



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

지리학박사학위논문

태안지역
해빈변화(1967-2017)와
지형학적 분류:
지형반응에서 정책적 활용까지

2019년 2월

서울대학교 대학원

지리학과

김 찬 응

태안지역
해빈변화(1967-2017)와
지형학적 분류:

지형반응에서 정책적 활용까지

지도교수 유근배

이 논문을 지리학박사 학위논문으로 제출함

2018년 11월

서울대학교 대학원

지 리 학 과

김 찬 응

김찬응의 지리학박사 학위논문을 인준함

2018년 12월

위 원 장	_____	(인)
부 위 원 장	_____	(인)
위 원	_____	(인)
위 원	_____	(인)
위 원	_____	(인)

<국문 초록>

태안지역 해빈변화(1967-2017)와 지형학적 분류 : 지형반응에서 정책적 활용까지

서울대학교 대학원 지리학과
김찬웅

이 연구는 지형동역학적 관점을 바탕으로 태안 일대 해빈의 변화를 관찰 및 해석하고 분류하였다. 시간적으로 계절적 변화에서부터 수십 년까지의 변화를 관찰하여 다양한 시간 규모에서의 해빈 변화 프로세스에 대한 이해를 향상시키고자 하였으며, 공간적으로 다수의 태안 일대 해빈을 선택하여 해빈의 변화를 유형화하여 살펴보았다. 또한 해빈을 통계적으로 분류한 뒤, 정책적 차원에서의 활용방안을 제시하였다. 연구 방법으로는 RTK-GPS를 활용한 해빈 단면 측량, 퇴적물 분석, SWAN-WAVE modeling, GIS를 활용한 항공사진 분석, 지오메트리를 활용한 통계분석이 활용되었다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째 계절에 대한 해빈 단면 변화를 유형화하여 살펴본 결과, 바다로의 개방성이 해빈의 차이를 가져오는 주요 요인임을 확인하였다. 해빈 단면과 단면 변화의 유사성을 지하수침출면과 릿지&런넬을 토대로 제시하였으며, 이들은 해빈 상황, 에너지 변화(지형 반응)를 의미한다. 이를 토대로 지하수침출면과 릿지&런넬의 유무에 따라 총 다섯 가지의 해빈 유형으로 구분하였다. 개별 유형은 서로 다른 특징(지오메트리, 구성 물질, 외력)과 계절적 해빈 단면 변화를 보였다. 유형별 차이를 만드는 조건은 국지적 지질조건인 바다로

의 개방성이며, 개방성에 따라 파랑 세기의 차이가 발생하였다. 해변 유형을 공간상에 도시한 결과 지하수침출면이 존재하는 해변은 상대적으로 보호받는 곳에 위치하였으며, 릿지&런넬의 발달정도는 경향성을 보이는 것으로 나타났다. 연구 결과를 바탕으로 평균입도와 평균 유의파고에 대한 태안 지역 해변의 개념적 모델을 제시하였다. 지하수침출면의 임계점은 0.3mm로 교란을 받은 몇몇 해변을 제외하면 비교적 명료하게 분리되었다. 유의파고에 따른 릿지&런넬의 존재와 부재는 상대적으로 명료하게 구분되지 않았으나 잠정적으로 0.2m, 0.4m를 기준으로 구분할 수 있었다.

둘째 수십 년 규모의 중규모 해변 거동을 살펴본 결과 공간적 스케일에 따라 영향을 미치는 요인이 다름을 확인하였다. 해변 거동의 지시자는 고조선(HWL)을 활용하였으며, 기존의 방식대로 오차를 분석할 경우 오차가 크게 나타나, 평균고조에서 활용하는 조위 보정을 2017년 현장자료를 바탕으로 실시하였다. 해변폭 변화에 영향을 주는 요인은 공간적으로 큰 스케일에서는 파랑 세기, 중간 스케일에서는 지형·지질조건에 따른 수심과 취송거리, 작은 스케일에서는 해변 배후지 개발, 사구의 역동성, 사취와 같은 해안 지형을 들 수 있었다. DSAS 분석 결과 신진도를 중심으로 북으로는 침식이 남으로는 퇴적의 경향이 있음을 확인하였으며, 연구 결과를 바탕으로 해변을 총 다섯 종류로 분류하였다.

셋째 해변을 통계적으로 분류하고 분류 결과를 바탕으로 정책적 활용방안을 제시하였다. 군집분석 결과 총 3군집으로 분류되며 유형에 포함하지 않는 해변이 3개 존재하였다. 군집분석의 결과를 다차원 척도 분석의 차원에 도시한 결과, 대부분 적절하게 군집되어 있음을 확인하였다. 통계적 분류와 기존의 분류(surf scaling, surf similarity, beach classification model)를 비교한 결과, 통계적 분

류가 아닌 기존의 분류는 일부 신뢰성에 의문이 가는 결과를 산출하였으며, 또한 인간의 개입을 분류하지 못한다는 한계점이 존재하였다. 통계적 해빈 분류를 바탕으로 정책과 재해관리의 관점에서 연구 결과를 해수욕장 위험성 평가, 기름 유출시 민감도 평가, 태풍 내습시 민감도 평가에 적용해 보았으며, 이는 해빈 분류가 프로세스에 대한 이해를 증진시키고, 한편으로는 정책에 효율적인 기초자료로 활용될 수 있음을 의미한다.

이 연구는 해빈의 분류에 따른 유형화와 중규모-수십 년을 대조차 해빈에서 함께 고려하였다. 다양한 시공간 스케일에서의 해빈 변화 관찰을 통해 지형 프로세스에 대한 이해를 증진시킬 수 있었으며, 결과를 바탕으로 해빈을 분류하여 학문적 함의를 도출하였다. 또한 위험과 재해의 관점에서 지형학자가 기여할 수 있는 방안을 고려하였다. 이 연구의 결과는 기후변화에 의한 해수면 상승이 현재의 위험으로 다가오고 있는 지금, 해안 프로세스의 이해와 이를 토대로 한 관리방안에 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

**주요어 : 해빈, 지형변화, 지형분류, 개념적 해빈 지형 모델, 수십
년 해빈 거동, 정책적 활용**

학번 : 2014-30979

<제목 차례>

1. 서론	1
1.1. 연구 배경	1
1.2. 연구 목적과 논문의 구성	7
2. 연구지역과 연구방법	11
2.1. 연구지역	11
2.1.1. 지형과 지질	11
2.1.2. 기상	12
2.1.3. 연구 지역 선정 근거	14
2.1.4. 연구 대상 해빈	16
2.2. 연구 방법	21
2.2.1. 해빈 단면 측량과 변수 추출	21
2.2.2. 계절적 해빈 단면 변화 분석	25
2.2.3. 퇴적물 분석	27
2.2.4. SWAN 모델링	28
2.2.5. 항공사진 분석	32
2.2.6. 해빈 분류를 위한 통계분석	35
3. 해빈의 계절적 단면 변화	37
3.1. 단면 변화 분류	38
3.1.1. 개관	38
3.1.2. 분류 기준	40
3.1.3. 분류 결과	44
3.2. 단면 변화 해석	45
3.3. 정량적 해석	48

3.4. 토의	60
3.4.1. 지질 조건	60
3.4.2. 공간적 분포	64
3.4.3. 파랑·입도 관계에 따른 개념적 해빈 지형 모델	65
3.5. 소결	73
4. 해빈의 중규모 거동	76
4.1. 오차 분석	76
4.2. 중규모 거동 해석	84
4.2.1. 개관	84
4.2.2. 개별 해빈 해석	86
4.3. 영향 요인	106
4.3.1. 외력과 해빈 거동	106
4.3.2. 퇴적물 역동성과 해빈 거동	111
4.3.3. 잠재적 오차	114
4.4. 중규모 해빈 분류	115
4.4.1. 공간적 경향성	115
4.4.2. 해빈 분류	117
4.4.3. 계절적 단면변화와 중규모 거동의 연계	119
4.5. 소결	123
5. 해빈 유형 분류	125
5.1. 통계 분석에 기반한 해안 분류	125
5.1.1. 변수	125
5.1.2. 자료 요약	128
5.2. 분류 결과	129
5.2.1. 군집 분석	129

5.2.2. 다차원 척도 분석	134
5.3. 타 분류와의 비교	135
5.3.1. 기존 연구와의 비교	135
5.3.2. 3, 4장과의 비교	140
5.3.3. 인간 교란의 영향	143
5.4. 정책적 활용	144
5.4.1. 해수욕장 위험성 평가	145
5.4.2. 기름 유출시 민감도 평가	152
5.4.3. 태풍 내습시 민감도 평가	154
5.5. 소결	155
6. 결론	157

〈표 차례〉

표 2.1. 월별 평균 기온(1997-2017)	13
표 2.2. 월별 평균 강수량(1997-2017)	13
표 2.3. 연구 대상 해빈 목록 및 해빈 길이	16
표 2.4. 단면 측량 해빈 목록	21
표 2.5. 단면 측량 일정	22
표 2.6. 해빈별 그리드 수	30
표 2.7. 모델 수심 입력 자료	30
표 2.8. 모델 기후 입력 자료	32
표 2.9. 항공사진 촬영 시기와 축척	33
표 3.1. 해빈 측선별 속성	39
표 3.2. 해빈 단면에 의한 분류 결과	44
표 3.3. 분석에 활용된 변수	49
표 3.4. 지하수침출면에 따른 해빈 유형별 속성	50
표 3.5. 릿지&런넬에 따른 해빈 유형별 속성	52
표 3.6. 릿지&런넬 고려시 사후검정 결과 유의한 변수	54
표 3.7. 모든 기준을 고려한 해빈 유형별 속성	55
표 3.8. 모든 조건 고려시 사후검정 결과 유의한 변수	55
표 3.9. 개방성을 고려한 해빈 유형간 차이	58
표 3.10. 개방성 고려시 사후검정 결과 유의한 변수	58
표 3.11. 유형 간 유의한 변수의 수	64
표 4.1. 해빈별 1차 오차 분석 결과	79
표 4.2. 해빈별 2차 오차 분석 결과	83
표 4.3. 평균 해빈폭(m) 및 변화량(1967-2016)	85
표 4.4. DSAS분석에 따른 NSM, EPR 결과(1967-2016)	85
표 4.5. 시기별 겨울철 유의파고 및 해빈폭 변화량	107
표 5.1. 통계 분석에 활용한 변수	127

표 5.2. 통계 분석에 활용된 해빈별 속성	128
표 5.3. 유형별 해빈 속성 및 ANOVA 분석 결과	131
표 5.4. 계절적 변화, 중규모 거동, 통계분석 결과의 비교	141
표 5.5. 해수욕장 안전관리지침	146
표 5.6. 기름유출 사고 후 생태계 회복에 드는 소요시간 추정	152

<그림 차례>

그림 1.1. 연구흐름도	10
그림 2.1. 연구지역도 및 연구대상 해빈	11
그림 2.2. 근흥 AWS 바람장미(1997-2017)	13
그림 2.3. 외연도 유의파고와 파주기(2017)	14
그림 2.4. 연구 대상 해빈 - 1	17
그림 2.5. 연구 대상 해빈 - 2	18
그림 2.6. 연구 대상 해빈 - 3	19
그림 2.7. 연구 대상 해빈 - 4	20
그림 2.8. 지하수 침출면과 릿지&런넬	26
그림 2.9. SWAN 모형 격자 구축	29
그림 2.10. SWAN 모형 평균해면수심도	31
그림 3.1. 꾸지나무골의 지하수 침출면	42
그림 3.2. 릿지&런넬	48
그림 3.4. 지하수침출면에 따른 해빈 유형별 상자도표	51
그림 3.5. 릿지&런넬에 따른 해빈 유형간 상자도표	53
그림 3.6. 모든 기준을 고려한 상자도표	56
그림 3.7. 개방성과 유형의 관계	57
그림 3.8. 개방성을 고려한 상자도표	59
그림 3.9. 해빈 유형별 공간적 분포	65
그림 3.10. 입도와 파고에 따른 지하수 침출면의 존재 유무	66
그림 3.11. 입도와 파고에 따른 릿지&런넬의 존재 유무	66
그림 3.12. 개념적 해빈 지형 모델(태안)	67
그림 3.13. 모델에 따른 대표 해빈 단면 예시	67
그림 3.14. 해빈 분류 모델	70
그림 3.15. 개념적 해빈 지형 모델에 따른 유형별 해빈 분포	71
그림 4.1. 해빈폭의 정의	77

그림 4.2. 해빈폭 예시	78
그림 4.3. 해빈별 DSAS분석에 따른 LRR 결과	86
그림 4.4. 꾸지나무골 측선별 해빈폭 변화	87
그림 4.5. 학암북 측선별 해빈폭 변화	88
그림 4.6. 학암서 측선별 해빈폭 변화	89
그림 4.7. 신두리 측선별 해빈폭 변화	90
그림 4.8. 의항 측선별 해빈폭 변화	91
그림 4.9. 파도 측선별 해빈폭 변화	92
그림 4.10. 갈음 측선별 해빈폭 변화	93
그림 4.11. 연포 측선별 해빈폭 변화	94
그림 4.12. 몽산 측선별 해빈폭 변화	95
그림 4.13. 달산 측선별 해빈폭 변화	96
그림 4.14. 청포대 측선별 해빈폭 변화	97
그림 4.15. 백사장 측선별 해빈폭 변화	98
그림 4.16. 삼봉 측선별 해빈폭 변화	99
그림 4.17. 기지포 측선별 해빈폭 변화	100
그림 4.18. 안면 측선별 해빈폭 변화	101
그림 4.19. 두여 측선별 해빈폭 변화	102
그림 4.20. 밧개 측선별 해빈폭 변화	103
그림 4.21. 꽃지 측선별 해빈폭 변화	104
그림 4.22. 장삼포 측선별 해빈폭 변화	105
그림 4.23. 서산 기상대 겨울철 시기별 풍속(1967-2016) ..	109
그림 4.24, SWAN 모형 평균해면수심도	110
그림 4.25. 선형경향성의 공간적 패턴, 중규모 해빈 분류	116
그림 4.26. 남부 캘리포니아 퇴적물 순환체계	117
그림 4.27. 시공간 스케일 연계	119
그림 4.28. 해빈의 중규모 거동에 영향을 미친 요인	121

그림 5.1. 군집분석 결과	131
그림 5.2. A, B, C 유형의 대표 해빈 단면	133
그림 5.3. 다차원 척도 분석 결과	134
그림 5.4. 군집 유형에 따른 다차원 척도 분석 결과	135
그림 5.5. 퇴적물 무차원 침강속도와 상대조차	136
그림 5.6. 해빈 분류 모델	140
그림 5.7. 개별 분류에 따른 해빈 유형	142
그림 5.8. 통계 분류를 활용한 정책적 활용 예시	151

1. 서론

1.1. 연구 배경

해빈은(beach)¹⁾ 파랑에 의해 모래가 이동하여 형성된 퇴적지형으로, 유입되는 에너지와 퇴적물 특성에 따라 역동적으로 변화한다. 해빈에 유입되는 주요 에너지는 바람, 파랑, 조석으로 최근 들어 강해진 인간의 간섭도 포함한다. 퇴적물 변동성에 대해 고려해야 할 부분은 크게 두 가지 이다. 하나는 경계조건(boundary conditions)에 따른 퇴적물의 유입과 유출을 의미하는 퇴적물 수지(budget)이며 다른 하나는 퇴적물 수용 공간(accommodation space)이다(Coe, 2003). 에너지 변화에 따른 해빈 변화는 주로 계절적 변화와 함께 설명되고 있으며, 2000년대 중반 이후로는 수십 년 규모의 해빈 변화를 대규모 기후 체제와 함께 서술하기도 한다(Zoulas and Orme, 2007).

기후변화에 따른 해수면 상승은 해빈의 역동성을 강화한다. 퇴적물 수용 공간의 창출, 브룬의 법칙과 같은 다양한 연구들이 해수면 상승에 따른 해안 침식 가속화를 예측하고 있다(Passeri, et al., 2015). 또한 해수면 상승과 함께 폭풍 해일의 변화, 극한 기후 현상의 증가, 더욱 강해지는 인간의 간섭은 극심한 해빈의 변화를 유발한다(Psuty, 2004). 특히 세립질의 모래해안은 암석해안이나 자갈해안에 비해 회복력이 낮으며 취약성이 매우 높다(Devoy, 2008).

해빈의 역동성을 이해하기 위해서는 다양한 시·공간적 스케일에서 발생하는 프로세스를 이해해야 한다. 해빈에 대한 연구는 시간적으로 단기적(수십 년 미만), 중기적(수십 년~수백 년), 장기적(수백 년 이상)으로 구분할 수 있으며, 시간적 스케일에

1) 이 연구에서는 지칭하는 해빈은 모두 모래해안을 의미한다.

더불어 공간적 스케일도 점점 증가한다(Masselink and Hughes, 2003).

단기적인 해빈에 대한 연구는 주로 외력에 반응하는 해빈의 변화에 초점을 맞춘다. 특히 계절의 변화는 유입되는 에너지의 변화를 의미하기 때문에, 해빈 단면의 변화를 주로 계절에 맞추어 설명한다. 계절적 해빈 단면 변화의 대표적인 연구로 Shepard는 캘리포니아 남쪽에서의 관측결과를 바탕으로 여름철 퇴적이 발생하며, 겨울철 침식이 발생한다는 해빈 계절 순환 양상(beach cycle)을 제시하였다. 이후 다양한 연구자들이 동일한 결과를 제시하거나 다름을 제시하면서, 계절과 해빈 단면과의 관계를 설명하고 있다(Diez et al., 2018). 우리나라에서 진행된 해빈 단면 변화에 관한 연구도 주로 계절과 해빈 단면의 관계를 설명하는 것에 집중하고 있다. 서해안 해빈의 경우 겨울철 강한 북서계절풍에 동반한 강한 파랑조건 때문에 해빈이 침식되며, 이는 일반적인 해빈 계절 순환 양상과 부합한다(e.g. 추용식 등, 1996; 성효현·방경화, 2005; 소광석 등, 2010). 단기적인 해빈 프로세스에 대한 연구에서 집중하는 공간적 단위는 단일 해빈 혹은 두셋의 해빈으로, 하나의 해빈에서 계절적 변화를 관찰 및 해석하거나, 두셋의 해빈 단면 변화를 비교하는 방법으로 주로 연구가 진행된다. 따라서 매우 제한적인 해빈과 시기를 대상으로 연구가 진행되었기 때문에, 다양한 조건을 가진 해빈들의 계절별 침식과 퇴적의 경향을 일반화하기는 다소 무리가 있다(김찬웅 등, 2015). 또한 특정한 단면 변화가 그 해빈의 특수성으로 인해 발생한 현상인지, 아니면 그 지역에 전반적으로 영향을 미친 현상인지에 대해서 분명하게 판단할 수 없다는 한계점이 존재한다.

장기적인 해빈에 대한 연구는 주로 해수면 변동에 초점을 맞춘다.

비록 국지적인 차원에서 해수면의 상승 곡선의 추세에 대해 아직도 불확실한 면이 존재하는 경우도 있지만, 해수면은 전반적으로 빙하기~간빙기에 따라 변화한다. 황해의 경우 최후 빙기시 육지였으나 간빙기로 접어들면서 현재와 같은 모습을 띠게 되었으며, 홀로신 시기동안 해수면 상승이 존재하였다(박지훈, 2011).²⁾ 장기적인 해빈에 대한 연구에서 집중하는 공간적 단위는 황해, 남해, 태평양 북부 등과 같이 보다 큰 공간 단위이다.

중기적인 해빈 프로세스에 대한 연구는 비교적 최근 진행되고 있으며, 주로 해안선 변화에 초점을 맞춘다. 항공사진, 위성영상, 해도, 지형도 등을 GIS를 통해 분석하여 수십 년 해빈 거동을 살펴보는 방법으로 진행된다(Boak and Turner, 2005). 주로, 해빈의 변화와 파랑, 바람, 해수면 상승, 지질 조건, 퇴적물 수지, 인간의 영향 등과 같은 다양한 요인과의 관계를 설명한다.

해빈 변화 관련 선행연구들은 일반적으로 장기간에 걸친 해수면 변동 혹은 고환경 연구나, 단기간에 걸친 지형변화와 프로세스를 다루는데 집중하여, 해빈의 역동성과 안정성을 다루는데 가장 요구되는 지식인 중기간에 걸친 중규모 지형변화에 대한 연구는 상대적으로 거의 진행되지 않았다. French and Burningham(2009)은 엔지니어링 스케일(engineering scale)에 해당하는 중규모 해안지형 연구가³⁾ 해안 관리에 가장 중요한 현실적 함의를 갖지만 이해하기가 어려움을 지적하며 ‘Grand challenge’ 라 지칭하였다. 변수를 통제할 수 있는 미시적인 연구와 국지적 조건이나 우연적 요소들을 배제할 수 있는 거시적인

2) 홀로신 시기동안 고해수면이 존재하였는지에 대해서는 아직 논쟁이 지속되고 있다.

3) 공간적 범위 10~100km, 시간적 범위 수십~수백 년, 이 연구에서 지칭하는 중기적 시간 스케일과 동일한 범위이다.

연구들과는 달리, 통제되어 있지 않은 변수들을 고려하며 다양하게 발생하는 이벤트를 상호작용의 패턴으로 받아들여야 한다는 점은 중규모 지형 연구에 큰 어려움으로 작용한다(류호상, 2010).

해안지형에 대한 중규모 지형 연구는 주로 해빈-사구를 연계하는 ‘모래공유 시스템’을 통해 연구되어 왔다. 특히 1990년대 이후 기술의 발달에 힘입어 해빈-사구를 연계하는 모래 이동과 이에 영향을 미친 요인들에 대한 연구들이 활발하게 진행되었다(Bauer et al., 2009). 해빈-사구를 연계하는 관점은 해빈을 기준으로 수직적인 모래 이동에 대한 프로세스를 반영하는 것이다.

해안지형에 발생하는 모래 이동이 반드시 수직적으로만 발생하지는 않기 때문에, 수평적으로 발생하는 모래 이동도 고려하여야 한다. 특히 퇴적물 순환 체계(littoral cell)⁴⁾에 대한 고려는 해안 관리와 프로세스에 대한 이해를 증진시킬 수 있다(Eureka et al., 2007). 퇴적물 순환체계란 일종의 구획(compartment)으로, 퇴적물의 이동/순환이 내부의 구획안에서 발생한다. 현재 미국과 유럽 등에서는 큰 틀에서 퇴적물 순환체계를 고려한 해안 정책에 관한 연구들이 지속되고 있으며, 이를 실제로 적용하고 있다. 우리나라의 경우 해빈 변화 관련 다수의 선행 연구들은 수평적인 모래 이동에 관심을 기울이지 않았다. 국내에서 진행되었던 해빈 관련 연구들은 시간 스케일 면에서 단기간 혹은 장기간을 대상으로 연구를 진행하여, 수십 년에 걸친 중규모 시간에 대한 해빈 연구는 사실상 실시하지 않았다. 환동해본부에서 강원도 해안가를 41개의 퇴적물 순환체계로 구분하는 연구를 진행하였지만⁵⁾, 보다 상위 개념에서의 퇴적물 순환체계를 제시한

4) 해안공학에서는 ‘표사계’라는 표현이 사용되고 있으나, 이 연구에서는 퇴적물의 공유를 강조하는 의미에서 ‘퇴적물 순환 체계’라고 활용하였다.

5) 2010~2014년 동안 강원도 해안을 41개 퇴적물 순환 체계로 구분하였으며,

것이 아니기에, 접근 방식에서 차이가 있기는 하나 사실상 개별 해빈을 대상으로 해안 보호를 실시하는 현재의 방법론과 큰 틀에서는 유사하다 할 수 있다. 또한 일부 수십 년 걸친 해안선 변화를 추적하는 연구들이 존재하나, 그 연구들은 해안 지형인 해빈의 변화를 다루는 것이 아니라 헤드랜드와 인공물을 포함한 육지 면적 변화를 다루었기에, 엄밀한 의미에서의 중규모 해빈 연구라 지칭할 수는 없다. 또한 대부분의 선행 연구가 연구 대상으로 단일한 해빈을 대상으로 연구를 진행하였기 때문에, 시간 규모에 맞는 적절한 공간 규모를 선택하였다 볼 수 없다. 현실적으로 퇴적물 순환체계를 판명하는 것은 매우 난해한 일로, 다양한 기초 자료와 연구가 기반이 되어야 한다.

중규모 해빈 프로세스에 대한 이해가 해안 관리의 중요성과 함께 증대된 것처럼, 해빈 분류에 대한 필요성도 증가하고 있다. 해빈 분류는 해안 관리의 차원에서 많은 학자들이 가치를 인정하는 주제로(Micallef and Williams, 2004), 해안에 대한 하나의 통합된 분류체계를 만드는 것은 어려운 일이지만 다양한 시도들이 진행되고 있다. 일반적으로 해빈 분류 시 고려되는 분류 기준은 총 5가지로, 프로세스(지각운동, 해수면 등), 구성 물질(모래, 자갈 등), 지형 형태(단면 모양), 해빈의 상태(state)와 발전 단계(equilibrium state, 이행 단계 등), 환경(생태적 서식처, 지질 조건 등) 등이다. 최근의 해빈 분류에서는 해안 관리와 계획, 재해 방지를 위한 면을 강조하며 지형, 역사, 수문 등을 종합적으로 고려하고 있다(e.g. Benedet et al, 2006; Pais-Barbosa, 2009).

해빈 분류시 활용되는 자료의 성격에 따라서 연구의 목적이 달라진다. 해빈의 시간적 변화양상을 바탕으로 한 연구는 이전

현재는 구분한 순환체계 일부를 대상으로 정밀 조사를 실시 중에 있다.

상태(previous state)와 반응 시간(response time)이 중요함을 강조하며, 해빈 변화를 지형변화 혹은 해빈 상태(state)의 변화, 발달, 이행 등으로 이해한다(e.g. Costas et al., 2005). 반면, 공간적 자료를 바탕으로 다수의 해빈을 대상으로 한 연구들은 외력(forcing factor)을 강조하며 연구 지역의 특수성을 강조하는 연구들이 진행된다(e.g. Jackson et al., 2005). 우리나라의 경우 해빈을 분류한 사례가 있었으나 실측을 기초로 하지 않았으며, 해안지형을 분류한 일부 연구들의 경우(e.g. 김태호, 2003; 허현수 등, 2011) 해안선의 퇴적물 구성으로 해안선을 분류하였다.⁶⁾

이 연구는 기존의 연구들과 비교하여 몇 가지 차별성을 갖는다. 먼저 다수의 해빈을 연구 대상으로 한다. 기후와 지질이 유사할 것으로 예측되는 특정 지역을 대상으로 그 지역에 있는 다수의 해빈에서 연구를 진행하여, 해빈 단면, 계절적 해빈 단면 변화, 수십년 규모의 변화를 바탕으로 해빈 프로세스를 해석하고 유형화한다.

두 번째로 그동안 거의 진행되지 않은 중규모 해빈 변화에 대해서 다룬다. 계절성을 반영할 것인데, 그 이유는 사계절이 뚜렷한 대한민국의 특성을 반영하는 것으로, 수십 년간의 시간에서 해빈 변화를 확인하기 위해서는 계절이라는 요인을 간과할 수 없기 때문이다. 이를 통해 해안 관리의 차원에서도 함의를 찾을 수 있다.

세 번째로 이 연구는 단기간과 중기간, 즉 두 시간 스케일을 대상으로 진행된다. 두 스케일에서의 연구를 통해 해빈 변화와 프로세스에 대한 이해를 증진시킬 수 있을 것이며, 나아가 두 스케일 모두에서 유의미한 요인을 발견할 수 있다면 또 다른 함의를 찾을 수 있다.

6) 모래, 자갈, 콘크리트, 암석 등

네 번째로 대조차⁷⁾ 환경인 서해에서 연구를 진행한다. 대조차 환경은 연구 범위가 주어진 시간에 비해 크고⁸⁾, 지연 효과(lag effect)가 나타나며⁹⁾, 이차 지형(Secondary morphology)이 많지 않다는 한계점으로 인해 연구 자체가 드물다(Masselink et al., 2007). 따라서 대조차 환경에 대한 연구는 상대적으로 소홀하였던 조석 조건을 보유한 환경에서의 해빈 프로세스 이해를 증진시킬 수 있다.

마지막으로 해빈 분류를 실시하여 지형학적 함의를 확인하고, 통계적 분류의 사회적 활용방안을 모색한다. 전술한 대로 해빈 분류는 해안 관리의 차원에서 주목받고 있는 주제로, 해빈 분류의 결과를 재해관리의 차원에서 활용한다. 해빈 분류는 형태와 외력에 따른 변화를 바탕으로 한 지형동역학(morphodynamic)적 관점과(3, 4장) 해빈의 물리적 특징을 바탕으로 한 형태기하학(morphometric)적 관점으로 진행되며(5장), 통계적 분석을 바탕으로 한 5장의 결과를 적용하여 사회적 활용방안을 모색한다.

1.2. 연구 목적과 논문의 구성

이 연구는 태안 지역에 존재하는 해빈¹⁰⁾의 변화를 관찰하고 이를 분류하는 것을 목적으로 한다. 먼저 단기적인 해빈 연구로, 다수의

7) 이하에서 언급하는 ‘대조차’는 대조시 평균 간만의 차가 4m를 상회하는 환경, 즉 조차가 큰 환경을 의미한다.

8) 조석의 상황(만조, 간조)에 따라 해빈 단면을 관찰할 수 있는 시간이 제한적이며(간조시지만 가능함), 조차가 작은 해빈과 비교하였을 때 상대적으로 관찰하여야 하는 해빈 단면 자체가 길어 시간 소요가 크다는 현실적인 제약이 있다.

9) 조차가 작은 해빈(소조차 환경)과 비교시 상대적으로 파랑 및 조석에 노출된 시간이 짧아(침수 시간) 에너지의 분산이 발생하여, 지형 변화가 특정 이벤트에 대해 즉각적으로 발생하는 경우가 드물다.

10) 이 연구에서 지칭하는 해빈의 공간적 범위는 전빈(foreshore)과 후빈(backshore)을 아우른다.

해빈에 주기적인 측량을 실시하여 단면과 단면 변화를 확인한다. 단면과 단면 변화의 유사성을 바탕으로 해빈을 유형화하여 지형 프로세스를 설명하고, 이후 지질조건과의 관계성을 살펴본다. 두 번째로, 다수의 항공사진을 판독하여 중규모 해빈 거동을 설명하고, 수십 년 동안의 변화가 발생한 이유를 찾는다. 마지막으로 해빈을 통계적으로 분류한 뒤, 정책적 활용방안을 제시한다. 구체적인 연구 목적은 다음과 같다.

1. 계절로 대표되는 에너지 변화에 대한 해빈 단면 변화를 지형동역학적 관점에서 유형화하여 살펴본다. 이 때 공간적 자료를 활용하여 지오메트리(geometry), 구성 물질, 외력(forcing factor)을 바탕으로 유형간 차이를 확인하며, 차이가 발생하는 원인을 탐구한다. 나아가 태안지역에서 나타날 수 있는 해빈의 개념모델을 제시한다.

2. 수십 년 규모의 중규모 해빈 거동을 살펴본다. 수십 년 지형 변화를 탐색하고, 이를 지형동역학적 관점으로 공간적 스케일에 따라 영향 요인을 차례로 탐색한다. 나아가 중규모 해빈 변화와 내부에서 작용한 프로세스를 바탕으로 해빈을 분류한다. 이후 계절적 해빈 변화와 수십년 해빈거동의 시공간 스케일 연계 가능성을 탐색한다.

3. 태안 지역 일대의 해빈을 통계적으로 분류한다. 지오메트리, 구성 물질, 외력에 기반하여 형태기하학적인 관점에서 통계분류를 실시하고, 이를 여타 분류와 비교하여 통계를 활용한 분류의 의의를 살펴본다. 이후 해빈 분류의 결과를 바탕으로 정책적 활용 방법을

모색한다.

이 논문의 구성은 총 6장으로 이루어져 있다(그림 1.1).

2장에서는 구체적인 연구 지역과 연구 방법을 제시한다. 연구 대상 지역을 선택하고, 대상 지역이 보유한 지형, 지질, 기상 조건을 제시한다. 또한 연구 지역으로 선택된 이유에 대해 서술하며, 활용한 다양한 연구 방법을 살펴본다.

3장에서는 해빈의 계절적 단면 변화를 관찰 및 해석한다. 해빈의 단면과 단면 변화를 유형화하여 제시함으로써, 효율성을 높이며 일반화로의 가능성을 모색한다. 구체적인 분류 기준을 제시하고, 분류에 따른 결과를 단면 그래프와 정량화된 수치로 제시하여, 지오메트리(geometry), 구성 물질, 외력(forcing factor)의 차원에서 분류된 유형에 대한 이해를 높인다. 이후 토의에서는 유형 간에 나타나는 경향성에 미친 지질 조건을 살펴보고, 공간적 분포를 도시하여 지리적 함의를 도출한 뒤, 태안 지역에 적용할 수 있는 평균 입도와 파고에 따른 개념적 해빈 지형 모델을 제안한다.

4장에서는 해빈의 중규모 거동을 확인한다. 해빈 변화를 확인하기 위해 항공사진을 전처리한 뒤, 오차를 반영하여 해빈 변화를 제시한다. 이후 개별 해빈의 변화와 전반적인 해빈 변화를 살펴봄으로써, 이에 영향을 미친 다양한 요인을 공간적 스케일에 따라 규명한다. 이후 공간적 분포를 도시하여 지리적 함의를 도출하며, 해빈을 분류한다. 마지막으로 3장의 결과와 4장의 결과를 결합하여 시공간 스케일 연계의 가능성을 모색한다.

5장에서는 해빈을 통계적으로 분류 한 뒤, 재해 관리의 관점에서 유형 분류의 활용성을 살펴본다. 다변량 분석을 통해 해빈을 통계적으로 분류한 뒤, 개별 유형의 특징을 논한다. 이후 다른 해빈

분류 모델과의 비교를 통해 통계 분석의 의미를 확인하며, 여기에는 3장과 4장의 결과도 활용된다. 마지막으로 해빈 분류의 결과를 구체적으로 적용해봄으로써, 정책적 차원에서의 활용도를 살펴본다.

마지막으로 6장에서는 논문의 내용을 요약·정리한다. 연구를 통해 밝힌 내용을 요약하고 의의를 평가한다.

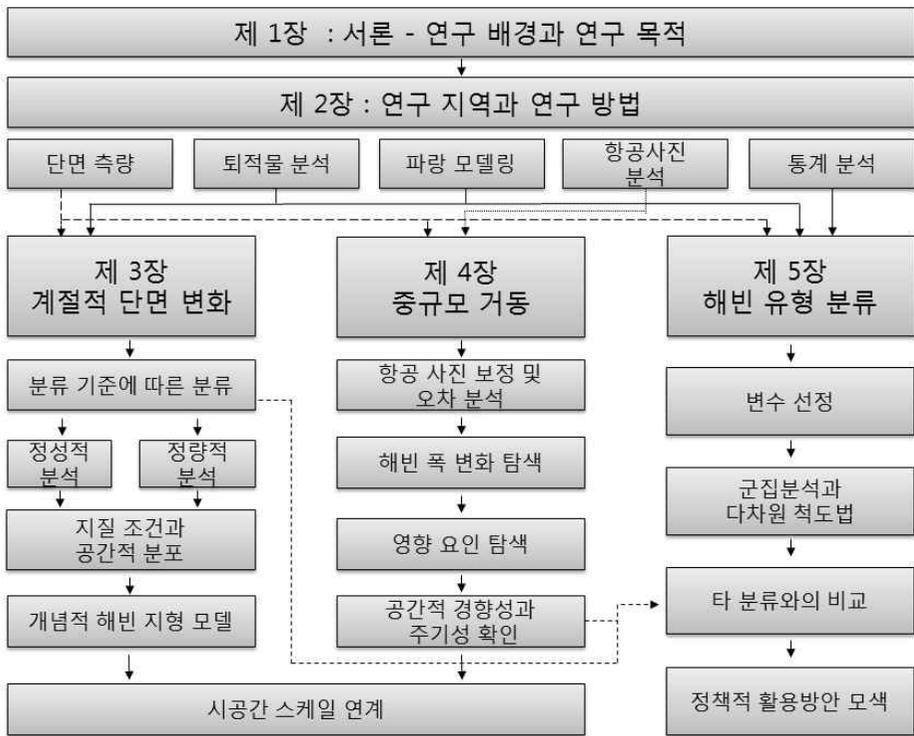


그림 1.1. 연구흐름도

2. 연구지역과 연구방법

2.1. 연구지역

2.1.1. 지형과 지질

연구지역은 안면도를 포함하는 태안군 지역 전체로, 북으로는 충남 태안군 이원면 내리의 꾸지나무골 해수욕장부터 남으로는 충남 태안군 고남면 장곡리의 장삼포 해수욕장까지이다. 지리적 좌표는 $36^{\circ} 25'19.2''N \sim 36^{\circ} 56'09.1''N$, $126^{\circ} 08'03.7''E \sim 126^{\circ} 21'35.5''E$ 에 해당한다(그림 2.1).

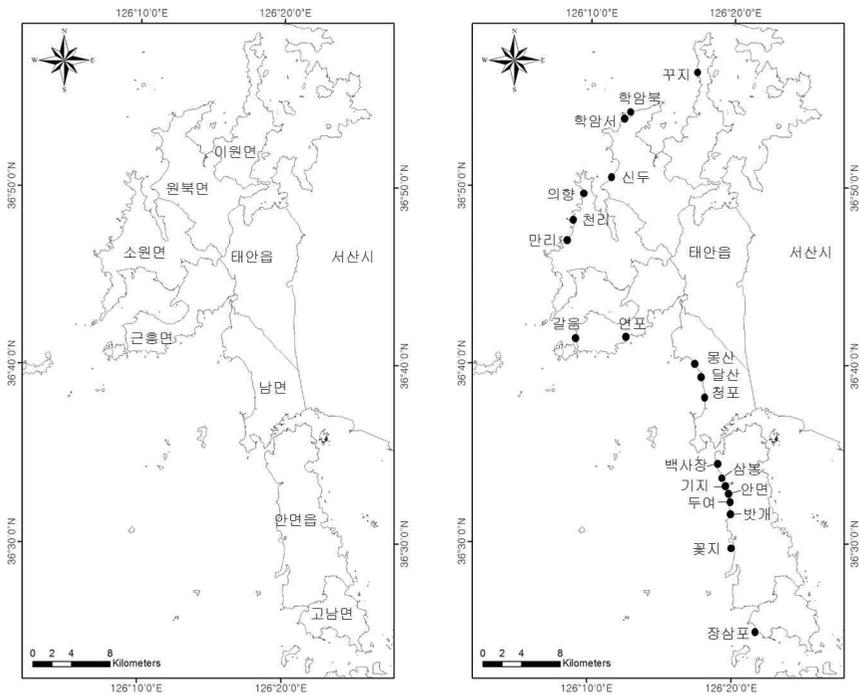


그림 2.1. 연구지역도 및 연구대상 해변

충청남도의 해안은 후빙기 해수면 상승에 의한 침수의 영향으로

형성되었으며, 태안반도 일대의 경우 차별침식작용에 의해 침수 이전의 구조선을 따라 여러 골짜기가 침수되었다(권혁재, 1981). 해진의 영향으로 구릉성산지, 만, 곳, 도서 등이 발달하고 있으나, 하천과 평야 발달은 매우 미약하다. 평야의 경우 해미, 서산시, 태안읍 등에서 비교적 발달하였으나 다른 곳에서는 뚜렷하게 나타나지 않는다. 태안일대에는 국가하천이 존재하지 않으며, 지방하천만 6개가 존재하나, 태안읍 주변에만 집중되어 있다. 태안 일대의 해안선은 리아스식 해안으로 매우 복잡한 형태를 보이며, 수심이 낮고 조차가 커 간석지가 발달해 있으나 배후지는 좁은 특징을 보인다. 태안 연안 지역의 지질은 주로 서산층군, 경기편마암복합체가 분포하며, 일부 충적층, 대보화강암이 존재한다.¹¹⁾

2.1.2. 기상

태안지역의 평균 기온은 12.46℃, 가장 기온이 높은 달은 8월로 평균 25.00℃, 가장 기온이 낮은 1월의 경우 0.58℃로, 24℃ 이상의 기온차를 보이고 있다(표 2.1).¹²⁾ 연 평균 강수량은 월별 18.45~229.57mm의 범위를 보이며, 여름에 강수가 50%이상 집중되었다(표 2.2). 평균 풍속은 월별 2.04~3.64m/s로 겨울철 풍속이 강하였으며, 기상청에서 제공하는 바람장미에 따르면 풍향은 북서풍, 남동풍이 지배적이었다(그림 2.2).

11) 한국지질자원연구원 지질정보검색시스템 홈페이지
(<https://mgeo.kigam.re.kr/>).

12) 충청남도 태안군 신진도리에 위치한 근흥 AWS의 1997년부터 2007년까지의 자료이다.

표 2.1. 월별 평균 기온(1997-2017)

기온(° C)	1월	2월	3월	4월	5월	6월
평균	0.58	1.61	4.79	9.56	14.31	18.99
평균최고	3.37	4.43	7.69	12.91	17.85	22.61
평균최저	-2.09	-1.12	2.12	6.73	11.31	15.98
기온(° C)	7월	8월	9월	10월	11월	12월
평균	23.09	25.01	21.59	16.44	10.04	3.48
평균최고	25.80	28.08	24.96	19.58	12.90	6.42
평균최저	20.91	22.58	18.79	13.39	7.14	0.62

표 2.2. 월별 평균 강수량(1997-2017)

강수량(mm)	1월	2월	3월	4월	5월	6월
평균	18.45	21.90	34.21	68.26	84.07	114.26
강수량(mm)	7월	8월	9월	10월	11월	12월
평균	226.71	229.57	110.17	38.26	45.98	26.52

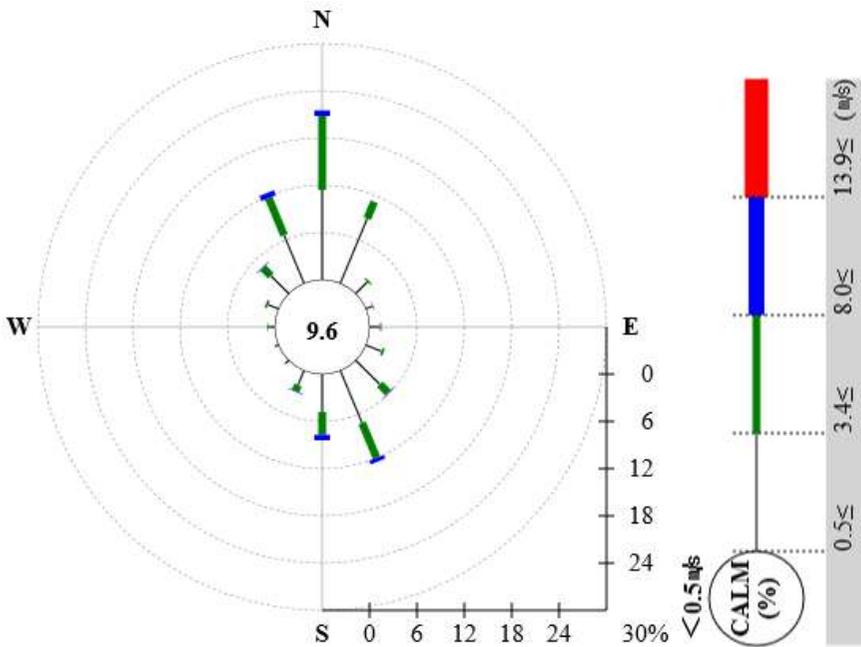


그림 2.2. 근흥 AWS 바람장미(1997-2017). 기상청 홈페이지 제공

2017년 외연도 부이에¹³⁾ 따르면 유의파고는 1월~2월, 11월~12월에 걸친 겨울철 높게 나타나는데, 봄~여름철 낮게 나타나며, 가을부터 점차 높아진다(그림 2.3). 파주기의 경우 유의파고와 유사하게 변화하는 특성을 보인다. 평균 유의파고는 0.91m이며, 평균 파주기는 5.18sec이다. 조석은 반일주조의 특징을 보이며, 국립해양조사원 실시간 해양 관측 정보시스템 기본수준점 성과표에¹⁴⁾ 따르면 태안군 근흥면 정죽리에서¹⁵⁾ 대조승 647.7cm, 소조승 481.5cm, 평균해면 353.8cm, 약 최고고조면 707.6cm이다.

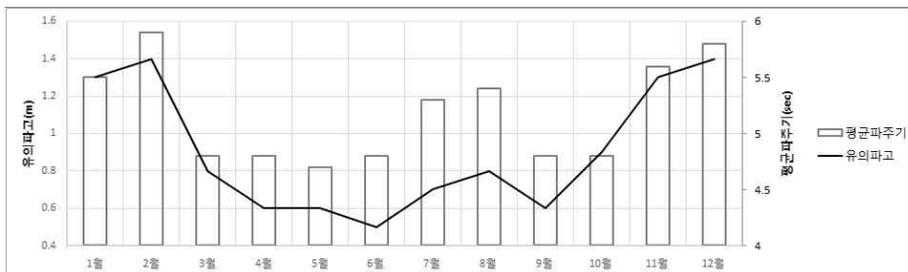


그림 2.3. 외연도 유의파고와 파주기(2017)

2.1.3. 연구 지역 선정 근거

연구 지역은 다음과 같은 이유로 선정하였다. 첫째, 과거 항공사진이 다수 확보 될 수 있는 곳을 우선순위로 둔다. 우리나라의 경우 해방 이후부터 항공사진 촬영이 이루어졌으나, 자료의 질과 양, 특히 시간적 해상도 측면에서 매우 한정적인 자료만을 보유하고 있다. 외국에서 진행된 선행연구들은 대부분

13) 36° 15' N, 125° 45' E

14) <http://www.khoa.go.kr/koofs/kor/tide/tbm.do>

15) 36° 68' N, 126° 15' E

과거부터 항공사진 촬영이 다수 실시된 곳에서 연구자가 원하는 연도, 계절, 해상도를 취사선택하여 진행한다(e.g. Zoulas and Orme, 2007; Viridis et al., 2012; Manca et al., 2013). 하지만 자료의 취사선택이 불가능한 경우 최대 다수의 항공사진을 확보 할 수 있는 지역을 선택하는 것이 보다 현실적이다. 서해안 태안군 일대의 경우 비교적 다수의 과거 항공사진이 존재하기에, 상대적으로 연구에 용이하다.

둘째, 해빈에 대한 인간의 영향이 상대적으로 강하지 않은 곳을 선정한다. 대규모 간척사업, 제방 건설, 배후지 개발 등과 같은 인간의 영향은 해빈 변화와 프로세스에 대한 연구를 어렵게 만든다. 그러나 대한민국의 모래 해빈중 인간의 영향이 미치지 않은 곳은 사실상 존재하지 않기 때문에, 비교적 영향이 적은 지역을 선정하는 것이 교란되지 않은 프로세스에 대한 관찰을 용이하게 한다. 연구 지역의 경우 태안군과 서산시 사이의 대규모 간척지가 존재하지만, 태안 일대가 대부분 해양국립공원에 포함되어 있어 인간의 영향이 다른 지역에 비해 상대적으로 크지 않다.

마지막으로, 하천 프로세스의 영향에서 비교적 자유로워야 한다. 하구가 존재하는 경우 하천 프로세스와 해안 프로세스가 상호간에 영향을 미친다. 특히, 규모가 큰 하천일수록 강한 영향이 나타나는데, 태안 일대의 경우 큰 규모의 하천이 바다로 유입되지 않고 소수의 소하천만이 유입되며 하천의 유입 또한 태안읍 일대에서 제한적으로 발생한다. 이 연구의 목적은 하천과 해안 프로세스를 아우르는 것이 아니라 해안 프로세스만을 관찰하는 것이기에 하천 프로세스가 최소화된 곳이 선택되어야 하며, 그러한 점에서 태안 일대는 적절한 조건을 가지고 있다.

2.1.4. 연구 대상 해변

충청남도 태안군에 위치하고 있는 해변 21개를 대상으로 연구를 진행하였다. 연구 대상으로 선정한 해변은 모두 모래 해변이다(표 2.3, 그림 2.4-2.7). 현장 작업으로 계절별 측량과 퇴적물 채취를 실시하였으며, SWAN 파랑 모델링, 항공사진 GIS 작업, 통계분석 등의 실내 작업 또한 실시하였다.

표 2.3. 연구 대상 해변 목록 및 해변 길이

명칭	길이(m)	명칭	길이(m)
갈음이	200	신두리	3400
기지포	1100	안면	863
꽃지	2900	연포	521
꾸지나무	200	의향	521
달산포	1090	장삼포	1300
두여	850	천리포	432
만리포	2000	청포대	3600
몽산포	2300	파도리	637
밭개	1400	학암북	1000
백사장	900(650) ¹⁶⁾	학암서	676
삼봉	835	-	-

16) 괄호안은 해변 남측에 기반암이 노출되어 있는 지역을 제외한 길이이다.

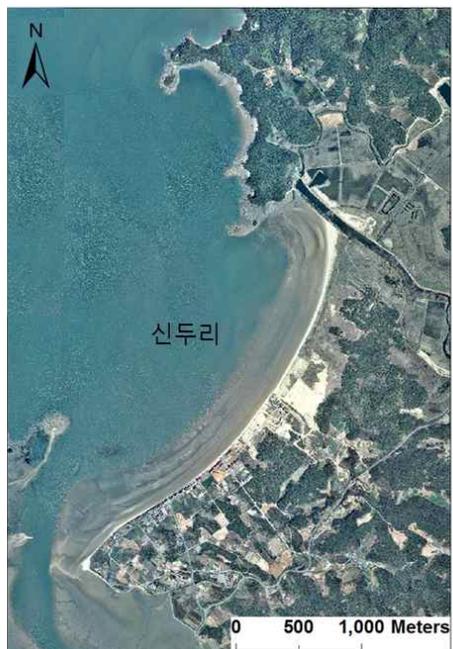
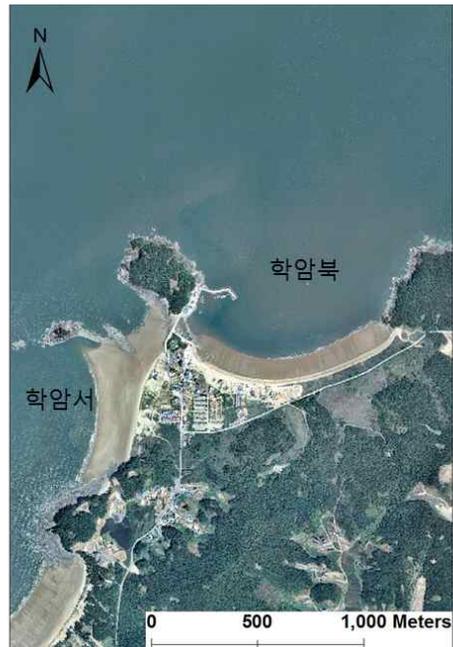


그림 2.4. 연구 대상 해변. 왼쪽 위부터 시계 방향으로 꾸지나무, 학암북&학암서, 신두리, 의향 해변.

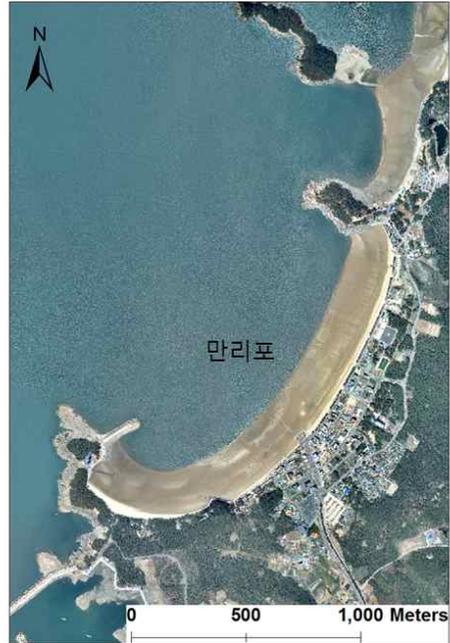


그림 2.5. 연구 대상 해변. 왼쪽 위부터 시계 방향으로 천리포, 만리포, 파도리, 갈음 해변.



그림 2.6. 연구 대상 해변. 왼쪽 위부터 시계 방향으로 연포, 몽산포&달산포&청포대, 백사장, 삼봉&기지포&안면&두여 해변.



그림 2.7. 연구 대상 해변. 왼쪽 위부터 시계 방향으로 밧개, 꽃지, 장삼포 해변.

2.2. 연구 방법

이 연구는 태안 일대 해빈의 계절적 변화, 수십 년 거동, 해빈 분류를 실시하였다. 이를 위해 해빈 단면 측량, 퇴적물 분석, SWAN 모델링, 항공사진 분석, 다양한 통계분석을 활용한다.

2.2.1. 해빈 단면 측량과 변수 추출

해빈 단면의 계절적 변화를 관찰하기 위해 총 21개 해빈의 70개 측선에서 총 다섯 시기에 단면측량을 실시하였다(표 2.4). RTK-GPS(모델명, Trimble R2)를 활용하여 측량 시 수직과 수평 오차는 3mm 이하로 설정하였으며, 연구자가 측선을 따라 걸어가며 3초 단위로 측정되는 자동 측량을 적용하였다. 단면 측량 일시는 2017년 2월, 5월, 8월, 11월, 2018년 2월로 총 5차례 실시하였으며, 가능한 넓은 해빈 단면을 관찰하기 위해 최대한 대조기(사리)를 선택하였다(표 2.5). 일반적으로 간조시기 1회당 측선 4-8개를 측량하였으며, 간조시기에 맞추어 하루에 2회 측량을 실시하였다.

표 2.4. 단면 측량 해빈 목록

명칭	측선 수	명칭	측선 수
갈음이	2	신두리	6
기지포	4	안면	4
꽃지	6	연포	3
꾸지나무	2	의향	2
달산포	2	장삼포	4
두여	4	천리포	2
만리포	4	청포대	4
몽산포	2	파도리	2
맞개	6	학암북	2
백사장	3	학암서	2
삼봉	4	-	-

표 2.5. 단면 측량 일정

일정	대상 해빈
2017.02.01.	학암포, 신두리
2017.02.02.	의항, 천리포, 만리포
2017.02.05.	백사장, 삼봉, 기지포
2017.02.06.	안면, 두여, 밧개, 장삼포
2017.02.07.	몽산포, 달산포, 청포대, 갈음이, 연포, 파도리
2017.02.12.	꽃지
2017.02.13.	원산 동, 원산 서, 원산도
2017.05.11.	학암포, 신두리
2017.05.12.	의항, 천리포, 파도리, 만리포
2017.05.13.	갈음이, 연포, 몽산포, 달산포, 청포대
2017.05.14.	삼봉, 기지포, 백사장
2017.05.15.	안면, 두여, 꽃지
2017.05.16.	밧개, 장삼포
2017.08.08.	학암포, 신두리
2017.08.09.	의항, 천리포, 파도리, 만리포
2017.08.10.	갈음이, 연포, 몽산포, 달산포, 청포대
2017.08.11.	삼봉, 기지포, 백사장
2017.08.12.	안면, 두여, 꽃지
2017.09.08.	장삼포
2017.11.02.	신두리
2017.11.03.	꾸지나무, 학암포, 만리포, 파도리
2017.11.04.	의항, 천리포, 몽산포, 달산포, 청포대
2017.11.05.	갈음이, 연포, 백사장, 밧개
2017.11.06.	삼봉, 기지포, 꽃지, 장삼포
2017.11.07.	안면, 두여
2018.01.31.	신두리
2018.02.01.	꾸지나무, 학암포, 만리포
2018.02.02.	의항, 천리포, 파도리, 몽산포, 달산포, 청포대
2018.02.03.	갈음이, 연포, 백사장
2018.02.04.	삼봉, 기지포, 꽃지
2018.02.05.	안면, 두여
2018.02.06.	밧개
2018.03.01.	장삼포

단면 측량에서 가장 중요한 요소 중 하나는 측선의 선정으로 모든 해빈에 최소 2개의 측선을 설정하였다. 해안선의 길이가 길수록

많은 측선을 선정해야 하기에, 700m 이상인 경우 4개를, 2000m 이상인 경우 6개의 측선을 설정하였다. 해안에 접근이 어려운 경우(몽산, 달산, 청포) 측선의 수가 기준보다 2개씩 적으며, 현장 답사 결과 상대적으로 다양한 환경 조건(bedrock 노출정도, 해변 단면 형태 등)을 보유한 경우(밭개, 백사장, 연포) 측선의 수를 증가시켰다. 또한 학암북의 경우 학암서와 연계되어 있기에 학암서의 측선 수와 일치시켰다. 측선의 위치는 기본적으로 측선수와 해변의 길이를 고려하여 균등하게 위치할 수 있도록 하였으며, 현장에서 세밀하게 조정하였다. 가장 면밀하게 해변 변화를 관찰하는 방법은 Lidar와 같은 장비를 통해 3차원으로 측량하는 것이다. 이러한 방법은 측선 관측을 통한 연구보다 해안을 따르는 방향으로의 변화를 보다 명확하게 관찰 할 수 있게 해준다. 하지만 상대적으로 비용의 측면에서 한계가 있으며, 자료 프로세싱에 시간이 많이 소요된다. 이 연구의 목적은 해변 변화의 관찰과 이를 유형화 하는 것이기에 측선 관측을 통한 연구 방법으로도 충분히 그 목적을 달성할 수 있다고 판단하였다. 다만, 측선 연구의 한계를 조금이나마 극복하고자 다수의 측선을 선정하였다.

연구 대상으로 선정한 해변중 상당수는 해양수산부에서 실시중인 ‘연안침식 모니터링’의 대상이다. 해당 사업은 2003년부터 지속되었기에 상대적으로 긴 시간 동안 자료가 축적되었다는 장점이 있다. 그러나 ‘연안침식 모니터링’은 침식이 진행된 해변을 관찰하는 것에 목적이 있어, 해변 변화의 자연적 프로세스를 관찰하기에 매우 적절한 자료라고는 볼 수는 없으며, 모니터링 대상 해변이 지속적으로 변화한다는 한계점도 존재한다. 연안침식 모니터링’의 경우 측선을 약 300-500m 간격 또는 해안의

길이(해안선을 따르는)가 1km 이하인 경우 3개 측선을 선정하는 것을 기본으로 하고 있다(해양수산부, 2005). 이 연구에서는 최대한 많은 수의 측선을 설정하고자 하였으며, 조석 주기에 따른 한정된 측량 가능 시간을 고려하여 700m와 1000m를 기준으로 결정하였다.

개별 측선의 기준점(0m)은 2017년 2월 첫 측량시 측정한 사구 말단부 혹은 제방의 끝부분으로 결정하였으며, 소조기 저조위의 고도가 포함되도록¹⁷⁾ 측량을 실시하였다. 개별 측량시 고조선(High Water Line, HWL)¹⁸⁾도 측량하여 해변폭(beach width)에 대한 자료도 확보 하였다.

측량 자료는 실내 보정작업을 걸쳐 해변 단면 그래프, 해변폭, 면적, 경사각 등의 자료를 산출하는데 활용된다. 해변 단면 그래프는 측선의 측량 기준점을 수평 기준으로 하며, 수직 기준은 인천항 평균 해수면, 즉 표고를 적용하였다. 표고를 적용한 이유는 개별 해변에 해상 표고인 기본 수준면(LDL)을 적용할 경우 연구 지역의 공간적 범위로 인해 고도의 차이가 나타나는 점을 반영한 것이다. 해변폭은 측량 기준점부터 고조선까지의 거리로, 고조선의 형성은 조위의 영향을 받으며 조위는 매일 변화하기에 조위보정을 실시하였다. 조위 보정은 계절적 차이를 반영하기 위해 각 계절별 사리시 최극조위를 적용하였으며, 2017년 2월부터 각각 표고 2.85m, 3.04m, 3.38m, 3.41m, 2.94m를 기준으로 삼았다. 측량시기와 기준 값과의 고도 차이를 반영하여 기 측정된 고조선의 값을 재계산 하여 해변폭 값을 계산하였다. 면적은 단면을 적분한 값으로, 표고로 계산시 음수가 반영되는 것을 고려하여 전체 고도에

17) 대략 표고 -1.26m이다.

18) wet/dry 라인이라고도 불린다.

3m를 더하여 계산하였으며 단위는 m^2 이다. 경사각은 소조기 저조위에서부터(수직 기준점, 표고 -1.26m) 측량기준점(수평 기준점, 0m)까지 계산하였으며, 단위는 도(degree)이다.

2.2.2. 계절적 해빈 단면 변화 분석

계절적 해빈 단면 측량 결과 70개 측선의 5계절의, 총 350개의 해빈 단면 자료를 생성하였다. 단면에 대한 해석은 해빈을 분류하여 실시하였다. 분류는 1) 지하수침출면(seepage, groundwater outcrop, effluent line 등)의 유무, 2) 릿지&런넬(ridge and runnel, bar and through 등)의 유무와 계절적 변화에 의해 결정하였다(그림 2.8). 지하수침출면은 경사가 급변하는 지점으로, 지하수침출면은 기준으로 육지 방향은 경사가 가파르며 바다 방향은 경사가 완만하다(그림 2.8). 릿지&런넬은 전빈(foreshore)에 존재하는 기복이 심한 지형으로, 릿지는 기복이 높으며, 런넬은 기복이 낮아 수로의 역할을 수행하는 지형을 지칭한다. 범(berm) 근처에 생성되는 스위시바(swash bar), 연안(nearshore)에 형성되는 롱쇼어바(longshore bar)와는 구분되는 용어이다.¹⁹⁾

19) 릿지&런넬이 스위시바에서 비롯되었다는 이론과, 롱쇼어바에서 비롯되었다는 이론이 공존한다.

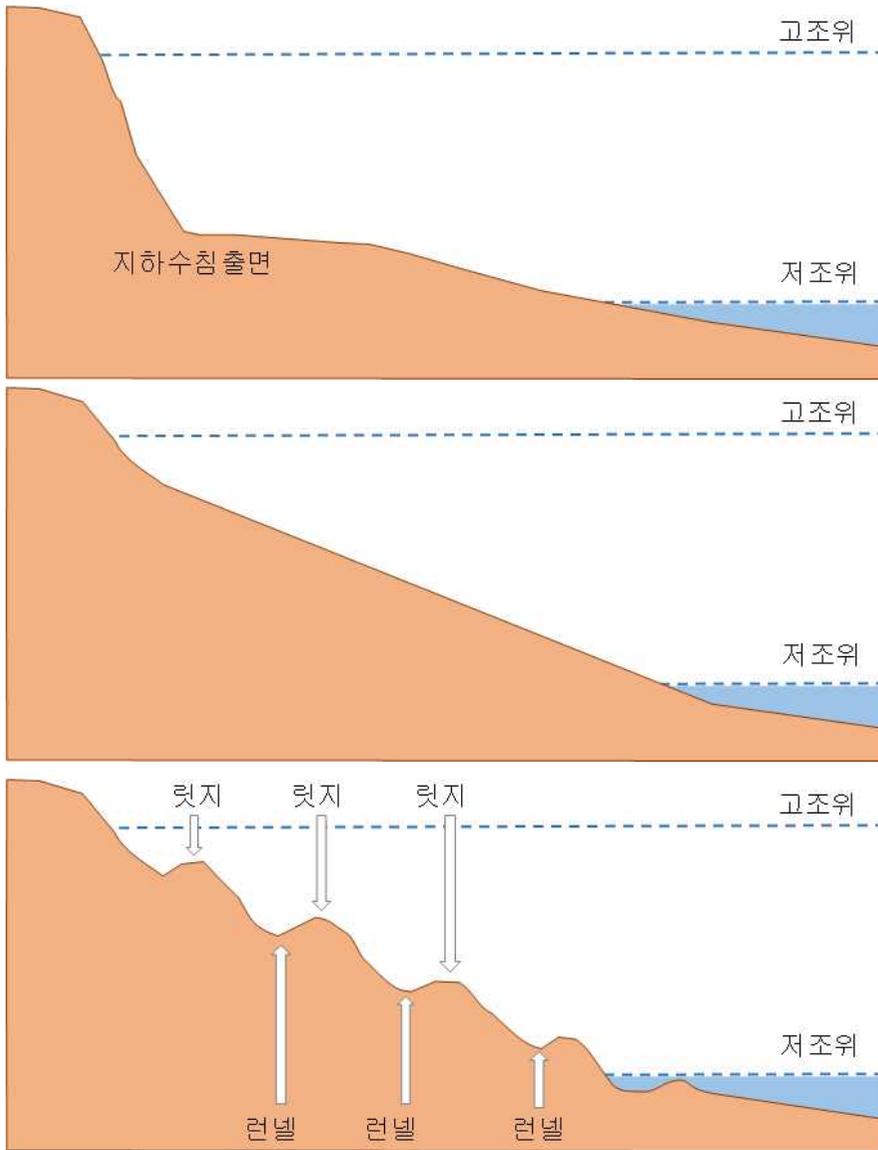


그림 2.8. 지하수 침출면과 릿지&런넬. 위에서부터 차례로 지하수 침출면이 존재하는 해빈 단면, 지하수 침출면이 존재하지 않는 해빈 단면, 릿지&런넬이 존재하는 해빈 단면.

이와 같은 분류에 의해 해빈을 분류한 뒤, 개별 해빈 유형을 설명하고 유형 간 차이에 대해 살펴보았다. 이러한 분류는 선행연구에서 언급한 해빈 분류 시 고려되는 5가지 중, 지형 형태를 반영한 분류이며 공간적 자료를 활용한 분류로 볼 수 있다. 따라서 단편적인 단일 해빈의 이해를 넘어서기 위함이기도 하다. 이 때 적용한 변수는 앞서 언급한 해빈폭, 단면적, 경사각과 항공사진을 통해 관측한 해빈 길이, SWAN 모형을 통해 산출된 쇄파고, 유의파고, 퇴적물 입도이다. 해빈 유형간 차이를 확인하기 위해 T검정(2개의 변수) 혹은 ANOVA(3개 이상의 변수)를 활용하였다. ANOVA에서 평균의 동질성 로버스트 검정은 Welch의 방법을 활용하였으며, 사후 분석시 등분산을 가정되는 경우 Bonferroni의 방법을 활용하였으며, 등분산이 가정되지 않을 경우 Dunnett의 T3를 활용하였다.

2.2.3. 퇴적물 분석

2017년 8월에 고조선에서 퇴적물을 채취하여 해빈간의 퇴적물 입도 차이를 확인하고자 하였다. 퇴적물 채취는 과도리를 제외한 모든 해빈에서 실시하였다. 시료 채취 장소를 RTK-GPS를 통해 기록하였으며, 채취한 시료는 40g 이상을 확보하였다. 채취한 시료는 비닐백에 넣어 외부의 불순물이 유입되지 않게 하며, 이를 실험실로 가져와 입도분석을 실시하였다. 입도분석을 위해 음건시료 20g 내외를 비커에 담아 10% 과산화수소(H_2O_2)와 10%의 염산(HCl)을 사용하여 유기물과 탄산염을 제거하였다. 이후 증류수를 이용하여 따라 붓기를 통해 염분과 잔류시약을 제거한 뒤, 시료를 재건조 시킨 후 건식 체질을 실시하였다. 2mm 미만의 모래를 Sieve Shaker MOD. RP(CISA)를 이용하여 -2ϕ , -1.5ϕ ,

-1Φ , -0.5Φ , 0Φ , 0.5Φ , 1Φ , 1.5Φ , 2Φ , 2.5Φ , 3Φ , 3.5Φ , 4Φ 의 표준망체로 입도별 분리를 실시하고 무게를 측정하였다. 이후 Folk and Ward 방법을 통해 평균 입도, 분급, 왜도를 구하였으며, 계산은 GRADISTAT 프로그램을 이용하였다(Blott and Pye, 2001). 분석된 입도 분포는 3장인 단기적 해빈 변화에서의 유형에 따른 차이를 확인하는 것과, 5장에서 해빈 분류에서 활용되었다.

2.2.4. SWAN 모델링

해빈의 변화에 가장 큰 영향을 주는 요인은 파랑으로, 연구 지역에 근접한 파랑 관측기계는 가대암²⁰⁾ 등표와 외연도 파고 부이²¹⁾가 있다. 등표의 경우 파고와 주기만을 측정하며, 부이는 파고, 파주기, 파향을 측정하고 있다. 등표와 부이 모두 개별 해빈과 이격되어 있기에, 개별 해빈에서 관찰되는 실제 파랑 조건을 정확하게 반영하고 있다고 보기는 힘들다. 따라서 개별 해빈에 대한 파랑의 영향을 보다 명확하게 살펴보고자 파랑 모델링을 실시하였다.

활용된 파랑모델은 Delft-3D Wave 모듈로 네덜란드 델프트(Delft) 대학에서 개발된 SWAN 4.03.01 버전을 채택하고 있다. SWAN 모델은 파랑의 생성, 전파, 소멸을 산정하는 모델로, 깊이 변화에 의한 굴절, 천수변형, 바닥마찰과 파랑의 붕괴로 인한 에너지 분산을 포함하고 있다. ST-Wave와 함께 전 세계적으로 널리 쓰이는 파랑모형으로, 파랑작용의 평형방정식(wave action balance equation)을 기본 방정식으로 채택하고 있다.²²⁾

모델의 격자는 직교곡선좌표로 좌표 체계는 카테시안 직교좌표를

20) $36^{\circ} 77' N$, $125^{\circ} 98' E$

21) $36^{\circ} 25' N$, $125^{\circ} 75' E$

22) Delft3D-Wave User manual(2017)

활용하였다(그림 2.9). 격자 크기는 선행연구를 다수 참고하여(Hopkins et al., 2017; Magana et al., 2018; De Boer et al., 2017; Choi et al., 2013; Hequette and Aernouts, 2010; Bennett et al., 2017; Pan et al., 2014)²³⁾ 1km x 1km로 결정하였으며, nesting기법을 활용하여 개별 해빈에서는 공간적 해상도가 높은 10m x 10m의 격자를 중첩하여 모의하였다. 큰 그리드 격자의 개수는 86x101로 총 8,686개이며, 작은 그리드 격자는 총 680,160개 이다(표 2.6).

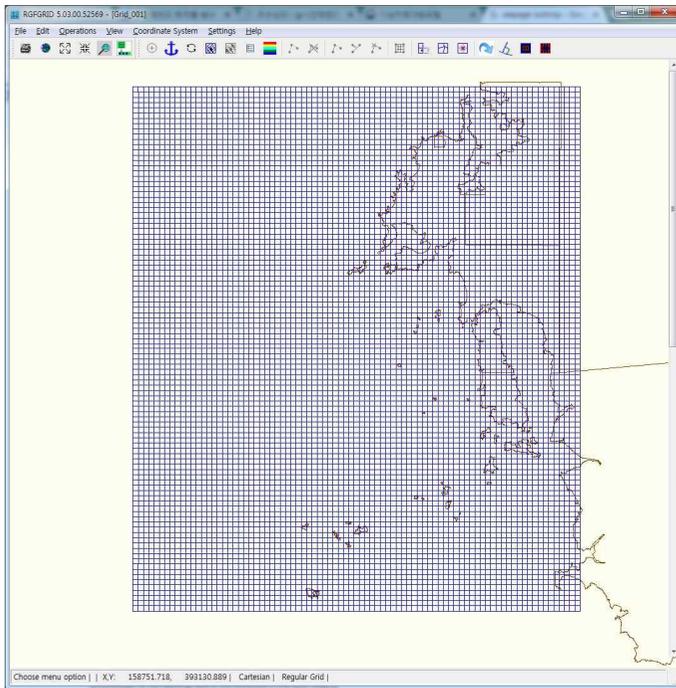


그림 2.9. SWAN 모형 격자 구축(큰 격자체계만 표시)

23) 각각 1km x 1km(nesting, 200m, 40m, 13m), 100m x 100m, 2km x 2km(nesting, 166m, 20m), 10m x 10m, 50m x 50m, 1km x 1km(nesting, 300m x 1km), 250m x 250m

표 2.6. 해빈별 그리드 수

명칭	m	n	개수	명칭	m	n	개수
갈음	89	47	4,183	신두	231	378	87,318
꽃지	425	196	83,300	연포	87	143	12,441
꾸지	44	29	1,276	의항	97	62	6,014
만리포	168	123	20,664	장삼포	159	116	18,444
몽산 ²⁴⁾	701	338	236,938	천리포	140	112	15,680
맞개	221	165	36,465	과도	106	93	9,858
백사장	225	190	42,750	학암북	78	121	9,438
삼봉 ²⁵⁾	420	205	86,100	학암서	163	57	9,291

수심자료는 다음과 같이 구축되었다. 국립해양조사원에서 제공받은 태안지역 일대 수심자료와 해도, 현장 측량 자료를 비교 후 활용하였으며, 자세한 상황은 표 2.7과 같다. 국립해양조사원에서 확보한 수심 측량 자료의 경우 과도리 부근 이북으로는 존재하지 않아, 해당 영역은 해도와 현장 자료만으로 수심이 입력되었다. 따라서 높은 해상도의 수심 자료를 반영하지 못한 한계가 있다.

표 2.7. 모델 수심 입력 자료

출처	축척(해상도)	자료 구분	기타
국립해양조사원	10m 이하	수심 측량 자료	x, y, z, 형태
국립해양조사원	1:75,000	해도	No. 3418
현장 자료	3m 이하	단면 측량 자료	RTK-GPS

24) 몽산-달산-청포대 모두 포함

25) 삼봉-기지포-안면-두여 모두 포함

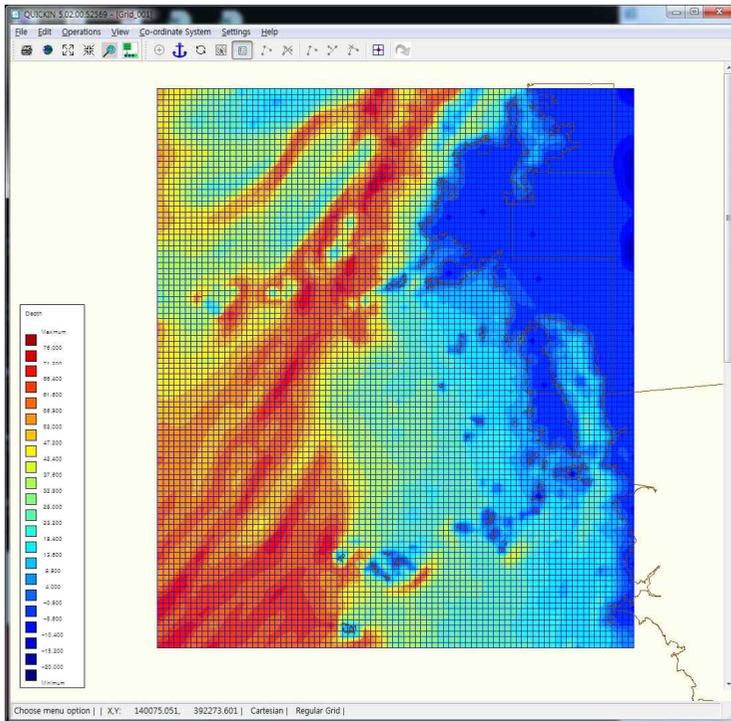


그림 2.10, SWAN 모형 평균해면수심도

이 외에 외연도 부이에서 측정된 풍속, 풍향, 유의파고, 파주기, 파향이 모형의 입력 자료로 활용되었으며(표 2.8), 2016년 11~12월에 걸쳐 모의된 결과와 신진도에서 측정된 실측값을 비교하여 모형을 보정하였다. 보정 이후 모의 결과를 spss를 이용하여 통계분석 한 결과 유의파고의 상관계수는 0.898, 최대 파주기는 0.761로, 99% 수준에서 유의하였다(e.g. Magana et al, 2018).

연구를 위한 파랑 모의는 5시기에 걸쳐 이루어 졌는데, 이 시기는 단면 측량시기에 일치시킨 것이다. 변수의 평균값을 해당 일시의 대푯값으로 선택하였으며, 이를 바탕으로 파랑을 모의하였다.

표 2.8. 모델 기후 입력 자료

일시	풍속(m/s)	풍향(deg)	유의파고(m)	파주기(sec)	파향(deg)
16.11.15~ 17.02.10	6.71	191.33	1.32	5.70	180.81
17.02.11~ 17.05.09	4.45	222.15	0.80	4.38	177.50
17.05.10~ 17.08.05	3.95	190.27	0.61	3.98	201.44
17.08.06~ 17.11.04	5.45	132.09	0.82	4.50	180.89
17.11.05~ 18.02.01	6.49	174.47	1.35	5.84	182.94

모의 결과를 통해 개별 측선 말단부(바다방향)에서의 유의파고와 유의파주기, 개별 해빈 offshore에서의 심해파고, 심해파장이 산출되었으며, 심해파고와 심해파장을 통해 쇄파고를 계산하였다(Komar and Gaughan, 1972). 산출된 자료는 3장인 단기적 해빈 변화에서의 유형에 따른 차이를 확인하는 것에 활용되었으며, 5장에서 해빈 분류에도 활용되었다.

$$H_b/H_o = 0.56 (L_o/H_o)^{1/5} \dots\dots\dots(1)$$

H_b = 쇄파고, H_o = 심해파고, L_o = 심해파장

2.2.5. 항공사진 분석

항공사진 분석은 수십 년에 걸친 해빈 변화를 분석하기 위해 활용하였다. 활용한 항공사진은 약 10년의 간격으로, 최대한 시간 주기를 일치시키려 하였지만 자료의 한계로 인해 기간 차이가 존재한다. 활용한 항공사진 목록과 축척은 표2.9와 같다.

표 2.9. 항공사진 촬영 시기와 축척 - 1

	1967		1977		1984(1986)	
	촬영일	축척	촬영일	축척	촬영일	축척
꾸지나무	09/12/1967	1:37500	05/30/1977	1:20000	07/01/1984	1:20000
학암북	09/12/1967	1:37500	05/30/1977	1:20000	08/18/1984	1:20000
학암서	09/12/1967	1:37500	05/30/1977	1:20000	08/18/1984	1:20000
신두리	09/12/1967	1:37500	06/05/1977	1:20000	08/18/1984	1:20000
의항	09/12/1967	1:37500	06/05/1977	1:20000	06/14/1984	1:20000
파도리	09/12/1967	1:37500	06/05/1977	1:20000	09/15/1984	1:20000
갈음이	09/12/1967	1:37500	06/05/1977	1:20000	09/15/1984	1:20000
연포	09/12/1967	1:37500	06/05/1977	1:20000	09/15/1984	1:20000
몽산포	09/12/1967	1:37500	06/05/1977	1:20000	10/06/1984	1:20000
달산포	09/12/1967	1:37500	06/05/1977	1:20000	09/15/1984	1:20000
청포대	09/12/1967	1:37500	06/05/1977	1:20000	09/15/1984	1:20000
백사장	09/12/1967	1:37500	06/05/1977	1:20000	09/15/1984	1:20000
삼봉	09/12/1967	1:37500	06/05/1977	1:20000	09/15/1984	1:20000
기지포	09/12/1967	1:37500	06/05/1977	1:20000	09/15/1984	1:20000
안면	09/12/1967	1:37500	06/05/1977	1:20000	09/15/1984	1:20000
두여	09/12/1967	1:37500	06/05/1977	1:20000	09/15/1984	1:20000
밭개	09/12/1967	1:37500	06/05/1977	1:20000	09/15/1984	1:20000
꽃지	09/12/1967	1:37500	06/05/1977	1:20000	05/03/1986	1:10000
장삼포	09/12/1967	1:37500	06/05/1977	1:20000	10/16/1986	1:10000

표 2.9. 항공사진 촬영 시기와 축척 - 2

	1998(1996)		2007(2006)		2016 ²⁶⁾	
	촬영일	축척	촬영일	축척	촬영일	축척
꾸지나무	09/21/1996	1:37500	09/07/2006	1:20000	05/05/2016	0.5m
학암북	09/21/1996	1:37500	09/07/2006	1:20000	05/05/2016	0.5m
학암서	10/02/1998	1:20000	09/07/2006	1:20000	05/05/2016	0.5m
신두리	10/02/1998	1:20000	09/01/2006	1:20000	04/26/2016	0.5m
의항	10/02/1998	1:20000	09/01/2006	1:20000	04/24/2016	0.5m
파도리	10/03/1998	1:20000	11/04/2007	1:20000	05/07/2016	0.5m
갈음이	05/05/1998	1:20000	11/04/2007	1:20000	05/07/2016	0.5m
연포	05/05/1998	1:20000	11/04/2007	1:20000	05/07/2016	0.5m
몽산포	05/05/1998	1:20000	11/04/2007	1:20000	05/07/2016	0.5m
달산포	05/05/1998	1:20000	11/04/2007	1:20000	05/07/2016	0.5m
청포대	05/05/1998	1:20000	11/04/2007	1:20000	05/07/2016	0.5m
백사장	05/05/1998	1:20000	11/25/2007	1:20000	05/07/2016	0.5m
삼봉	05/05/1998	1:20000	11/25/2007	1:20000	05/07/2016	0.5m
기지포	05/05/1998	1:20000	11/25/2007	1:20000	05/07/2016	0.5m
안면	10/03/1998	1:20000	11/25/2007	1:20000	05/07/2016	0.5m
두여	10/03/1998	1:20000	11/25/2007	1:20000	05/07/2016	0.5m
밭개	10/03/1998	1:20000	11/25/2007	1:20000	05/07/2016	0.5m
꽃지	10/03/1998	1:20000	11/27/2007	1:20000	09/24/2016	0.5m
장삼포	10/03/1998	1:20000	11/24/2007	1:20000	05/01/2016	0.5m

26) 2016년은 정사 보정된 영상으로 해상도를 제시하였다.

천리포와 만리포의 경우 1967년부터 약 30년간의 항공사진이 부재하여 분석에 포함하지 않았다. 2016년 영상은 정사 보정된 영상으로, 2016년 영상을 기준으로 다른 영상들에 대해 보정작업을 실시하였다. 2016의 정사영상과 다른 항공사진들을 상호 비교하여, 변화가 거의 없는 지점을 대상으로 15-19개의 GCP(Ground Control Point)를 선정하여 기하보정(geometric correction)을 실시하였는데, 이때 기하보정 에러(geometric correction error)는 0.6m 이하로 제한하였으며, 방법은 3rd Order Polynomial을 활용하였다(e.g. Ford, 2013; Blue and Kench, 2017; Del Rio et al, 2013).

항공사진이나 위성영상 등을 통해 해안선을 탐지할 때 중요한 점 중 하나는 해안선을 무엇으로 결정할 것인가이다(Moore, 2000; Boak and Turner, 2005). 다양한 지시자(proxy)들이 활용되고 있다. 활용되는 지시자는 고조선(HWL, High Water Line), 사구 말단부, 해수면(waterline) 등으로, 항공사진, 위성영상 등에 존재하는 지시자를 탐지하여, 지시자의 변화 양상을 확인한다. 이 연구에서 활용한 지시자는 수평적 지시자인 고조선으로,²⁷⁾ Barman(2018)에 따르면 “The High Water Line (HWL) defined as the wet/dry line is the most usually used shoreline indicator because it is visible ~” 로 고조선이 광범위하게 활용되고 있다. 그러나 여기서 언급하고 있는 wet/dry line은 연구자들에 따라 크게 두 의미로 활용된다(Boak and

27) 평균고조위(MHW, Mean High Water)를 활용한 연구들의 수가 다수이나, 평균고조위를 지시자로 활용하기 위해서는 정확한 촬영 시간(항공사진 혹은 위성영상)에 대한 정보와 조위에 대한 정보가 필요한데, 과거 항공 사진들의 경우 정확한 촬영시기와 조위정보가 부재하여 이 연구에서는 고조선을 식별 대상으로 활용하였다.

Turner, 2005). 하나는 고조선을 구분하는데 활용하는 지시자로 조위가 하강하더라도 위치가 변하지 않는데, Barman(2018)에서 언급하는 wet/dry line은 고조선을 의미한다. 다른 의미로는 평균고조(Mean High Water, MHW)와 해수면(waterline)을 활용하는 방법에서 활용되는데, 항공사진에 촬영된 해수면 인근의 젖은/젖지 않은 모래를 지칭하며, 위치가 변화하는 특징이 있다. 이 연구에서는 전자의 의미인 고조선의 wet/dry line을 활용하고 있으며, 혼란을 방지하기 위해 고조선이라고만 언급하였다.

고조선(HWL)과 단기 측량시 선정한 수평 0m까지의 거리를 해변쪽으로 정의하고 변화를 확인하였다. 판독된 해안선은 DSAS(Digital Shoreline Analysis System, 4.3)를 통해 분석하였으며, 분석 대상이 되는 측선을 단기 측량시 선정한 측선과 동일하게 선정하였다. DSAS는 해안선에 수직인 측선을 설정하여, 해안선의 변화를 통계적으로 보여주는 분석도구이다(Himmelstoss, 2009). 계산된 통계 값은 가장 최근의 해안선과 가장 오래된 해안선간의 거리를 나타내는 순 해안선 변화(Net Shoreline Movement, NSM), 이를 연 단위 비율로 환산한 최종 해안선 변화량(EndPoint Rate, EPR), 변화에 선형 회귀를 적용한 선형 변화량(Linear Regression Rate, LRR)이다.

2.2.6. 해변 분류를 위한 통계분석

5장에서 태안 지역 일대에 위치한 해변을 분류하기 위해 통계분석을 활용하였다. 이 연구에서 활용한 방법은 군집분석(clustering analysis)과 다차원 척도법(multidimensional scaling, MDS)이다. 군집분석을 활용하여 통계적으로 해변을 분류한 뒤 다차원 척도 차원에 도식화 하여 산포를 살펴보았다.

군집분석은 사전정보가 밝혀지지 않은 각 객체들의 속성을 파악하고, 속성이 높은 객체들끼리 군집을 만드는 방법이다(오택섭과 최현철, 2003). 이 연구에서는 선행연구를 참고하여 계층적 군집분석(hierarchical clustering)의 집단 간 평균 연결법을 활용하였다. 군집분석에서 중요한 점은 군집 분석 이후 어떠한 차원에서 군집을 분류할 것이냐는 점이다. 명확한 군집 기준이 존재하지 않기 때문에, 선행연구에서는 주로 Gowers general Similarity coefficient와 같은 지수를 활용하거나(Scott et al., 2011), 기존 선행연구에서 제시된 분류에 기반하여 구분하였다(de Souza Pereira et al., 2010). 이 연구에서는 3장과 4장을 통해 제시된 해빈 유형을 기준으로 군집분석의 군집을 분류하였다.

다차원 척도법은 측정 대상의 속성을 하나의 차원이 아닌 다차원의 척도에, 유사성 측도에 의거해서 배치시키는 것이다(노형진, 2010). 유사성이 큰 대상끼리는 가깝게, 유사성이 작은 대상끼리는 멀게 위치시킨다. 선행연구를 따라 이 연구에서는 다차원 척도법중 비계량적 방법(nonmetric MDS)을 활용하였다(Scott et al., 2011; de Souza Pereira et al., 2010).

3. 해빈의 계절적 단면 변화

이 장은 해빈²⁸⁾ 단면의 형태와 단면의 변화 양상의 차이를 통해 해빈을 분류한 뒤, 지오메트리(geometry), 구성 물질, 외력(forcing factor)으로 유형간 차이를 설명하였으며, 유형에서 나타나는 경향성을 지질조건(geological factor)과 비교하였다.²⁹⁾ 이후 연구 결과를 바탕으로 태안지역해빈의 개념적 모델을 제시하였다.

해빈단면은 에너지와 퇴적물 수지에 따라 변화한다. 특히 해빈 순환(beach cycle)으로 지칭되는 여름과 겨울에 반복되는 해빈 단면의 퇴적과 침식은, 계절적 변화에 따라 해빈 단면 변화가 발생하는 대표적인 현상이다. 퇴적과 침식이 계절적으로 반복되고 있지만, 해빈 단면 전체에 걸쳐 하나의 침/퇴적 프로세스만 발생하는 것은 아니다. 파랑이 강하면 바다방향(offshore)으로 퇴적물이 이동하여 상부 해빈 단면의 경사가 감소하며, 파랑이 약하면 육지방향(onshore)으로 퇴적물이 이동하여 상부 해빈 단면의 경사가 증가한다(Masselink and Pule, 2006). 파랑의 세기는 계절적 변화에 따라 변화하며, 스톰(태풍)의 영향을 받기도 한다.

유입되는 에너지에 대한 반응은 파랑 조건과 퇴적물 상황에 따라 다르게 나타날 수 있으며, 이를 이론화 한 것이 평형해빈단면(Equilibrium Beach Profile)이다. 평형해빈단면은 Brunn에 의해 처음 제시되고, Dean에 의해 발전된 모형으로, 스위시 존에서의 평형해빈단면(해빈 경사각)은 파고가 줄어들거나, 파주기와 퇴적물 입

28) 3장에서 언급하는 해빈은 전빈(foreshore)에 해당한다. 후빈(bakshore)은 포함되지 않는다.

29) 이러한 분류는 앞서 서론에서 언급한 해빈 분류 중 지형 형태를 바탕으로 한 분류이며 한편으로는 공간적 자료를 활용한 분류로 볼 수 있다. 이 연구를 통해 획득한 자료에서 시간적 변화를 강조하면 해빈 state의 이행으로 자료를 해석할 수도 있으나, 전반적인 연구 목적과 맞지 않아 행하지 않았으며 차후 실시할 계획이다.

도가 증가하면 커진다. 비록, 해빈의 단면을 무한하다 가정하고 단면에서 릿지&런넬의 형성이 간과되고 있는 등의 한계점이 존재하지만, 평형해빈단면은 에너지와 퇴적물이 해빈 단면에 중요함을 지시한다.

우리나라 서해안의 경우 겨울철 북서계절풍이 강한 파랑조건을 형성하여 해빈을 침식시키고 있음을 다수의 연구들에서 언급하고 있다 (김장수 등, 2011; 추용식 등, 1996). 하지만 선행연구들은 개별 해빈 혹은 두셋의 해빈에서 진행되어 주로 해빈의 변화가 어떻게 진행되는지, 변화의 원인이 무엇인지에 초점을 맞추었다. 따라서 태안 지역 해빈에 대한 연구가 일정수준 진행된 지금, 태안 지역 전체 해빈을 연구함으로써 태안 지역 해빈의 전반적인 이해를 높이고, 지역에서 작용하는 일반성에 대해 논해 볼 수 있을 것이다.

3.1. 단면 변화 분류

3.1.1. 개관

총 21개의 해빈, 70개의 측선에 대해 단면 측량과 퇴적물 분석을 실시하였으며, 이를 요약하면 다음의 표 3.1과 같다. 해빈폭은 평균 7.28m로 최대는 천리1의 73.11m, 표준편차는 14.33m이다. 해빈 이름 뒤의 숫자는 측선 번호를 지칭한다. 면적은 최소 176.45 m²~1538.09m²의 범위를 보였으며, 경사각은 최소 0.60° 에서 최대 6.18° 의 범위를 보였다. 쇄파고와 유의파고는 안면도 북부에서 높았으며, 태안 북부지역으로 가면서 낮아지는 경향을 보였다.

표 3.1. 해빈 측선별 속성

구분	해빈폭 (m)	단면적 (m ²)	경사각 (°)	해빈길이 (m)	입도 (mm)	쇄과고 (m)	유의과고 (m)
꾸지1	8.63	429.17	3.50	200	0.34	0.25	0.12
꾸지2	8.71	403.53	3.70	200	0.34	0.25	0.10
학암북1	3.33	479.74	2.04	1000	0.56	0.34	0.10
학암북2	3.05	446.70	2.34	1000	0.56	0.34	0.12
학암서1	2.73	887.51	1.89	676	0.22	0.39	0.06
학암서2	3.41	777.38	2.17	676	0.22	0.39	0.04
신두1	-1.81	1099.87	1.07	3400	0.22	0.34	0.20
신두2	0.09	1115.38	1.09	3400	0.23	0.34	0.18
신두3	-1.18	1012.21	1.13	3400	0.20	0.34	0.19
신두4	0.29	968.70	1.16	3400	0.20	0.34	0.18
신두5	-3.64	957.67	1.07	3400	0.20	0.34	0.15
신두6	-1.87	1288.66	0.84	3400	0.20	0.34	0.12
의항1	8.11	569.96	2.52	521	0.41	0.40	0.30
의항2	6.53	549.01	2.50	521	0.41	0.40	0.28
천리1	73.11	633.37	1.72	432	0.48	0.26	0.12
천리2	42.23	649.80	1.59	432	0.48	0.26	0.16
만리1	-	659.32	1.89	2000	0.44	0.39	0.24
만리2	-	704.95	1.73	2000	0.40	0.39	0.21
만리3	-	709.66	1.72	2000	0.40	0.39	0.18
만리4	-	699.45	1.65	2000	0.40	0.39	0.15
과도1	10.32	291.92	6.18	637	-	0.48	0.26
과도2	12.44	305.86	6.02	637	-	0.48	0.25
갈음1	12.62	741.04	2.09	200	0.35	0.24	0.24
갈음2	17.46	791.46	2.34	200	0.35	0.24	0.24
연포3	45.19	374.19	1.69	521	0.24	0.42	0.34
연포2	47.88	213.19	3.30	521	0.24	0.42	0.35
연포1	38.05	176.45	5.16	521	0.24	0.42	0.37
몽산1	-	1504.57	0.60	2300	0.33	0.47	0.44
몽산2	-	1434.68	0.64	2300	0.33	0.47	0.43
달산1	1.19	1401.63	0.77	1090	0.17	0.47	0.40
달산2	-1.43	1352.55	0.76	1090	0.17	0.47	0.40
청포1	1.81	1200.91	0.94	3600	0.16	0.45	0.36
청포2	2.84	1225.45	0.95	3600	0.16	0.45	0.36
청포3	2.57	1194.50	0.95	3600	0.16	0.45	0.22
청포4	2.85	1270.86	0.94	3600	0.16	0.45	0.22
백사장1	-	759.32	1.91	900	0.24	0.51	0.43
백사장2	-	581.80	1.53	900	0.24	0.51	0.47
백사장3	-	545.46	1.25	900	0.42	0.51	0.47
삼봉1	1.82	797.93	1.47	835	0.21	0.51	0.49
삼봉2	1.78	814.30	1.47	835	0.21	0.51	0.49
삼봉3	0.61	872.37	1.34	835	0.21	0.51	0.47
삼봉4	2.79	907.35	1.40	835	0.21	0.51	0.48
기지1	5.50	972.36	1.40	1100	0.23	0.51	0.47
기지2	4.85	980.38	1.35	1100	0.23	0.51	0.48
기지3	3.17	1051.86	1.19	1100	0.23	0.51	0.46
기지4	2.41	1069.87	1.13	1100	0.23	0.51	0.46

안면1	7.84	1538.09	0.85	1030	0.19	0.50	0.45
안면2	3.77	1427.05	0.91	1030	0.19	0.50	0.46
안면3	-0.29	1033.60	1.13	1030	0.19	0.50	0.45
안면4	0.71	1064.12	1.12	1030	0.19	0.50	0.45
두여1	1.64	1010.81	1.22	470	0.17	0.50	0.43
두여2	2.30	1021.24	1.24	470	0.17	0.50	0.42
두여3	1.13	998.46	1.26	470	0.17	0.50	0.37
두여4	2.60	1013.06	1.34	470	0.17	0.50	0.36
밭개1	-3.42	785.49	1.25	1400	0.25	0.48	0.40
밭개2	3.18	846.59	1.38	1400	0.25	0.48	0.40
밭개3	3.01	847.66	1.36	1400	0.25	0.48	0.40
밭개4	1.09	889.94	1.45	1400	0.25	0.48	0.37
밭개5	0.86	913.84	1.35	1400	0.25	0.48	0.39
밭개6	0.72	834.27	1.36	1400	0.25	0.48	0.34
꽃지1	-	762.98	1.52	2900	0.24	0.45	0.39
꽃지2	-	736.80	1.56	2900	0.24	0.45	0.39
꽃지3	-	697.86	1.67	2900	0.24	0.45	0.37
꽃지4	-	707.08	1.62	2900	0.24	0.45	0.38
꽃지5	-	762.88	1.36	2900	0.26	0.45	0.37
꽃지6	-	717.55	1.40	2900	0.26	0.45	0.37
장삼1	2.16	1055.20	1.05	1300	0.20	0.36	0.36
장삼2	3.35	1048.54	1.19	1300	0.20	0.36	0.36
장삼3	0.18	953.65	1.24	1300	0.20	0.36	0.36
장삼4	1.02	936.36	1.27	1300	0.22	0.36	0.36

3.1.2. 분류 기준

일반적으로 해빈 단면 변화를 분석하는 방법은 크게 두 방향으로 진행되고 있다. 하나는 해빈 단면을 시기별로 도식화하여 단면의 변화를 정성적으로 해석하는 것이며, 다른 하나는 정량적으로 해석하는 것이다. 여기서는 해빈 단면의 특징에 따라 먼저 분류한 뒤 단면 변화에 대한 해석을 실시하였다. 먼저 각 유형별 대표 측선을 예시로 정성적으로 해석할 것이며, 이후 유형 간 차이를 확인하기 위해 통계적 방법을 활용해 해석할 것이다.

분류 기준은 앞서 언급하였던 것처럼 지하수침출면과 릿지&런넬이다. 지하수침출면과 릿지&런넬은 각각 해빈&에너지의 상황과 해빈&에너지의 변화 양상을 대표한다(각각 그림 3.1, 3.2 참조).

지하수침출면과 해빈 단면의 관계를 간단하게 도식화 할 수는 없

다. 이는 이하에서 언급하는 파랑의 스워시³⁰⁾에 관련된 세 가지 프로세스가 복잡하게 상호작용하기 때문이다(Horn, 2002). 스워시 발생 시 일부 파랑이 해변에 침투(infiltration)하면서 스워시 부피가 감소하고, 이는 스워시 에너지의 감소를 가져와 파랑에 의해 운반된 퇴적물이 해변 상부(스워시 존)에 퇴적된다. 한편, 파랑이 해변에 침투하는 경우 해변의 저항력이(normal stress) 증가하여 경사가 증가하고, 해변에서 유출되는 경우 저항력이 감소하여 경사가 감소한다. 또한 파랑이 해변에 침투하는 경우 sheet flow depth가 감소하여 전단응력이 증가하고, 경사가 감소한다. 위와 같이 스워시 발생으로 파랑이 해변에 흡수되면서 복잡한 프로세스가 나타나며, 이들의 상호작용에 따라 실제 현상이 발현된다. 지하수침출면과 입도의 관계는 상대적으로 간단하게 도식화 되는데, 입도에 의해 침출면의 유무가 결정된다. 정확한 임계 퇴적물 입도(critical grain size)는 연구마다 다소 범위의 차이가 있지만 일반적으로 0.3mm-0.6mm를 언급하며(Karambas, 2003), 이보다 조립할 경우 지하수침출면이 존재한다고 본다. 지하수침출면이 존재하게 되면, 이를 경계로 파랑의 소산방식이 반사형(reflective)과 소산형(dissipative)으로 구분된다(Masselink and Short, 1993). 따라서 지하수침출면의 존재 유무는 입도와 파랑에너지 자체를 의미하는, 해변의 상황에 대한 지시자로 볼 수 있다.

30) swash의 정확한 의미는 uprush와 backwash를 모두 포함하나, 대부분의 경우 swash를 uprush와 동일하게 활용하고 있다. 이 연구에서 언급하는 스워시는 uprush를 의미한다.



그림 3.1. 꾸지나무골의 지하수 침출면. 상단은 육지에서 바다 방향으로, 하단은 바다에서 육지방향으로 촬영한 것이다.

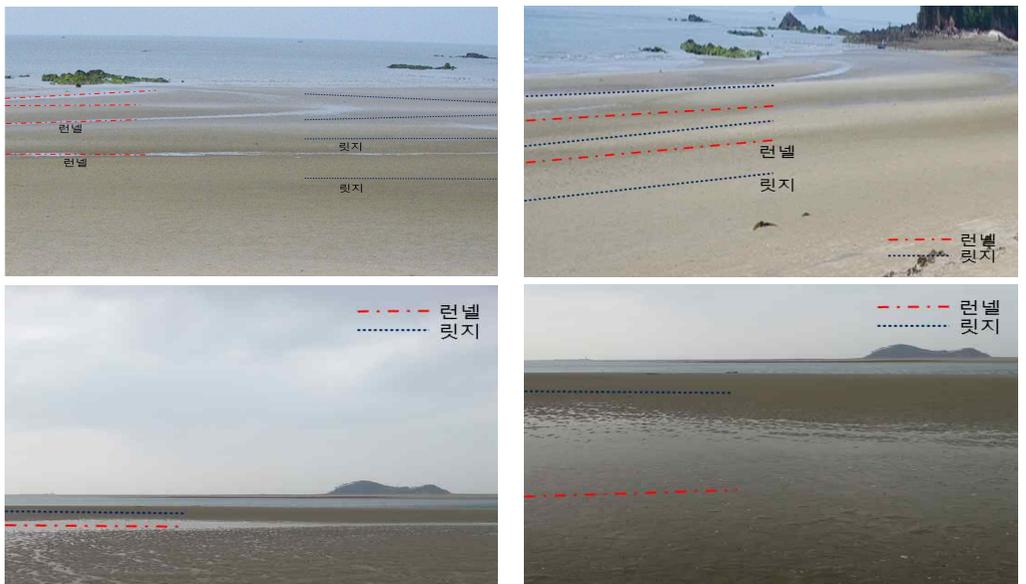


그림 3.2. 릿지&런넬. 상단은 장삼포, 하단은 백사장 해빈이다.

릿지&런넬은 대조차 해변에서 볼 수 있는 유일한 2차지형 (secondary morphology)으로 규모와 형태 등에 따라 크게 세 종류로 구분된다(Masselink et al., 2006). 각각 Slip-face bars, Low-amplitude ridges, Sand waves로 불리며, 태안지역에서 발견되는 릿지는 모두 Low-amplitude ridges에 해당한다. 약한 파랑과 대조차 조건에서 주로 관찰되는 Low-amplitude ridges는, 완만한 경사의 해변에서 크지 않은 릿지&런넬의 기복(0.5-1m)을 보이며, 육지방향으로 미약하게 릿지가 비대칭적이다. 릿지는 상대적으로 강한 파랑 조건하에서, 서프존에서의 바다방향으로 퇴적물 이동과 서프존 밖에서의 육지방향으로의 퇴적물 이동으로 인해 퇴적물이 서로 수렴하여 브레이킹 존에서 생성된다. 이후 파랑의 비대칭성 (wave skewness, asymmetry), 가속, 난류와 bed return flow, 스위시 존에서의 부유 약화의 상대적인 힘에 따라 육지방향 혹은 바다방향으로 이동한다. 반대로 파랑 조건이 약한 경우 서프존에서는 육지방향으로 퇴적물이 이동하며 서프존 밖에서는 퇴적물의 이동성이 감소하거나 이동하지 않아 새로운 릿지가 생성되지 않는다 (Masselink et al., 2006). 파랑의 상대적 크기 변화는 계절적 변화와 일치하기에, 우리나라에서 겨울철 릿지&런넬이 소멸, 기복 감소, 육지방향으로 이동한다는 선행연구들은 스위시 혹은 보어존에서의 변화를 관찰 해석한 것이라 볼 수 있다(김찬웅, 2012; 추용식, 1996). 이 모든 프로세스는 조차에 의해 영향을 받으며, 조석의 범위가 넓을수록 릿지&런넬의 이동성은 약하다. 따라서 릿지&런넬의 존재 유무와 계절적 변화양상은 파랑에너지 자체와 변화를 뜻하는 것으로, 실질적인 퇴적물의 이동 즉 지형변화라는 측면에서도 의미가 있다.

3.1.3. 분류 결과

위와 같은 분류기준에 의해 해빈 측선을 분류한 결과 지하수침출면과 릿지&런넬이 모두 존재하지 않는 측선이 7개, 지하수침출면이 존재하지 않고 릿지&런넬이 계절적으로 존재하는 측선이 16개, 지하수침출면이 존재하지 않고 릿지&런넬이 항상 존재하는 측선이 27개, 지하수침출면이 존재하고 릿지&런넬이 존재하지 않는 측선이 15개, 지하수침출면과 릿지&런넬이 모두 존재하는 측선이 5개로 분류되었다(표 3.2). 지하수침출면이 존재하며 릿지&런넬이 한 계절이라도 존재하는 측선은 만리와 백사장 해빈에 속해 있다. 동일한 해빈에 속해있더라도 측선에 따라 다른 유형으로 분류되는 경우도 상당수 존재하였다.

표 3.2. 해빈 단면에 의한 분류 결과

구분 (측선수)	소산형 (7)	계절적 릿지형 (16)	릿지&런넬형 (27)	저조간석지형 (15)	저조간석지 + 릿지형 (5)
침출면	X	X	X	O	O
릿지&런넬	X	계절적 존재	항상 존재	X	O
해당 측선	학암서1, 학암서2, 신두1, 꽃지1, 꽃지2, 꽃지3, 꽃지4	신두2, 의항1, 의항2, 두여1, 두여2, 두여3, 두여4, 밧개1, 밧개2, 밧개3, 밧개4, 밧개5, 밧개6, 꽃지5, 꽃지6, 장삼포4	신두3, 신두4, 신두5, 신두6, 몽산1, 몽산2, 달산1, 달산2, 청포대1, 청포대2, 청포대3, 청포대4, 삼봉1, 삼봉2, 삼봉3, 삼봉4, 기지포1, 기지포2, 기지포3, 기지포4, 안면1, 안면2, 안면3, 안면4, 장삼포1, 장삼포2, 장삼포3	꾸지1, 꾸지2, 학암북1, 학암북2, 천리1, 천리2, 만리1, 파도1, 파도2, 갈음1, 갈음2, 연포1, 연포2, 연포3, 백사장3	만리2, 만리3, 만리4, 백사장1, 백사장2

3.2. 단면 변화 해석

지하수침출면과 릿지&런넬에 의거하여 분류된 각 해변 유형에서, 가장 대표적인 측선 단면을 다음의 그림 3.3과 같이 도시하였다. 대표 단면은 각각 신두 1, 꽃지 6, 장삼포 3, 학암북 2, 만리 2로 선택하였다. 전반적으로 지하수침출면이 존재하지 않을수록, 릿지&런넬이 존재할수록 복잡한 지형과 지형 변화를 보였다. 또한 지하수침출면이 존재하는 경우 단면 길이가 짧았다. 유형의 이름은 해변 분류 모델(beach classification model)³¹⁾에서 일부 유래하였으며, 일부는 해변의 특성을 반영한 것이다. 개별 유형의 이름은 각각 소산형, 계절적 릿지형, 릿지&런넬형, 저조간석지형, 저조간석지+릿지형으로, 개별 해변 단면은 부록1에서 제시하였다. 이 연구의 측량 결과는 기존 선행 연구들에서 제시한 개별 해변의 단면과 일치하는 것으로 나타나며(e.g. 추용식 등, 1996; 김찬웅, 2012; 김찬웅 등, 2015), 또한 해양수산부에서 실시중인 연안침식 모니터링의 해변 단면 측량 결과와도 일치하는 것으로 나타난다.³²⁾

소산형의 경우 지하수침출면과 릿지&런넬이 없으며, 연구 기간 전반에 걸쳐 큰 변화가 관찰되지 않았다. 상당수의 해변에서 뚜렷하게 관찰되는 변화는 해변 최상부에서 관찰되는 스위시 바(swash bar)로, 이는 파랑의 계절적 세기에 의해 제한적인 공간에서 발생하며 소멸된다. 큰 변화가 발생하지 않았다는 점은 저조간석지형과 유사하다.

계절적 릿지형의 경우 지하수침출면이 발달하고, 여름~가을철에 릿지&런넬이 관찰되며 강한 파랑조건을 보이는 겨울철 소멸된다.

31) Masselink and Short(1993)

32) 사업 연도에 따라 다르지만 연안 침식 모니터링에 한번이라도 포함된 해변은 학암포, 신두리, 의항, 만리포, 몽산포, 달산포, 청포대, 백사장, 삼봉, 꽃지, 운여 등이다.

일반적으로 Low-amplitude ridges의 경우 겨울철 소멸되지 않고 기복이 줄어들며, 해당 유형의 경우 소멸한다. 릿지&런넬이 생성되는 위치는 대략 표고 0m 전후이며, 대부분의 해변에서 해변 최상부에서 스위시 바가 관찰된다.

릿지&런넬형의 경우 지하수침출면이 출현하지 않고, 계절에 관계없이 릿지&런넬이 관찰된다. 파랑 세기가 약한 여름~가을에 릿지&런넬의 생성, 발달, 육지방향으로의 이동이 발생하였으며, 파랑 세기가 강한 시기에 기복이 악화되며 바다 방향으로도 이동이 발생하였다. 즉, 릿지&런넬의 이동은 파랑 에너지의 세기에 따라 발생하는 육지방향과 바다방향으로의 이동 속도 차이에 따라 연간 이동성이 결정되었다. 대부분의 단면에서 해변 최상부에서의 스위시 바가 관찰된다. 또한 한 해변 내에서 동일하게 릿지&런넬형으로 분류되었더라도, 특정방향(남, 북, 동, 서)에 따른 경향성이 존재하는데, 예를 들면 신두리 해변의 경우³³⁾ 남쪽으로 갈수록, 삼봉 해변의 경우³⁴⁾ 남쪽으로 갈수록 변동성이 컸다.³⁵⁾

저조간석지형의 경우 지하수유출면이 뚜렷하게 나타났으며, 릿지&런넬은 단 한 시기도 존재하지 않았다. 일부 측선의 경우 상부 스위시 바가 관찰되었으며, 지하수유출면의 위치는 크게 변동하지 않았다. 지하수유출면 상부는 상대적으로 경사가 큰 해변면(steept beach face)으로 반사형의 파랑 조건을 보이며, 하부는 경사가 완만한 저조간석지(low tidal terrace)로 소산형의 파랑 조건을 보인다.

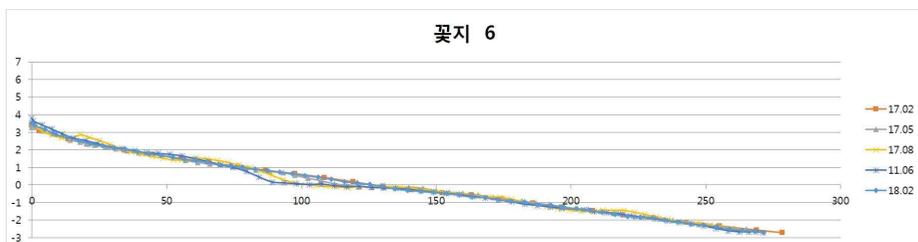
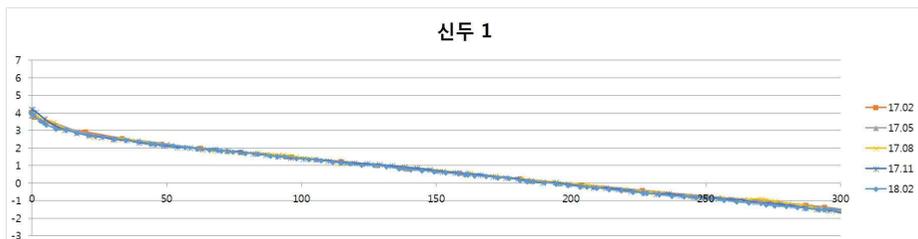
저조간석지+릿지형의 경우 지하수유출면이 뚜렷하게 나타났으며,

33) 신두리 해변중 릿지&런넬형으로 분류된 측선은 3-6 측선이다.

34) 삼봉 해변은 모든 측선이 릿지&런넬형으로 분류된다.

35) 이러한 해변 내에서의 경향성은 해변 내 존재하는 연안류의 방향과 세기로 인해 결정되는 것으로 보이나, 이 연구에서 구체적으로 다루지는 않았다.

릿지&런넬이 계절적으로 존재하는 경우와(만리), 항상 존재하는 경우로 구분할 수 있었다(백사장). 주로 파랑의 세기가 약한 5월과 8월 단면에서 릿지&런넬이 뚜렷하게 관찰된다. 일부 측선의 경우 상부 스워시 바가 관찰되었으며, 지하수유출면의 위치는 크게 변동하지 않았다. 저조간석지형과 동일하게 지하수유출면 상부는 상대적으로 가파른 해빈면으로 반사형의 파랑 조건을 보이며, 하부는 완만한 저조간석지로 소산형의 파랑 조건을 보인다.³⁶⁾



36) 저조간석지 + 릿지형에 포함되는 측선이 만리와 백사장 해빈에만 포함되어 있다는 점은 의미심장하다. 추후 언급하지만 릿지&런넬의 형성을 위해서는 일정 수준 이상의 파랑에너지가 필요하나, 지하수침출면은 약한 파랑에너지 조건을 가진 소규모 포켓비치에서 나타난다. 즉, 저조간석지 + 릿지형은 파랑에너지의 세기가 강한 것도 아니고 약한 것도 아닌 중간 정도의 강도에서 나타나게 되는 점이성 성격을 갖는다. 다만, 구체적으로 일반화하기에서는 측선 수가 부족하여 후속 연구를 통해 구체적으로 다루길 기대한다. 백사장의 경우 릿지&런넬이 항상 존재하나, 만리의 경우 계절적으로 존재한다는 차이가 있으며 이는 파랑 에너지의 차이에서 비롯된 것으로 보인다. 또한 만리 1과 백사장 3은 릿지&런넬이 나타나지 않는데, 이는 헤드랜드의 영향으로 보인다.

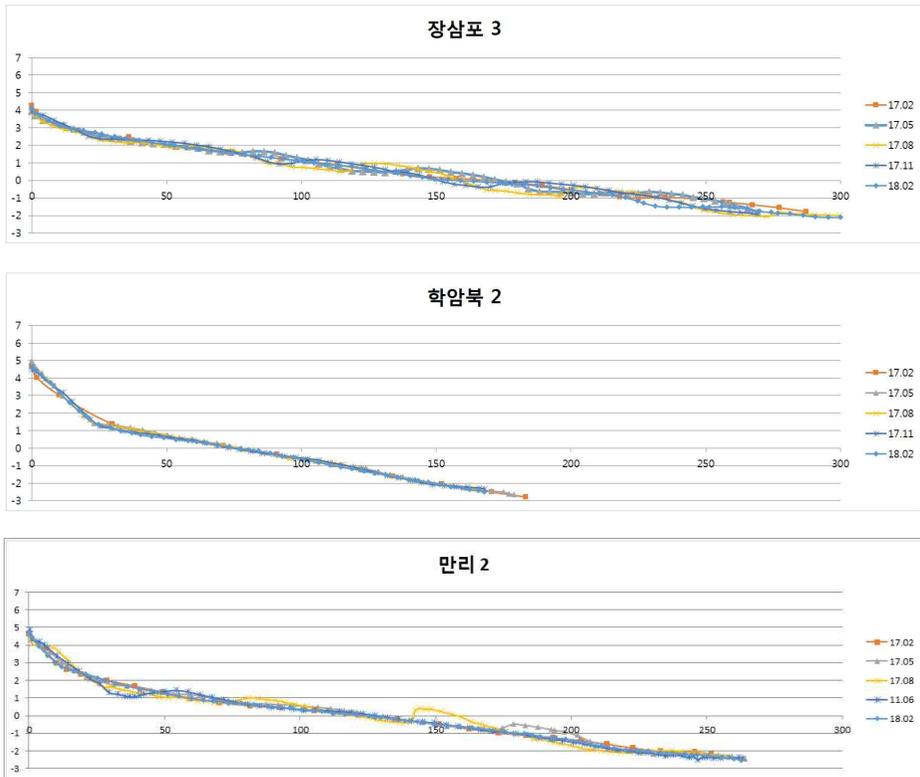


그림 3.3. 각 해변 유형별 대표 단면. 위로부터 각각 소산형, 계절적 릿지형, 릿지&런넬형, 저조간석지형, 저조간석지+릿지형.

3.3. 정량적 해석

여기서는 각 해변 유형이 상호간에 어떠한 차이가 있으며, 특성이 무엇인지를 확인할 것이다. 유형간 차이를 확인하기 위해 T검정 혹은 ANOVA를 활용하였으며, 적용한 변수는 표 3.3과 같다. T검정은 비교대상이 2개 이하인 경우, ANOVA는 3개 이상인 경우 적용하였다. ANOVA에서 분산의 동질성 검정이 기각되는 경우 평균의 동질성 로버스트 검정을 Welch의 방법으로 활용하였다. 또한, 사후 분석시 등분산을 가정되는 경우 Bonferroni의 방법을 활용하였으며, 등분산이 가정되지 않을 경우 Dunnett의 T3를 활용하였다.

표 3.3. 분석에 활용된 변수

구분	내용
해빈폭 (m)	- beach width :사구 말단부 혹은 제방 끝부분부터 (기준점) 고조선까지의 거리
단면적 (m ²)	- 단면그래프를 적분한 값
경사각 (°)	- 첫 측량시기 기준 고도 -1.26m ³⁷⁾ 상응하는 거리부터 0m까지의 경사각
해빈 길이 (m)	- 지도에서 확인 가능한 해빈의 길이(해안선을 따른 방향)
입도평균 (mm)	- 고조선에서 채취한 퇴적물, 건식체질 실시
쇄파고	- SWAN 모형을 통해 산출되고, 계산식으로 계산됨
유의파고	- SWAN 모형을 통해 산출

지하수침출면에 근거하여 통계 분석시 모든 변수에서 차이가 유의한 것으로 나타났다(그림 3.4, 표 3.4). 지하수침출면이 없는 경우 해빈폭, 경사각, 입도가 작았으며, 단면적, 해빈 길이, 파랑에너지가 컸다. 경사각이 커질수록 조간대 길이가 짧아지고 단면적이 감소하는데, 이는 서로 동일한 현상의 다른 표현이다. 경사각은 입도와 관련되어 있으며, 일반적으로 입도가 조립할수록 경사각이 가파른데, 이 연구에서도 동일하다. 평균적으로 세립질일수록 육지방향으로의 이동보다는 바다방향의 이동이 많고, 조립질일수록 바다방향의 이동보다는 육지방향의 이동이 많아 경사각의 차이가 나타나는 것이다 (Butt et al., 2001; Karambas, 2003). 앞서 언급한 것처럼 지하수침출면은 입도가 상대적으로 조립한 곳에서 나타나며, 일반적으로 임계입도는 0.3mm-0.6mm이다. 이 연구에서 임계 입도는 0.24-0.41mm 사이로 나타나 선행연구들과 유사한 모습을 보였다. 하지만 0.24mm 이상에서 일률적으로 지하수침출면이 나타나는 것은 아니다. 실레로 꽃지, 밧개, 몽산, 의항 등의 경우 0.24mm 보다

37) 안흥 조위 관측소 기준 소조기 저조위

입도가 조립하지만, 지하수침출면이 발견되지 않는다. 꽃지, 밧개의 경우 임계 입도인 0.24mm와 유사한 입도 크기를 보이기에 국지적 요인으로 해석할 수 있다. 의향과 몽산의 경우 인공 제방으로 인한 파랑의 반사파로 인해 입도가 조립한 것으로 판단된다. 지하수침출면이 있는 경우에 해빈 길이가 짧은 것과 파랑에너지가 약한 것은 이 유형에 해당하는 해빈들이 상대적으로 보호받는 위치에 있는 것과 밀접한 관련이 있다. 토의에서 자세하게 설명할 것이지만, 파랑 에너지가 약한 것은 지질조건의 영향이며, 이로 인해 퇴적물 조건도 다르다.

표 3.4. 지하수침출면에 따른 해빈 유형별 속성

지하수침출면	없음	있음	p-value
해빈폭 (m)	1.84	24.85	0.003**
단면적 (m ²)	997.62	529.82	0.000**
경사각 (°)	1.28	2.67	0.001**
해빈 길이 (m)	1774.28	860.05	0.000**
입도평균 (mm)	0.22	0.39	0.000**
쇄과고 (m)	0.45	0.37	0.004**
유의과고 (m)	0.35	0.25	0.001**

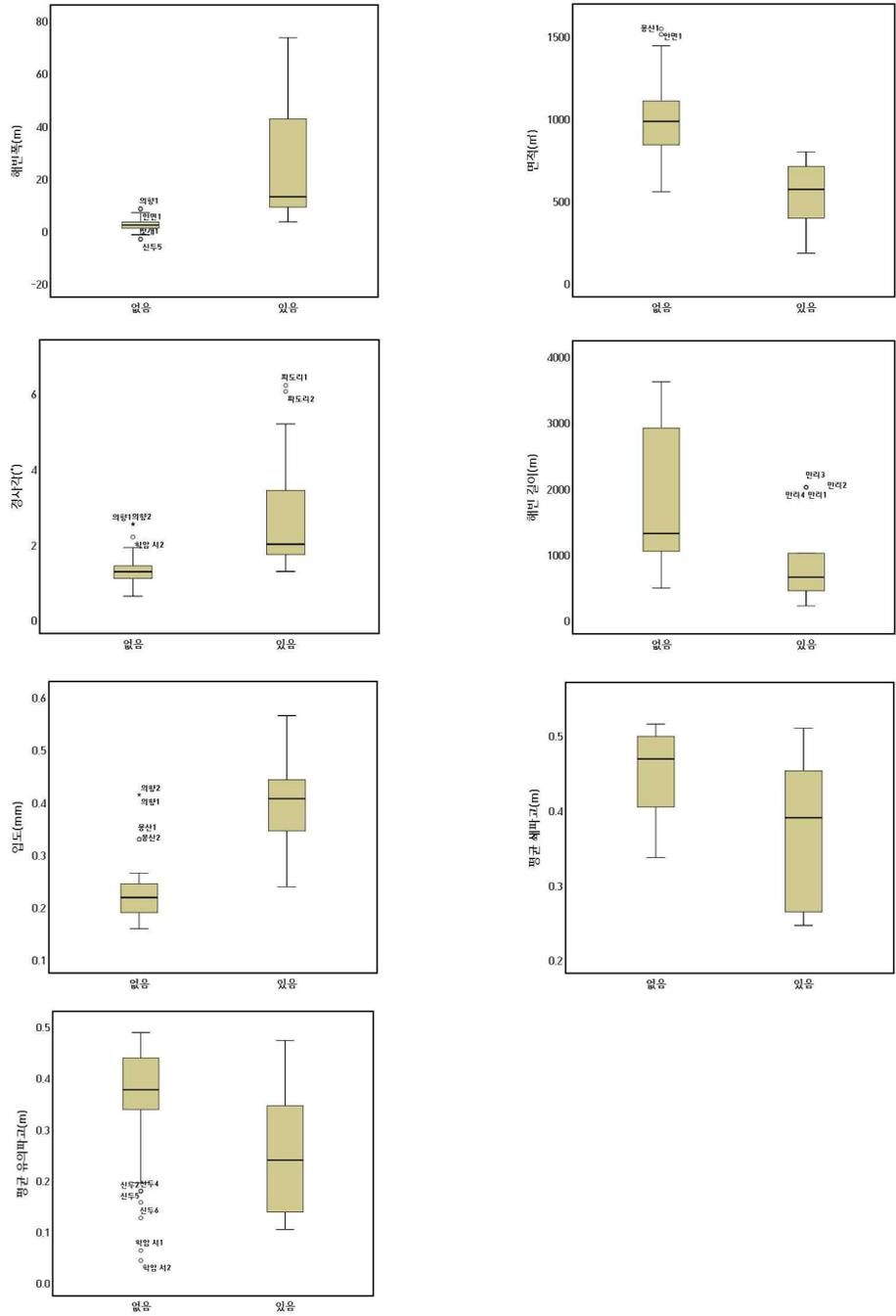


그림 3.4. 지하수침출면에 따른 해빈 유형별 상자도표

릿지&런넬에 근거하여 통계 분석시 해빈 길이를 제외한 변수에서 차이가 유의한 것으로 나타났다(그림 3.5, 표 3.5). ANOVA의 사후 검정 결과 릿지&런넬이 없는 경우 릿지&런넬이 존재하는 경우와 다수의 변수에서 분명한 차이를 보였으나, 릿지&런넬의 계절적 존재 유/무에 따른 차이는 크지 않았다(표 3.6).

릿지&런넬이 없는 경우 해빈폭, 경사각, 입도가 크고, 면적, 파랑 에너지가 작았으며, 있는 경우 해빈폭, 경사각, 입도가 작고, 면적, 파랑에너지가 컸다. 계절에 따라 존재하는 경우 중간값을 보였다. 앞서 언급한 것처럼 면적, 경사각, 입도는 상호 연관성이 있으며, 이 경우에도 일반적인 관계와 일치하였다. 주목할만한 부분은 파랑에너지의 세기로, 릿지&런넬이 있는 경우 파랑에너지가 강하다. 파랑에너지의 세기가 절대적으로 약하면, 장주기 중력파(infragravity edge wave)가 발달하지 못하여 bar가 형성되지 않을 수 있다 (Guza and Davis, 1974; Masselink and Short, 1993). 파랑의 강도가 해빈의 상태, 즉, 릿지&런넬의 출현 여부를 결정하는 것이다 (Jiminez et al., 2008; Scott et al., 2011). 릿지&런넬이 계절적으로 존재하는 경우와 항상 존재하는 경우의 차이는 전반적으로 유의하지 않았으며, 특히 파랑에너지에서 유의한 차이가 나타나지 않았다.

표 3.5. 릿지&런넬에 따른 해빈 유형별 속성

미지형	없음	계절적 존재	항상 존재	F	p-value
해빈폭(m)	20.46	2.06	1.76	13.821	0.009**
단면적(m ²)	582.30	838.24	1094.49	34.653	0.000**
경사각(°)	2.56	1.50	1.12	17.439	0.000**
해빈길이(m)	1170.59	1464.32	1804.83	2.288	0.109
입도평균(mm)	0.33	0.27	0.22	8.064	0.002**
쇄파고(m)	0.37	0.44	0.46	8.917	0.003**
유의파고(m)	0.24	0.33	0.38	9.856	0.000**

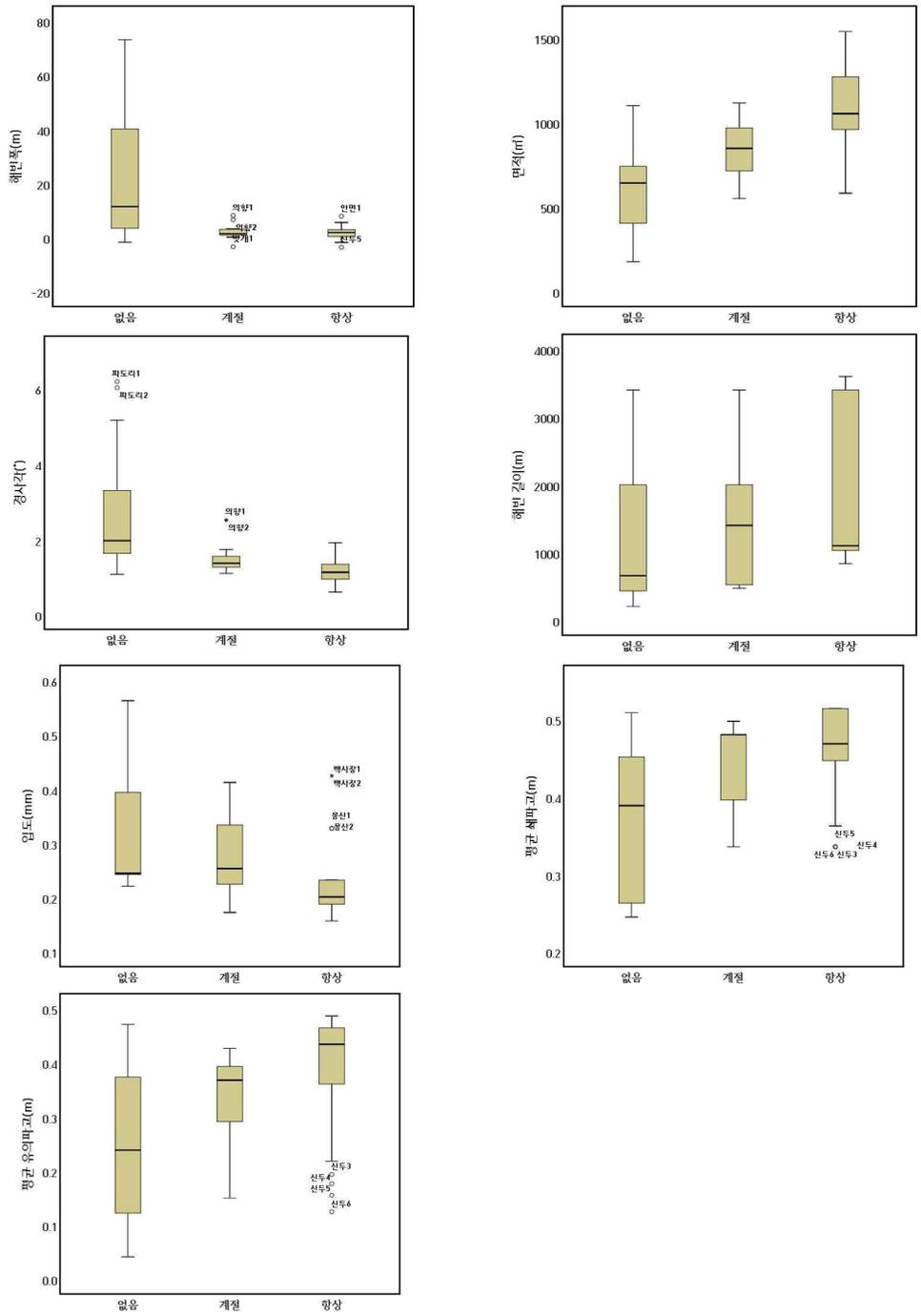


그림 3.5. 릿지&런넬에 따른 해빈 유형간 상자도표

표 3.6. 릿지&런넬 고려시 사후검정 결과 유의한 변수

구 분	유의한 변수
없음 vs 계절적 (5)	해빈폭, 단면적, 경사각, 쇄파고, 유의파고
없음 vs 항상 (6)	해빈폭, 단면적, 경사각, 입도, 쇄파고, 유의파고
계절적 vs 항상 (2)	단면적, 경사각

분류기준 1과 2를 모두 고려하여 통계 분석시 모든 변수에서 차이가 유의한 것으로 나타났다(그림 3.6, 표 3.7). 저조간석지형은 여타 유형과 가장 이질적이었으며, 소산형이 여타 유형과 이질성이 가장 떨어졌다. 가장 극명한 차이를 보이는 유형은 릿지&런넬형과 저조간석지형으로 7개의 변수 모두에서 유의한 차이가 나타났다. 파랑에너지의 경우 저조간석지형이 가장 약하였으나, 다른 유형들 간의 유의미한 차이는 나타나지 않았다(표 3.8).

해빈폭은 저조간석지형에서 매우 넓은데 이는 인간의 영향이 강하게 작용한다. 과거 항공사진을 확인하면(1967년) 태안 일대에는 다양한 곳에 자연성 높은 사구지대가 분포하고 있었다. 하지만 이후 급속한 개발, 간척 등으로 인해 사구지대가 파괴되었으며, 현재 넓은 해빈폭을 보이는 꾸지, 천리, 갈음, 연포의 경우 상대적으로 사구와 해빈의 자연성이 높다. 이는 해당 해빈들이 소규모 헤드랜드 사이에 존재하여, 상대적으로 관심을 덜 받은 점도 영향을 미친 것으로 판단한다.

표 3.7. 모든 기준을 고려한 해빈 유형별 속성

구분	소산형	계절적 릿지형	릿지&런넬형	저조간석지형
해빈폭(m)	1.44	2.06	1.76	24.85
단면적(m ²)	809.93	863.28	1125.89	476.08
경사각(°)	1.64	1.46	1.07	2.99
해빈 길이(m)	2336.00	1363.88	1871.85	626.73
입도평균(mm)	0.23	0.25	0.21	0.38
쇄파고(m)	0.42	0.45	0.45	0.35
유의파고(m)	0.26	0.36	0.38	0.23
구분	저조간석지+ 릿지형	F		p-value
해빈폭(m)	-	14.793		0.043*
단면적(m ²)	691.04	31.477		0.000**
경사각(°)	1.71	14.112		0.000**
해빈 길이(m)	1560.00	5.580		0.000**
입도평균(mm)	0.41	19.794		0.000**
쇄파고(m)	0.44	5.526		0.029*
유의파고(m)	0.29	4.958		0.013*

표 3.8. 모든 조건 고려시 사후검정 결과 유의한 변수

구분	유의한 변수
소산형 vs 계절적 릿지형(0)	-
소산형 vs 릿지&런넬형(3)	면적, 경사각, 입도
소산형 vs 저조간석지형(3)	해빈폭, 면적, 입도
소산형 vs 저조간석지+릿지형(1)	입도
계절적 릿지형 vs 릿지&런넬형(2)	면적, 경사각
계절적 릿지형 vs 저조간석지형(6)	해빈폭, 면적, 경사각, 입도, 쇄파고, 유의파고
계절적 릿지형 vs 저조간석지+릿지형(2)	면적, 입도
릿지&런넬형 vs 저조간석지형(7)	해빈폭, 면적, 경사각, 해빈 길이, 입도, 쇄파고, 유의파고
릿지&런넬형 vs 저조간석지+릿지형(3)	면적, 경사각, 입도
저조간석지형 vs 저조간석지+릿지형(1)	면적

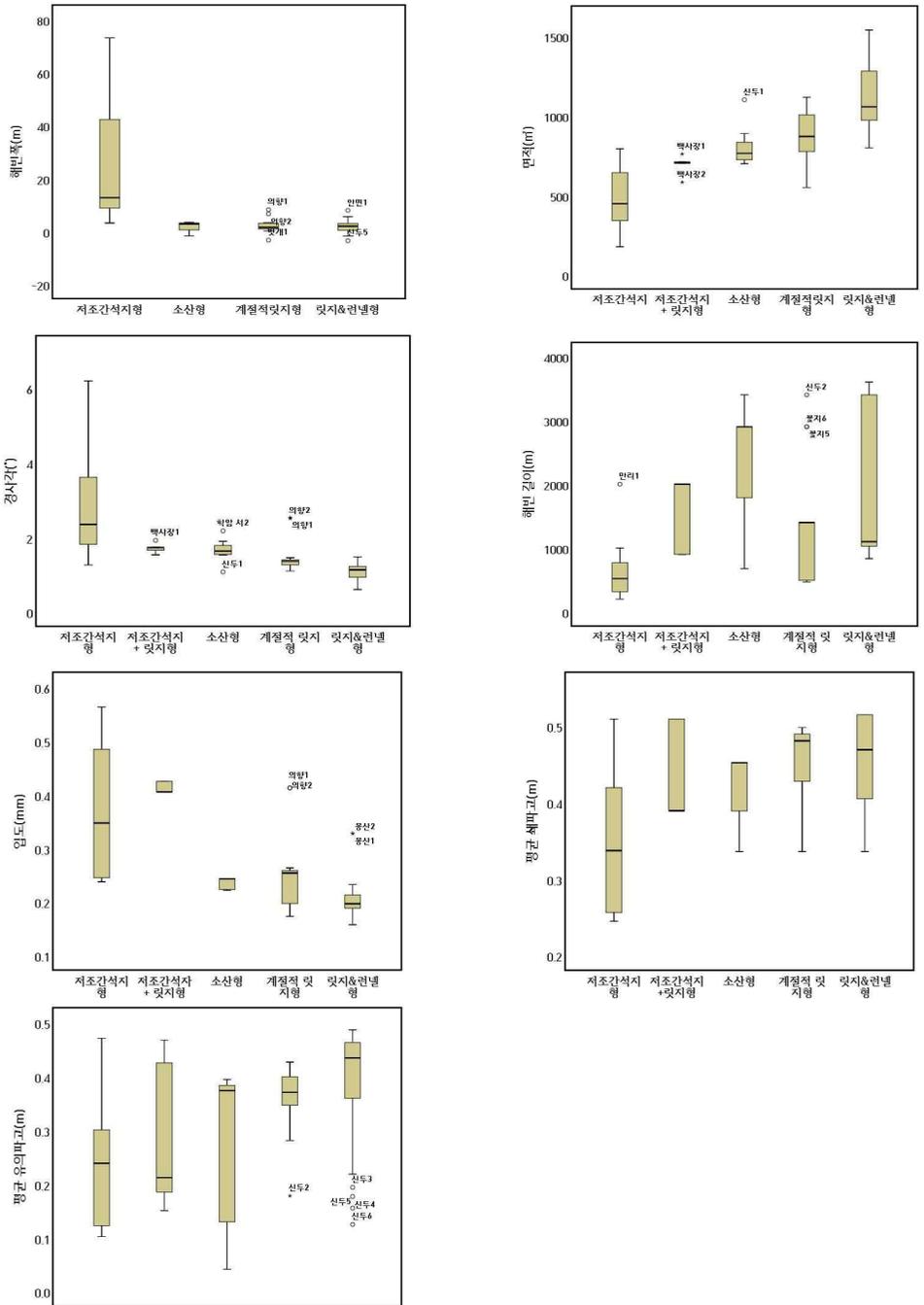


그림 3.6. 모든 기준을 고려한 상자도표

해빈의 지질조건에 따라 개방형, 반폐쇄형, 폐쇄형으로 구분하여 개별 유형과의 관계를 살펴보았다(그림 3.7). 여기서 각 수치는 동일하게 포함하고 있는 측선의 수를 나타내며, 색이 짙을수록 동일한 측선의 수가 많음을 의미한다. 개방형은 전부 릿지&런넬형으로 구성되어 있었으나, 폐쇄형에서는 릿지&런넬형이 관찰되지 않았다. 또한 저조간석지형에서 계절적 릿지형으로 갈수록 반폐쇄형이 증가하는 형태가 보인다. 즉 저조간석지-폐쇄형과 릿지&런넬-개방형을 양 극단으로 가운데 반폐쇄형이 위치하고 있으며, 이것이 일종의 경향성을 갖는다.

개방성과 유형분류

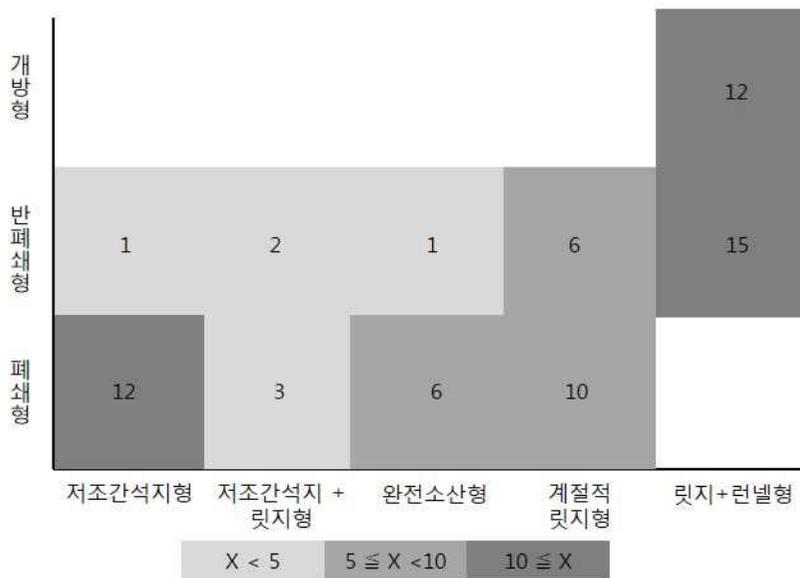


그림 3.7. 개방성과 유형의 관계. X는 유형간 포함되는 해빈수를 의미.

보다 면밀하게 개방성과 유형분류의 관계를 살펴보기 위해,

개방성을 근거로 차이를 분석하였다(표 3.9, 그림 3.8). 분석결과 해빈길이를 제외한 6개의 항목에서 유의한 차이를 보였으며, 사후검정을 보면 해빈 지오메트리에서는 폐쇄형 vs 개방형, 반폐쇄형, 외력에서는 개방형 vs 반폐쇄형, 폐쇄형의 차이가 큰 것으로 나타났다(표 3.10). 개방형과 폐쇄형을 극단으로 반폐쇄형이 점이적 성격을 보인다. 주목할만한 점은 개방성이 높을수록 파랑에너지가 강한 것으로, 파랑에너지의 공간적 분포에 지질 조건이 영향을 미친다.

표 3.9. 개방성을 고려한 해빈 유형간 차이

구분	개방형	반폐쇄형	폐쇄형	F	p-value
해빈폭(m)	2.70	0.93	15.18	7.368	0.003**
단면적(m ²)	1193.16	1006.52	636.26	39.714	0.000**
경사각(°)	1.04	1.19	2.27	13.575	0.000**
해빈 길이(m)	1491.67	1812.80	1293.79	1.695	0.239
입도 평균(mm)	0.19	0.23	0.33	15.474	0.000**
쇄파고(m)	0.49	0.43	0.40	7.136	0.000**
유의파고(m)	0.43	0.35	0.27	10.717	0.000**

표 3.10. 개방성 고려시 사후검정 결과 유의한 변수

구분	유의한 변수
개방형 vs 반폐쇄형(3)	면적, 쇄파고, 유의파고
개방형 vs 폐쇄형(6)	해빈폭, 면적, 경사각, 입도, 쇄파고, 유의파고
반폐쇄형 vs 폐쇄형(3)	면적, 경사각, 입도

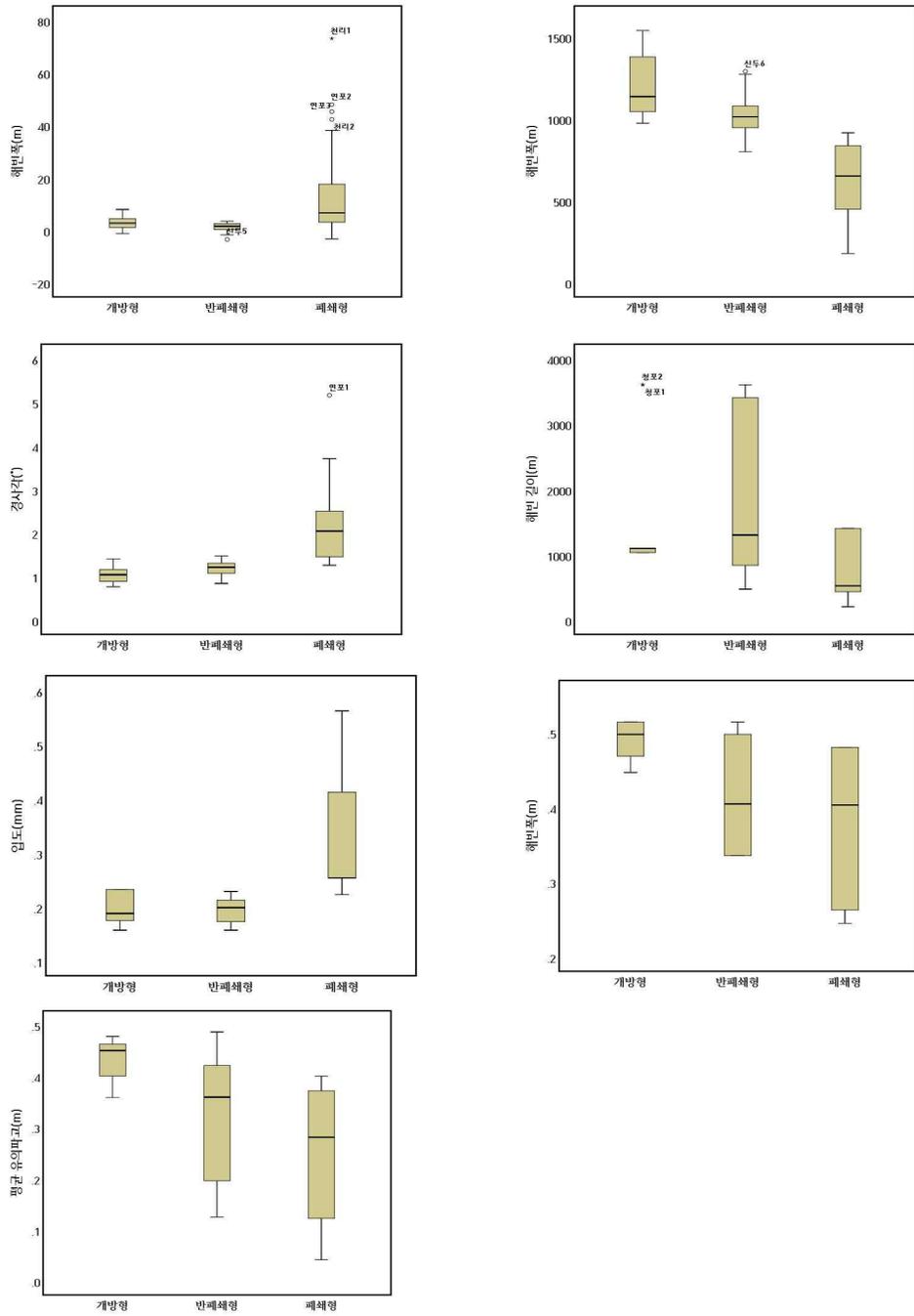


그림 3.8. 개방성을 고려한 상자도표

3.4. 토의

3.4.1. 지질 조건

해빈 지형 변화에 제약을 주는 지질 조건의 중요성은 다양한 연구에서 주목하고 있다(e.g. Jackson et al., 2005; Jackson and Cooper, 2009; del rio et al.,2013). 이 연구는 태안군이 위치한 서해 중부 지역에 한정되어 있다. 따라서 큰 공간 범위 안에서 전반적인 외력과 지질적 조건은 동일하다고 볼 수 있다.³⁸⁾ 하지만 보다 국지적인 차원에서 개별 해빈에 작용하는 외력과 해빈이 보유한 지질 조건은 이질적이다.

앞서 해빈의 지질조건(바다로의 개방성)과 개별 유형과의 관계를 살펴본 결과 저조간석지형 - 저조간석지+릿지형 - 완전소산형-계절적 릿지형 - 릿지& 런넬형으로 이르는 연계성을 확인하였다. 이는 폐쇄형 해빈이 가지고 있는 국지적인 지질 조건에서 비롯된다. 헤드랜드로 인해 연안류로부터 퇴적물을 공급받지 못하며 퇴적물 공급 측면에서 단혀 있는, 즉 퇴적물 순환 체계에서 제외되어 있기 때문이다(Dehouck et al., 2009). 폐쇄형 해빈의 경우 해안에 수평 방향의(alongshore) 퇴적물 이동이 주로 연구되며 중요성이 강조되었었다(e.g. Thomas et al., 2011;Van de Lageweg et al., 2013). 그러나 호주 동남쪽의 Narrabeen-Collaroy Beach에서 진행된 Harley 등(2011)의 연구에 따르면 해안에 수직 방향의 퇴적물 이동이 전체 퇴적물 이동의 60%를 기여하며, 수평 방향으로의 이동은 26%에 그치는 것으로 나타났다. 후속연구를 통해 해안에 수평 방향의 기울기의 차이가 범의 경사 변화에 큰 영향을 미쳤음을 증명하며, 폐쇄형 해빈에서 해안에 수직 방향으로 퇴적물 이동의 중요성을 강조하였다(Harley et al., 2015). 해안에

38) 계절적 에너지 변화, 큰 조석 범위 등 전반적인 상황이 동일함

수직 방향으로의 퇴적물 이동을 고려하면 저조간석지-폐쇄형 해빈의 특징에는 크게 두 가지 프로세스가 영향을 미친 것으로 보인다. 하나는 세립한 퇴적물이 모종의³⁹⁾ 이유로 외해로 빠져나간 뒤, 온화한 기후 조건 하에서 다시 유입되지 않는, 즉 퇴적물 이동의 비대칭이 발생하였을 가능성이다. 헤드랜드를 우회하는 퇴적물 유출을 관찰한 연구(Goodwin et al., 2013)나 메가립을 통한 바다방향으로의 퇴적물 이동을 관찰한 연구(Loureiro et al., 2012)와 같이 퇴적물의 유출이 발생한 것이다. 이 때 평균적으로 세립질일수록 바다방향으로의 이동이 많으며, 조립질일수록 육지방향의 이동이 많음을 고려하면(Karambas, 2003), 세립질 퇴적물이 상대적으로 헤드랜드 밖으로 유출되었을 가능성이 높다. 다른 해석으로는 해빈-사구, 해빈-배후지 상황의 관계에서 실마리를 찾을 수 있다. 북서 계절풍의 영향으로 조간대내부의 상대적으로 세립한 모래가 조상대, 사구, 배후지로 이동하였지만, 사구, 배후지에서 해빈으로의 모래 이동이 이루어지지 않으면서 세립질 퇴적물이 조간대에서 고갈된 것이다. 현장 답사 결과 해당 해빈 중 해빈에서 사구(배후지)로의 일방향 이동이 아닌, 상호간에 쌍방향 이동이 관찰되는 곳은 존재하지 않았으며, 꾸지, 학암북의 경우 사구에 목본류가 존재하였다. 갈음, 천리의 경우 비사방사제가 존재하여 사구의 모래가 이동하는 것을 차단하고 있었으며, 연포의 경우 인간이 지속적으로 평탄화 등의 영향을 끼쳐 이동성이 떨어진다. 만약 바다로부터 퇴적물 공급이 지속된다면 해빈에서 배후지로 모래이동이 지속되는 것을 상쇄시킬 수 있지만, 퇴적물 공급이 헤드랜드에 의해 차단되어 있어 위와 같은 현상이 발생하는 것이다. 조간대 릿지&런벨의 존재 자체가 충분한 퇴적물

39) 태풍, 메가립 등

공급과 관련 있음을 지적하는 Scoot 등(2011)의 연구를 반영하면, 저조간석지-릿지형의 경우 측선 수 자체가 적다는 점 또한 퇴적물 차원에서의 해석을 뒷받침한다.

하지만 모든 폐쇄형 해빈에서 동일한 현상이 발생하지는 않는다. 이는 저조간석지형에 포함된 폐쇄형 해빈은 상대적으로 해빈 길이가 짧으며, 완전소산형 혹은 계절적 릿지형에 속한 해빈은 해빈의 길이가 긴 점⁴⁰⁾, 영향을 미친 것으로 판단된다. 해빈의 길이가 길면 헤드랜드의 길이가 길더라도 보호받는 곳이 줄어들어, 외부에서의 퇴적물 유입이 발생할 가능성 또한 높아지는 것이다.

계절적 릿지형과 릿지&런넬형, 즉 릿지&런넬이 계절적으로 존재하는 경우와 항상 존재하는 경우 유의한 차이를 보이는 변수는 면적만이 존재하였다. 그런데 개방성을 기준으로 살펴보면 계절적 릿지형은 개방형이 없으며, 릿지&런넬형은 폐쇄형이 없다. 따라서 개방형과 폐쇄형의 가장 큰 차이점은 외력과 퇴적물로, 둘 중 하나 혹은 두 요인 모두가 영향을 미친 것으로 추측해 볼 수 있다.

앞서 릿지&런넬이 계절적으로 존재하는 경우와 항상 존재하는 경우의 파랑에너지 차이는 유의하지 않았지만, 항상 존재하는 경우의 파랑이 조금 더 강했었다. 앞서 분석하였던 ANOVA의 경우 해당 유형의 해빈을 모두 삽입하여 분석하였기 때문에, 해당 해빈만의 특성이 반영되지 않는다는 한계점이 있다. 따라서 계절적 릿지형과 릿지&런넬형이 모두 있는 장삼포 해빈의 유의파고를 살펴보면, 릿지&런넬형의 경우 각각 0.36418, 0.36062, 0.36054m로, 계절적 릿지형의 경우 0.35572m이다. 하나의 해빈은 아니지만 경계가 모호하며 사실상 하나의 해빈으로 볼 수 있는

40) 저조간석지-폐쇄형의 평균 해빈 길이는 500.08m이지만, 완전소산-폐쇄형은 2139.11m, 계절적 릿지-폐쇄형은 1464.32m이다.

안면, 두여의 경우에도, 릿지&런넬형은 0.44632~0.45624m의 범위를, 계절적 릿지형은 0.35572~0.36418m의 범위를 보여 릿지&런넬형의 파랑이 더 강한 것으로 나타났다. 즉, 릿지&런넬형과 계절적 릿지형은 파랑 에너지에서 다소 차이를 보이고 있다.

한편으로, 릿지&런넬형에서 릿지&런넬이 소멸하지 않고 기복이 감소하는 것은 반응 시간(response time)과 지속시간의 문제이다. 상대적으로 릿지&런넬의 규모가 클수록 소멸하기까지의 시간이 길게 소모되기에, 계절적 릿지형보다 릿지&런넬이 강하게 발달하는 릿지&런넬형의 경우, 릿지&런넬이 소멸하기까지의 시간이 더욱 오래 필요한 것이다. 바꾸어 말하면 겨울이 지속된다면 릿지&런넬형에 존재하는 릿지&런넬도 소멸할 수가 있으나, 계절적 변화가 발생하고 있기에 충분히 소멸할 시간이 주어지지 않는다. 만약 겨울의 지속시간이 길어진다면 릿지&런넬의 소멸이 발생할 수 있으며, 역으로 겨울의 지속시간이 짧아진다면 계절적 릿지형에서도 릿지&런넬의 소멸이 나타나지 않을 수 있다.

지금까지 확인한 것처럼 지질조건(개방성)과의 관계를 통해 저조간석지형 - 저조간석지+릿지형 - 완전소산형 - 계절적 릿지형 - 릿지&런넬형 으로 이르는 연계성을 확인 할 수 있었다. 표 3.11은 각 유형간 차이가 유의한 변수의 수를 나타낸 것이다. 유의한 변수의 수를 고려하면 저조간석지형 - 릿지&런넬형으로 연계되는 관계를 다시 확인 할 수 있다. 우측으로 (지하수침출면이 없고, 릿지&런넬이 항상 존재) 갈수록 경사각이 낮고, 입도가 세립하며, 파랑에너지가 강하다.

표 3.11. 유형 간 유의한 변수의 수

	저조 간석지형	저조간석지+ 릿지형	완전소산형	계절적 릿지형	릿지&런넬형
저조 간석지형	-	1	3	6	7
저조간석지 + 릿지형	-	-	1	2	3
완전소산형	-	-	-	0	3
계절적 릿지형	-	-	-	-	2
릿지& 런넬형	-	-	-	-	-

3.4.2. 공간적 분포

분류기준에 따라 분류된 해빈을 지도상에 도시해 보았다(그림 3.9). 앞서 언급한 것처럼 지하수침출면이 나타나는 해빈은 모두 폐쇄형이었기에, 상대적으로 보호된 곳에 위치한 소규모 포켓형 해빈이 지하수침출면을 보유한 것으로 나타났다.

릿지&런넬의 경우 그림의 화살표 방향으로 갈수록 발달하였는데, 전반적으로 태안반도보다는 안면도에서 발달하였다. 구체적으로 살펴보면, 태안반도의 경우 남쪽으로 갈수록 릿지&런넬이 발달하였다. 안면도 북부(밭개 해빈까지)의 경우 북쪽으로 갈수록, 중부의 경우(꽃지 해빈 전후) 남쪽으로 갈수록 릿지&런넬이 잘 발달하였다. 안면도 북부의 삼봉, 기지포, 안면, 두여 해빈은 공간적으로 연계되어 있기에, 하나의 해빈처럼 해석한다면 북쪽으로의 경향성이 있다. 안면도 중부의 경우 꽃지 해빈을 빼고는 연구를 진행하지 않았지만, 꽃지 해빈 북쪽에 위치한 두여기, 방포 해빈의 경우 현장답사와 항공사진으로 미루어 볼 때 모래양이 극히 부족함을 확인할 수 있었다. 따라서 안면도 중부의 경우 남쪽으로 가며 모래양이 많아지고 릿지&런넬이 발달함을 알 수 있다. 안면도

남부의 장삼포 해빈의 자료만 존재하여 정확한 해석은 힘들지만, 파랑을 고려하면 북쪽으로 가면서 릿지&런넬이 발달하는 형태일 것으로 미약하게나마 추정할 수 있다.

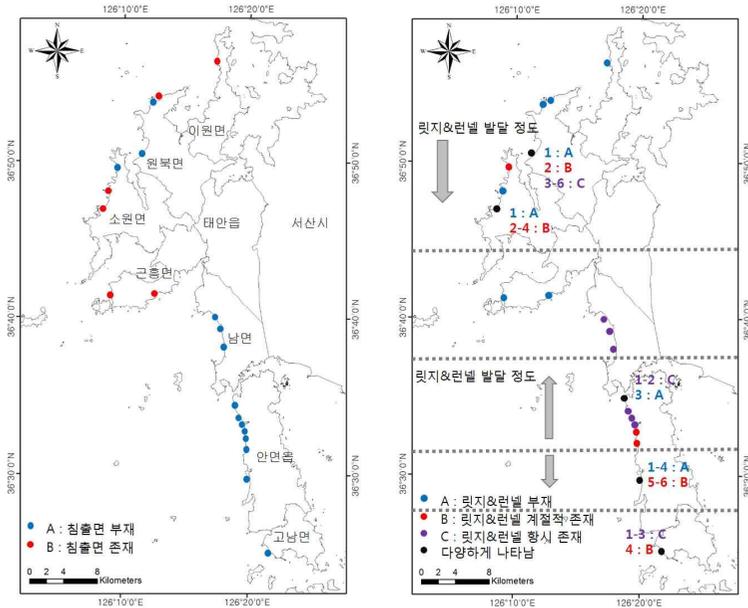


그림 3.9. 해빈 유형별 공간적 분포

3.4.3. 파랑-입도 관계에 따른 개념적 해빈 지형 모델

퇴적물 분석 결과 입도 크기가 최소 0.24mm 이상인 경우 지하수침출면이 나타나기 시작한다(그림 3.10). 하지만 0.24mm 이상에서 일률적으로 지하수침출면이 나타나는 것은 아니며, 제방 전면부의 반사파로 인해 최대 0.41mm 에서도 지하수침출면이 나타나지 않은 경우도 존재한다(의향). 릿지&런넬은 파랑에너지가 매우 약한 경우 발달하지 않으며, 상대적으로 강한 경우 계절에 관계없이 항상 존재한다. 그러나 릿지&런넬의 발달은 앞서 언급한 장삼포 해빈의 사례처럼 개별 해빈에 따라 다소 상이한 파고 범위

내에서 전개되는 양상을 보이기도 한다(그림 3.11).

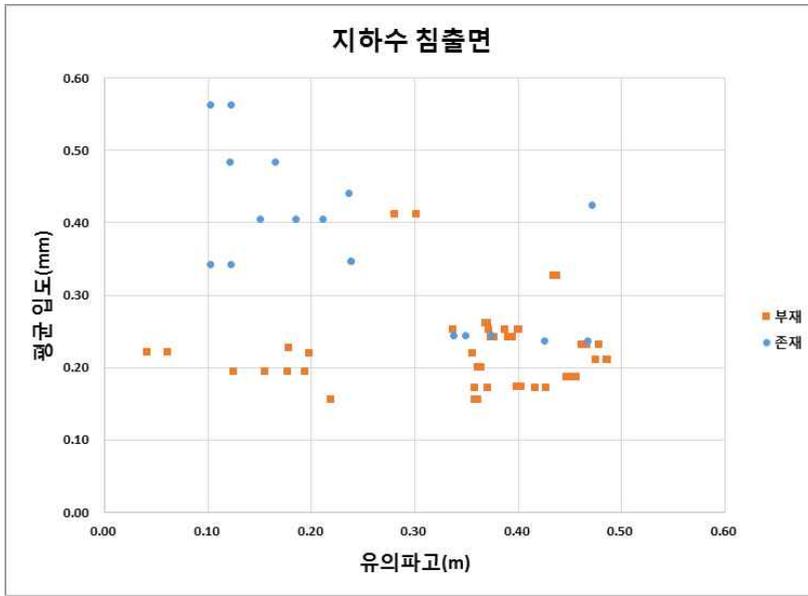


그림 3.10. 평균 입도와 파고에 따른 지하수 침출면의 존재 유무

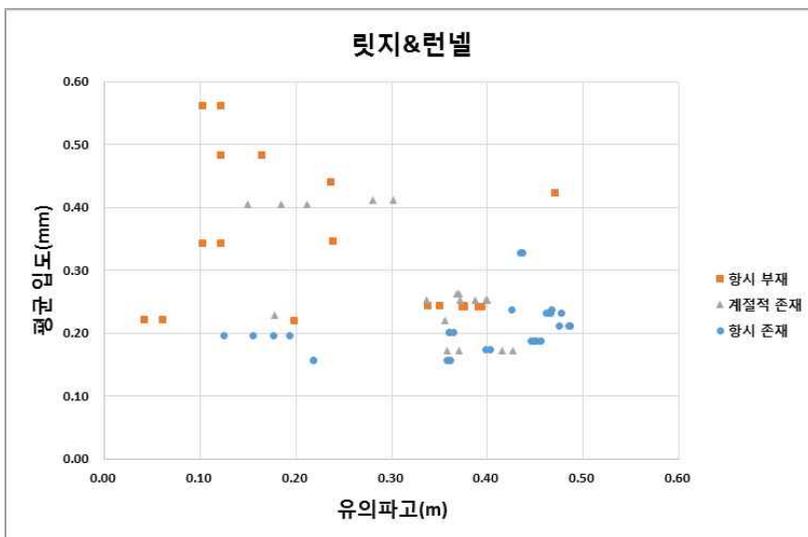


그림 3.11. 평균 입도와 파고에 따른 릿지&런넬의 존재 유무

이와 같은 결과를 바탕으로 태안지역에 존재하는 해빈의 입도 평균과 유의파고에 기반한 개념적 해빈 지형 모델을 제시할 수 있다(그림 3.12, 3.13). 입도 기준은 여름철 고조선에서 채취한 퇴적물을 바탕으로 하며, 파랑 파라미터는 SWAN을 통해 계산된 계절별 유의파고의 평균값이다. 태안 지역 해빈 지형 모델은 제한적인 지역에서 제한적인 해빈을 대상으로 연구된 결과이기는 하지만, 지형의 형태와 변화에 퇴적물 입도와 외력이 개입하고 있음을, 단순하게 개념적으로 잘 전달해주고 있다.

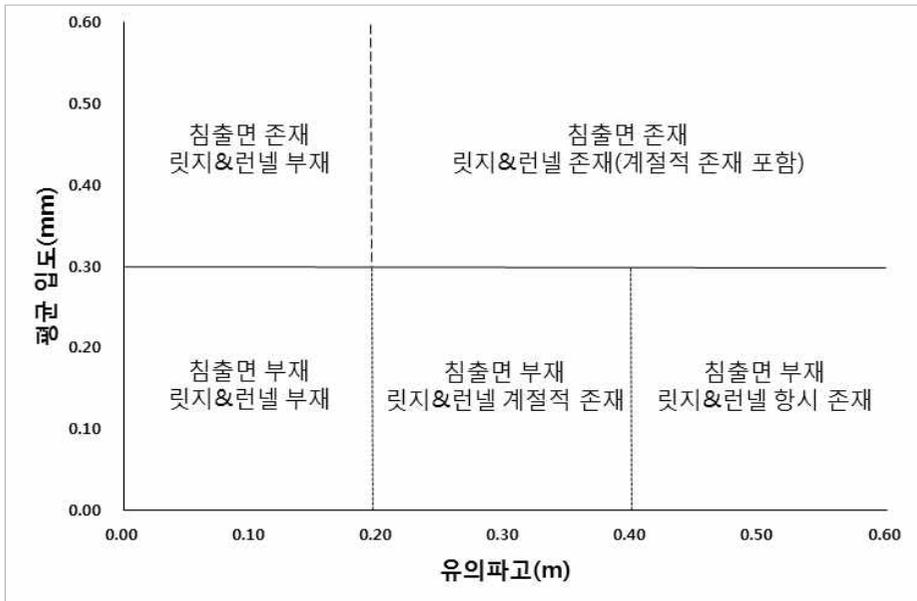
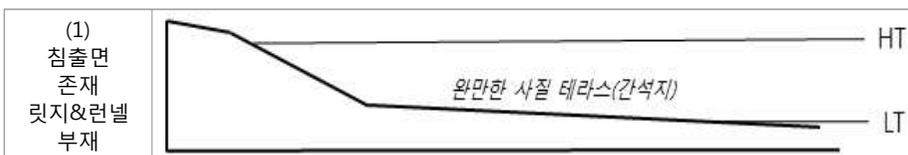


그림 3.12. 개념적 해빈 지형 모델(태안)



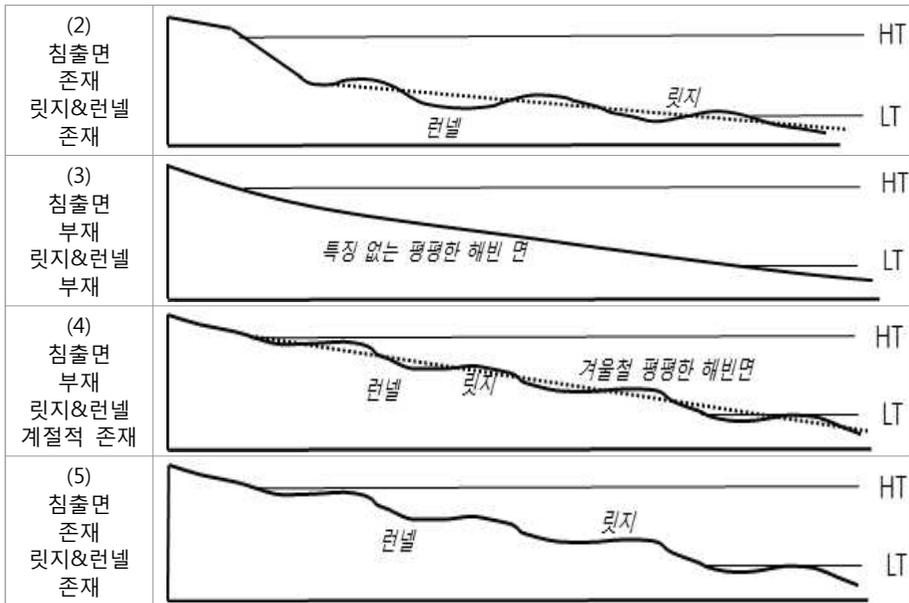


그림 3.13. 개념적 해빈 지형 모델(태안)에 따른 대표 해빈 단면 예시.

평균 입도는 지하수침출면의 존재 여부를 결정하는데, 0.30mm를 기준으로 보다 조립한 경우 지하수침출면이 존재하며, 그보다 세립한 경우 지하수침출면이 존재하지 않는다. 해당 기준에 부합하지 않는 경우는 크게 두 경우로, 하나는 0.30mm를 초과하지만 지하수침출면이 부재한 경우이며(의향, 몽산), 다른 하나는 0.30mm 미만이지만 지하수침출면이 존재하는 경우이다(연포, 백사장). 의향과 몽산의 경우 해안 제방 근처에 고조선이 형성되어 반사파로 인해 조립한 퇴적물이 채취된 결과이다. 백사장의 경우 입도 분석 결과를 살펴보면, 분급(sorting)이 불량하며 bimodal한 형태로 관찰되는데, 이는 조립한 해빈 퇴적물에 일부 비사가 유입되어 기준보다 세립한 것이다. 연포의 경우 남쪽으로 개방된 해빈의 향이 영향을 미쳤거나 인간이 지속적으로 개입한 결과로 추정되나 정확한 이유는 알 수

없다.

평균 입도 0.30mm의 기준에는 또 다른 의미가 존재한다. Masselink and Short(1993)은 퇴적물 입도, 쇄파고, 조석 범위를 변수로 하여 호주에서 나타나는 다양한 형태의 해변을 유형화 하였다(그림 3.14). 그들은 해변 분류 모델(beach classification model)을 제시하였으며, 분류 기준으로 Ω (dimensionless fall velocity, 퇴적물 무차원 침강 속도)와 RTR(Relative Tidal Range, 상대조차)를 제시하였다. 그 중 Ω 값이 2보다 작은 경우 지하수침출면이 존재하며, 2보다 큰 경우 존재하지 않는다. 홍미롭게도 외연도 부이의 2017년 여름철 평균 수온(24℃),⁴¹⁾ SWAN을 통해 계산된 개별 해변에서의 심해 피크파주기(peak period)의 평균값(3.41sec), SWAN을 통해 계산된 개별 해변에서의 쇄파고의 평균값(0.42m)을 기준으로 Ω 값이 2가 산출되는 입도를 역추적하면 0.30902mm가 도출된다. 이러한 점은 이 연구에서 제시하는 개념적 해변 지형 모델이 보다 확장성을 가질 수 있음을 의미한다.

41) <https://data.kma.go.kr/data/sea/selectBuoyRltmList.do?pgmNo=52>

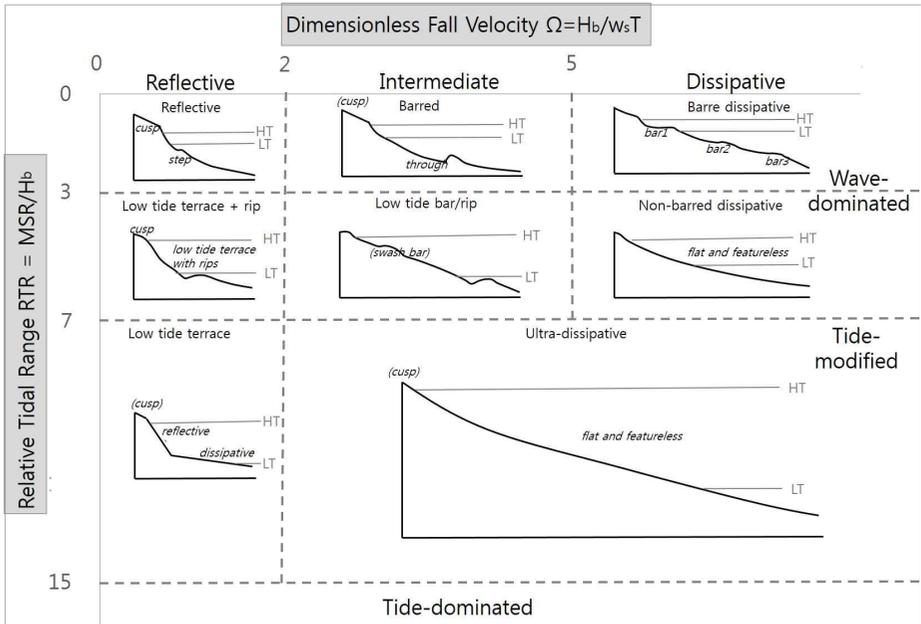


그림 3.14. 해변 분류 모델 (beach classification model), Masselink and Short (1993)의 그림 4를 수정

상대적으로 유의파고에 따른 릿지&런넬의 존재와 부재는 입도에 따른 지하수침출면의 출현 여부에 비해 명료하게 나타나지 않는다. 하지만 전반적으로 유의파고가 낮을수록 릿지&런넬이 부재하며, 높아질수록 릿지&런넬이 항상 존재하는 모습이 관찰되는 결과를 반영하여, 0.20m, 0.40m를 각각 잠정적인 유형 구분 기준으로 선정하였다. 평균 입도와 유의파고는 전반적으로 음의 관계를 보이고 있지만, 아주 뚜렷하게 나타나고 있지는 않다. 특히, 보유한 자료만으로는 지하수침출면이 존재하는 경우 릿지&런넬의 등장 및 변화양상에 뚜렷한 유의파고의 차이를 발견할 수는 없었다.⁴²⁾ 릿지&런넬과 파랑의 관계를 초과확률분포 (Frequency of

42) 지하수침출면이 존재하면서 릿지&런넬도 존재하는 유형 (저조간석지 + 릿지형) 자체의 수가 적다는 한계점이 존재한다.

exceedance, exceedance time)등을 통해 해석한다면 새로운 관계를 발견할 수 있을 것으로 예상하나, 이 연구에서 활용한 파랑 모형에 삽입된 기상 조건이 각 계절의 대푯값이기에 적용에 한계가 있다. 향후 이 점을 보완한다면 보다 명료한 결과를 반영할 수 있을 것이다.

제시한 개념적 해빈 지형 모델에 유형별 해빈 분포를 도시하면 그림 3.15와 같다. 앞서 언급한 것처럼 평균 입도 기준 0.3mm는 지하수침출면이 존재하는 유형과 여타 유형을 명료하게 구분하고 있으나, 릿지&런넬의 기준은 다소 모호하다. 다만 계절적 릿지형과 릿지&런넬이 군집한 가운데 0.4m를 기준으로 비교적 잘 구분하고 있음을 확인할 수 있다.

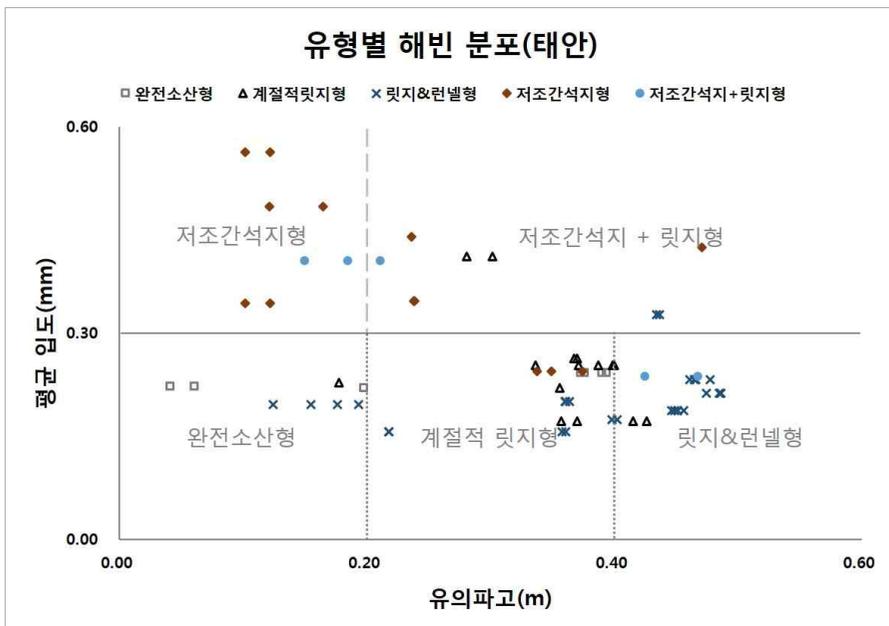


그림 3.15. 개념적 해빈 지형 모델에 따른 유형별 해빈 분포

개념적 태안 지역 해변 모델의 해석시 한 가지 고려해야 하는 것이 있다. 바로 파랑 에너지의 계절적 변화이다. 릿지&런넬의 소멸은 파랑 에너지가 상대적으로 강한 계절인 겨울철 발생한다. 하지만 개념적 해변 지형 모델에서 연평균 유의파고가 0.2m를 상회하지 않는 경우 릿지&런넬이 발달하지 않는 모습 또한 관찰된다. 즉, 파랑의 세기가 일정 수준 이상이어야 릿지&런넬이 형성되지만, 반대로 파랑의 세기가 너무 강해지면 릿지&런넬이 소멸한다. 이는 ‘강하지도 약하지도 않은 중간의’ 파랑 세기일 때 릿지&런넬이 잘 발달할 수 있음을 의미한다. 또한 3.4.1에서 릿지&런넬이 계절적으로 존재하는 경우와 항시 존재하는 경우의 차이는 릿지&런넬의 규모(반응시간, 지속시간)와 관련 있음을 제시한 바 있다. 릿지&런넬의 규모가 클수록 강한 파랑조건을 필요로 하며 소멸에 오랜 시간이 걸리고, 릿지&런넬의 규모가 작을수록 상대적으로 낮은 파랑조건을 보이며 겨울철 소멸한다. 즉, 겨울철 상대적으로 강해진 파랑에너지에 동반하여 릿지&런넬의 기복 감소(상대적으로 강한 파랑 조건, 0.4m 이상)와 소멸(상대적으로 약한 파랑 조건, 0.2-0.4m)이 함께 나타나는 것이며, 이를 연평균 유의파고라는 축을 활용함으로써 계절적 변화 또한 개념적 해변 지형 모델에 포함되어 있는 것이다.

개념적 해변 지형 모델(태안)은 앞서 언급한 해변 분류 모델(beach classification model)과 사뭇 유사한 점이 있다. 두 모델 모두 퇴적물 입도와 파랑 에너지를 주요한 변수로 삼는다. 그러나 분명한 차이점도 존재한다. 바로 태안 모델에서는 조석을 반영하지 않고 있다는 점이다. 이는 말 그대로 이것이 ‘태안’ 지역을 기반으로 한 모델이기에, 대조차 환경을 가정하고 있기 때문이다. 호주의 해변 분류 모델은 조석을 반영하여야

하기에, 릿지&런넬을 유형 안에 포함시킬 수 없었다. Masselink and Short(1993)은 본문에서 릿지&런넬을 하나의 유형으로 식별하는 것이 아니라 RTR이 3보다 이상인 경우 모든 해빈 유형에서 발견될 수 있음을(발견되지 않을 수도 있음을) 언급하고 있다. 개념적 해빈 지형 모델(태안)은 평균 유의파고를 활용함으로써, 릿지&런넬의 출현 유무까지 반영하였다는 점에서 차이점을 보인다. 따라서 개념적 해빈 지형 모델(태안)은 해빈 분류 모델에서 제시하는 여러 유형 중 대조차 환경에 적용 할 수 있는 세부 유형을 한 형태를 제시하고 있다.

3.5. 소결

3장에서는 주기적 측량을 통해 관찰한 계절적 해빈 단면과 변화를 기반으로 해빈을 분류하고 해석하였다. 해빈 단면의 형태와 단면의 변화 양상의 차이를 통해 해빈을 분류하여, 지오메트리, 구성 물질, 외력으로 유형간 차이를 설명하였으며, 유형에서 나타나는 경향성을 지질조건과 비교하였다

총 21개 해빈의 70개 측선을 다섯 번에 걸쳐 측량하였으며, 이를 도시하여 유형을 분류하고 특징을 해석하였다. 분류 기준은 1) 지하수침출면, 2) 릿지&런넬로, 각각 해빈(에너지) 상황과 변화를 의미하는 지시자로 볼 수 있다. 분류 결과 지하수침출면과 릿지&런넬이 없는 완전소산형, 지하수침출면이 없고 릿지&런넬이 계절적으로 존재하는 계절적 릿지형, 지하수침출면이 없고 릿지&런넬이 항상 존재하는 릿지&런넬형, 지하수침출면이 있고 릿지&런넬이 없는 저조간석지형, 지하수침출면이 있고 릿지&런넬이 계절적으로 존재하는 저조간석지 + 릿지형으로 분류할 수 있었다. 각 유형에 대해 해빈 폭, 면적, 경사각, 해빈 길이, 입도, 쇄파고, 유의파고를 변수로 놓고

통계분석을 실시한 결과, 대부분의 변수들의 차이가 유의한 것으로 나타났다. 또한 해빈 유형과 바다로의 개방성간의 관계에서, 개방성이 높을수록 파랑에너지가 강하여 개방성과 파랑에너지간의 밀접한 관련성을 확인하였다.

분류된 유형과 지질조건과의 관계를 바다로의 개방성을 통해 확인한 결과, 뚜렷한 경향성을 발견할 수 있었다. 개방성이 낮은 저조간석지형-폐쇄형과 개방성이 높은 릿지&런넬형-개방형을 양 극단으로 구분할 수 있었다. 저조간석지형-폐쇄형의 경우 헤드랜드에 의해 퇴적물 유입이 차단되지만, 외해나 사구로 유출되는 퇴적물이 존재하여, 퇴적물 비대칭적 이동의 결과 입도가 조립해지는 것이다. 이는 헤드랜드와 같은 국지적인 지질적 조건이 해빈에 영향을 크게 미침을 의미한다. 또한 동일한 폐쇄형이더라도 바다로의 개방성이 높을수록 퇴적물 이동이 상대적으로 자유롭고, 계절적 릿지형과 릿지&런넬형을 동일한 해빈에서 비교할 경우 파랑에너지의 세기 차이를 확인할 수 있었다. 공간적으로 도시한 결과 지하수침출면이 존재하는 해빈은 상대적으로 보호받는 곳에 위치하였으며, 릿지&런넬의 발달정도는 공간적 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 평균입도와 평균 유의파고에 대한 태안 지역 해빈의 개념적 모델을 제시하였다. 모델은 여름철 고조선에서 채취한 퇴적물과 SWAN을 통해 계산된 계절별 유의파고의 평균값을 기준으로 한다. 지하수침출면의 임계점은 0.3mm로 교란을 받은 몇몇 해빈을 제외하면 비교적 명료하게 분리되며, 이는 해빈 분류 모델의 Ω 값 2에 해당하는 입도이기도 한다. 유의파고에 따른 릿지&런넬의 존재와 부재는 상대적으로 명료하지 않으나 잠정적으로 0.2m, 0.4m를 기준으로 구분하였다. 겨울철 릿지&런넬이 소멸하는 파랑의 평균 유의파고는 0.2-0.4m 이며, 0.4m보다 클 경우 릿지&런넬의 규모가 커서 기록

이 감소할 뿐 소멸하지는 않는다. 이 연구에서 제시한 태안 지역 개념적 해빈 지형 모델은 해빈 분류 모델에서 제시하는 여러 유형 중 대조차 환경에 적용 할 수 있는 세부 유형을 제시하고 있다.

4. 해빈의 중규모 거동

4장에서는 1967~2016년까지의 해빈 변화에 대해 살펴보았다. 수십 년 규모의 해안 지형 변화 프로세스는 해안 관리 정책을 성공적으로 펼치기 위해 꼭 필요한 지식이지만 아직 매우 미진한 실정이다(Ashton et al., 2008; French and Burningham, 2009). 항공사진을 통해 태안 지역 해빈의 수십 년 거동을 살펴봄으로써, 중규모 프로세스 이해를 높이고자 하였다. 해안선 판독에는 해빈폭을 의미하는 고조선을 활용하였는데, 기존의 방식대로 해안선 변화를 분석할 경우 오차로 인해 분석이 어려워, 평균고조에서 활용하는 조위 보정을 계절별 현장자료를 기반으로 적용해 보았다. 일부 부족한 조위 자료는 다른 조위 관측소의 자료를 보정을 통해 활용하여, 주어진 자료의 한계로 발생하는 문제점을 극복하고자 하였다. 또한 수십 년 지형 변화에 대해서 외력에 지형이 반응하는 지형동역학적(morphodynamic) 관점을 바탕으로, 공간적 스케일에 따라 해빈에 영향을 주는 요인을 차례로 살펴보았다.

4.1. 오차 분석

수십 년 걸친 해빈 변화를 추적하기 위해 활용한 자료는 항공사진으로, 구체적인 촬영 시기, 축척, 보정 방법은 앞선 2.2.5 에서 언급하였다. 해안선은 고조선으로 선택하였으며, 그 이유는 자료의 한계 때문이다. 고조선 외에는 주로 평균고조(Mean High Water, MHW) 혹은 해수면(waterline)을 활용한다(e.g. Chen and Chang, 2009). 해당 방법에는 사진 촬영 시간(시, 분), 해당 시기 조위에 대한 정확한 정보가 필수적이다. 그러나 과거 항공사진(ex: 1977년 등)의 경우 정확한 촬영 시간이⁴³⁾ 알려져 있지 않으며, 연구 지역

43) 촬영 일자만 존재

에 가장 가까운 안흥 조위관측소의 조위정보가 없다.⁴⁴⁾ 따라서 정확한 시간이 존재하지 않더라도 해안선을 추출할 수 있는 고조선을 활용한 방법을 적용하였다. 고조선을 활용한 방법도 해당 시기의 조위자료를 요구하지만 상대적으로 덜 민감하기에 적절하다 판단하였다. 고조선이 위치한 상부 해변의 경우 해변 경사각이 상대적으로 다른 곳보다 높기에, 동일하게 수직적 오차가 발생하더라도 수평으로 환산할 경우, 오차가 줄어드는 현상이 나타난다. 여기서는 고조선부터 사구 말단부까지의 거리를 해변쪽으로 정의하여 분석에 활용하였다(그림 4.1, 4.2).⁴⁵⁾

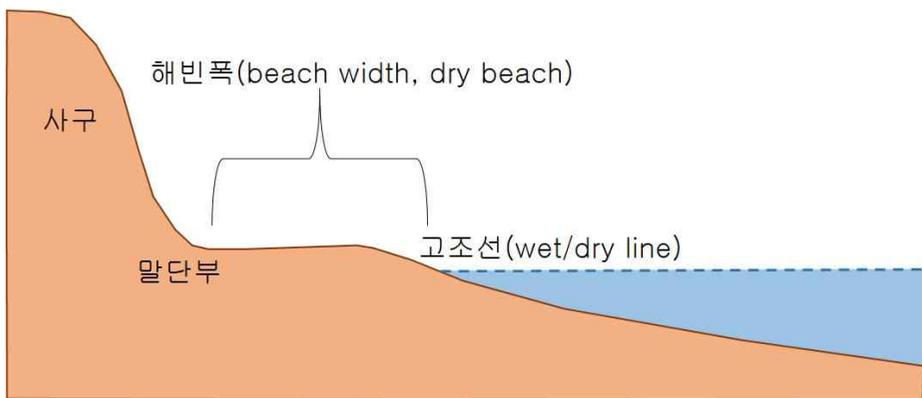


그림 4.1. 해변폭의 정의

44) 안흥 조위 관측소의 경우 1986년 10월 1일부터 관측을 시작 하였다.

45) 다양한 연구에서 해변폭(beach width)과 dry beach는 같은 개념으로 활용되고 있다. 범(berm)이 발달한 경우에는 해변폭과 후빈(backshore)은 동일하며, 해변폭의 측정이 범을 기준으로 이루어지게 된다. 그러나 범이 발달하지 않은 경우(서해안 처럼) 고조선을 기준으로 해변폭을 정의한다.



그림 4.2. 해빈폭 예시(학암 북).

항공사진을 통한 해안선 분석은 오차를 추정하고 이를 분석에 반영하여야 해석에 신뢰도를 높일 수 있다. 오차는 다음과 같이 계산하였다(Virdis et al, 2012; Manca et al., 2013; Genz, 2007).

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_p^2 + \sigma_g^2 + \sigma_t^2 + \sigma_{wr}^2 + \sigma_s^2} \dots\dots\dots(2)$$

σ_T = 총 에러, σ_d = 디지털라이징 에러, σ_p = 픽셀 에러, σ_g = 기하보정 에러, σ_t = 고조선 에러, σ_{wr} = 파랑 에러, σ_s = 계절 에러

디지털라이징 에러는 동일한 해안선에 대해 수 회 디지털라이징 실시 후, 개별 디지털라이징 간의 차이에서 나타나는 차이 값을 반영한다. 픽셀 에러는 항공사진의 축적과 DPI로 인해 발생하는 에러로, 정사보정된 영상의 경우 해상도를 반영하였다. 기하보정 에러는 기하보정시 발생하는 에러로 3rd Order Polynomial을 활용하여 항공사진을 변환하였으며, 이때 오차는 0.7m 이하로 제한하였다. 고조선 에러는 조석 주기에 따른 고조선의 변동으로 인해 발생하는 에러로, 안흥 조위 관측소의 2017년 최극조위자료의 수직 편차가 0.675m

인 점을 활용하였다. 수직 0.675m를 2017년 1년 동안 측량한 자료의(단기측량) 평균 경사각을 활용하여 수평으로 환산하여 에러로 반영하였다. 파랑 에러는 파랑의 처올림으로 인해 발생하는 에러로 Hunt formular에 기반하여 Moore 등(2006)이 활용한 $R_{2\%}$ 값을 활용하였다. 계산식에 활용된 심해파고, 심해파장은 SWAN에서 계산된 값을 활용하였으며, 해빈의 슬로프는 단기 측량 자료의 평균 슬로프값을 활용하였다. 계절 에러는 단기 측량시 측정한 해빈별 고조선의 편차를 활용하였다. 앞서 2.1.3.의 연구 지역 선정 이유에서 언급한 것처럼 선행연구에서는 항공사진이 대량으로 존재하기에, 파랑이 상대적으로 약한 특정 계절만을 선택하여 활용하였다. 하지만 우리나라의 경우 자료의 양이 극히 제한적이기에 연구자가 선택할 수 없는 어려움이 있다.

식(2)를 통해 추정하면 총 오차는 9.493-62.785m 로 나타나, 오차를 반영할 경우 해석이 불가능하게 된다(표 4.1). 오차는 주로 조위에 따른 고조선의 변동과 계절적 차이에서 기인하기에, 추가적으로 고조선, 계절 에러에 대해 보정작업을 실시하였다.

표 4.1. 해빈별 1차 오차 분석 결과

연도	위치	총 에러	연도	위치	총 에러	연도	위치	총 에러
1967	꾸지	11.033	1967	연포	12.414	1967	기지포	28.903
1977	꾸지	11.003	1977	연포	12.411	1977	기지포	28.898
1984	꾸지	10.997	1984	연포	12.411	1984	기지포	28.896
1996	꾸지	11.010	1998	연포	12.408	1998	기지포	28.898
2006	꾸지	11.007	2007	연포	12.410	2007	기지포	28.896
2016	꾸지	10.993	2016	연포	12.403	2016	기지포	28.896
1967	학암북	17.782	1967	몽산포	62.785	1967	안면	34.380
1977	학암북	17.792	1977	몽산포	62.784	1977	안면	34.380
1984	학암북	17.781	1984	몽산포	62.784	1984	안면	34.379
1996	학암북	17.789	1998	몽산포	62.784	1998	안면	34.380
2006	학암북	17.778	2007	몽산포	62.783	2007	안면	34.380

2016	학암북	17.775	2016	몽산포	62.782	2016	안면	34.374
1967	학암서	19.210	1967	달산포	50.666	1967	두여	34.212
1977	학암서	19.203	1977	달산포	50.664	1977	두여	34.213
1984	학암서	19.198	1984	달산포	50.664	1984	두여	34.214
1998	학암서	19.200	1998	달산포	50.663	1998	두여	34.213
2006	학암서	19.196	2007	달산포	50.662	2007	두여	34.210
2016	학암서	19.200	2016	달산포	50.661	2016	두여	34.207
1967	신두리	36.548	1967	청포대	40.964	1967	빛개	28.524
1977	신두리	36.521	1977	청포대	40.964	1977	빛개	28.518
1984	신두리	36.521	1984	청포대	40.963	1984	빛개	28.517
1998	신두리	36.522	1998	청포대	40.962	1998	빛개	28.518
2006	신두리	36.521	2007	청포대	40.962	2007	빛개	28.517
2016	신두리	36.517	2016	청포대	40.960	2016	빛개	28.514
1967	의향	15.649	1967	백사장	24.929	1967	꽃지	25.633
1977	의향	15.640	1977	백사장	24.926	1977	꽃지	25.629
1984	의향	15.640	1984	백사장	24.924	1986	꽃지	25.626
1998	의향	15.636	1998	백사장	24.933	1998	꽃지	25.626
2006	의향	15.634	2007	백사장	24.925	2007	꽃지	25.628
2016	의향	15.622	2016	백사장	24.921	2016	꽃지	25.625
1967	파도리	9.493	1967	삼봉	28.865	1967	장삼포	32.812
1977	파도리	9.536	1977	삼봉	28.866	1977	장삼포	32.809
1984	파도리	9.497	1984	삼봉	28.867	1986	장삼포	32.808
1998	파도리	9.494	1998	삼봉	28.864	1998	장삼포	32.809
2007	파도리	9.496	2007	삼봉	28.868	2007	장삼포	32.810
2016	파도리	9.525	2016	삼봉	28.862	2016	장삼포	32.807
1967	갈음이	17.843	-	-	-	-	-	-
1977	갈음이	17.842	-	-	-	-	-	-
1984	갈음이	17.844	-	-	-	-	-	-
1998	갈음이	17.841	-	-	-	-	-	-
2007	갈음이	17.847	-	-	-	-	-	-
2016	갈음이	17.841	-	-	-	-	-	-

고조선 에러를 해당 시기의 대표 단면을 반영하여 조위보정을 실시하여 상쇄시켰다. 조위 보정 방법은 Komar(1998)에 의해 처음 제시되고 이후 지속적으로 활용되고 있는, 해빈 단면을 활용하는 방법이다. 특정 수위(MHW, MSL, LDD 등)를 기준으로 삼고, 항공사진이 촬영된 시간과 해당 시기의 조위 값을 바탕으로 해빈 단면위에

서 조위를 상승 혹은 하강 시키는 방법으로, 주로 평균고조 혹은 해수면을 프록시로 이용한 방법에서 활용된다. 이 방법은 항공사진의 정확한 촬영 시간과 조위가 필수적인 자료이나, 이 연구에서는 이 방법을 고조선에 적용시킴으로써, 촬영 일자만을 가지고도 보정할 수 있었다. 이 때 필요한 정보는 해빈 단면에서 기반한 보정식과 고조선의 형성에 영향을 미친 해당 일자의 최극조위이다. 조위보정을 위해서는 기준 조위를 선택하여야 하며, 이 연구에서는 안흥 조위 관측소의 조화상수를 활용하여 평균 고조위인 표고 2.1m(인천 기준)로 선정하였다(LDL 기준 561cm).

보정식 계산은 다음과 같이 진행되었다. 해빈 단면을 활용하여 당시 조위를 반영하여 실제로 해수면의 고도를 조정하여야 하는데, 예를 들면 조위 기준이 2.1m이고 사진이 촬영된 시기의 조위가 1.1m라면, 조위가 있는 고도에서 1m 상승한 위치에 보정 조위가 있다고 가정하는 것이다. 그런데 평균고조를 이용한 방법에서는 조위의 1m 상승이 고도의 1m상승과 일치하지만, 고조선의 경우 동일하게 증가하지 않는다.⁴⁶⁾ 따라서 이에 대한 보정에 2017년 고조선을 측량한 값을 활용하였다. 각 측량 시기에 해당하는 최극조위와 고조선의 표고값의 관계를 선형방정식을 통해 추정된 결과, 실측 결과 만조시 조위가 1m 상승한다고 해서 고조선이 1m 높은 곳에 형성되지 않으며, 조위의 1m 상승은 대략 고조선의 0.5m 고도 상승을 발생시킴을 확인하였다. 개별 측선마다 다른 관계식을 활용하여 각 항공사진 측량 시기의 해당하는 고조선의 고도값을 도출하였다.⁴⁷⁾

46) 한 해빈의 측선에서 여러 차례 고조선을 측량한 결과, 조위가 증가할수록 고조선의 위치도 육지 방향으로 이동하지만, 1:1의 비율로 증가하지는 않는 것으로 나타났다.

47) 몽산포 해빈의 경우 실측값이 없어, 연계된 해빈인 달산포 자료를 적용하였으며, 백사장과 꽃지의 경우 조위 자료를 그대로 반영하였다. 따라서 백사장과 꽃지의 결과는 실측 자료를 활용한 것에 비해 과대추정된 것으로 판단된다.

최극조위의 경우 조위값은 안흥 조위관측소의 자료를 활용하였으나, 1986년 10월 1일 이전 조위값은 자료의 부재로 인해 인천 조위관측소의 자료를 활용하였다.⁴⁸⁾ 보정은 다음과 같이 진행되었다. 항공사진이 촬영된 일자의 인천 조위관측소의 최극조위를 확인한 뒤, 1999년 동안 인천 기준 해당 최극조위 값이 나타난 일시를 모두 확인한다.⁴⁹⁾ 해당 일시에 해당하는 안흥 조위관측소의 최극조위 값을 추출한 다음, 추출한 안흥 조위값의 평균과 표준편차를 계산한다. 평균값은 해당 시기의 조위로 반영되고, 표준편차는 계절 단면을 반영하여 수직적 오차를 수평적 오차로 환산한 후 에러로 반영하였다. 이때 항공사진이 촬영된 계절과 동일한 계절의 단면을 활용하여 계절적 변화도 반영하였다. 경사각은 수평 기준 0-20m 까지의 평균 경사각을 반영하였으며, 릿지&런벨이 존재하는 해변의 경우 영향을 감소시키기 위해 가로 기준 0m에서 세로 기준 2.1m까지의 평균 경사각을 반영하였다.⁵⁰⁾ 이 외에도 계절적 차이를 반영하기 위해 파랑 에러에 대해서도 약간의 수정이 있었다. 기존의 경우 파랑 에러 계산시 해변의 경사각을 단기 측량 자료의 평균 경사각을 활용한 것에서, 계절에 맞는 단면을 활용하는 것으로 수정하여 계절적 차이를 반영하였다. 새롭게 적용된 오차는 다음과 같이 계산한다.

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_p^2 + \sigma_g^2 + \sigma_{wr}^2 + \sigma_{tc}^2} \dots\dots\dots(3)$$

48) 2007년 11월 4일의 경우에도 관측값이 없어 인천 자료를 활용하였다.
 49) 2007년 11월 4일의 보정에는 전후 1년의 자료를 활용하였다.
 50) 만약 2.1m 이하에 최극조위가 존재한다면 해당 값을 포함하는 값까지 반영하였다.

σ_T = 총 에러, σ_d = 디지털라이징 에러, σ_p = 픽셀 에러, σ_g = 기하보정 에러, σ_{wr} = 파랑 에러, σ_{tc} = 인천 조위 보정 에러

고조선 에러가 삭제되고 인천 조위 보정 에러가 추가되었는데, 이와 같이 추정 시 총 오차는 0.62~2.97m 로 나타난다(표 4.2). 개별 항목에 대한 에러는 부록2에 첨부하였다.

표 4.2 해빈별 2차 오차 분석 결과

연도.	위치	에러	연도	위치	에러	연도	위치	에러
1967	꾸지	1.455	1967	연포	1.577	1967	기지포	1.631
1977	꾸지	1.075	1977	연포	1.404	1977	기지포	1.908
1984	꾸지	0.927	1984	연포	1.365	1984	기지포	1.310
1996	꾸지	0.893	1998	연포	0.967	1998	기지포	0.900
2006	꾸지	0.854	2007	연포	1.374	2007	기지포	0.842
2016	꾸지	0.651	2016	연포	0.889	2016	기지포	0.839
1967	학암북	1.287	1967	몽산포	2.947	1967	안면	2.361
1977	학암북	1.318	1977	몽산포	2.849	1977	안면	2.212
1984	학암북	1.169	1984	몽산포	2.643	1984	안면	1.940
1996	학암북	1.031	1998	몽산포	0.827	1998	안면	1.005
2006	학암북	0.814	2007	몽산포	1.762	2007	안면	1.004
2016	학암북	0.752	2016	몽산포	0.632	2016	안면	0.780
1967	학암서	1.773	1967	달산포	2.978	1967	두여	1.727
1977	학암서	1.655	1977	달산포	2.862	1977	두여	1.636
1984	학암서	1.567	1984	달산포	2.377	1984	두여	1.500
1998	학암서	0.951	1998	달산포	0.867	1998	두여	0.899
2006	학암서	0.866	2007	달산포	1.772	2007	두여	0.784
2016	학암서	0.960	2016	달산포	0.687	2016	두여	0.644
1967	신두리	2.549	1967	청포대	2.118	1967	밭개	1.809
1977	신두리	2.116	1977	청포대	2.237	1977	밭개	1.354
1984	신두리	1.943	1984	청포대	1.726	1984	밭개	1.430
1998	신두리	0.865	1998	청포대	0.773	1998	밭개	0.810
2006	신두리	0.817	2007	청포대	1.340	2007	밭개	0.754
2016	신두리	0.624	2016	청포대	0.655	2016	밭개	0.637
1967	의항	1.634	1967	백사장	1.425	1967	꽃지	1.916
1977	의항	1.291	1977	백사장	1.397	1977	꽃지	1.775
1984	의항	1.202	1984	백사장	1.156	1986	꽃지	1.744
1998	의항	0.939	1998	백사장	1.019	1998	꽃지	0.748
2006	의항	0.890	2007	백사장	0.825	2007	꽃지	0.807
2016	의항	0.657	2016	백사장	0.676	2016	꽃지	0.703
1967	파도리	2.067	1967	삼봉	2.112	1967	장삼포	1.921
1977	파도리	2.249	1977	삼봉	1.652	1977	장삼포	1.477
1984	파도리	1.935	1984	삼봉	1.788	1986	장삼포	0.697

1998	파도리	1.646	1998	삼봉	0.834	1998	장삼포	0.752
2007	파도리	1.939	2007	삼봉	0.975	2007	장삼포	0.791
2016	파도리	1.815	2016	삼봉	0.775	2016	장삼포	0.657
1967	갈음이	1.525	-	-	-	-	-	-
1977	갈음이	1.413	-	-	-	-	-	-
1984	갈음이	1.326	-	-	-	-	-	-
1998	갈음이	0.772	-	-	-	-	-	-
2007	갈음이	1.374	-	-	-	-	-	-
2016	갈음이	0.762	-	-	-	-	-	-

4.2. 중규모 거동 해석

4.2.1. 개관

중규모 거동을 해석하기 위해 고조선을 기준으로 해안선을 추출하였으며, 이는 앞서 언급한 것처럼 해변폭을 의미한다. 해변폭 변화를 분석하기 위해 각 해변의 시기별 평균 해변폭과 시기별 변화량을⁵¹⁾ 계산하였으며(표 4.3), DSAS결과를 제시하였다.

평균 해변폭의 경우 연포, 기지포, 두여, 안면, 삼봉 등이 넓었으며, 꽃지, 청포대, 장삼포 등이 좁았다. 2016년의 해변폭이 가장 넓었으며(평균 16.09m), 1984년이 가장 좁았다(평균 6.16m). 변화량의 경우 가장 많은 변화가 발생한 해변은 꽃지이며, 가장 적은 변화는 파도에서 나타났다. 1967~1977년에 이르는 시기에 가장 많은 양의 변화가 발생하였으며, 1977~1984년에 이르는 시기에 가장 큰 음의 변화가 발생하였다. 가장 뚜렷한 경향성은 1977~1984년에 발생한 해변폭의 감소이다. DSAS결과 연구 해변은 연구 기간 동안 해안선이 평균 7.50m 전진하였으며, 이는 연간 0.15yr/m수준이다(표 4.4). 가장 많이 전진한 해변은 안면으로 59.44m 증가하였으며, 의항 해변의 경우 24.52m 감소하였다. EPR의 최대 최소화는 동일하게 안면과 의항으로 나타났으나, 선형 회귀를 의미하는 LRR의 경우 가장 많은 후퇴가 발생한 해변은 학암북으로 연 0.45m 해안선

51) 회색의 이탤릭체는 오차 범위 내의 유의하지 않은 변화량을 의미한다.

이 후퇴하는 것으로 나타났다(그림 4.3). 학암북의 경우 결정계수도 0.77수준으로 매우 높았으며, 학암서의 경우 결정계수가 0.80에 달하였다. LRR의 경우 전반적으로 태안반도에서 침식이, 안면도에서 퇴적이 발생하였음을 지시하고 있다.

표 4.3. 평균 해빈폭(m) 및 변화량(1967-2016)

단위 (m)	1967		1977		1984		1998		2007		2016		평균
	해빈폭	변화량	해빈폭	변화량	해빈폭	변화량	해빈폭	변화량	해빈폭	변화량	해빈폭	변화량	
꾸지	9.83	4.71	-5.11	-0.1	-4.81	7.95	8.06	-7.8	-15.76	-0.48	7.32	2.35	
학암북	19.22	16.98	-2.23	10.5	-6.48	15.57	5.07	-0.1	-15.68	-3.36	-3.26	9.8	
학암서	18.68	15	-3.67	7.25	-7.75	3.84	-3.4	-5.3	-9.14	1.47	6.78	4.67	
신두리	-0.52	7.44	7.96	5.24	-2.19	-7.05	-12.3	0.18	7.24	13.16	12.97	4.19	
의항	23.87	13.99	-9.87	-1.92	-15.91	14.78	16.71	11.83	-2.94	-0.64	-12.48	10.32	
파도	0.04	-1.72	-1.76	1.96	3.68	-1.59	-3.55	-6.2	-4.61	-3.96	2.23	-1.91	
갈음	1.38	7.07	5.68	8.29	1.22	14.56	6.27	18.99	4.42	10.08	-8.9	10.06	
연포	61.11	48.77	-12.33	57.39	8.61	68.7	11.31	79.03	10.33	74.69	-4.33	64.95	
몽산	0.55	9.22	8.66	15.75	6.53	-0.09	-15.84	0	0.09	0	0	4.24	
달산	-13.82	3.63	17.45	1.16	-2.47	-1.86	-3.02	-4.82	-2.96	8.21	13.03	-1.24	
청포대	-28.38	-3.87	24.51	-3.3	0.57	-21.59	-18.29	-28.93	-7.34	4.96	33.9	-13.52	
백사	12.27	12.75	0.48	-6.35	-19.11	-18.87	-12.51	4.31	23.19	2.77	-1.54	1.14	
삼봉	14.74	28.88	14.13	20.26	-8.61	16.81	-3.45	30.87	14.05	29.48	-1.39	23.51	
기지포	21.07	31.75	10.68	15.33	-16.42	32.55	17.22	53.62	21.06	64.94	11.32	36.54	
안면	6.76	24.24	17.48	16.94	-7.3	18.99	2.05	37.34	18.34	48.44	11.1	25.45	
두여	19.32	30.77	11.45	19.66	-11.11	25.39	5.72	37.01	11.62	36.12	-0.89	28.05	
밭개	-1.35	11.04	12.39	5.26	-5.77	1.06	-4.19	8.5	7.44	11.79	3.29	6.05	
꽃지	-27.01	-11.34	15.67	-40.57	-29.22	-2.91	37.65	-8.3	-5.38	0	8.3	-15.02	
장삼포	-5.85	1.3	7.15	-20.91	-22.21	-10.05	10.86	-8.21	1.84	2.81	11.02	-6.82	
전체	131.91	250.61	118.72	111.84	-138.75	156.19	44.37	212.02	55.81	300.48	88.47		

표 4.4. DSAS분석에 따른 NSM, EPR 결과(1967-2016)

구분	꾸지	학암북	학암서	신두	의항	파도	갈음	연포	몽산	달산
NSM	-10.32	-22.59	-17.20	13.68	-24.52	-4.01	8.70	13.58	-0.56	22.04
EPR	-0.21	-0.46	-0.35	0.28	-0.50	-0.08	0.18	0.28	-0.01	0.45
구분	청포	백사장	삼봉	기지포	안면	두여	밭개	꽃지	장삼포	-
NSM	33.87	-9.50	14.73	43.88	59.44	16.80	13.15	-18.57	9.80	-
EPR	0.70	-0.20	0.30	0.90	1.22	0.35	0.27	-0.38	0.20	-

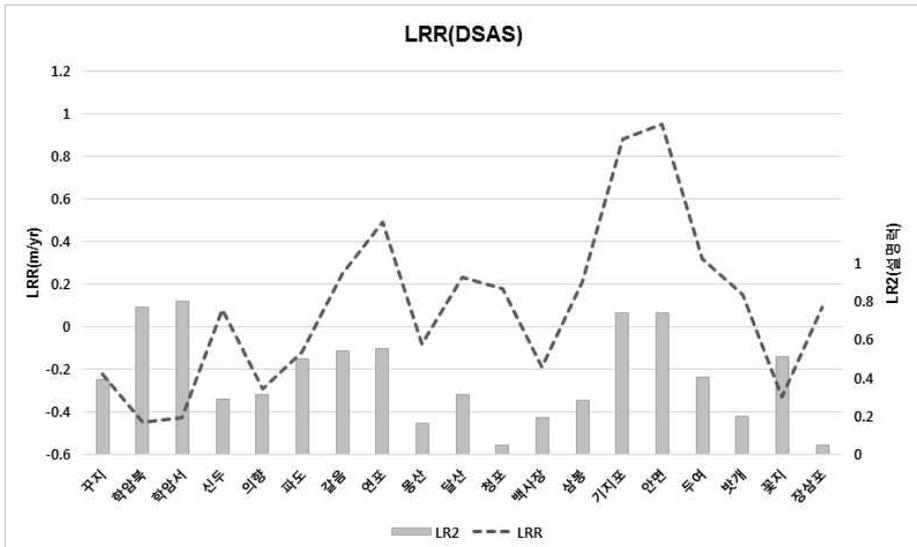


그림 4.3. 해빈별 DSAS분석에 따른 LRR 결과(1967-2016)

4.2.2. 개별 해빈 해석⁵²⁾

현재까지 태안에 포함된 일부 지역을 대상으로 수십년 동안의 해빈 변화를 다룬 연구는 소수 존재한다. 김백운 등(2013)의 연구에서는 수직적 프록시인 표고 1m와 2m를 기준으로 연구를 진행하여 꽃지 해빈에서 1985-2009년 동안 연간 0.8m 침식되었음을 제시하였다. 김장수 등(2011)의 연구는 1967-2009년 동안의 바람아래 해빈의 변화를 다루었으나, 남동방향에 존재하는 할미섬 방향으로 진행된 사취의 성장에 분석 초점이 맞추어져 있다. 이하에서는 개별 해빈의 변화를 매 시기별로 살펴보고, 해안 프로세스로 인해 발생한 변화를 확인하며 인간의 영향이 나타난 시기들을 구분할 것이다.

52) 이하에서 제시하는 그래프의 x축은 연도이며, y축은 해빈폭(m)이다.

꾸지의 경우⁵³⁾ 전형적인 소규모 포켓비치로 두 측선 모두 유사한 거동을 보인다(그림 4.4). 1번 측선의 경우 -0.16m/yr , 2번 측선은 -0.28m/yr 로 전반적으로 침식이 발생하고 있다. 1984~1998년에 해빈의 배후지가 농경지에서 집 등의 인공물로 변화하였으며, 2007년 해빈폭이 매우 낮은 수치를 보이는 것이 특징이다. 2007년 이후 사구와 해빈 사이에 목재로 된 모래 차단 시설이 설치되면서 고도차이로 인해 해빈에서 사구로의 모래 이동은 어려우나 역으로의 이동은 지속되어 해빈폭이 증가한 것으로 추정된다.

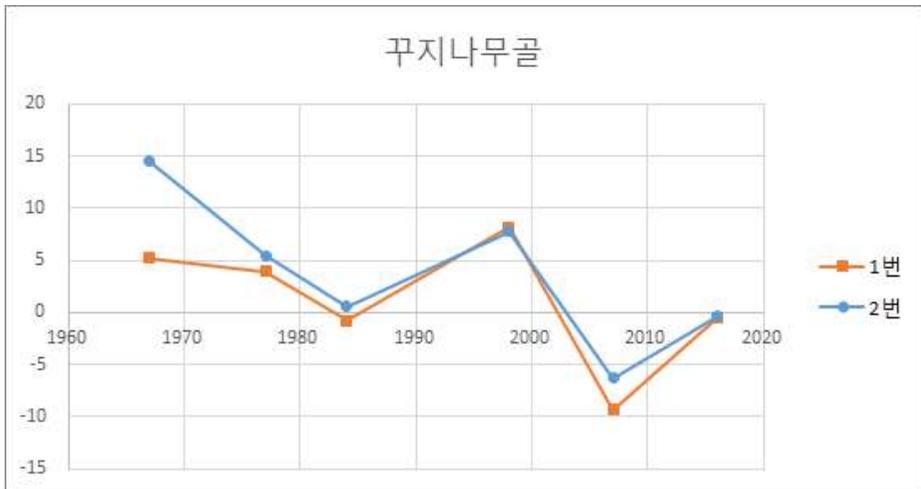


그림 4.4. 꾸지나무골 측선별 해빈폭 변화

학암북의 경우 연포와 더불어 유이하게 동서의 향을 가지고 있는 포켓비치로 2016년을 제외하고 두 측선 모두 유사한 거동을 보인다(그림 4.5). 선형 경향성은 1번 측선의 경우 -0.5m/yr , 2번 측선은 -0.4m/yr 로 전반적으로 침식이 발생하고 있다. 1984~1998에 학암북과 학암서의 경계부에 해안 제방 등의 대규모 인공물이 건설되었

53) 정확한 명칭은 꾸지나무골

으며, 한편으로 1984~1998에 일부 사구 배후지를 개발하였다. 시간이 지속되며 식생이 초본류에서 목본류로 변화하고, 식생 밀도가 증가하였다는 특징이 있다. 학암서와는 과거 연결되어 있었으나, 해안 제방을 건설하여 현재는 단절되어 있다.



그림 4.5. 학암북 측선별 해빈폭 변화

학암서의 경우 학암북의 서쪽에 자리 잡은 포켓비치로 2번 측선의 유의하지 않은 특정 시기를 제외하고 두 측선 모두 유사한 거동을 보인다(그림 4.6). 해빈의 북서방향에 섬이 존재하여 완벽하게 개방되어 있지는 않았으며, 1번 측선의 경우 -0.5m/yr , 2번 측선은 -0.36m/yr 로 전반적으로 침식이 발생하고 있다. 1984~1998년에 학암북과 학암서의 경계부에 해안 제방 등의 대규모 인공물이 건설되었는데, 학암북에서 해빈폭이 증가한 것과 달리 학암서는 감소하였다. 1984~1998년에 사구 배후지를 대규모로 개발하였으며, 시간

이 지속되며 식생이 초본류에서 목본류로 변화하고, 식생 밀도가 증가하였다. 2007-2016에서 1번 측선 부분에 집중적인 전진이 발생하였다는⁵⁴⁾ 특징이 있다.



그림 4.6. 학암서 측선별 해빈폭 변화

신두리는 1998년 북쪽 제방이 건설되기 이전까지는 해빈 양 말단 모두 바다에 노출되어 있었으나, 현재 북쪽은 제방이 헤드랜드의 역할을 하여 반폐쇄형의 형태를 보인다. 남쪽에서 관찰되는 사취는 제방 건설 이전 북쪽에서 더욱 활성화 되어 있었으며, 해빈의 위치 자체가 소규모 만에 존재하여 상대적으로 보호 받는 위치에 있다. 전반적으로 릿지, 런벨, 사취의 영향으로 각 측선이 매우 복잡한 양상으로 변화하며, 선형 경향성은 1, 5, 6번 측선에서 증가하고 있으며, 2, 3번 측선에서 감소하고 있으나, 1번과 6번 측선을 제외하고는

54) 과거 두꺼운 해빈폭을 보였던 곳에서(사취처럼 보이는) 해빈폭 증가가 발생하였다.

결정계수가 높지 않다(그림 4.7). 1번 측선의 최근 해빈폭 증가는 전진퇴적(progradation)의 결과이며, 6번 측선은 사취의 규모 증가에 기인한 결과이다. 1967~77년과 1977~84년 모두 식생 면적이 증가하며 활성사구의 면적이 감소하나, 해빈폭의 변화량이 각각 양과 음으로 나타나는데, 이는 차후 언급할 파랑세기의 차이 때문이다. 1984~98에 급속한 침식이 발생하는 것은 앞서 언급한 북쪽 제방의 영향으로, 북쪽 제방 끝에 퇴적물이 대량 퇴적된 후 정체되어 있는 모습이 관찰되며, 2007년 3~6번 측선 배후지에 대규모 개발이 진행되어 제방이 건설되었다. 제방 건설 이후 남쪽의 사취가 역동성을 보이는 것으로 볼 때, 퇴적물 순환에 영향을 받은 것으로 추정되나, 구체적인 연구가 요구된다. 1967~2016년에 걸쳐 전반적으로 릿지&런벨이 줄어드는 모습을 보인다.



그림 4.7. 신두리 측선별 해빈폭 변화

의향은 과거 육계사주였으나 동쪽 부분을 간척하여 현재는 포켓형태의 해변으로 변모하였으며, 이행 과정에서 전반적인 침식이 발생하였다. 선형 경향성은 1번 측선의 경우 -0.3m/yr , 2번 측선은 -0.28m/yr 로 전반적으로 침식이 발생하고 있으며(그림 4.8), 전반적으로 해변 길이에 비해 해변폭이 넓은 편이다. 1967~1977년에 사주위에 도로가 건설되고 동편 간척이 완료되는 등의 인위적 영향이 발생하였으며, 1998~2007년 해안가에 제방이 건설되고, 2007~2016년에는 사구 위에 다수의 인공물(집, 펜션 등)이 건설되었다. 2007년 관찰되는 제방의 설치 자체가 해변 침식에 대응하기 위한 방안이었을 수 있다.



그림 4.8. 의향 측선별 해변폭 변화

파도는 연구 대상 해변 중 유일하게 조상대에서 자갈이 관찰되는 곳으로, 1번 측선의 경우 대부분의 시점에서 유의미하지 않은 변화가 관찰된다(그림 4.9). 선형 경향성은 1번 측선과 2번 측선 모두 -0.12m/yr 침식이 발생하고 있으나, 전반적으로 유의미하지 않아 중기적 변동에서는 해석에서 제외하였다.

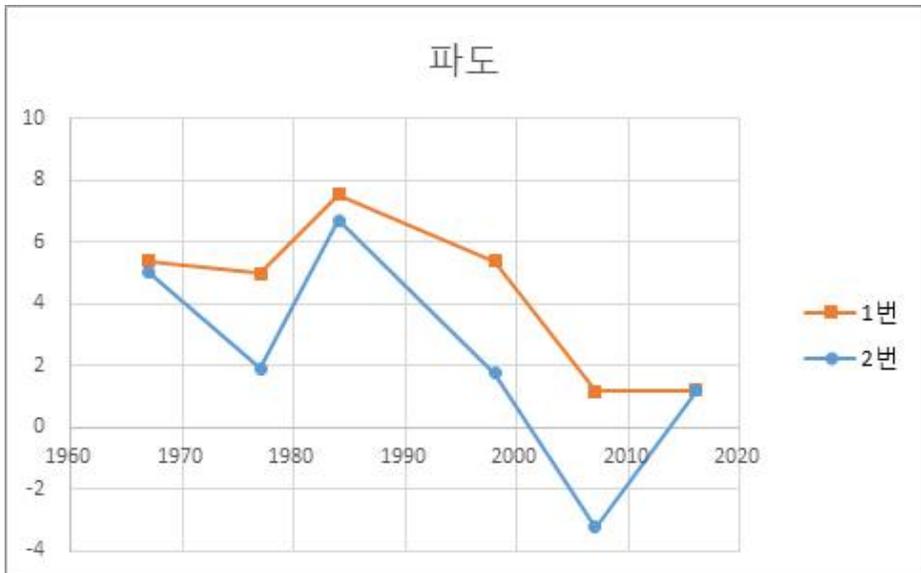


그림 4.9. 파도 측선별 해변폭 변화

갈음은 소규모 헤드랜드 사이에 위치한 해변으로, 해변 북서방향에는 육지부가 존재하고, 서남방향에는 신진도, 가의도 등이 존재하여 바다에 대한 개방성이 매우 낮은 특징을 보인다. 선형 경향성은 1번 측선 0.32m/yr, 2번 측선 0.18m/yr 퇴적이 발생하고 있다(그림 4.10). 2007~2016년을 제외하고 지속적으로 해변폭이 증가 추세로, 2015년 사구에 설치된 비사 방사체가 사구로 이동한 모래가 해변으로 이동하는 것을 막아 해변폭이 줄어든 것으로 판단된다. 포켓비치의 경우 퇴적물 순환 체계에서 단절된 경우가 많으나, 지속적인 해변폭 증가는 퇴적물의 유입을 의미한다. 이는 퇴적물이 파랑, 조류 등에 의해 상대적으로 보호받는 곳에 위치한 갈음 해변으로 이동된 뒤 퇴적된 것으로 추정되며, 일종의 퇴적물 수용처(sink)의 역할을 하는 것으로 보인다.

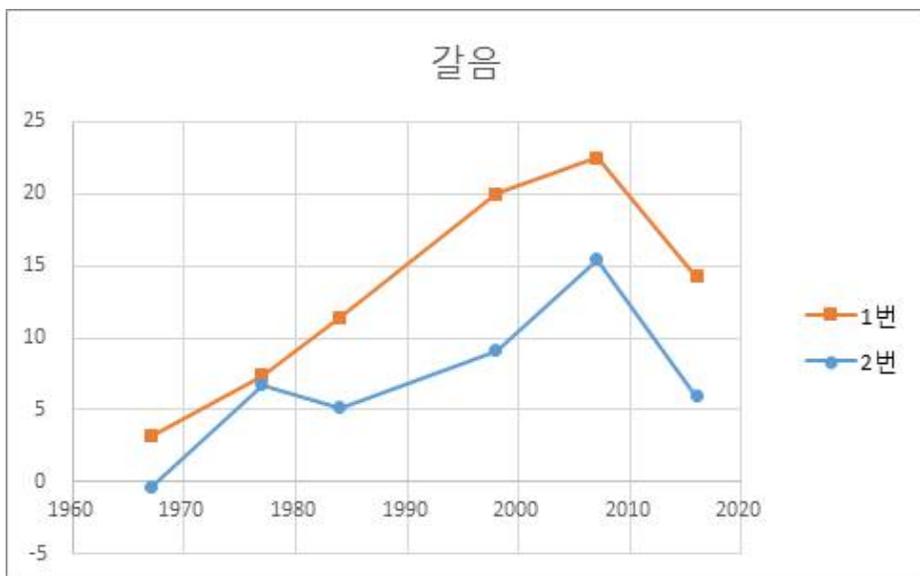


그림 4.10. 갈음 측선별 해변폭 변화

연포는 학암북과 더불어 유이하게 동서방향의 향을 보이는 해변으로, 학암북은 북으로 바다에 개방되어 있지만, 연포는 남으로 바다에 개방되어 있다. 뚜렷한 사구가 존재하지 않으며, 매우 두터운 해변폭을 보이는데(평균 64.953m), 선형 경향성은 1번 측선 0.78m/yr, 2번 측선 0.57m/yr, 3번 측선 0.13m/yr 퇴적이 발생하고 있다(그림 4.11). 1967~1977년 동안 급격한 해변폭의 감소가 발생하였는데, 이는 해안가에 설치된 대구모 군사시설의 영향으로 67년에 존재하던 저지를 해변 모래를 이용하여 메운 것으로 추정된다. 1977~1984년에는 군사시설이 철거되고 기존 부지는 다른 인공물들이 대체하고 있으며, 2~3번 측선의 배후지에 송림 식재와 평탄화 등의 작업을 실시한 것으로 추정된다. 3번 측선에서 2016년 해변폭이 감소하는 것은 수구의 영향이다. 해수욕장으로 활용되면서 지속적으로 dry beach의 평탄화와 식생 제거 작업을 실시하고 있으며, 이것이 해변폭 감소에 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다.

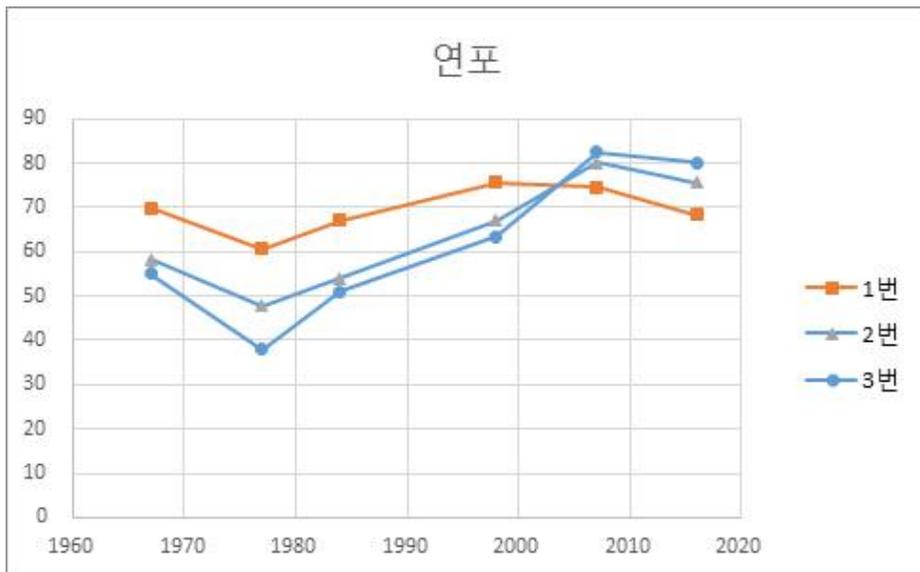


그림 4.11. 연포 측선별 해변폭 변화

몽산포의 경우 북쪽이 헤드랜드로 가로 막혀 있으며 남쪽은 달산포 해빈과 연결되는데, 몽산포와 달산포 사이에 소규모 만이 존재하여, 사취가 발달하고 있다. 1984년부터 해빈 제방이 관찰되어 분석 대상으로 적합하지 않은데, 유일하게 의미가 있는 1967~1977년에 식생 피복이 감소함과 동시에 해빈폭이 증가하는 모습이 관찰된다(그림 4.12). 1984년의 높은 해빈폭은 제방이 현재 해안선보다 전진하여 설치되었기 때문이다.

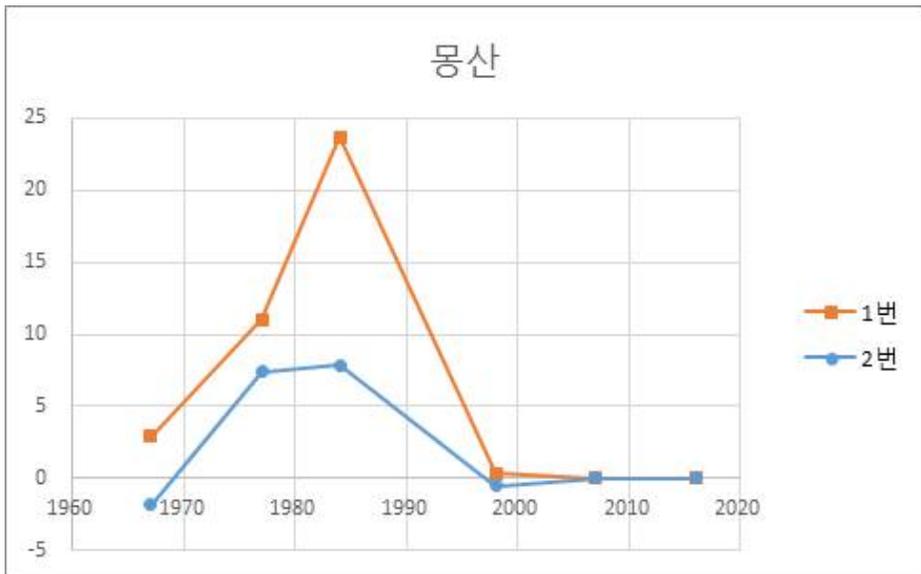


그림 4.12. 몽산 측선별 해빈폭 변화

달산포의 경우 북쪽으로 몽산포 해변과 남쪽으로 청포대와 연결되는데, 달산포와 청포대 사이에 명확한 경계가 없다. 1977~1984년과 1984~1998년에 평균 해변폭이 감소하였지만, 유의하지 않다(그림 4.13). 선형 경향성은 1번 측선 0.18m/yr, 2번 측선 0.27m/yr 퇴적이 발생하고 있다. 1967~1977년 사이 사구의 식생 피복이 감소하면서 해변폭이 증가하고, 1977~1984년에는 인공물 조성이 시작되었다. 몽산포와 달산포 사이에 존재하는 사취가 1967년에는 크고 복잡하게 발달하였으나 2016년에는 거의 관찰되지 않는데, 이는 모래의 역동성이 감소함을 의미한다. 또한 현재 사구가 존재하나 활동성이 전혀 없고 매우 단단하여, 마치 제방과 같은 역할을 하는 것으로 보인다. 가장 최근의 해변폭 증가는 dry beach의 증가가 아니라, 기존 사구 전면부에 초지가 형성되면서 해안선 자체가 전진하는 전진퇴적으로, 이 때 이동성을 갖던 모래들이 해변에 흡수되어 모래의 역동성이 감소한 듯 하다.

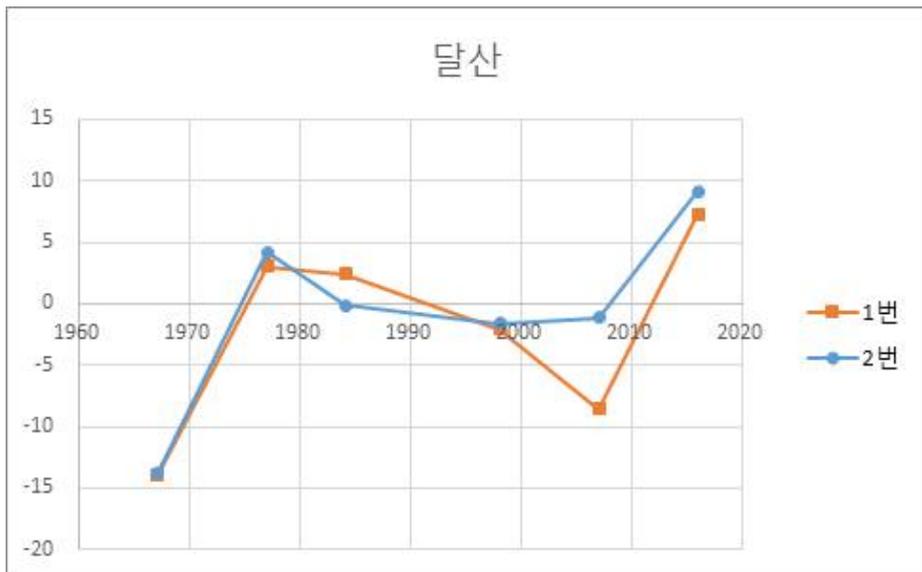


그림 4.13. 달산 측선별 해변폭 변화

청포대의 경우 북쪽이 달산포와 연결되며 남쪽에는 인공물로 막혀 있다. 1977~1984년에 유의하지 않은 변화가 발생하였다(그림 4.14). 선형 경향성은 1번 측선 0.15m/yr, 4번 측선 0.23m/yr 으로 남쪽으로 가면서 퇴적이 증가하고 있으나, 결정계수가 극히 낮다. 1967~1977년 사이 1~2번 측선 배후지가 농경지로 개발되고, 해변 순환(beach rotation)의 영향으로 재배열(reorientation)이 발생하여 해변폭이 증가하였다. 1984~1998년에 배후지에 대규모 공사가 관찰되며, 특히 1~2번 측선 해안선에는 제방이 설치되었으며, 가장 최근의 해변폭 증가는 제방(1~2)과 사구의 역동성 감소(3~4)에서 기인한 것으로 추정된다.

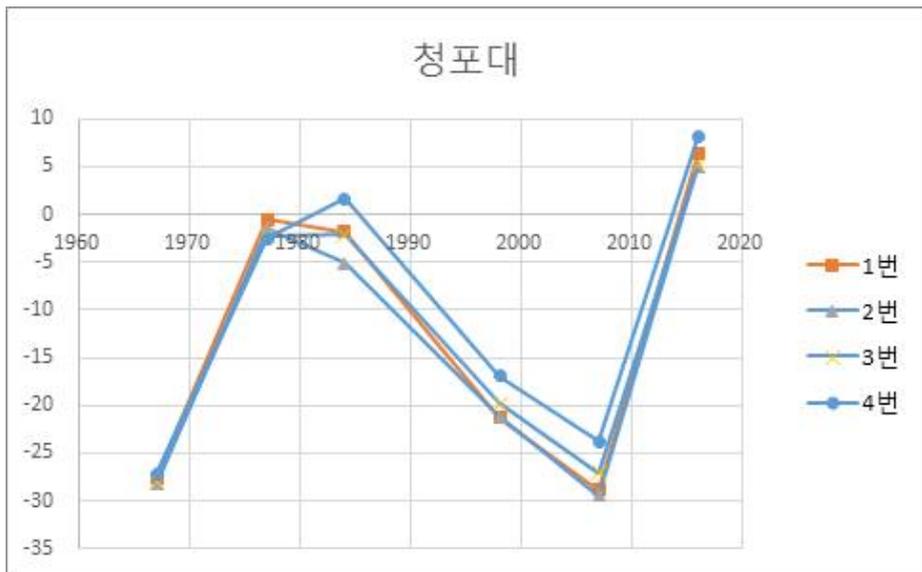


그림 4.14. 청포대 측선별 해변폭 변화

백사장은 안면도 최북단에 위치한 해변으로, 해변의 서쪽에서 북쪽으로 안면도와 본토 사이에 흐르는 조수통로가 위치하여, 해변 북부에 동쪽방향으로 전개된 사취가 발달해 있다. 1977년의 경우 1~2번 측선이 촬영된 항공사진이 부재하여, 3번 측선만 판독하였다. 선형 경향성은 1번 측선 0.1m/yr, 2번 측선 -0.37m/yr, 3번 측선 -0.29m/yr 로 침식과 퇴적이 혼재하나 퇴적의 결정계수가 높지 않다(그림 4.15). 1967~1984년 동안 급격한 해빈폭 감소가 발생하였으며, 릿지&런넬이 줄어들고, 사구에 목본류가 증가하였다. 2007년부터 2~3번 측선에서 해빈폭이 0m인 것은 제방이 건설되었기⁵⁵⁾ 때문이다. 1998~2007년 1번 측선에서 급격한 해빈폭 증가가 발생하는 것은 사취가 상부 해빈에 흡수되었기(welding) 때문으로, 해빈폭, 사취, 릿지&런넬의 관계가 중요한 해변으로 볼 수 있다.

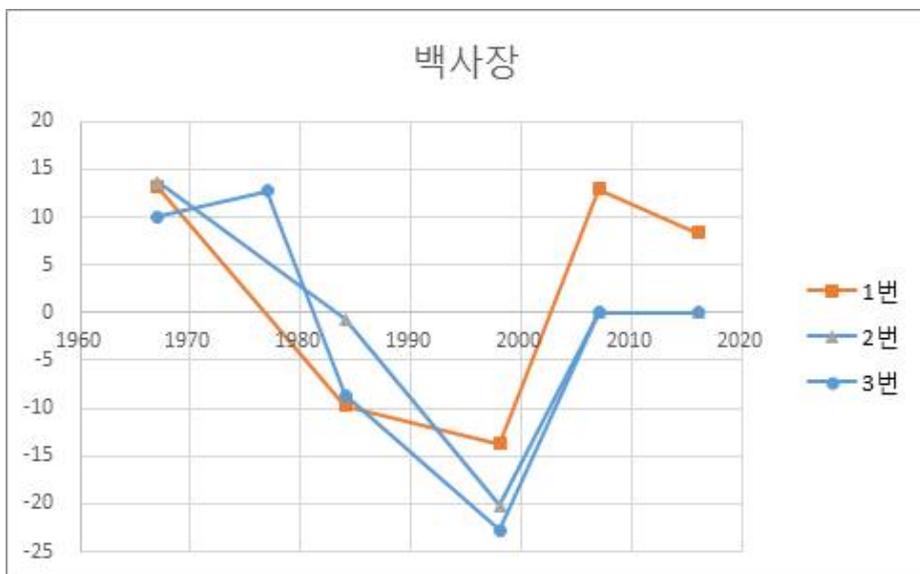


그림 4.15. 백사장 측선별 해빈폭 변화

55) 따라서 2, 3번 측선에서의 증가는 의미 없다.

삼봉의 북쪽에는 헤드랜드가 존재하며, 남쪽으로는 기지포 해변과 연결되어 있는데, 삼봉과 기지포 사이에 규모가 매우 작은 소규모 하천이 유입되고 있다. 선형 경향성은 1번 측선 0.06m/yr, 4번 측선 0.38m/yr로 남쪽으로 가면서 많은 퇴적이 발생하였으며, 결정계수도 높다(그림 4.16). 1977~1998년 사이에 식생 피복 면적과 밀도가 증가함에 따라 침식이 발생하였다. 1998~2007년은 사구와 해변 사이에 사구울타리(dune fence, sand fence, snow fence)⁵⁶⁾를 설치되고 해변폭이 증가한 것으로 보아, 해변에서 사구로 이동하는 모래의 상당수가 사구울타리에 가로막혀 해변에 퇴적된 것으로 보인다. 1967년에 비해 2016년 릿지&런넬의 수와 기복이 감소하였으며, 기존 사구 전면부에 초지가 형성되면서 해안선 자체가 전진하는 전진퇴적이 발생하였다. 이는 퇴적물 역동성이 감소한 것으로, 3~4번 측선의 경우 삼봉~기지포 사이의 하구의 범위가 감소한 것도 영향을 미친 것으로 판단된다.

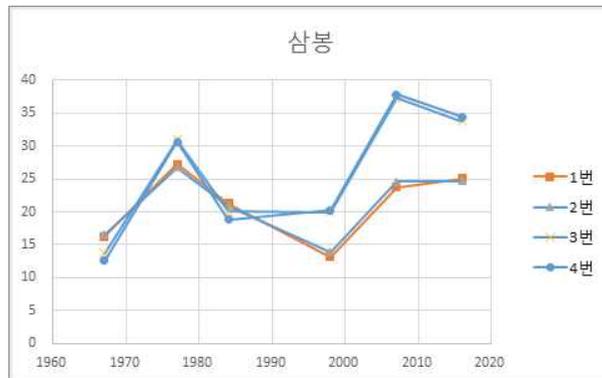


그림 4.16. 삼봉 측선별 해변폭 변화

56) 기존 연구에서는 사구울타리를 모래포집기로 번역하고 있다. 그러나 ‘포집’이라는 단어는 표준국어대사전에 따르면 “여러 가지 방법으로 일정한 물질 속에 있는 미량 성분을 분리하여 잡아 모으는 일”로, dune fence의 기능이 풍속을 감소시켜 비사를 퇴적시키는 장치라는 것을 볼 때 아주 적절한 번역이라고 볼 수는 없다. 이 연구에서는 원문의 의미를 최대한 살려 dune fence를 사구울타리로 번역하였다.

기지포의 경우 북쪽으로 삼봉, 남쪽으로 안면 해변과 연결되는데, 기지포와 안면 사이에 소규모 만이 있으며, 주위로 사취가 존재한다. 선형 경향성은 모든 측선에서 0.87m/yr 이상으로 결정계수도 매우 높다(그림 4.17). 1977~1984년 사이 초지가 증가함에 따라 모래의 역동성이 감소하여 침식이 발생하였다. 1984~1998년 사이 목본류가 증가하고 해안선이 전진하였으며, 2007년 사구와 해변 사이에 사구울타리를 설치하였다. 전반적으로 기존 사구 전면부에 초지가 형성되면서 해안선 자체가 전진하는 전진퇴적이 발생하였다. 삼봉과 달리 릿지&런넬의 쇠퇴가 관찰되지 않으며, 기지포와 안면 사이의 사취의 변화로 미루어 보면 퇴적물 양이 줄어들지 않은 듯하다.

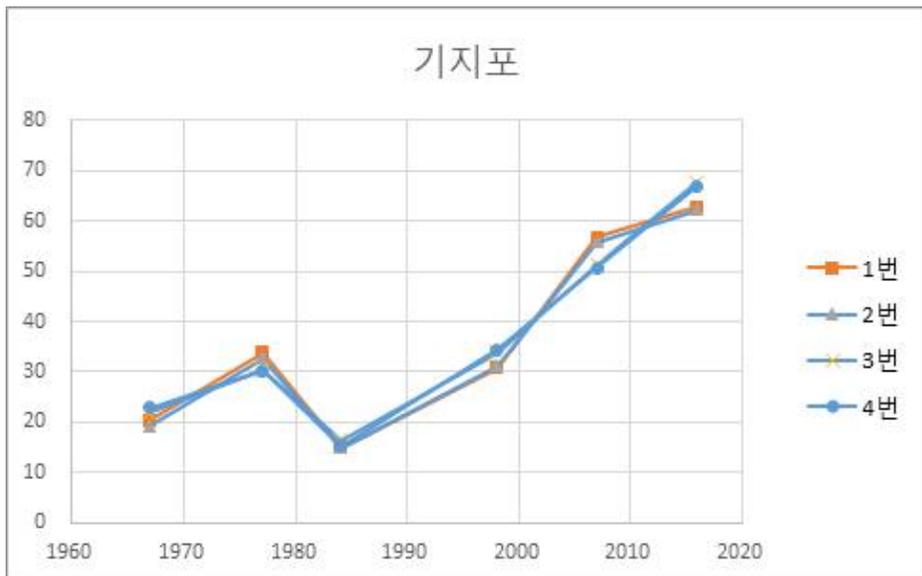


그림 4.17. 기지포 측선별 해변폭 변화

안면은 북쪽으로 기지포, 남쪽으로 두여 해빈과 연결되는데, 두여 해빈과의 뚜렷한 경계가 없다. 선형 경향성은 모든 측선에서 0.93m/yr 이상으로 결정계수도 비교적 높으며(그림 4.18), 북쪽으로 갈수록 측선의 변화가 강하게 나타난다. 1967~1977년 사이 사구 전면부에 초지가 형성되면서 해안선 전진과 일부 지역에서 블로아웃이 관찰되며, 1977~1984년에는 블로아웃이 전반적으로 발생하며, 나지가 대규모로 증가하였다. 1984~1998년엔 식재한 것으로 추정되는 목본류가 증가하였으며, 연구 기간 전반적으로 기존 사구 전면부에 초지가 형성되면서 해안선 자체가 전진하는 전진퇴적(progradation)이 발생하였다.



그림 4.18. 안면 측선별 해빈폭 변화

두여는 북쪽으로 안면으로 연결되며 남으로는 헤드랜드가 존재한다. 1~2번 측선의 경우 배후지가 사구이며, 3~4번 측선의 경우 일부 지역은 사구이나 대부분이 산지이다. 선형 경향성은 1~2번 측선에서 0.64m/yr 이상이며, 3,4번 측선에서 0에 가까운데, 1~2번 측선은 결정계수도 높으나, 3~4번 측선은 극히 낮다(그림 4.19). 1967~1977년 사이 사구 전면부에 초지가 형성되면서 해안선이 전진하였으며, 1977~1984년에는 나지가 증가하였다. 1984~1998년에는 목본류가 초지로 바뀌었으며, 1998~2006년에는 해안도로가 건설되고 목본류가 증가하였다. 최종적으로 2006~2016년에는 기존 사구 전면부에 초지가 형성되면서 해안선 자체가 전진하는 전진 퇴적이 발생하였는데, 상대적으로 3~4번 측선의 경우 크게 전진하지 않는 모습을 보인다. 현장 답사 결과 3~4번 측선 후미의 사구에서 비사의 흔적이 거의 관찰되지 않은 점을 고려하면, 해빈과의 상호작용이 크지 않은 듯 하다.

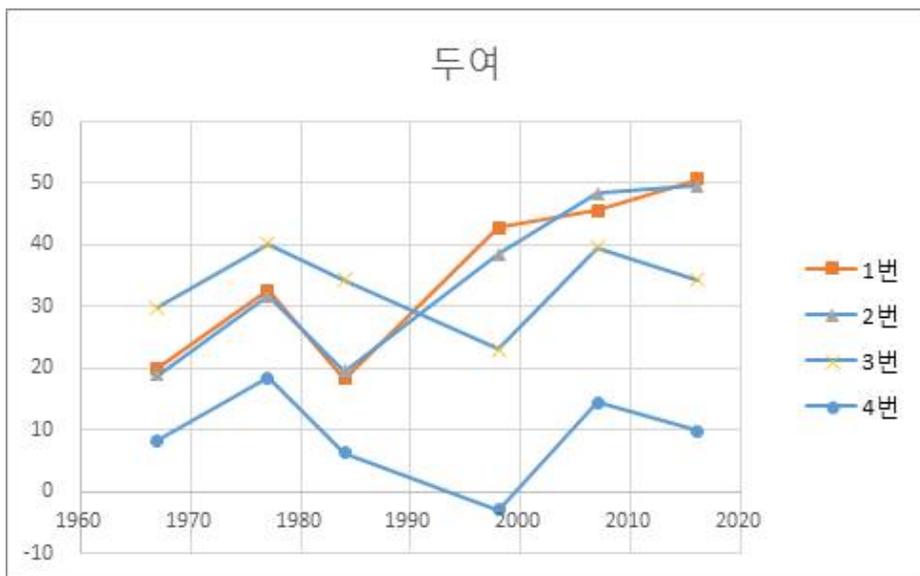


그림 4.19. 두여 측선별 해빈폭 변화

밭개는 헤드랜드 사이에 존재하는 포켓비치로 해안도로가 비교적 해안가에 가까이 있으며 사구의 폭이 넓지 않다. 1번 측선 뒤로 수로가 존재하며, 이 수로는 1번 측선 북측에서 바다로 유입된다. 선형 경향성은 1번 측선에서 0.37m/yr 로 나타나며, 다른 측선들은 뚜렷한 경향성을 보이지 않는다(그림 4.20). 1번 측선에서 해빈폭이 증가한 것은 제방의 영향으로, 1984년부터 제방이 설치되었다. 1984~1998년 사이 초본류가 감소하고 목본류가 증가 함과 동시에, 전반적으로 식생 면적 줄어들었으며, 1998~2006년에는 해안도로가 건설되었다.



그림 4.20. 밭개 측선별 해빈폭 변화

꽃지는 북쪽에 소규모 만을 건너 방포항과 연결되며, 남쪽은 헤드랜드가 존재한다. 전 해빈에 걸쳐 제방이 건설되어 있어, 유일하게 의미가 있는 부분은 1~2번 측선의 1967~1984년 사이로 볼 수 있다. 이 기간 동안 1~2번 측선의 배후 사구가 파괴되면서 지속적으로 침식이 발생하였다(그림 4.21).



그림 4.21. 꽃지 측선별 해빈폭 변화

장삼포는 비대칭적으로 그늘지역(shadow area)이 발달한 z-bay 형의 해빈으로, 북쪽에 위치한 헤드랜드가 바다 방향으로 길게 존재하여 그늘지역이 형성되어 있다. 선형 경향성은 침식과 퇴적이 교차하나 결정계수가 높지 않다(그림 4.22). 전반적으로 식생의 증가와 감소가 교차하며 나타나며, 2006-2016년 동안 제방이 건설되며 인공물이 증가하였다. 연구 기간 초창기에는 4번 측선의 변화량이 많았으나 시간이 가며 북쪽의 변화량이 높은 모습을 보였다.

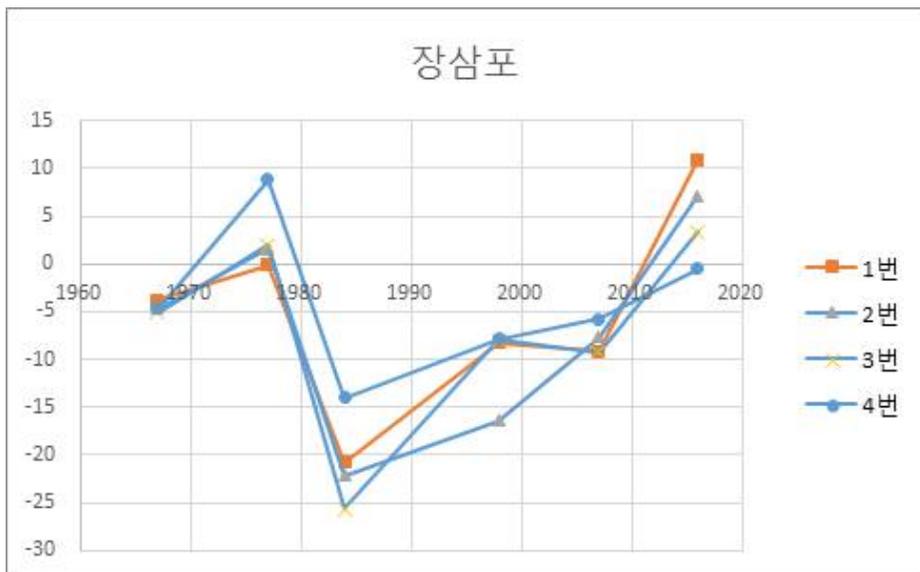


그림 4.22. 장삼포 측선별 해빈폭 변화

4.3. 영향 요인

4.3.1. 외력과 해빈 거동

해빈의 수십 년 거동에 대해 파랑과 바람과 같은 외력을 기반으로 해석하였다. 이 연구의 연구기간은 1967년부터 2016년에 이르는 기간이지만, 우리나라의 경우 가장 오래된 파랑 관측이 1990년대 후반부터 시작되어 연구기간과 맞지 않다. 따라서 이 연구는 파랑 자료를 활용한 시기간 비교를 제한적으로 실시하였다(표 4.5). 활용한 파랑 세기는 겨울철 유의파고로 우리나라 서해안의 경우 겨울철 북서계절풍이 강한 파랑조건을 형성하여 해빈을 침식시키고 있음을 다수의 연구들에서 언급하고 있음을 반영한 것이다(e.g. 김장수 등, 2011; 추용식 등, 1996). 먼저 1977~1984년과 1984~1998년간의 비교는 HYPA(Hybrid Parametrical wave model) 모델을 활용한 해양수산부의 장기 파랑 산출 결과를 활용하였다(해양수산부, 1997). 장기 파랑 산출 결과는 우리나라 주변을 격자로 구성하여 1979~1996년 동안의 파랑 통계를 제공하고 있다. 1998~2007년과 2007~2016년과의 비교는 기상청에서 측정하고 있는 가대암 등표 자료를⁵⁷⁾ 활용하였다. 가대암 등표는 2001년 12월 23일부터 관측이 시작되어, 해당 일자부터의 관측결과를 반영하였다. 장기 파랑 산출 결과와 파랑 측정간의 위치와 방식의 상이함으로 인해 상호간의 비교를 수행하지는 않았으며, 동일한 자료의 출처만을 상호비교 하였다. 장기 파랑 산출 자료와 가대암 등표 관측 결과를 비교하면 실측자료에서 유의파고가 더 낮음을 알 수 있다.

57) <https://data.kma.go.kr/data/sea/selectRhRltmList.do?pgmNo=53>

표 4.5. 시기별 겨울철 유의파고 및 해빈폭 변화량

출처	장기 파랑 산출 결과 ⁵⁸⁾		가대암 등표 ⁵⁹⁾	
	1977~1984년	1984~1998년	1998~2007년	2007~2016년
유의파고(m)	1.21	1.17	0.88	0.84
해빈폭변화량(m)	-138.75	44.37	55.81	88.47

장기 파랑 산출 자료를 통해 1977~1984년과 1984~1998년을 비교하면 전자의 시기동안 파랑세기가 더 강함을 알 수 있다. 해당 시기동안 전체 해빈폭 변화량을 살펴보면, 1977~1984년 동안에는 138.75m가 감소하였으며, 1984~1998년 동안에는 44.37m가 증가하였다. 겨울철 파랑 세기가 상대적으로 강한 시기에 침식이 발생하였으며, 상대적으로 약한 시기에 퇴적이 발생한 것이다. 전반적으로 해빈폭이 감소한 1977~1984년 동안 오차 범위 이상의 유의한 해빈 폭 증가는 연포, 몽산만 해당하며 두 경우 모두 인간의 영향이 강하게 나타나고 있다. 또한 연구 기간 내 지속적으로 오차 범위 밖의 꾸준한 증가 폭을 보이던 같음에서 오차 범위 내의 증가가 발생한 것은 파랑의 영향을 반영하는 결과로 볼 수 있다. 가대암 등표 자료를 통해 1998~2007년과 2007~2016년을 비교하면 전자의 시기동안 파랑세기가 더 강함을 알 수 있다. 해당 시기동안 전체 해빈폭 변화량을 살펴보면, 1998~2007년 동안에는 55.81m, 2007~2016년 동안에는 88.47m 증가하였다. 두 시기 모두 퇴적이 발생하였으며, 상대적으로 파랑이 약한 시기에 더 많은 해빈 폭의 증가가 발생하였다. 즉, 파랑의 세기와 해빈폭은 밀접한 관련성을 보이며 이것이 연구지역 전반에 큰 영향을 미쳤다.

파랑세기는 연구지역 전반에 걸쳐 영향을 미쳤으며, 보다 작은

58) 36° 42' N, 125° 48' E

59) 36° 46' N, 125° 58' E

공간 범위에서는 취송거리의 영향이 강하게 나타났다. 상대적 세기를 바탕으로 겨울철 풍속은 크게 세 종류로 구분 가능하며(그림 4.23), 해당 기간 동안 풍향은 큰 변화가 없는 것으로 확인된다. 구분되는 시기는 풍속이 강했던 1998~2007년, 보통의 풍속을 보인 1967~1977년과 2007~2016년, 풍속이 약한 1977~1984년과 1984~1998년 이다. 이 중 1977~1984년은 강한 파랑의 영향을 받고 있음을 앞서 서술하였으며, 2007~2016년은 개별 해빈폭 분석에서 확인한 것처럼 인간의 영향이 태안 지역 해빈 전반에 걸쳐 강하게 나타나고 있다. 1977~1984년 강한 파랑 조건을 보임에도 풍속이 약한 이유는, 해당 시기에 영향을 미친 파랑이 바람의 직접적인 영향권에서 벗어나 너울(swell)의 형태로 전달되었기 때문으로 추정된다. 만약 해당 시기 파랑 자료가 존재한다면 이를 다른 시기와의 비교를 통해 입증 할 수 있겠지만 자료가 부재하다는 한계가 있다. 이 두 시기를 제외하고, 풍속의 세기에 따른 해빈폭의 변화량을 바탕으로 해빈을 크게 두 유형으로 분류할 수 있다.⁶⁰⁾ 먼저 풍속이 비교적 강한 시기에⁶¹⁾ 해빈폭이 감소(태안반도, 상대적으로 북부)한 해빈으로, 꾸지, 학암북, 학암서, 의향이 포함된다. 반면, 풍속이 비교적 강한 시기에 해빈폭이 증가(안면도, 상대적으로 남부)한 해빈은 삼봉, 기지포, 안면, 두여, 밧개, 장삼포가 존재한다. 풍속이 강할수록 이러한 경향이 강하게 나타나며,⁶²⁾ 풍속이 약한 경우

60) 모든 해빈을 대상으로 분류하지 않아 일부 제외된 해빈이 존재한다. 또한 포함된 일부 해빈의 경우 특정 시기의 변화가 반대로 나타나는 경우가 있으나 이는 앞서 개별 해빈에서 서술하였던 것처럼 국지적 변화를 반영한 결과로 볼 수 있다.

61) 중간 이상의 풍속을 보이는 시기를 말한다.

62) 풍속이 강한 시기가 중간 정도의 풍속을 보이는 시기보다 태안반도와 안면도에서의 침/퇴적(해빈폭 증가/감소) 경향성이 강하게 나타난다.

경향성이 나타나지 않는다.

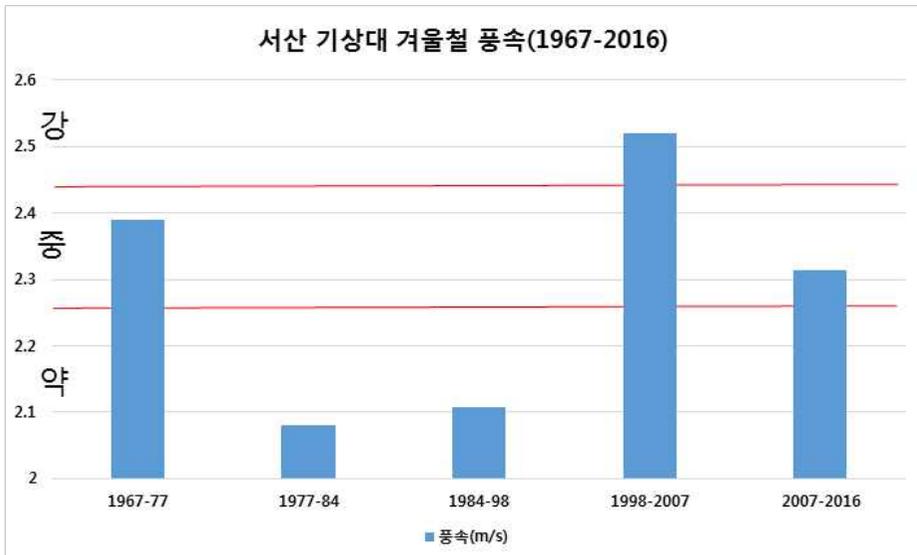


그림 4.23. 서산 기상대 겨울철 시기별 풍속(1967-2016)

이처럼 태안반도(북부)와 안면도(남부)에서 풍속에 대한 반응이 다르게 나타나는 것은, 파랑에너지의 세기 차이에서 비롯된 것으로 해빈의 지형·지질조건에서 기인한 것이다. 해빈의 지형조건은 해빈 전면부의 수심을 의미하며, 지질조건은 취송거리(fetch length)의 제약을 의미한다. 지형조건인 경우 앞서 2장의 SWAN모형 설명에서 살펴보았던 것처럼, 태안반도와 안면도의 수심은 상당한 차이를 보인다(그림 4.24). 상대적으로 태안반도의 경우 해빈 전면부의 수심이 깊지만, 안면도의 경우 얇다. 이러한 수심의 차이는 파랑의 전달방식에 영향을 미쳐, 안면도로 전달되는 파랑의 세기를 상대적으로 약하게 만든다.

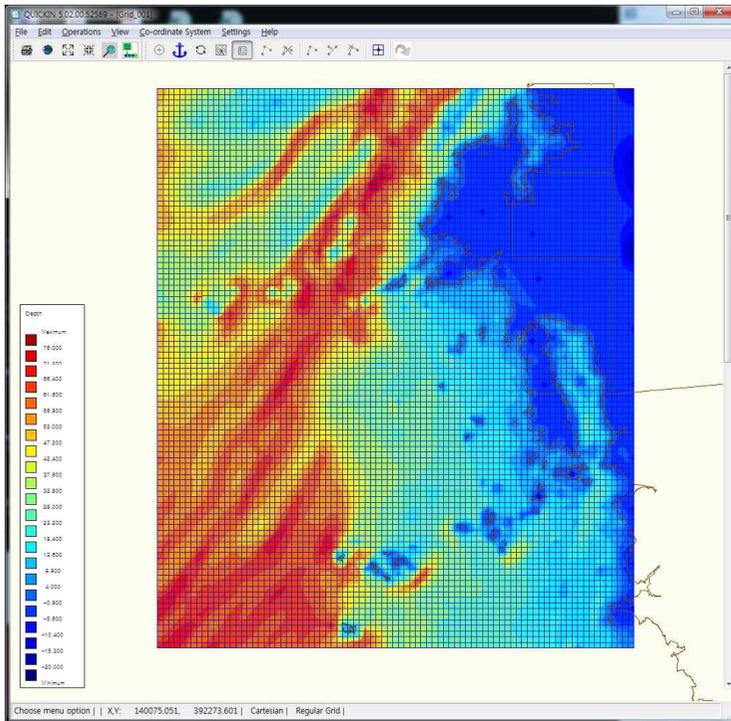


그림 4.24, SWAN 모형 평균해면수심도. 앞선 그림 2.10 재인용.

지질조건인 경우 태안반도와 안면도의 위치 차이에서 비롯되는 취송거리의 문제이다. 고희중 등(2005)은 기상 부이 자료를 활용하여 각 해역에서의 바람과 파랑의 관계를 분석하였다. 경기만 덕적도에서의 분석 결과 겨울철 파랑이 강하지 않았으며, 이는 북서방향의 막혀 있기 때문이라⁶³⁾ 해석하였다. 비록 경기만에 대한 연구 결과이지만, 같은 서해안에 위치하였기 때문에 태안반도와 안면도의 관계에서도 유사하게 적용될 수 있다고 판단한다. 지리적으로 안면도는 태안반도와 부속 도서들이 일종의 장애물 역할을 하지만, 태안반도는 북서계절풍에 직접적으로 노출되어 있어

63) 취송거리의 제한으로 인한 결과이다.

상대적으로 북서계절풍에 민감하게 반응하는 것이다. 즉, 지형·지질조건에 의해 제약을 받아 수심과 취송거리의 상이함으로 인해 파랑의 세기 차이가 나타나는 것이다.⁶⁴⁾

4.3.2. 퇴적물 역동성과 해빈 거동

전반적으로 파랑과 바람에 의해 해빈이 변화하였으나, 국지적으로는 해빈 배후지의 상황, 사구, 사취, 릿지&런넬 등과의 관계에 의해 해빈폭이 변화하는 모습도 다수 관찰되었다. 이러한 영향은 하나의 현상이 단순한 하나의 침/퇴적 프로세스로만 진행되지 않는 매우 복잡한 양상을 보인다.

해빈 배후지를 인간이 개발하는 경우 그 영향으로 해빈폭이 증가하기도 하며, 감소하기도 한다. 해빈폭이 증가한 경우는 꾸지나무(1984~1998년), 학암북(1984~1998년), 신두리(1998~2007년), 연포(1977~1984년), 달산(2007~2016년), 청포대(1967~1977년), 두여(1998~2007년), 밧개(1998~2007년), 장삼포(2007~2016년) 등이다. 해빈폭이 증가하는 경우는 배후지 개발 시 대량의 퇴적물이 바다로 유입될 때로, 개발을 위해 부지를 정리하며 해안선도 정비하는 경우가 많다. 한편으로 연포와 같이 송림 식재를 위해 해빈 자체에 인간이 영향을 가하는 경우도 존재한다. 반면, 해빈폭이 감소하는 경우는 학암서(1984~1987년), 의항(1967~1977년), 연포(1967~1977년), 청포대(1984~1987년) 등으로, 해빈폭이 감소하는 이유는 배후지에서 해빈으로 유입되어야 하는 모래 이동이 차단되었기 때문이다(e.g. Del Rio, 2013). 배후지 개발 이후 배후지에 모래가 지속적으로 유입되는 곳들이 존재하

64) 태안반도에서 침식된 퇴적물이 북서풍 혹은 북서방향의 파랑을 따라 안면도로 이동하여 퇴적되었을 가능성도 존재한다. 하지만 이 연구에서는 이를 실증하고 있지 않으며, 따라서 가능성으로만 남겨둔다.

며, 이렇게 이동된 모래들은 해변으로 다시 이동하지 못한다. 의항의 경우 육계사주의 배후지가 간척되고, 사주위에 도로가 건설되어 퇴적물 역동성이 감소하였으며, 연포의 경우 dry beach 뒤의 저지를 메우는 과정에서 해변의 모래를 활용한 것으로 판단된다. 이처럼 배후지 개발과 해변폭의 관계는 인간이 해안 프로세스에 깊이 관여하고 있음을 보여준다.

사구의 역동성도 해변폭에 큰 영향을 주었으며, 이는 주로 식생에서 기인한다. 해변폭이 증가하는 경우가 꾸지나무(2007~2016년), 몽산(1967~1977년), 달산(1967~1977년), 안면(1967~1977년), 두여(1967~1977년) 등에서 나타났다. 사구의 역동성이 감소하며 해변폭의 증가가 나타나는 것은 주로 기존 사구 전면부에 초지가 형성되면서 해안선 자체가 전진하는 전진퇴적에 의해서 발생하였다. 사구의 전진퇴적이 발생하면 해안선 또한 바다 방향으로 퇴적되어, 해변폭이 증가한다. 꾸지나무의 경우 해변과 사구사이에 목재로 된 제방이 건설되어, 사구에서 해변으로의 퇴적물 이동은 가능하나 역으로의 이동이 어려워짐에 따라 해변폭이 증가한 것으로 보인다. 해변폭이 감소한 경우는 학암북(전 기간), 학암서(전 기간), 백사장(1977~1984년), 삼봉(1977~1998년), 밧개(1977~1998년) 등에서 찾아볼 수 있으며, 주로 식생으로 인해 사구에서 해변으로 퇴적물 이동이 어려워짐에 따라 발생한다(Nordstrom, 2000). 이는 자연성이 높은 사구에서 사구 전면부에 사구식생이 성장하면서 해변폭이 증가하는 경우와 다르게, 특히 인공적으로 소나무를 식재하는 경우 퇴적물의 이동성에 급격한 제약이 발생하는 것에서 비롯된다. 인간이 사구에 설치한 물체의 영향 또한 상반되게 나타났다. 삼봉(1998-2007년)과 기지포(1998-2007년)의 경우 사구울타리 주변에 모래가 많아 퇴적되어 해변폭이 증가하였지만, 같은

(2007-2016년)의 경우 사구에 퇴적된 모래가 재동되는 것을 비사 방사체가 차단하고 있다.⁶⁵⁾ 설치된 물체의 위치에 따라 효과가 다르게 나타나는 것으로 삼봉, 기지포의 경우 해빈과 사구의 경계부에 설치되었으며, 갈음의 경우 사구에 설치한 것에서 차이가 비롯된 것으로 판단된다. 배후 사구 역동성의 중요성은 두여 해빈에서 측선간 비교를 통해서도 유추 가능하다. 두여 해빈의 경우 1~2번의 배후지는 사구이며, 3~4번의 배후지는 일부 사구를 제외하면 산지이다. 2017년 현장답사에 의하면 1~2번의 경우 사구와 해빈의 상호작용이 활발하나, 3~4번의 경우 사구의 역동성이 없어 해빈과의 상호작용이 거의 존재하지 않았다. NSM을 보면 1~2번의 평균은 30.66m 이나, 3~4번의 평균은 2.94m로 상호작용이 활발한 곳에서 많은 변화가 발생하였음을 알 수 있다.

사취가 존재하는 경우 사취가 해빈쪽 자체에 큰 영향을 주었으며, 이는 릿지&런넬이 발견되는 해빈에서도 동일하게 나타났다. 신두리, 백사장의 경우 각각 남쪽과 북쪽에 사취가 존재하는데, 신두리의 경우 북쪽을 차단하기 전 전체 해빈에 걸쳐 사취와 릿지&런넬이 강하게 나타났으며, 북측이 차단된 현재 릿지&런넬의 역동성이 줄어들고 사취는 남쪽에서만 나타나고 있다. 백사장의 경우 전반적으로 해빈에 침식이 발생하여 침식된 모래들이 사취로 이동한 것으로 판단되며, 또한 1번 측선의 경우 최근 넓은 해빈쪽을 보이는 이유가 사취와 해빈의 연결이 이루어지는 지점이기 때문이다. 두 해빈 모두 연구 기간 동안 릿지&런넬의 역동성이 감소하였다는 특성이 있으며, 이는 사취의 발달로 이어져 해빈-사취-릿지&런넬을 연결하는 관계가 매우 중요하게 작용하고 있음을 확인할 수 있다.

65) 비사를 퇴적시키려는 사구 울타리의 목적과 배후지로의 비사 이동을 방지하려는 비사 방사체의 목적에 부합되는 결과이다.

한편으로, 사취가 퇴적물 수지의 하나의 지시자 역할을 하기도 한다(e.g. Castelle et al., 2018). 몽산포와 달산포 사이에 존재하던 사취는 1967년에는 뚜렷하게 관찰되나 현재는 미약하게 관찰되는데, 이는 이동성을 갖던 모래가 사구 전면부에 퇴적되어 시스템 내에서 교환되던 모래의 양이 감소한 것에서 기인한다. 반면, 기지포와 안면 사이에 존재하는 사취는 현재에도 과거처럼 뚜렷하게 관찰된다. 기지포와 안면에서 전반적인 전진퇴적이 발생하였으며 과거보다 사구의 역동성이 다소 줄어들었으나 사취가 역동적으로 유지되고 있는 것은, 외부로부터 지속적으로 퇴적물이 유입되고 있음을 의미한다.

4.3.3. 잠재적 오차

이 연구에서는 2차 오차 보정시 고조선 에러, 계절 에러를 보정하기 위해 조위 보정 방법을 활용하였다. 이 방법은 일반적으로 평균 고조에서 활용하는 방법이나, 이 연구에서는 고조선에 활용하였다는 특징이 있다. 평균고조에서 조위 보정시 해빈 단면 자체를 활용하나, 여기서는 판독 대상이 다르기에 2017년 매 측량 시기마다 측량한 고조선의 자료에서 고도와 해빈폭의 관계를 활용하였다. 그러나 이 방법은 해빈 최상부의 기복과 기상상황에서 발생할 수 있는 오차를 현장 자료를 이용하여 보정하였기 때문에, 과연 2017년 측량한 해빈폭과 고도의 관계가 과거에도 그러했을 것이냐에 대한 의문이 들 수 있게 한다. 물론 이와 같은 의문은 평균고조에서 해빈 단면을 활용할 때에도 동일하게 발생하는 것으로, 다양한 선행연구들에서 제시하는 것처럼 위와 같은 부분을 ‘그림직한’ 가정으로 받아들일 수 있으나(e.g. Chen and Chang, 2009), 여전히 방법의 한계에서 오는 과소추정의 가능성이 존재한다.

이는 현장 측량 시기의 문제로, 측량이 이루어진 시기가 대조시기라는 것에서 기인한다. 이 연구에서 적용한 고조선은 평균 고조위로(표고 기준 2.1m, LDL 기준 561cm), 대조시기의 조위 보다 낮은 값을 지닌다. 실제 현장 측량시 561cm보다 낮은 조위 때 실측한 경우가 총 95개중 26번에 불과한데(27%), 이러한 경우 고도가 높아지면서 해빈의 기울기가 급격하게 상승하는 것으로 미루어 보아 적절한 기울기가 반영되지 않았을 수도 있다. 이 경우 해빈폭이 과소 추정될 것이며, 해빈폭의 편차가 증가하여 오차 범위를 상회하는 시기도 증가할 것으로 예측된다.

4.4. 중규모 해빈 분류

4.4.1. 공간적 경향성

DSAS에서 도출된 LRR의 침/퇴 경향성을 살펴보면 신진도를 기준으로 북부에 위치한 해빈은 침식되고, 남부에 위치한 해빈은 퇴적되는 경향이 나타난다(그림 4.25).⁶⁶⁾ 이러한 구분은 풍속의 세기와 해빈폭의 변화량에서 살펴본 것과 유사하기에, 이를 반영하는 것으로 해석 할 수도 있다.

하지만 이는 퇴적물에서 비롯된 경향일 수도 있다. 미국, 영국 등에서는 퇴적물의 순환과 관련하여 퇴적물 순환체계(Littoral cell)라는 개념을 활용하고 있다. 퇴적물 순환체계란 일정한 구획으로, 퇴적물의 이동/순환이 내부의 구획 안에서 발생한다는 의미이다. 1960년 Inman and Chamberlin에 의해 미국 동부 캘리포니아 해안을 대상으로 구획 설정이 시작되었으며(그림 4.26), 영국의 경우 2010년부터 Shoreline Management Plan의

66) 예를 들면 북으로 가면서 경향성이 강해지는 등의 해빈 내에서의 경향성도 존재하는 듯한데, 이 연구에서 구체적으로 해석하기에는 무리가 있다.

일환으로 시행되고 있다. 퇴적물 순환체계는 가장 상위의 개념인 주 순환체계(main cell)와 더 이상 나눌 수 없는 최소 단위인 단위 순환체계(unit-cell)로 나뉜다. 일반적으로 미국의 주 순환체계는 해저협곡 등이 퇴적물 수용처(sink)의 역할을 수행하는 것으로 알려져 있으나, 우리나라 서해안에서는 아직 명확하게 밝혀져 있지 않다. 만약, 신진도를 기준으로 북부에 위치한 해빈은 침식되고, 남부에 위치한 해빈은 퇴적되는 경향이 퇴적물 유입과 순환의 차이에서 비롯된 것이라면, 퇴적물 순환체계를 간접적으로 확인할 수 있는 결과이나 보다 심도 깊은 연구가 필요하다.

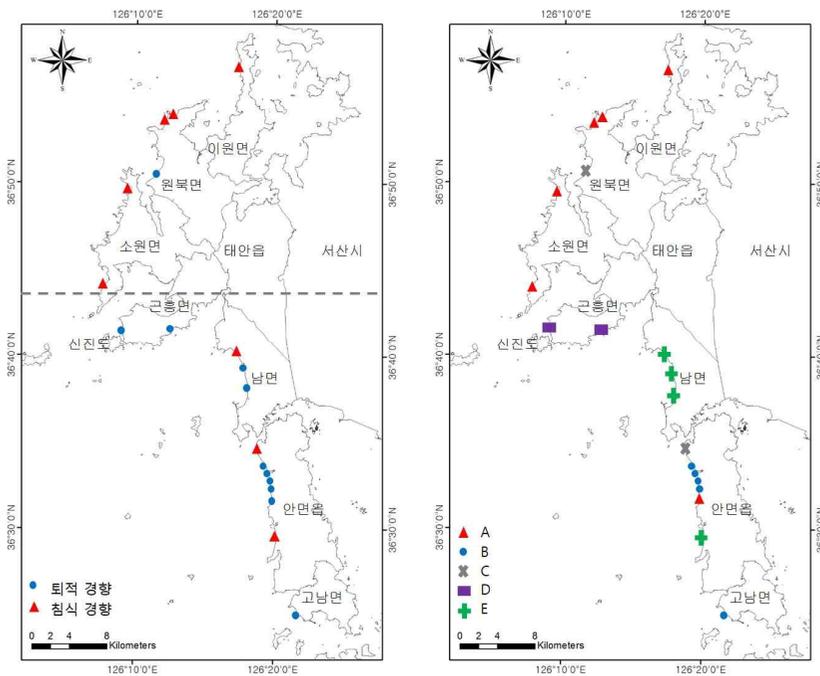


그림 4.25. 선형경향성의 공간적 패턴(좌), 중규모 해빈 분류(우)

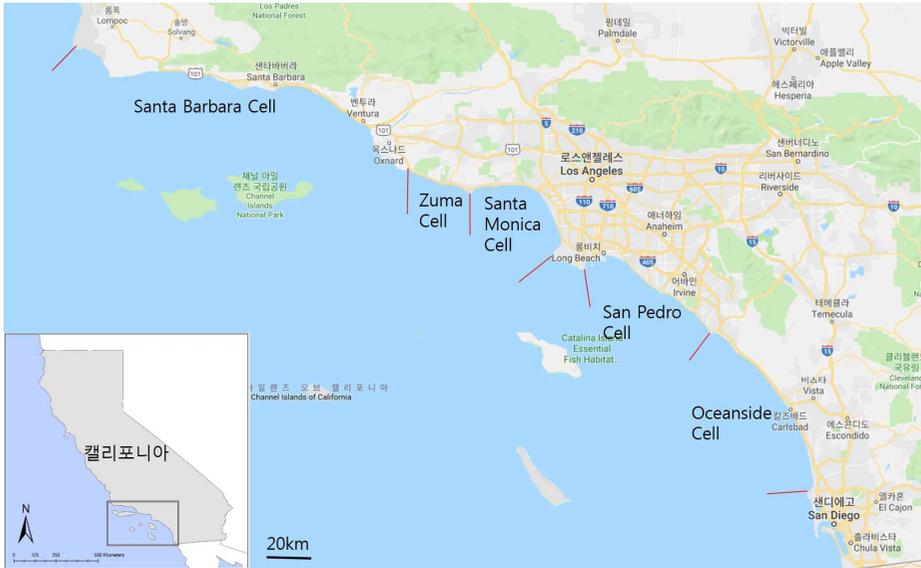


그림 4.26. 남부 캘리포니아 퇴적물 순환체계, Griggs & Patsch(2018)의 그림 1을 수정, 구글 맵을 활용함

4.4.2. 해빈 분류

현재까지의 해석을 바탕으로 공간적 상황을 고려하여 해빈을 다음과 같이 분류하였다(그림 4.25).

1) 태안북부형(A) : 겨울철 파랑 세기가 중요한 해빈으로, 지속적인 침식이 발생하고 있다. 꾸지, 학암북, 학암서, 의향, 파도가 포함되며 주로 태안반도 북부에 해당한다.

2) 안면도형(B) : 겨울철 파랑 세기가 제한적인 해빈으로, 지속적인 퇴적이 발생하고 있다. 삼봉, 기지포, 안면, 두여, 밧개, 장삼포가 포함되며, 주로 안면도에 위치한다.

3) 사취형(C) : 해안 지형 내에서의 모래 순환이 주요하게 작용하는 해빈으로, 신두리, 백사장이 포함된다. 두 해빈 모두 반 폐쇄형으로 사취가 나타나고 있으며, 주변에 일종의 조수통로가 있는 것이 특징이다.

4) 근흥형(D) : 일종의 sink로, 지속적인 퇴적이 발생하고 있으며, 갈음이, 연포가 포함된다. 두 해변 모두 근흥면에 위치한 것이 특징이다. 근흥형은 태안북부형과 안면도형이 결합된 유형이다. 태안북부형의 물리적 특징, 지질 조건을 보유하고 있지만, 겨울철 파랑에너지와 퇴적물 상황이 안면도형에 가까운 점이적 성격을 보인다. 이는 근흥면을 기준으로 북부와 남부의 상황이 상이함을 보여주며, 두 유형의 복합적인 성격을 띠었다고 볼 수 있다.

5) 인공형(E) : 인간의 영향이 강하게 나타나는 해변으로, 몽산, 달산, 청포대, 꽃지가 해당한다. 주로 많은 사람들이 방문하는 해수욕장으로 활용되고 있다. 원래는 다른 유형에 포함될 수 있었겠지만, 인간의 영향을 극도로 받아 본래의 성질을 잃어버린 것으로 판단된다.

해빈의 수십년 거동에 대해 일종의 ‘시간적 주기성’을 강조하는 연구가 존재한다. Zoulas and Orme(2007)의 Zuma littoral cell에서의 연구는, PDO(Pacific Decadal Oscillation)의 영향을 받아 해빈의 변화가 주기성을 갖으며, 시간 주기는 최소 20년에서 최대 70년까지 나타남을 제시하였다. Short 등(2004) 호주 Narrabeen 해변에서, 수십년간에 걸친 자료에 대해 주성분분석과 웨이블릿 분석(wavelet analysis)을 실시하였다. 연구 결과 SOI(Southern Oscillation Index)의 영향을 받아 해변폭은 1~5년의 변화 주기를, 해변 순환 지수(beach rotation index) 5~10년의 변화 주기를 보임을 제시하였다. 하지만 이 연구에서는 시간적 주기성을 발견하지는 못하였는데 이는 근본적으로 연구가 10년 단위로 진행되었기 때문으로, 시간적 해상도를 높이며 시간적 스케일을 보다 장기간으로 가져간다면 중규모 시간 규모에서의 이해를 더욱 증진시킬수 있을 것이다.

4.4.3. 계절적 단면변화와 중규모 거동의 연계

3장과 4장을 연계하면, 즉 계절적 단면 변화와 중규모 거동을 연계하면 스케일 연구 차원에서 함의를 얻을 수 있다(그림 4.27). 두 스케일에서의 연구 모두 파랑 세기가 가장 중요한 영향 요인이며, 파랑 세기는 해빈의 지질 조건에 의해 공간적으로 다양한 분포를 갖는다. 보다 직접적인 변수는 파랑이며, 이를 영향을 미치며 간접적으로 파악할 수 있게 하는 것이 지질 조건인 것이다.

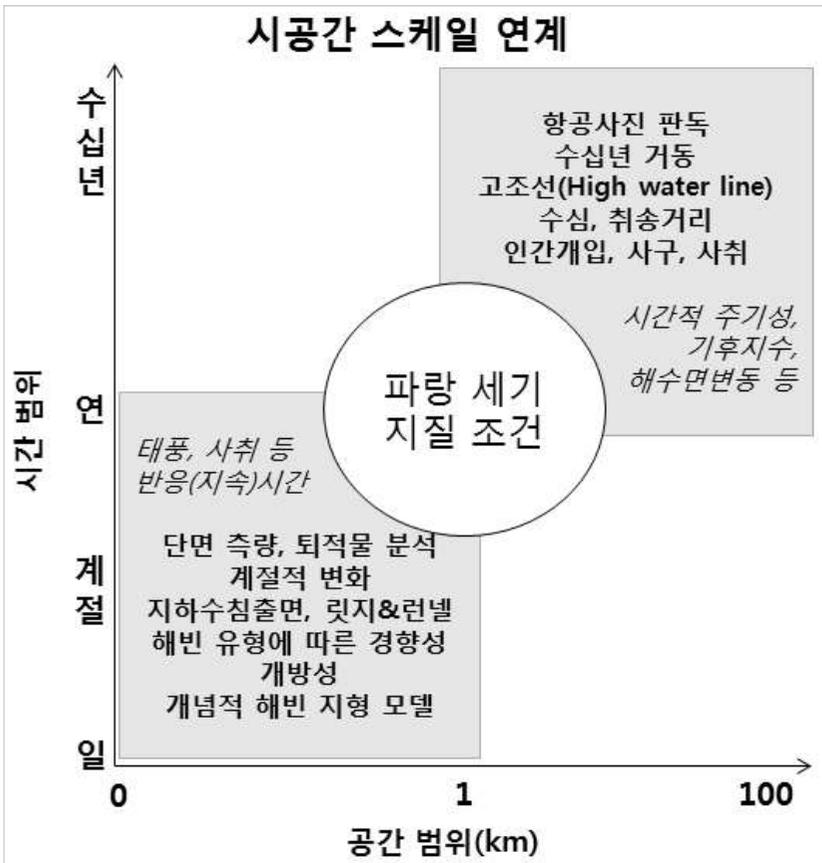


그림 4.27. 시공간 스케일 연계. 이탤릭체는 이 연구에서 밝히지 못하였지만 중요하다고 판단되는 변수를 의미한다.

3장에서는 측량을 통해 확보된 해빈 단면과 단면의 변화양상을 토대로 해빈을 분류하였으며, 영향 요인을 탐구 하였다. 계절적 변화는 단면 측량과 퇴적물 분석을 통해 관찰 가능하며, 지하수침출면과 릿지&런넬을 지표로 해빈을 분류하였다. 분류결과 해빈 유형에 따른 경향성이 바다로의 개방을 기준으로 나타났다. 다양한 지질 조건은 파랑 에너지의 공간적 이질성에 영향을 미치며, 이것이 입도와 릿지&런넬에 영향을 미쳤다. 이를 토대로 입도와 유의파고만을 가지고도 태안 지역에서 나타나는 해빈 유형을 설명할 수 있었다.

4장에서는 해빈폭을 지시자로 활용하여 항공사진을 통해 수십년 해빈 거동을 확인하였다. 파랑 에너지와 풍속을 활용해 해빈 거동을 해석하였으며, 해빈 지형(수심)·지질조건(취송거리)의 중요성을 살펴보았다. 연구 결과 가장 큰 공간적 범위와 영향력을 갖는 것은 파랑 조건으로, 사취형(C형)에서 큰 영향을 미쳤다고 보기는 힘들지만 전반적으로 강한 영향력을 보였다(그림 4.27). 중간 규모의 공간적 범위와 영향을 갖는 것은 지형(수심)·지질조건(취송거리)으로, 특히 근흥형(D형)의 경우 지질조건의 영향이 매우 강하게 나타났다. 태안북부형(A형)과 안면도형(B형)은 지질조건의 영향으로 상반되는 침/퇴적 거동을 보였다. 인간의 개입, 사구의 역동성, 사취의 영향 등 가장 작은 공간적 범위와 영향력을 보였다. 그러나 사취형(C형)과 인공형(E형)의 경우 사취와 인간의 영향이 매우 강하게 나타났다.

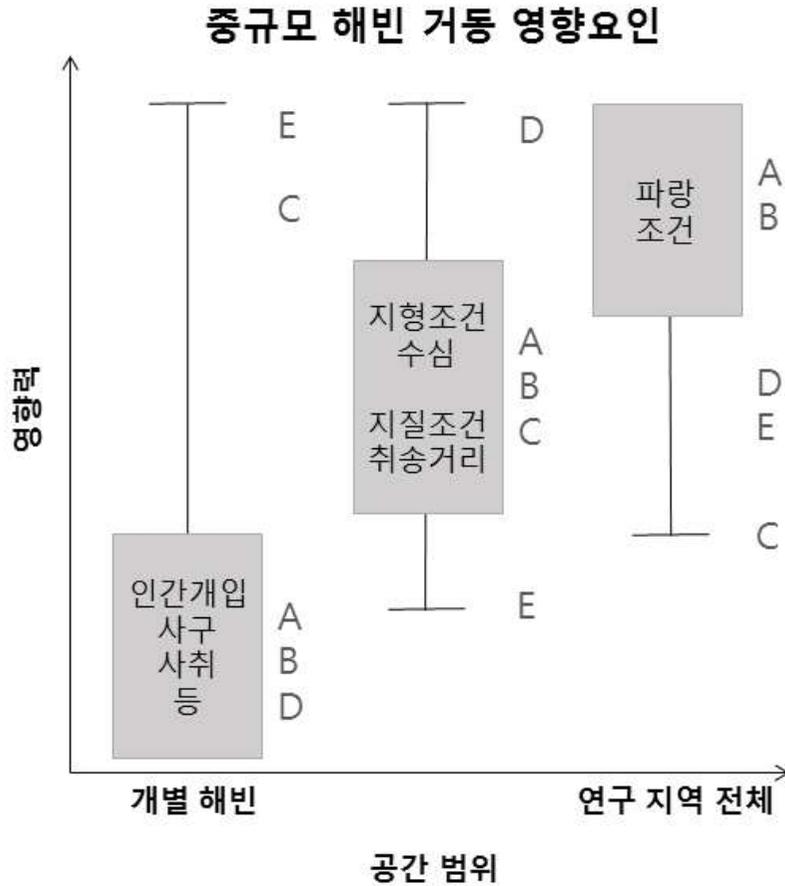


그림 4.28. 해빈의 중규모 거동에 영향을 미친 요인. A-E는 앞서 분류한 해빈 유형을 의미한다.

3장에서 활용한 단면 측량과 퇴적물 분석은 수십년 규모의 해빈 거동 연구에 적극적으로 활용되기 힘들다. 수십년 동안 동일한 기준을 가지고 방대한 영역에 걸쳐 측량이 지속되는 것은 현실적 제약이 많다. 일부 선진국의 경우 측량 기술의 발달과 더불어 1980년대 전후로 해빈을 지속적으로 측정해온 자료가 일부 존재하지만, 극히 일부 지역에서 제한된 해빈만을 대상으로 진행되고 있는 한계점이 존

재한다. 따라서 수십년 해빈 거동연구에서 항공사진을 비롯한 영상 자료를 활용하는 것이 현재로서 유일한 방법이다. 해빈의 측정이 어떠한 방법으로 진행하느냐에 따라 연구 방법 또한 다르게 적용되며, 활용되는 변수도 다르게 선택된다. 활용되는 방법의 차이로 인해 수십년 규모의 해빈 거동에서 해빈 단면을 활용한 연구는 존재하지 않는다. 예를 들어 3장 계절적 해빈 변화에서 활용되었던 해빈 단면 변화를 바탕으로 한 연구는 적용될 수 없다. 반면, 4장 수십년 해빈 거동에서 판독한 지시자인 해빈폭의 경우 3장에서 실제 측량을 통해 확보 가능하다. 과거 자료에서 판독 할 수 있는 지형을 실제로 측량하여 활용할 수 있는 것이다. 그러나 스케일 의존성(scale dependency, scale disjunction)과 스케일 프리(scale free)등과 관련된 스케일 문제(scale problems)를 구체적으로 다루기에는 한계가 있다. 이는 3장에서 다룬 내용이 해빈의 변화가 아닌 해빈의 분류에 치중해 있기 때문으로, 후속연구를 통해 다룰 예정이다.

한편으로, 3장에서 고려하지 않았지만 태풍은 계절적 변화에 영향을 미치는 요인이다. 우리나라는 여름-가을철 태풍이 내습하며, 이때 강한 바람을 동반하고 수위를 상승시켜 해빈을 강하게 침식할 수 있다(이연규 등, 2005). 사취도 해빈의 변화에 큰 영향을 미치는데, 김찬웅 등(2015)은 안면도 백사장 해빈을 ‘사취형 해빈’이라 지칭하고, 서해안에 존재하는 여타 유형의 해빈과는 다른 거동을 보임을 지적하였다. 한편으로, 특정 계절의⁶⁷⁾ 지속시간과 해당 외력 조건에 따라 지형이 충분히 변화하는데 걸리는 반응시간의 조합으로 지형의 완전한 소멸(릿지&런벨의 소멸)과 기복 감소가 결정된다. 따라서 기후가 변화한다면 반응시간과 지속시간의 변화가 발생할 것이며, 이것이 계절적 지형변화에 충분히 영향을 줄 수 있다.

67) 혹은 특정 환경 조건의 지속 시간

또한 4장에서는 밝히지 못하였지만 해빈의 수십년 거동에는 일종의 ‘시간적 주기성’이 나타난다. 기후지수(Climatic Indices)는 개별 지수마다 상이한 시간적 주기를 갖는데, 이것이 파랑에 영향을 미쳐 해빈 거동이 시간적 주기를 보인다(e.g. Short et al., 2014; Zoulas and Orme, 2007). 또한 해빈의 수십년 연구에 있어서 해수면의 변동은 상당히 중요한 의미를 갖는데, 이 연구에서는 실측 조위값을 반영하여 해수면 변동을 적용하였다.

4.5. 소결

4장에서는 항공사진을 활용하여 총 19개의 해빈을 대상으로 1967~2016년까지의 해빈의 중규모 거동을 확인하였다. 해안선 판독에는 고조선을 활용하였는데, 기존의 방식대로 오차를 분석할 경우 오차가 크게 나타나, 평균고조에서 활용하는 조위 보정을 2017년 현장자료를 바탕으로 실시하였다. 일부 부족한 조위 자료는 인천 조위 관측소의 자료로 추정하여 활용하였다. 이 때 계절에 맞는 실측값을 반영하여 조위와 계절에러를 동시에 반영하였다. 최종적으로 총 오차는 0.62~2.29m로, 원활한 해석이 가능한 수준으로 감소하였다. 해석은 해빈폭, 해빈폭 변화량, DSAS분석을 기반으로 진행되었다.

해빈의 평균 폭은 2016년이 가장 컸으며, 1984년이 가장 작았다. 1967~1977년에 이르는 시기에 가장 많은 양의 변화가 발생하였으며, 1977~1984년에 이르는 시기에 가장 큰 음의 변화가 발생하였다. DSAS결과 연구 해빈은 연구 기간 동안 해안선이 평균 7.50m 전진하였으며, 이는 연간 0.15yr/m수준으로 나타났다.

이 연구에서는 수십 년 지형 변화에 대해, 외력에 지형이 반응하는 지형동역학적 관점을 바탕으로, 공간적 스케일에 따라 해빈에 영

향을 주는 요인을 차례로 살펴보았다. 먼저 큰 공간 스케일에서, 파랑 자료를 활용하였는데 파랑의 세기와 해빈폭은 음의 관계를 보였다. 중간 스케일에서는 태안반도와 안면도에서 발생하는 풍속에 대한 반응차이를 지형(수심)·지질조건(취송거리)을 활용하여 살펴보았다. 가장 작은 스케일에서는 해빈 배후지 개발, 사구의 역동성, 사취와 같은 해안 지형이 해빈 거동에 상반되는 영향을 미침을 알 수 있었다.

LRR의 결과는 신진도를 중심으로 북으로는 침식이 남으로는 퇴적의 경향이 있음을 보여주는데, 이것이 퇴적물 순환체계의 영향일 수도 있으나 세심한 연구가 필요하다. 중규모 해빈 변화와 내부에서 작용한 프로세스를 바탕으로 해빈을 총 5종류로 구분하였다. 3장과 4장의 결과를 연계한 결과, 두 시간 스케일에서 공통적으로 가장 중요한 요소는 파랑세기와 지질 조건으로 나타났다.

현재 다목적의 해안 보호를 위해 다양한 기술적인 접근이 진행되고 있는데, 특히 공학적 관점에서 해빈을 단절된 상태로, 한정된 시간 규모에서 접근하는 방법이 주로 행해지고 있다. 하지만 현재까지 살펴본 것처럼, 해빈 변화는 공간적으로 단일한 현상이라 볼 수 없다. 따라서 이를 극복하는 이론적 기초로서 이 연구가 큰 의의를 갖는다고 볼 수 있다.

5. 해빈 유형 분류

이 장에서는 총 20개 해빈을 통계 분류해보고자 한다.⁶⁸⁾ 전통적으로 자주 언급되는 해안 분류는 지질적, 구조적 분류 등이 존재한다.⁶⁹⁾ 지질적 분류는 태평양형, 대서양형으로 분류하였으며, 구조적 분류는 지판 전면 가장자리의 해안, 지판 후면 가장자리의 해안, 주변해안으로 분류하였다(하슬렛, 2010). Shepard는 육지와 해양 프로세스에 따라 분류하였으며, Valentin은 해안선의 전진과 후퇴에 기반하여 분류하였다(Slaymaker et al., 2009). 가장 최근 해안 분류를 집대성한 사람은 Finkl(2004)로, 암석, 기후, 기복, 지형을 기반으로 rock type, rock age, 침식/퇴적량 등 다양한 요인을 고려한 분류를 제시하였으나, 실제로 적용하기 모호하다는 단점이 있다(Slaymaker et al., 2009). 보다 큰 문제점은 이러한 분류들에서 실제 지형 분류를 수동으로 진행하여 주관성이 반영된다는 점으로, 이를 극복하고자 객관성을 확보하기 위해 통계 기법에 기반한 해안 분류가 실시되고 있다(Scott et al., 2011). 주로 활용되는 통계 기법은 군집분석, 다차원 척도 분석, 주성분 분석, 유사성 분석 등으로, 이 연구에서는 그 중에서도 군집분석과 다차원 척도 분석을 활용하여 태안 지역 해안 분류를 실시하였다. 지오메트리, 구성 물질, 외력에 기반하여 통계분류를 실시하였으며, 이를 여타 분류와 비교하고 정책적 활용 방법을 모색하였다.

5.1. 통계 분석에 기반한 해안 분류

5.1.1. 변수

68) 파도리의 경우 입도 자료가 존재하지 않아 분석에서 제외되었다.

69) 서론에서 언급한 것처럼 해빈 분류 시 고려되는 분류 기준은 총 5가지로, 프로세스, 구성 물질, 지형 형태, 해빈의 상태, 환경이다. 지질적, 구조적 분류는 모두 프로세스를 기반으로 한 분류에 속한다.

20개 해변에 총 13개의 변수를 활용하여 군집분석과 다차원 척도 분석을 적용하였다. 활용한 변수는 현장 답사, 모델링, 항공사진, 해변 분류 파라미터를 기반으로 획득하였으며, 선행연구를(Scott et al., 2011; de Souza Pereira et al., 2010; Pian et al., 2014) 기반으로 변수를 총 13개 선정하였다(표 5.1). 현장 답사를 통해 해변폭, 단면적, 경사각, 평균입도, 배후지 활동성을 확인하였다. 배후지 활동성은 명목척도로 0은 활동성이 없으며, 1은 활동성이 있음을 의미한다. SWAN 모형을 통해 도출된 유의파고가 변수로 활용되었으며, 다른 산출값들도 다양한 파라미터를 계산하는데 활용되었다. 항공사진을 통해 해변 길이와 chord length(헤드랜드와 헤드랜드 사이의 거리)의 길이를 구하였다. 선행연구에서 제시한 파라미터로 해변 분류 모델(beach classification model)이 제시한 Ω (dimensionless fall velocity, 퇴적물 무차원 침강 속도)과 RTR(relative tidal range, 상대 조차)이 활용하였으며(Masselink and Short, 1993) surf similarity⁷⁰⁾(Battjes, 1975), surf scaling⁷¹⁾(Guza and Inman, 1975)과 같은 파랑에 관련된 지수도 적용하였다. 각종 파라미터를 구하는 방법은 다음과 같다.

$$\Omega = H_b / w_s T_p \dots\dots\dots(4)$$

$$w_s = \frac{1}{18} \times \frac{\rho_p - \rho_{sw}}{\mu} \times g d^2 \dots\dots\dots(5)$$

H_b = 쇄파고, w_s 퇴적물 침강 속도, T_p = 심해 최대 파주기, ρ_p = 모래 밀도, ρ_{sw} = 해수 밀도, μ = 동점성 계수, g = 중력

70) ξ

71) ε

가속도, $d =$ 입경 (m)

$$RTR = TR / H_b \dots\dots\dots(6)$$

$T_R =$ 대조승(mean spring tidal range), $H_b =$ 쇄파고

$$\xi = \frac{\tan \theta}{\sqrt{(H_b/L_o)}} \dots\dots\dots(7)$$

$\tan \theta =$ 해변 경사각, $H_b =$ 쇄파고, $L_o =$ 심해파장

$$\epsilon = \frac{0.5 \times H_b \times (2 \times \pi \times T_m)^2}{g \times \tan^2 \theta} \dots\dots\dots(8)$$

$H_b =$ 쇄파고, $T_m =$ 평균 파주기, $g =$ 중력 가속도, $\tan \theta =$ 해변 경사각

표 5.1. 통계 분석에 활용한 변수

구분	내용
해빈폭 (m)	- beach width :사구 말단부 혹은 제방 끝부분부터(기준점) wet/dry line 까지의 거리, 조위 보정 실시
단면적 (m ²)	- 단면그래프를 적분한 값으로 표고 기준, 원활한 해석을 위해 3m씩 더함
경사각 (°)	- 첫 측량시기 기준 고도 -1.26m에 상응하는 거리부터 거리 0m까지의 경사각
입도(mm)	- 고조선에서 채취한 퇴적물, 건식체질 실시 ⁷²⁾
배후지 활동성	- 명목 척도로 1은 활동성이 있음을 의미함
유의파고(m)	- SWAN 모형을 통해 산출
해빈 길이(m)	- 해안선을 따르는 방향의 해빈 길이
chord length(m)	- 헤드랜드와 헤드랜드 사이의 거리
Ω (퇴적물 무차원 침강속도)	- 높을수록 파고가 높고, 입경이 작고, 침식을 의미
RTR(상대적 조석 범위)	- 대조승/쇄파고, 조석의 상대적 크기에 의해 결정, 높을수록 조석우세, 낮을수록 파랑우세
surf similarity (ξ)	- $\xi > 1$ 쇄기파, $1 > \xi > 0.23$ 권파, $0.23 > \xi$ 붕괴파
surf scaling (ϵ)	- $\epsilon > 20$ 붕괴파, $20 > \epsilon > 2.5$ 권파, $2.5 > \epsilon$ 쇄기파

72) 파도의 경우 퇴적물 채취를 실시하지 않았다.

5.1.2. 자료 요약

해빈폭은 인간이 개입한 것으로 추정되는 천리와 연포의 높은 수치에서부터(57.67m, 43.71m), 제방이 형성되어 있어 해빈폭이 존재하지 않은 곳(만리, 꽃지, 몽산), 음의 수치를 보이는 곳(신두리, -1.35m)까지⁷³⁾ 다양하게 나타났다. 면적은 254.61m²-1469.62m², 경사각은 0.62° -6.10° 의 범위를 보였는데, 일반적으로 경사각이 높을수록 낮은 면적을 보유하였다. 입도는 0.17mm-0.48mm로 나타났으며, 여름철 평균 고조선에서 채취하였기 때문에 해빈 평균 입도보다 큰 것으로 판단된다. 입도가 반영되어 있는 Ω 의 경우 0.14-5.79의 범위를 보였으며, RTR은 12.61-25.98로 나타났다. Surf similarity와 surf scaling은 연구 지역이 태안으로 한정되어 있어 기술적인 해석을 적용하면 동일하게 소산형으로 구분되어 수치를 대입하였다. 해빈 길이는 200m-3600m의 범위를 보였으며, chord length는 326m-3220m으로 나타났다(표 5.2).

표 5.2. 통계 분석에 활용된 해빈별 속성

명칭	해빈폭(m)	면적(m ²)	경사각(°)	입도(mm)	배후지 활동성	유의과고(m)
꾸지	8.67	416.35	3.60	0.34	0	0.11
학암 북	3.19	463.22	2.19	0.56	1	0.11
학암 서	3.07	832.45	2.03	0.22	1	0.05
신두	-1.35	1073.75	1.06	0.21	1	0.17
의향	7.32	559.49	2.51	0.41	0	0.29
천리	57.67	641.58	1.66	0.48	1	0.14
만리	0.00	693.34	1.75	0.42	0	0.20
갈읍	15.04	766.25	2.22	0.35	1	0.24
연포	43.71	254.61	3.38	0.24	1	0.35
몽산	0.00	1469.62	0.62	0.33	0	0.44
달산	-0.12	1377.09	0.76	0.17	0	0.40
청포대	2.52	1222.93	0.95	0.16	1	0.29
백사장	0.00	628.86	1.56	0.24	0	0.45

73) 음수 값이 나타나는 이유는 다음의 두 가지 이유 때문이다. 1) 첫 측량시기를 기준으로 하였기 때문, 2) 조위 보정에서 오는 결과

삼봉	1.75	847.99	1.42	0.21	1	0.48
기지포	3.98	1018.62	1.27	0.23	1	0.47
안면	3.01	1265.72	1.00	0.19	1	0.45
두여	1.92	1010.89	1.26	0.17	1	0.39
밭개	0.91	852.96	1.36	0.25	0	0.38
꽃지	0.00	730.86	1.52	0.25	0	0.38
장삼포	1.68	998.44	1.19	0.21	1	0.36
명칭	해빈 길이(m)	chord length(m)	Ω	RTR	ξ	ϵ
꾸지	200	397	0.88	26	0.20	18.76
학암 북	1000	744	0.39	19	0.13	68.62
학암 서	676	960	2.77	17	0.12	81.13
신두	3400	2780	2.65	19	0.06	562.59
의항	521	554	0.76	16	0.15	74.16
천리	432	798	0.49	25	0.12	197.44
만리	2000	1250	0.72	17	0.10	195.87
갈음	200	326	0.14	26	0.13	98.24
연포	521	445	0.76	15	0.20	49.47
몽산	2300	2100	2.41	14	0.04	1376.10
달산	1090	1090	4.98	14	0.04	957.72
청포대	3600	2530	5.37	15	0.06	656.39
백사장	900	1230	5.79	13	0.09	201.50
삼봉	835	954	2.81	13	0.08	250.81
기지포	1100	1100	3.33	13	0.07	317.25
안면	863	863	3.01	13	0.06	501.47
두여	850	900	3.27	13	0.07	338.15
밭개	1400	1810	5.21	13	0.08	270.43
꽃지	2900	3220	1.84	14	0.09	214.25
장삼포	1300	1280	2.19	18	0.07	381.26

5.2. 분류 결과

5.2.1. 군집 분석

군집분석은 선행연구를 참고하여, 자료를 표준화하고 계층적, 집단 간 연결법을 활용하는 방법을 선택하였다(e.g. Travers, 2007; Scott et al, 2011). 군집분석에서 중요한 점은, 군집을 어느 수준에서 구분할 것이냐에 관한 문제이다. 일반적으로 Gowers general Similarity coefficient와 같은 지수를 활용하거나(e.g. Ramsay et al., 2006; Scott et al, 2011), 기존 선행연구에서 기 제시된 분류에 근거하여 군집 수준을 결정한다(e.g. de Souza Pereir et al., 2010; Pena-Alonso et al.,

2017).

이 연구에서는 3장과 4장에서 제시한 분류에 기반하여 군집 수준을 구분하였다. 먼저, 3장의 분류 중 가장 뚜렷한 차이가 나타나는 릿지&런벨형과 저조간석지형이 완전하게 분류되는 시점이 20단계이기 때문에, 20단계 이하에서 군집하기로 결정하였다. 4장의 분류 중 가장 뚜렷하게 분류되는 A, B가 완전하게 분류되는 시점은 12단계로, 12단계 이상으로 군집하기로 결정하였기 때문에 군집은 12~20단계사이에서 이루어지게 된다. 마지막으로, 제방의 존재 여부를 반영하여⁷⁴⁾ 최종적으로 12단계로 군집의 수준을 최종 결정하였다. 이와 같이 분류하면 총 3군집으로 분류되며, 유형에 포함하지 않는 해빈이 3개 존재하게 된다(그림 5.1).⁷⁵⁾ 유형별 평균값은 표 5.3에 제시되어 있다. 유형이 3종류로만 분류되는 점은 해빈간의 이질성이 매우 강하게 나타나고 있지는 않은 점이 반영된 결과이다. ANOVA 분석 결과 해빈폭과 RTR을 제외한 변수에서 유의한 차이가 존재하였으나, 그 차이는 주로 C군집과 다른 군집(A, B)의 차이에서 기인하였다. A군집과 B군집의 차이에서 유의한 변수는 유의과고, 해빈 길이, chord length의 세 변수뿐이며, 파랑 파라미터(ξ , ε)에서 유의한 차이가 나타나지 않는 것으로 보아 유의과고 또한 해석의 여지가 있다. 반면 C군집의 경우 대부분의 변수에서 A, B와 유의한 차이를 보이고 있다.

74) 제방이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우를 구분하여 적용하였다.

75) 몽산, 연포, 천리가 해당한다.

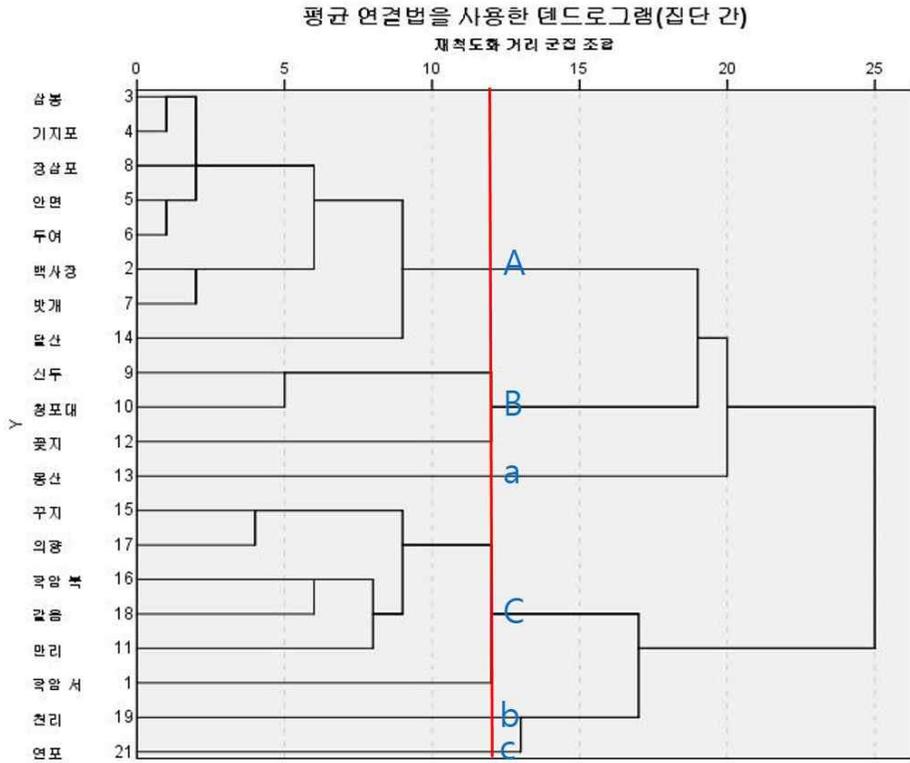


그림 5.1. 군집분석 결과(빨간선은 분류 수준을 의미함)

표 5.3. 유형별 해빈 속성 및 ANOVA 분석 결과

명칭	A군집	B군집	C군집	몽산	천리	연포	F	p-value
해빈폭(m)	1.64	0.39	6.22	0	57.67	43.71	4.145	0.182
면적(m ²)	1000.07	1009.18	621.85	1469.62	641.58	254.61	5.928	0.037*
경사각(°)	1.23	1.18	2.38	0.62	1.66	3.38	13.615	0.026*
입도(mm)	0.21	0.21	0.38	0.33	0.48	0.24	11.266	0.050*
배후지 활동성	0.63	0.67	0.5	0	1	1	-	-
유의파고 (m)	0.42	0.28	0.17	0.44	0.14	0.35	20.900	0.006**
해빈길이 (m)	1042.25	3300	766.17	2300	432	521	34.553	0.001**
chord length(m)	1153.38	2843.33	705.17	2100	798	445	43.555	0.001**
ρ	3.45	3.54	1.05	4.98	0.49	2.41	9.031	0.014*
RTR	13.65	16.06	20.18	13.87	24.67	15.46	6.699	0.071
ξ	0.07	0.07	0.14	0.04	0.12	0.2	14.743	0.020*
ϵ	402.32	477.75	89.46	1376.1	197.44	49.47	5.794	0.030*

개별 군집의 대표 단면을 선정하였다. 대표 단면은 각각 장삼포 3, 청포대 3, 학암북 3로 그림 5.2와 같다. 가로축 기준은 2017년 사구 말단부 혹은 제방 말단부이며, 세로축 기준은 표고이다.

1) A군집(8개) : 삼봉, 기지포, 장삼포, 안면, 두여, 백사장76), 밧개, 달산이 포함된다. 달산을 제외하고는 안면도에 포함된 해빈으로 구성되어 있으며, 대부분의 수치에서 중간 정도의 순위를 보인다. 상대적으로 유의파고가 높으며 붕괴파(spilling wave)가 나타난다. 입도가 세립하여 Ω 이 상대적으로 크며, RTR이 가장 낮았다. 해빈의 단면은 대부분의 경우 항상 릿지&런넬이 존재하며, 계절에 따라 변화하였다.

2) B군집(3개) : 신두, 청포대, 꽃지가 포함된다. 매우 긴 해빈 길이를 보유한 곳으로, chord length 또한 가장 길다. 경사각이 가장 낮은 반면 단면적 수치가 가장 높으며, 유의파고는 A유형보다 낮지만, 파랑 파라미터의 값은 유사하다. 유의파고의 경우 3장의 계절적 단면 측량시 선정한 측선의 바다방향의 값이며 파랑 파라미터의 경우 심해의 파장, 파고 등을 활용하기에, 심해와 천해의 수심 변화에 따라 수치가 달라지는 것으로 판단된다. 상당수의 측선에 제방이 존재하며, 해수욕장으로 널리 활용되고 있다. 릿지&런넬은 존재하지 않는 곳에서, 항상 존재하는 곳까지 다양하게 나타난다.

3) C군집(6개) : 꾸지, 의향, 학암북, 갈음, 만리, 학암서로 구성된다. 분류군 중 해빈폭이 가장 넓으며, 파고가 낮다. 또한 면적, 해빈 길이, chord length의 수치가 낮으며, 경사각의 수치가

76) 앞서 3장에서 백사장 해빈의 남쪽(3번 측선)에서 매우 조립한 퇴적물이 나타남을 제시한 바 있다. 현재 백사장 해빈 남쪽은 모래가 대부분 유실되어 기반암이 극명하게 드러나고 있어, 이 장에서 집중하고자 하는 사빈 해빈과 다소 다른 성격을 보인다고 판단하여 3번 측선을 제외한 자료를 활용하였다.

높은 특징을 보이는데, 낮은 Ω 은 조립한 입도에서 비롯된다. 주로 태안반도에 위치하고 있다. 대부분 지하수침출면이 존재하며, 텃지&런넬이 존재하지 않는 단면 특성을 보인다.

4) 그 외(3개) : 몽산, 연포, 천리로 여타 유형에 포함되지 않은 해빈이다. 몽산의 경우 제방의 영향을 강하게 받고 있으며 해빈길이, 면적 등이 아주 큰 특징을 지닌다. 연포와 천리의 경우 넓은 해빈폭⁷⁷⁾을 보유하고 있는 것이 특징이다.

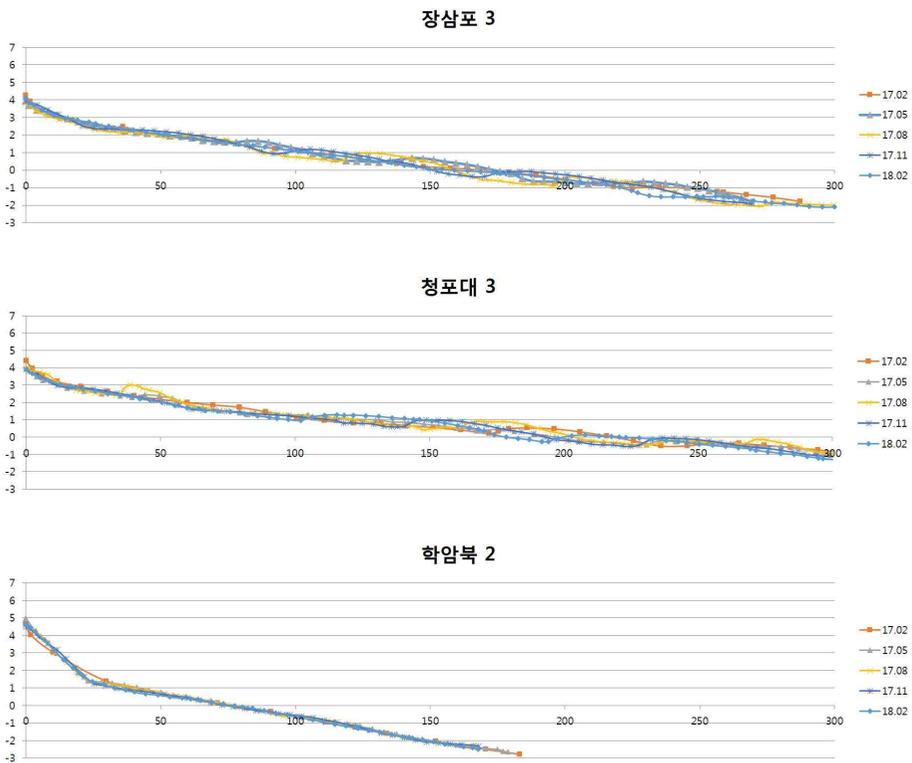


그림 5.2. A, B, C 유형의 대표 해빈 단면. 위에서부터 각각 A, B, C.

77) 해빈폭의 형성과 유지에 인간이 크게 개입한 것으로 판단된다.

5.2.2. 다차원 척도 분석

다차원 척도 분석은 선행연구를 참고하여, 비계량적 방법을 활용하였다(e.g. Scott et al, 2011; de Souza Pereir et al., 2010). 분석 결과 Stress는 0.17, RSQ는 0.91로 도출되었는데, 통계적으로 Stress값이 0.1보다 낮은 수치를 보이는 것이 선호되나, 선행연구를 살펴보면 0.17은 해빈 분류에 있어 양호한 수준으로 볼 수 있다. 해빈이 복잡한 프로세스와 상호작용을 보이며, 특히 인간에 의해 강한 교란을 받고 있기에 일반적으로 통용되는 수치보다 덜 엄격하게 적용한다. 한편 모형의 적합성 지수는(RSQ) 0.9 이상으로 설명력이 매우 높았다(그림 5.3).

군집분석에 의한 결과를 다차원 척도 분석의 차원에 도시한 결과, 대부분의 경우 적절하게 군집되어 있으나, 일부분 명료하게 분리되고 있지는 않은 경우들이 나타났다(그림 5.4). 청포대의 경우 분류군 A와 더 근접하였지만 B로 분류되었으며, 천리의 경우 꾸지와 매우 근소하나 분류되지 않았다.

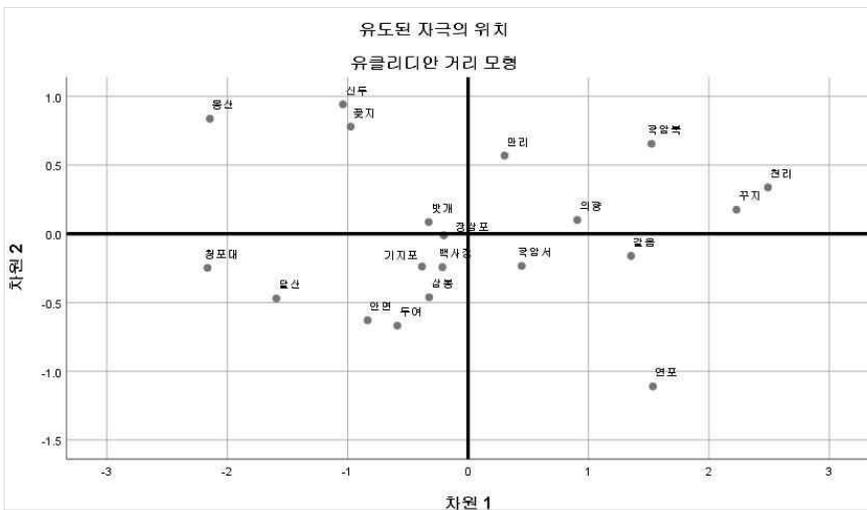


그림 5.3. 다차원 척도 분석 결과

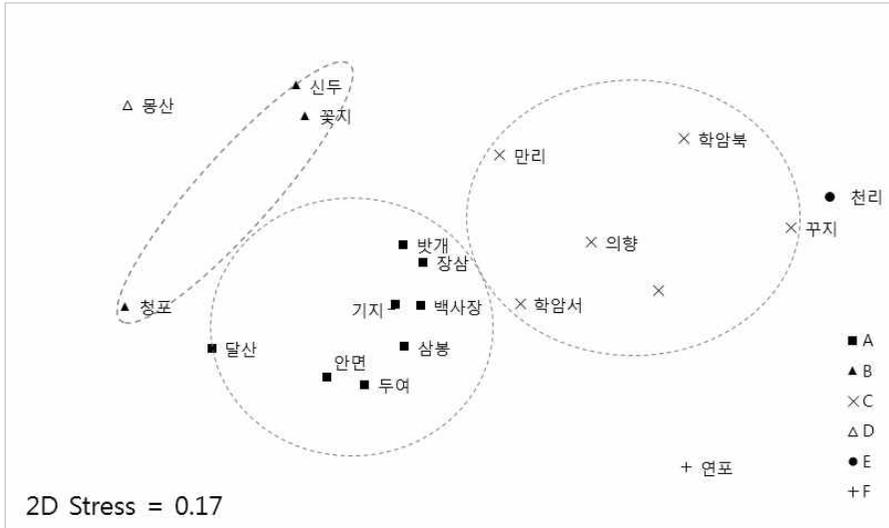


그림 5.4. 군집 유형에 따른 다차원 척도 분석 결과

5.3. 타 분류와의 비교

5.3.1. 기존 연구와의 비교

군집분석을 통해 분류한 결과를 기존의 해빈 분류 모델에 적용하여, 차이를 살펴보고자 하였다. 이 과정을 통해 통계 분석 결과의 의의를 확인할 수 있을 것이다.

Surf similarity와 surf scaling의 경우 대부분의 해빈이 붕괴파로 분류되며, surf scaling의 꾸지와 파도만이 권파로 분류되었다. 그러나 분류 기준을 조금 상회하는 수준이어서, 연구 지역 전반의 파랑 조건이 유사한 상황이라 볼 수 있다. 대조차환경의 보호받는 곳에 위치한 해빈의 경우 surf similarity나 surf scaling을 적용하는 것이 더욱 적절하다는 선행연구가 존재하였지만(Levoy et al, 2000), 이 연구에서는 차이가 나타나지 않았다.

해빈 분류 모델이 제시한 Ω 과 RTR에 의거하며 연구 대상을 도시하였다(그림 5.5, 5.6). 모든 해빈이 RTR이 7보다 커 파랑이

지배적인(wave-dominated) 해빈은 발견되지 않았으며, 이는 서해안의 특성이 잘 반영된 것이다. RTR은 15를 기준으로, 15이하의 조석에 변형된(tide-modified) 해빈과 15이상의 조석이 지배적인(tide-dominated) 해빈으로 구분된다(Short, 2003). 또한 $3 < RTR$ 의 조건에서는 릿지&런넬이 어떠한 유형에서든지 나타날 수 있다. Ω 의 경우 2와 5를 기준으로 각각 반사형, 중간형, 소산형을 의미하며, RTR이 7보다 큰 경우 Ω 을 2에서만 구분한다. 분류 결과 Low tide terrace형 1개, Ultra-dissipative형 9개, beach and sand ridges 4개, beach and sand flats형 6개로 구분되었다.

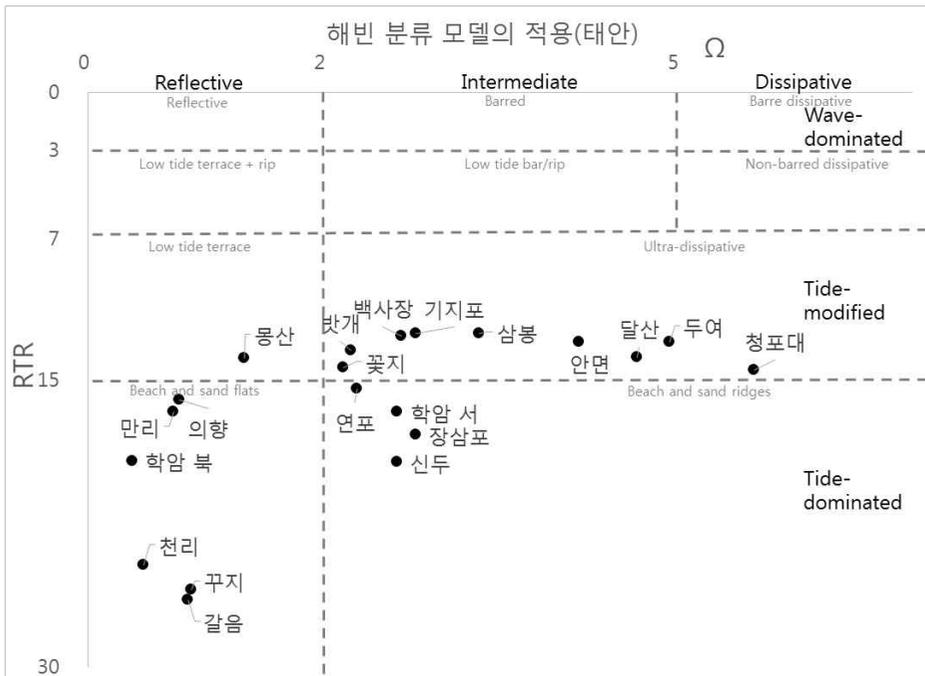


그림 5.5. 퇴적물 무차원 침강속도와 상대조차(연구 지역 해빈)

Low tide terrace형은 조립한 입도의 가파른 상부해빈과 세립한 입도의 평평한 하부해빈으로 구성되어 있다. 주로 0.5~1m의 파고로, 파형은 상부에서 쇄기파, 하부에서 권파가 나타난다. Ultra-dissipative형은 넓고 특징이 없는 경사가 완만한 해빈으로 조간대에서 세립한 퇴적물과 붕괴파가 나타난다. 파고는 0.5~1.5m의 범위로 해풍의 풍속증가와 함께 파고가 높아진다. beach and sand ridges형은 조립한 입도의 가파른 상부해빈과 세립한 입도의 평평한 하부간석지로 구성되어 있으며, 연결점에서 급격한 경사 변화가 나타난다. 일반적으로 low amplitude형의 릿지&런벨이 나타나며, 그 수는 2~14개에 달한다. beach and sand flats형은 beach and sand ridges형과 매우 유사하나, 릿지&런벨이 나타나지 않으며, 그 외의 특징은 동일하다(Short, 2003; 2006).

해빈 분류 모델이 제시하는 각 유형의 특징을 개별 유형에 포함된 해빈과 비교하면, 상당수가 일치하는 모습을 보인다. 3장에서 분류 기준 중 하나로 삼았던 지하수침출면의 유/무는 해빈 분류 모델에서 적용하는 Ω 의 개념과 매우 유사하다고 볼 수 있다. 3장의 연구 결과에서 지하수침출면이 존재하는 해빈은 꾸지, 학암북, 천리, 만리, 파도, 갈음, 연포, 백사장이며, 다른 해빈들은 지하수침출면이 존재하지 않는다. 지하수침출면이 존재하는 해빈들은 상대적으로 입도가 조립하며, 3장의 연구 결과 태안 지역 해빈의 경우 0.3mm를 기준으로 개념적으로 지하수침출면의 유무가 결정된다. 지하수침출면이 존재하는 해빈은 상대적으로 보호 받는 곳에 위치한 소규모 포켓형 해빈이며, 존재하지 않는 해빈은 상대적으로 개방된 곳에 위치한다. 소규모 포켓형 해빈의 경우 퇴적물 순환 체계에서 제외되어 퇴적물 유입은 제한적이지만, 외해나 사구로

유출되는 퇴적물이 존재하여, 퇴적물 비대칭적 이동의 결과 입도가 조립해진 것으로 판단된다.

몽산, 의향, 연포, 백사장의 경우 지하수 침출면의 유무관계가 해빈 분류 모델의 분류 결과와 일치하지 않는다. 먼저 몽산의 경우 선형 해빈 단면을 보유하고 있으나 Low tide terrace형으로 분류되었는데, 이는 해안선에 설치되어 있는 제방의 영향이다. Ω 의 계산에는 고조선의 퇴적물이 활용되는데, 몽산의 경우 고조선이 제방에 형성되기에 퇴적물 채취를 제방과 해빈의 경계부근에서 실시하였으며, 따라서 상대적으로 조립한 퇴적물의 영향이 관찰되는 것이다.⁷⁸⁾ 의향은 beach and sand flats형에 포함되나 선형의 해빈단면을 보유하고 있으며, 연포는 beach and sand ridges형에 포함되나 ridges가 나타나지 않는다. 파랑의 세기가 고정되어 있다고 가정하면, 의향의 퇴적물은 모델 기준보다 조립하였으며 연포의 퇴적물은 세립하였던 것이다. 이는 모두 인간의 영향으로, 의향은 사주섬에서 간척이후 해빈으로 변모한 것이, 연포는 넓은 해빈쪽의 형성과 유지에 인간이 지속적으로 개입하고 있는 점이 영향을 미치고 있다.⁷⁹⁾ 또한 백사장에서는 지하수침출면이 존재하나, 존재하지 않는 것으로 분류되었으며 이는 앞서 설명한 것처럼 비사의 영향이다. 즉, 파고나 퇴적물에 인간이 개입하면(교란이 발생하면) 적절하게 분류되지 않는 한계점이 나타나는 것이다.

해빈 분류 모델에 따른 공간적 경향성도 발견할 수 있었다. 전반적으로 해빈의 공간적 분포가 Ω 이 낮을수록 북쪽에, 높을수록 남쪽에 위치하고 있으며, RTR이 높을수록 북쪽에, 낮을수록 남쪽에

78) 이 외에도 제방을 가진 해빈은 상당수 존재하지만, 고조선이 항상 제방위에 형성되는 경우는 백사장 남단을 제외하고는 존재하지 않는다.

79) 해당 내용은 4장의 개별 해빈의 중규모 해빈 거동에서 언급한 부분이다.

위치하고 있는 공간적 경향성이 나타났다. 이러한 경향성은 릿지&런넬의 발달정도와 동일하게 나타난다. 이는 북쪽으로 가면서 파고가 약해지며, 소규모 포켓비치가 증가하는 것을 반영하는 결과로, 3, 4장에서 언급한 것처럼 지질 조건이 중요하게 작용하고 있음을 의미한다.

그러나 Ω 이 2이상인 경우, RTR 임계수치 15가 결정적으로 작용하지는 않는 듯하다. 삼봉과 장삼포의 경우 각각 Ultra-dissipative형과 beach and sand ridges형이지만 현장 관찰 결과에서 큰 차이가 나타나지는 않는다. Short(2003; 2006)의 분류에 따르면 beach and sand ridges형은 조립한 입도의 가파른 상부해빈과 세립한 입도의 평평한 하부간석지로 구성되어 있으나, 장삼포 해빈은 오히려 선형에 가깝다. 이는 beach and sand ridges형에 포함된 다른 해빈(학암 서, 신두)의 경우에도 적용되는 것으로, RTR의 임계수치가 태안 지역의 경우 다르게 적용되어 할 수도 있다. 실제로, 해빈 분류 모형이 대조차 해빈에 적합하지 않으며(Anthony, 1998) 국지적 스케일에서의 지질 조건(Jackson et al, 2005), 산호초의 존재(Masselink and Pattiaratchi, 2001), 낮은 에너지 조건에 제약 받을 수 있음이 지적된 바 있다(Gomez et al. 2007). Scott 등(2011)은 해빈 분류 모델은 해빈을 예측하기 위한 도구가 아니라, 해빈 시스템에 영향을 미치는 상대적인 파랑, 조석, 퇴적물 특성을 이해하는 도구도 활용되어야 함을 언급하였다. 이는 해빈 분류가 결과물이 아니라 논의의 출발점이 되어야 한다는 의미이다. 해빈 분류 모델에서도 RTR이 조석, 공극률, 투수율, 해빈 경사각 등에 의해 달라질 수 있음을 명시하고 있다(Masselink and Short, 1993).

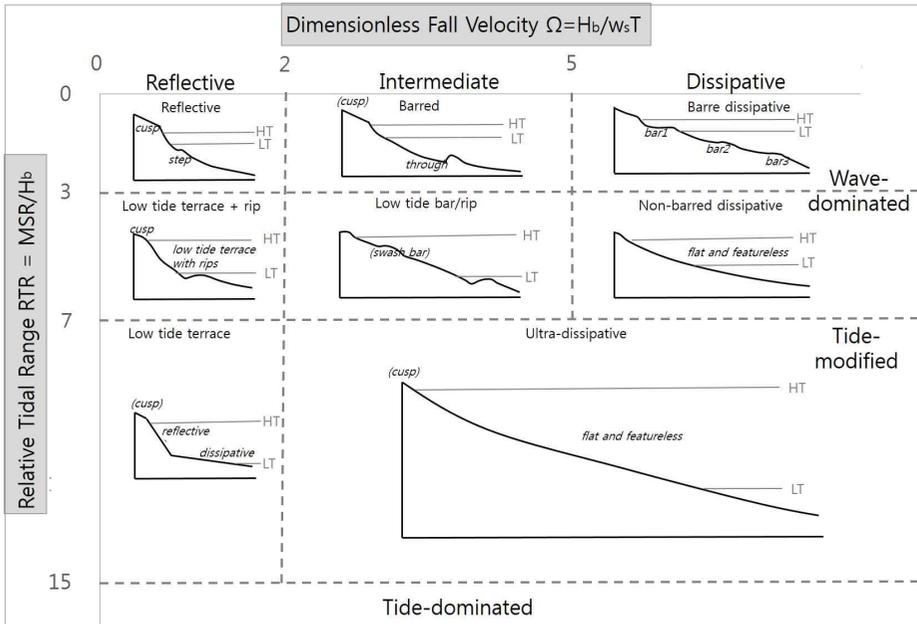


그림 5.6. 해변 분류 모델 (beach classification model), Masselink and Short(1993)의 그림 4를 수정

5.3.2. 3, 4장과의 비교

연구 지역을 대상으로 진행된 이 연구의 3장과 4장의 결과를 해변 통계분석과 비교해 보았다(표 5.4, 그림 5.7).⁸⁰⁾⁸¹⁾ 개별 수치는 동일한 유형에 속해있는 해변의 수를 의미한다. 앞서 3장은 해변 단면의 형태를 바탕으로 공간적인 분류하였으며, 4장은 중규모 시간 규모에서의 변화를 바탕으로 분류하였다. 한편, 5장에서 해변 분류 방법으로 활용한 통계적 방법은 연구자의 주관성을

80) 비록 클러스터링 분류 이후 군집하는 것에 대해 연구 목적 1과 2의 결과가 판단근거로 일부 적용되었으나, 모든 조건을 만족시키지 않았으며 또한 어떠한 수준에서 분류하느냐의 문제였기에 연구 목적 1, 2의 결과와의 비교가 적절하다고 판단한다.

81) 해변의 수가 일치하지 않는 이유는 각 장마다 자료의 한계로 인해 분류에서 제외된 해변이 존재하기 때문이다.

배재하였다는 점에서 상대적으로 객관성을 확보하고 있다.

표 5.4. 계절적 변화, 중규모 거동, 통계분석 결과의 비교

구분	완전 소산형	계절적 릫지형	릿지 & 런넬형	저조 간석지형	저조간석지+ 릫지형
A군집	-	2	5	-	1
B군집	1	-	2	-	-
C군집	1	-	-	3	1
구분	북부형	안면형	사취형	근홍형	인공형
A군집	-	6	1	-	1
B군집	-	-	1	-	2
C군집	4	-	-	1	-

계절적 변화와의 비교 결과 A, B군집은 릫지&런넬형에, C군집은 저조간석지형에 속하는 해빈의 수가 가장 많았다. 릫지&런넬-A군집에 속한 해빈은 기지포, 장삼포, 삼봉, 안면, 달산으로, 지하수침출면이 없고, 릫지&런넬이 상시 존재하는 해빈이다. 릫지&런넬-B군집에 속한 해빈은 신두, 청포이며, 저조간석지-C군집에 속한 해빈은 꾸지, 학암북, 갈음이다.

중규모 거동과의 비교 결과 북부형은 C군집만, 안면형은 A군집만을 포함하고 있었다. 북부-C군집에 포함된 해빈은 꾸지, 학암북, 학암서, 의향이며, 안면-A군집에 포함된 해빈은 삼봉, 기지포, 안면, 두여, 밧개, 장삼포로 중규모 거동을 통해 분류된 태안형, 안면형의 전부에 해당하는 해빈들이 포함되어 있다. 태안형은 겨울철 파랑 세기가 중요한 해빈으로, 지속적인 침식이 발생하고 있으며, 안면형은 겨울철 파랑 세기가 제한적인 해빈으로, 지속적인 퇴적이 발생하고 있는 해빈으로, 가장 상이한 유형이 분류되었다.

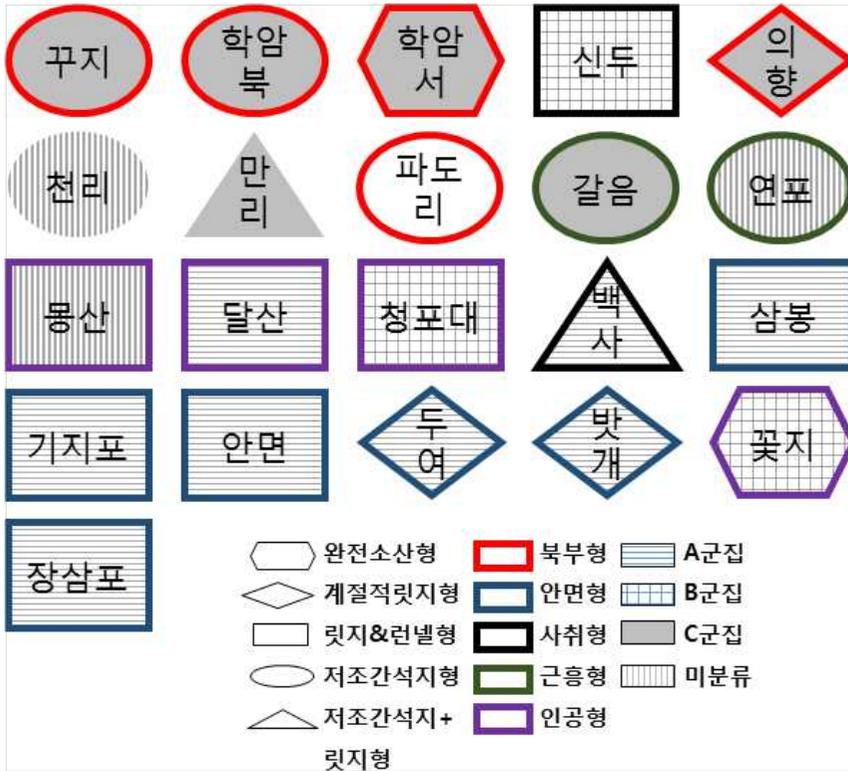


그림 5.7. 개별 분류에 따른 해빈 유형. 천리와 만리는 중규모 거동 분석에 포함되지 않았으며, 파도는 통계 분석에 포함되지 않았음

계절적 변화, 중규모 거동과 통계분석과의 관계를 살펴보면 미세하게나마 중규모 거동이 통계적 분류와 동일한 유형에 속해있는 해빈의 수가 높음을 알 수 있다. A군집은 릿지&런넬형과 동일한 유형에 속해있는 해빈의 수가 5개이지만, 안면형과는 6개였다. 또한 C군집은 저조간석지형과 동일한 유형에 속해있는 해빈의 수가 3개이지만, 북부형과는 4개였다. 따라서 계절적 변화보다 중규모 거동을 바탕으로 한 분류에서 동일한 유형에 속해있는 해빈의 수가 많았다. 세부적으로 중규모 분석에서의 유형 분류 상황을 살펴보면 더욱 유사하다. 중규모 분석 결과의 인공형은

해빈의 현재 상황을 의미하는 것으로, 중규모 거동을 통해 분류된 다른 유형과는 다른 기준으로 분류되었다. 만약 수십 년 거동을 기준으로 재분류 한다면 인공-A군집의 달산은 안면-A군집으로 분류 될 것이다.

3장은 해빈 단면과 지형 변화 자체에 기반하여 해빈을 분류하였기 때문에, 결과적으로 5장의 분류에서 활용한 지오메트리, 구성 물질, 외력이 중복되어 고려된 것일 수도 있다. 따라서 3장과 5장의 분류에서 상당부분 일치하는 것은 변수 선정의 문제일 수 있다. 그러나 4장의 분류는 해빈의 수십년 거동을 바탕으로 한 분류로 지오메트리, 구성물질, 외력을 바탕으로 한 5장의 분류와 다른 성격을 지닌다. 따라서 3장처럼 변수의 중복이 있지 않음에도 불구하고, 변수의 중복이 있었던 3장의 결과보다 4장의 결과에서 더 유사성이 나타난다는 점은 특기할만한 점이다. ‘진정한’ 혹은 ‘정확한’ 해빈 분류가 무엇인지 모른다는 점에서 이것이 잘 된 분류라 평가할 수는 없겠지만, 적어도 지오메트리를 통한 통계 분류가 ’수십 년 변화를 어느 정도 반영 하고 있을 수도 있다’라는 점 정도는 추측해봄직 하다.

5.3.3. 인간 교란의 영향

다차원 척도 분석의 차원에 도시된 군집분석의 결과에서, 특정 분류군은(B) 구분에 모호한 점이 존재하였으며 특정 해빈은(몽산, 연포, 천리) 분류군에 포함되지 않았는데, 이는 인간의 영향으로 판단된다.

꽃지를 제외한 B분류군의(신두, 청포대) 경우 해안선에 제방이 설치되어 있는 경우가 대부분이며, 제방이 없는 경우에는 자연사구로 활동성이 있는 부분도 존재하여, 상대적으로 교란의

정도가 몽산보다 약하게 나타난다. 달산포 북쪽에 존재하는 몽산포의 경우 차원의 좌상단에 홀로 도시될 만큼 이질적이며, 이는 교란의 정도가 신두와 청포대보다 강하기 때문이다. 남은 B분류군의 꽃지의 경우 몽산보다 심한 인간의 교란이 가해져왔고, 현재에도 가해지고 있다.⁸²⁾ 이와 유사한 해빈이 만리로 두 해빈 모두 몽산에 가까운 곳에 위치하여야 하나 그렇지 않은 이유는 양빈의 영향으로 판단된다. 실제로 만리와 꽃지는 각각 태안반도와 안면도를 대표하는 해수욕장으로, 많은 관광객이 지속적으로 방문하고 있다. 따라서 여름철 피서객을 위해 지속적으로 양빈을 실시하고 있으며, 이것이 영향을 미쳐 교란의 정도가 분명하게 나타나지 않은 것이다. 반면, 몽산의 경우 양빈 기록을 찾을 수 없다. 즉, 통계 분류에 의한 해빈 분류는 인간에 의해 교란 받은 해빈도 분류해 내고 있으며, 여기에는 양빈 등에 의한 영향도 나타나는 것이다.

분류군 B와 몽산, 연포, 천리가 인간에 의해 영향을 받지 않았음을 가정하고 재분류해 보았다. 먼저 B분류군 내부에서 신두리보다 청포대가 교란을 적게 받았음과 몽산-달산-청포가 삼봉-기지포-안면 -두여처럼 연계성을 가질 수 있음을 고려하면, 몽산, 달산, 신두가 현재 청포대가 표기된 곳 인근에 군집 될 가능성이 있다. 꽃지의 경우 사구의 파괴와 제방에 큰 영향을 받지 않았더라면, 여타 안면도의 해빈처럼 A유형에 포함되었을 가능성이 있다. 다만 이는 추정으로, 상세한 연구가 필요하다.

5.4. 정책적 활용

보편적인 해빈 분류 모델은 존재하지 않으며, 공간적으로 의미 있는 스케일에서 적용되어야 한다. 이 연구는 태안 지역 해빈을

82) 해양수산부는 2016년부터 꽃지 해변에 240여억 원을 들여 사구 복원사업을 실시하고 있다.

대상으로 해변을 통계적으로 분류해 보았기에, 분류의 결과를 태안지역의 해안 정책과 재해관리(risk management)의 관점에서 활용할 수 있다.

5.4.1. 해수욕장⁸³⁾ 위험성 평가

해수욕장은 레저의 관점에서 널리 활용되고 있다. 이에 발맞추어 해수욕장의 수질, 증금속 등의 관광객에게 피해를 끼칠 수 있는 요인들에 대한 관심이 높아졌으며, 다양한 연구가 이루어지고 있다. 우리나라의 경우 해수욕장의 전반적인 물리적 특징과 지형을 아우르는 접근은 거의 행해지지 않고 있다.

“해수욕장의 이용 및 관리에 관한 법률”이 2014년 6월 제정, 12월 4일부터 시행되어, 국민안전처의 해양 경찰을 중심으로 진행되던 해수욕장 안전관리가 지자체 중심으로 변모하게 되었다. 동법 제3장(해수욕장 기본계획 등), 제10조(기본계획의 내용), 4항에 따르면 해수욕장의 안전관리에 관한 사항은 ‘해수욕장 기본계획’에 포함되어야 함을 명시하고 있다. ‘해수욕장 기본계획’은 해양수산부가 10년 단위로 수립하는 것으로, 2016-2025년을 대상으로 현재 1차 기본계획이 진행 중에 있다. ‘해수욕장 기본계획’에 따르면 안전관리에 관한 사항을 ‘해수욕장 안전관리지침’을 통해 수립 및 시행하고 있으며, 해양경찰청에서 주관하고 있다. ‘해수욕장 안전관리지침’에 따르면 해당 지자체장은 해수욕장에 대해 위험성 평가를 실시하여야 하며, 이때 평가 항목은 안전시설, 관리요원, 위험지역을 포함한다(표 5.5).

83) 해변과 동일한 개념이지만, 이하에서는 해수욕장이라는 용어를 레저로의 해변 이용의 뜻을 담는 것으로 사용하였다.

표 5.5. 해수욕장 안전관리지침

구분	내용
제2조 (정의) 5항	「"위험성 평가"란 해수욕장 내 장소 및 시설에 대한 전수조사를 통해 위험지역을 파악하고, 안전시설 필요성, 안전관리요원·구조장비의 적정성 등을 도출하는 등의 활동으로서 제7조에 따라 규정된 평가를 말한다.」
제7조 (위험성 평가)	「① 관리청은 관할 해수욕장의 장소 및 시설에 대해 전수조사를 통한 위험성 평가를 실시하여야 한다. ② 해수욕장 위험성 평가는 다음 사항에 대하여 실시한다. 1. 해저 급경사면, 웅덩이, 갯골, 암초, 갯바위 등 위험지역 조사 2. 안전저해 시설 여부 조사 3. 안전시설 설치 규모 및 위치 판단 4. 안전관리요원 배치 인원 및 배치 위치 판단 5. 과거 사망사고 발생장소, 안전사고 다발지역에 대한 조사 및 대책 6. 그밖에 관리청이 안전관리를 위해 조사가 필요하다고 인정하는 사항」

국민안전처에서는 ‘해수욕장 기본계획 중 안전관리에 관한 사항’에 대해 2015년 약 3개월간 연구 용역을 실시하였다. 사단법인 한국 라이프세이빙 소사이어티에서 해당 연구 용역을 실시하였는데, 결과 보고서에는 호주에서 진행 중인 해수욕장 위험도 산출 및 위험성 평가 수행 사례를 중요한 부분으로 다루고 있다(한국 라이프세이빙 소사이어티, 2015). 호주의 해수욕장 위험도 산출 및 위험성 평가에 따르면, 해수욕장의 위험도는 지형 평가 + 주변 인구 현황 + 이용객 이용 현황 + 해수욕장 접근성을 합산하여 계산되며, 이 중 지형 평가는 6단계로 이루어져 있다. 1단계는 조위에 따라 파랑지배해수욕장, 파랑-조석 복합해수욕장, 조석 지배해수욕장으로 구분한다. 2단계는 세부 해빈 유형을 결정하는 것으로, 파랑지배해수욕장(6개), 파랑-조석 복합해수욕장(3개), 조석 지배해수욕장(3개)로 구성되어 있다. 3단계는 파고와 세부 해빈 유형에 따라 위험도를 점수화 하는 것이며, 4단계는 이안류, 암초 유무로 가중치를 부여한다. 5단계는 헤드랜드, 그로인, 하구, 석호 등의 해당 해수욕장의 지형 특성에 따라 가중치를 부여하는 것이며, 최종적으로 해수욕장의 지형

상태에 따른 위험도를 산출한다. 주변 인구 현황은 해수욕장 주변 2km 이내 인구를 통해 위험 수준을 평가하는 것이며, 이용객 이용 현황은 실제로 해수욕장을 이용하는 사람의 수이다. 또한 해수욕장으로 접근하는 것이 용이할수록 접근성은 높게 평가받게 된다. 최종적으로 각 평가 항목들의 점수를 합산하여 해수욕장의 위험성을 종합적으로 평가하게 된다. 이러한 과정은 ‘해수욕장 안전관리지침’의 제7조 위험성 평가와 동일한 방향성을 담고 있으나, 구체적인 실현 방법에 있어서는 다소 상이하다. 해수욕장 기본계획 중 안전관리에 관한 사항’에 대한 정책연구 ‘평가 결과서’에 따르면, 호주 사례와 같은 복합적인 위험성 평가를 정책 방향 결정에 중요 자료로 활용 가능성을 언급하고 있으며, 정책연구 활용결과 보고서에 따르면 이를 2016년 해수욕장 기본계획(10년 단위) 수립시 반영할 것으로 언급하고 있다. 그러나 표 5.5의 제7조에 제시되어 있는 ‘해저 급경사면, 웅덩이, 갯골, 암초, 갯바위 등 위험지역 조사’는 해수욕장의 다양한 물리적 위험 요소를 극히 단순화 하여 반영하고 있다. 이는 다양한 해안 지형에 대한 이해가 선행되지 않은 채, 안전요원과 안전시설에만 집중하는 정부의 인식에서 발생하는 문제이다. 실제로 ‘해수욕장 안전관리지침’ 제7조의 위험성 평가의 항목을 살펴보면, 안전요원과 시설에 관련된 부분이 대다수를 차지하고 있으며, 전체 지침 자체를 구성하는 상당수의 항목들이 안전요원과 시설에 집중되어 언급되고 있다. 이는 태안군의 경우에도 비슷한데, 태안군에서 수립한 해수욕장 기본계획, 태안군에서 발주한 연구용역(순천향대학교 산학협력단, 2016) 등에서 해수욕장의 물리적 위험요소는 거의 언급되지 않는다.⁸⁴⁾ 또한 언급되고 있는

84) 태안군에서는 ‘해수욕장 안전관리계획 수립 및 위험성평가 용역’을 진행하고 있다. 애초 사업 종료일이 2018.06.30일 까지이나 현재(2018.11.09)에도 용역이 종료되지 않아 내용 확인이 불가능하다.

물리적 위험요소도 해수욕장의 전반적인 상황을 아우를 수 있는 스케일에서 적용되는 것이 아니라, 국지적인 개별 요소에 집중하고 있다. 이는 가시적인 성과를 보이기 위한 전시행정에 가까우며, 해수욕장에서 사건 사고가 발생하게 되는 근본적인 원인을 진단하지 않는다는 한계점을 지닌다. 이러한 현상은 행정안전부에 의해 2014년부터 선정되고 있는 ‘물놀이 안전명소’에서도 나타난다. 물놀이 안전명소의 선정기준은 안전사고 여부, 안전관리요원 배치, 안전시설 설치, 응급 구호시설 운영 등의 안전성을 포함한 경관문화성, 교통접근성, 환경위생, 만족도로 구성된다. 물놀이 안전명소 선정에도 안전시설과 안전요원의 확충이 중요시되며, 해수욕장의 지형적 특징은 간과되고 있다.

우리나라에서 진행된 해수욕장 안전관리에 관한 연구들은 주로 안전 요원과 시설을 비롯한 행정 체계와 관련된 부분에 집중되어 있으며, 해수욕장의 물리적 위험요소에 집중한 연구는 크게 두 종류가 존재한다. 하나는 해수욕장의 수질에 관련된 부분이며, 다른 하나는 해운대에서 발생하는 이안류에 관한 연구이다. 두 주제 모두 협소한 스케일에서의 연구라 볼 수 있으며, 전반적으로 지형을 아우르는 연구는 거의 이루어지지 않았다.

그러나 해수욕장의 지형 조건은 해수욕장에서 발생할 수 있는 사건에 대한 가능성의 정보를 담고 있기에 이를 반영하는 것이 더욱 타당하다고 판단한다. 실제로 호주의 해수욕장 위험도 및 관리 프로그램(ABSAMP)에서는 해수욕장 안전을 관한 정보뿐만 아니라 해안 지형과 지리에 관련된 정보도 수집하고 있음을 명시하고 있다.⁸⁵⁾ 이때 수집되는 해안 지형과 지리에 관한 정보는 예를 들면, 퇴적물 분석, 파고, 해수욕장 종류, 조석, 해변 반경(beach

85) <http://lifesaving.com.au/communityprograms/lifesaving/coastal-management/>

centroid), 배리어 특징 등이 존재한다. 배선환(2017)은 2015.12.01.- 2016.11.30.의 기간에 발생한 해수욕장 인명피해를 조사한 결과, 해당 기간 동안 전국적으로 총 64건의 사고가 발생하였으며, 142명의 인명피해가 발생하였음을 제시하였다. 총 64건 중 34건이 서해에서 발생하였으며, 그 중 충남에서 발생한 사건이 21건으로 전국 지자체중 가장 많은 사건이 발생하였다. 또한 조위가 클수록, 해무가 많을수록, 파고가 높을수록, 구조물이 많을수록 위험성이 높다고 평가하였다. 양병모(2014)는 2009-2013년 해양경찰청에서 제공하는 익사사고 원인 분석 결과 조위에 의한 사고가 전체의 10%를 차지함을 제시하였다. 또한 호주 사례를 해운대, 낙산, 대천, 중문 해수욕장에 적용해 보았으며, 후속연구를 통해 꽃지와 만리포 해수욕장이 각각 위험등급 '주의'에 해당함을 제시하였다(양병모 등, 2014). 그러나 두 연구 모두 전반적인 개념을 제시하는 것에 초점을 맞추었으며, 이를 다양한 환경에(동해안, 남해안, 서해안, 제주도 등) 적용하는 것에 초점을 맞추었다. 따라서 이 연구는 사건이 가장 많이 발생한 충남에서 많은 해안선을 보유하고 있는 태안을 대상으로 간략하게나마 해수욕장 위험성 평가를 전체 지형의 관점에서 적용해 보았다. 이 때 앞서 통계적으로 분류한 결과를 활용하였다. 정책 수립에 있어 동일한 예산과 시간이 주어졌을 경우 개별 해수욕장 하나하나를 탐구하는 것보다 개별 군집에 대해 연구하는 것이 효율성이 높다. 동일한 특징을 보유한 해수욕장들을 여러 번 기술하며 연구하는 것보다, 동일한 지형 특징끼리 군집하여 연구를 진행함으로써 개별 군집의 이해와 정책 수립에 투여되는 예산을 늘리며, 시간을 단축시킬 수 있다.

기본적으로, 해수욕장에서 발생하는 사고에 가장 유명한 현상은

이안류로, 우리나라의 경우 해운대에서 발생하는 이안류로 인해 거의 매년 사고가 발생할 수 있다. 이안류로 인한 피해는 해안프로세스가 이용객의 안전에 영향을 미치는 전형적인 사례라 볼 수 있다(Scott et al, 2009a). 해수욕장 안전관리에 관한 지침'에서 유일하게 따로 분리되어 언급되는 해안 프로세스는 이안류인데, 사건 빈도에 비해 과대평가 되는 경향이 없지 않다. 이는 이안류가 발생하는 해운대 해수욕장에 다수의 관광객이 해수욕을 즐기기 때문으로, 다른 사건들보다 동일한 사건 횟수에 더 많은 사람이 영향을 받기 때문이기도 하다. 아직까지 태안 일대의 해변중 이안류가 강하게 발생하는 사례는 관찰되지 않았다. 이하에서는 Short(2006)에 근거하여 태안 일대 해수욕장의 위험성 평가를 진행하였다.

A군집의 경우 릿지&런넬이 강하게 나타나는 형태로, 선형에 가까운 해변 단면을 보유하고 있어 Ultra-dissipative형으로 볼 수 있다. 이러한 해변은 고조시 육지와 가까운 곳에서 파랑의 쇄파가 발생하며, 저조시 해변 단면 길이 자체가 길다는 점에서 위험성이 있다. 안전사고에 취약한 계층이 노약자임을 감안하면 넓은 해변 단면과 릿지&런넬과 같은 복잡한 지형은 충분한 위험 요소이다. 특히 해변의 지형 변화가 강하게 발생할수록 잠재적 위험성이 높다는 점(Scott et al, 2009b)과 릿지&런넬의 변화가 강하게 관찰된다는 점에서, 위험성이 높다고 볼 수 있다.

B군집의 경우 A군집과 유사하지만, 경사각이 더 낮으며 규모가 크다는 차이점이 존재한다. 따라서 전반적으로 A군집과 유사한 잠재적 위험이 존재하지만, 파랑 에너지가 현저하게 낮기 때문에(유의파고) 파랑으로 기인한 위험성은 상대적으로 크지 않다고 볼 수 있다. 따라서 B군집은 A군집보다 위험성이 덜하다.

C군집의 경우 고조시 지하수침출면을 기준으로 수심이 급격하게 깊어지기에 주의를 요한다. 또한 저조시 해안을 따르는 방향으로 조류가 발생할 수 있으나, 전반적으로 큰 위험은 없다고 볼 수 있다. 따라서 위험한 순서대로 군집을 나열한다면 A, B, C 군집의 순서라 볼 수 있다(그림 5.8).

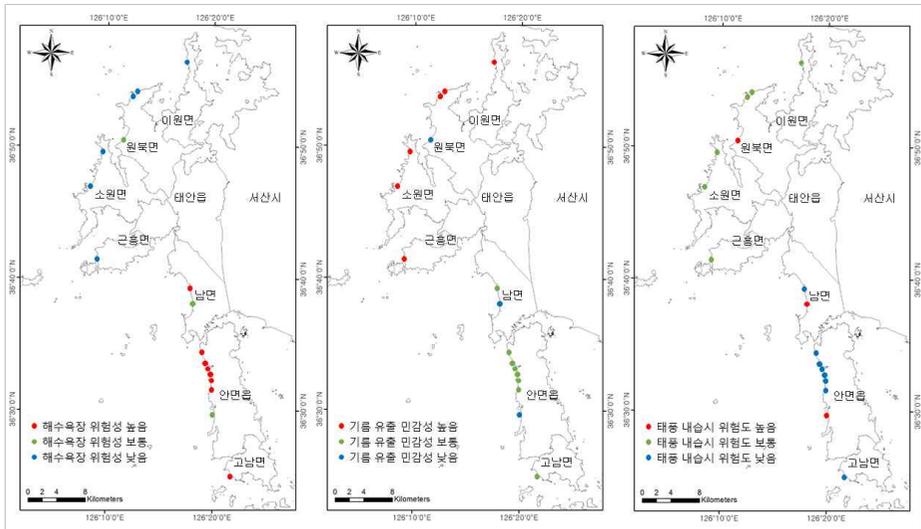


그림 5.8. 통계 분류를 활용한 정책적 활용 예시. 왼쪽부터 각각 해수욕장 위험성 평가, 기름유출시 민감도 평가, 태풍 내습시 민감도 평가.

이 외에도 이 연구에서 집중하지는 않았지만, 조수통로가 인접한 경우⁸⁶⁾ 강한 조류로 인해 인명 사고가 발생할 수 있다. 2013년 백사장 해수욕장에서 발생한 ‘사설 해병대 캠프 참사’가 강한 조류에 노출 되었을 시의 위험성을 강하게 보여주는 사례라 할 수 있다.

86) 신두리와 백사장에 해당하는데, 두 해변 모두 조수 통로 방향으로 사취가 발달하였다는 특징이 있다.

5.4.2. 기름 유출시 민감도 평가⁸⁷⁾

2007년 12월 7일 태안해안국립공원 만리포 해역에서 허베이 스피리트 호의 원유 유출 사고가 발생한 사례처럼, 전 세계적으로 다양한 기름 유출 사고가 발생하고 있다. 기름 유출 사고는 양식장, 해양생물 서식처와 같은 생태계에 막대한 피해를 끼친다. 이에 대비하고자 기름 유출을 가정한 뒤, 어떠한 해안선 혹은 해빈이 기름유출에 민감하게 반응하는지에 관한 연구도 진행되고 있다.

비록 모래해안의 경우 상대적으로 여타 해안에 비해 회복이 빠르지만(표 5.6), 서해안은 수심이 깊지 않고, 해류가 강하게 나타나지 않아 비교적 자정능력이 약하여, 사고시 다른 해역에서의 유출 사고보다 조하대에 잔존하는 오염물의 양이 많을 가능성이 높다.(정종관 등, 2008). 특히 서해 모래해안은 관광의 핵심으로 활용되며, 양식장과 같은 주민의 생계유지, 해양저서생물의 서식처로 그 중요성이 매우 높다. 따라서 서해 모래 해안의 기름 유출에 대한 위험성 평가는, 경제적, 생태적 측면뿐만 아니라 인간으로 인한 재해의 관점에서 매우 중요하다고 볼 수 있다.

표 5.6. 기름유출 사고 후 생태계 회복에 드는 소요시간 추정. 정종관 등(2008)의 표 7을 수정 후 인용

구 분	3년	5년	10년 이상
모래 해안	개체군들이 보임	거의 회복	회복됨

유출된 기름은 육지로 이동하면서, 주로 해안의 스위시존에 안착된다(de Souza Pereir et al., 2010). 기름이 모래에 침투하는 깊이는 파랑 에너지 세기, 퇴적물 입도, 해빈 경사각, 해빈 단면

87) 민감도가 높은 것은 기름 유출시 받을 수 있는 피해가 크다는 것을 의미한다.

길이에 영향을 받는다(Olita et al., 2012). 소산형 해빈, 세립한 퇴적물, 완만한 경사, 긴 해빈 단면을 보유한 경우 침투가 강하게 발생하지 않으며(혼합이 잘 되지 않으며), 반사형 해빈, 조립한 퇴적물, 급한 경사, 짧은 해빈 단면을 보유한 경우 침투가 상대적으로 강하게 발생한다. 위와 같은 조건은 퇴적물의 이동을 통한 지형변화의 관점에서도 동일하게 볼 수 있다. 지형변화의 역동성이 높을수록 기름이 해빈 내부로 침투하는 것이 수월하기에, 둘은 양의 관계를 갖는다고 할 수 있다. 또한 유출 사고가 발생하기 전의 생물량도 중요하게 작용하는데, 생물 서식 구멍⁸⁸⁾과 같이 해빈 표면과 내부를 연결하는 연결로가 많을수록 기름이 내부에 잘 침투하게 된다.

이와 같은 관점에서 기름 유출에 대한 태안 지역 해빈의 민감도를 살펴보면, C, A, B 군집의 순서대로 민감도가 높다 할 수 있다(그림 5.8). C군집은 해빈 상부에 가파른 해빈면이 존재하여 상부에서 반사형의 파랑 조건을 보이며, 해빈 경사가 가파르고, 해빈 단면이 짧으며, 입도가 상대적으로 조립하다. A와 B군집의 경우, B군집이 상대적으로 경사각이 낮으며, 해빈 단면이 길고, 파랑에너지가 낮아 B군집이 기름 유출에 가장 덜 민감함을 알 수 있다.⁸⁹⁾ 이러한 사실은 기름 유출 방제 관리시 어떠한 장소를 우선적으로 복원해야 하는가와 같은 재해 관리 우선순위의 선정에 기초자료로 활용할 수 있다.

88) 주로 게가 만들어 놓은 구멍을 의미한다.

89) 소산형 해빈이 반사형 해빈보다 생산성이 더욱 높다는 연구도 존재한다 (Bergamino et al., 2011). 그러나 태안 지역 해빈은 해빈 상부가 반사형의 단면을 보이더라도, 상부를 제외한 대부분의 단면에서 소산형의 형태를 보이고 있기에 큰 차이가 없다고 판단하였다. 물론 이는 연구자의 판단으로, 지형 조건(반사형에서 상대적으로 침투가 강하게 발생함)과 생물 서식 조건(반사형에서 생물 서식의 빈도가 낮음)의 상대적인 영향에 따라 바뀔 수 있는 부분이다.

5.4.3. 태풍 내습시 민감도 평가

태풍은 파랑, 조석, 바람과 같은 외력에 영향을 미쳐 해빈을 침식시킨다. 태풍이 해빈에 미치는 영향은 태풍의 빈도, 강도, 경로 등이 중요하게 작용하지만, 해빈 종류, 국지적 지질 조건 또한 중요하다(Loureiro et al., 2012). 지난 수십 년 태풍의 빈도, 강도, 경로에 많은 변화가 관찰되었다는 점에서, 태풍에 대한 반응은 중요한 재해 관리 항목 중 하나이다.

Burvingt 등(2017)은 영국 남서부 해안을 대상으로, 태풍 전후의 해빈 변화를 기반으로 군집분석을 실시하였다. 그 결과 1) 개방형 해빈, 2) 반-폐쇄형 해빈, 3) 폐쇄형-짧은 해빈, 4) 폐쇄형-긴 해빈의 네 군집을 확인하여, 태풍에 대한 반응에 지질조건이 강한 영향을 미치고 있음을 제시하였다. 개방형 해빈에서는 강한 침식이, 반-폐쇄형 해빈에서는 중간 강도의 침식이, 폐쇄형-짧은 해빈은 제한적인 해빈 변화가 발생하였으며, 폐쇄형-긴 해빈에서는 해안을 따르는 방향으로 방대한 양의 퇴적물 이동이 발생하였으나 순 침/퇴적량은 극히 제한적이었다. 이러한 반응을 유발하는 중요 요인은 태풍에서 기인한 파랑에의 노출 정도, 파향, 해빈의 embayed 정도였다. 그리고 이러한 반응은 전 세계에서 동일하게 나타날 수 있음을 주장하였다.

비록 이 연구에서 태풍에 대한 해빈의 반응을 확인하고, 통계 분석에의 변수로 활용하지는 않았지만, 3장의 결과에서 태풍에 대한 해빈의 반응을 어느 정도 예측해 볼 수 있다. 기본적으로 계절의 차이는 유입되는 에너지와 퇴적물 조건의 차이이기에, 계절적 해빈 단면 변화는 변화하는 에너지에 대한 단면의 반응으로도 볼 수 있다. 태풍이 중요한 점은 파랑과 바람을 강하게 만들며, 조위가 상승한다는 점으로, 계절적으로 보면 각각 겨울과 여름의 조건과

유사하다. 겨울은 강한 풍속과 파랑이 관찰되는 시기이며, 여름은 음력 7월 15일인 백중사리가 존재하는 계절로, 안흥 조위관측소의 자료에 따르면 매년 7~9월의 조위가 높게 관찰된다. 즉, 계절적 단면 변화는 태풍 시 발생 가능한 상황에 대한 이해로 대체 될 수 있는 것이다. Burvingt 등(2017)의 연구결과에서 제시한 지질조건(바다로의 개방성)과 해빈 지형 변화의 정도를 고려하면⁹⁰⁾, 다음과 같이 태풍에 대한 민감도를 제시할 수 있다. B군집은 개방형과 반폐쇄형이 공존하며, 지형변화가 가장 강하게 발생한다. A군집의 경우 B군집과 유사하나, 지형변화가 상대적으로 약하게 발생한다는 특징을 지닌다. 반면 C군집의 경우 대부분 폐쇄형으로 구성되어 있으며, 지형변화도 거의 발생하지 않는다. 따라서 B, A, C군집의 순으로 태풍에 대한 민감도가 증가하며, 민감도가 증가할수록 위험성이 높다(그림 5.8).

5.5. 소결

5장에서는 20개 해빈에 총 13개의 변수를 활용하여 군집분석과 다차원 척도 분석을 적용해 보았다. 통계 분석을 활용한 해빈 분류는 주관성을 최소화하고 객관성을 확보하였다는 점에서 의미를 갖는다. 이 장에서는 지오메트리, 구성 물질, 외력에 기반하여 통계분류를 실시하였으며, 이를 여타 분류와 비교하고 정책적 활용 방법을 모색하였다.

3장과 4장에서 제시한 분류에 기반하여 군집 수준을 구분한 결과 총 3군집으로 분류되며, 유형에 포함하지 않는 해빈이 3개 존재하였다. ANOVA 분석 결과 해빈폭과 RTR을 제외한 변수에서

90) 해빈의 지형 변화가 강하게 발생할수록 잠재적 위험성이 높다(Scott et al, 2009b).

유의한 차이가 존재하였으며, 그 차이는 주로 C군집과 다른 군집(A, B)의 차이에서 기인하였다. A군집은 대부분 안면도에 위치하였으며, 대부분의 수치에서 중간 정도의 순위를 보였다. B군집은 매우 긴 해변 길이를 보유한 곳으로, 상당수의 측선에 제방이 존재하며, 해수욕장으로 널리 활용되고 있다. C군집은 태안반도에 위치하였으며, 지하수침출면이 존재하고, 해변 길이가 짧은 특징은 지닌다. 군집분석에 의한 결과를 다차원 척도 분석의 차원에 도시한 결과, 대부분의 경우 적절하게 군집되어 있어, 통계 분류에 의한 해변 분류가 적절하게 진행되었으며, 또한 인간에 의해 교란 받은 해변도 분류하고 있음을 알 수 있었다.

Surf similarity와 surf scaling의 경우 해변간의 유의미한 차이가 거의 나타나지 않았으나, 해변 분류 모델은 어느 정도 적절한 결과를 도출하였다. 그러나 인간의 개입과 같은 퇴적물 교란을 적절하게 반영하지 못하였으며, RTR 임계수치 15의 신뢰성에 의문이 가는 결과가 나타났다.

통계적 분류와 계절적 변화, 중규모 거동과의 관계를 살펴본 결과 중규모 거동과 통계적 분류사이의 동일한 유형에 속해있는 해변의 수가, 계절적 변화와 통계적 분류간의 동일한 유형에 속해있는 해변의 수보다 많음을 확인할 수 있었다. 이는 연구에서 고려한 변수들과 수십 년간의 해변 거동이 상관성이 있음을 의미하는 것일 수도 있으나 보다 세심한 연구를 요한다.

해빈 분류를 바탕으로 정책과 재해관리의 관점에서 연구 결과를 해수욕장 위험성 평가, 기름 유출시 민감도 평가, 태풍 내습시 민감도 평가에 적용해 보았다. 그 결과 다양한 결과가 도출되었으며 이는 ‘재해’에 대해 다각적으로 검토할 필요가 있음을 의미한다.

해빈 분류는 이처럼 해안 프로세스에 대한 이해와 이의 현실적 활용에 대한 차원에서 중요성을 지닌다고 볼 수 있다.

6. 결론

이 연구는 태안 일대 해빈의 변화를 관찰 및 해석하고, 해빈을 분류하였다. 공간적으로 다수의 태안 일대 해빈을 선택하여 해빈의 변화를 유형화하여 살펴보았으며, 시간적으로 계절적 변화에서부터 수십 년까지의 변화를 관찰하여 다양한 시간 규모에서의 해빈 변화 프로세스에 대한 이해를 향상시키고자 하였다. 마지막으로 해빈을 통계적으로 분류하여 지형학적 함의를 살펴보고, 정책적 차원에서의 활용방안을 제시하였다. 다양한 시공간적 스케일에서의 해빈 연구 결과, 연구 전반에 걸쳐 개별 해빈의 국지적 지질 조건이 중요하게 작용함을 확인하였으며, 지질조건으로 인해 파랑 세기가 공간적으로 다양한 분포를 보였다. 연구 목적은 1) 계절로 대표되는 에너지 변화에 대한 해빈 단면 변화를 살펴보고, 2) 수십 년 규모의 중규모 해빈 거동을 확인하며 3) 태안 지역 일대의 해빈을 통계적으로 분류하는 것이다. 연구 목적은 다음과 같다.

1. 계절로 대표되는 에너지 변화에 대한 해빈 단면 변화를 유형화하여 살펴본다. 이 때 공간적 자료를 활용하여 지오메트리(geometry), 구성 물질, 외력(forcing factor)을 바탕으로 유형간 차이를 확인하며, 차이가 발생하는 원인을 탐구한다. 나아가 궁극적으로 태안지역에서 나타날 수 있는 해빈의 개념모델을 제시한다.

해빈 단면과 단면 변화의 유사성을 지하수침출면과 릿지&런넬을 토대로 제시하였으며, 이들은 해빈 상황, 에너지 변화, 지형 반응을 의미한다. 이를 토대로 지하수침출면과 릿지&런넬이 없는 완전소산형, 지하수침출면이 없고 릿지&런넬이 계절적으로

존재하는 계절적 릿지형, 지하수침출면이 없고 릿지&런넬이 항상 존재하는 릿지&런넬형, 지하수침출면이 있고 릿지&런넬이 없는 저조간석지형, 지하수침출면과 릿지&런넬이 모두 존재하는 저조간석지-릿지형으로 분류할 수 있었다. 각각의 유형은 서로 다른 특징(지오메트리, 구성 물질, 외력)과 계절적 해빈 단면 변화를 보였으며, 동일 유형은 에너지에 대한 반응이 동일하게 나타났다. 유형별 차이를 만드는 조건은 국지적 지질조건인 바다로의 개방성이며, 이는 파랑 세기의 차이를 만들었다. 개방성이 낮은 저조간석지형-폐쇄형과 개방성이 높은 릿지&런넬형-개방형을 양 극단으로, 개별 유형의 지질조건이 해빈에 강한 영향을 미쳤다. 해빈 유형을 도시한 결과 지하수침출면이 존재하는 해빈은 상대적으로 보호받는 곳에 위치하였으며, 릿지&런넬의 발달정도는 공간적 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 평균입도와 평균 유의파고에 대한 태안 지역 해빈의 개념적 모델을 제시하였다.

2. 수십 년 규모의 중규모 해빈 거동을 살펴본다. 수십 년 지형 변화를 탐색하고, 이를 지형동역학적 관점으로 공간적 스케일에 따라 영향 요인을 차례로 탐색한다. 나아가 중규모 해빈 변화와 내부에서 작용한 프로세스를 바탕으로 해빈을 분류한다.

수십 년 해빈폭 변화를 고조선을 통해 확인하였다. 1977~1984년에 이르는 시기 동안 전반적으로 해빈폭의 감소가 발생하였으나, 그 외에 연구 지역 전반을 아우르는 변화는 관찰되지 않았다. 해빈폭 변화에 영향을 주는 요인은 공간적으로 큰 스케일에서는 파랑 세기, 중간 스케일에서는 지형·지질조건에 따른

수심과 취송거리, 작은 스케일에서는 해변 배후지 개발, 사구의 역동성, 사취와 같은 해안 지형을 들 수 있었다. LRR의 결과는 신진도를 중심으로 북으로는 침식이 남으로는 퇴적의 경향이 있음을 보여준다. 이러한 결과를 바탕으로 해변을 총 5 종류로 구분하였으며, 이를 분류에 따라 도시한 결과 유형에 따라 특정한 경향성을 확인할 수 있었다. 또한 해변의 계절적 변화와 수십년 거동을 연계한 결과 두 시간 스케일에서 공통적으로 가장 중요한 요소는 파랑세기와 지질 조건으로 나타났다.

3. 태안 지역 일대의 해변을 통계적으로 분류한다. 지오메트리, 구성 물질, 외력에 기반하여 통계분류를 실시하고, 이를 여타 분류와 비교하여 통계를 활용한 분류의 의의를 살펴본다. 이후 해변 분류의 결과를 바탕으로 정책적 활용 방법을 모색한다.

13개의 변수를 활용하여 군집분석과 다차원 척도 분석을 적용한 결과, 총 3군집으로 분류되며, 유형에 포함하지 않는 해변이 3개 존재하였다. 특히, 군집분석에 의한 결과를 다차원 척도 분석의 차원에 도시한 결과, 인간에 의해 교란 받은 해변도 분류하고 있음을 알 수 있었다. 그러나 통계적 분류가 아닌 Surf similarity, surf scaling, 해변 분류 모델은 일부 신뢰성에 의문이 가는 결과를 산출하였으며, 또한 인간의 개입을 분류하지 못한다는 한계점이 존재하였다. 통계적 분류와 계절적 변화, 중규모 거동과의 관계를 살펴본 결과 중규모 거동이 통계적 분류와 더 유사하였으나, 보다 면밀한 연구가 요구된다. 해변 분류를 바탕으로 정책과 재해관리의 관점에서 연구 결과를 해수욕장 위험성 평가, 기름 유출시 민감도 평가, 태풍 내습시 민감도 평가에 적용해 보았으며, 이는 해변

분류가 프로세스에 대한 이해를 증진시키고, 한편으로는 정책에 효율적인 기초자료로 활용될 수 있음을 의미한다.

이 연구는 해빈의 분류에 따른 ‘유형화’와 ‘중규모-수십년’을 ‘대조차 해빈’에서 함께 고려하였다는 점에서 학문적 의의가 있다. 이는 정책적으로 현재 적용되는 방식인 단일해빈을 독립된 시스템으로 간주하고, 50년 주기의 파랑을 통해 제방을 건설하는 등의 매우 단순화된 해안관리 접근방식을 탈피해야 함을 지적하며, 이것이 미래의 계획에 적절하게 적용되어야 함을 의미한다. 또한 해수욕장 위험성, 기름 유출 사고, 태풍 등의 위험과 재해의 관점에서 지형학자가 기여할 수 있는 방안을 고려하였다는 점에 사회적 의의가 있다. 이 연구의 결과는 기후변화에 의한 해수면 상승이 현재의 위험으로 다가오고 있는 지금, 해안 프로세스의 이해와 이를 토대로 한 관리방안에 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

- Anthony, E. J. 1998. Sediment-wave parametric characterization of beaches. *Journal of Coastal Research*, 347-352.
- Ashton, A. D., Donnelly, J. P., & Evans, R. L. 2008. A discussion of the potential impacts of climate change on the shorelines of the Northeastern USA. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 13(7), 719-743.
- Barman, N. K. 2018. Sustainable Coastal Zone Management Strategies for Unconsolidated Deltaic Odisha, the Northern Part of East Indian Coast. In *Beach Management Tools-Concepts, Methodologies and Case Studies* (pp. 755-778). Springer, Cham.
- Battjes, J. A. 1975. Surf similarity. In *Coastal Engineering*, pp. 466-480
- Bauer, B. O., Davidson-Arnott, R. G. D., Hesp, P. A., Namikas, S. L., Ollerhead, J., & Walker, I. J., 2009, Aeolian sediment transport on a beach: Surface moisture, wind fetch, and mean transport. *Geomorphology*, 105(1), 106-116.
- Benedet, L., Finkl, C. W., and Klein, A. H. F., 2006, Morphodynamic classification of beaches on the Atlantic coast of Florida: geographical variability of beach types, beach safety and coastal hazards. *Journal of Coastal Research*, 360-365.
- Bennett, W. G., Karunaratna, H., & Reeve, D. E. 2017, Morphological Impacts due to Storms on a Macro-Tidal Beach. *Coastal dynamics*, 9, 1821-1831
- Bergamino, L., Lercari, D., & Defeo, O. 2011. Food web structure of sandy beaches: temporal and spatial variation using stable isotope analysis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 91(4), 536-543.
- Blott, S.J. and Pye, K. 2001, GRADISTAT: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surf. Proc. Landforms*, 26, 1237-1248.
- Blue, B., & Kench, P. S. 2017. Multi-decadal shoreline change and beach connectivity in a high-energy sand system. *New Zealand Journal*

- of Marine and Freshwater Research, 51(3), 406–426.
- Boak, E.H., Turner, I.L., 2005. Shoreline definition and detection: a review. *Journal of Coastal Research* 21, 688–703.
- Burvingt, O., Masselink, G., Russell, P., & Scott, T. 2017. Classification of beach response to extreme storms. *Geomorphology*, 295, 722–737.
- Butt, T., Russell, P., & Turner, I. 2001. The influence of swash infiltration–exfiltration on beach face sediment transport: onshore or offshore?. *Coastal Engineering*, 42(1), 35–52.
- Castelle, B., Guillot, B., Marieu, V., Chaumillon, E., Hanquiez, V., Bujan, S., & Poppeschi, C. 2018. Spatial and temporal patterns of shoreline change of a 280–km high–energy disrupted sandy coast from 1950 to 2014: SW France. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 200, 212–223.
- Chen, W. W., & Chang, H. K. 2009. Estimation of shoreline position and change from satellite images considering tidal variation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 84(1), 54–60.
- Choi, J.–Y., Park, J.–Y., Cho, K.–H., Hyun, S.–K., Yoo, J., Lee, D.–Y. and Jun, K.–C., 2013 Field observation and modeling of wave set–up on a macrotidal beach: the Malipo Experiment. In: Conley, D.C., Masselink, G., Russell, P.E. and O’ Hare, T.J. (eds.), *Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England)*, *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65, pp. 183–188, ISSN 0749–0208.
- Costas, S., Alejo, I., Vila–Concejo, A., & Nombela, M. A. 2005. Persistence of storm–induced morphology on a modal low–energy beach: a case study from NW–Iberian Peninsula. *Marine Geology*, 224(1–4), 43–56.
- Coe, A. L. (Ed.), 2003, *The sedimentary record of sea–level change*. Cambridge University Press. 58p
- De Boer, W., Huisman, B., Yoo, J., McCall, R., Scheel, F., Swinkels, C., .. & Deigaard, R. 2017. Understanding coastal erosion processes at

- the Korean east coast.
- De Souza Pereira, P., Calliari, L. J., & do Carmo Barletta, R. 2010. Heterogeneity and homogeneity of Southern Brazilian beaches: A morphodynamic and statistical approach. *Continental Shelf Research*, 30(3-4), 270-280.
- Dehouck, A., Dupuis, H., & Senechal, N. 2009. Pocket beach hydrodynamics: The example of four macrotidal beaches, Brittany, France. *Marine geology*, 266(1-4), 1-17.
- Del Rio, L., Gracia, F. J., & Benavente, J. 2013, Shoreline change patterns in sandy coasts. A case study in SW Spain. *Geomorphology*, 196, 252-266.
- Delft3D-WAVE, A. 2017. User manual, version 3.05. Delft Hydraulics.
- Devoy, R. J. 2008. Coastal vulnerability and the implications of sea-level rise for Ireland. *Jo*
- Diez, J., Cohn, N., Kaminsky, G. M., Medina, R., & Ruggiero, P. 2018. Spatial and Temporal Variability of Dissipative Dry Beach Profiles in the Pacific Northwest, USA. *Journal of Coastal Research*, 34(3), 510-523.
- EUREKA, S. C., BAY, S. M., SANTA BARBARA, S. M. I. Z., PEDRO, S., LAGUNA, O., & BAY, M. 2007. Development of Sand Budgets for California' s Major Littoral Cells, California Coastal Sediment Management WorkGroup
- Finkl, C. W. 2004. Coastal classification: systematic approaches to consider in the development of a comprehensive scheme. *Journal of Coastal Research*, 166-213.
- Ford, M. 2013. Shoreline changes interpreted from multi-temporal aerial photographs and high resolution satellite images: Wotje Atoll, Marshall Islands. *Remote Sensing of Environment*, 135, 130-140.
- French, J. R., & Burningham, H. 2009. Coastal geomorphology: trends and challenges. *Progress in Physical Geography*, 33(1), 117-129.
- Genz, A. S., Fletcher, C. H., Dunn, R. A., Frazer, L. N., & Rooney, J. J. 2007. The predictive accuracy of shoreline change rate methods

- and alongshore beach variation on Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research*, 87–105.
- Gomez–Pujol, L., Orfila, A., Canellas, B., Alvarez–Ellacuria, A., Méndez, F. J., Medina, R., & Tintor, J. 2007. Morphodynamic classification of sandy beaches in low energetic marine environment. *Marine Geology*, 242(4), 235–246.
- Goodwin, I. D., Freeman, R., & Blackmore, K. 2013. An insight into headland sand bypassing and wave climate variability from shoreface bathymetric change at Byron Bay, New South Wales, Australia. *Marine Geology*, 341, 29–45.
- Griggs, G. B., & Patsch, K. 2018. Natural changes and human impacts on the sand budgets and beach widths of the Zuma and Santa Monica littoral cells, Southern California. *Shore & Beach*, 86(1), 1.
- Guza, .T. and Davis, R.E., 1974. Excitation of edge waves by waves incident on the beach. *Journal of Geophysical Research*, 79, 1285–1291
- Guza, R. T., & Inman, D. L. 1975. Edge waves and beach cusps. *Journal of Geophysical Research*, 80(21), 2997–3012.
- Harley, M. D., Turner, I. L., & Short, A. D. 2015. New insights into embayed beach rotation: The importance of wave exposure and cross–shore processes. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120(8), 1470–1484.
- Harley, M. D., Turner, I. L., Short, A. D., & Ranasinghe, R. 2011. A reevaluation of coastal embayment rotation: The dominance of cross–shore versus alongshore sediment transport processes, Collaroy–Narrabeen Beach, southeast Australia. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(F4).
- Hequette, A., & Aernouts, D. 2010. The influence of nearshore sand bank dynamics on shoreline evolution in a macrotidal coastal environment, Calais, Northern France. *Continental Shelf Research*, 30(12), 1349–1361.
- Himmelstoss, E.A. 2009. “DSAS 4.0 Installation Instructions and User

- Guide” in: Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., and Ergul, Ayhan. 2009 Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 — An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278. *updated for version 4.3.
- Hopkins, J., Elgar, S., & Raubenheimer, B. 2017. Flow separation effects on shoreline sediment transport. *Coastal Engineering*, 125, 23-27.
- Horn, D. P. 2002. Beach groundwater dynamics. *Geomorphology*, 48(1-3), 121-146.
- Jackson, D. W. T., & Cooper, J. A. G. 2009. Geological control on beach form: accommodation space and contemporary dynamics. *Journal of Coastal Research*, 69-72.
- Jackson, D. W. T., Cooper, J. A. G., & Del Rio, L. 2005. Geological control of beach morphodynamic state. *Marine Geology*, 216(4), 297-314.
- Jiminez, J. A., Guillin, J., & Falquis, A. 2008. Comment on the article “Morphodynamic classification of sandy beaches in low energetic marine environment” by Gimez-Pujol, L., Orfila, A., Caiellas, B., Alvarez-Ellacuria, A., Mindez, FJ, Medina, R. and Tintori, J. *Marine Geology*, 242, pp. 235-246, 2007. *Marine Geology*, 255(1-2), 96-101.
- Karambas, T. V. 2003. Modelling of infiltration-exfiltration effects of cross-shore sediment transport in the swash zone. *Coastal Engineering Journal*, 45(01), 63-82.
- Komar and Gaughan, 1972, Airy wave theory and breaker height protection. *Proceedings of the 13th International Conference of Coastal Engineering*, Vancouver, Canada, 405-418
- Komar, P.D., 1998. *Beach Processes and Sedimentation*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 544 pp.
- Levoy, F., Anthony, E. J., Monfort, O., & Larssonneur, C. 2000. The morphodynamics of megatidal beaches in Normandy, France. *Marine Geology*, 171(1-4), 39-59.
- Loureiro, C., Ferreira, O., & Cooper, J. A. G. 2012. Geologically

- constrained morphological variability and boundary effects on embayed beaches. *Marine Geology*, 329, 1–15.
- Magana, P., Bergillos, R. J., Del-Rosal-Salido, J., Reyes-Merlo, M. A., Díaz-Carrasco, P., & Ortega-Sánchez, M. 2018. Integrating complex numerical approaches into a user-friendly application for the management of coastal environments. *Science of The Total Environment*, 624, 979–990.
- Manca, E., Pascucci, V., Deluca, M., Cossu, A., & Andreucci, S. 2013. Shoreline evolution related to coastal development of a managed beach in Alghero, Sardinia, Italy. *Ocean & coastal management*, 85, 65–76.
- Masselink, G., & Hughes, M. G. 2003. An introduction to coastal processes and geomorphology. Oxford University Press Inc, p 2
- Masselink, G., & Pattiaratchi, C. B. 2001. Seasonal changes in beach morphology along the sheltered coastline of Perth, Western Australia. *Marine Geology*, 172(3–4), 243–263.
- Masselink, G., & Puleo, J. A. 2006. Swash-zone morphodynamics. *Continental Shelf Research*, 26(5), 661–680.
- Masselink, G., & Short, A. D. 1993. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. *Journal of Coastal Research*, 785–800.
- Masselink, G., Kroon, A., & Davidson-Arnott, R. G. D. 2006. Morphodynamics of intertidal bars in wave-dominated coastal settings — a review. *Geomorphology*, 73(1–2), 33–49.
- Masselink, G.; Auger, N.; Russell, P., and O’ hare, T., 2007. Short-term morphological change and sediment dynamics in the intertidal zone of a macrotidal beach. *Sedimentology*, 54(1), 39–53
- Micallef, A., and Williams, A. T., 2004, Application of a novel approach to beach classification in the Maltese Islands. *Ocean & Coastal Management*, 47(5), 225–242.
- Moore, L. J., Ruggiero, P., & List, J. H. 2006. Comparing mean high water and high water line shorelines: should proxy-datum offsets be

- incorporated into shoreline change analysis?. *Journal of Coastal Research*, 894–905.
- Moore, L.J., 2000. Shoreline mapping techniques. *Journal of Coastal Research* 16, 111–124.
- Nordstrom, K. F. 2000. *Beaches and dunes of developed coasts*. Cambridge University Press. p. 338.
- Olita, A., Cucco, A., Simeone, S., Ribotti, A., Fazioli, L., Sorgente, B., & Sorgente, R. 2012. Oil spill hazard and risk assessment for the shorelines of a Mediterranean coastal archipelago. *Ocean & Coastal Management*, 57, 44–52.
- Pais–Barbosa, J., Veloso–Gomes, F., and Taveira–Pinto, F., 2009, Portuguese northwest beach classification using aerial photographs and GIS tools. *Journal of Coastal Research*, 1552–1556.
- Pan, Y., Kuang, C., Gu, J., He, L., Zhang, Y., Yang, Y., .. & Zhang, J. 2014. Assessment of a measure for water exchange strengthening of artificial headland bays based on shoreline change and flushing time. *Journal of Coastal Research*, 30(3), 615–628.
- Passeri, D. L., Hagen, S. C., Medeiros, S. C., Bilskie, M. V., Alizad, K., & Wang, D. 2015. The dynamic effects of sea level rise on low-gradient coastal landscapes: A review. *Earth's Future*, 3(6), 159–181.
- Pena–Alonso, C., Fraile–Jurado, P., Hernandez–Calvento, L., Perez–Chacon, E., & Ariza, E. 2017. Measuring geomorphological vulnerability on beaches using a set of indicators (gvi): A tool for management. *Journal of environmental management*, 204, 230–245.
- Pian, S., Menier, D., & Sedrati, M. 2014. Analysis of morphodynamic beach states along the South Brittany coast. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 20(3), 261–274.
- Pusty, N.P., 2004, The coastal foredune: a morphological basis for regional coastal dune development, In Martinez, M.L. and Pusty, N.P(eds.), *Coastal Dunes: Ecology and Conservation*, Springer–Verlag, 11–27

- Ramsay, P. M., Kent, M., Reid, C. L., & Duckworth, J. C. 2006. Taxonomic, morphological and structural surrogates for the rapid assessment of vegetation. *Journal of Vegetation Science*, 17(6), 747–754.
- Scott, T., Masselink, G., & Russell, P. 2011. Morphodynamic characteristics and classification of beaches in England and Wales. *Marine Geology*, 286(1–4), 1–20.
- Scott, T. M., Russell, P., Masselink, G., & Wooler, A. 2009a. Rip current variability and hazard along a macro-tidal coast. *J. Coastal Res.*, SI, 56, 895–898.
- Scott, T., Russell, P., Masselink, G., Wooler, A., & Short, A. 2009b. High volume sediment transport and its implications for recreational beach risk. In *Coastal Engineering 2008: (In 5 Volumes)* pp. 4250–4262
- Short, A. D. 2003. Australia beach systems—the morphodynamics of wave through tide-dominated beach-dune systems. *Journal of Coastal Research*, 7–20.
- Short, A. D. 2006. Australian beach systems—nature and distribution. *Journal of Coastal Research*, 11–27.
- Short, A. D., & Trembanis, A. C. 2004. Decadal scale patterns in beach oscillation and rotation Narrabeen Beach, Australia—time series, PCA and wavelet analysis. *Journal of Coastal Research*, 523–532.
- Short, A. D., Bracs, M. A., & Turner, I. L. 2014. Beach oscillation and rotation: local and regional response at three beaches in southeast Australia. *Journal of Coastal Research*, 70(sp1), 712–717.
- Slymaker, O., Spencer, T., & Embleton-Hamann, C. (Eds). 2009. *Geomorphology and global environmental change*. Cambridge University Press. 160–161p
- Thomas, T., Phillips, M. R., Williams, A. T., & Jenkins, R. E. 2011. Short-term beach rotation, wave climate and the North Atlantic Oscillation (NAO). *Progress in physical geography*, 35(3), 333–352.

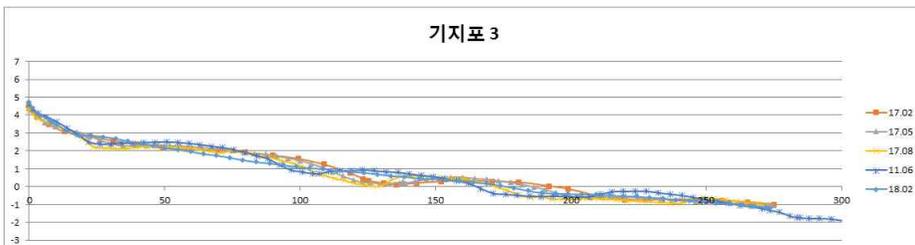
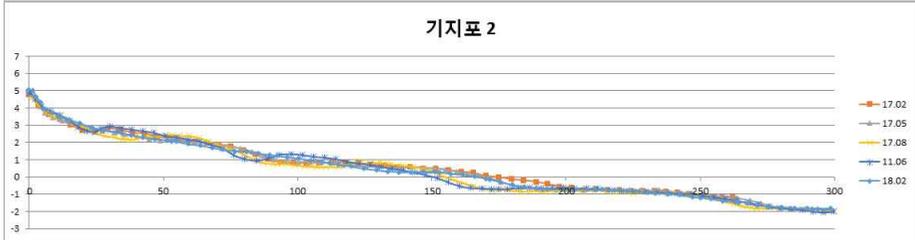
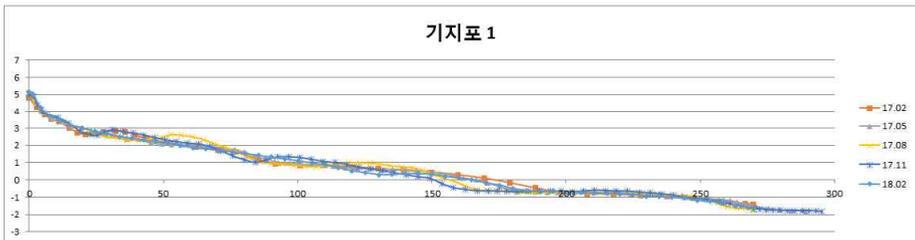
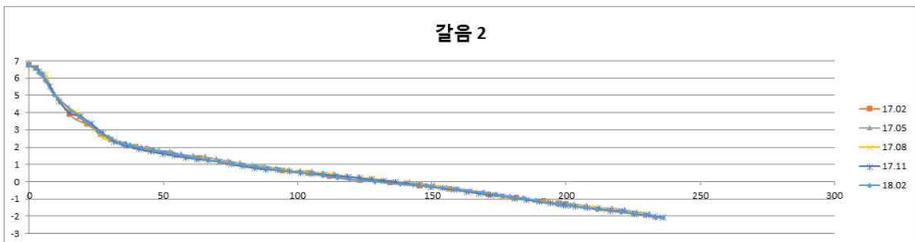
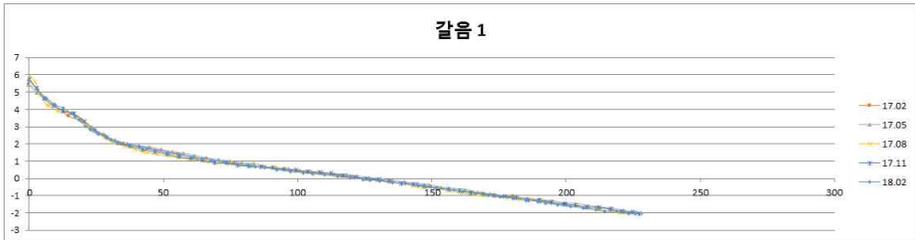
- Travers, A. 2007. Low-energy beach morphology with respect to physical setting: a case study from Cockburn Sound, Southwestern Australia. *Journal of Coastal Research*, 429-444.
- Van de Lageweg, W. I., Bryan, K. R., Coco, G., & Ruessink, B. G. 2013. Observations of shoreline-sandbar coupling on an embayed beach. *Marine Geology*, 344, 101-114.
- Virdis, S. G., Oggiano, G., & Disperati, L. 2012. A geomatics approach to multitemporal shoreline analysis in Western Mediterranean: the case of Platamona-Maritza beach (northwest Sardinia, Italy). *Journal of Coastal Research*, 28(3), 624-640.
- Zoulas, J. G., & Orme, A. R. 2007. Multidecadal-scale beach changes in the Zuma littoral cell, California. *Physical Geography*, 28(4), 277-300.
- 고희중, 방익찬, & 김태희. 2005. 한반도 주변 해역 5 개 정점에서 파랑과 바람의 관계. *한국지구과학회지*, 26(3), 240-252.
- 국가 법령 정보 센터, “해수욕장의 이용 및 관리에 관한 법률”, <http://www.law.go.kr/LSW/main.html>
- 국립해양조사원 실시간 해양 관측 정보시스템 기본수준점 성과표
권혁재, 1981, “태안반도와 안면도의 해안지형”, 고려대학교 사대논문집, 6, 261-287
- 가대암 등표 <https://data.kma.go.kr/data/sea/selectRhRltmList.do?pgmNo=53>
- 김백운, 윤공현, & 이창경. 2013. 항공사진을 이용한 방포항 인근 해변의 장기간 해안선 변화 분석. *대한원격탐사학회지*, 29(5), 477-486.
- 김장수, 장동호, 2011, 항공사진과 기준목 측정자료를 이용한 안면도 바람아래 해변의 시계열 변화 분석, *한국지형학회지*, 11(2), 39-51
- 김찬웅, 2012. 해변의 단면 변화에 관한 연구 : 백사장 해수욕장을 사례로, 서울대학교 석사학위 논문
- 김찬웅, 신영호, & 유근배. 2015. 겨울철 서해안 사취형 해변의 지형과 퇴적물 특성의 변화. *국토지리학회지* 제, 49(1), 117-131.
- 김태호, 2003, 제주도 해안지대의 지형분류. *한국지형학회지*, 10(1), 33-47.
- 노형진. 2010. Excel 및 SPSS 를 활용한 다변량분석 원리와 실천. 서울: 한울출판사. p 469

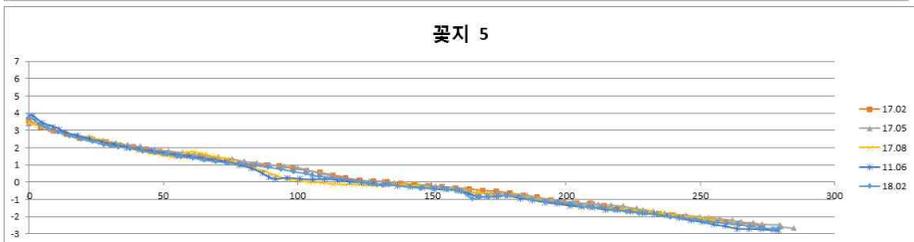
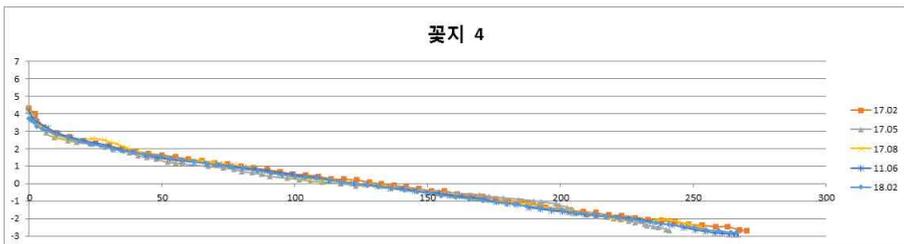
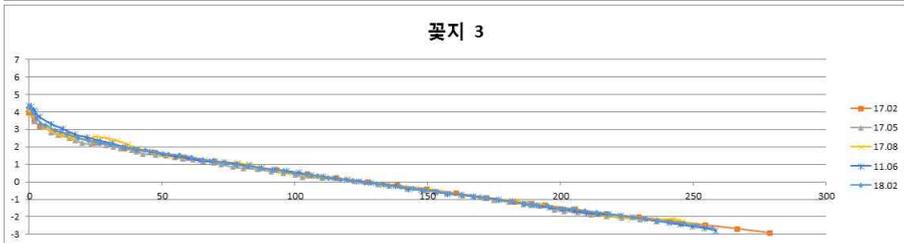
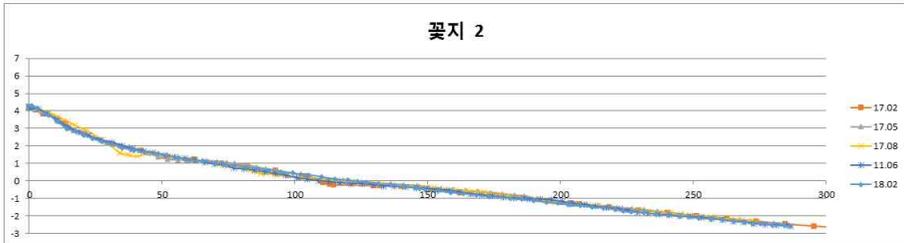
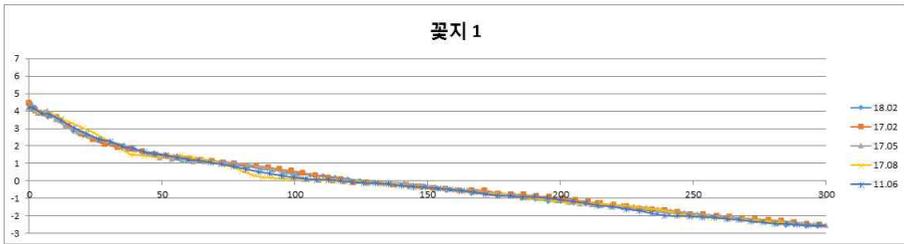
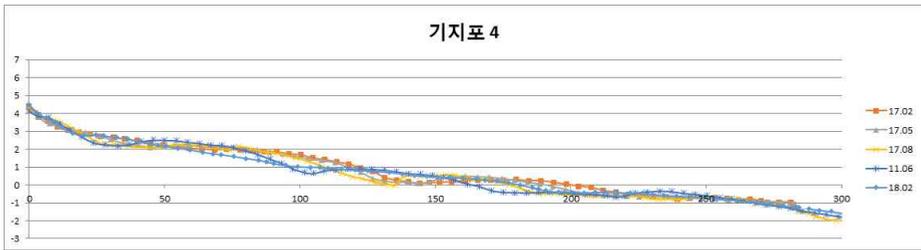
- 류호상, 2010. 세포자동자 기반 수치모형을 이용한 해빈-사구 단면의 중규모 지형변화 탐구 : 모의실험과 사례를 중심으로, 서울대학교 박사학위 논문
- 박지훈, 2011, 한국의 제 4기 환경연구, 한국지형학회지, 18(4), 97-1269
- 배선한, 2017, 해역별 해수욕장 인명피해 위험도 분석 및 평가, 성균관대학교 석사학위 논문
- 성효현·방경화, 2005, 만리포 해빈퇴적물의 동절기 퇴적환경, 한국지형학회지 122):87-98.
- 소광석·양우현·권이균·강솔잎, 2010, 고창군 동호 해빈 표층 퇴적물의 계절 변화, 한국지구과학회지 31(7):708-719.
- 순천향대학교 산학협력단, 2016, 태안군 해수욕장 이용 및 관광활성화 방안
- 양병모, 2014, 해수욕장 익사 사고 관리를 위한 정량적 위험 평가, 성균관대학교 석사학위 논문
- 양병모, 이주용, & 이정렬. 2014. 호주 연안 위험도 평가 방법의 국내 해수욕장 적용. 한국연안방재학회지, 1, 105-112.
- 오택섭 & 최현철. 2003. 사회과학데이터분석법. 나남출판. 59
- 외연도 파고 자료 <http://www.khoa.go.kr/koofs/kor/tide/tbm.do>
- 이연규, 신현옥, 이종섭, 박일흠, & 최정민. 2005. 태풍에 의한 해빈 퇴적물 조성 및 지형 변화 (동해, 나아해빈). 한국해양환경·에너지학회지, 8(3), 122-133.
- 정종관·김종렬·성기준·황경엽, 2008, 유류오염 실태조사 및 환경생태 복원방안 연구 - 허베이 스피리트호 유류유출 사고 사례 -, 충남발전 연구원, 83-84, 88p,
- 국립해양조사원 조위자료 <http://www.khoa.go.kr/koofs/kor/tide/tide.do>
- 추용식·권수재·박장준·박용안, 1996, 한국 서해중부 해빈에서의 퇴적작용의 계절변화, 해양연구 18(1):37-45.
- 하슬렛, S., 김성환·손명원 율김, 2010, 해안시스템, 푸른길, 31-35p
- 한국 라이프세이빙 소사이어티, 2015, “해수욕장 기본계획(안전관리에 관한 사항) 수립” 에 관한 연구용역 보고서, 국민안전처, pp. 60-74
- 한국지질자원연구원 지질정보검색시스템 홈페이지 <https://mgeo.kigam.re.kr/>
- 해양경찰청, 2018, 해수욕장 안전관리에 관한 지침, 해양경찰청
- 해양수산부, 1997, 장기 파랑 산출 자료집, 해양수산부, p 13.
- 해양수산부, 2005, 연안침식 모니터링 체계구축(Ⅲ), 해양수산부, pp 58-59.

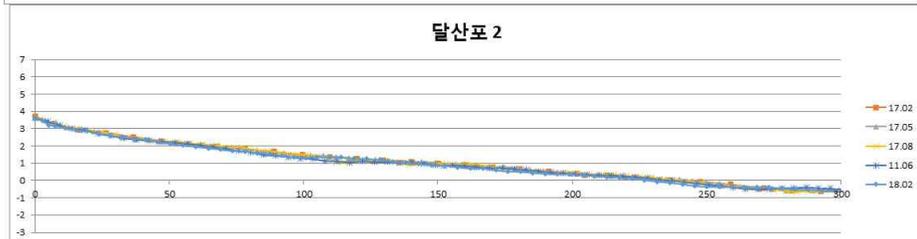
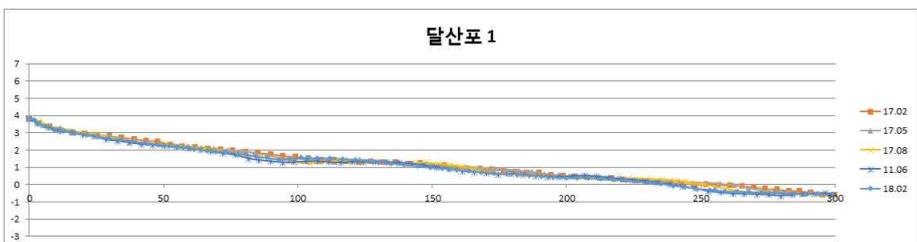
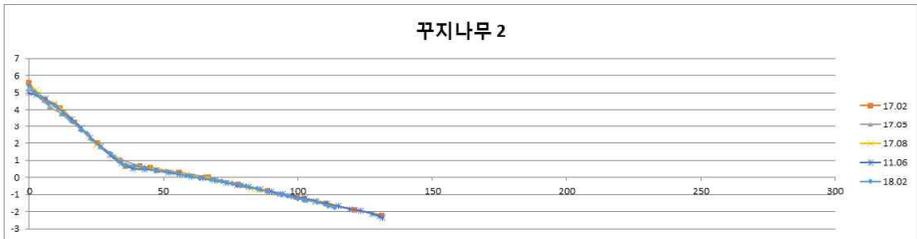
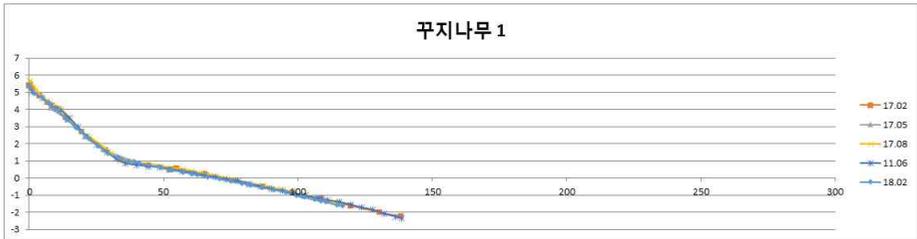
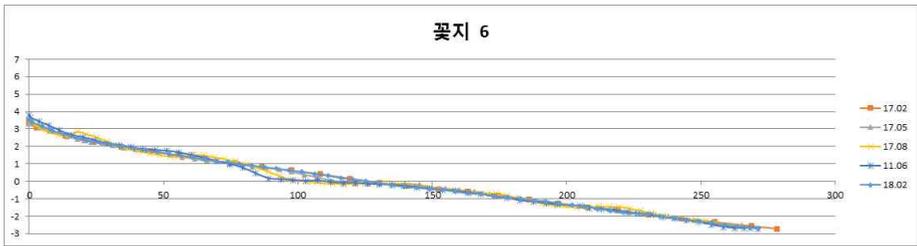
w해양수산부, 2017, 제1차 해수욕장 기본계획, 해양수산부, p 7.

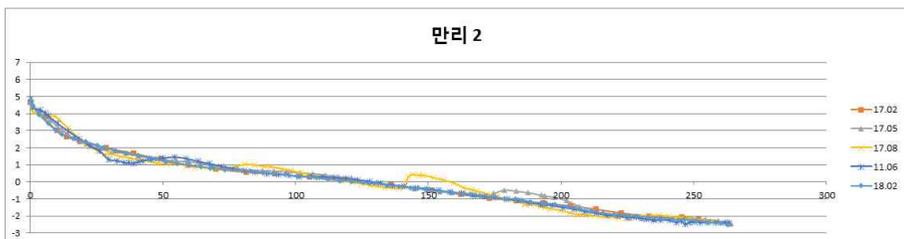
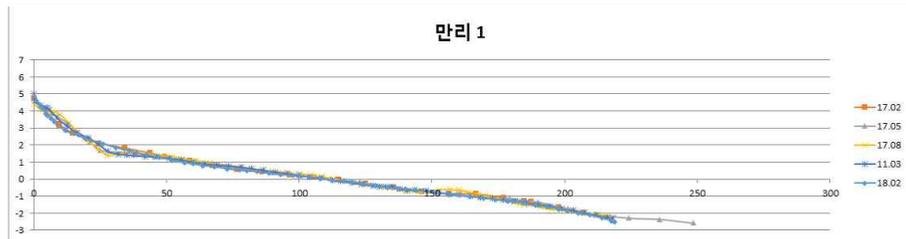
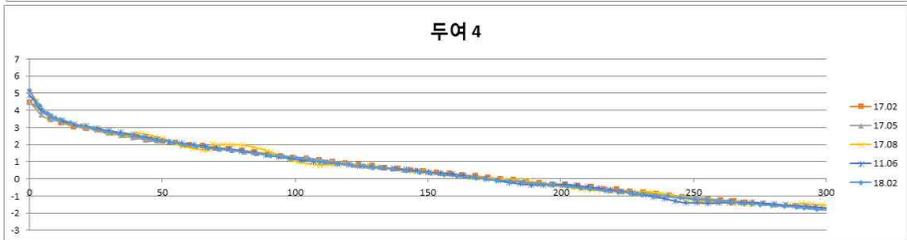
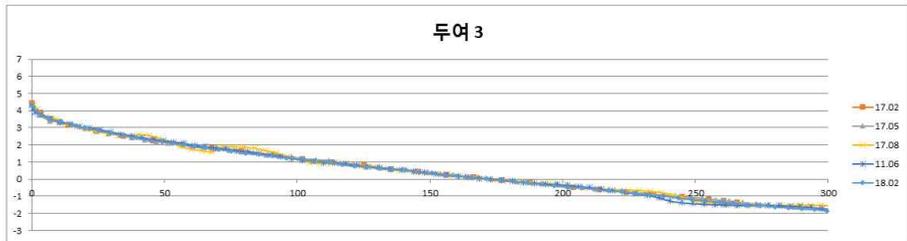
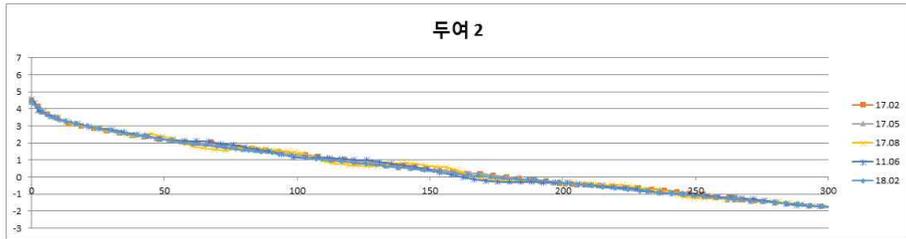
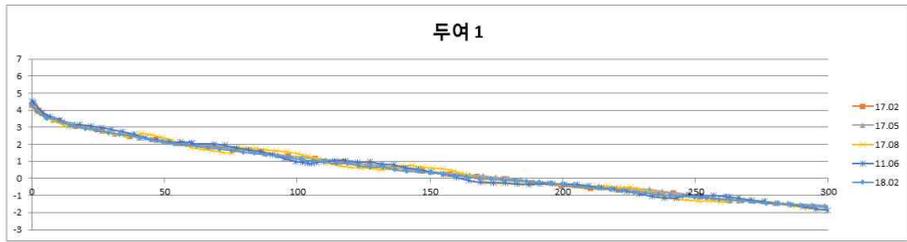
허현수 · 노진관 · 김덕인 · 위광재, 2011, 고해상도 항공 초분광영상을 이용한
해안선 재질분류. 한국측량학회 학술대회자료집, 343-349.

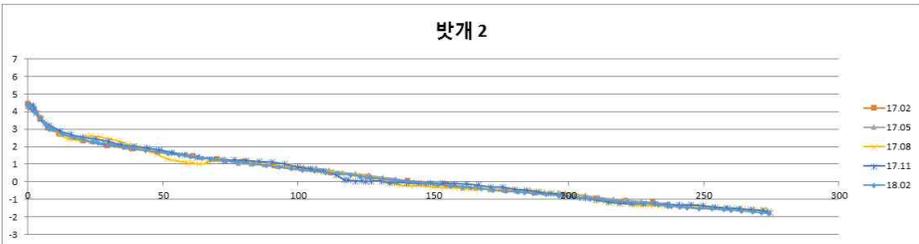
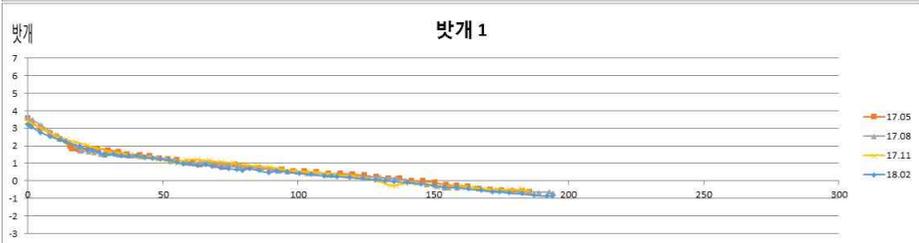
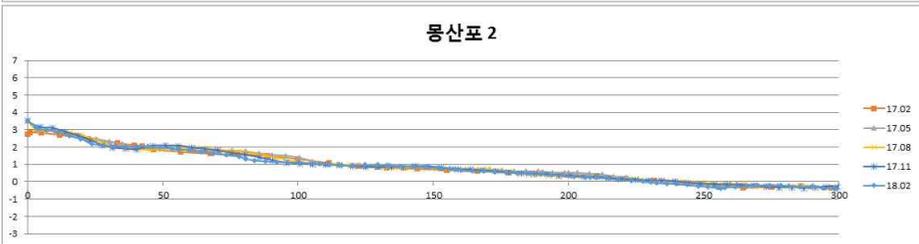
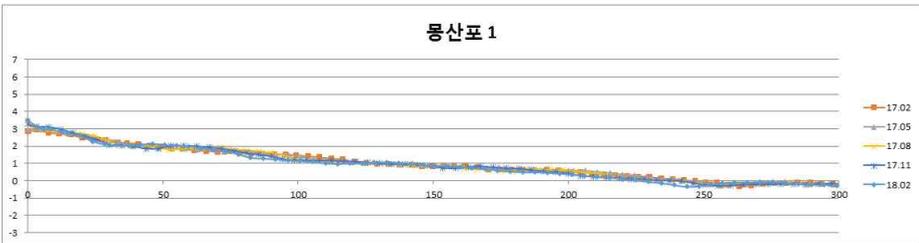
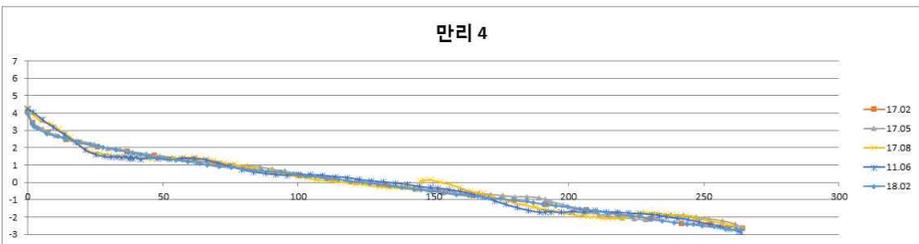
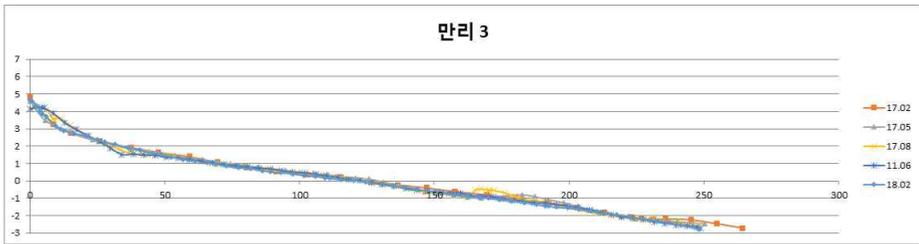
부록 1. 개별 해빈 단면

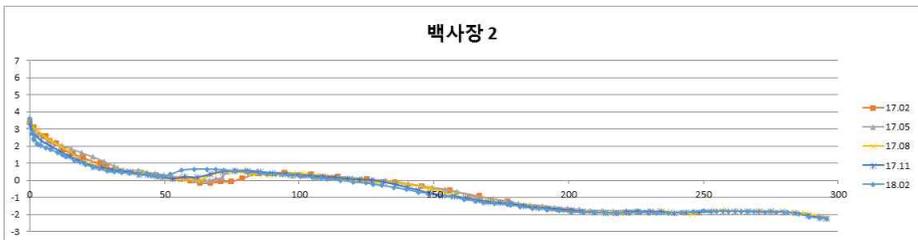
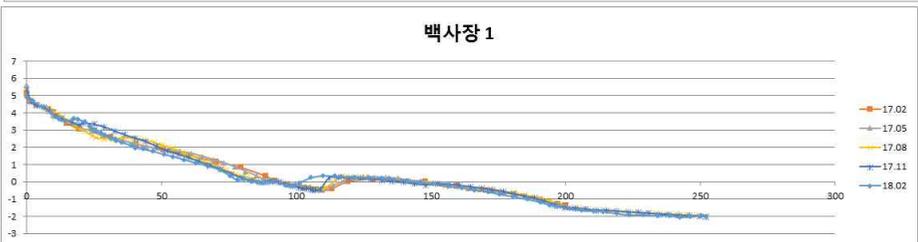
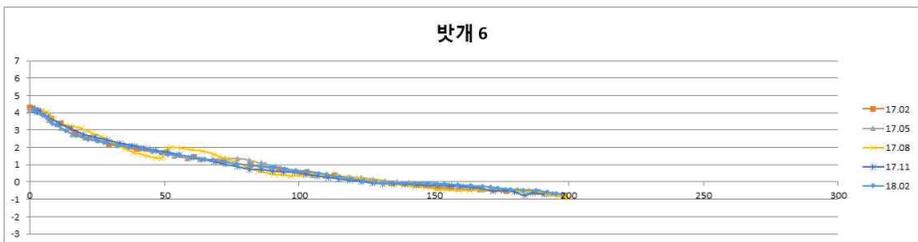
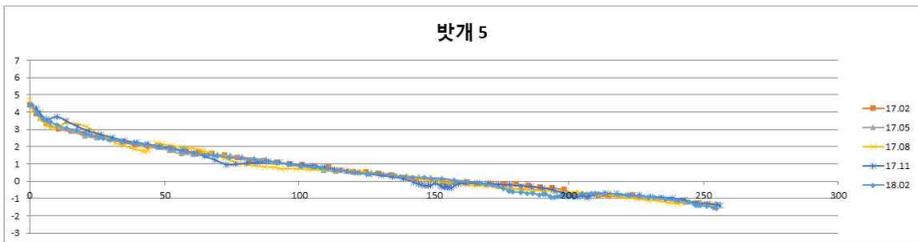
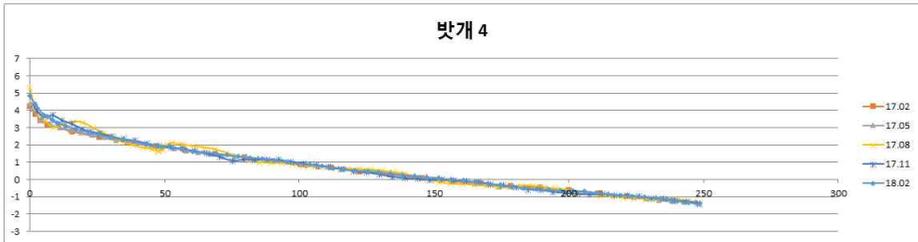
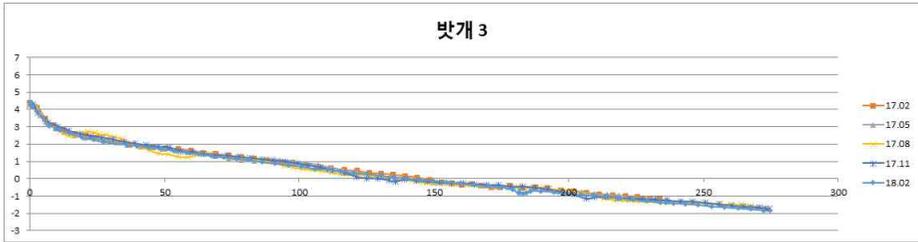


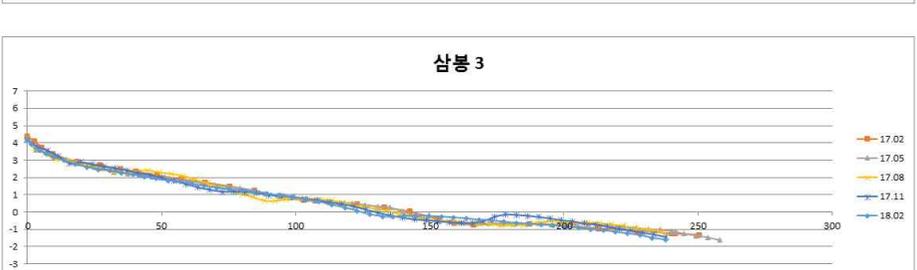
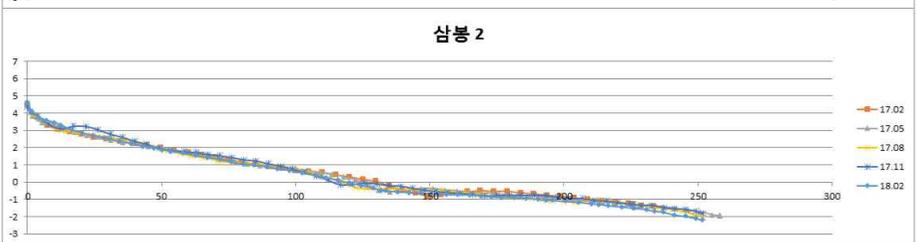
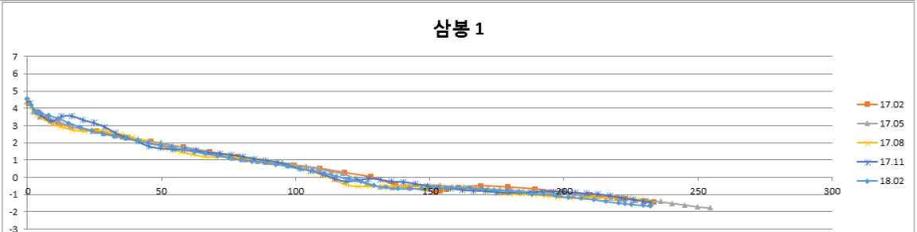
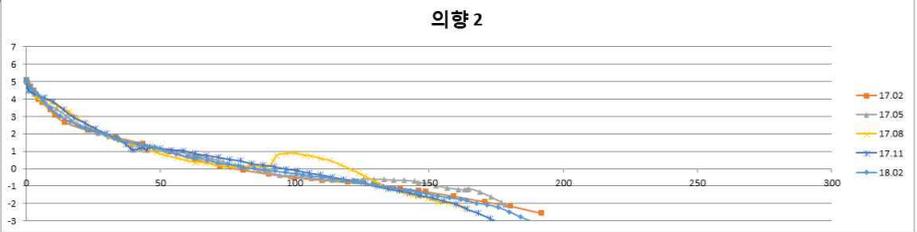
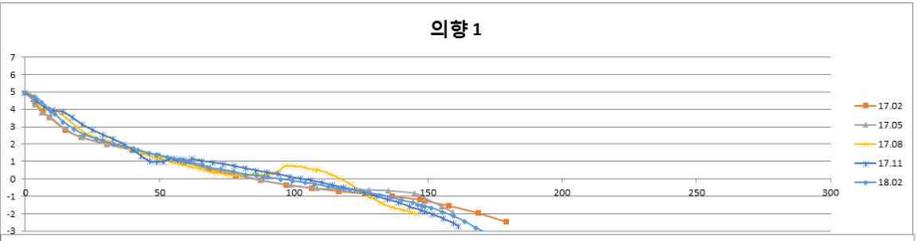
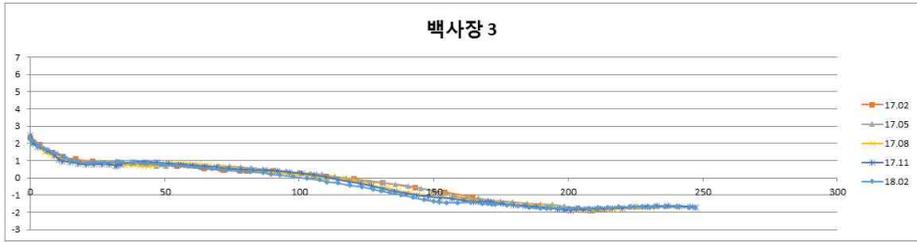


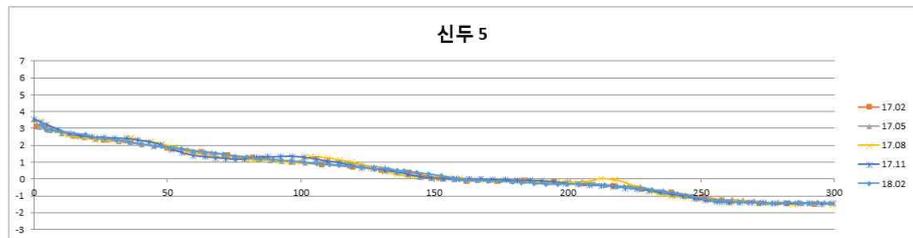
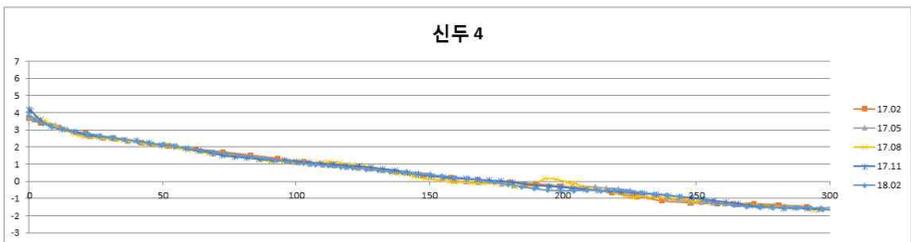
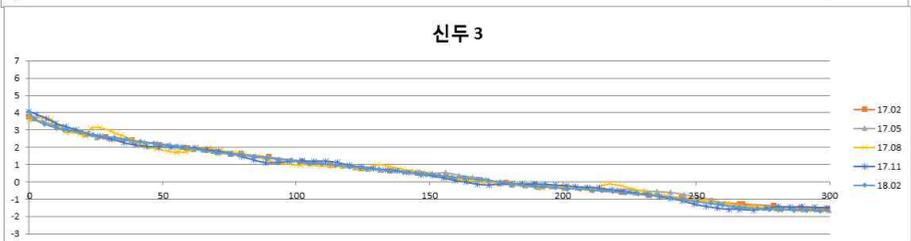
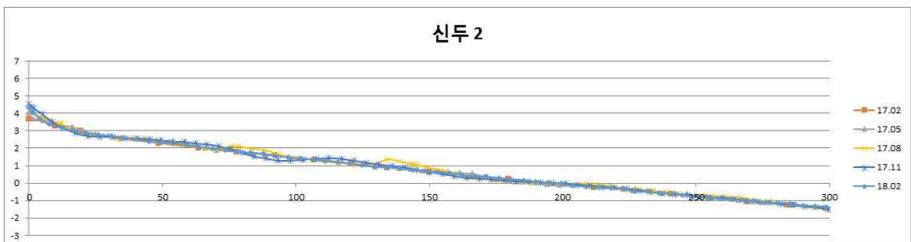
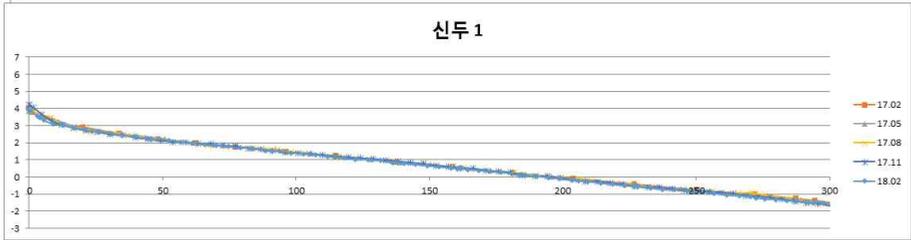
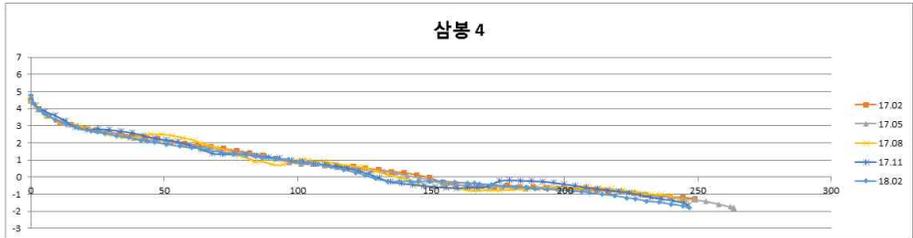


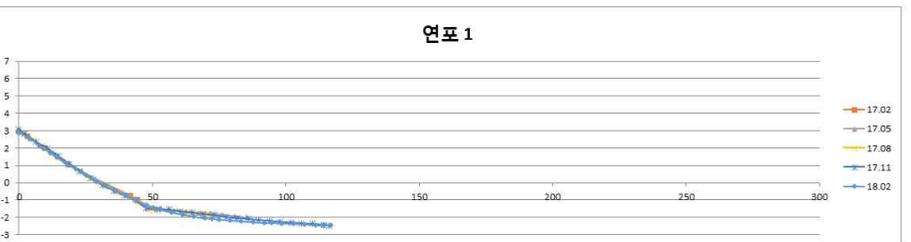
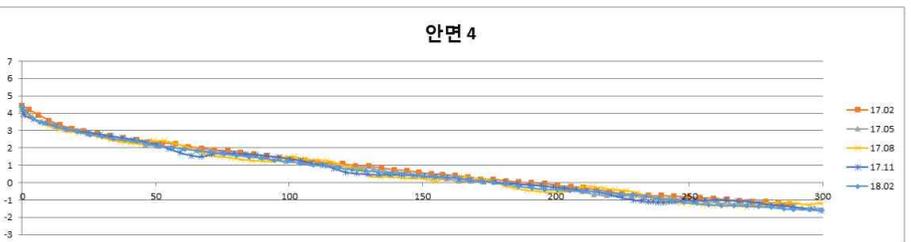
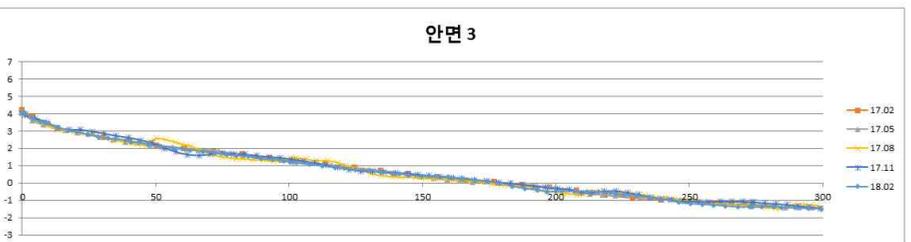
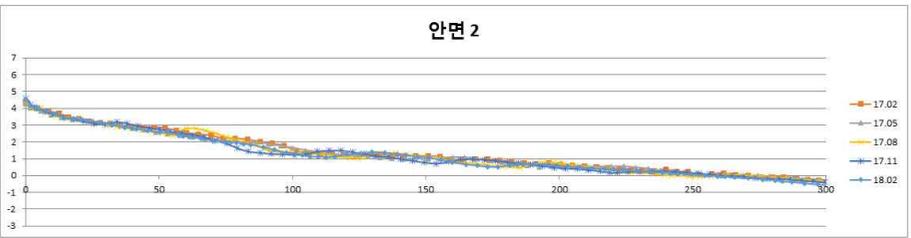
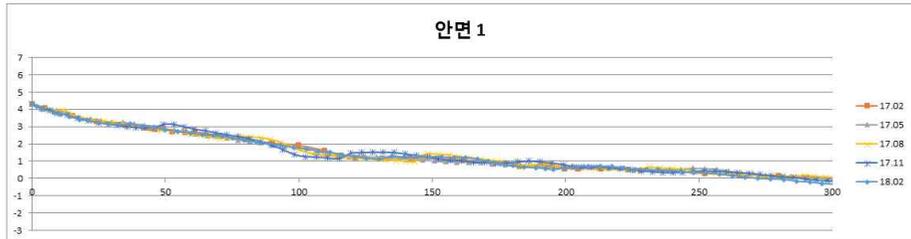
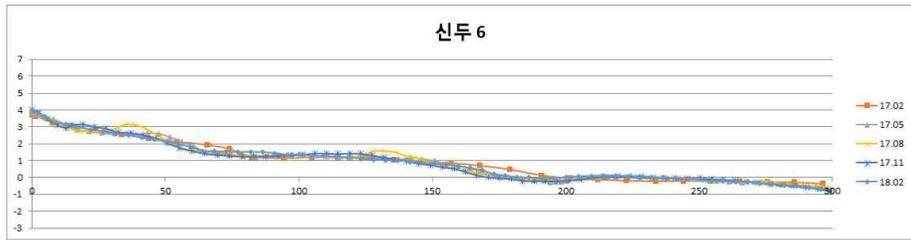


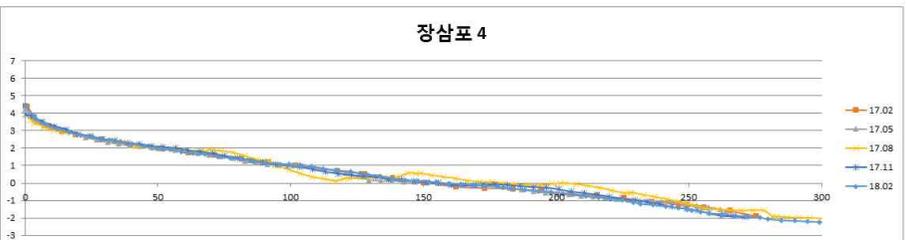
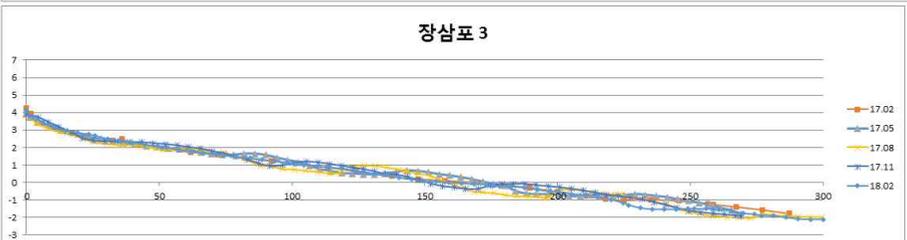
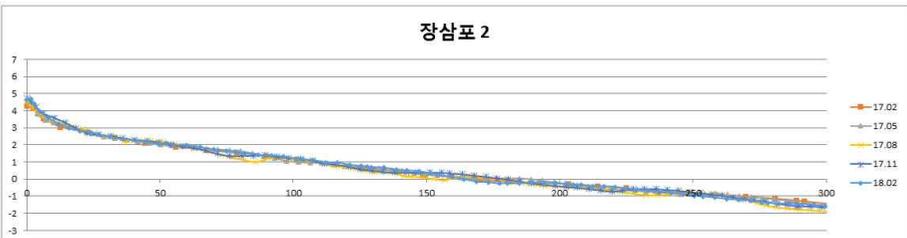
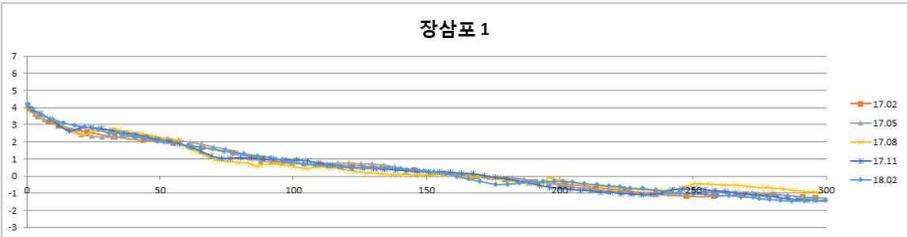
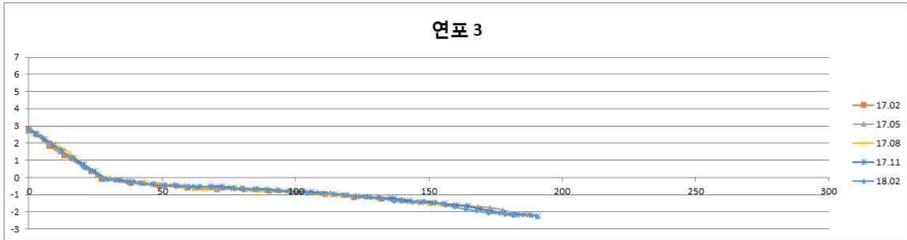
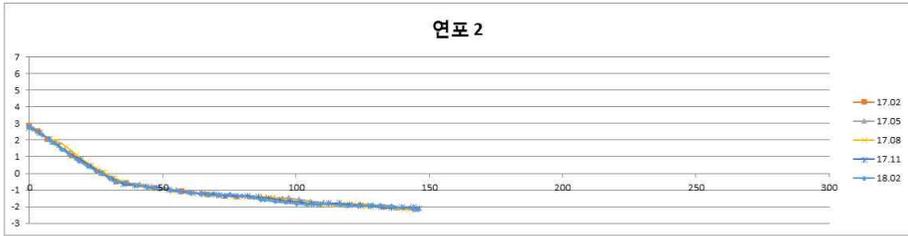


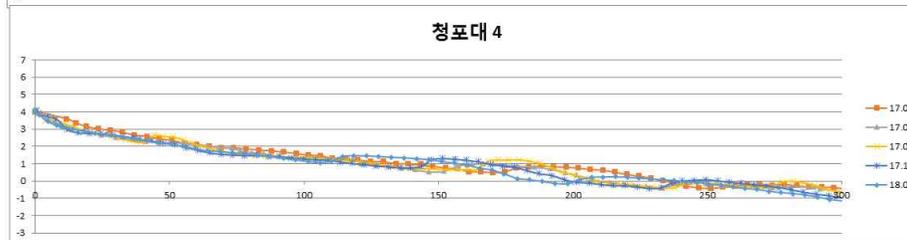
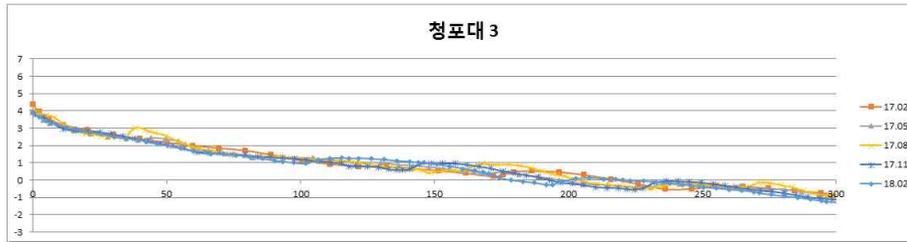
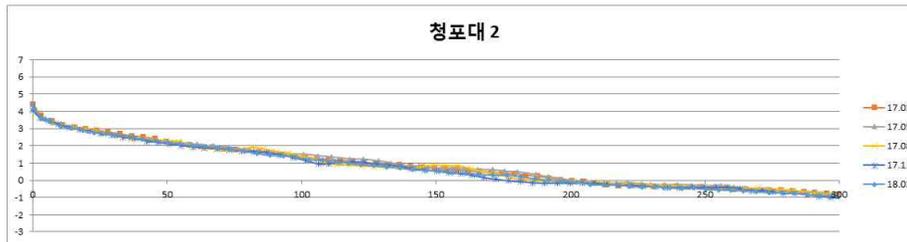
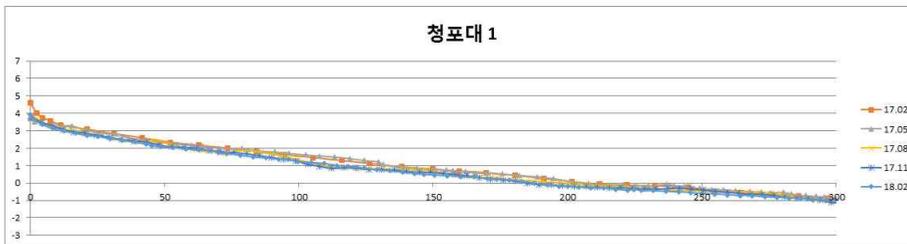
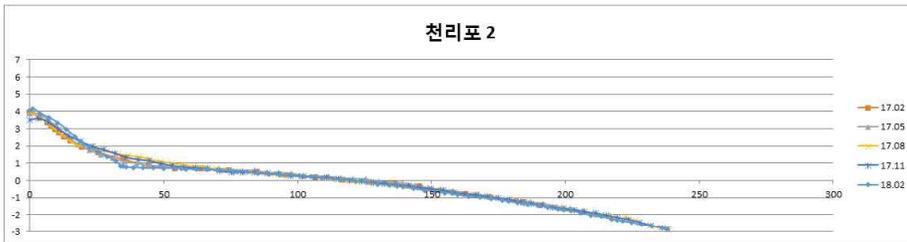
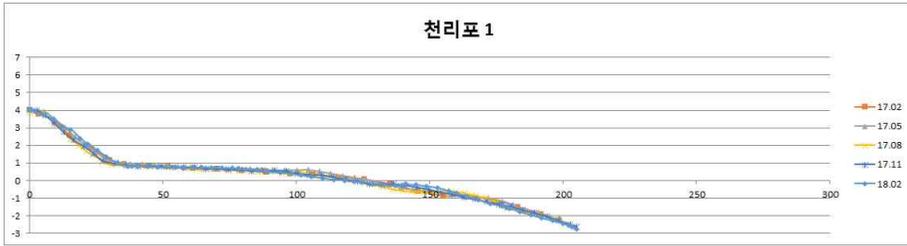


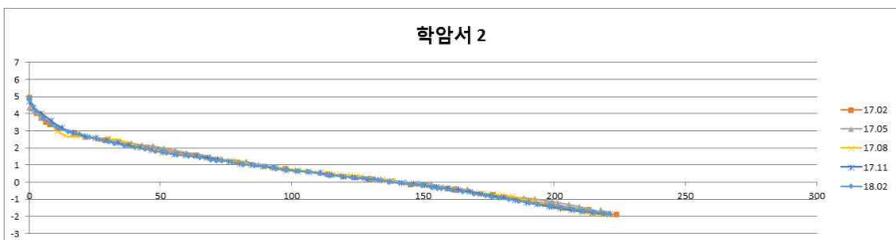
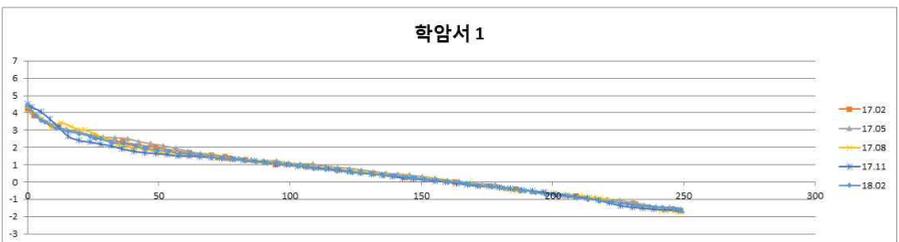
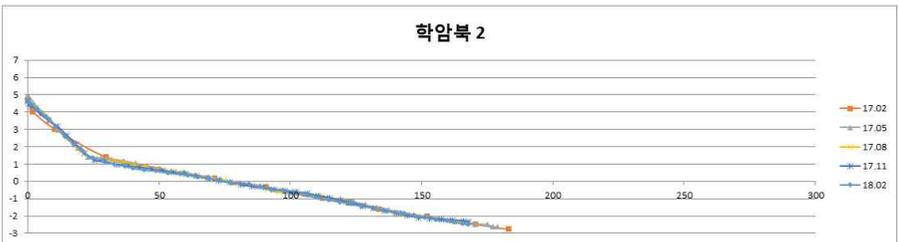
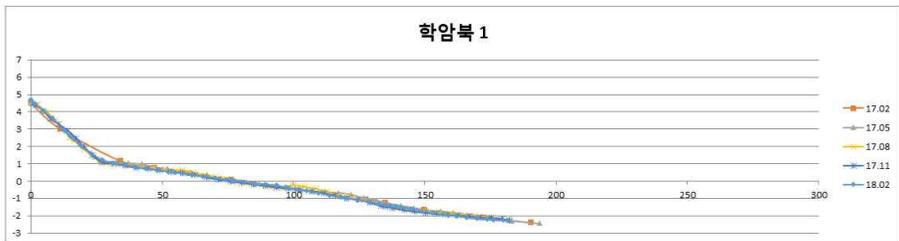
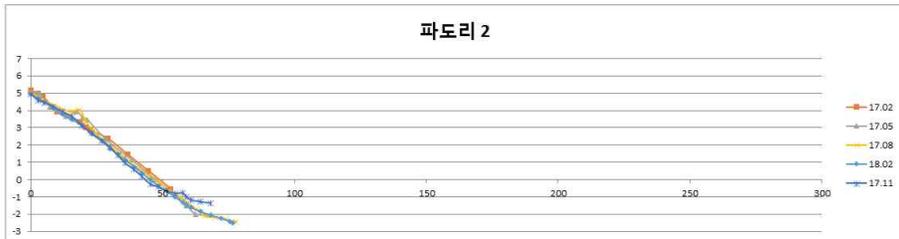
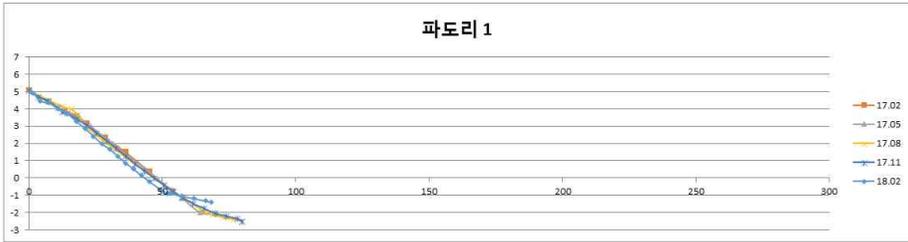












부록 2. 개별 해빈 오차 분석(1차 분석)⁹¹⁾

연도	위치	디지털정 에러	픽셀 에러	기하보정 에러	파랑 에러	조석 에러	계절적 에러	총 에러
1967	꾸지	0.77	0.53	0.58	0.31	10.72	2.35	11.03
1977	꾸지	0.27	0.42	0.56	0.29	10.72	2.35	11.00
1984	꾸지	0.32	0.42	0.38	0.30	10.72	2.35	11.00
1996	꾸지	0.31	0.53	0.57	0.31	10.72	2.35	11.01
2006	꾸지	0.46	0.42	0.49	0.31	10.72	2.35	11.01
2016	꾸지	0.28	0.51	0.00	0.29	10.72	2.35	10.99
1967	학암북	0.42	0.53	0.53	0.27	17.64	2.06	17.78
1977	학암북	0.74	0.42	0.59	0.26	17.64	2.06	17.79
1984	학암북	0.47	0.42	0.56	0.26	17.64	2.06	17.78
1996	학암북	0.61	0.53	0.58	0.27	17.64	2.06	17.79
2006	학암북	0.23	0.42	0.60	0.27	17.64	2.06	17.78
2016	학암북	0.49	0.51	0.00	0.26	17.64	2.06	17.78
1967	학암서	0.76	0.53	0.53	0.42	19.08	1.96	19.21
1977	학암서	0.52	0.42	0.60	0.48	19.08	1.96	19.20
1984	학암서	0.35	0.42	0.56	0.46	19.08	1.96	19.20
1998	학암서	0.46	0.42	0.58	0.42	19.08	1.96	19.20
2006	학암서	0.19	0.42	0.60	0.42	19.08	1.96	19.20
2016	학암서	0.66	0.51	0.00	0.48	19.08	1.96	19.20
1967	신두리	1.39	0.53	0.60	0.27	36.48	1.45	36.55
1977	신두리	0.51	0.42	0.43	0.32	36.48	1.45	36.52
1984	신두리	0.34	0.42	0.57	0.28	36.48	1.45	36.52
1998	신두리	0.45	0.42	0.54	0.27	36.48	1.45	36.52
2006	신두리	0.27	0.42	0.59	0.27	36.48	1.45	36.52
2016	신두리	0.17	0.51	0.00	0.32	36.48	1.45	36.52
1967	의항	0.65	0.53	0.60	0.47	15.40	2.52	15.65
1977	의항	0.64	0.42	0.50	0.38	15.40	2.52	15.64
1984	의항	0.54	0.42	0.56	0.46	15.40	2.52	15.64
1998	의항	0.37	0.42	0.59	0.47	15.40	2.52	15.64
2006	의항	0.26	0.42	0.57	0.47	15.40	2.52	15.63
2016	의항	0.15	0.51	0.00	0.38	15.40	2.52	15.62
1967	파도리	0.18	0.53	0.52	1.45	6.32	6.89	9.49
1977	파도리	0.17	0.42	0.58	1.72	6.32	6.89	9.54
1984	파도리	0.34	0.42	0.60	1.45	6.32	6.89	9.50
1998	파도리	0.30	0.42	0.57	1.45	6.32	6.89	9.49
2007	파도리	0.30	0.42	0.60	1.45	6.32	6.89	9.50
2016	파도리	0.27	0.51	0.00	1.72	6.32	6.89	9.52
1967	갈음이	0.16	0.53	0.52	0.28	17.44	3.68	17.84

91) 단위는 모두 m 이다.

1977	갈음이	0.19	0.42	0.56	0.30	17.44	3.68	17.84
1984	갈음이	0.33	0.42	0.59	0.28	17.44	3.68	17.84
1998	갈음이	0.23	0.42	0.52	0.30	17.44	3.68	17.84
2007	갈음이	0.44	0.42	0.59	0.28	17.44	3.68	17.85
2016	갈음이	0.48	0.51	0.00	0.30	17.44	3.68	17.84
1967	연포	0.29	0.53	0.56	0.64	11.42	4.77	12.41
1977	연포	0.30	0.42	0.56	0.64	11.42	4.77	12.41
1984	연포	0.23	0.42	0.59	0.64	11.42	4.77	12.41
1998	연포	0.12	0.42	0.58	0.64	11.42	4.77	12.41
2007	연포	0.21	0.42	0.59	0.64	11.42	4.77	12.41
2016	연포	0.35	0.51	0.00	0.64	11.42	4.77	12.40
1967	몽산포	0.32	0.53	0.60	0.31	62.72	2.67	62.79
1977	몽산포	0.13	0.42	0.60	0.36	62.72	2.67	62.78
1984	몽산포	0.40	0.42	0.57	0.31	62.72	2.67	62.78
1998	몽산포	0.14	0.42	0.59	0.36	62.72	2.67	62.78
2007	몽산포	0.19	0.42	0.52	0.31	62.72	2.67	62.78
2016	몽산포	0.08	0.51	0.00	0.36	62.72	2.67	62.78
1967	달산포	0.49	0.53	0.60	0.39	50.59	2.63	50.67
1977	달산포	0.15	0.42	0.60	0.45	50.59	2.63	50.66
1984	달산포	0.29	0.42	0.59	0.39	50.59	2.63	50.66
1998	달산포	0.12	0.42	0.59	0.45	50.59	2.63	50.66
2007	달산포	0.14	0.42	0.52	0.39	50.59	2.63	50.66
2016	달산포	0.08	0.51	0.00	0.45	50.59	2.63	50.66
1967	청포대	0.25	0.53	0.59	0.32	40.87	2.71	40.96
1977	청포대	0.26	0.42	0.59	0.41	40.87	2.71	40.96
1984	청포대	0.21	0.42	0.59	0.32	40.87	2.71	40.96
1998	청포대	0.17	0.42	0.47	0.41	40.87	2.71	40.96
2007	청포대	0.17	0.42	0.55	0.32	40.87	2.71	40.96
2016	청포대	0.06	0.51	0.00	0.41	40.87	2.71	40.96
1967	백사장	0.37	0.53	0.58	0.33	24.73	3.03	24.93
1977	백사장	0.10	0.42	0.60	0.41	24.73	3.03	24.93
1984	백사장	0.24	0.42	0.51	0.33	24.73	3.03	24.92
1998	백사장	0.63	0.42	0.54	0.41	24.73	3.03	24.93
2007	백사장	0.21	0.42	0.59	0.33	24.73	3.03	24.93
2016	백사장	0.18	0.51	0.00	0.41	24.73	3.03	24.92
1967	삼봉	0.07	0.53	0.51	0.51	28.77	2.23	28.87
1977	삼봉	0.36	0.42	0.60	0.44	28.77	2.23	28.87
1984	삼봉	0.39	0.42	0.57	0.51	28.77	2.23	28.87
1998	삼봉	0.19	0.42	0.54	0.44	28.77	2.23	28.86
2007	삼봉	0.40	0.42	0.59	0.51	28.77	2.23	28.87
2016	삼봉	0.39	0.51	0.00	0.44	28.77	2.23	28.86
1967	기지포	0.67	0.53	0.51	0.33	28.77	2.61	28.90

1977	기지포	0.20	0.42	0.60	0.53	28.77	2.61	28.90
1984	기지포	0.35	0.42	0.57	0.33	28.77	2.61	28.90
1998	기지포	0.24	0.42	0.54	0.53	28.77	2.61	28.90
2007	기지포	0.27	0.42	0.59	0.33	28.77	2.61	28.90
2016	기지포	0.40	0.51	0.00	0.53	28.77	2.61	28.90
1967	안면	0.51	0.53	0.51	0.47	34.10	4.27	34.38
1977	안면	0.46	0.42	0.60	0.52	34.10	4.27	34.38
1984	안면	0.45	0.42	0.57	0.47	34.10	4.27	34.38
1998	안면	0.54	0.42	0.56	0.47	34.10	4.27	34.38
2007	안면	0.62	0.42	0.47	0.47	34.10	4.27	34.38
2016	안면	0.29	0.51	0.00	0.52	34.10	4.27	34.37
1967	두여	0.23	0.53	0.51	0.33	34.10	2.64	34.21
1977	두여	0.31	0.42	0.60	0.36	34.10	2.64	34.21
1984	두여	0.46	0.42	0.57	0.33	34.10	2.64	34.21
1998	두여	0.45	0.42	0.56	0.33	34.10	2.64	34.21
2007	두여	0.32	0.42	0.47	0.33	34.10	2.64	34.21
2016	두여	0.15	0.51	0.00	0.36	34.10	2.64	34.21
1967	밭개	0.43	0.53	0.59	0.39	28.44	1.95	28.52
1977	밭개	0.19	0.42	0.59	0.33	28.44	1.95	28.52
1984	밭개	0.09	0.42	0.52	0.39	28.44	1.95	28.52
1998	밭개	0.10	0.42	0.56	0.39	28.44	1.95	28.52
2007	밭개	0.14	0.42	0.47	0.39	28.44	1.95	28.52
2016	밭개	0.19	0.51	0.00	0.33	28.44	1.95	28.51
1967	꽃지	0.33	0.53	0.59	0.44	25.44	3.03	25.63
1977	꽃지	0.23	0.42	0.50	0.50	25.44	3.03	25.63
1986	꽃지	0.14	0.21	0.49	0.50	25.44	3.03	25.63
1998	꽃지	0.23	0.42	0.36	0.44	25.44	3.03	25.63
2007	꽃지	0.19	0.42	0.49	0.44	25.44	3.03	25.63
2016	꽃지	0.19	0.51	0.00	0.44	25.44	3.03	25.62
1967	장삼포	0.20	0.53	0.58	0.29	32.59	3.67	32.81
1977	장삼포	0.28	0.42	0.53	0.25	32.59	3.67	32.81
1986	장삼포	0.18	0.21	0.57	0.29	32.59	3.67	32.81
1998	장삼포	0.28	0.42	0.47	0.29	32.59	3.67	32.81
2007	장삼포	0.21	0.42	0.57	0.29	32.59	3.67	32.81
2016	장삼포	0.33	0.51	0.00	0.25	32.59	3.67	32.81

부록 3. 개별 해빈 오차 분석(2차 분석)⁹²⁾

연도	위치	디지털타이징 에러	픽셀 에러	기하보정 에러	파랑 에러	인천조위 보정 에러	총 에러
1967	꾸지	0.77	0.53	0.58	0.31	0.90	1.45
1977	꾸지	0.27	0.42	0.56	0.29	0.71	1.08
1984	꾸지	0.32	0.42	0.38	0.30	0.59	0.93
1996	꾸지	0.31	0.53	0.57	0.31	0.00	0.89
2006	꾸지	0.46	0.42	0.49	0.31	0.00	0.85
2016	꾸지	0.28	0.51	0.00	0.29	0.00	0.65
1967	학암북	0.42	0.53	0.53	0.27	0.92	1.29
1977	학암북	0.74	0.42	0.59	0.26	0.76	1.32
1984	학암북	0.47	0.42	0.56	0.26	0.77	1.17
1996	학암북	0.61	0.53	0.58	0.27	0.00	1.03
2006	학암북	0.23	0.42	0.60	0.27	0.00	0.81
2016	학암북	0.49	0.51	0.00	0.26	0.00	0.75
1967	학암서	0.76	0.53	0.53	0.42	1.35	1.77
1977	학암서	0.52	0.42	0.60	0.48	1.30	1.66
1984	학암서	0.35	0.42	0.56	0.46	1.28	1.57
1998	학암서	0.46	0.42	0.58	0.42	0.00	0.95
2006	학암서	0.19	0.42	0.60	0.42	0.00	0.87
2016	학암서	0.66	0.51	0.00	0.48	0.00	0.96
1967	신두리	1.39	0.53	0.60	0.27	1.96	2.55
1977	신두리	0.51	0.42	0.43	0.32	1.94	2.12
1984	신두리	0.34	0.42	0.57	0.28	1.76	1.94
1998	신두리	0.45	0.42	0.54	0.27	0.00	0.86
2006	신두리	0.27	0.42	0.59	0.27	0.00	0.82
2016	신두리	0.17	0.51	0.00	0.32	0.00	0.62
1967	의항	0.65	0.53	0.60	0.47	1.18	1.63
1977	의항	0.64	0.42	0.50	0.38	0.82	1.29
1984	의항	0.54	0.42	0.56	0.46	0.68	1.20
1998	의항	0.37	0.42	0.59	0.47	0.00	0.94
2006	의항	0.26	0.42	0.57	0.47	0.00	0.89
2016	의항	0.15	0.51	0.00	0.38	0.00	0.66
1967	파도리	0.18	0.53	0.52	1.45	1.26	2.07
1977	파도리	0.17	0.42	0.58	1.72	1.25	2.25
1984	파도리	0.34	0.42	0.60	1.45	0.99	1.93
1998	파도리	0.30	0.42	0.57	1.45	0.00	1.65
2007	파도리	0.30	0.42	0.60	1.45	1.01	1.94
2016	파도리	0.27	0.51	0.00	1.72	0.00	1.82
1967	갈음이	0.16	0.53	0.52	0.28	1.29	1.53

92) 단위는 모두 m 이다.

1977	갈음이	0.19	0.42	0.56	0.30	1.17	1.41
1984	갈음이	0.33	0.42	0.59	0.28	1.02	1.33
1998	갈음이	0.23	0.42	0.52	0.30	0.00	0.77
2007	갈음이	0.44	0.42	0.59	0.28	1.04	1.37
2016	갈음이	0.48	0.51	0.00	0.30	0.00	0.76
1967	연포	0.29	0.53	0.56	0.64	1.18	1.58
1977	연포	0.30	0.42	0.56	0.64	0.99	1.40
1984	연포	0.23	0.42	0.59	0.64	0.93	1.36
1998	연포	0.12	0.42	0.58	0.64	0.00	0.97
2007	연포	0.21	0.42	0.59	0.64	0.95	1.37
2016	연포	0.35	0.51	0.00	0.64	0.00	0.89
1967	몽산포	0.32	0.53	0.60	0.31	2.80	2.95
1977	몽산포	0.13	0.42	0.60	0.36	2.73	2.85
1984	몽산포	0.40	0.42	0.57	0.31	2.49	2.64
1998	몽산포	0.14	0.42	0.59	0.36	0.00	0.83
2007	몽산포	0.19	0.42	0.52	0.31	1.59	1.76
2016	몽산포	0.08	0.51	0.00	0.36	0.00	0.63
1967	달산포	0.49	0.53	0.60	0.39	2.80	2.98
1977	달산포	0.15	0.42	0.60	0.45	2.73	2.86
1984	달산포	0.29	0.42	0.59	0.39	2.21	2.38
1998	달산포	0.12	0.42	0.59	0.45	0.00	0.87
2007	달산포	0.14	0.42	0.52	0.39	1.59	1.77
2016	달산포	0.08	0.51	0.00	0.45	0.00	0.69
1967	청포대	0.25	0.53	0.59	0.32	1.92	2.12
1977	청포대	0.26	0.42	0.59	0.41	2.06	2.24
1984	청포대	0.21	0.42	0.59	0.32	1.52	1.73
1998	청포대	0.17	0.42	0.47	0.41	0.00	0.77
2007	청포대	0.17	0.42	0.55	0.32	1.09	1.34
2016	청포대	0.06	0.51	0.00	0.41	0.00	0.65
1967	백사장	0.37	0.53	0.58	0.33	1.08	1.42
1977	백사장	0.10	0.42	0.60	0.41	1.11	1.40
1984	백사장	0.24	0.42	0.51	0.33	0.85	1.16
1998	백사장	0.63	0.42	0.54	0.41	0.00	1.02
2007	백사장	0.21	0.42	0.59	0.33	0.00	0.82
2016	백사장	0.18	0.51	0.00	0.41	0.00	0.68
1967	삼봉	0.07	0.53	0.51	0.51	1.91	2.11
1977	삼봉	0.36	0.42	0.60	0.44	1.37	1.65
1984	삼봉	0.39	0.42	0.57	0.51	1.51	1.79
1998	삼봉	0.19	0.42	0.54	0.44	0.00	0.83
2007	삼봉	0.40	0.42	0.59	0.51	0.00	0.98
2016	삼봉	0.39	0.51	0.00	0.44	0.00	0.77
1967	기지포	0.67	0.53	0.51	0.33	1.25	1.63

1977	기지포	0.20	0.42	0.60	0.53	1.67	1.91
1984	기지포	0.35	0.42	0.57	0.33	0.99	1.31
1998	기지포	0.24	0.42	0.54	0.53	0.00	0.90
2007	기지포	0.27	0.42	0.59	0.33	0.00	0.84
2016	기지포	0.40	0.51	0.00	0.53	0.00	0.84
1967	안면	0.51	0.53	0.51	0.47	2.13	2.36
1977	안면	0.46	0.42	0.60	0.52	1.97	2.21
1984	안면	0.45	0.42	0.57	0.47	1.68	1.94
1998	안면	0.54	0.42	0.56	0.47	0.00	1.01
2007	안면	0.62	0.42	0.47	0.47	0.00	1.00
2016	안면	0.29	0.51	0.00	0.52	0.00	0.78
1967	두여	0.23	0.53	0.51	0.33	1.51	1.73
1977	두여	0.31	0.42	0.60	0.36	1.38	1.64
1984	두여	0.46	0.42	0.57	0.33	1.19	1.50
1998	두여	0.45	0.42	0.56	0.33	0.00	0.90
2007	두여	0.32	0.42	0.47	0.33	0.00	0.78
2016	두여	0.15	0.51	0.00	0.36	0.00	0.64
1967	밭개	0.43	0.53	0.59	0.39	1.52	1.81
1977	밭개	0.19	0.42	0.59	0.33	1.08	1.35
1984	밭개	0.09	0.42	0.52	0.39	1.20	1.43
1998	밭개	0.10	0.42	0.56	0.39	0.00	0.81
2007	밭개	0.14	0.42	0.47	0.39	0.00	0.75
2016	밭개	0.19	0.51	0.00	0.33	0.00	0.64
1967	꽃지	0.33	0.53	0.59	0.44	1.65	1.92
1977	꽃지	0.23	0.42	0.50	0.50	1.56	1.77
1986	꽃지	0.14	0.21	0.49	0.50	1.58	1.74
1998	꽃지	0.23	0.42	0.36	0.44	0.00	0.75
2007	꽃지	0.19	0.42	0.49	0.44	0.00	0.81
2016	꽃지	0.19	0.51	0.00	0.44	0.00	0.70
1967	장삼포	0.20	0.53	0.58	0.29	1.72	1.92
1977	장삼포	0.28	0.42	0.53	0.25	1.26	1.48
1986	장삼포	0.18	0.21	0.57	0.29	0.00	0.70
1998	장삼포	0.28	0.42	0.47	0.29	0.00	0.75
2007	장삼포	0.21	0.42	0.57	0.29	0.00	0.79
2016	장삼포	0.33	0.51	0.00	0.25	0.00	0.66

<Abstract>

Beach Changes(1967–2017) and Geomorphological
Classification in Taean region, Yellow Sea :
Geomorphic Response and Policy Implications

Department of Geography
Graduate School
Seoul National University
Chan Woong Kim

This study observes, interprets, and classifies the changes of the beaches in Taean region based on morphodynamic approach. By observing temporal changes from seasons to decades, this study intends to improve our understanding of the beach change process at various time scales. Spatially, a large number of beaches were selected and classified. After classifying the beaches statistically, based on the results, this study sought the policy utilization method. As a research method, beach profile survey using RTK–GPS, sediment analysis, SWAN–WAVE modeling, aerial photograph analysis using GIS, and statistical analysis were used. The results are summarized as follows.

1. The seasonal changes in the beach profile were observed and classified. As a result, it was confirmed that

the openness to the sea is the main factor that causes the differences among the beach. Beach profiles and the similarity of the profile changes were presented based on seepage(groundwater outcrop) and ridge & runnel. Based on this, beaches were classified into five types according to the presence(absence) of seepage and ridge & runnel. Each type showed different characteristics (geometry, material, external force) and seasonal changes. The conditions that make the differences by type are the openness to the sea, which is a local geological condition. And the differences in wave strength is caused by the openness. As a result of visualizing the beach type in the space, the beach with seepage is located in a relatively protected place. Also, there was a spatial tendency of ridge & runnel development. Based on the results of the study, the conceptual beach morphology model in Taean was proposed using significant wave height and sediment diameter. The critical point of the seepage is 0.3mm, which is relatively clearly separated except for some cases. The presence and absence of ridge & runnel according to significant wave height were relatively inexplicable but could be classified based on potential 0.2m and 0.4m.

2. The changes in the beach width for decades (meso-scale) were detected and interpreted. HWL(High Water Line) was used as an indicator of the beach width, and errors were estimated. When using traditional methods

to calibrate aerial photographs, the error was large, so tidal correction was applied to the field data. The factors affecting the beach width varied depending on the spatial scale. The wave intensity influenced the beach width at spatially large scale, depth and fetch distance influenced at medium scale, coastal development, sand dune dynamics, and spits influenced at small scale. DSAS analysis result showed that it was confirmed that erosion was occurred in the north(Taeon peninsula) and sedimentation was occurred in the south(Anmyeon island). Based on the results of the study, I classified the beaches into five types.

3. Beaches were statistically classified and this study sought the policy utilization method using the classification result. As a result of cluster analysis, there were three clusters. The results of the cluster analysis which were applied at multidimensional scaling dimensions shows that the clusters are appropriately analyzed in most cases. Comparing statistical classifications, existing classifications(surf scaling, surf similarity, beach classification model) had some reliability problem and they could not classify the effect of human intervention. Beach hazard assessment, sensitivity assessment against oil spill, and sensitivity evaluation during storm surge were suggested on the basis of beach classification using policy and disaster management perspective. This means that the classification of the beaches improves understanding of the process and can be

used as an effective basis for related policy.

This study considers beach process, changes and classifications from seasons to decadal time scale. Observation of beach changes on various space–time scales could improve the understandings in geomorphological process. In addition, I considered how geomorphology can contribute to society in terms of risk and disaster management. The results of this study can be used as basic data for the understandings in coastal process and the management plan.

Keyword : beach, geomorphic change, beach classification, conceptual beach morphology model in Taean, shoreline evolution, policy implication.

Student Number : 2014–30979