 산업 분야와의 형평성을 고려하여 보조율을 낮춰야 한다는 의견이 많다. 그러나 양식산업은 식량 생산, 물가 등과 직접적으로 관련되고, 에너지 절감 시설 보급을 통한 생산원가 절감이 결국은 최종 소비자인 국민의 수혜로

돌아가므로 어업인의 참여 활성화와 탄소중립 수용성 향상을 위해 현행 보조율을 유지할 필요가 있다.

농림축산식품부의 경우, 기획재정부의 보조사업 연장평가 의견을 반영하여 농업 에너지 이용 효율화 사업의 국고 보조율을 2017년도 60%에서 50%로 하향 조정한 적이 있으나, 이후 전년에 비해 절반 이하로 사업비가 감소하는 등 농업인의 수용성이 급감하여 2019년도에 다시 60%로 원상회복한 사례가 있다.¹⁷⁴⁾

현재는 농업인의 사업 참여를 더욱 독려하기 위하여 20%의 자부담 중 절반을 국고 용자로 추가 지원하고, 기 보급 시설의 성능향상 등 개보수 지원, 사업 신청단계에서부터 한국전력에 온실가스 배출량 판매 약정을 지원하여 자부담금을 최대 7천만 원까지 추가 지원받을 수 있도록 하는 제도¹⁷⁵⁾를 만드는 등 수용성 향상을 위한 노력을 하고 있다.¹⁷⁶⁾

또한, 양식어업인이 에너지 절감 시설 설치를 통해 추가 소득을 얻을 수 있도록 온실가스 배출권 거래 제도의 외부 사업이나 한국전력의 에너지 효율 향상(Energy Efficiency, EE) 사업 등 기 시행되는 제도에 참여할 수 있도록 지원하거나, 참여방안을 시행지침에 구체화시켜 제도화하는 정책이 필요하다.

태양광 발전설비나 냉난방용 히트펌프 보급 시 요구하는 온실가스 감축량 모니터링 설비를 설치하고, 그 운영 결과를 토대로 감축량을 인정받는다면, 인버터는 설치 후 한국전력의 에너지 효율 향상 사업을 통해 한국전력으로부터 인버터의 용량에 따른 지원금을 추가로 받을 수 있다.

174) 농업 에너지 이용 효율화(지열 히트펌프 보급) 사업 연도별 사업 추진실적 : 2015년 24,463 백만 원 → 2017년 6,320 백만 원 → 2019년 11,457 백만 원(한국농어촌공사 위탁시행사업 내부자료)

175) 농업 에너지 이용 효율화 고효율 에너지 기기 공동 보급사업, 지원금액: 7만 원/kW, 최대 1,000kW까지

176) 「농업 에너지 이용 효율화 사업」의 경우 「고효율 에너지 기기 공동 보급사업」을 통해 신규로 지열, 공기열 냉난방시설을 설치하거나 기존 유류, 전기보일러를 지열, 공기열 냉난방시설로 교체하는 경우, 사업비 지원 또는 농사용 전기 사용 절감 인센티브를 지급하고 있다.

또한 양식산업에도 보일러를 대체한 온실가스 감축 실적 등을 위한 지원 사업이 필요하다. 기존 사용하던 유류·전기보일러 사용을 모니터링하여 저감 수칙에 따른 차등 인센티브 혹은 보조사업에 대한 우선순위나 보조율 조정이 가능한 정책을 마련하면, 양식어업인의 수용성 제고에 도움이 될 수 있다.

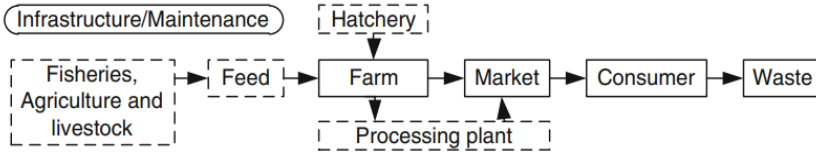
어업인이 온실가스 배출권을 추가 소득원으로 활용할 수 있어 소득 증대와 탄소중립 수용성을 강화할 수 있다. 이러한 다양한 인센티브 제도에 어업인이 자연스럽게 참여할 수 있도록 지원·제도화하여 홍보하면, 어업인 스스로가 탄소중립 정책사업에 참여하여 기대 이상의 수익을 낼 수 있다는 인식 전환으로 탄소중립 수용성을 강화할 수 있다.

4. 양식산업 탄소배출 인벤토리 구축

환경 전과정평가(LCA, Life Cycle Assessment)는 목적 및 범위 설정, 목록분석, 영향 평가의 과정을 거쳐 전과정을 해석하는 모든 과정을 포함한다.¹⁷⁷⁾ 양식산업은 후방산업, 양식장, 전방산업 등에서 온실가스가 배출된다. 수산물 양식을 위해서는 수산물(어분), 농산물(대두박, 밀가루 등) 등을 이용해서 제조한 사료, 종묘 배양장에서 생산된 치어, 펌프 등을 통해 유입되는 물, 양식장(건축물, 수조) 등이 있어야 한다. 양식산업의 전 과정은 치어, 사료, 물 등을 투입하여 생산된 양식수산물은 가공 후 판매되거나, 생산 후 바로 시장에 판매·소비되고, 나머지는 버려지거나 부산물은 재활용되는 과정이다.

177) 아시아-태평양 경제협력기구(2004), p. 3.

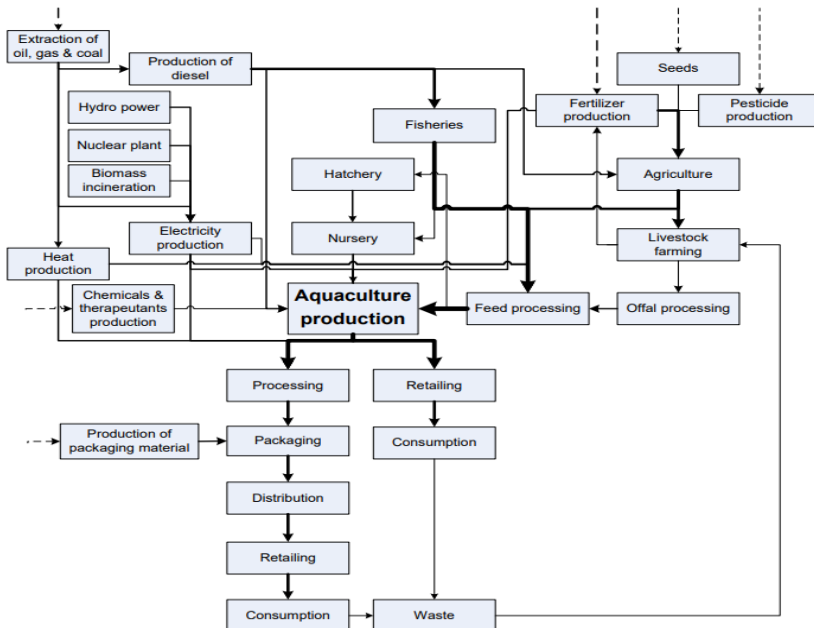
〈그림 6-4〉 양식수산물 생산과정 개념도



자료: Henriksson P.J.G. et al.(2012), p. 307.

그러나 양식수산물 LCA 분석을 위한 공식 데이터 및 온실가스 배출 인벤토리가 구축되어 있지 않다. LCA 분석을 위해서는 시스템 경계 및 범위를 설정하는 것이 중요하다. 우선 데이터 유무를 떠나 전과정 목록 분석 및 영향평가 방법 정립을 위해 전체 양식수산물의 생산시스템 흐름도를 살펴볼 필요가 있다.

〈그림 6-5〉 양식수산물 생산시스템 흐름도



자료: Henriksson P.J.G. et al.(2014), p.15

전과정평가에서는 시스템의 1단위(기능단위)에 해당하는 전과정 투입물, 배출물의 정량적 데이터를 목록화한 데이터를 LCI(Life Cycle Inventory) 데이터라고 한다.¹⁷⁸⁾ 이때 양식수산물 생산을 위해 사용되는 원료물질, 보조물질, 에너지, 유틸리티 등의 정량적인 투입량과 대기 배출물, 수계 배출물, 고형 폐기물 등의 정량적인 배출량이 필요하다.¹⁷⁹⁾

양식수산물 생산을 위한 핵심 투입 요소는 치어, 사료이다. 치어를 양식장에 넣어서 사료를 주면 상품 크기로 성장하고, 상품 크기의 수산물은 가공, 패키징, 유통, 소매, 소비의 단계를 거치거나 바로 유통되어 소비되고 폐기되는 과정을 거치게 된다. 이때 투입물 중 에너지 소비가 많은 부분이 사료, 치어이고, 양식장에서의 수산물 양성을 위해서 사용된다.

전과정 평가를 위해서는 양식장에 사용되는 사료가 배합사료인지, 생사료인지를 구분해야 한다. 양식장이 생사료를 사용한다면 디젤을 사용하는 어선에서 어획된 수산물이 유통과정을 거쳐 양식장으로 바로 들어가지만, 배합사료를 사용하는 양식장이라면 어선에서 어획된 수산물(어분, 어유 등)과 비료, 살충제, 종자를 사용하여 농사지어서 산출된 농산물(대두박, 밀가루 등)을 섞어서 사료를 만들어 양식장의 배합사료로 사용된다. 이 과정에서 전제 탄소 배출량이 고려되어야 한다.

또 다른 양식장의 투입물인 치어는 부화장을 통한 부화와 양성 과정을 거치므로 이 과정에서의 탄소 배출량이 계산되어야 한다. 양식수산물 생산을 위한 투입물에 대한 온실가스 배출량, 수산물 양성 과정에서 사용되는 에너지원(수력, 원자력, 바이오연료 등)을 통해 만들어진 전기가 사용되고, 이외에도 각종 수산 의약품도 사용하게 된다.

양식산업 주요 품종별, 지역별, 배출 요소별(사료, 전기, 유류, 고정자산,

178) 국립수산물과학원 홈페이지, 수산업 분야 LCI DB 구축(검색일: 2022.6.19.)

179) 위의 자료(검색일: 2022.6.19.)

어류 자체 배출 등) 인벤토리 구축을 통해 2050 탄소중립 목표 달성까지 주기적인 모니터링으로 저탄소 인증 수산물 제도 도입 및 양식수산물 생산 과정의 온실가스 배출량을 단계적 저감하기 위한 전략 마련이 필요하다.¹⁸⁰⁾

탄소배출 인벤토리 구축 사업(안)은 <표 6-4>에 제시하였다.

<표 6-4> 탄소배출 인벤토리 구축 사업(안)

- | |
|---|
| <p>☐ 필요성</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 그동안 추진되어 온 에너지 절감 사업의 환경적, 경제적 효과의 평가와 종자부터 판매까지 산업 전 주기 과정상 탄소배출 단계와 배출 비중을 점검하여 사업 효과 제고 필요 ○ 양식장 에너지 절감 사업 보조율 변경(상향 또는 하향) 협의 시 탄소배출 인벤토리 구축 자료를 토대로 종자-사료-양성 등 산업업종에 따라 보조율 차등 지원 등의 근거자료로 활용 <p>☐ 기본방향</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 육상양식장을 대상으로 에너지 절감 시설 설치 여부, 제품성능에 따른 에너지 감축 효과를 산정하고, 종자·양식·사료 가공 등 육상양식 전 주기 단위시간 당 에너지 사용량 산정을 통한 에너지 절감 우선순위 도출 <p>☐ 세부 내용</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 에너지 절감 사업지원 양식장 현황조사, 지원 양식장 에너지 절감 장비 규격 및 사용량 확인, 양식장 유형별 대조를 통한 장비 효율성 순위 도출, 양식장 에너지 절감 지원 사업의 경제적, 환경적 효용 분석 ○ 종자, 사료, 양성 등 에너지 소요량 파악 및 인벤토리 구축, 단계별·유형별 에너지 절감 시 경제적 효과, 소비자 효용, 수출가격 경쟁력 등 연쇄 파급효과 산출 <p>☐ 예산/기간</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 3억 원(일반연구용역, 공모)/ 24~25년(2년)/ 국비 100% |
|---|

자료: 저자 작성

180) 이상엽 외(2022), pp. 340-363.

참고문헌

국내 문헌

- 관계부처 합동(2022), 2021년 이상 기후 보고서.
- 국립수산물과학원(2021), 주요 양식품목(넙치·전복·김)의 가치사슬 분석.
- 국무조정실(2016), 「2030 국가 온실가스 감축 기본로드맵 보도자료」
- 기상청(2020), 한국 기후변화 평가보고서 2020 -기후변화 과학적 근거-
_____(2021), 기후변화 2021 과학적 근거: 정책결정자를 위한 요약본, 기상청.
- 김수현·김창훈 외(2020), 유럽 그린딜의 동향과 시사점, 에너지경제연구원.
- 김은주(2019), 기후변화에 따른 수산분야의 온실가스 감축 방안, 한국해양비즈니스 학회, 42, pp. 53-90.
- 김종현 외(2014), 뱀장어 양식장에서 발생하는 온실가스 배출량 산정, 수산해양 기술연구, Vol. 49, No. 3, p. 58-66.
- 농림축산식품부(2021), 2050 농식품 탄소중립 추진전략.
- 농어업·농어촌특별위원회(2022), 탄소중립시대, 수산·어촌 부문 정책지원 방안.
- 대외경제정책연구원(2021), 2021년 유엔기후변화협약 당사국총회(COP26) 논의 및 시사점, KIEP 오늘의 세계 경제, 21호.
- 리서치랩(2020), 친환경에너지보급사업 실태조사 및 성과분석 보고서, 한국농어촌 공사.
- 마창모(2021), D.N.A 기반의 스마트양식장, TTA Journal, 198, TTA.
- 민인식·최필선(2019), 고급통계분석, 지필미디어.

-
- 박성진 외(2020), 토지이용과 토지이용 변화에 따른 농경지 온실가스 배출량 산정 방법 연구, 국립농업과학원.
- 박영석 외(2021), 국제사회의 탄소중립 정책 방향과 시사점, KIEP 오늘의 세계경제, 21(1), 대외경제정책연구원.
- 신용민·정겨운(2018), 우리나라 근해어업의 CO₂ 배출 저감 비용함수 추정, 자원·환경경제연구, 27(3), pp. 399-420.
- 아시아-태평양 경제협력기구(2004), Life Cycle Assessment ISO 14040 시리즈 실무 지침.
- 안성배(2022), 2022년 세계 경제 전망(업데이트), KIEP 오늘의 세계 경제, 22(8), 대외경제정책연구원.
- 양용수 외(2015), 넙치 양식장에서 발생하는 온실가스 배출량 산정, 수산해양기술 연구, 51(4), pp. 614-623.
- 이규태 외(2018), 에너지 제로 스마트양식 시스템 개발, 해양수산과학기술진흥원.
- 이상엽 외(2022), 탄소중립 정책연구, 경제·인문사회연구회.
- 이지훈(2013), 전과정 평가 방법에 의한 대형선망의 온실가스 배출량 정량적 분석, 수산해양기술연구, pp. 282-290.
- 이춘수·양훈민(2021), 소비자의 저탄소 인증 농산물 구매형태 및 인식에 관한 연구, 한국식품유통학회 하계학술발표논문집, <https://doi.org/10.11625/KJOA.2021.29.3.333>.(검색일: 2022.11.29)
- 임소영·양주영(2021), EU 탄소국경조정제도 입법안의 주요 내용과 시사점, i·KIET 산업경제이슈, 산업연구원.
- 장우석 외(2021), 탄소중립시대의 국제 질서 변화와 우리의 대응, VIP Report 738(21-02), 현대경제연구원, pp. 1-24.
- 정연제 외(2017), 농사용 전기요금 체계 개선방안 연구, 에너지경제연구원.
- 중소벤처기업부(2019), 중소기업 전략 로드맵.
- 최현석 외(2020), 수조식 양식장의 신재생에너지 대체를 위한 전력사용실태 조사, 조명·전기설비학회, p. 103.
- 한국교통연구원(2008), 교통부문 청정개발체제(CDM) 활성화 방안.
- 한국농어촌공사(2022.2.23.), 2022년 친환경에너지 및 용수관리 업무편람(내부 자료).

- 한국전자통신연구원(2021), 최적의 수산 양식 설계·운영을 위한 디지털 아쿠아 트윈
핵심기술 플랫폼 기술개발, 2021년도 정보통신·방송 기술개발 사업(ICT
융합산업원천기술개발), 사업제안서, pp. 22-40.
- 해양수산부(2018), 제2차 친환경어업 육성계획(안).
- _____ (2021a), 2021년 친환경에너지 보급사업 시행지침.
- _____ (2021b), 해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵.
- 홍지형(2012), 삼림과 초지 간의 토지이용 변화에 따른 기후변화 영향 평가: 뉴질랜드
사례연구, 한국도시환경학회
- 환경부(2019), 제2차 기후변화 대응 기본계획안.
- ASC(2019), ASC 이매패류 표준 - 버전 1.1.
- EY한영회계법인(2021), 기후변화 규제가 한국수출에 미치는 영향분석: 주요 3개국
(美·中·EU)을 중심으로.
- KDB산업은행(2022), 탄소중립시대 데이터센터의 열관리, Weekly KDB Report.

국외 문헌

- Ahmed, Nesar et al.(2016), Can greening of aquaculture sequester blue carbon?,
Ambio, 46(4), pp. 468-477.
- Ahmed, Nesar, & Turchini, Giovanni M.(2021), Recirculating aquaculture systems
(RAS): Environmental solution and climate change adaptation, Journal of
Cleaner Production, 297, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126604>.
(검색일:2022. 6.25)
- ASC & MSC(2018), ASC-MS Seaweed (Algae) Standard.
- Aubin, J. et al.(2006), Characterisation of the environmental impact of a turbot
(Scophthalmus maximus) re-circulating production system using Life Cycle
Assessment, Aquaculture, 261(4), pp. 1259-1268.
- _____ (2009), Assessment of the environmental impact of carnivorous finfish
production systems using life cycle assessment, J Clean Prod, 17(3), pp. 354-
361.

-
- Ayer, N. W., & Tyedmers, P. H.(2009), Assessing alternative aquaculture technologies: life cycle assessment of salmonid culture systems in Canada, *J Clean Prod*, 17(3), pp. 362–373.
- Bayart, J-B et al.(2010), A framework for assessing off-stream freshwater use in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 15, pp. 439–453.
- Biniam, Samuel-Fitwi(2012), Environmental evaluation of aquaculture using life cycle assessment(LCA), Kiel university.
- Cao, L. et al.(2011), Life cycle assessment of Chinese shrimp farming systems targeted for export and domestic sales, *Environ Sci Technol*, 45), pp. 6531–6538.
- Card, D., & Krueger, A. B. (1993). Minimum wages and employment: A case study of the fast food industry in New Jersey and Pennsylvania.
- Colt, John et al, (2008) Energy and resource consumption of land-based Atlantic salmon smolt hatcheries in the Pacific Northwest (USA), *Aquaculture*, 280 (1-4), pp. 94-108.
- Cucuzza, Marina L., Sagar, Heather L., & Griffis, Roger B.(2021), Synthesis of Public Comments to NOAA on Executive Order 14008, Tackling the Climate Crisis at Home and Abroad, Section 216(c): Recommendations on How to Make Fisheries and Protected Resources, Including Aquaculture, More Resilient to Climate Change, NOAA Tech. Memo, NMFSF/SPO-218.
- European Commission(2020), Strategic guidelines for a more sustainable and competitive EU aquaculture for the period 2021 to 2030.
- FAO(2022a), Fishery and Aquaculture Statistics, Global production by production source 1950–2020, Capture Fisheries and Aquaculture Production in Million Tonnes, Excluding Aquatic.
- _____(2022b), Fishery and Aquaculture Statistics, Global production by production source 1950–2020, World Capture Fisheries and Aquaculture Production, Excluding Aquatic Plants.
- _____(2022c), Fishery and Aquaculture Statistics, Global production by production source 1950–2020, World Capture Fisheries and Aquaculture Production, Including Aquatic Plants.

- _____(2022d), Fishery and Aquaculture Statistics. Global production by production source 1950-2020, Production by ISSCAAP Division in Million Tonnes, Excluding Aquatic Plants.
- _____(2022e), The State of World Fisheries and Aquaculture 2020.
- Froehlich, Halley E. et al.(2019), Blue Growth Potential to Mitigate Climate Change through Seaweed Offsetting, *Current Biology*, 29(18), p. 3089.
- Gabrielii, Cecilia H., & Jafarzadeh, Sepideh(2020), Carbon footprint of fisheries – a review of standards, methods and tools, SINTEF.
- Hasan, Mohammad R. et al(2017), Improving feed conversion ratio and its impact on reducing greenhouse gas emissions in aquaculture, FAO.
- Henriksson, P.J.G. et al.(2012), Life cycle assessment of aquaculture systems- a review of methodologies, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(3), pp. 304-313.
- _____(2014), Final LCA case study report, Sustaining Ethical Aquaculture Trade.
- IPCC(2018), Global Warming Of 1.5 °C, an IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 °C Above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty, Summary for Policymakers.
- _____(2021), Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Summary for Policy makers.
- Jones, Alice R. et al.(2022), Climate-Friendly Seafood: The Potential for Emissions Reduction and Carbon Capture in Marine Aquaculture, *BioScience* Vol.72, No. 2, pp. 125-128.
- Liu, Yajie et al.(2016), Comparative economic performance and carbon footprint of two farming models for producing Atlantic salmon (*Salmo salar*): Land-based closed containment system in freshwater and open net pen in seawater, *Aquacultural Engineering*, 71, pp. 1-12.
- MacLeod, M. et al.(2019), Quantifying and mitigating greenhouse gas emissions

-
- from global aquaculture, FAO, Fisheries and aquaculture technical Paper, 626.
- MacLeod, M. J. et al.(2020), Quantifying greenhouse gas emissions from global aquaculture, *Scientific reports*, 10(1), 11679, pp. 1-8.
- McLean, Ewen et al.(2022), Muscle amino acid profiles of eleven species of aquacultured animals and their potential value in feed formulation, *Aquaculture and Fisheries*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2022.04.010>.(2022.12.21)
- Mungkung, R. T.(2005), Shrimp aquaculture in Thailand: application of life cycle assessment to support sustainable development (Ph.D. thesis. Center for Environmental Strategy, School of Engineering, University of Surrey, Surrey, UK.)
- Papatryphon, E. et al.(2004), Environmental impact assessment of salmonid feeds using life cycle assessment (LCA). *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 33(6), pp. 316-323.
- Pelletier, N. & Tyedmers, P.(2007), Feeding farmed salmon: is organic better? , *Aqua culture*, 272(1-4), pp. 399-416.
- _____ (2010), Life Cycle Assessment of Frozen Tilapia Fillets from Indonesian Lake-Based and Pond-Based Intensive Aquaculture Systems, *Journal of Industrial Ecology*, 14(3), pp. 467-481.
- Rabobank(2022), Seafood Trade Keeps Growing From Strength to Strength.
- Ray, Nicholas E. et al.(2019), Low Greenhouse Gas Emissions from Oyster Aquaculture, *Environmental Science & Technology*, 53(15), pp. 9118-9123, 9125.
- Robb, David H.F. et al.(2017), Greenhouse gas emissions from aquaculture, FAO, Fisheries and aquaculture technical Paper, 609.
- Sahya Maulu et al.(2021), Climate change effects on Aquaculture Production : sustainability implications, mitigation, and adaptations, *frontiers in Sustainable Food Systems*.
- Tilman, David, & Clark, Michael(2014), Global diets link environmental sustainability and human health, *Nature*(515), pp. 518-522.
- UNEP(2018), Emissions Gap Report 2018.
-

- Wang, Jie et al.(2022), C1 gas protein: A poteintial protein substitute for advancing aquaculture sustainability, Reviews in Aquaculture 1-19, p.4.
- Yuan, J.J. et al.(2019), Rapid growth in greenhouse gas emissions from the adoption of industrial-scale aquaculture, BANGOR university.

법률 자료

- 해양수산부 공고 제2022-97호(2022.1.18.)
- 해양수산부 소관 친환경농어업 육성 및 유기식품 등의 관리·지원에 관한 법률(2021. 4. 13., 법률 제18026호)
- 환경부 고시(2022), 전기자동차 배터리 반납 등에 관한 고시(2022.1.12., 제2022-14호)

인터넷 자료

- 2050 탄소중립녹색성장위원회, <https://www.2050cnc.go.kr/base/contents/view?contentsNo=9&menuLevel=2&menuNo=11>(검색일: 2022.6.7.)
- 경향신문(2021.9.5.), 이봉주 수산과학원 연구원, “넙치 양식에는 곤충사료가 최고입니다”, <https://www.khan.co.kr/science/science-general/article/202109051144001>(검색일 : 2022.10.8.)
- 국가통계포털, 어류양식동향조사, 시도·시군구별 양식방법별 어종별 양식현황 (입식, 생산, 사육, 먹이(사료)를 준 량), 2012~2021, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1EZ0008&conn_path=12(검색일: 2022. 5.7., 2022.7.14.)
- _____, 어류양식동향조사, 양식방법별 어종에 따른 경영체 현황, 2017~2021, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1EZ0003&vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=K2_4&seqNo=&lang_mode=ko&language=kor&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=MT_ZTITLE(검색일: 2022.5.7.)

-
- _____, 어업생산동향조사, 어업별 품종별 어법별 통계, 2012~2021, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1EW0005&conn_path=I2(검색일: 2022.7.14.)
- 국립수산물과학원 홈페이지, 수산업 분야 LCI DB 구축, https://m.nifs.go.kr/sub4/sub7_10.jsp(검색일: 2022.6.19.)
- 국립수산물품질관리원, 친환경 수산물 인증현황, <https://www.nfqs.go.kr/hpmsg/data/actionMarineOrganicCertificationForm.do?menuId=M0000229>, (검색일: 2022.6.18.)
- 그린포스트코리아(2022.5.6.), [대한민국 환경보고서] “탄소중립, 에너지 패러다임 변화 대응해야”, <http://www.greenpostkorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=200738>(검색일: 2022.12.21.)
- 기계설비신문(2022.4.11.), [자동제어설비:개론②] BEMS프로그램 온라인 유지관리·무인관리 프로그램 개발 절실, <http://www.kmecnews.co.kr/news/articleView.html?%20idxno=25292>, (검색일: 2022.10.8.)
- 녹색경제신문(2022.6.23.), 클라우드 대세에 탄소 배출 ‘문제’로 … MS ‘해저 냉각’, 네이버·카카오 ‘에너지 효율’ 대응, <https://www.greened.kr/news/articleView.html?idxno=2962970>(검색일: 2022. 9.8.)
- 농림축산식품부 보도자료(2021.10.8.), 정부, 2030년 온실가스 감축목표(NDC) 온라인 토론회 개최, <https://www.mafra.go.kr/mafra/293/subview.do?sessionId=BNHiSMVnegeY8E+VJca5QsUX.inst11?enc=Zm5jdDF8QEB8JTJGYmJzJTJGbwFmcmElMkY2OCUyRjMyODMyNyUyRmFydGNsVmllldy5kbyUzRg%3D%3D>(검색일: 2022.10.8.)
- _____(2022.2.6.), 2030년까지 축산분야 온실가스 30% 감축, <https://www.mafra.go.kr/bbs/mafra/68/329553/artclView.do>(검색일: 2022.12.21.)
- _____(2022.3.8.), 농식품부, 상반기 저탄소 농산물 인증 희망 농가 모집, <https://www.mafra.go.kr/mafra/293/subview.do?enc=Zm5jdDF8QEB8JTJGYmJzJTJGbwFmcmElMkY2OCUyRjMyOTgyMSUyRmFydGNsVmllldy5kbyUzRg%3D%3D>(검색일: 2022.12.21.)
- 농림축산식품부 저탄소 농축산물 인증제 사업, <https://www.mafra.go.kr/mafra/1281/subview.do>(검색일: 2022. 6.18.)
-

- 농림축산식품부 최근 통계자료, 배합사료 생산실적 통계, <https://www.mafra.go.kr/mafra/358/subview.do>(검색일: 2022.12.21.)
- 대한민국 정책브리핑, [탄소중립 용어사전] RE100이란?, <https://www.korea.kr/news/visualNewsView.do?newsId=148899478>(검색일: 2022.5.24.)
- 물류신문(2022.4.28.), 중국 주요 도시 봉쇄에 해운물류 직격탄, <https://www.klnews.co.kr/news/articleView.html?idxno=304426>(검색일: 2022.6.26.)
- 아시아타임즈(2022.3.16.), 해상운임 1년 새 3배 ‘폭등’…해운사 vs 수출기업 ‘엇갈린 희비’, <https://www.asiatime.co.kr/article/20220316500128>(검색일: 2022.6.26.)
- 연합뉴스(2017.9.21.), 수산과학원 어분 함량 줄인 양식어류 사료 개발 나서, <https://www.yna.co.kr/view/AKR20170921156400051>(검색일: 2022.6.27.)
- _____(2021.7.17.), 서유럽 홍수 사망자 150명 넘어…독일 133명·벨기에 20명, <https://www.yna.co.kr/view/AKR20210717042900009>(검색일: 2022.6.20.)
- 연합인포맥스, 시사금융용어, 스코프3, <https://news.einfomax.co.kr/news/articleView.html?idxno=4201301>(검색일: 2022.6.24.)
- 전력통계정보시스템, <https://epsis.kpx.or.kr/epsisnew/selectEksaScfChart.do?menuId=060600>(검색일: 2022.10.10.)
- 전자신문(2022.4.28.), [기고]지속가능한 미래, 데이터센터에 달렸다, <https://www.etnews.com/20220428000152>(검색일: 2022.9.8.)
- 조선일보(2021.7.20.), 저탄소 농산물, ‘진짜’ 저탄소는 아니었네, <https://futurechosun.com/archives/57491>(검색일: 2022.6.18.)
- _____(2022.6.10.), 환경부, 녹색제품에 농산물 포함 추진 학교급식도 친환경으로, <https://www.chosun.com/national/transport-environment/2022/06/10/TR5ZYTZVCBEAZCRB3CFYJ4WX6A/>(검색일: 2022.6.10.)
- 조선일보(2022.4.21.), IMF 총재 “중국 경기침체 장기화, 전 세계에 파급효과 커”, http://m.joseilbo.com/news/view.htm?newsid=452507#_enliple(검색일: 2022.6.28.)
- 주간경향(2021.9.3.), [수과원의 젊은 과학자들](10) “넙치 양식에 곤충사료가 최곱니다”, <https://weekly.khan.co.kr/khnm.html?mode=view&artid=202109031538571&code=114>(검색일: 2022.6.27.)

직업백과, 수산종묘생산, <https://job.asamaru.net/%EC%A7%81%EB%AC%B4/%EC%88%98%EC%82%B0%EC%A2%85%EB%AC%98%EC%83%9D%EC%82%B0>
(검색일: 2022.6.27.)

한겨레(2021.11.10.), 해수면 상승에 국토가 바다 아래로…투발루 외무장관 ‘수중 연설’, <https://www.hani.co.kr/arti/society/environment/1018821.html>(검색일: 2022.6.20.)

해양수산부 보도자료(2021.12.16.), 해양수산, 탄소중립을 넘어 탄소네거티브로, <https://www.mof.go.kr/article/view.do?articleKey=44099&boardKey=10&menuKey=376¤tPageNo=1>(검색일: 2022.6.30.)

해양수산부 공식 블로그(2022.8.1.), 국민횡감 넙치, 스마트양식으로 저렴해집니다!, <https://blog.naver.com/koreamof/222836484868>(검색일: 2022.12.26.)

환경부 온실가스정보센터(2022.1.10.), <https://www.gir.go.kr/home/board/read.do?menuId=36&boardId=56&boardMasterId=2>(검색일: 2022.10.10.)

Ai타임스(2022.3.18.), 에스아이에이, 이산화탄소 배출량 AI로 검출하는 기술 가능성 제기, <http://www.aitimes.com/news/articleView.html?idxno=143516>(검색일: 2022.12.21.)

BBC News 코리아(2022.1.15.), 이상기후: 호주 60년 만에 최고기온 50.7도…평균보다 15도 높아, <https://www.bbc.com/korean/international-60006278>(검색일: 2022.6.20.)

_____(2022.2.18.), 기후 변화: 22년 넘게 이어진 미국 남서부 가뭄… 1200 년만의 대가뭄, <https://www.bbc.com/korean/international-60399042>
(검색일: 2022.6.20.)

Climate Action Tracker, <https://climateactiontracker.org/climate-target-update-tracker-2022/>(검색일: 2022.6.8.)

ECONOMYChosun(2020.12.14.), 인공위성AI 라이다로 전 세계 숲과 탄소 데이터 분석, http://economychosun.com/client/news/view.php?boardName=C00&t_num=13610003(검색일: 2022.12.21.)

European Union, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2021:236>(검색일: 2022.6.8.)

FIS, KRAV, <https://seafood.media/fis/companies/details.asp?l=e&filterby=companies>

- &company=KRAV&page=1&company_id=153433&country_id=(검색일: 2022. 6.18.)
- Global Seafood Alliance 홈페이지(2013.9.2.), Assessing the carbon footprint of aquaculture, <https://www.globalseafood.org/advocate/assessing-carbon-footprint-of-aquaculture>(검색일: 2022.8.13.)
- Guardian(2021.8.9.), “The world could hit 1.5C warming in a decade. That’s terrible news for the Pacific”, <https://www.theguardian.com/commentisfree/2021/aug/09/the-world-could-hit-15c-warming-in-a-decade-thats-terrible-news-for-the-pacific>(검색일: 2022.6.20.)
- IT DAILY(2022.4.14.), [글로벌] 구글, “2030년까지 데이터센터 100% 탄소제로 에너지 사용”, <http://www.itdaily.kr/news/articleView.html?idxno=207544>(검색일: 2022.9.8.)
- KDI 경제정보센터, 경제정책자료, <https://eiec.kdi.re.kr/policy/materialView.do?num=217697&topic=C&pp=20&datecount=&recommend=&pg=>(검색일: 2022.6.7.)
- RE100 홈페이지, https://www.there100.org/re100-members?items_per_page=All (검색일: 2022.6.4.)
- Seafood Source 홈페이지, <https://www.seafoodsource.com/news/supply-trade/rabobank-global-seafood-trade-value-rebounds-to-usd-164-billion> (검색일: 2022.6. 26.)
- SEC 홈페이지, <https://www.sec.gov/news/press-release/2022-46>(검색일: 2022. 6.28.)
- The Science Times(2022.3.31.), <https://www.sciencetimes.co.kr/news/2050-%ED%83%84%EC%86%8C-%EC%A4%91%EB%A6%BD%EA%B3%BC-re100-%EC%9A%B0%EB%A6%AC%EC%9D%98-%EC%97%AD%ED%95%A0%EC%9D%80/>(검색일: 2022.10.7.)
- UNFCCC 홈페이지, <https://unfccc.int/process/parties-non-party-stakeholders/parties-convention-and-observer-states>(검색일: 2022.10.25.)
- WRI 홈페이지, <https://www.wri.org/insights/6-pressing-questions-about-beef-and-climate-change-answered>(검색일: 2022.8.11.)

관련 자료

국무조정실 보도자료(2016.12.6.), 신기후체제 출범에 따라 효율적 기후변화대응을 위한 국가차원의 중장기 전략과 정책방향 제시, https://www.motie.go.kr/common/download.do?fid=bbs&bbs_cd_n=81&bbs_seq_n=158865&file_seq_n=29(검색일: 2022.6.18.)

정규희·윤찬식(2021), 수산물 저탄소 인증제 도입을 위한 국제표준 분석, 한국표준협회, ISSUE REPORT(21-1)

(☞)퀵팀(2022), 충남·제주지역 양식장 소비전력 실태조사. KMI 의뢰 분석 결과.

(☞)AQA(2022), 육상양식장 소수력 발전 설치 타당성 분석. KMI 의뢰 분석 결과.

충남연구원(2020), 충청남도 온실가스 감축역량 강화를 위한 해양·연안 부문 적용 확대 방안.

Gephart, Jessica A. et al, (2016), Vulnerability to Shocks in the global seafood trade network, Environ. Res. Lett. 11 035008, doi: 10.1088/1748-9326/11/3/035008.

Koehler, A. (2010) A framework for assessing off-stream freshwater use in LCA, International Journal of Life Cycle Assessment, 15, pp. 439-453.

부 록

선행연구 검토

구분		선행연구 검토		
		연구 목적	연구 방법	주요 연구 내용
GHG 배출량 추정	1	- 과제명 : 전과정 평가 방법에 의한 한국 대형선망의 온실가스 배출량 정량적 분석 - 연구자(연도) : 이지훈 (2013) - 연구목적 : 대형선망온실가스 배출량 추정을 통한 정부 정책 방향 설정	- 대형선망어업 LCA모델 구축 - 대형선망어업 온실가스 배출량을 추정을 위한 LCA를 구축하고, 고등어의 중량/순중량별 배출량 추정	- 대형선망어업의 연료 소모계수 도출 - LCA방법(ISO 14044)을 통한 정량적 온실가스 분석
	2	- 과제명 : 뱀장어 양식장에서 발생하는 온실가스 배출량 산정 - 연구자(연도) : 김종현 외 (2014), Fisheries technology - 연구목적 : 유수식 육상 양식장을 대상으로, 규모별 양식장에서 발생하는 온실가스 배출량 산정	IPCC가이드라인의 TIER1 방법 사용	- 뱀장어 양식 표준지침서(2006)를 참고하여 양식장 규모를 4단계로 구분하여 탄소 배출량 산정 - 종묘, 사료, 전기, 유류, 전기, 고정자산, 어류 호흡, 기타로 배출 요소 분류 - 생산단위당 18.7kg·CO₂ 배출 - 지수식 : 뱀장어 1kg당 탄소배출량 소규모 19.09, 중규모 19.39, 대규모 18.33kg·CO₂

구분	선행연구 검토		
	연구 목적	연구 방법	주요 연구 내용
			• 순환여과식 : 18.03kg·CO ₂
3	• 과제명 : 넙치 양식장에서 발생하는 온실가스 배출량 산정 • 연구자(연도) : 양용수 외 (2015), Fisheries technology • 연구목적 : 우수식 육상 양식장을 대상으로, 규모별 양식장에서 발생하는 온실가스 배출량 산정	• IPCC가이드라인의 TIER1 방법 사용	• 넙치 양식 표준지침서 (2006)을 토대로 하여 규모를 4단계로 구분 하여 탄소 배출량 산정. • 사료, 전기, 유류, 고정 자산, 여류자체, 기타 로 배출 요소 분류. • 남해안 넙치 1kg당 탄소 배출량 36.83, 제주도 는 24.33.
4	• 과제명 : Mitigation of adverse effects on competitiveness and leakage of unilateral EU climate policy: An assessment of policy instruments • 연구자(연도) : Antimiani et al.(2016), Ecological Economics • 연구목적 : EU기후정책(온실 가스배출저감) 도입에 따른 부정적 영향 완화에 관한 정책 도구 평가	• 문헌조사 • 시나리오분석(EU기후 정책(탄소배출저감정책)의 영향 평가	• 산업분야별 탄소배출량, 에너지 효율 향상성, 대체 탄력성 추정 • (장기적 관점에서) 정책수행으로 인한 환경효과성, 비용효율성 정책적 타당성
5	• 과제명:Comparative economic performance and carbon footprint of two farming models for producing Atlantic salmon (Salmo salar): Land-based closed containment system in freshwater and open net pen in seawater • 연구자(연도): Liu et al.(2016), Aquacultural Engineering	• 기업 재무분석과 LCA 평가로 해상양식, 육상 폐쇄형 순환여과식 시스템을 비교함	• 해상 개방형 양식 (ONP)과 육상 폐쇄형 순환여과식 양식 (LBCC-RAS)의생산비, 수익성, 탄소발자국을 비교함 • 이자비용과 감가상각 비를 제외하면 두 시스템의 총 운영비는 차이가 크지 않음 • LBCC-RAS의 초기 투자 비용이 ONP보다 높지만, 시장 프리미엄

구분	선행연구 검토		
	연구 목적	연구 방법	주요 연구 내용
	연구목적 : 해상 개방형 연어 양식과 육상 폐쇄형 순환여과식 연어양식시스템을 경제성과 탄소발자국 측면에서 비교하는 연구		- 이 있기 때문에 수익성이 높음 - 사료가격이 가장 높은 민감도를 보이고, 탄소발자국에 영향을 미치는 주요 요인임 - 탄소발자국 측면에서 LBCC-RAS(화석연료로 만든 전력 사용)는 ONP보다 두배에 가깝지만, 항공수송을 포함하면 ONP가 더 높을 수 있음
6	- 과제명 : 양식장 펌프 제어를 통한 에너지 절감 시스템 설계 및 구현 - 연구자(연도) : 김형수·김보균·곽윤식(2017) - 연구 목적 : 육상양식장 전력 절감 방안 마련	OpenADR 2.0b 표준 프로토콜을 적용함으로써 양식장의 지능형 수요 반응 자원거래가 가능하도록 운영	24시간 가동하는 육상 양식장 펌프로 인해 과소비되는 전력을 절감하고 절감분을 거래하는 탄력적인 에너지 절감 시스템을 개발함 - 개발한 시스템을 양식장에 설치 및 12시간 가동 실험함. 실험 결과, 기존 시스템보다 효율적으로 나타남 (292kWh, 40%의 전력량 절감)
7	- 과제명 : LCA기법을 활용한 스마트폰의 잠재적 환경영향평가 - 연구자(연도) : 허영채 외 (2017) - 연구목적 : 스마트폰의 높은 보급률과 짧은 교체주기로 폐기량이 증가할 것으로 전망됨에 따라, 스마트폰의 환경영향 평가 실시	- LCA 평가 - ISO 14040 의거(제조 전, 제조, 유통, 사용 및 폐기)	- 연구대상 및 범위 정의 - 전과정 목록분석 - 전과정 영향평가 - 전과정 해석 - 유사 연구사례 비교 - 영국 Carbon Trust 인증 취득한 스마트폰 B와 비교
8	과제명 : Evaluation of Different Aquaculture	사료 원재료별 LCI DB 구축	- 사료 원료별 LCA 구축 - 카테고리별(기후변화,

구분	선행연구 검토		
	연구 목적	연구 방법	주요 연구 내용
	- Feed Ingredients in Indonesia Using Life Cycle Assessment • 연구자(연도) : Henriksson & Philips(2017) • 연구목적: 인도네시아의 지속가능한 양식 어류 생산에 있어 정부의 정책의사 결정을 위한 가이드 마련	• 국내산/수입산 탄수화물, 단백질 원료를 구분함 • 인터뷰, 문헌조사 • LCA평가 모델 구축 • 통계자료 조사 • 몬테카를로 시뮬레이션	- 산성화, 부영양화, 토지 이용, 물 사용) 평가 • 질량/경제적 할당에 따른 민감도 분석
9	• 과제명 : The Carbon Footprint of Norwegian Seafood Products on the Global Seafood Market • 연구자(연도) : Ziegler et al.(2012) • 연구목적 : 수산식품 유형에 따른 온실가스 배출 측정과 주요 배출요인을 밝히기 위한 비교분석	• ISO에 표준화된 LCA 평가 • 통계자료 조사	• 품종, 생산방식(어로 어업 유형별, 양식), 무역운송의 형태, 상품유형별 탄소배출량 추정 및 비교분석
10	• 과제명 : Integration of energy audits in the Life Cycle Assessment methodology to improve the environmental performance assessment of Recirculating Aquaculture Systems • 연구자(연도) : Badiola et al.(2017) • 연구목적 : 순환여과식양식의 에너지 소모 구조 개선으로 비용 효율성 제고	• 에너지 진단(energy audit) • LCA 평가 • 에너지 사용량에 따른 시나리오 분석	• 육상양식장 장치별 에너지 소모량 추정 • 수온 유지에 투입되는 에너지 비율이 가장 큰 비중을 차지하고, 에너지 변동성의 주요 원인 • 에너지 사용량이 투입물(치어, 산소, 사료)과 환경영향력(무생물 고갈, 산성화, 부영양화, 지구온난화)에 미치는 영향
11	• 과제명 : Greenhouse gas emissions from aquaculture	• 현장조사, 설문조사(양식장, 사료공장) • LCA 평가	• 시스템범위(cardle to gate)에서 전과정 평가 모델을 구축

구분	선행연구 검토		
	연구 목적	연구 방법	주요 연구 내용
	• 연구자(연도) : Robb et al.(2017), FAO • 연구목적 : 아시아 국가의 양식산업 성장률이 높은 어종을 대상으로 온실가스 배출구조를 분석하여, 양식시스템 개선, 비용 효율적인 방법을 모색하기 위함		• 양식기차기술, 원료공급, 사료생산 등 분석 • 생산시스템별 GHG 배출량이 상이한데, 공통적으로 사료 생산이 주요원인임 • 사료의 원료, 생산기술, 효율성(FCR)이 중요 • 생산의 단계별 개선방안 제시
12	• 과제명 : 에너지제로 스마트 양식시스템개발 • 연구자(연도) : 이규태 외 (2018) • 연구목적 : 국내 현실에 적합한 에너지 제로 스마트 제어 패시브 양식장 표준모델을 제시	• 문헌조사(국내외 기술·산업동향조사) • 현장조사(에너지 사용량 등 실태조사) • 기술개발 및 현장평가	• 에너지제로 바이오플락 사양기술개발 • 바이오플락 IoT 시스템 구축 • 패시브양식장설계인자 도출 • 에너지 제로 패시브 양식장 표준설계 및 시공 • 실증 파일럿 운용 및 상업적 규모 현장 평가
13	• 과제명 : Measuring the potential for sustainable intensification of aquaculture in Bangladesh using life cycle assessment • 연구자(연도) : Henriksson et al.(2018) • 연구목적 : 방글라데시 양식 어업의 지속가능성 강화를 위한 지역별 양식 생산 강화와 환경적 영향간 상관관계 분석	• LCA 평가를 활용하여 양식 생산 강화와 환경적 영향의 상관관계 분석 • 온실가스 배출, 산성화물 배출, 물 사용, 토지 이용 데이터 활용 • 설문조사(양식장 생산 데이터, 사료공장 데이터 확보) • 문헌조사 • 몬테카를로 시뮬레이션	• LCA를 사용하여 양식업과 관련된 환경적 영향과 절충안 평가 • 농업 시스템의 6가지 환경 영향요소를 정량화, 기술간 및 영향 범주간 환경측면의 절충안 탐색, 전략 설명 등
14	• 과제명 : Net-zero emissions energy systems • 연구자(연도) : Davis et al.(2018), Science	• 통계자료(항공, 장거리 운송의 평균 이동거리, 사용 연료 등) • 주요 에너지원 상호 변환을 위한 프로세스 수립	• 서비스와 관련된 (탈탄소화가 어려운)배출물 제거, 관리를 위한 기술적 기회 분석/장벽 분석

구분	선행연구 검토		
	연구 목적	연구 방법	주요 연구 내용
	연구목적 : 산업공정 조정배치를 통한 최소한의 배출목표 달성		- 자율주행트럭, 분산 제조 등 - 주요 에너지원 상호 변환 비용 및 효율성 분석 - 탈탄소화 기술개발 방안 - 자본집약적 자산 활용 방안
15	- 과제명 : Livestock and climate change: impact of livestock on climate and mitigation strategies - 연구자(연도) : Grossi et al.(2018) - 연구목적 : 가축생산시스템 구성요소간 상호작용에 기반한 배출량 저감 방안 제시	문헌조사	- 축산부문 주요 온실가스 배출원 - 사료생산에서 온실가스 다량 배출 - 온실가스 배출량 완화 방안 제시
16	- 과제명 : Modeling greenhouse gas emissions from dairy farms - 연구자(연도) : Rotz(2017) - 연구목적 : 다양한 온실가스 배출원간 상호관계를 고려한 프로세스 모델 구축	문헌연구	- 축산 GHG배출원 분석 - 장내 배출, 분뇨 저장 및 처리, 사육장, 목초지 및 경작지(탄소격리 고려 가능) - GHG 추정 모델 비교 - 전주기평가, 탄소발자국으로 온실가스 배출 구조 설명 - 축산 GHG 배출량 모델링 개선방향 - 사료, 분뇨 등 배출원 별 주요 성분을 중심으로 연구 제안
17	- 과제명 : 주요 근해어업의 온실가스 배출량 정량적 분석 - 연구자(연도) : 배재현 외 (2019) - 연구목적 : 우리나라 주요 근해어업의 연료소모계수 도출,	- 문헌조사 - 통계분석 - LCA 평가	- 최근 5년간 생산량 및 에너지 사용량을 기반으로 유류소모계수 도출 - 업종별(자망, 연승, 채낚기, 기선권현망) 조업 및 운송 과정에서 발

구분	선행연구 검토		
	연구 목적	연구 방법	주요 연구 내용
	LCA분석을 통한 온실가스 추정		생하는 온실가스 배출량 추정 조업 어장 이동, 이동 중 선속 감소, 고효율 추진 시스템, 조업 효율 개선 등으로 온실가스 배출량 감축 필요
18	- 과제명 : Comparing Life Cycle Assessment of Salmonid Aquaculture Production Systems - 연구자(연도) : Philis et al.(2019) - 연구목적 : 어류양식 기술과 종류에 따른 LCA연구를 비교·분석하여, 연어류 양식 기술의 환경적 강약점을 구분하고 지속가능한 정책적·산업적 방향을 설정하기 위함	- 연어양식 관련 LCA 연구들의 방법론 적용법, 자료 구축, 생산기술(전주기 영향평가, 사료계수) 측면에서 비교·분석 2000~2018년에 발표된 연어양식LCA연구 중, 선발기준(1차자료 사용, 시스템범위 등)에 부합하는 최종 24개 연구를 대상으로 진행	연어양식 관련 LCA 연구들의 방법론 적용법, 자료구축, 생산기술(전주기영향평가, 사료계수) 측면에서 비교·분석
19	- 과제명 : Life Cycle Assessment of Seabass(Dicentrarchus labrax) Produced in Offshore Fish Farms: Variability and Multiple Regression Analysis - 연구자(연도) : García et al.(2019) - 연구목적 : 농어 LCA 평가를 통해 사료와 연료 절감하는 방법을 고안하기 위함	- LCA 분석 - 다중회귀분석	- 농어 LCA(범위 : 사료 투입-양식장-이동거리)로 환경영향정도를 추정 - LCA 결과를 바탕으로, 사료와 수송거리 등 잠재적 환경 영향력의 주요 요소를 시나리오별로 다중회귀분석 시행
20	- 과제명 : 충청남도 온실가스 감축역량 강화를 위한 해양·연안 부문 적용확대 방안 - 연구자(연도):충남연구원 (2020) - 연구목적 : 지역여건에 적합한 해양·연안 온실가스 감축 사업 확대와 역량강화 방안 마련	- 문헌연구 - 국립수산과학원의 수산 부문 온실가스 배출량 산정 및 저감방안 참고 - 통계자료 활용	- 해양·연안 현황 조사 - 온실가스 저감 국내외 사례 분석 - 해양/해운·항만/수산·어업·양식 분야 온실가스 배출량 추정 및 저감 사업 발굴

구분	선행연구 검토		
	연구 목적	연구 방법	주요 연구 내용
21	• 과제명 : Quantifying greenhouse gas emissions from global aquaculture • 연구자(연도) : MacLeod, et al.(2020) • 연구목적 : 전 세계 양식업의 온실가스 배출량을 정량화	• 문헌조사(데이터 활용) • FAO 생산 데이터를 이용하여, 주요어종에 대해 대륙별로 배출량 계산	• 시스템 경계를 “cradle to farm-gate”로 하고, 온실가스 계산 범주를 설정함 • 2017년 배출한 온실가스 중, 93%가 MtCO₂e이며, 어류와 패류의 총 배출량은 263 MtCO₂e임(연간 인위적 배출량의 0.49% 차지) • 사료가 유형(곡물, 어분)에 따라 배출량이 상이하고, 사료가 전체 배출량에서 가장 높은 비율을 차지함
22	• 과제명 : Carbon footprint of fisheries – a review of standards, methods and tools • 연구자(연도):Gabrielii & Jafarzadeh(2020) • 연구목적 : 수산업(어업) 분야 탄소발자국 추정에 대한 다양한 관점 제공	• 통계 자료(어선 연료사용비, 냉동시스템 냉매 누출량) • 수명주기분석 및 탄소발자국 추정을 위한 전과정 평가(LCA): 제품의 수명주기 동안 제품으로 인해 야기하는 환경 영향을 매핑, 정량화 • IPCC(UN산하 기후변화 국제협약체) 탄소발자국 추정 방법론 사용	• 어선 및 냉동 시스템과 관련된 수산물의 탄소발자국(CF) 표준, 방법, 인증 제도, 도구 및 이전 연구에 대한 개요 • 주요국 사례 • EU(트롤어업과 어업 대체 장비 사용 어업의 연료소비량, 어종별 평균 연료소비량) • 노르웨이(환경친화형 냉매 사용, 연어 항공 운송으로 변경 확대, 연어 사료 생산을 위한 토지 이용 변화에 따른 영향 분석) • 영국(연료 사용, 양식 어류의 사료 공급으로 인한 배출이 주요 원인) • 스웨덴(냉동대구필렛에 대한 연구-지구 온난화 잠재력, 부영양화

구분		선행연구 검토		
		연구 목적	연구 방법	주요 연구 내용
				잠재력, 산성화 잠재력, 광화학 오존 생성 잠재력, 수생 생태 독성 등 영향 조사) • 영국 셰틀랜드(원양트롤러선 대서양 고등어. 선박 내 냉동저장 탱크, 가공공장의 냉동저장 탱크의 연료 및 냉매 사용) • 필리핀(참치어업. 높은 생산량, 낮은 에너지 사용 효율(냉장 및 보조장치의 연료소비), 해상 운송) • 그리스(어업함대. 에너지 효율성, 연료 집약도)
	23	• 과제명 : Recirculating Aquaculture Is Possible without Major Energy Tradeoff : Life Cycle Assessment of Warmwater Fish Farming in Sweden • 연구자(연도) : Bergman, et al.(2020) • 연구목적: 육상폐쇄형순환 양식시스템의 환경영향력 개선 가능성 검토	• LCA 평가 • 시나리오분석	• 양식장 투입/산출 분석 • 민감도(mass allocation 사용) 및 시나리오 분석 • 담수부영양화, 기후변화, 토지이용, 에너지 소모별 • 사료생산 환경영향력이 높음
GHG 정책	24	• 과제명 : 한국형 온실가스 배출권 거래제도 활성화를 위한 EU 및 일본 사례 비교 연구 • 연구자(연도) : 이정은·조용성·이수철(2015) • 연구목적 : 한국의 배출권 거래 • 제도 설계 시 시장구조에서의 정책적 함의를 도출	• 문헌조사 • 법제도 분석	• 유럽형 배출권 거래제도(EU-ETS)와 일본의 통합형 배출권 거래제도(JVETS) 분석, 거래 현황 및 관련 정책을 분석함 • EU는 국가별 할당량 및 경매 비율, 감독·보고·검증(MRV) 절차에 있어 개선이 필요함

구분	선행연구 검토		
	연구 목적	연구 방법	주요 연구 내용
			- 일본에서는 산업계의 반발로 국가 차원의 배출권 거래제도가 도입되지 못함 - 한국의 거래제도는 상쇄배출권을 배출권 거래제와 연계시키는 방향으로 설계해야 함
25	- 과제명 : Improving feed conversion ratio and its impact on reducing greenhouse gas emissions in aquaculture - 연구자(연도) : Hasan (2017) - 연구목적 : 양식업의 온실가스 발생량 저감을 위한 방안으로서 사료효율 개선을 제안	- 문헌조사 - 전문가 세미나 - 통계분석	- FAO는 양식업 탄소 발자국을 줄이기 위해 FCR 저감 및 기술개발에 대한 전문가 세미나를 개최함 - 양식업의 GHG 기여도 평가 및 측정 방법, FCR 저감을 위한 국제 공동 조치, 연어양식의 사료효율 개선 사례 확산 등에 대해 논의됨 - 논의내용을 바탕으로 장기적인 해결 방안을 모색함
26	- 과제명 : 기후변화에 따른 수산분야의 온실가스 감축 방안 - 연구자(연도) : 김은주 (2019) - 연구목적 : 기후변화 및 국제 규범 강화 대응을 위한 수산 부문 대응 전략 마련	- 문헌조사 - 통계 분석 - 국제기구 및 해외 정책 분석 - 법제도 분석	- IPCC, FAO, UN 등 국제기구의 온실가스 감축 관련 논의 진행 - 국가별(EU, 영국, 일본, 호주, 미국, 한국) 온실가스 저감 목표, 온실가스 배출량, 정책 비교 - 해양신재생에너지 및 탄소흡수원 활용, 탄소 감축형 어구 개발, 해양 산성화 대비, 해양 보호구역 지정 등 대응 방안 제시
27	과제명 : Rapid growth in greenhouse gas emissions from the	- 문헌조사 - 통계분석	중국은 농지를 양식장으로 전환하는 방식으로 양식업 규모화를 추진함

구분	선행연구 검토		
	연구 목적	연구 방법	주요 연구 내용
28	- adoption of industrial-scale aquaculture - 연구자(연도) : Yuan et al.(2019) - 연구목적 : 양식업의 규모화로 인한 온실가스 배출 증가량 분석을 통해 기후 변화 대응 마련	배출량 추정	- 양식업 규모화로 메탄(CH₄) 배출량이 증가되어 지구 온난화 지수를 증가시킴 - 에어레이션 시설이 갖춰진 양식장에서 배출량이 낮으므로, 농지를 양식장으로 전환 시 폭기 시설이 필요함
	- 과제명 : Low Greenhouse Gas Emissions from Oyster Aquaculture - 연구자(연도) : Ray et al.(2019) - 연구목적 : 굴 양식업의 온실가스배출량을 추정하여 축산업과 비교 분석	- 문헌조사 - 통계분석 - 배출량 추정	- 굴 양식에서 아산화질소, 이산화탄소가 소량 발생하고 메탄은 발생하지 않음 - 퇴적물에 의한 아산화탄소 발생은 양식장 운영 4~6년 사이 증가하지만 대조군과 유의미한 차이는 없음 - 육류 섭취량의 10%를 굴로 대체할 경우 온실가스 절감 효과는 자동차 1,080만대를 줄이는 효과와 같음
	- 과제명 : Quantifying greenhouse gas emissions from global aquaculture - 연구자(연도) : MacLeod et al.(2020) - 연구목적 : 주요 품목별 온실가스 배출량을 분석하고 배출 저감 방안 제시	- 문헌조사 - 통계분석 - 배출량 추정	- 양식업, 어로어업, 양계, 양돈, 육우 등 1차 산업의 온실가스 배출량을 분석하였으며, 양식 및 어로어업의 배출량은 축산업 대비 낮은 수준임 - 양식업은 전체 인위적 온실가스 발생량의 0.49%를 차지하였으며, 패류 대비 어류의 발생량 비중이 높음 - 양식업에서 온실가스 배출량을 저감 하기 위해 사료 효율을 높여 사료로 인한 배출을 줄여야 함

구분	선행연구 검토		
	연구 목적	연구 방법	주요 연구 내용
			수산 동물 양식의 배출량은 추정하였으나 해조류의 배출량은 산정하지 못하는 한계점을 가짐
30	- 과제명 : 국제사회의 탄소중립 정책 방향과 시사점 - 연구자(연도) : 박영석 외(2021) - 연구목적 : 국제사회의 기후변화 정책과 탄소중립 정책 방향을 파악하고, 우리나라의 기후변화 정책과 탄소중립 추진 방향에 대한 시사점 도출	- 문헌조사 - 법제도 분석	- 주요국가는 기후변화 관련 정책 수립을 위해 체계적인 연구 지원을 하고 있음. 기후변화 정책은 탄소중립 등 포괄적 내용과 함께 기후변화로 인한 생태적·경제적 영향을 반영하여 설계함 - 탄소중립 이행에 있어 기후변화 정책의 핵심은 과학적 근거를 고려한 시장기반의 정책이라는 것과 저탄소 기술 혁신을 위한 제도적 지원임
31	- 과제명 : 탄소중립시대의 국제질서 변화와 우리의 대응 - 연구자 : 장우석 외(2021) - 연구목적 : 탄소중립 시대를 맞이하여 경제·사회 변화를 분석하고, 대응책 마련을 위함	문헌조사	- 탄소중립시대의 국제질서 변화 - 주요 선진국은 포괄적·선제적 대응 체계 구축, 글로벌 선도기업은 지속가능한 경영전략 적극 추진 - 한국의 대응과 도전과제 - 한국의 현황과 대응방안, 7대 전략 제안
32	과제명 : Climate Change Effects on Aquaculture Production: Sustainability Implications, Mitigation, and Adaptations	- 문헌조사 - 사례조사 - 정책분석	- 양식산업은 온실가스를 배출하는 축산업을 대체하는 지속 가능한 단백질 공급원으로서 기후변화 대응책 - 기후변화로 인한 기온

구분	선행연구 검토		
	연구 목적	연구 방법	주요 연구 내용
	• 연구자(연도) : Maulu et al.(2021) • 연구목적 : 기후변화가 양식 산업에 미치는 잠재적 영향 분석		상승, 해수면 상승, 질병 및 적조, 강수량 변화, 해수 염도 변화 등으로 인해 영향을 받을 것으로 분석됨 • 단기적으로는 예측되는 변화에 대응하고, 장기적으로는 기후변화 완화 조치를 취해야 양식업이 지속가능할 수 있음

기본연구보고서 발간목록

Ⅰ 2022년

01	선박투자 가치평가 및 위험관리 모형 연구	박성화
02	항만 컨테이너 반출입 예약시스템 가격결정 모형 연구	서정용
03	연안재해 대응을 위한 그린인프라 구축방안 연구	정지호
04	탄소중립이 해양수산업에 미치는 경제적 영향분석 연구	권장한
05	수산물 안전성 관리체계 개선방안 연구	조현주
06	준해양사고 통보제도 개선방안 연구	박상원
07	MZ세대 소비트렌드를 반영한 해양관광 추진방안 연구	최일선
08	연근해 어종별 어획쿼터제도 도입방안 연구	심성현
09	행위자기반 해양공간계획 시뮬레이션 개발 연구	조성진
10	항만분야 탄소중립 관리체계 개선방안 연구	안승현
11	탄소중립 시대 양식산업 대응전략 연구 - 육상 어류양식을 중심으로 -	마창모
12	수산물식품산업의 탄소중립 대응방안 연구 - 가공업을 중심으로 -	김지연
13	해양환경보전정책 도입방안 연구	박수진
14	포스트 코로나 시대의 컨테이너 해운산업 대응방안 연구 - 디지털 플랫폼을 중심으로 -	최건우
15	항만분야 공공갈등 관리방안 연구	김세원
16	글로벌 가치사슬 변화와 국제물류 분야 대응방안 연구 - 전기자동차 산업을 중심으로 -	권보배
17	항만개발제도 개선방안 연구	이수영
18	클러스터 혁신을 통한 선박관리업 발전방안 연구	허성례
19	수입수산물 예방적 관리체계 도입방안 연구 - IUU 수산물을 중심으로 -	안지은
20	양식수산물 유통 빅데이터 구축방안 연구	이기영
21	글로벌 혁신성장을 위한 신남방·신북방 정책 연구 - 신남방 지역 ICT산업 가치사슬 변화에 따른 물류 공급사슬 대응방안	최나영환

2021년

01	시민참여형 해안돌봄 정책 도입방안 연구	정치호
02	해양 플라스틱 쓰레기가 선박 운항에 미치는 영향분석 연구	김보람
03	여성어업인 노동정책 방향 연구	홍혜수
04	순환경제 시스템을 활용한 어업폐기물의 자원화 방안 연구	고동훈
05	1conomy 시대, HMR 시장 확대에 따른 수산부문 대응전략 수립 연구	마창모
06	AIS 데이터 기반 해상교통 안전 평가모델 개발 연구	황선일
07	항만 에너지 관리시스템 도입을 위한 로드맵 구축 연구 - 부산항 신항 전기에너지 소비를 중심으로 -	김근섭
08	해양분야 리빙랩 활성화 방안 연구	좌미라
09	빅데이터의 연계·활용을 통한 선박의 배출량 산정체계 고도화 방안 연구	안용성
10	해양공간계획 집행체계 고도화 방안 연구	최희정
11	수산식품산업 푸드테크 환경분석 및 적용전략 연구	이상건
12	AIS데이터기반 해상물동량 추정 연구	황수진
13	항만부문 정책의사결정 지원 빅데이터 플랫폼 구축 방안 연구	이기열
14	항만 컨테이너 물류 프로세스 디지털화 모형 연구	서정용
15	해양수산 분야 국제산업연관표 구축기반 연구	정수빈
16	해양수산 과학기술 정책평가모형 연구 - 해양수산 R&D를 중심으로 -	전형모
17	글로벌 경제위기와 해운산업 대응체계 연구	박성화
18	항만산업 경기진단체계 구축 연구 - 경기동행지수 개발을 중심으로 -	김성아
19	전국 무역항 부두 분류 체계 개선방안 연구	이수영
20	IMO 규제기반 해사산업의 글로벌 지속발전방안 연구 - 新해사산업의 육성 및 지원을 위한 법제화 연구(5차년도) -	박한선
21	수소에너지 거점 구축을 위한 항만의 대응방안 연구	신수용

수시연구보고서 발간목록

Ⅰ 2022년

01	항만의 탄소중립 이행·관리 표준안 연구	안용성
02	매립지 소유권 분리 제도화의 이해관계 분석과 관리방안	윤성순
03	글로벌 공급망 리스크별 영향분석 및 대응방안 연구 - 에너지·곡물을 중심으로	조지성
04	대북제재 강화와 코로나 팬데믹 이후 북한 해양수산 이슈와 대응 방안	윤인주
05	남극환경보호의정서 제6부속서의 국내 이행을 위한 법제 정비방안 연구	박예나
06	해양바이오산업 활성화를 위한 해양수산생명자원 법령 정비 방안 연구	좌미라
07	우리나라 수산종자 관리체계 개선방안 연구	조현주
08	2050 신해양강국 미래비전 수립 연구	김민수

Ⅰ 2021년

01	해양환경산업 육성 방안 연구	한기원
02	선원의 인권 및 근로여건 향상을 위한 선원근로감독관 제도 개선 방안 연구	허성례
03	포스트 코로나 시대를 대비하는 지역 해양축제 활성화 연구	최일선
04	회복탄력성 개념을 적용한 항만 위기관리 시스템 구축 연구	김성기
05	중대재해처벌법 시행에 따른 항만에서의 대응방안 연구	최상균
06	크루즈산업 COVID-19 방역체계 구축방안 연구	황진희
07	한국형 선주사의 최적 운영방안 연구	고병욱
08	어촌형 생활서비스 전달체계 개선 연구	이호림
09	원양산업의 ESG 도입 기초 연구	윤미경
10	수상레저활동 관리체계 개선방안 연구	홍장원
11	연안지역 자연성 회복을 위한 정책 방향_간척지·담수호 중심으로	정지호
12	스마트항만 구축에 따른 탄소저감 효과 연구 - 동력전환을 중심으로 -	김가현

일반연구보고서 발간목록

Ⅰ 2022년

01	건화물선 시장 비용분석을 통한 해운시장 위험관리지표체계 구축	류희영
02	해상운임 예측모형 고도화 연구(Ⅰ)	황수진
03	IMO 시장기반조치 도입이 국내 해운기업에 미치는 영향	김한나
04	연안지역발전지수(CoDI) 개발 연구	황재희
05	CGE 기반 국제통상환경 변화의 해양수산부문 파급효과 분석	임병호
06	글로벌 수산부문 이미징 이슈 분석 모델 개발 연구	한기욱
07	양식 수산물 중장기 수급전망모형 구축 연구 - 굴을 중심으로 -	김철현
08	Network DEA를 이용한 물류기업 경쟁력 비교 분석 연구	황선일
09	해양수산 사업체 성과 및 효율성 분석 연구	김주현
10	베이지안 방법을 이용한 양식 명계 단수 추정방안 연구	천성훈
11	수입수산물과 국산 간의 대체관계 분석 연구 - 활·신선냉장품을 중심으로 -	박혜진
12	국내 컨테이너 해운기업의 디지털 전환 활성화 방안 연구	전서연
13	비컨테이너 항만물동량 예측모형 고도화 방안 연구(Ⅰ) - 자동차, 석탄, 고철, 시멘트를 중심으로 -	최석우
14	동중국해 해양경계획정 방안 기초 연구	박영길
15	해양수산 분야 미래 리스크 발굴 및 파급효과 분석 연구(Ⅱ)	김찬호
16	항만개발사업의 정책효과 적용방안 연구	이종필
17	국가 해양전략 기본구상 연구	정현욱
18	선박대기시간 예측모형 개발을 위한 방법론 연구	조아현
19	안전항만 구축을 위한 비용 산정 및 지원체계 마련을 위한 연구	최상균

Ⅰ 2021년

01	해양수산 정책영향평가를 위한 기초 연구	김주현
02	해양교육의 사회·경제적 가치 평가 연구	이슬기
03	해양수산업 경기진단체계 기초연구 - 해운업을 중심으로 -	권장한
04	선박 기술진보를 고려한 탄소 배출량 추정 연구	최건우
05	서포트벡터머신(SVM) 기법을 활용한 해운시황 예측 연구	김병주
06	크루즈 여객 수요 전망 모형 구축 연구	안승현
07	디지털 공급사슬 물류정보통합 구축전략 연구(Ⅲ)	서정용
08	수출용 전복의 유통경로 분석 연구	이정필
09	인공지능기반 해상운임 예측 연구(3차년도)	황수진
10	인공신경망모형을 이용한 양식수산물 단수 전망에 관한 연구 - 김 양식을 중심으로 -	천성훈
11	해양수산분야 미래 리스크 발굴 및 파급효과 분석 연구	박광서

기본연구 2022-11

탄소중립 시대 양식산업 대응전략 연구 - 육상 어류양식을 중심으로 -

인쇄 2022년 12월 29일

발행 2022년 12월 31일

발행인 김 종 덕

발행처 한국해양수산개발원

주 소 49111 부산시 영도구 해양로 301번길 26(동삼동)

연락처 051-797-4800 (FAX 051-797-4810)

등록 1984년 8월 6일 제313-1984-1호

조판·인쇄 디자인글꼴 (051-636-1210)

판매 및 보급: 정부간행물판매센터 Tel: 02-394-0337

정가 15,000원

