
한반도 동해안 해안선 변화 조사 분석

Spatio-temporal Analysis of Korean East Coastline

임종서 · 김찬웅



한국해양수산개발원
KOREA MARITIME INSTITUTE

저자	임종서, 김찬웅
내부연구진	연구책임자 임종서 한국해양수산개발원 해양연구본부 전문연구원 공동연구원 김찬웅 한국해양수산개발원 해양연구본부 전문연구원

연구기간	2022. 3. 2. ~ 2022. 12. 31.
------	-----------------------------

보고서 집필내역

연구책임자	임종서 제1장, 제2장, 제3장, 제4장
내부연구진	김찬웅 제2장제2절의2, 제3장제1절의2, 제3장제2절의2, 제3장제2절의3

목차

01

서론_1

제1절 연구배경 및 목적	1
1. 연구의 필요성	1
2. 연구 목적	5
제2절 선행연구 검토 및 선행연구와 차별성	6
제3절 연구범위 및 추진전략	9
1. 연구의 범위	9
2. 연구 내용 및 추진전략	12

02

원격탐사자료 수집, 전처리 및 해안선 조사 방법_15

제1절 원격탐사자료 수집	15
1. LANDSAT 장기 위성영상	15
2. 고해상도 위성영상	17
제2절 자료 전처리 및 시기별 해안선 조사	19
1. 위성영상 전처리	19
2. 해안선 조사 방법론 설정 및 적용	21
제3절 해안선 변화 및 자료유형별 차이 분석	25
1. 시·공간적 변화 분석	25
2. 원격탐사 자료 유형별 비교분석	28

03

한반도 동해안의 시·공간적 해안선 변화 분석_29

제1절 전체 연안지역의 해안선 변화 분석	29
1. 권역별 해안선 길이 변화	29
2. 권역별 해안선 위치 변화	40
제2절 주요 연안지역의 해안선 변화 분석	49
1. 단위 해빈 및 정선별 해안선 길이 변화	49

2. 단위 해빈 및 정선별 해안선 위치 변화	52
3. 원격탐사 자료 유형별 해안선 비교분석	55

04 요약 및 결론_63

제1절 연구결과 요약	63
제2절 결론 및 제언	65

참고문헌_69

표 목차

〈표 1-1〉 우리나라 연안지역의 침식우심을 변화	2
〈표 2-1〉 연구에 활용한 LANDSAT 위성영상 목록	16
〈표 2-2〉 연구에 활용한 고해상도 위성영상 목록	18
〈표 2-3〉 북한 주요 연안지역에 대한 해안선 분석 자료 및 정점 수	28
〈표 3-1〉 한반도 동해안의 권역별 해안선 길이 변화-1	30
〈표 3-2〉 한반도 동해안의 권역별 해안선 길이 변화-2	31
〈표 3-3〉 동해안 전체 해안선 위치 변화	40
〈표 3-4〉 라선특별시 해안선 위치 변화	41
〈표 3-5〉 함경북도 해안선 위치 변화	42
〈표 3-6〉 함경남도 해안선 위치 변화	43
〈표 3-7〉 강원도(북한) 해안선 위치 변화	44
〈표 3-8〉 강원도(남한) 해안선 위치 변화	45
〈표 3-9〉 경북 해안선 위치 변화	46
〈표 3-10〉 울산광역시 해안선 위치 변화	47
〈표 3-11〉 부산광역시 해안선 위치 변화	48
〈표 3-12〉 북한 주요 연안지역의 해안선 길이 변화	49
〈표 3-13〉 나진시 연안지역의 해안선 위치 변화	52
〈표 3-14〉 선봉시 연안지역의 해안선 위치 변화	53
〈표 3-15〉 신포시 연안지역의 해안선 위치 변화	54
〈표 3-16〉 문천시 연안지역의 해안선 위치 변화	54
〈표 3-17〉 원산시 연안지역의 해안선 위치 변화	55
〈표 3-18〉 원격탐사 자료 유형별 해안선 길이 조사 결과	56
〈표 3-19〉 나진시 연안지역의 원격탐사 유형별(Landsat, 고해상도) 해안선 위치 차이 ·	59
〈표 3-20〉 선봉시 연안지역의 원격탐사 유형별(Landsat, 고해상도) 해안선 위치 차이 ·	60
〈표 3-21〉 신포시 연안지역의 원격탐사 유형별(Landsat, 고해상도) 해안선 위치 차이 ·	60
〈표 3-22〉 문천시 연안지역의 원격탐사 유형별(Landsat, 고해상도) 해안선 위치 차이 ·	61
〈표 3-23〉 원산시 연안지역의 원격탐사 유형별(Landsat, 고해상도) 해안선 위치 차이 ·	62

그림 목차

〈그림 1-1〉 단파적외선 원격탐사자료를 활용한 해안선 위치 탐지 연구 사례	4
〈그림 1-2〉 LANDSAT 위성영상 기반의 해안선 조사 및 보정결과 비교	7
〈그림 1-3〉 장기 해안선 변화 조사·분석 범위	9
〈그림 1-4〉 고해상도 위성영상 기반 해안선 조사·분석 범위	10
〈그림 1-5〉 연구 수행체계	13
〈그림 2-1〉 지표피복에 따른 LANDSAT 파장대역별 반사도와 주요 해안선 조사 알고리즘	22
〈그림 2-2〉 연안지역의 주요 지표피복 유형별 MNDWI 값의 확률밀도함수(예)	23
〈그림 2-3〉 DSAS를 이용한 해안선 위치 변화 조사 방법	27
〈그림 3-1〉 라선특별시 해안선의 시계열 변화(진할수록 최근 해안선)	32
〈그림 3-2〉 함경북도 해안선의 시계열 변화(진할수록 최근 해안선)	33
〈그림 3-3〉 함경남도 해안선의 시계열 변화(진할수록 최근 해안선)	35
〈그림 3-4〉 강원도(북한) 해안선의 시계열 변화(진할수록 최근 해안선)	36
〈그림 3-5〉 강원도(남한) 해안선의 시계열 변화(진할수록 최근 해안선)	37
〈그림 3-6〉 경상북도 해안선의 시계열 변화(진할수록 최근 해안선)	38
〈그림 3-7〉 울산 및 부산광역시 해안선의 시계열 변화(진할수록 최근 해안선)	39
〈그림 3-8〉 북한 주요 연안지역 해안선의 시계열 변화(진할수록 최근 해안선)	51
〈그림 3-9〉 북한 주요 연안지역의 원격탐사자료 유형별 해안선 조사 결과 비교 LANDSAT(회색), 고해상도위성영상(흑색) A) 나진, B)선봉, C)문천, D)신포, E)원산	58

01

서론

제1절 연구배경 및 목적

1. 연구의 필요성

최근 폭서와 집중호우, 한파 등 우리가 경험적으로 습득하였거나 중장기 관측자료를 통해 파악한 일반적인 기상 및 기후현상의 범위를 벗어난, 이상기상 또는 극한기후 현상의 발생이 빈발하고 있다. 예상치 못한 기상·기후현상 발생 빈도가 증가함에 따라 이를 대표할 수 있는 기후변화를 주제로 한 분석, 예측 및 대응 관련 연구의 필요성 또한 재조명되고 있다. 해양 분야에서는 우리나라의 해수면이 지난 30년 간 평균적으로 9cm 이상 상승한 것으로 조사되었고 상승속도 또한 점차 빨라진 것으로 보고되었다¹⁾. 고해상도 예측모델을 활용한 국내연구는 2100년의 우리나라 주변해역 평균 해수면은 현재보다 73cm 높아질 것으로 예측하기도 하였다.²⁾

특히 한반도에 접근하는 태풍의 연간 최대 강도 또한 과거 대비 크게 증가함에 따라,³⁾ 이에 동반되는 폭풍해일고 변화를 고려할 경우 실제 연안지

1) 해양수산부 보도자료, “우리나라 해수면 지난 30년 동안 평균 9.1cm 높아져”(검색일자: 2022.12.7.)

2) 해양수산부 보도자료, “2100년, 우리나라 주변 해역 해수면 73cm 높아질 수도”(검색일자: 2022.12.7.)

역에서 체감하는 해수면의 변화와 연안침식 및 침수 피해의 수준은 더욱 심각할 수 있다. 실제로 우리나라 주요 연안지역을 대상으로 한 연안침식 실태조사 결과, 침식등급이 우려 및 심각으로 분류된 연안지역의 비율을 의미하는 침식우심률이 2017년 약 55% 대비 2020년 약 62%로 점차 증가하였으며, 2021년에는 약 43%로 감소하였으나 두 시점 간의 경향성 변화는 실태조사 대상지역을 기존 250개소에서 360개소로 확대한 것을 감안할 필요가 있다.⁴⁾

〈표 1-1〉 우리나라 연안지역의 침식우심률 변화

연도	침식우심률(%)	조사 대상지역 수
2017	55.2	250
2018	59.6	250
2019	61.2	250
2020	62.4	250
2021	43.1	360

자료: 해양수산부 사전정보공표, “2017년도 연안침식 모니터링 결과”; “2018년도 연안침식 실태조사 결과”; “2019년도 연안침식 실태조사 결과”; “2019년도 연안침식 실태조사 결과”; “2020년도 연안침식 실태조사 결과”; “2021년도 연안침식 실태조사 결과”

상기한 바와 같이 장기적으로 우리나라 연안지역은 해수면 상승 및 이에 따른 토지 유실, 침수 등 다양한 유형의 피해가 발생할 우려가 있다. 그러나 과거부터 가까운 미래까지의 해수면 변화 및 이와 연관된 연안지역의 지형변화의 조사에 활용할 수 있는 자료가 부족하여 시공간적 변동을 파악하는 데 제약이 존재한다. 구체적으로 우리나라가 장기적인 연안지역의 해수면 변화를 파악하는데 활용하는 자료는 전국 21개소의 조위관측소 조사 자료에 국한하며, 해안선 등 지형변화 관련 분석에는 2000년대 이후에 도입한 전국 250개소(또는 360개소)를 대상 정선 관측자료(연안침식 실태조사;

3) 문일주(2022), p. 66.

4) 해양수산부 사전정보공표, “2017년도 연안침식 모니터링 결과”; “2018년도 연안침식 실태조사 결과”; “2019년도 연안침식 실태조사 결과”; “2019년도 연안침식 실태조사 결과”; “2020년도 연안침식 실태조사 결과”; “2021년도 연안침식 실태조사 결과”(검색일자: 2022.12.7.)

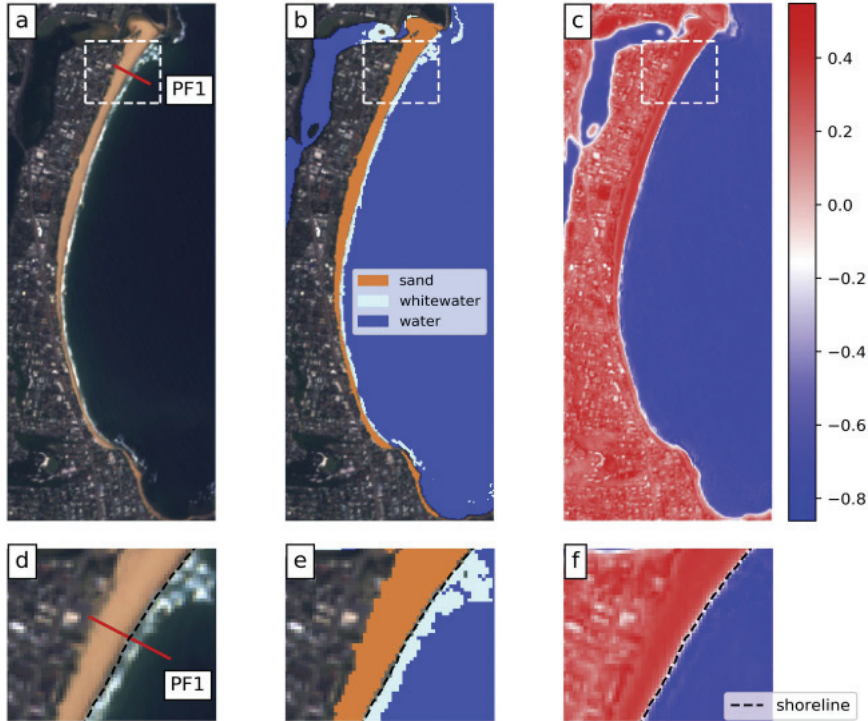
구 연안침식 모니터링)와 2014년에 제작한 뒤 5년 주기 정밀조사를 통해 갱신하고 있는 전국 해안선 조사 자료만을 활용한다. 이 때문에 조위관측소 인근을 제외한 대부분의 연안지역은 해수면 변화에 따른 해안선의 장기적인 공간적 위상 변화를 파악하는데 어려움이 있다. 특히 동해안의 경우 도서지역인 울릉도를 제외하면 장기 관측자료가 존재하는 조위관측소가 4개소⁵⁾에 불과하여 전술한 제약이 상대적으로 더 크다. 또한 동해안에서 해안선의 길이가 더 긴 북한의 연안지역은 관측자료가 존재하지 않거나 습득하기 어려워 한반도 동해안 전역을 공간적 범위로 할 경우 해안선 변화에 대한 정보는 크게 부족한 실정이다.

한편, LANDSAT으로 대표할 수 있는 공간해상도 30m 내외 중해상도 위성영상의 운용기간이 약 50년에 이르면서 육상과 해양의 다양한 분야에서 이를 활용한 중·장기 시계열 조사 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 1982년에 발사된 LANDSAT 4호부터 장착한 TM(Thematic Mapper) 센서의 경우 분광대역의 범위를 단파적외선과 중적외선 및 열적외선까지 확장하여 원격탐사 분야의 활용성을 크게 개선하였다. 이 가운데 단파적외선은 수분에 민감하게 반응하는 파장대역으로 해안선의 위치를 탐지하거나 시계열 변화를 파악하는 연구에 활발히 활용된다.⁶⁾ 구체적으로 연안지역을 촬영한 위성영상에서 사람의 눈으로 볼 수 있는 가시광선 파장대역은 파도의 영향으로 인해 해안선의 위치를 파악하는데 어려움이 있지만, 단파적외선 파장대역에서는 파도가 부서지는 구역과 잔잔한 수면의 반사값에 큰 차이가 없어 연속적으로 나타나기 때문에 비교적 용이하게 해안선을 파악할 수 있다(그림 1-1).

5) 속초 조위관측소(강원도 속초시 동명동 소재; 1973년 12월 1일 관측 시작)
 묵호 조위관측소(강원도 동해시 묵호진동 소재; 1965년 2월 1일 관측 시작)
 포항 조위관측소(경상북도 포항시 북구 항구동 소재; 1971년 5월 1일 관측 시작)
 울산 조위관측소(울산광역시 남구 매암동 소재; 1962년 9월 1일 관측 시작)

6) Xu(2006), p. 3027.

〈그림 1-1〉 단파적외선 원격탐사자료를 활용한 해안선 위치 탐지 연구 사례



자료: Vos et al., 2019. p. 4.

위성영상을 활용한 해안선 조사는 넓은 범위의 연안지역에서 효율적으로 연속적인 조사 결과를 수집할 수 있다는 장점이 있지만, 조석주기와 운량, 결빙 등 환경조건을 통제하기 어렵고 정지궤도 위성을 제외한 대부분의 저궤도 위성은 한 지역을 지속적으로 촬영하지 않고 일정 주기마다 재방문한다. 이러한 제약들로 인해 위성영상을 이용할 경우 관계 법령에 따른 엄밀한 의미의 해안선⁷⁾을 조사하는 데에 어려움이 있다.⁸⁾

7) 「측량·수로조사 및 지적에 관한 법률」 제6조 제4호는 “해수면이 약최고조면(略最高潮面: 일정 기간 조석을 관측하여 분석한 결과 가장 높은 해수면)에 이르렀을 때의 육지와 해수면과의 경계”를 해안선으로 정의한다.

8) Almonacid-Caballer et al.(2016), p. 86.

우리나라 동해안의 경우 서해안과 달리 조차가 크지 않아 조석주기에 따른 해안선의 위치 변화가 상대적으로 적고 해수의 결빙도 거의 발생하지 않아 위성영상을 이용한 장기 해안선 변화에 상대적으로 좋은 조건에 해당한다. 또한 동해안은 해안선의 굴곡이 비교적 완만하기 때문에 항만개발 등에 따른 인공해안선 조성 시 해안선의 길이가 길어지고 해안선의 위치 또한 전면부로 이동하는 특성이 두드러지게 나타난다. 따라서 위성영상을 이용하여 동해안 전역을 대상으로 해안선의 장기 시계열 변화 자료를 구축할 경우 연안침식 등 해안선 변화에 대한 논의에서 기후변화로 대표할 수 있는 자연환경의 변화와 인위적 개변에 따른 영향을 구분하는데 기여할 수 있다. 특히 오랜 기간 도시화의 영향을 크게 받은 휴전선 이남과 달리 북한 동해안은 연안지역의 개발압력이 비교적 적은 반면 지리·환경적 유사성은 높기 때문에 지역간 비교·대조에도 적합하다. 최근 북한에서도 원산시 등 주요지역을 중심으로 개발을 가속화함에 따라 연안지역의 간척 및 대규모 방파제 구축 등 인위적 개변이 이루어지고 있다는 점 또한 주목할 점이다.

2. 연구 목적

상기한 연구의 필요성을 토대로 이 연구는 위성영상을 활용하여 한반도 동해안 전역을 대상으로 해안선의 공간적 위상에 대한 장기 시계열 변화를 파악하는 것을 목적으로 한다. 구체적으로 이 연구를 통해 (i)LANDSAT 위성영상을 이용하여 한반도 동해안 전역에 대한 5년 주기의 해안선 공간자료를 제작하고, (ii)시기별 해안선의 변화량을 권역별로 조사하여 해안선의 시·공간적 변화를 분석하였다. 또한, (iii)주요 연안지역을 대상으로 고해상도 위성영상을 이용하여 해안선 공간자료를 제작한 뒤 원격탐사자료의 종류에 따른 해안선 분석 결과를 비교·대조하였다.

제2절 선행연구 검토 및 선행연구와 차별성

서로 다른 시점에 촬영한 두 개 이상의 LANDSAT 위성영상을 활용하여 육상과 수역을 구분하는 연안지역의 경계선을 파악하고, 이를 토대로 연안 경계선의 시공간적 변화의 파악을 시도한 초기의 연구는 Alesheikh, Ghorbanali & Nouri(2007)이다. 전술한 연구는 중동지역에 위치한 우르미아(Urmia) 호수를 대상으로 LANDSAT 위성영상을 통해 1989년부터 2001년까지 호수위 하강에 따른 호수 경계선의 위치 변화를 추적하였다. 그 외에도 위치와 규모가 상이한 다양한 지역들을 대상으로 여러 연구자가 위성영상을 활용한 해안선 변화 조사 연구를 수행하였으며, 30년 이상의 장기 시계열 변화를 다룬 대표적인 사례는 Xu(2018)와 Wang et al.(2017) 등이 있다. 이 가운데 Xu(2018)은 미국 텍사스주 연안지역을 대상으로 LANDSAT 위성영상을 이용하여 1986년부터 2015년까지 해안선의 시기별 위치를 조사하고 시공간적 변화를 분석하였으며, Wang et al.(2018)은 동중국해 연안에 위치한 중국 저장성(浙江省) 동부 Ningbo(寧波) 지역에서 1976년부터 2015년까지 발생한 해안선 변화를 다루었다.

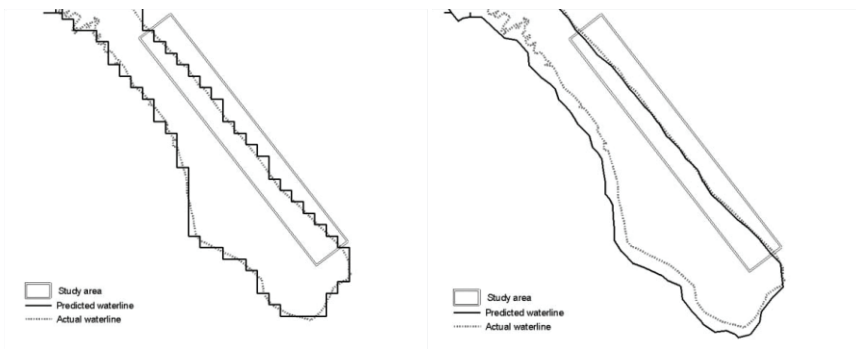
상기한 연구를 포함하여 지금까지 누적된, 위성영상을 활용하여 해안선 변화를 분석한 사례들은 방법론적 측면에서 원격탐사 기반의 해안선 장기 시계열 변화 분석의 장·단점에 대해 논의한 바 있다. 해수면 변화에 대해 충분한 수준의 신뢰도를 갖춘 현장조사 자료를 확보하기 어려운 현실을 감안할 때,⁹⁾ 원격탐사기법을 통해 수집한 영상자료는 현장조사를 통해 수집하기 어려운 광범위한 시공간 규모의 정보를 제공할 수 있다는 것이 큰 장점으로 거론된다.¹⁰⁾ 동시에 원격탐사 기반 해안선 조사는 지구 표면으로부터 반사 및 방사되는 전자기파를 측정하여 그 형질을 파악하는 방법론적

9) Turner et al.(2016), p. 2.

10) Splinter, Mitchell & Turner(2018), pp. 2-3.

특성상 전자기파를 수신 및 처리하는 과정과, 영상자료를 지표상의 지형지물과 정합하는 기하보정(geometric calibration) 과정에 각각 일정 수준의 불확도가 존재한다.¹¹⁾ 그 외에도 위성영상 기반의 장기 해안선 변화 분석은 가용한 영상자료에 절충이 존재한다는 단점이 있다. 대표적으로, LANDSAT 영상은 시간적 범위와 분광해상도 및 자료 수집의 용이성은 뛰어나지만 공간해상도가 30m 수준에 불과하여 지형지물을 상세히 구분하기에는 다소 부족함이 있다. 한편, 공간해상도가 상대적으로 좋은 SPOT, IKONOS, QuickBird, WorldView, KOMPSAT 등의 영상은 시간적 범위와 분광해상도 및 자료 수집의 용이성 측면에서 단점이 있다. 위성영상 유형별 절충사항 가운데 장기 시계열 분석에 있어서 가장 중요한 요소는 시간적 범위이며 해안선 탐지 결과의 정확도에 큰 영향을 주는 분광해상도, 특히 단파적외선 파장대역 영상의 가용 여부이다. 이 때문에 다수의 국내외 선행연구는 LANDSAT 영상을 주로 활용하였으며, 일부는 공간통계 및 이에 기반한 기계학습기법을 접목하여 위성영상 기반 해안선 조사 결과의 공간해상도 관련 제약을 저감할 수 있는 보정방법을 제안하였다.¹²⁾

〈그림 1-2〉 LANDSAT 위성영상 기반의 해안선 조사 및 보정결과 비교



자료: Foody, Muslim & Atkinson(2005), p. 5387-5389.

11) Markham & Helder(2012), pp. 38-39.

12) Pardo-Pascual et al.(2018), p. 3.

방법론적 측면에서 위성영상 등 원격탐사자료를 활용하여 장기적으로 해안선의 공간적 위상 변화를 분석한 연구가 상당량 축적된 것과 상이하게, 공간적 측면에서 볼 때 한반도는 원격탐사에 기반을 둔 해안선 변화 조사 연구가 주로 개별 해빈이나 지역 규모에서 이루어져 왔다. 대표적으로 Yang et al.(2010)은 부산 해운대 해빈을 대상으로 고해상도 항공영상을 이용하여 1947년부터 2005년까지 8개 시점의 해안선을 조사한 뒤 이를 비교분석하였다. 윤공현·송영선(2017)은 항공영상을 활용하여 2009년과 2016년 간의 해안선을 조사한 뒤 상호비교를 통해 변화량을 파악하였다. 비교적 넓은 공간적 범위에서는 김찬웅(2019)이 충청남도 태안군에 위치한 해빈 19개소를 대상으로 1967년부터 2016년까지 6개 시점의 항공사진을 활용하여 해안선 변화를 분석한 바 있다. 한반도 지역을 대상으로 거시적인 시공간 규모에서 수행한 대표적인 연구 사례는 임중서(2019)로, 황해에 접한 3개국 연안지역의 LANDSAT 위성영상을 활용하여 1980년대 초반부터 2010년대 후반까지 약 40년간의 해안선 변화를 분석하였다.

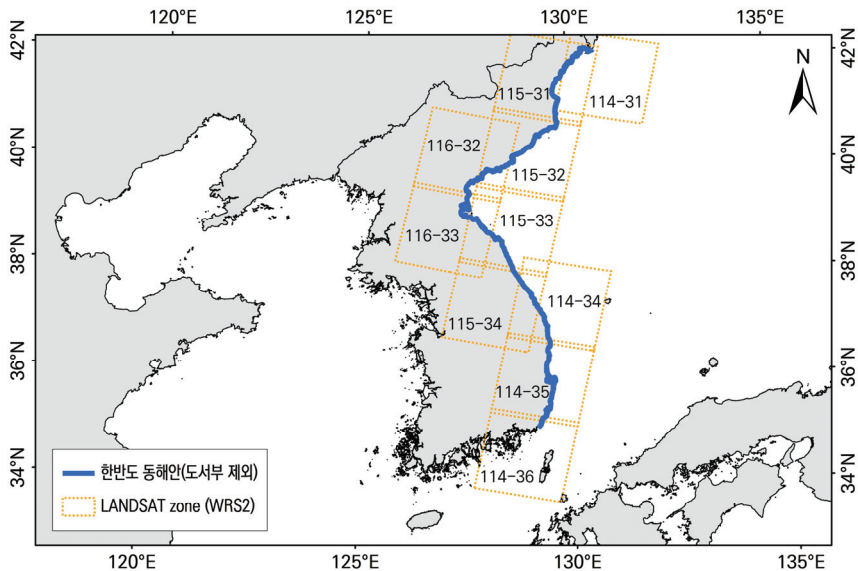
국내외 선행연구를 종합할 때, 원격탐사자료를 활용하여 장기적인 해안선의 공간적 위상 변화를 분석한 지역연구가 다수 수행되었으며 이 과정에서 연구결과의 활용성 증진을 위한 방법론인 개선도 이루어졌음을 확인할 수 있다. 특히 우리나라와 인접한 중국의 경우 다양한 시공간 규모에서 LANDSAT 위성영상을 활용한 해안선 변화 분석 연구가 활발히 이루어지고 있으나, 한반도의 경우 2000년대 이전의 해안선 자료를 찾기 어렵고 주기적으로 그 변화를 분석한 사례도 매우 제한적이다. 특히 남북한을 포괄한 한반도 동해안의 장기 해안선 변화 조사는 다양한 후속연구에 활용 가능한 기초자료를 구축하는데 기여할 수 있고, 지역간 비교를 통해 인위적 개변과 자연환경 조건의 영향을 구분하는 데 효과적일 것으로 기대된다. 또한 주요지역의 원격탐사자료 유형별 해안선 비교분석은 자료의 신뢰도 검증 및 활용방안 모색 시 주요 근거자료로 활용할 수 있을 것이다.

제3절 연구범위 및 추진전략

1. 연구의 범위

이 연구는 한반도 동해안에 대한 위성영상 기반의 시기별 해안선 조사와 이에 기반한 시·공간적 변화 분석에 초점을 맞춘다. 따라서 연구의 공간적 범위는 대동강 하구에 위치한 북한지역과 러시아 사이의 국경선부터 부산 중구에 위치한 해월정(달맞이고개 정상부 팔각정) 인근의 동해와 남해 간 경계부¹³⁾까지가 해당한다(그림 1-3).

〈그림 1-3〉 장기 해안선 변화 조사·분석 범위

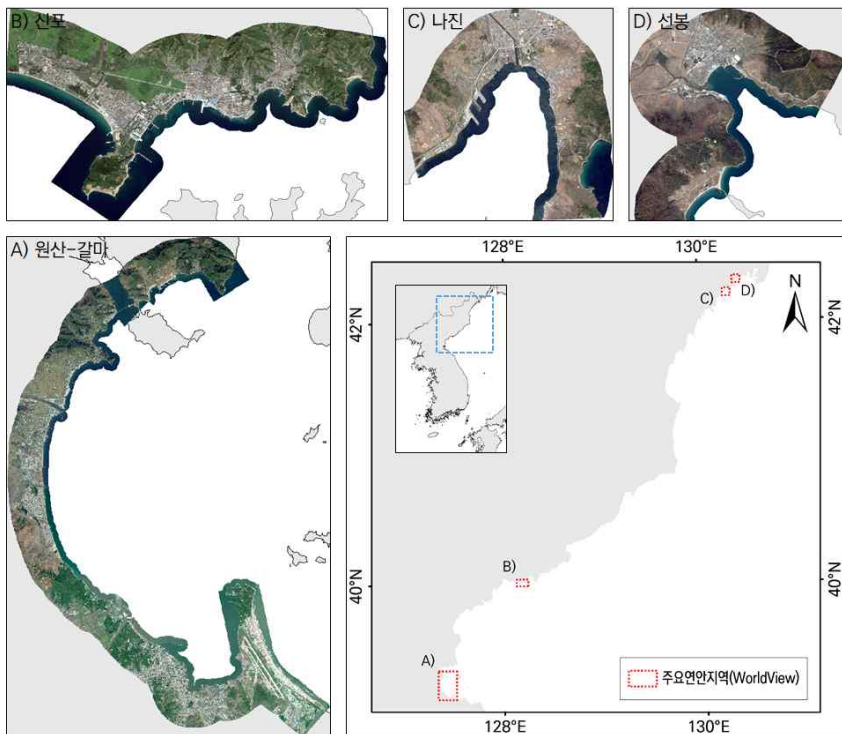


자료: 저자 작성

13) 국립해양조사원은 「국가해양기본조사를 통해 본 우리나라의 해양영토」에서 동해의 범위를 “두만강에서 부산시 달맞이 고개 정상에 위치한 팔각정(해월정)앞 동해바다를 조망하는 곳(35°09'24.66"N, 129°10'54.53"E)에서 135°로 그른 선의 북측해역까지”로 정하였다(국립해양조사원(2012), pp. 7-8).

원격탐사자료의 유형별 해안선 조사 결과를 비교·대조하기 위하여 나진, 선봉, 신포, 문천, 원산 등 북한 동해안에 위치한 주요 도시지역을 대상으로 고해상도 위성영상을 확보하였다(그림 1-4). 이는 원자료 유형에 따른 해안선 조사 결과의 정확도를 파악하기 위한 것으로, 구글어스(Google Earth)¹⁴⁾ 등을 이용한 사전조사를 거쳐 북한에 위치한 연안지역 가운데 시계열 변화에 따른 해안선의 공간적 위상에 비교적 큰 차이가 발생한 지역들을 선출한 심층 연구지역으로 선정하였다.

〈그림 1-4〉 고해상도 위성영상 기반 해안선 조사·분석 범위



자료: 저자 작성

14) 구글이 개발한 GIS 기반의 지도화 및 분석도구로, 무료로 고해상도 위성영상 등의 공간정보를 확인할 수 있으며, 다음의 링크를 통해 접속할 수 있다(<https://earth.google.com/>).

이 연구는 원격탐사자료의 활용에 기반을 둔 방법론적 특성상 시간적 범위의 설정은 수집할 수 있는 자료의 기간에 제약을 받는다. 이 연구에서 장기 해안선 변화 조사에 활용한 단파적외선 분광대역의 영상자료는 1982년 7월에 운영을 시작한 LANDSAT 4호가 처음 제공하였으므로, 연구의 시간적 범위는 1980년대 초반부터 2010년대 후반까지 약 40년으로 설정하였다. 한편 LANDSAT 위성의 재방문주기¹⁵⁾는 약 16일이며,¹⁶⁾ 연구지역인 한반도는 운량과 강우, 적설 및 결빙 등 계절변동과 관련된 환경적 요인으로 인해 해안선 조사에 적합한 위성영상을 취득하는데 제약이 있다. 이 때문에 LANDSAT 등 위성영상을 활용하여 넓은 공간범위의 해안선을 산출할 때에는 일정한 기간을 시간 단위로 설정한 뒤, 동일한 시간 단위 내에 촬영한 위성영상 중 대표성이 높은 영상을 집성(mosaic)하여 활용한다. 이 연구는 우선 공간범위에 포함되는 9개 LANDSAT 촬영구역(그림 1-3)을 대상으로 환경조건을 고려하여 가용한 위성영상들을 선별한 뒤, 모든 구역에서 1개 이상의 영상을 확보할 수 있는 시간 단위를 조사하였다. 이를 통해 적정 시간 단위를 5년으로 설정하였고, 8개 시점(1981~1985년, 1986~1990년, 1991~1995년, 1996~2000년, 2001~2005년, 2006~2010년, 2011~2015년, 2016~2020년)의 해안선을 산출 및 분석하였다. 원격탐사자료 유형별 결과물 심층 분석을 위한 OrbView-3, GeoEye 및 WorldView 영상은 상기한 네 개 지역을 대상으로 2004~2005년과 2000~2021년에 촬영한 위성영상을 수집 및 집성하여 해안선 분석에 활용하였다.

15) 인공위성이 특정 장소를 반복해서 조사할 수 있는 촬영주기를 의미

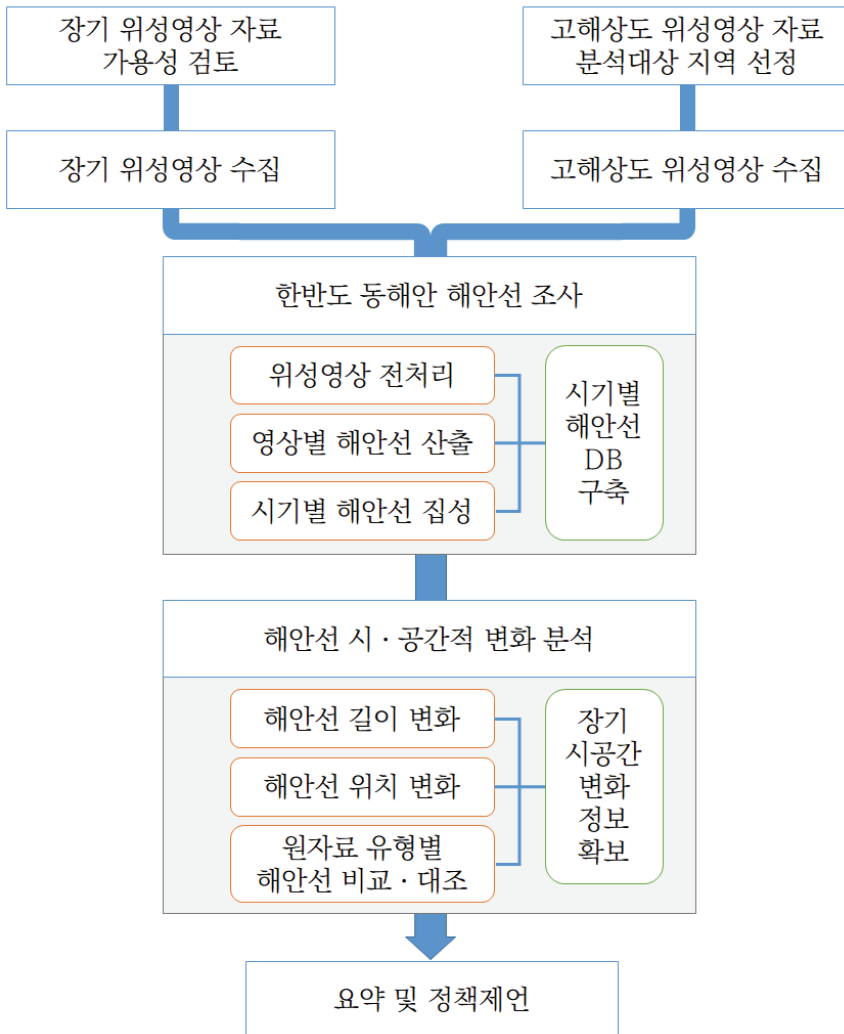
16) 미 항공우주국(NASA: National Aeronautics and Space Administration)은 당초 동일하거나 유사한 센서를 탑재한 두 개의 LANDSAT 위성을 병용하여 재방문주기를 8일로 단축하는 방안을 계획하였다. 그러나 LANDSAT 6호가 궤도 안착에 실패하였고, 원래 계획보다 앞당겨 발사 및 운용한 LANDSAT 7호 또한 2003년 4월부터 촬영각보정기(SLC: Scan Line Corrector) 고장으로 인해 영상에 결측값이 다수 발생하여 활용성이 크게 감소하였다. 결과적으로 2013년 2월까지의 LANDSAT5 영상만 활용할 수 있었으며, 2022년 현재는 LANDSAT8(2013년 운용 시작)와 LANDSAT9(2021년 운용 시작)의 영상을 병용하면 약 8일 주기의 조사자료를 활용할 수 있다.

2. 연구 내용 및 추진전략

앞 절에서 기술한 바와 같이 원격탐사 기반의 해안선 변화 분석은 가용 자료의 여부와 품질에 큰 영향을 받는다. 이 연구는 분광해상도, 공간해상도, 운용기간, 활용의 용이성 등 다양한 측면에서 장·단점을 지닌 위성영상 가운데 LANDSAT과 OrbView-3, GeoEye 및 WorldView를 선정하여 해안선의 장기 시계열변화 분석 및 원자료 유형에 따른 결과물 비교·대조를 수행하였다.

상기한 연구내용을 순서대로 구체화하면 다음과 같다. 제2장의 내용은 연구 수행의 첫 단계로, 가용한 위성영상을 수집한 뒤 시간 단위인 5년에 맞춰 해안선을 산출하는데 적합한 대표영상을 선별하였다. 다음으로 영상 자료의 화소값과 지리오차를 보정하는 전처리를 수행하였다. 이후 해수와 육지를 구분하는 지표피복분류를 통하여 영상별로 해안선을 산출하였다. 개별 영상에서 산출한 해안선은 시기별로 집성하여 한반도 동해안 전역의 시기별 해안선을 도출하였다. 제3장은 상기한 시기별 해안선을 대상으로 시계열에 따른 변화를 분석하였으며, 이 때 분석 대상은 (1)항만 등 연안지역의 개발과 관련성이 높은 해안선의 길이와 (2)연안지역의 자연적인 침퇴적 또는 인위적인 매립 등과 관련성이 높은 해안선의 위치로 설정하였다. 연안지역의 각 지점에서 발생한 해안선의 시·공간적 변화는 광역행정구역 단위로 요약하여 정리하였다. 이와 함께 (3)주요 연안지역을 대상으로 유사한 시기에 촬영한 원격탐사자료 유형별 해안선 조사 결과를 비교·대조하였다. 전술한 심층 연구를 통하여 위성영상 기반의 장기 해안선 조사 및 분석 결과의 활용성과 한계점을 검토하였다. 마지막으로 제4장은 전체 연구를 요약·정리하고, 선행연구와 비교할 때 이 연구를 통해 새롭게 파악한 점과 후속 연구를 통해 보완이 필요한 사항을 포함하여 기술·정책적 제언사항을 기술하였다.

〈그림 1-5〉 연구 수행체계



02

원격탐사자료 수집, 전처리 및 해안선 조사 방법

제1절 원격탐사자료 수집

1. LANDSAT 장기 위성영상

제1장에 기술한 바와 같이 이 연구는 한반도 동해안 전역을 대상으로 LANDSAT 영상에 기반한 약 5년 간격의 해안선 자료를 구축하여 최근 40년 간의 시·공간적 변화를 분석하는 것을 목적으로 한다. 전술한 목적을 달성하기 위하여 어스 익스플로러(EarthExplorer)¹⁷⁾를 통하여 연구 수행에 필요한 해안선 조사에 용이한 위성영상을 수집하였다.

영상 수집 시 전처리 과정을 단축하기 위하여 촬영구역별로 방사 및 대기보정이 완료된 Level2자료¹⁸⁾를 대상으로 영상 내 운량 조건을 20% 이하로 설정하여 검색하였다. 다음으로 운량과 파랑 등 세부조건을 목시비교하여 시간 단위(5년)별로 대표영상을 1매씩 선정하였다.

17) USGS(United States Geological Survey; 미국 내무부 산하 지질조사국) 내 EROS(Earth Resources Observation and Science Center; 지구자원 관찰 및 과학센터)가 운영하는 웹기반 자료공유포털 (<https://earthexplorer.usgs.gov>).

18) 원본 LANDSAT 영상(Collection1)에 우선 지형정밀보정(Terrain Precision Correction)을 수행한 뒤(Collection2-Level1), NASA의 LEDAPS(Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System) 소프트웨어를 활용하여 방사보정 및 대기보정을 완료한 지표반사율 자료

이 연구의 시간적 범위는 1980년대 초반부터 2010년대 후반까지를 포괄하기 때문에 연구에 활용한 LANDSAT 영상은 시기별로 위성과 탑재체가 상이하다. 구체적으로 이 연구는 LANDSAT5 TM, LANDSAT7 ETM+, LANDSAT8 OLI 영상을 이용하였다. 구역 및 시기별로 활용한 영상의 수는 총 74매로, 해당 영상의 촬영일자 목록은 아래와 같다(표 2-1).

〈표 2-1〉 연구에 활용한 LANDSAT 위성영상 목록

구역	위성	촬영일자	구역	위성	촬영일자	구역	위성	촬영일자
115-31	5	1985-10-14	116-33	5	1985-04-12	114-34	5	1985-10-23
		1988-10-22			1990-10-19			1988-10-31
		1995-10-26			1994-10-14			1995-04-26
		1999-05-30			1999-11-05			1999-10-30
		2005-10-05		7	2004-06-03			2005-06-24
		2009-08-29		5	2010-06-04			2010-08-09
	8	2014-10-14		8	2015-09-22		8	2015-05-19
		2019-09-26			2019-05-28			2020-04-14
115-32	5	1985-10-14	115-33	5	1985-04-05	114-35	5	1985-10-23
		1990-10-12			1990-10-12			1990-08-02
		1995-10-26			1995-10-26			1995-06-29
		1999-05-30			1997-09-29			2000-05-25
		2005-10-05			2004-08-31			2005-04-05
		2009-04-07			2009-04-07			2010-11-29
	8	2014-10-14		8	2015-10-17		8	2014-09-05
		2018-10-25			2020-04-05			2020-04-30
116-32	5	1985-04-12	115-34	5	1985-04-05	114-36	5	1985-10-07
		1990-10-19			1989-10-25			1990-08-02
		1994-05-07			1994-11-08			1995-06-29
		2000-10-14			2000-09-05			2000-05-25
		2003-09-21			2004-04-09			2005-04-05
		2010-10-10			2009-05-25			2009-03-15
	8	2015-09-22		8	2015-10-17		8	2014-05-16
		2020-05-30			2020-04-05			2020-04-30

2. 고해상도 위성영상

OrbView는 상업용 지구관측위성을 개발 및 운용하던 민간기업 Orbital Sciences Corporation이 개발 및 운용한 위성시리즈로, 4호까지 개발되었다. 특히 2003년부터 운용된 OrbView-3는 전정색 영상의 공간해상도가 1m인 초기의 고해상도 위성영상으로, 2007년에 이미지 센서 고장으로 인해 설계수명보다 일찍 폐기되었다. USGS는 2018년부터 어스 익스플로러를 통하여 2003-2007년 기간에 촬영된 OrbView-3 전체 영상을 제공하고 있다. 그러나 해안선 분석에 용이한 다중분광(MS; Multi Spectral) 영상 중 한반도 동해안 지역의 자료는 존재하지 않아, 2000년대 초반의 전정색 영상을 수집하였다.

USGS가 제공하는 OrbView-3 영상은 위성의 궤도 및 자세정보와 유리 함수 계수에 대한 메타데이터를 제공하는 Level1B(Basic Enhanced) 자료와, 이를 토대로 지형보정을 수행한 Level1Gst(Systematic Terrain Correction) 자료¹⁹⁾를 제공한다. 이 연구는 전처리 과정을 단축하기 위하여 주요 연안지역별로 윤량 조건이 20% 이하인 Level1Gst 자료를 검색한 뒤, 목시 비교를 통하여 전체 주요 연안지역을 포함하도록 대표영상들을 선정하였다.

GeoEye와 WorldView는 미국에 본사를 둔 민간기업 DigitalGlobe가 운영하는 상업용 지구관측위성이다. DigitalGlobe가 기존에 운영하던 상업용 지구관측위성 IKONOS와 QuickBird의 설계수명이 도래함에 따라 이를 대체하기 위한 목적으로 개발하였다. 현재까지 WorldView-1(2007년 9월 발사), GeoEye-1(OrbView-5; 2008년 9월 발사), WorldView-2(2009년 10월 발사), WorldView-3(2014년 8월 발사), WorldView-4(GeoEye-4; 2016년 11월 발사)이 개발되었다. 이 가운데 가장 최근에 발

19) 90m 공간해상도의 수치표고모델(DEM; Digital Elevation Model)을 활용하여 방사·기하보정된 자료

사된 WorldView-4는 자세제어장치의 고장으로 인해 2019년에 퇴역하였으나 나머지 네 개 위성은 현재까지 운영 중이다. 2022년 현재 DigitalGlobe 소유 지구관측위성의 원격탐사자료는 모기업인 MAXAR²⁰⁾를 통해 구입하여 활용할 수 있다. 위성영상 활용 시 별도 요구조건이 있는 경우 효율성을 높이기 위하여 위탁판매기관(reseller)을 통하여 구입 및 활용할 수도 있다. 이 연구는 북한의 일부 주요 연안지역의 해안선 변화에 집중하기 위하여 해안선을 기준으로 일정 범위의 관심영역(AOI; Area Of Interests)을 설정한 뒤 국내 재판매기관을 통하여 해당 범위의 위성영상을 수집하였다.

이 연구에 활용한 OrbView-3 영상은 원산·문천 3매와 신포, 나진, 선봉 각 1매씩 총 6매이며 GeoEye와 WorldView 영상은 원산·문천 10매, 신포, 나진, 선봉 각 1매씩 총 13매로 총합 19매이다. 파장대역 영상은 전정색 영상과 자연색(적색, 녹색, 청색)으로 구성된 4종으로, 전정색 영상을 이용하여 자연색 영상의 공간해상도를 1m로 재분류(panchromatic)하였다. 구체적으로 이 연구에 활용한 고해상도 위성영상의 촬영일자 목록은 아래와 같다(표 2-2).

〈표 2-2〉 연구에 활용한 고해상도 위성영상 목록

구역	위성	촬영일자	구역	위성	촬영일자
원산·문천	OrbView-3	2004-07-29	원산·문천	WorldView-2	2020-05-21
		2004-07-29			2021-10-13
		2004-10-29	신포	OrbView-3	2004-10-05
	GeoEye-1	2020-04-13		GeoEye-1	2021-09-01
		2020-04-13	나진	OrbView-3	2004-12-08
		2020-09-13		WorldView-3	2021-05-11
		2020-12-10	선봉	OrbView-3	2004-12-08
		2020-12-10		WorldView-2	2021-10-24

20) MAXAR의 전신인 MDA(MacDonald, Dettwiler and Associates)는 2017년에 DigitalGlobe를 인수한 후 본사를 미국 콜로라도주로 이전하였으며 사명을 MAXAR로 변경하였다.

제2절 자료 전처리 및 시기별 해안선 조사

이 연구는 장기 해안선 변화 분석에 활용한 LANDSAT 5,7,8 영상과 주요 연안지역의 원격탐사자료 유형별 비교분석에 활용한 OrbView-3, GeoEye-1, WorldView 2,3 영상 등 총 7종의 위성영상을 활용하였으며, 자료 수집원은 USGS의 어스익스플로러와 국내 위탁판매기관으로 구분된다. 또한 위성영상별로 전처리 여부와 세부항목이 상이하고, 전처리를 거친 자료 중 알 수 없는 요인에 따른 오차가 잔존하는 경우도 확인하였다. 따라서 이 절은 먼저 해안선 조사에 앞서 특정 원격탐사자료를 대상으로 수행한 전처리 유형과 구체적인 수행 내용을 기술하였다. 다음으로 원격탐사자료 유형별로 해안선 조사를 위해 적용한 방법론을 기술하였다.

1. 위성영상 전처리

1) 방사보정

장기 해안선 조사·분석에 활용한 LANDSAT 영상의 경우 대부분 방사보정이 완료된 Level2 자료이지만 일부 영상은 Level1 자료만 존재하거나 영상자료 내 노이즈가 존재하는 것을 확인하였다. 이러한 경우 Level1 자료에 방사보정을 별도로 수행하여 해안선 조사에 활용하였다.

오늘날 원격탐사자료의 전처리 및 분석에 활용할 수 있는 다양한 전문 소프트웨어들이 개발 및 활용되고 있으며, 이들 가운데 일부는 영상 전처리에 활용할 수 있는 다양한 자동화도구를 제공한다. 대표적으로 인 연구는 PCI Geomatica 데모(무료체험)를 이용하여 방사보정을 수행하였다.

2) 기하보정

LANDSAT 영상은 모두 지형정밀보정을 완료한 Collection2 자료를 활용하였으나, 일부 영상은 동일한 구역의 이전 또는 이후 시기의 영상과 비교할 때 일정 수준의 기하 오차(geometric error)가 존재하는 것을 확인하였다. 이러한 경우 동일한 구역의 여타 영상들을 기준으로 다수의 지상 기준점(GCP; Ground Control Points)을 설정하고 이를 활용하여 영상의 기하 오차를 해소하였다.

방사보정과 유사하게, 원격탐사 관련 전문 소프트웨어가 제공하는 도구 가운데 두 개의 영상자료를 비교하여 자동으로 GCP를 검색 및 제안하는 기능이 존재하며, 이를 활용할 경우 비교적 빠르고 정확하게 기하보정을 수행할 수 있다. 이 연구는 PCI Geomatica를 활용하여 자동으로 GCP를 설정한 뒤, 일부를 재조정하여 기하보정을 수행하였다.

고해상도 위성영상 중 어스 익스플로러를 통하여 수집한 OrbView-3의 경우 지형보정을 완료한 Level1Gst 자료를 수집하였으나, LANDSAT 영상과 비교할 때 일부 기하오차가 존재하는 것을 확인하였다. 전술한 오차는 OrbView-3 영상의 지형보정에 활용한 수치표고모델의 공간해상도가 상대적으로 낮은 것에 기인할 수 있다. 고해상도 위성영상 가운데 나머지 GeoEye-1와 WorldView 영상 또한 위성의 궤도 및 자세정보를 토대로 대략적인 위치설정만 되어있는 자료이기 때문에 별도의 기하보정을 필요로 하였다. 전술한 고해상도 위성영상의 경우 상대적으로 공간해상도가 낮은 LANDSAT 영상만을 활용할 경우 정확하게 GCP를 설정하기에 어려움이 있다. 따라서 이 연구는 OpenStreetMap, GoogleEarth 등을 활용하여 지형지물에 대한 공간정보 및 높은 수준의 정밀지형보정이 완료된 영상정보와 비교하여 다수의 GCP를 설정한 뒤, 이를 활용하여 고해상도 위성영상의 기하오차를 보정하였다.

2. 해안선 조사 방법론 설정 및 적용

제2절에 기술한 바와 같이 이 연구에 활용한 원격탐사자료는 총 7종의 위성영상으로, 공간해상도와 분광해상도 등 특성이 상이하여 해안선의 위치를 파악하는데 활용할 수 있는 자료 유형과 방법론에 차이가 있다. 예를 들어 장기 해안선 변화 분석에 활용한 LANDSAT 영상의 경우 공간해상도가 30m 수준으로 비교적 낮지만 단파적외선 영상을 활용할 수 있다. 한편, 이 연구에 활용한 고해상도 위성영상인 OrbView-3와 GeoEye-1 및 WorldView 영상은 공간해상도가 1m 수준으로 비교적 높지만 단파적외선 영상을 활용할 수 없다.²¹⁾ 전술한 특성 차이에 따라 원격탐사자료 유형별 해안선 조사 방법론이 일부 상이하기 때문에 이 연구에 적용한 방법론을 자료 유형별로 구분하여 기술하였다.

1) LANDSAT 장기 위성영상

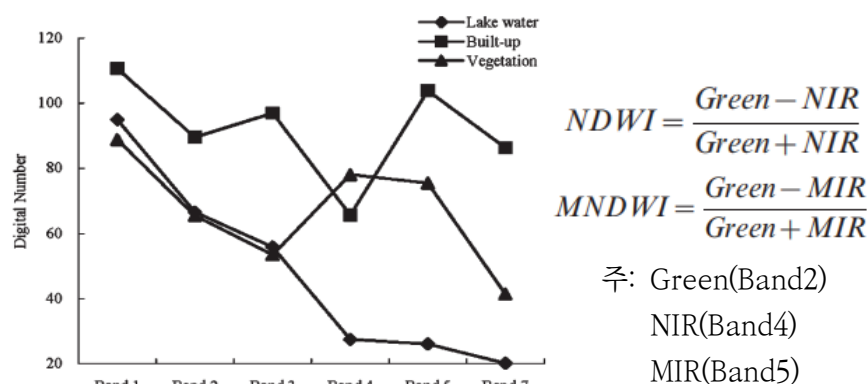
제1장 제2절에 기술한 바와 같이 LANDSAT 영상은 일반적인 연구자가 확보할 수 있는 원격탐사자료 가운데 시간적 범위, 촬영빈도 및 공간해상도, 분광해상도 등 다양한 측면에 장점이 있다. 이 때문에 LANDSAT 영상을 활용한 해안선 조사에 참고할 수 있는 국내외 선행연구도 누적되어 있으며, 이 연구는 조사의 용이성과 결과의 정확성 측면을 고려하여 주요 선행연구가 제시한 방법론을 적용하였다.

먼저 육역과 해역을 구분하는 경계선 탐지는 Xu(2006)이 제시한 MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index; 수정정규수분지수)를 이용하였다. LANDSAT 가운데 TM 센서보다 앞서 운용한 MSS 센서를 포

21) WorldView-3는 8개 파장대역의 SWIR(Short Wave Infra Red; 단파적외선) 영상을 촬영하는 센서를 탑재하였으며 이 중 2번과 3번 파장대역이 LANDSAT의 5번 파장대역(SWIR 1)과 유사하다. 그러나 이 연구는 고해상도 위성영상 간의 통일성을 확보하기 위하여 해당 파장대역 영상을 제외하였다.

함하여, 기존 원격탐사자료는 대부분 가시광선 및 근적외선 파장대역의 자료만 제공하였기 때문에 기존의 원격탐사기법은 주로 해당 파장대역 영상을 활용하였다. MNDWI의 토대인 NDWI 또한 지면과 수면에서 가시광선 중 녹색 파장대역(band2)과 근적외선 파장대역(band4)의 반사도 값에 차이가 큰 것에 착안하였다.²²⁾ 구체적으로, 지면과 수면은 모두 녹색 파장대역의 반사도가 상대적으로 높지만 근적외선 파장대역의 경우 식생이나 토양 및 인공구조물로 덮인 지면에 비해 수면의 반사도가 크게 낮아진다(그림 2-1). 이 연구에 적용한 MNDWI의 경우 녹색 파장대역 영상을 활용하는 것은 동일하나, 근적외선 파장대역 영상을 대신하여 TM 센서부터 제공하는 단파적외선(band5) 파장대역 영상을 활용한다는 점에서 차이가 있다. 단파적외선 파장대역은 식생과 인공구조물의 반사도가 녹색 파장대역과 유사하거나 다소 높은 수준인 반면 수면의 반사도는 근적외선 파장대역보다도 낮기 때문에, MNDWI는 NDWI에 비하여 육역과 해역의 경계를 파악하는 데 더 용이하다.²³⁾

〈그림 2-1〉 지표피복에 따른 LANDSAT 파장대역별 반사도와 주요 해안선 조사 알고리즘

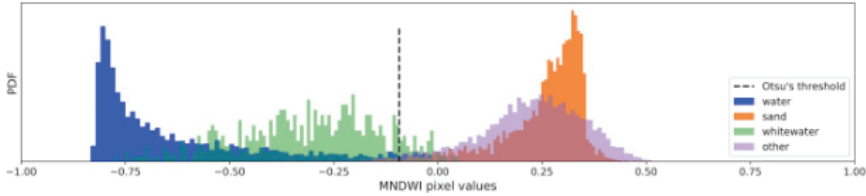


자료: Xu(2006), pp. 3026-3027.

22) McFeeters(1996), pp. 1429-1430.

23) Xu(2006), pp. 3026-3027.

〈그림 2-2〉 연안지역의 주요 지표피복 유형별 MNDWI 값의 확률밀도함수(예)



자료: Vos et al.(2019), p. 4.

LANDSAT 영상의 MNDWI는 -1부터 1사이의 값에 분포하는데, 지표피복유형에 따라 차이가 비교적 뚜렷하며, 주로 육역의 MNDWI는 음(-)의 값으로 나타나는 반면 해역은 양(+)의 값을 보인다(그림 2-2). 한편, LANDSAT 영상의 공간해상도가 비교적 낮은 것과 관련하여, 소규모 방파제와 같이 육역과 해역이 혼합된 격자는 양의 값을 보이기도 한다. 따라서 이 연구는 MNDWI 값 0.2를 기준으로 하되, 해안선이 누락되는 경향을 저감하기 위하여 영상별로 소폭 조정하여 해안선을 탐지하였다.

격자형 영상자료로부터 상이한 지형요소(feature)를 구분하는 경계선의 산출 방법은 선행연구를 검토하여 정확성이 높은 것으로 알려진 MS (Marching Squares; 격자진보법)를 적용하였다.

연안해역에 대형선박이 존재하거나 영상자료에 노이즈가 잔존하는 경우 해안선으로 오탐지될 수 있다. 전술한 경우 시기별 위성영상을 비교하여 오탐지 결과를 제거할 수 있다. 이 연구는 한반도 동해안을 대상으로 해안선을 조사하는 것을 목적으로 하기 때문에 도서부의 해안선을 제거하는 과정에 전술한 오탐지 결과들을 함께 제거하였다.

LANDSAT 영상별로 해안선을 탐지한 뒤에는 1980년대 초반부터 2010년대 후반까지, 연구의 시간 단위인 5년별로 9개 구역의 해안선을 집성하여 전체 한반도 동해안의 해안선 자료를 구축하였다.

2) 고해상도 위성영상

앞서 기술한 바와 같이 이 연구에 활용한 고해상도 위성영상은 단파적외선 파장대역 자료의 가용성 제약으로 인해 LANDSAT 영상과 동일한 해안선 조사 기법을 적용할 수 없다. 따라서 이 연구는 원격탐사자료의 파장대역별 화소값을 토대로 지형요소를 분류하는 화소기반 지표피복분류기법을 적용하여 해안선을 조사하였다. 구체적으로, 선행연구를 참고하여 통계적 유사성에 기반하여 자동적으로 군집을 분류하는 무감독분류기법 가운데 Fuzzy K-means 무감독분류기법을 적용하여 육역과 해역을 구분하였다.²⁴⁾ Fuzzy K-means는 특정 화소값이 여러 개의 군집에 대하여 높은 적합성을 보일 경우 개별 군집에 대한 적합성을 수치화함으로써 비교적 용이하게 결과물의 정확도를 높일 수 있는 것으로 알려져 있다.²⁵⁾

지표피복분류기법의 적용에 앞서 해안선 조사의 용이성을 높이기 위하여 해안선 주변지역을 추출한 뒤 영상별로 32개 또는 64개의 군집으로 분류하였으며, 50회 이상 분류를 반복(iteration)하여 오분류를 저감하였다. 다음으로 유사한 시점에 LANDSAT 영상을 활용하여 해안선을 조사한 결과와 비교하여 해안선 인근에 위치한 군집들을 선별하였다. 마지막으로 목시분석을 통하여 육역과 파랑 및 선박 등에 해당하는 군집을 표기(label)한 뒤 전술한 군집들을 해역과 분리함으로써 해안선 자료를 구축하였다. 이때, 파랑의 경우 모든 파장대역에서 반사도가 높게 나타나기 때문에 식별이 용이하며 비교적 낮은 수심의 해역인 천해에만 발생하는 자연현상임을 고려하여 육상과 해역을 구분하는 보조지표로 활용하였다. 특히 완만한 사질해빈의 경우 넓은 범위에 걸쳐 발생한 파랑을 관찰하여 일시적인 육역과 해역의 경계선과 배후지에 위치한 습윤선의 위치를 파악함으로써 해안선 조사에 반영하였다.

24) 임종서(2019), p.55.

25) Burrough, Gaans & MacMillan(2000), p. 51.

제3절 해안선 변화 및 자료유형별 차이 분석

1. 시·공간적 변화 분석

3차원 공간에서 해안선의 변화는 해수면 높이의 변화에 따른 경사면의 노출 또는 수몰과, 육상지역으로부터 유입하는 퇴적물량의 변동에 따른 전면부의 침식 및 퇴적, 그리고 인위적인 매립이나 복원에 따른 전진 또는 후퇴 등 복잡한 양상으로 나타난다. 따라서 해안선 변화에 대한 심층적인 분석에는 2차원 평면의 위치이동뿐만 아니라 연안지역의 고도분포 등 3차원 변화에 대한 종합적인 정보를 조사하여 활용한다.

일반적인 지구탐사 위성영상을 통해 수집할 수 있는 자료는 대부분 2차원 평면에 대한 정보에 국한한다. 전술한 제약을 고려하여, 원격탐사에 기반한 해안선 조사는 일부 지표를 개별적으로 분석하거나 이를 결합하여 보다 포괄적인 해석을 시도한다. 이 연구는 경험적으로 해안선의 길이 증감과 기존 해안선과 평행한 방향으로의 위치 이동을 기준으로 해안선의 시·공간적 변화를 분석하였다. 이를 위하여 전체 한반도 동해안의 연안지역에 일정한 간격으로 정점을 선정한 뒤, 정점별 해안선 이동을 조사하였다. 다음으로 해안선을 광역행정구역 단위로 군집화하여 시·공간적 변화의 지역별 경향성을 비교·대조하였다.

1) 권역별 해안선 길이 변화

한반도 동해안에는 일곱 개의 광역행정구역이 분포한다. 이 가운데 나선직할시와 함경북도 및 함경남도는 북한 연안지역에 위치하고 경상북도, 울산광역시, 부산광역시는 남한 연안지역에 위치한다. 마지막으로 강원도는

남북한에 걸쳐있다. 이 연구는 편의상 강원도를 남측과 북측으로 구분하여 한반도 동해안을 총 여덟 개의 권역으로 분류하였다.

다음으로 제2절의 방법을 통하여 구축한 1980년대 초반부터 2010년대 후반까지 5년 단위 8개 시기의 해안선을 광역행정구역 단위로 추출하였다. 이 때, 행정구역의 공간적 범위는 2010년대 후반을 기준으로 동일하게 설정하여 행정구역 경계 변동에 따른 영향을 제외하였다. 마지막으로 광역행정구역별로 시계열 변화에 따른 해안선의 길이를 기록하고 증감에 대한 변화를 분석하였다.

1) 권역별 해안선 위치 변화

이 연구는 해수면 높이의 변화 또는 자연·인공적인 침퇴적 등으로 인하여 기존 해안선과 평행한 방향으로 전진 또는 후퇴하는 현상을 해안선의 위치 변화로 간주하였다. 해안선의 위치 변화는 연안지역에서 해안선과 수직인 방향으로 일정 거리 떨어진 육역(배후지)에 기준점(reference point)을 설정한 뒤, 해안선과 기준점의 거리 변화를 측정하는 방법으로 파악할 수 있다.²⁶⁾

상기한 방법론에 따른 해안선의 위치 변화 분석을 보다 용이하게 수행할 수 있도록 지원하는 전문 소프트웨어들이 다수 개발 및 활용되고 있다. 이 연구는 선행연구를 검토하여 USGS 산하 우즈홀연안해양과학센터(Woods Hole Coastal and Marine Science Center)가 개발하여 무료로 공개한 DSAS(Digital Shoreline Analysis System) 5.1을 활용하였다.

구체적으로 LANDSAT 영상으로부터 추출한 1980년대 초반의 해안선에서 200m 거리 이격된 배후지에 기준선(baseline)을 구축한 뒤, 기준선에

26) Yasir et al.(2020), p.180158.

서 1km 간격으로 정점을 선정하였다. 다음으로 기준선의 각 정점에서 기준선과 수직인 방향으로 1980년대 초반 해안선을 연결하는 정선을 산출한 뒤, 각 정선의 길이를 산출하였다. 마지막으로 1980년대 초반 해안선을 대신하여 5년 단위 시기별 해안선 자료를 입력하고 정선의 길이를 산출함으로써 해안선 위치의 시계열 변화를 분석하였다. 이 때, 중대형 하천의 하구역과 선착장 등 정선 자료를 구축하기 어렵거나 오산출된 해역의 경우 정점의 위치를 일부 조정하였다.

〈그림 2-3〉 DSAS를 이용한 해안선 위치 변화 조사 방법



2) 정점 선정 및 조정 3) 정점별 해안선 위치 조사 정선 구축

TransectID	BaselineID	GroupID	TransOrder	Azimuth	ShrCount	TCD	SHAPE_Length	NSM
1	1	0	1	315.91	2	1000	320.010742	10.03
2	1	0	2	271.24	2	2000	230.1031	20.13
3	1	0	3	263.37	2	3000	310.170952	65.92
4	1	0	4	269.49	2	4000	488.326901	-11.43
5	1	0	5	263.91	2	5000	525.701455	19.77
6	1	0	6	267.42	2	6000	290.947916	-12.13
7	1	0	7	311.68	2	7000	270.127504	10.73
8	1	0	8	306.43	2	8000	274.055027	-12.61
9	1	0	9	279.16	2	9000	365.348954	-1.59
10	1	0	10	294.24	2	10000	263.682791	-11.83
11	1	0	11	292.27	2	11000	271.995067	-10.85
12	1	0	12	282.55	2	12000	231.424406	-10.91

4) 정선별 해안선 위치 변화 분석

자료: 저자 작성

2. 원격탐사 자료 유형별 비교분석

이 연구는 원격탐사 기반 해안선 조사에 활용한 원자료의 유형에 따른 해안선 조사 결과의 차이를 세세하게 분석하기 위하여 장기 시계열 자료가 존재하는 LANDSAT 영상 외에도 1m 공간해상도의 고해상도 위성영상을 추가로 확보하여 해안선을 조사하였다. 연구에 활용한 고해상도 위성영상은 각각 2000년대 초반 및 2010년대 후반의 해안선 조사에 활용한 LANDSAT 영상과 촬영시기가 비슷하다. 따라서 전술한 두 개 시점을 대상으로 각각 LANDSAT 영상과 고해상도 위성영상을 활용하여 조사한 해안선의 길이 및 위치를 비교·대조하였다.

자료 유형별 비교분석 시 해안선의 길이 및 위치 분석은 시·공간적 변화 분석과 동일한 방법을 활용하였으나, 해안선의 위치 차이 분석 시 정점 간격을 100m로 단축하였다. 이는 공간적 규모가 상대적으로 작은 주요 연안 지역 내에서 보다 상세한 분석을 수행하기 위함이며, 구체적으로 대상지역별 정점 수는 아래와 같다(표 2-3).

〈표 2-3〉 북한 주요 연안지역에 대한 해안선 분석 자료 및 정점 수

구역	LANDSAT	고해상도	정점	구역	LANDSAT	촬영일자	정점	
원산·문천	2004-06-03	2004-07-29	166	신포	2003-09-21	2004-10-05	103	
		2004-10-29			2020-05-30	2021-09-01		
	2019-05-28	2020-04-13		나진	2005-10-05	2004-12-08	70	
		2020-05-21			2019-09-26	2021-05-11		
		2020-09-13		선봉	2005-10-05	2004-12-08	106	
		2020-12-10			2019-09-26	2021-10-24		
		2021-10-13						

03

한반도 동해안의 시·공간적 해안선 변화 분석

제1절 전체 연안지역의 해안선 변화 분석

이 장의 1절은 LANDSAT 영상 기반의 해안선 조사 결과를 활용하여 1980년대 초반부터 2010년대 후반까지 약 40년 동안 한반도 동해안을 대상으로 해안선의 시계열 변화 분석 결과를 기술하였다. 시기에 따라 다소 차이가 있지만 동해안의 전체 해안선 길이는 약 1,900~2,000km에 달할 정도로 범위가 넓다. 이 때문에 전체 지역의 변화를 상세히 기술하기에는 제약이 있다. 따라서 우선적으로 거시적인 시계열 변화 경향성을 파악하기 위하여 해안선의 길이와 정점별 해안선의 위치 변화를 광역행정구역 단위 권역별로 요약하였다. 이후 권역별로 구분하여 변화량이 두드러지는 시기를 중심으로 세부지역들을 살펴보는 형태로 분석 결과를 정리하였다.

1. 권역별 해안선 길이 변화

LANDSAT 영상을 활용하여 조사한 한반도 동해안의 광역행정구역별 5년 단위 시계열 변화는 아래의 표와 같다(표 3-1; 표 3-2).

〈표 3-1〉 한반도 동해안의 권역별 해안선 길이 변화-1

단위: km, %(1980년대 초반 해안선 길이 대비 변화율)

행정구역	1980년대 초반	1980년대 후반	1990년대 초반	1990년대 후반
라선특별시	108	108 -	113 (▲ 4.5)	108 (▲ 0.5)
함경북도	399	414 (▲ 3.8)	419 (▲ 5.0)	398 (▼ 0.1)
함경남도	446	434 (▼ 3.0)	434 (▼ 3.0)	429 (▼ 3.8)
강원도(북)	277	285 (▲ 2.9)	285 (▲ 3.0)	285 (▲ 2.8)
소계(북한)	1,230	1,241 (▲ 0.9)	1,251 (▲ 1.7)	1,221 (▼ 0.7)
강원도(남)	263	276 (▲ 4.9)	290 (▲ 0.0)	281 (▲ 6.8)
경상북도	293	294 (▲ 0.3)	308 (▲ 5.2)	320 (▲ 9.3)
울산광역시	92	89 (▼ 2.0)	94 (▲ 2.3)	92 (▲ 0.6)
부산광역시	42	44 (▲ 4.7)	44 (▲ 4.8)	47 (▲ 1.4)
소계(남한)	690	704 (▲ 2.0)	735 (▲ 6.6)	741 (▲ 7.3)
합계	1,920	1,945 (▲ 1.3)	1,986 (▲ 3.5)	1,961 (▲ 2.2)

자료: 저자 작성

1980~2020년 기간에 한반도 동해안에서 해안선 길이는 1,920km에서 2,051km로 131km 증가하였다. 1980년대 해안선 길이를 기준으로 증가량을 환산할 경우 약 6.8%에 해당한다. 해안선 길이 증가량을 연평균으로 환산할 경우 매년 3.3km씩 증가한 셈이다.

해안선 길이의 변화량을 5년 단위로 세분하여 살펴보면, 해안선 길이가 가장 길었던 시기는 2010년대 초반으로, 1990년대 후반과 2010년대 후반을 제외하면 모든 시기에서 직전 시기보다 해안선 길이가 꾸준히 증가하였다. 구체적으로 1980년대 후반에는 25km, 1990년대 초반에는 41km 증가하였으며, 1990년대 후반에 25km 감소한 후 2000년대 초반에는 63km 증가하여 가장 많은 증가량을 기록하였다. 2000년대 후반과 2010년대 초반에도 각각 18km, 9km 증가하여 2010년대 초반까지 해안선 길이의 증가율은 5년당 1% 내외로 유지되었으나 2010년대 후반에는 해안선의 길이가 큰 변동 없이 유지된 것으로 나타났다.

〈표 3-2〉 한반도 동해안의 권역별 해안선 길이 변화-2

단위: km, %(1980년대 초반 해안선 길이 대비 변화율)

행정구역	2000년대 초반	2000년대 후반	2010년대 초반	2010년대 후반
라선특별시	114 (▲ 5.9)	110 (▲ 2.2)	118 (▲ 9.5)	113 (▲ 4.2)
함경북도	413 (▲ 3.6)	405 (▲ 1.6)	405 (▲ 1.7)	408 (▲ 2.4)
함경남도	437 (▼ 1.9)	434 (▼ 2.8)	420 (▼ 5.8)	429 (▼ 3.9)
강원도(북)	288 (▲ 4.1)	282 (▲ 1.7)	289 (▲ 4.4)	283 (▲ 2.3)
소계(북한)	1,253 (▲ 1.9)	1,231 (▲ 0.1)	1,233 (▲ 0.3)	1,233 (▲ 0.3)
강원도(남)	294 (▲ 1.5)	302 (▲ 4.9)	310 (▲ 7.9)	299 (▲ 13.6)
경상북도	333 (▲ 3.7)	355 (▲ 1.1)	353 (▲ 0.5)	353 (▲ 0.6)
울산광역시	96 (▲ 5.2)	105 (▲ 5.2)	105 (▲ 4.3)	115 (▲ 25.8)
부산광역시	48 (▲ 12.8)	49 (▲ 4.9)	50 (▲ 18.3)	50 (▲ 9.0)
소계(남한)	771 (▲ 1.7)	811 (▲ 7.6)	818 (▲ 8.6)	818 (▲ 8.5)
합계	2,024 (▲ 5.4)	2,042 (▲ 6.4)	2,051 (▲ 6.8)	2,051 (▲ 6.8)

자료: 저자 작성

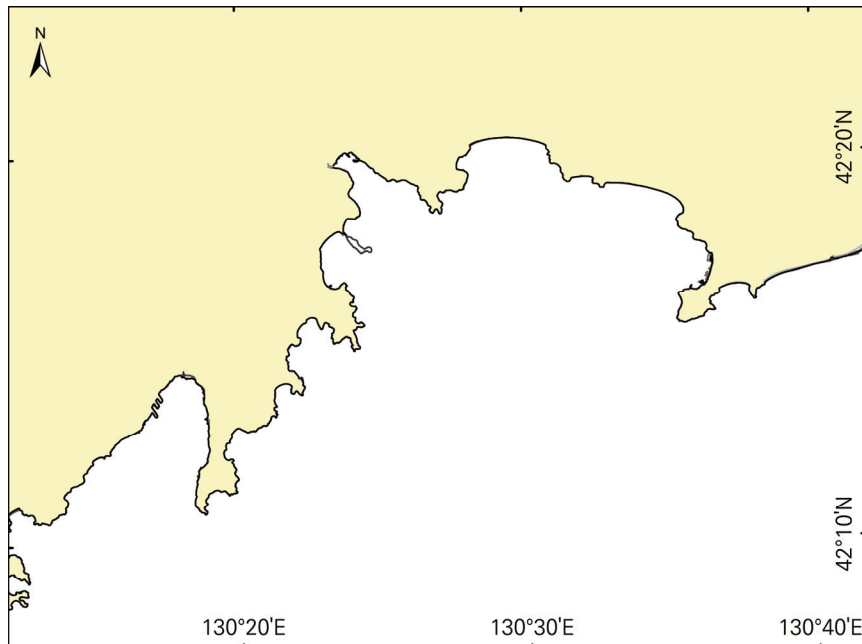
한반도 동해안에서 남한과 북한의 해안선 길이 변화는 뚜렷하게 대조되는 경향성을 보인다. 먼저 북한의 동해안 길이는 1980년대 초반에 1,230km였으며, 2010년대 후반에는 1,233km로 40년 동안 약 0.3% 증가하여 큰 변화가 없었다. 5년 단위로 구분할 경우 1980년대 후반부터 순서대로 11km 증가, 10km 증가, 30km 감소, 32km 증가하는 등 2000년대 초반까지는 직전시기 대비 약 1~2% 내외로 증감하였다. 뒤를 이어서 2000년대 후반에 직전 시기 대비 22km(1.7%) 감소한 뒤로 북한의 동해안 길이는 눈에 띄는 변화 없이 유지되었다. 한편, 남한의 경우 1980년대에는 690km에 불과했던 동해안의 길이가 2010년대 후반에는 818km로 약 128km 늘어났으며, 이는 1980년대의 해안선 길이 대비 약 18.5% 증가한 수치이다. 특히 1990년대 초반과 2000년대 초반 및 후반에 해안선 길이가 각각 직전 시기 대비 31km, 30km, 40km 증가하여 남한뿐만 아니라 한반도 동해안 전체적인 규모에서도 주목할 만한 변화를 야기하였다.

1) 라선특별시

1980~2020년 기간에 라선특별시의 해안선은 큰 변화 없이 유지되는 것으로 나타났다. 1980년대 초반의 해안선 길이는 108km로 전체 기간 중 가장 짧았으며, 2010년대 후반에는 113km로 1980년대 초반에 비하여 약 5km 늘어났다. 해안선의 길이가 가장 길었던 시기는 2010년대 초반으로 118km이며, 가장 짧았던 시기와 비교할 때 약 10km의 차이가 있다.

라선특별시 해안선의 시계열 변화를 지도로 살펴보면, 두만강 하구 서측의 우암리 해빈에 사주가 발달함에 따라 자연해안선의 변동성이 크고, 나진시 연안 도서가 시기별로 육역 또는 도서로 분류되는 등 자연적 요인의 영향에 따라 해안선의 길이가 시기별로 상이하게 나타나는 것으로 판단된다.

〈그림 3-1〉 라선특별시 해안선의 시계열 변화(진할수록 최근 해안선)



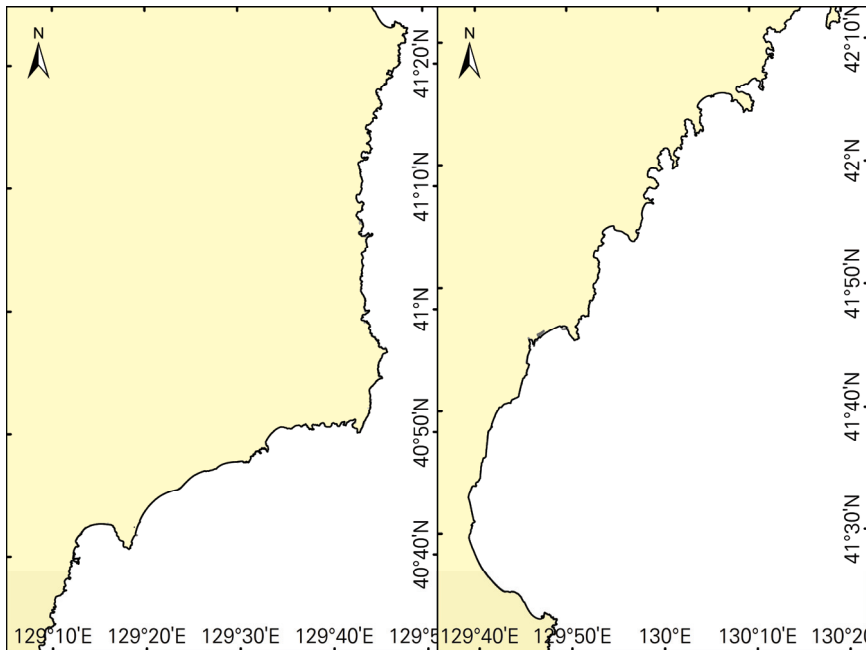
자료: 저자 작성

2) 함경북도

1980~2020년 기간에 함경북도의 해안선 길이는 큰 변화 없이 시기별로 변동성이 있다. 1980년대 초반의 해안선 길이는 399km였으며, 2010년대 후반에는 408km로 1980년대 초반에 비하여 약 9km 늘어났다. 해안선의 길이가 가장 길었던 시기는 1990년대 초반으로 419km이며, 가장 짧았던 시기는 1990년대 후반으로 두 시기의 해안선 길이 차는 약 21km이다.

함경북도 해안선의 시계열 변화를 지도로 살펴보면, 도 남측에 위치한 청진시의 연안지역 매립 및 항만 개발 등 인위적 요인의 영향에 따라 해안선의 길이가 상이하게 나타나는 것으로 판단된다.

〈그림 3-2〉 함경북도 해안선의 시계열 변화(진할수록 최근 해안선)



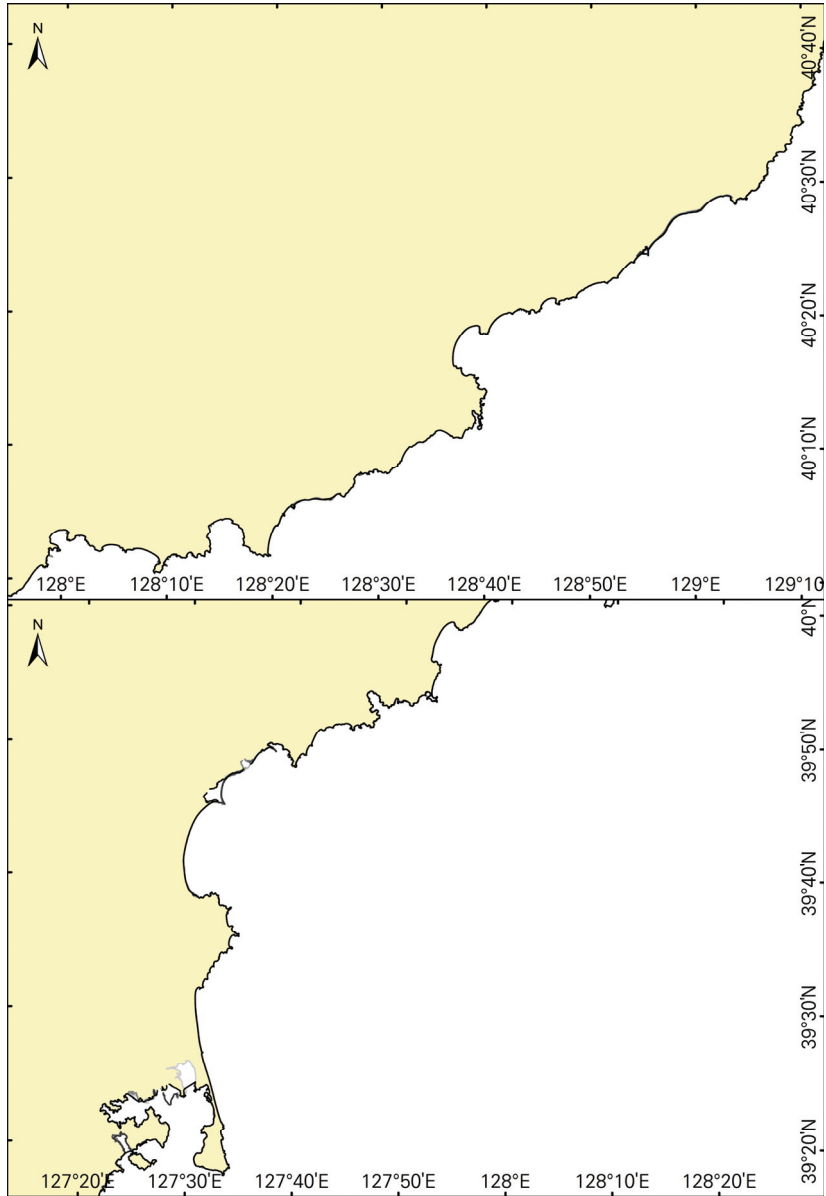
자료: 저자 작성

3) 함경남도

1980~2020년 기간에 함경남도의 해안선 길이는 북한지역에 위치한 광역행정구역 가운데 비교적 큰 변화가 발생하였다. 함경남도는 1980년대 초반을 기준으로 하여 해안선의 길이가 약 446km로, 한반도 동해안에 위치한 광역행정구역 가운데 해안선이 가장 긴 것으로 나타났다. 한편, 2010년대 후반에 함경남도의 해안선 길이는 429km로 줄어들어 해안선 길이가 두 번째로 긴 함경북도와의 차이가 당초 47km에서 21km로 크게 감소하였다. 해안선의 길이가 가장 짧았던 2010년대 초반에는 420km로 1980년대 초반에 비해 약 26km 짧았으며, 동일한 시기의 함경북도와의 해안선 길이의 차이가 15km로 가장 적었다.

함경남도 해안선 길이의 시계열 변화가 여타 광역행정구역과 상이한 양상을 보이는 것은 도 남단에 위치한 원산만의 자연환경 특성과 밀접한 연관성이 있다. 원산만 북측은 한반도에서 동해로 유입하는 하천 가운데 길이가 길고 유량이 풍부한 금야강과, 함경남도와 강원도의 경계를 이루는 덕지강이 유입하는 하구역으로 퇴적물 공급량이 많아 삼각주가 발달해 있다. 따라서 이 지역은 동해안에서 비교적 적은 비용과 노력으로 간척 및 매립을 통해 농경지와 염전 등을 확보하기에 용이한 지역이다. 실제로 위성영상 등을 통하여 1980~2020년 기간 동안 금야강 하구역에 대규모 간척지가 새로 조성된 것을 확인할 수 있다. 함경남도의 해안선 길이는 1980년대 후반과 2010년대 초반에 크게 감소하였는데, 두 시기 모두 원산만의 호도반도 내측에 대규모로 방조제를 조성함에 따라 이 지역에서 해안선이 짧아진 것에 기인한다. 과거 넓은 범위에 걸쳐 습지가 분포해있던 이 지역은 현재 광명성 로동지구로 명명된 농경지 및 염전이 위치해 있다. 그 외에도 원산만 북부의 많은 지역에서 비슷한 시기에 간척 및 매립으로 인하여 해안선의 길이와 위치가 변화하였다.

〈그림 3-3〉 함경남도 해안선의 시계열 변화(진할수록 최근 해안선)



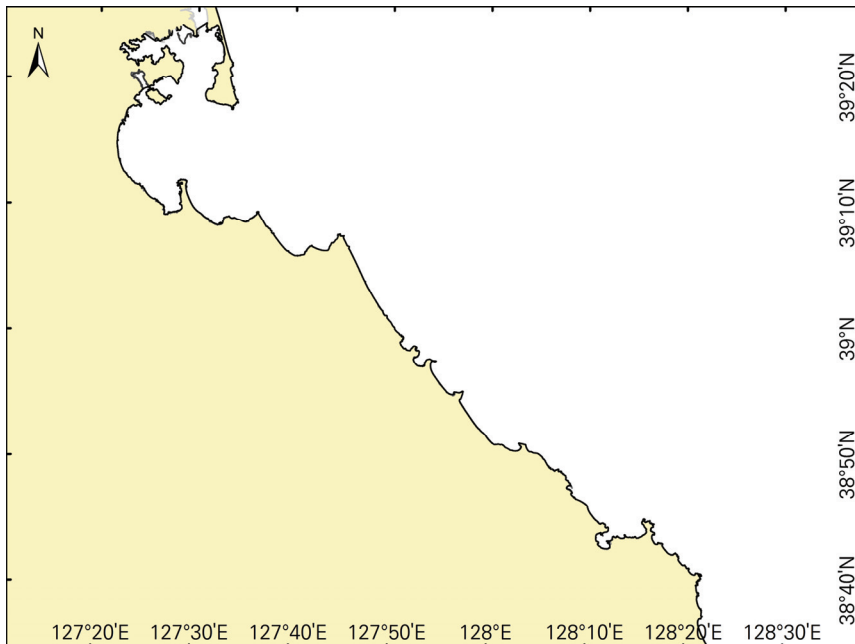
자료: 저자 작성

4) 강원도(북한)

1980~2020년 기간에 북한지역에 위치한 강원도의 해안선 길이는 소폭 증가하였으나, 1980년대 초반과 2010년대 후반의 해안선 길이가 각각 277km와 283km로 차이가 크지는 않다. 해안선의 길이가 가장 길었던 시기는 2010년대 초반으로 289km이며, 가장 짧았던 1980년대 초반과의 차이는 12km에 불과하다. 특히 1980년대 후반에 해안선이 약 8km 늘어난 이후 큰 변화 없이 유지되는 것으로 나타났다.

지도를 통해 살펴보면, 강원도의 해안선은 단순한 지형구조를 보이며 시계열 변화 또한 발견하기 쉽지 않다. 수치로 나타나는 시기별 차이는 주로 항만 개발에 따른 방파제 건설의 영향인 것으로 판단된다.

〈그림 3-4〉 강원도(북한) 해안선의 시계열 변화(진할수록 최근 해안선)



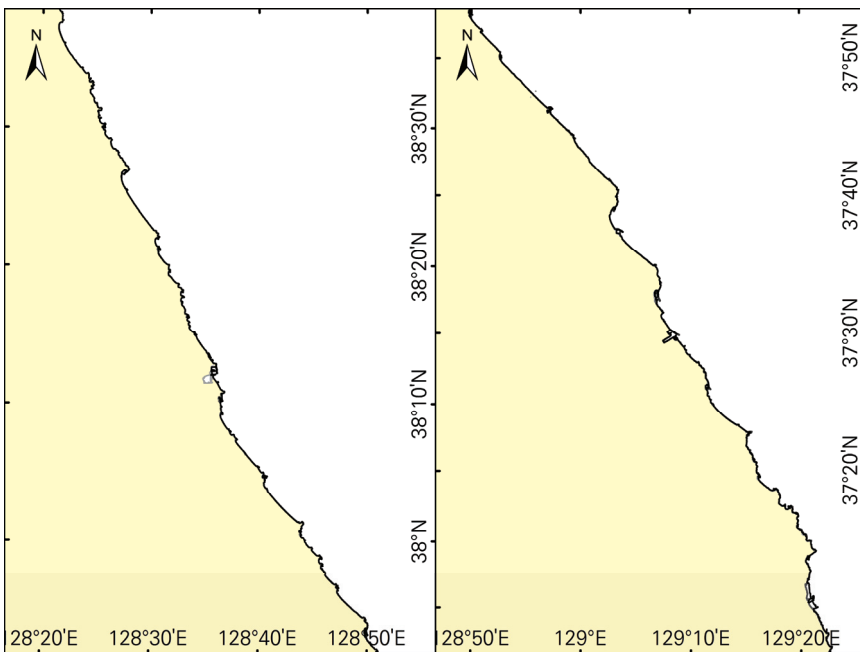
자료: 저자 작성

5) 강원도(남한)

북한측과 달리 남한에 위치한 강원도의 해안선은 1980~2020년 기간에 비교적 큰 폭으로 늘어났다. 구체적으로 1980년대 초반에는 263km로 북한지역에 비해 짧았던 해안선이 2010년대 후반에는 26km 늘어난 299km로 조사되어 북한지역을 역전하였다. 특히 해안선의 길이가 가장 길었던 2010년대 초반에는 310km로 1980년대 초반과 33km의 차이를 보인다.

남한지역에서 두드러지는 강원도 해안선 길이의 증가는 주로 항만개발에 따른 방파제 건설에 기인한다. 강원도 해안선의 시계열 변화를 지도로 살펴보면, 도 전역에 걸쳐 30개소 이상의 크고 작은 항만이 신규 개발되었거나 기존의 방파제 등 시설을 증축하였음을 확인할 수 있다.

〈그림 3-5〉 강원도(남한) 해안선의 시계열 변화(진할수록 최근 해안선)



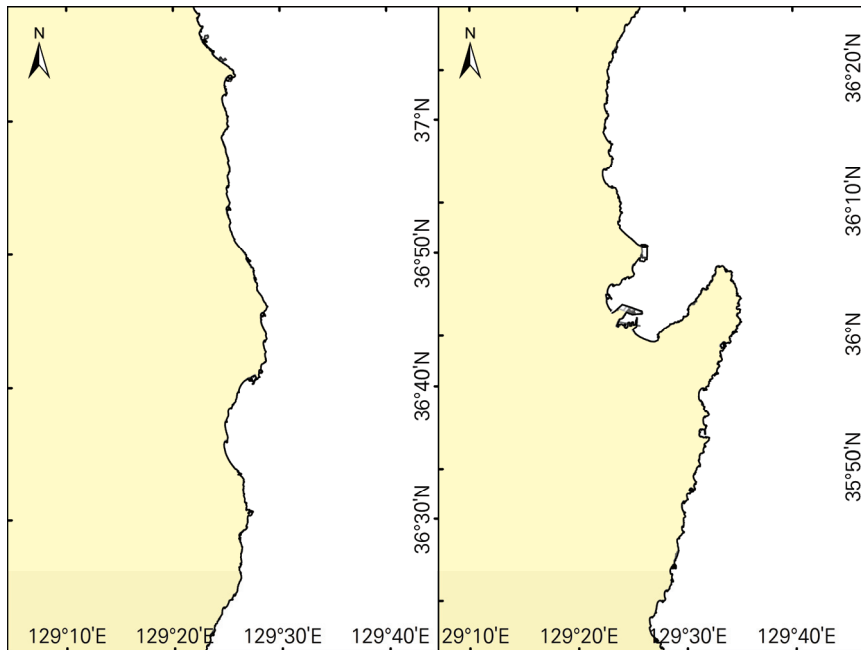
자료: 저자 작성

6) 경상북도

경상북도의 해안선 길이 또한 강원도와 동일하게 1980~2020년 기간에 큰 폭으로 증가하였다. 1980년대 초반에는 293km였던 해안선 길이가 2010년대 후반에는 353km로 20% 이상 증가하였으며, 증가량은 전체 광역행정구역 가운데 가장 많은 60km로 나타났다.

앞서 살펴본 강원도와 유사하게 경상북도의 해안선 길이 변화 또한 항만 개발이 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. 특히 대규모 무역항인 포항항의 개축 및 증축을 통한 부두와 방파제의 조성은 소축척 지도를 통해서도 용이하게 식별할 수 있는, 거시적인 규모의 해안선 변화를 야기하였음을 파악할 수 있다.

〈그림 3-6〉 경상북도 해안선의 시계열 변화(진할수록 최근 해안선)



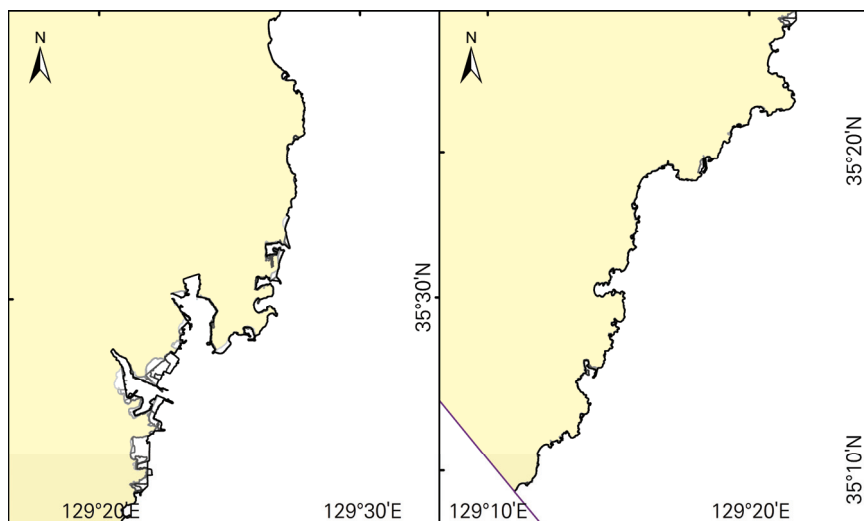
자료: 저자 작성

7) 울산·부산광역시

경상북도의 남측에 위치한 울산광역시는 1980년대 초반에 92km에 불과하였던 해안선 길이가 2010년대 후반에는 115km로 23km 증가하였으며 증가율은 동해안에 위치한 광역행정구역 중 가장 큰 25.8%로 나타났다. 울산광역시의 해안선 길이 변화는 항만 개발과 연안지역 매립이 복합적인 영향을 미친 것으로 판단된다. 특히 신울산항 및 온산항 조성 시 대규모 매립에 따른 회야강 하구역의 해안선 변화가 지도상에 뚜렷하게 나타난다.

마지막으로 부산광역시는 해운대 동측 달맞이고개를 기점으로 일부 해역만 동해에 포함된다. 부산광역시의 동해안은 범위가 작고 개발압력 또한 비교적 낮아 해안선 길이 변화가 그리 크지 않다. 1980년대 초반(42km) 대비 2010년대 후반(50km)의 해안선 길이는 8km(19%) 증가하였으며, 이러한 변화에는 대변항 개발이 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

〈그림 3-7〉 울산 및 부산광역시 해안선의 시계열 변화(진할수록 최근 해안선)



자료: 저자 작성

2. 권역별 해안선 위치 변화

1980~2020년 기간에 한반도 동해안에서 발생한 해안선 위치의 변화는 약 1km 단위로 1,603개의 정선을 선정한 뒤, 정선별 전진 및 후퇴량을 5년 단위 시계열로 조사하였으며 그 결과를 요약하면 아래와 같다(표 3-3). 1980년대 후반은 1980년대 초반에 비해 전체 해안선이 총 10,178m 후퇴하였으며, 이는 평균적으로 정선 당 약 6.35m 후퇴한 것을 의미한다. 반면, 1990년대 초반은 1980년대 초반에 비해 전체 해안선 2,566m, 정선 당 1.60m 전진했으며, 1980년대 후반과 비교하면 전체 해안선 12,744m, 정선 당 7.95m 전진하였다. 1980년대 후반, 1990년대 후반, 2010년대 후반은 해안선이 후퇴하였으며, 1990년대 초반, 2000년대 초반, 2000년대 후반, 2010년대 초반은 전진하였다. 특히 2010년대 초반의 경우 1980년대 초반에 비해 정선 당 16.23m 전진해 있었으며, 2000년대 후반과 비교하면 정선 당 9.32m 전진하였다. 반면 1980년대 초반 대비 해안선이 가장 후퇴한 시기는 1980년대 후반이었다. 한반도 동해안의 전반적인 위치 변화를 요약하면, 40년 동안 평균적으로 12.42m 전진한 것으로 볼 수 있다.

〈표 3-3〉 동해안 전체 해안선 위치 변화

단위: m, 기준 : 1980년대 초반

구분	기준 대비 전체 해안선 위치 변화	5년간 전체 해안선 위치 변화	기준 대비 정선 당 평균 위치 변화	5년간 정선 당 평균 위치 변화
1980 초반	-		-	
1980 후반	-10,178	-10,178	-6.35	-6.35
1990 초반	2,566	12,744	1.60	7.95
1990 후반	424	-2,142	0.26	-1.34
2000 초반	9,889	9,466	6.17	5.90
2000 후반	10,937	1,047	6.91	0.74
2010 초반	25,730	14,794	16.23	9.32
2010 후반	19,914	-5,817	12.42	-3.81

자료: 저자 작성

1) 라선특별시

1980년대 초반 대비 라선특별시 해안선의 위치 변화를 살펴보면 아래의 표와 같다(표 3-4). 라선특별시의 해안선 위치 변화는 약 1km 간격의 정선 103개를 활용하여 분석하였다. 그 결과, 1980년대 후반은 1980년대 초반에 비하여 전체 해안선이 총 614m 후퇴하였으며, 이를 환산하면 모든 정선이 평균적으로 6.22m 후퇴한 것으로 볼 수 있다. 해안선의 후퇴 경향은 지속되어 1990년대 후반에는 1980년대 초반에 비하여 전체 해안선 2,812m, 정선 당 27.30m 후퇴한 것으로 나타났다. 반면, 2000년대 초반은 1980년대 초반에 비하여 전체 해안선 156m, 정선 당 1.51m 전진해 있었으며, 1990년대 후반과 비교하면 무려 전체 해안선 2,968m, 정선 당 28.81m 전진하였다. 40년(1980~2020년) 동안의 전반적인 위치 변화를 요약하면, 전체 해안선은 2,564m, 정선 당 평균적으로 24.89m 후퇴하였다. 5년간 전체 해안선 위치 변화량을 보면 2,000m대의 전진과 후퇴가 반복되고 있는 점이 특징이다.

〈표 3-4〉 라선특별시 해안선 위치 변화

단위: m, 기준: 1980년대 초반

구분	기준 대비 전체 해안선 위치 변화	5년간 전체 해안선 위치 변화	기준 대비 정선 당 평균 위치 변화	5년간 정선 당 평균 위치 변화
1980 초반	-		-	
1980 후반	-641	-641	-6.22	-6.22
1990 초반	-401	239	-3.90	2.32
1990 후반	-2,812	-2,411	-27.30	-23.41
2000 초반	156	2,968	1.51	28.81
2000 후반	-2,572	-2,727	-24.97	-26.48
2010 초반	-428	2,143	-4.16	20.81
2010 후반	-2,564	-2,136	-24.89	-20.73

자료: 저자 작성

2) 함경북도

1980년대 초반 대비 함경북도 해안선의 위치 변화를 살펴보면 아래의 표와 같다(표 3-5). 라선특별시의 해안선 위치 변화는 약 1km 간격의 정선 330개를 활용하여 분석하였다. 그 결과, 1980년대 후반은 1980년대 초반에 비하여 전체 해안선이 총 1,841m 후퇴하였으며, 이를 환산하면 모든 정선이 평균적으로 5.58m 후퇴한 것으로 볼 수 있다. 그 이후에도 모든 시점에 1980년대의 해안선 위치보다 육역 방향으로 후퇴해있는 것으로 나타났다. 해안선 위치 변화량이 가장 큰 시기는 2010년대 후반으로, 직전 시기 대비 전체 해안선 8,573m, 정선 당 평균 25.98m 후퇴하였다. 40년(1980~2020년) 동안의 전반적인 위치 변화를 요약하면, 전체 해안선은 9,068m, 정선 당 평균적으로 27.48m 후퇴하였다. 직전 시기에 비하여 해안선이 상대적으로 전진한 경우는 1990년대 후반과 2000년대 후반 두 시점인 것으로 나타났다.

〈표 3-5〉 함경북도 해안선 위치 변화

단위: m, 기준: 1980년대 초반

구분	기준 대비 전체 해안선 위치 변화	5년간 전체 해안선 위치 변화	기준 대비 정선 당 평균 위치 변화	5년간 정선 당 평균 위치 변화
1980 초반	-		-	
1980 후반	-1,841	-1,841	-5.58	-5.58
1990 초반	-3,829	-1,988	-11.60	-6.02
1990 후반	-11,922	-8,093	-36.13	-24.52
2000 초반	-4,881	7,040	-14.79	21.33
2000 후반	-8,566	-3,684	-25.96	-11.16
2010 초반	-495	8,071	-1.50	24.46
2010 후반	-9,068	-8,573	-27.48	-25.98

자료: 저자 작성

3) 함경남도²⁷⁾

1980년대 초반 대비 함경남도 해안선의 위치 변화를 살펴보면 아래의 표와 같다(표 3-6). 함경남도의 해안선 위치 변화는 약 1km 간격의 정선 318개를 활용하여 분석하였다. 그 결과, 1980년대 후반은 1980년대 초반에 비하여 전체 해안선이 총 636m 후퇴하였으며, 이를 환산하면 모든 정선이 평균적으로 2.00m 후퇴한 것으로 볼 수 있다. 1980년대 후반과 1990년대 후반, 그리고 2010년대 후반에는 해안선이 후퇴하였으며, 1990년대 초반, 2000년대 초반, 2000년대 후반 및 2010년대 초반에는 해안선이 전진하는 국면이었다. 1980년대와 비교할 때 해안선이 해역쪽으로 가장 많이 전진한 시기는 2010년대 초반으로, 전체 해안선은 5,749m, 정선 당 평균 19.16m 전진해 있었다. 해안선 위치 변화량이 가장 큰 시기는 2000년대 후반으로, 직전 시기 대비 전체 해안선 5,749m, 정선 당 평균 19.16m 전진하였다. 40년(1980~2020년) 동안의 전반적인 위치 변화를 요약하면, 전체 해안선은 2,092m, 정선 당 평균적으로 6.58m 전진하였다.

〈표 3-6〉 함경남도 해안선 위치 변화

단위: m, 기준 : 1980년대 초반

구분	기준 대비 전체 해안선 위치 변화	5년간 전체 해안선 위치 변화	기준 대비 정선 당 평균 위치 변화	5년간 정선 당 평균 위치 변화
1980 초반	-		-	
1980 후반	-636	-636	-2.00	-2.00
1990 초반	95	730	0.30	2.30
1990 후반	-233	-328	-0.73	-1.03
2000 초반	1,028	1,261	3.23	3.96
2000 후반	4,420	3,393	14.83	11.60
2010 초반	5,749	1,329	19.16	4.33
2010 후반	2,092	-3,657	6.58	-12.58

자료: 저자 작성

27) 2005년 123-125, 287-306번 정선 제외, 2010년 287-301번 제외

4) 강원도(북한)

1980년대 초반 대비 강원도(북한) 해안선의 위치 변화를 살펴보면 아래의 표와 같다(표 3-7). 강원도(북한)의 해안선 위치 변화는 약 1km 간격의 정선 232개를 활용하여 분석하였다. 그 결과, 1980년대 후반은 1980년대 초반에 비하여 전체 해안선이 총 1,282m 후퇴하였으며, 이를 환산하면 모든 정선이 평균적으로 5.53m 후퇴한 것으로 볼 수 있다. 1980년대 후반과 1990년대 초반, 2000년대 후반 및 2010년대 초반에는 해안선이 후퇴하였으며, 1990년대 후반, 2000년대 초반, 2010년대 후반은 해안선이 전진하는 국면이었다. 1980년대와 비교할 때 해안선이 해역쪽으로 가장 많이 전진한 시기는 2000년대 초반으로, 전체 해안선은 3,823m, 정선 당 평균 16.48m 전진해 있었다. 이는 직전 시기 대비 전체 해안선은 4,592m, 정선 당 평균 19.81 전진한 것이다. 40년(1980~2020년) 동안의 전반적인 위치 변화를 요약하면, 전체 해안선은 2,262m, 정선 당 평균적으로 9.75m 전진하였다.

〈표 3-7〉 강원도(북한) 해안선 위치 변화

단위: m, 기준 : 1980년대 초반

구분	기준 대비 전체 해안선 위치 변화	5년간 전체 해안선 위치 변화	기준 대비 정선 당 평균 위치 변화	5년간 정선 당 평균 위치 변화
1980 초반	-		-	
1980 후반	-1,282	-1,282	-5.53	-5.53
1990 초반	-1,762	-480	-7.60	-2.07
1990 후반	-770	993	-3.33	4.26
2000 초반	3,823	4,592	16.48	19.81
2000 후반	2,302	-1,521	9.92	-6.55
2010 초반	108	-2,194	0.47	-9.46
2010 후반	2,262	2,154	9.75	9.28

자료: 저자 작성

5) 강원도(남한)

1980년대 초반 대비 강원도(남한) 해안선의 위치 변화를 살펴보면 아래의 표와 같다(표 3-8). 강원도(남한)의 해안선 위치 변화는 약 1km 간격의 정선 218개를 활용하여 분석하였다. 그 결과, 1980년대 후반은 1980년대 초반에 비하여 전체 해안선이 총 47m 후퇴하였으며, 이를 환산하면 모든 정선이 평균적으로 0.22m 후퇴한 것으로 볼 수 있다. 직전 시기 대비 해안선이 전진한 시기는 1990년대 초반, 2000년대 초반, 2000년대 후반, 2010년대 초반이며, 1980년대 후반, 1990년대 후반, 2010년대 후반은 해안선이 후퇴하였다. 해안선 위치 변화량이 가장 큰 시기는 1990년대 초반으로, 직전 시기 대비 전체 해안선 3,328m, 정선 당 평균 15.48m 전진하였다. 40년(1980~2020년) 동안의 전반적인 위치 변화를 요약하면, 전체 해안선은 6,044m, 정선 당 평균적으로 27.72m 전진하였다. 2000년대 초반에 전진한 해안선이 최근까지 큰 변화 없이 유지되고 있는 점이 특징적이다.

〈표 3-8〉 강원도(남한) 해안선 위치 변화

단위: m, 기준 : 1980년대 초반

구분	기준 대비 전체 해안선 위치 변화	5년간 전체 해안선 위치 변화	기준 대비 정선 당 평균 위치 변화	5년간 정선 당 평균 위치 변화
1980 초반	-		-	
1980 후반	-47	-47	-0.22	-0.22
1990 초반	3,328	3,375	15.27	15.48
1990 후반	3,127	-201	14.34	-0.92
2000 초반	5,520	2,393	25.32	10.97
2000 후반	6,035	515	27.68	2.36
2010 초반	7,380	1,345	33.85	6.17
2010 후반	6,044	-1,336	27.72	-6.13

자료: 저자 작성

6) 경상북도

1980년대 초반 대비 경상북도 해안선의 위치 변화를 살펴보면 아래의 표와 같다(표 3-9). 경상북도의 해안선 위치 변화는 약 1km 간격의 정선 252개를 활용하여 분석하였다. 그 결과, 1980년대 후반은 1980년대 초반에 비하여 전체 해안선이 총 2,505m 후퇴하였으며, 이를 환산하면 모든 정선이 평균적으로 9.94m 후퇴한 것으로 볼 수 있다. 직전 시기 대비 해안선이 전진한 시기는 1990년대 초·후반, 2000년대 후반 및 2010년대 후반이며, 1980년대 후반, 2000년대 초반, 2010년대 초반은 해안선이 후퇴하였다. 1980년대와 비교할 때 해안선이 해역쪽으로 가장 많이 전진한 시기는 1990년대 후반으로, 전체 해안선은 4,612m, 정선 당 평균 18.30m 전진해 있었다. 해안선 위치 변화량이 가장 큰 시기는 1990년대 초반으로, 직전 시기 대비 전체 해안선 4,431m, 정선 당 평균 17.58m 전진하였다. 40년(1980~2020년) 동안의 전반적인 위치 변화를 요약하면, 전체 해안선은 4,059m, 정선 당 평균적으로 16.11m 전진하였다.

〈표 3-9〉 경북 해안선 위치 변화

단위: m, 기준 : 1980년대 초반

구분	기준 대비 전체 해안선 위치 변화	5년간 전체 해안선 위치 변화	기준 대비 정선 당 평균 위치 변화	5년간 정선 당 평균 위치 변화
1980 초반	-		-	
1980 후반	-2,505	-2,505	-9.94	-9.94
1990 초반	1,925	4,431	7.64	17.58
1990 후반	4,612	2,686	18.30	10.66
2000 초반	1,486	-3,126	5.90	-12.40
2000 후반	2,402	916	9.53	3.64
2010 초반	103	-2,299	0.41	-9.12
2010 후반	4,059	3,956	16.11	15.70

자료: 저자 작성

7) 울산광역시

1980년대 초반 대비 울산광역시 해안선의 위치 변화를 살펴보면 아래의 표와 같다(표 3-10). 울산광역시의 해안선 위치 변화는 약 1km 간격의 정선 66개를 활용하여 분석하였다. 그 결과, 1980년대 후반은 1980년대 초반에 비하여 전체 해안선이 총 223m 후퇴하였으며, 이를 환산하면 모든 정선이 평균적으로 3.38m 후퇴한 것으로 볼 수 있다. 직전 시기 대비 해안선이 전진한 시기는 1990년대 초반, 1990년대 후반, 2000년대 후반 및 2010년대 후반이며, 1980년대 후반, 2000년대 초반, 2010년대 초반은 해안선이 후퇴하였다. 해안선 위치 변화량이 가장 큰 시기인 2000년대 후반에는 직전 시기 대비 전체 해안선 3,845m, 정선 당 평균 58.26m 전진하였다. 40년(1980~2020년) 동안의 전반적인 위치 변화를 요약하면, 전체 해안선은 6,553m, 정선 당 평균적으로 99.29m 전진하였다. 울산광역시는 울산항, 울산신항 건설 등의 영향으로, 해안선이 1980년대 초반 대비 상당량 전진한 것이 특징적이다.

〈표 3-10〉 울산광역시 해안선 위치 변화

단위: m, 기준 : 1980년대 초반

구분	기준 대비 전체 해안선 위치 변화	5년간 전체 해안선 위치 변화	기준 대비 정선 당 평균 위치 변화	5년간 정선 당 평균 위치 변화
1980 초반	-		-	
1980 후반	-223	-223	-3.38	-3.38
1990 초반	1,908	2,131	28.91	32.29
1990 후반	2,189	281	33.16	4.25
2000 초반	1,100	-1,089	16.67	-16.49
2000 후반	4,945	3,845	74.93	58.26
2010 초반	3,812	-1,134	57.75	-17.18
2010 후반	6,553	2,742	99.29	41.54

자료: 저자 작성

8) 부산광역시

1980년대 초반 대비 부산광역시 해안선의 위치 변화를 살펴보면 아래의 표와 같다(표 3-11). 부산광역시의 해안선 위치 변화는 약 1km 간격의 정선 34개를 활용하여 분석하였다. 그 결과, 1980년대 후반은 1980년대 초반에 비하여 전체 해안선이 총 337m 후퇴하였으며, 이를 환산하면 모든 정선이 평균적으로 9.91m 후퇴한 것으로 볼 수 있다. 직전 시기 대비 해안선이 후퇴한 시기는 1980년대 후반과 2010년대 후반이며 그 외 다른 시기는 모두 해안선이 전진하였다. 해안선 위치 변화량이 가장 큰 시기인 2010년대 초반에는 직전 시기 대비 전체 해안선 686m, 정선 당 평균 20.17m 후퇴하였다. 40년(1980~2020년) 동안의 전반적인 위치 변화를 요약하면, 전체 해안선은 652m, 정선 당 평균적으로 11.35m 전진하였다. 이는 앞서 살펴본 바와 같이 대변항 등 항만개발과 매립 등 인위적 요인의 영향으로 판단할 수 있다.

〈표 3-11〉 부산광역시 해안선 위치 변화

단위: m, 기준: 1980년대 초반

구분	기준 대비 전체 해안선 위치 변화	5년간 전체 해안선 위치 변화	기준 대비 정선 당 평균 위치 변화	5년간 정선 당 평균 위치 변화
1980 초반	-		-	
1980 후반	-337	-337	337	-9.91
1990 초반	-91	246	246	-2.68
1990 후반	375	466	466	11.03
2000 초반	642	267	267	18.89
2000 후반	952	310	310	28.01
2010 초반	266	-686	686	7.84
2010 후반	652	386	386	19.18

자료: 저자 작성

제2절 주요 연안지역의 해안선 변화 분석

이 장의 2절은 북한 동해안의 주요 연안지역 5개소를 대상으로 2005년 전후와 2020년 전후에 15년 간격으로 수집한, 고해상도 위성영상 기반의 해안선 조사 결과를 활용하여 두 시점의 해안선 변화 분석 결과를 기술하였다. 조사에 활용한 위성영상은 2005년 전후의 경우 OrbView-3이며 2020년 전후의 경우 GeoEye-1 및 WorldView 영상으로 공간해상도는 공통적으로 1m이다. 이는 장기 해안선 변화 분석에 활용한 LANDSAT 영상과 비교 시 900배 정밀한 것으로, 원자료 유형에 따른 차이를 알아보기 위하여 2010년대 후반의 LANDSAT 영상과 2020년 무렵의 고해상도 위성영상을 활용하여 각각 조사한 해안선 자료를 비교·대조하였다.

1. 단위 해빈 및 정선별 해안선 길이 변화

고해상도 위성영상을 활용하여 조사한 북한 동해안의 주요 연안지역별 해안선 변화는 아래의 표와 같다(표 3-12).

〈표 3-12〉 북한 주요 연안지역의 해안선 길이 변화

단위: m, %

주요 연안지역	2004~2005년	2020~2021년	해안선 길이 변화
나진	11,168	14,214	3,045 (▲ 27.3)
선봉	11,380	12,752	1,372 (▲ 12.1)
신포	19,020	23,160	4,141 (▲ 21.8)
문천	10,042	16,449	6,407 (▲ 63.8)
원산	18,846	20,504	1,658 (▲ 8.8)
합계	70,455	87,079	16,623 (▲ 23.6)

자료: 저자 작성

고해상도 위성영상에 기반한 해안선 산출 결과를 활용할 경우 북한 동해안에 위치한 주요 연안지역의 해안선 길이는 2005년의 70,455m에서 2020년에는 87,079m로 15년 동안 약 17km 증가하였다. 이는 해당 지역에서 해안선의 길이가 매년 1km 이상 증가한 것을 의미하며, 2005년 주요 연안지역의 해안선 길이를 기준으로 증가량을 환산할 경우 약 23.6%로 높은 수치로 나타났다. 해안선 길이는 모든 주요 연안지역에서 공통적으로 증가하는 양상이 나타났으며, 구체적으로 단위 지역별 변화량을 기술하면 아래와 같다.

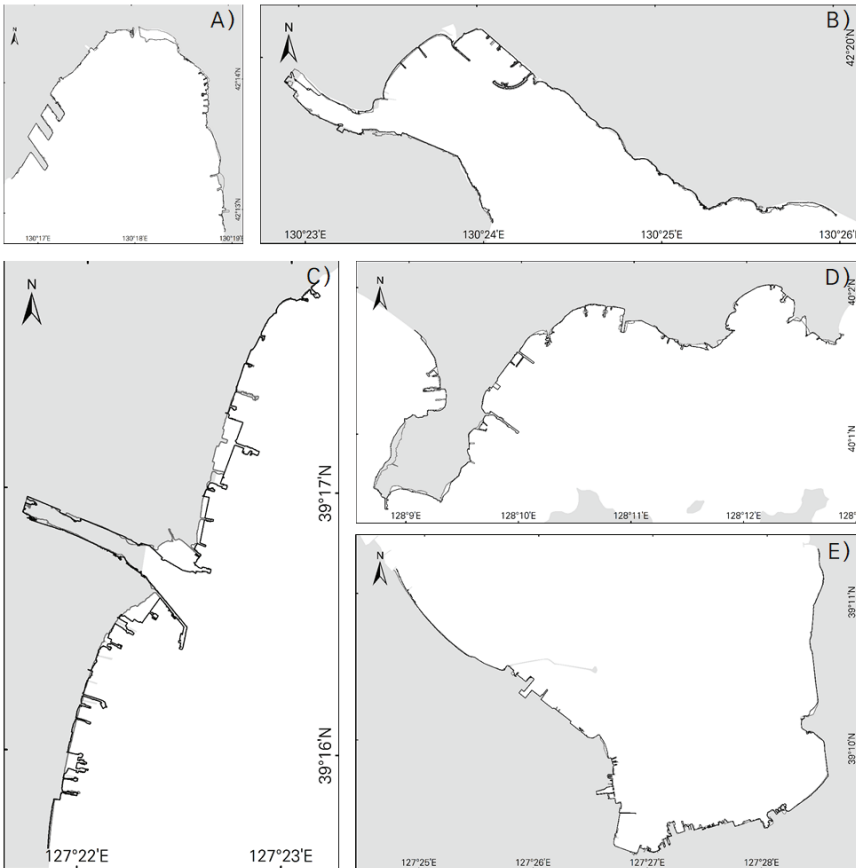
먼저 라선특별시에 위치한 나진시 연안지역의 해안선 길이는 2005년의 경우 11,168m였으나 2020년에는 14,214m로 3,045m 증가하였다. 이를 2005년의 해안선 길이를 기준으로 환산하면 증가율은 27.3%이다. 라선특별시에 위치한 또다른 주요 연안지역인 선봉시의 경우 2005년에는 해안선 길이가 11,380m였으며 2020년에는 12,752m로 나타나 증가량(1,372m)에는 차이가 있으나 증가 경향성(12.1%)을 확인할 수 있었다.

다음으로 함경남도에 위치한 주요 연안지역인 신포시의 경우 2005년의 해안선 길이가 19,020m로, 분석을 수행한 북한 동해안의 주요 연안지역 가운데 가장 긴 것으로 나타났다. 2020년의 해안선 길이도 직전 시기 대비 21.8% 증가한 23,160m로 조사되었으며 증가량은 4,141m에 달하는 것으로 나타났다. 마찬가지로 함경남도에 위치한 문천시의 경우 2020년의 해안선이 16,449m인데, 10,042m로 나타난 2005년과 비교할 때 해안선 증가량이 여타 주요 연안지역 대비 가장 큰 6,407m로 나타났으며, 증가율 또한 63.8%로 월등히 높았다. 마지막으로 원산시의 경우 2005년의 해안선 길이는 18,846m로 신포시 다음으로 해안선의 규모가 컸으나, 2020년에는 20,504m로 나타나 증가량과 증가율이 각각 1,658m, 8.8%로 여타 주요지역 대비 적은 수준이었다.

북한 주요 연안지역에서 두드러지는 해안선 길이의 증가는 주로 항만개발에 따른 부두 및 방파제 건설에 기인한다. 해당 지역의 해안선 변화를 지도로 살펴보면 연안해역의 매립을 통하여 기존의 비교적 단순한 자연해안선을 지형적으로 요철이 많은 부두와 방파제 등 인공해안선으로 변형하였음을 파악할 수 있다.

〈그림 3-8〉 북한 주요 연안지역 해안선의 시계열 변화(진할수록 최근 해안선)

A) 나진, B)선봉, C)문천, D)신포, E)원산



자료: 저자 작성

2. 단위 해빈 및 정선별 해안선 위치 변화

1) 나진

나진시 연안지역의 정선별 해안선 위치 변화 분석은 2004년과 2021년 영상을 활용하였다. 2004년을 기준연도로 설정하고, 변화 분석을 실시하였다. 결과를 종합하면 나진시 연안해역은 전체 해안선 1,333m, 정선 당 19.33m의 해안선 전진이 진행되었다. 구역별로 살펴보면 연안지역 중앙부에서 해안선 전진이 많이 발생하였으며, 이후 북부와 남부 순서였다. 구체적으로 북부의 경우 전체 해안선 410m, 정선 당 17.84m, 중앙부의 경우 전체 해안선 891m, 정선 당 38.73m, 남부의 경우 전체 해안선 32m, 정선 당 1.40m 전진하였다. 나진시 연안지역 가운데로 유입되는 하천의 동안에서 매립을 진행한 것이 주된 변화 요인으로 추정된다.

〈표 3-13〉 나진시 연안지역의 해안선 위치 변화

				단위: m
구분	2004년 (기준연도)	기준연도 대비 2021년 전체 해안선 위치 변화량	기준연도 대비 2021년 정선 당 평균 위치 변화량	정선수
북	0	410	17.84	23
중앙	0	891	38.73	23
남	0	32	1.40	23
전체	0	1,333	19.33	69

자료: 저자 작성

2) 선봉

선봉시 연안지역의 정선별 해안선 위치 변화 분석은 2004년과 2021년 영상을 활용하였다. 2004년을 기준연도로 설정하고, 변화 분석을 실시하였다. 결과를 종합하면 선봉시 연안해역은 전체 해안선 103m, 정선 당 1.06m의 해안선 후퇴가 진행되었다. 구역별로 살펴보면 연안지역의 북부와

남부에서 후퇴가, 중앙부에서 전진이 발생하였다. 구체적으로 북부의 경우 전체 해안선 204m, 정선 당 6.17m, 남부의 경우 전체 해안선 58m, 정선 당 1.82m 후퇴하였으며, 중앙부는 전체 해안선 159m, 정선 당 4.96m 전진하였다. 전반적으로 선봉시 연안지역은 큰 변화가 발생하지 않은 점이 특징이다.

〈표 3-14〉 선봉시 연안지역의 해안선 위치 변화

단위: m,

구분	2004년 (기준연도)	기준연도 대비 2021년 전체 해안선 위치 변화량	기준연도 대비 2021년 정선 당 평균 위치 변화량	정선수
북	0	-204	-6.17	33
중앙	0	159	4.96	32
남	0	-58	-1.82	32
전체	0	-103	-1.06	97

자료: 저자 작성

3) 신포

신포시 연안지역의 정선별 해안선 위치 변화 분석은 2004년과 2021년 영상을 활용하였다. 2004년을 기준연도로 설정하고, 변화 분석을 실시하였다. 결과를 종합하면 신포시 연안지역은 전체 해안선 1,333m, 정선 당 19.33m의 해안선 전진이 진행되었다. 구역별로 살펴보면 연안지역의 남부에서 해안선 전진이 많이 발생하였으며, 이후 중앙부와 북부 순서였다. 구체적으로 북부의 경우 전체 해안선 213m, 정선 당 6.45m, 중앙부의 경우 전체 해안선 364m, 정선 당 11.03m, 남부의 경우 전체 해안선 491m, 정선 당 14.89m 전진하였다. 신포시 연안지역 남부에 존재하는 육계사주에 대해 매립을 진행한 것이 주된 변화 요인으로 추정된다.

〈표 3-15〉 신포시 연안지역의 해안선 위치 변화

단위: m

구분	2004년 (기준연도)	기준연도 대비 2021년 전체 해안선 위치 변화량	기준연도 대비 2021년 정선 당 평균 위치 변화량	정선수
북	0	213	6.45	33
중앙	0	364	11.03	33
남	0	491	14.89	33
전체	0	1,068	10.79	99

자료: 저자 작성

4) 문천

문천시 연안지역의 정선별 해안선 위치 변화 분석은 2004년과 2020년 및 2021년 영상을 활용하였다. 2004년을 기준연도로 설정한 변화 분석 결과를 종합하면, 이 지역은 전체 해안선 2,082m, 정선 당 46.26m의 해안선 전진이 진행되었다. 구역별로는 연안지역의 중앙부에서 해안선 전진이 많이 발생하였으며, 이후 남부와 북부 순서였다. 구체적으로 북부의 경우 전체 해안선 90m, 정선 당 6.00m, 중앙부의 경우 전체 해안선 1,833m, 정선 당 122.21m, 남부의 경우 전체 해안선 159m, 정선 당 10.58m 전진하였다. 문천시 연안지역의 가운데로 유입되는 하천의 양안에서 매립을 진행하고 해안 시설을 설치한 것이 주된 변화 요인으로 추정된다.

〈표 3-16〉 문천시 연안지역의 해안선 위치 변화

단위: m

구분	2004년 (기준연도)	기준연도 대비 2021년 전체 해안선 위치 변화량	기준연도 대비 2021년 정선 당 평균 위치 변화량	정선수
북	0	90	6.00	15
중앙	0	1,833	122.21	15
남	0	159	10.58	15
전체	0	2,082	46.26	45

자료: 저자 작성

5) 원산

원산시 연안지역의 정선별 해안선 위치 변화 분석은 2004년과 2020년 및 2021년 영상을 활용하였다. 2004년을 기준연도로 설정하고, 변화 분석을 실시하였다. 결과를 종합하면 원산시 연안지역은 전체 해안선 797m, 정선 당 7.38m의 해안선 전진이 진행되었다. 구역별로 살펴보면 연안지역의 남부에서 해안선 전진이 많이 발생하였으며, 이후 중앙부와 북부 순서였다. 구체적으로 북부의 경우 전체 해안선 30m, 정선 당 0.82m, 중앙부의 경우 전체 해안선 346m, 정선 당 9.62m, 남부의 경우 전체 해안선 421m, 정선 당 11.70m 전진하였다. 원산시 연안지역의 남부에 존재하는 원산국제공항 전면 해안부의 도류제, 공항 관련 해안 시설의 설치가 주된 변화 요인으로 추정된다.

〈표 3-17〉 원산시 연안지역의 해안선 위치 변화

단위: m

구분	2004년 (기준연도)	기준연도 대비 2021년 전체 해안선 위치 변화량	기준연도 대비 2021년 정선 당 평균 위치 변화량	정선수
북	0	30	0.82	36
중앙	0	346	9.62	36
남	0	421	11.70	36
전체	0	797	7.38	108

자료: 저자 작성

3. 원격탐사 자료 유형별 해안선 비교분석

1) 해안선 길이 비교·대조

2010년대 후반의 LANDSAT 영상과 2020년 무렵 고해상도 위성영상을 활용하여 조사한 북한 동해안의 주요 연안지역별 해안선 산출 결과는 아래

의 표와 같다(표 3-18). 2020년을 전후로 유사한 시기에 촬영한 원격탐사 자료 가운데 LANDSAT 영상을 활용한 주요 연안지역 5개소의 해안선 길이 조사 결과를 모두 더한 결과, 총합 58,330m로 나타났다. 한편, 고해상도 위성영상인 WorldView 2/3와 GeoEye-1 영상을 활용한 조사 결과는 LANDSAT에 비해 훨씬 많은 89,079m로 나타났다. 서로 다른 원격탐사 자료에 기반을 둔 해안선 길이 조사 결과 간의 차이는 28,749m로, 이는 LANDSAT 영상을 활용한 해안선 길이 조사 결과의 절반 수준(49.3%)에 해당하는 양이며, 고해상도 위성영상을 활용한 조사 결과를 기준으로 하더라도 LANDSAT 기반의 해안선 조사 결과에 33% 이상의 해안선이 누락됨을 의미한다. 구체적으로 단위 지역별 해안선 조사 결과의 차이량을 기술하면 다음과 같다.

〈표 3-18〉 원격탐사 자료 유형별 해안선 길이 조사 결과

단위: m, %(LANDSAT 영상 대비 고해상도 위성영상 기반 해안선 길이)

주요 연안지역	LANDSAT	WorldView/GeoEye	차이
나진	8,970	14,214	5,244 (▲ 58.5)
선봉	12,719	12,752	33 (▲ 0.3)
신포	13,674	23,160	9,486 (▲ 69.4)
문천	8,025	16,449	8,424 (▲ 105.0)
원산	14,942	20,504	5,562 (▲ 37.2)
합계	58,330	87,079	28,749 (▲ 49.3)

자료: 저자 작성

먼저 라선특별시에 위치한 나진시 연안지역의 해안선 길이는 LANDSAT 영상을 활용한 경우 8,970m로 나타났으며 고해상도 위성영상을 활용한 경우에는 14,214m로, 그 차이가 5,200km를 초과하였다. 이러한 차이량은 LANDSAT 영상 기반의 해안선 조사 결과 대비 59%에 해당하는 많은 양으로 나타났다. 한편, 나진시와 유사한 지역에 있어 환경조건 또한 크게 다르지 않을 것으로 예상하는 선봉시는 LANDSAT 영상과 고해상도 위성

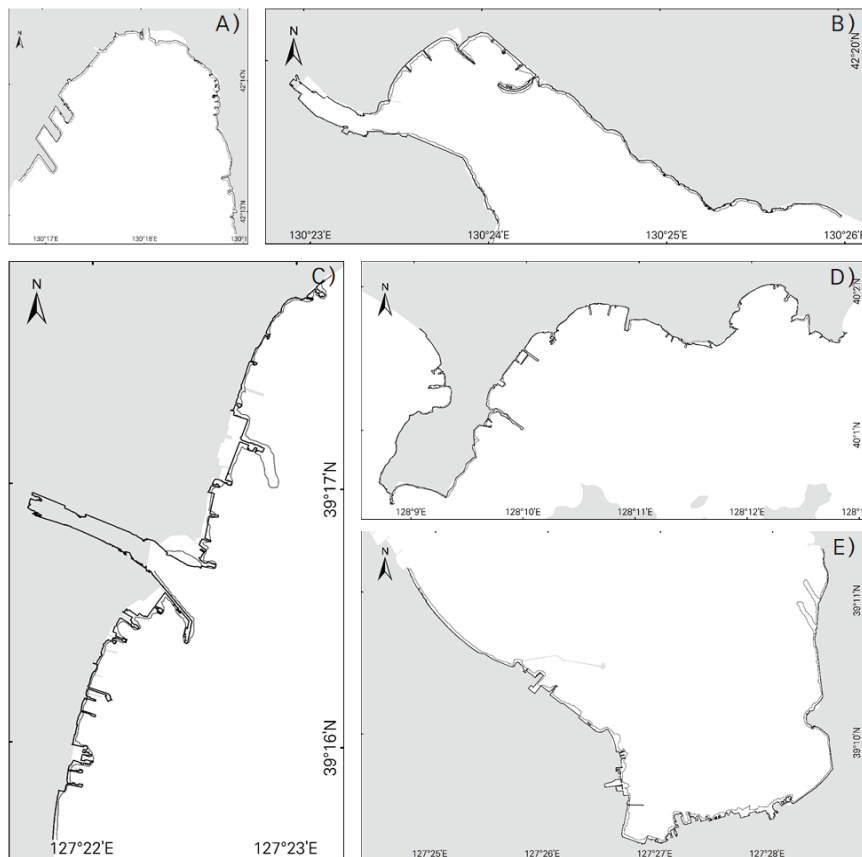
영상 기반의 해안선 조사 결과와 각각 12,719m와 12,752m로, 큰 차이 없이 서로 유사하였다.

원격탐사자료 유형에 따른 해안선 조사 결과의 차이량이 가장 큰 지역은 함경남도에 위치한 신포시 연안지역이었다. 신포시의 해안선 길이는 고해상도 위성영상으로 조사한 결과 23,160m로 전체 주요 연안지역 5개소 가운데 가장 긴 것으로 나타난 반면, LANDSAT 영상을 활용한 조사 결과에서는 13,674m로 선봉시의 해안선 길이와 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 원격탐사자료 유형에 따른 조사 결과의 차이는 LANDSAT 기반 해안선 조사 결과의 약 70%에 해당하는 9,500m 수준이었다.

이어서 문천시의 경우 LANDSAT과 고해상도 위성영상을 활용한 해안선 길이 조사 결과는 각각 16,449m와 8,025m로 신포시의 사례와 유사하게 큰 차이를 보였다. 특히 고해상도 위성영상을 활용한 조사 결과가 LANDSAT 영상을 활용한 경우의 두 배 이상으로 많았다. 마지막으로 원산시 연안지역의 경우 LANDSAT 영상을 활용한 장기 시계열 변화 조사에서는 2020년대의 해안선 길이가 58,330m로 나타났으나 고해상도 위성영상을 활용한 분석 결과는 그보다 약 37%(5,562m) 많은 87,079m였다.

연안지역별 비교·대조 결과를 종합해보면, 모든 연안지역에서 공통적으로 LANDSAT 영상보다 고해상도 위성영상을 활용한 경우에 탐지한 해안선이 많은 것으로 나타났다. 이는 지형적으로 복잡한 개발지역을 조사할 때 공간해상도가 30m 수준으로 비교적 낮은 LANDSAT 영상의 신뢰도가 연구자의 기대치에 비하여 낮을 수 있음을 잘 보여주는 사례이다. 심층연구를 수행한 주요 연안지역의 해안선 조사 결과를 비교한 지도를 살펴보면, 공통적으로 LANDSAT 영상을 활용한 경우에 해안선의 위치가 전면부로 돌출되어 있으며 요철부분 또한 비교적 단순화한 형태임을 파악할 수 있다.

〈그림 3-9〉 북한 주요 연안지역의 원격탐사자료 유형별 해안선 조사 결과 비교
 LANDSAT(회색), 고해상도위성영상(흑색)
 A) 나진, B)선봉, C)문천, D)신포, E)원산



자료: 저자 작성

2) 해안선 위치 비교·대조

(1) 나진

나진시 연안지역의 정선별 해안선 위치 변화 분석은 2019년과 2021년 영상을 활용하였다. 2019년을 기준연도로 설정하고, 변화 분석을 실시하

였다. 결과를 종합하면 나진시 연안지역은 원격탐사 유형에 따라 전체 해안선 1,890m, 정선 당 27.38m의 차이가 나타났다. 전반적으로 고해상도 영상이 Landsat영상에 비해 해안선이 후퇴한 형태로 나타났다. 구역별로 살펴보면 연안지역의 중앙부에서 차이가 가장 컸으며, 이후 남부와 북부 순서였다. 구체적으로 북부의 경우 전체 해안선 475m, 정선 당 20.67m, 중앙부의 경우 전체 해안선 798m, 정선 당 34.68m, 남부의 경우 전체 해안선 617m, 정선 당 26.81m의 차이가 발견되었다.

〈표 3-19〉 나진시 연안지역의 원격탐사 유형별(Landsat, 고해상도) 해안선 위치 차이

단위: m

구분	2019년 (Landsat, 기준연도)	Landsat 대비 2021년 전체 해안선 위치 변화량(고해상도)	Landsat 대비 2021년 정선 당 평균 위치 변화량(고해상도)	정선수
북	0	-475	-20.67	23
중앙	0	-798	-34.68	23
남	0	-617	-26.81	23
전체	0	-1,890	-27.38	69

자료: 저자 작성

(2) 선봉

선봉시 연안지역의 정선별 해안선 위치 변화 분석은 2019년과 2021년 영상을 활용하였다. 2019년을 기준연도로 설정하고, 변화 분석을 실시하였다. 결과를 종합하면 선봉시 연안지역은 원격탐사 유형에 따라 전체 해안선 3,149m, 정선 당 32.46m의 차이가 나타났다. 전반적으로 고해상도 영상이 Landsat영상에 비해 해안선이 후퇴한 형태로 나타났다. 구역별로 살펴보면 연안지역의 남부에서 차이가 가장 컸으며, 이후 중앙부와 북부 순서였다. 구체적으로 북부의 경우 전체 해안선 524m, 정선 당 15.88m, 중앙부의 경우 전체 해안선 743m, 정선 당 23.21m, 남부의 경우 전체 해안선 1,882m, 정선 당 21.08m의 차이가 발견되었다.

〈표 3-20〉 선봉시 연안지역의 원격탐사 유형별(Landsat, 고해상도) 해안선 위치 차이

단위: m

구분	2019년 (Landsat, 기준연도)	Landsat 대비 2021년 전체 해안선 위치 변화량(고해상도)	Landsat 대비 2021년 정선 당 평균 위치 변화량(고해상도)	정선수
북	0	-524	-15.88	33
중앙	0	-743	-23.21	32
남	0	-1,882	-21.08	32
전체	0	-3,149	-32.46	97

자료: 저자 작성

(3) 신포

신포시 연안지역의 정선별 해안선 위치 변화 분석은 2020년과 2021년 영상을 활용하였다. 2020년을 기준연도로 설정하고, 변화 분석을 실시하였다. 결과를 종합하면 신포시 연안지역은 원격탐사 유형에 따라 전체 해안선 4,181m, 정선 당 42.23m의 차이가 나타났다. 전반적으로 고해상도 영상이 Landsat영상에 비해 해안선이 후퇴한 형태로 나타났다. 구역별로 살펴보면 연안지역의 중앙부에서 차이가 가장 컸으며, 이후 남부와 북부 순서였다. 구체적으로 북부의 경우 전체 해안선 1,228m, 정선 당 37.21m, 중앙부의 경우 전체 해안선 1,576m, 정선 당 47.75m, 남부의 경우 전체 해안선 1,377m, 정선 당 41.73m의 차이가 발견되었다.

〈표 3-21〉 신포시 연안지역의 원격탐사 유형별(Landsat, 고해상도) 해안선 위치 차이

단위: m

구분	2020년 (Landsat, 기준연도)	Landsat 대비 2021년 전체 해안선 위치 변화량(고해상도)	Landsat 대비 2021년 정선 당 평균 위치 변화량(고해상도)	정선수
북	0	-1,228	-37.21	33
중앙	0	-1,576	-47.75	33
남	0	-1,377	-41.73	33
전체	0	-4,181	-42.23	99

자료: 저자 작성

(4) 문천

문천시 연안지역의 정선별 해안선 위치 변화 분석은 2019년과 2020년 및 2021년 영상을 활용하였다. 2019년을 기준연도로 설정하고, 변화 분석을 실시하였다. 결과를 종합하면 문천시 연안지역은 원격탐사 유형에 따라 전체 해안선 7271m, 정선 당 16.16m의 차이가 나타났다. 전반적으로 고해상도 영상이 Landsat영상에 비해 해안선이 후퇴한 형태로 나타났다. 구역별로 살펴보면 연안지역의 북부에서 차이가 가장 컸으며, 이후 남부와 중앙부 순서였다. 구체적으로 북부의 경우 전체 해안선 488m, 정선 당 32.52m, 중앙부의 경우 전체 해안선 322m, 정선 당 2.13m, 남부의 경우 전체 해안선 208m, 정선 당 13.85m의 차이가 발견되었다.

〈표 3-22〉 문천시 연안지역의 원격탐사 유형별(Landsat, 고해상도) 해안선 위치 차이
단위: m

구분	2019년 (Landsat, 기준연도)	Landsat 대비 2021년 전체 해안선 위치 변화량(고해상도)	Landsat 대비 2021년 정선 당 평균 위치 변화량(고해상도)	정선수
북	0	-488	-32.52	15
중앙	0	-32	-2.13	15
남	0	-208	-13.85	15
전체	0	-727	-16.16	45

자료: 저자 작성

(5) 원산

원산시 연안지역의 정선별 해안선 위치 변화 분석은 2019년과 2020년 및 2021년 영상을 활용하였다. 2019년을 기준연도로 설정하고, 변화 분석을 실시하였다. 결과를 종합하면 원산시 연안지역은 원격탐사 유형에 따라 전체 해안선 1,741m, 정선 당 48.35m의 차이가 나타났다. 전반적으로 고해상도 영상이 Landsat영상에 비해 해안선이 후퇴한 형태로 나타났다. 구역별로 살펴보면 연안지역의 북부에서 차이가 가장 컸으며, 이후 중앙부와

북부 순서였다. 구체적으로 북부의 경우 전체 해안선 1,741m, 정선 당 48.35m, 중앙부의 경우 전체 해안선 1,232m, 정선 당 34.23m, 남부의 경우 전체 해안선 150m, 정선 당 4.15m의 차이가 발견되었다.

〈표 3-23〉 원산시 연안지역의 원격탐사 유형별(Landsat, 고해상도) 해안선 위치 차이

단위: m

구분	2019년 (Landsat, 기준연도)	Landsat 대비 2021년 전체 해안선 위치 변화량(고해상도)	Landsat 대비 2021년 정선 당 평균 위치 변화량(고해상도)	정선수
북	0	-1,741	-48.35	36
중앙	0	-1,232	-34.23	36
남	0	-150	-4.15	36
전체	0	-3,123	-28.91	108

자료: 저자 작성

04

요약 및 결론

제1절 연구결과 요약

제1장에 기술한 바와 같이 이 연구는 위성영상을 활용하여 한반도 동해안 전역을 대상으로 해안선의 공간적 위상에 대한 장기 시계열 변화를 파악하는 것을 목적으로 수행하였다. 현지조사를 통한 자료 수집과 모니터링 자료의 제약으로 인하여 한반도 연안지역의 통합적이고 장기적인 해안선 변화 파악이 어려운 상황임을 고려하여, 인공위성 기반 원격탐사자료를 분석을 통하여 최근 40년간의 주기적인 해안선 시계열 자료를 구축하였다.

제2장은 일반 연구자가 비교적 용이하게 확보할 수 있는 원격탐사자료를 중점적으로 활용하여 해안선의 시계열 자료를 구축하는 방법론을 기술하였다. 이를 위하여 전통적인 원격탐사기법부터 비교적 최신의 보정기법에 이르기까지 국내외 다양한 선행연구를 참고하여 한반도 동해안의 해안선 조사 및 분석에 필요한 방법론을 설정하였다. 또한 유·무료로 취득한 고해상도 위성영상을 활용하여 유사한 방법론을 적용하여 해안선을 산출하였다. 이후 상이한 원격탐사자료 유형별 해안선 조사 결과를 비교·대조하는 방법론을 설정하였다. 이를 통하여 공간해상도가 비교적 낮은 LANDSAT 영상

기반의 해안선 조사 결과를 객관적으로 검토할 수 있을 것으로 기대하였다.

제3장은 제2장에 기술한 방법론을 적용하여 산출한, 시기 및 원자료 유형별 해안선 자료를 이용하여 한반도 동해안 전역의 해안선 시계열 변화를 분석하였다. 이 때, 한반도 전체, 남·북한, 광역행정구역, 주요 연안지역 및 100m 또는 1km 간격의 정선 등 국가적 규모에서 국지적 규모에 이르기 까지 다양한 공간 규모와 단위별로 해안선의 길이와 위치 이동을 분석하였다. 분석 결과, 한반도 동해안 지역은 환경적 조건이 유사함에도 불구하고 해안선의 시계열 변화에 남한과 북한의 지역적 차이가 뚜렷하게 구분할 수 있는 수준인 것으로 나타났다. 특히 남한에서 해안선의 전진을 동반한 길이 증가 현상이 두드러지게 나타났는데, 이는 주로 연안지역의 매립이나 항만개발 등 인위적 개변에 기인한 것으로 판단된다.

2005년과 2020년 무렵의 고해상도 위성영상을 활용하여 비교적 고밀도의 개발행위가 이루어진 북한의 주요 연안지역을 대상으로 해안선 변화를 분석한 결과도 남한의 거시적인 변화와 유사한 경향성을 확인하였다. 한편, 장기 시계열 변화 조사에 활용한 LANDSAT 영상과 고해상도 위성영상 등 상이한 원격탐사자료를 활용한 해안선 조사 결과를 상호 비교·대조함으로써 연구 결과를 비판적으로 검토하였다. 전술한 과정을 통하여 공간해상도가 낮은 LANDSAT 영상 기반의 해안선 조사 결과의 본격적인 활용에 앞서 자료에 내재한 본질적인 한계점을 파악하였다. 구체적으로 LANDSAT 기반의 해안선 조사 결과는 고해상도 위성영상을 활용한 경우에 비하여 실제 연안지역의 요철과 같이 지형적으로 드나듦이 복잡한 지역을 재현하는 데 제약이 큰 것을 확인하였다. 또한 공간해상도가 선형으로는 30배, 면형으로는 900배 낮은 한계점에 기인하여 해안선의 위치 또한 고해상도 위성영상을 활용한 조사 결과에 비하여 해역 방향으로 돌출하여 분포하는 것을 확인하였다.

제2절 결론 및 제언

한반도는 지정학적 이유로 민간인의 출입을 제한한 완충구역이 존재하여 한반도 전역을 대상으로 거시적인 연구를 수행하기에는 많은 제약이 있다. 예를 들어 남한의 연구자는 북한 연안지역에서 현장조사를 수행하기 어렵고, 일부 조사결과 또한 외부 공개에 제약이 많다. 북한의 연구자 또한 사정은 이와 유사할 것이다. 이 연구는 전술한 사정을 고려하여 현장조사에 대한 대안적 접근으로서 원격탐사를 통하여 한반도 동해안 전역을 대상으로 하여 비교적 장기적인 해안선 시계열 자료를 구축하였다. 이 연구를 통하여 구축한 LANDSAT 영상 기반의 해안선 자료는 연구지역을 달리 적용할 때에도 방법론적·경제적 측면에서 장점이 있다. 먼저 단파적외선 파장대역 영상 활용시 가시광선 파장대역 영상만을 활용하는 경우에 비하여 파랑이나 적·녹조 등 환경적 요인에 의한 영향을 저감하여 용이하고 신속하게 해안선을 조사할 수 있다. 다음으로 일반인에게 무료로 공개된 위성영상의 특성상 16일 또는 최대 8일 주기로 반복 조사를 할 수 있다는 점은 경제적 측면에서 큰 장점이라 할 수 있다. 여기에 Sentinel 등 유사한 위성영상과 연계할 경우 활용성을 더욱 높일 수 있을 것으로 기대된다.

앞서 논의한 바와 같이 LANDSAT 영상을 활용한 해안선 조사 결과는 원자료에 내재한 본질적인 한계점으로 인하여 해안선 자료를 요구하는 다양한 연구분야에 폭넓게 활용하기에는 제약이 있다. 그러나 해안선의 드러남이 비교적 단순한 자연해안선 또는 저밀도 개발지역의 경우 전술한 제약사항이 크게 두드러지지 않을 것으로 판단된다. 실제로 고해상도 위성영상을 활용한 해안선 조사 결과와 비교한 지도와 정선자료에서 항만개발 등으로 인하여 소규모의 복잡한 해안선이 분포하는 고밀도 개발지역이 아닌 주변지역에서는 해안선 자료 간의 차이가 줄어드는 것을 확인하였다.

이 연구는 30m와 1m 공간해상도의 위성영상을 각각 이용하여 한반도 동해안 전역의 5년 주기 해안선 자료와 북한 주요 연안지역 5개소의 고해상도 해안선 자료를 구축하는 데 중점을 둔 시범연구이다. 전술한 연구성과물은 향후 이 연구에서 수행한 광역행정구역이나 1km 간격의 정선 단위의 분석보다 작은 공간규모에서 발생하는 변화를 대상으로 추가적인 분석을 수행할 때에도 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 예를 들어 후속연구에서는 기초자치단체 단위의 행정구역이나 표사계 공간규모에서 90m 또는 150m 단위의 정선을 설정하여 해안선의 위치 변화를 분석할 때에도 일정한 수준 이상의 거시적인 변화를 포착하는 데 활용할 수 있을 것이다.

최근 해양분야는 다양한 측면에서 공간자료의 해상도를 높이기 위한 노력이 활발하게 이루어지고 있다. 이 연구는 공간해상도의 차이가 약 900배 수준인 두 자료 기반의 해안선 변화 분석 결과를 상호 비교·대조함으로써 고해상도 자료의 유용성을 방증하였다. 한편, 고해상도 자료는 조사와 분석에 소요되는 시간, 인력, 비용 측면에 제약이 있음을 상기할 필요가 있다. 동일한 플랫폼²⁸⁾을 이용하여 공간해상도가 900배 높은 고해상도 자료를 확보하고자 할 때에는 결국 900배 많은 자료를 수집하여야 한다. 이는 곧 900배의 시간을 들이거나 899개의 장비를 추가로 투입하여야 동일 지역의 자료를 확보할 수 있음을 의미한다. 자료 분석에도 많은 인력이 소요된다. 이 때문에, 보다 효율적인 조사·분석을 위한 기술개발 연구들이 수행되고 있으며, 대표적으로 무인조사장비의 개발 및 활용과 기계학습 등에 기반한 자동화 분석 방법 등이 있다. 그러나 고해상도 자료의 조사·분석 효율이 획기적으로 향상되더라도 모든 분야에 해당 자료를 활용하기보다는 효율이 클 것으로 예상되는 분야와 지역에 집중하는 것이 더 효과적일 수 있다. 이러한 관점에서 공간해상도가 상대적으로 낮은 자료의 활용 방안도 지속적으로 발굴할 필요가 있다. 예를 들어 해안선과 같은 자연현상에 내재한

28) 여기서는 조사에 소요되는 일련의 장비를 총칭

공간 자기상관성²⁹⁾에 주목하여 국지적으로 이상현상이 밀집한 지역을 우선적으로 탐색한 뒤, 해당 지역을 중심으로 고해상도 자료를 활용한 집중 조사를 병행하는 방법을 고려할 수 있다. 다양한 원격탐사자료를 결합 및 융합하여 활용함으로써 개별 자료에 내재한 단점을 상쇄하고 장점을 극대화하는 방안에 대해서도 활발한 논의가 이루어지고 있다. 예를 들어 다중 시기 위성영상을 활용하여 선박과 구름 등 노이즈를 제거하는 방안은 이미 보편적으로 활용하고 있는 방법론 가운데 하나이며, 일부 연구 분야에서는 LANDSAT 영상과 Sentinel 등 특성이 유사한 위성영상을 연계하여 촬영 주기와 파장대역의 제약을 저감하는 방안을 적용하고 있다. 전체 연구대상 지역 중 일부 지역에서 취득한 현장조사 자료에 공간통계기법 및 기계학습 등을 적용하여 원격탐사기법의 정확도를 높이거나 공간해상도를 높이는 공간분할(up-scaling 또는 spatial desegregation) 기법도 한 예이다.

상기한 학술적 접근방향은 공통적으로 자료의 생산보다는 활용 분야에 주안점을 둔다. 동일한 지향점을 둔 연장선상에서 후속연구는 방법론적 측면에서 접근하여, 기 구축한 해안선 자료의 활용성을 제고할 수 있는 보정 기법의 개발과 적용 및 검증에 심도 있게 다룰 수 있을 것이다. 또는 이 연구에서 집중적으로 조명한 대안적 자료와 이를 활용한 정보탐색기법의 활용 폭을 넓히는 방안에 대하여 중점적으로 논의하고자 한다. 특히 연구 성과물의 신뢰수준과 불확도 등에 주목하는 전통적인 논쟁 외에도, 자료의 완전성보다는 충분성에 근거한 수용프로세스와 실무 이행을 위한 리스크 관리방안 등 전향적인 논의들을 심도있게 다룰 필요가 있다.

한반도 동해안 전역의 해안선 조사 및 분석을 통하여 자료를 구축하는 과정에서 겪은 경험들이, 향후 데이터 기반의 정책수립 및 이행 분야에서 리스크 관리와 이를 통한 적극행정 환경 조성에 기여할 수 있는 정책제언 등으로 이어지기를 고대해본다.

29) 프랙탈 이론으로 대표할 수 있는, 공간 규모(scale)와 무관하게 유사한 형태를 보이는 기하학적 구조

참고문헌

국내 문헌

- 국립해양조사원(2012), (국가해양기본조사를 통해 본)우리나라의 해양영토, 국립해양조사원.
- 김찬웅(2019), 태안지역 해빈변화(1967-2017)와 지형학적 분류: 지형반응에서 정책적 활용까지(박사학위, 서울대학교 대학원).
- 문일주(2022), 변화하는 기후에 달라지는 태풍: 시사점과 대응방안, 기상기술정책, 15(1), pp. 63-73.
- 윤공현·송영선(2017), 디지털항공영상을 활용한 방아머리 해빈의 해안선 변화 관측, 대한원격탐사학회지, 33(6), pp. 971-980.
- 임종서(2019), 황해 해안 지형 변화와 취약성에 관한 연구(박사학위, 서울대학교 대학원).

국외 문헌

- Alesheikh, A. A., Ghorbanali, A., & Nouri, N. (2007). Coastline change detection using remote sensing. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 4(1), 61-66.
- Almonacid-Caballer, J., Sanchez-Garcia, E., Pardo-Pascual, J. E., Balaguer-Beser, A. A., & Palomar-Vazquez, J. (2016). Evaluation of annual mean shoreline position deduced from Landsat imagery as a mid-term coastal evolution ind

-
- icator. *Marine Geology*, 372, 79-88.
- Burrough, P. A., van Gaans, P. F., & MacMillan, R. A. (2000). High-resolution landform classification using fuzzy k-means. *Fuzzy sets and systems*, 113(1), 37-52.
- Foody, G. M., Muslim, A. M., & Atkinson, P. M. (2005). Super-resolution mapping of the waterline from remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(24), 5381-5392.
- Markham, B. L., & Helder, D. L. (2012). Forty-year calibrated record of earth-reflected radiance from Landsat: A review. *Remote Sensing of Environment*, 122, 30-40.
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International journal of remote sensing*, 17(7), 1425-1432.
- Pardo-Pascual, J. E., Sanchez-Garcia, E., Almonacid-Caballer, J., Palomar-Vazquez, J. M., Priego De Los Santos, E., Fernandez-Sarria, A., & Balaguer-Beser, A. (2018). Assessing the accuracy of automatically extracted shorelines on microtidal beaches from Landsat 7, Landsat 8 and Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 10(2), 326.
- Splinter, K. D., Harley, M. D., & Turner, I. L. (2018). Remote sensing is changing our view of the coast: Insights from 40 years of monitoring at Narrabeen-Colaroy, Australia. *Remote Sensing*, 10(11), 1744.
- Turner, I. L., Harley, M. D., Short, A. D., Simmons, J. A., Bracs, M. A., Phillips, M. S., & Splinter, K. D. (2016). A multi-decade dataset of monthly beach profile surveys and inshore wave forcing at Narrabeen, Australia. *Scientific data*, 3(1), 1-13.
- Vos, K., Splinter, K. D., Harley, M. D., Simmons, J. A., & Turner, I. L. (2019). CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling & Software*, 122, 104528.
- Wang, X., Liu, Y., Ling, F., Liu, Y., & Fang, F. (2017). Spatio-temporal change detection of Ningbo coastline using Landsat time-series images during 1976-2015. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(3), 68.
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance

- e open water features in remotely sensed imagery. International journal of remote sensing, 27(14), 3025-3033.
- Xu, N. (2018). Detecting coastline change with all available landsat data over 1986?2015: A case study for the state of Texas, USA. Atmosphere, 9(3), 107.
- Yang, J., Seo, D., Lim, H., & Choi, C. (2010). An analysis of coastal topography and land cover changes at Haeundae Beach, South Korea. Acta Astronautica, 67(9-10), 1280-1288.
- Yasir, M., Sheng, H., Fan, H., Nazir, S., Niang, A. J., Salauddin, M., & Khan, S. (2020). Automatic coastline extraction and changes analysis using remote sensing and GIS technology. IEEE Access, 8, 180156-180170.

인터넷 자료

- 해양수산부, 보도자료, “2100년, 우리나라 주변 해역 해수면 73cm 높아질 수도”, https://www.khoa.go.kr/user/bbs/detailBbsList.do?bbsMasterSeq=BOARD_MST_0000000003(검색일자: 2022.12.7.)
- 해양수산부, 보도자료, “우리나라 해수면 지난 30년 동안 평균 9.1cm 높아져”, https://www.khoa.go.kr/user/bbs/detailBbsList.do?bbsMasterSeq=BOARD_MST_0000000003(검색일자: 2022.12.7.)
- 해양수산부, 사전정보공표, “2017년도 연안침식 모니터링 결과”, <https://www.mof.go.kr/article/view.do?articleKey=20593&boardKey=2>(검색일자: 2022.12.7.)
- 해양수산부, 사전정보공표, “2018년도 연안침식 모니터링 결과”, <https://www.mof.go.kr/article/view.do?articleKey=38166&boardKey=2>(검색일자: 2022.12.7.)
- 해양수산부, 사전정보공표, “2019년도 연안침식 모니터링 결과”, <https://www.mof.go.kr/article/view.do?articleKey=38167&boardKey=2>(검색일자: 2022.12.7.)
- 해양수산부, 사전정보공표, “2020년도 연안침식 모니터링 결과”, <https://www.mof.go.kr/article/view.do?articleKey=38786&boardKey=2>(검색일자: 2022.12.7.)
- 해양수산부, 사전정보공표, “2021년도 연안침식 모니터링 결과”, <https://www.mof.go.kr/article/view.do?articleKey=45728&boardKey=2>(검색일자: 2022.12.7.)

일반사업 2022-05-04

한반도 동해안 해안선 변화 조사 분석

인쇄 2022년 12월 29일

발행 2022년 12월 31일

발행인 김 종 덕

발행처 한국해양수산개발원

주소 49111 부산시 영도구 해양로 301번길 26(동삼동)

연락처 051-797-4800 (FAX 051-797-4810)

등록 1984년 8월 6일 제313-1984-1호

조판·인쇄 (주)디자인월드 (051-916-1533)

비매품

