



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](#)

박 경 교수지도  
석사학위청구논문

항공LiDAR를 이용한 갯골지형 연구  
-갯벌 유형에 따른 비교를 중심으로-

2013

성신여자대학교 대학원

지리학과

김 정 수

# 항공LiDAR를 이용한 갯골지형 연구

-갯벌 유형에 따른 비교를 중심으로-

박 경 교수지도

이 논문을 석사학위논문으로 제출함

2012년 11월

성신여자대학교 대학원

지리학과

김 정 수

# 인 준 서

김정수의 석사학위 논문으로 인준함.

심사위원 \_\_\_\_\_ 인

심사위원 \_\_\_\_\_ 인

심사위원 \_\_\_\_\_ 인

성신여자대학교 대학원

## 논문개요

갯골은 갯벌을 사행하며 수력학적인 역할을 관장하고, 영양소 및 유기물 등을 운반할 뿐만 아니라 퇴적물을 운반하며 갯벌 전체의 퇴적형태를 결정한다. 이와 같은 갯골의 중요성에도 불구하고 갯골에 대한 연구는 국·내외적으로 많지 않으며, 연구주제와 연구지역 및 연구방법이 한정되어 있다.

이와 같은 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 갯골의 수계망 분석뿐만 아니라 기존에 실시하지 않았던 차수별 횡단면 분석을 통해 갯골 지형의 계량적 분석을 연구목적으로 하였다. 연구지역은 갯벌을 지형에 따른 유형에 따라 분류하고 각각의 갯골 유역으로 영광군 염산면, 곰소만 죽도, 함평만 외측 및 내측 갯골을 선정하였다. 연구자료 및 방법으로 고해상도의 항공 LiDAR 자료를 이용하였으며, 자료 분석을 위해 ESRI사의 ArcGIS 9.3.1과 동일 S/W 내의 익스텐션인 ArcHydro Tool이 사용되었다.

연구결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 수계망 분석은 갯벌의 지형적 분류에 따른 유형에 영향을 받지 않았다. 그보다는 직선형 또는 수지상 등 수계패턴 및 형태에 더욱 영향을 받았으며 유역분지 경사 등의 지형에도 영향을 받았다. 또한 하천과 비교한 결과, 유사하게 나타났다. 둘째, 갯골의 차수별 횡단면 분석결과 갯벌의 지형적 분류에 따른 차이를 반영하였다. 그 중에서도 반폐쇄형 및 폐쇄형 만입에 위치한 중립적인 형태보다 개방형과 폐쇄형의 만내에서 뚜렷한 차이를 나타냈다. 유역별 공통점도 발견되었는데, 이는 미립질의 유속이 약한 갯벌의 형성 특성을 반영하였다.

본 연구는 퇴적물 분석을 직접 실시하지 않아 세부적 분류가 뒷받침되지 못했다는 점과 갯벌 유형별로 두 곳 이상의 갯골유역을 분석하지 않았다는 한계점이 있다. 그러나 갯골의 공간적 입지에 착안하여 갯벌의 유형별로 비교분석하고 상관관계 도출해냈다는 점과 항공LiDAR를 이용하여 갯골을 3차원으로 분석한 것은 최초로 시도되었다는 점에서 의의가 있다.

# 목 차

|               |    |
|---------------|----|
| 논문 개요 .....   | i  |
| 목 차 .....     | ii |
| 표 목 차 .....   | v  |
| 그 립 목 차 ..... | vi |

## 제1장 서 론 .....1

|                     |    |
|---------------------|----|
| 1. 연구배경 및 목적 .....  | 1  |
| 2. 연구방법 및 자료 .....  | 4  |
| 3. 연구지역 .....       | 7  |
| 1) 연구지역 선정절차 .....  | 7  |
| 2) 영광군 염산면 갯골 ..... | 8  |
| 3) 곰소만 죽도 갯골 .....  | 11 |
| 4) 함평만 .....        | 13 |
| (1) 함평만 외측 갯골 ..... | 13 |
| (2) 함평만 내측 갯골 ..... | 15 |

## 제2장 연구동향 및 이론적 배경 .....17

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 1. 연구 동향 .....           | 17 |
| 1) 국내 연구 .....           | 17 |
| 2) 국외 연구 .....           | 19 |
| 3) 선행연구의 한계점 및 시사점 ..... | 21 |
| 2. 조석에 대한 이론 .....       | 23 |
| 1) 조차에 기반한 해안 분류 .....   | 25 |
| 2) 연구지역의 조석 .....        | 25 |
| 3. 갯벌의 정의 및 유형 .....     | 28 |

|                                      |           |
|--------------------------------------|-----------|
| 1) 갯벌의 정의 .....                      | 28        |
| 2) 갯벌의 유형 .....                      | 31        |
| (1) 조차에 의한 분류 .....                  | 31        |
| (2) 지형에 의한 분류 .....                  | 31        |
| (3) 퇴적물 분포에 의한 분류 .....              | 35        |
| 4. 갯골의 정의 및 분류 .....                 | 36        |
| 1) 갯골의 정의 .....                      | 36        |
| 2) 갯골의 분류 .....                      | 36        |
| 3) 갯골의 유역과 수계의 특성 .....              | 39        |
| 5. 하계망의 차수분석 .....                   | 40        |
| <b>제3장. 갯골의 수계망 및 횡단면분석 과정 .....</b> | <b>44</b> |
| 1. 자료 구축 .....                       | 44        |
| 2. 수계망 분석 .....                      | 45        |
| 1) Hydro Analysis .....              | 45        |
| 2) Stream Order .....                | 52        |
| 3) 한계점 및 대안 .....                    | 53        |
| 2. 횡단면분석 .....                       | 57        |
| <b>제4장. 갯골의 수계망 및 횡단면분석 결과 .....</b> | <b>60</b> |
| 1. 수계망 분석 .....                      | 60        |
| 1) 영광군 염산면 갯골 .....                  | 61        |
| 2) 곰소만 죽도 갯골 .....                   | 63        |
| 3) 함평만 외측 갯골 .....                   | 65        |
| 4) 함평만 내측 갯골 .....                   | 67        |
| 5) 종합 .....                          | 69        |

|                             |           |
|-----------------------------|-----------|
| 2. 횡단면분석 .....              | 71        |
| 1) 영광군 염산면 갯골 .....         | 72        |
| 2) 고평만 죽도 갯골 .....          | 75        |
| 3) 함평만 외측 갯골 .....          | 77        |
| 4) 함평만 내측 갯골 .....          | 79        |
| 5) 종합 .....                 | 82        |
| <b>제5장. 결론 및 향후과제 .....</b> | <b>84</b> |

참 고 문 헌

Abstract

## 표 목 차

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 표 1. 연구지역의 갯벌 유형 .....               | 17 |
| 표 2. 갯골과 관련된 선행연구 요약 .....           | 23 |
| 표 3. 조위와 관련된 명칭과 정의 .....            | 25 |
| 표 4. 2011년 연구지역의 조석 .....            | 27 |
| 표 5. 갯골의 일반적 분류와 크기 범위 .....         | 38 |
| 표 6. 연구지역별 Stream definition 값 ..... | 56 |
| 표 7. 연구지역별 단면샘플 수 .....              | 59 |
| 표 8. 영광군 염산면 갯골의 수계망분석 결과 .....      | 63 |
| 표 9. 고평만 죽도 갯골의 수계망분석 결과 .....       | 65 |
| 표 10. 함평만 외측 갯골의 수계망분석 결과 .....      | 67 |
| 표 11. 함평만 내측 갯골의 수계망분석 결과 .....      | 69 |
| 표 12. 한강 유역별 유역특성 .....              | 71 |
| 표 13. 영광군 염산면 갯골의 단면분석 결과 .....      | 74 |
| 표 14. 고평만 갯골의 단면분석 결과 .....          | 77 |
| 표 15. 함평만 외측 갯골의 단면분석 결과 .....       | 79 |
| 표 16. 함평만 내측 갯골의 단면분석 결과 .....       | 81 |

## 그림 목 차

|  |    |
|--|----|
| 그림 1. 본 연구의 흐름도 .....                                    | 6  |
| 그림 2. Folk의 퇴적물 분류 .....                                 | 8  |
| 그림 3. 연구지역(1): 영광군 염산면 일대 갯골유역 .....                     | 10 |
| 그림 4. 영광군 염산면 갯골일대 표층퇴적물 분포 .....                        | 11 |
| 그림 5. 연구지역 인근 검조소의 조석자료 분석에 따른 조위표 .....                 | 11 |
| 그림 6. 연구지역(2): 곰소만 일대와 죽도 갯골유역 .....                     | 12 |
| 그림 7. 곰소만 죽도 갯골유역의 표층퇴적물 계절적 분포 .....                    | 13 |
| 그림 8. 연구지역(3),(4): 함평만과 함평만 외측 갯골, 함평만 내측 갯골 .....       | 15 |
| 그림 9. 함평만 외측 갯골 일대 표층퇴적물의 계절적 분포 .....                   | 15 |
| 그림 10. 함평만 내측 갯골 일대 표층퇴적물의 계절적 분포 .....                  | 16 |
| 그림 11. 기초력 원리에 의한 대조 혹은 사리와 소조 혹은 조금 .....               | 24 |
| 그림 12. 우리나라의 등조시도 .....                                  | 27 |
| 그림 13. 갯벌의 구분 .....                                      | 30 |
| 그림 14. 학자들간의 상이한 갯벌 또는 간석지의 정의 .....                     | 31 |
| 그림 15. 개방형 갯벌 예시: 영광군 일대 .....                           | 35 |
| 그림 16. 폐쇄형 갯벌 예시: 함평만 .....                              | 35 |
| 그림 17. 반폐쇄형 갯벌 예시: 곰소만 .....                             | 35 |
| 그림 18. 하구형 및 개방형 갯벌 예시: 강화도 남단 .....                     | 36 |
| 그림 19. 갯골수계패턴: (a)직각상, (b)선형수지상, (c)곡류형, (d)곡류형수지상 ..... | 40 |
| 그림 20. 차수분석 방법 .....                                     | 42 |
| 그림 21. 원자료를 래스터로 변환 시 발생하는 문제점과 제거 후 .....               | 45 |
| 그림 22. Fill sinks의 오차보정 원리 .....                         | 47 |
| 그림 23. Flow direction 알고리즘의 8방향과 GRID내의 입력방식 .....       | 48 |
| 그림 24. DEM의 표고값과 그에 따른 Flow direction결과 예시 .....         | 48 |

|   |    |
|---|----|
| 그림 25. Flow direction 결과예시 .....                                    | 49 |
| 그림 26. Flow accumulation의 결과 .....                                  | 49 |
| 그림 27. Stream definition과 Stream Segmentation의 차이 .....             | 51 |
| 그림 28. 최소 누적격자 값 설정 예시 .....  | 51 |
| 그림 29. Catchment grid delineation과 Catchment polygon processing의 차이 | 52 |
| 그림 30. Drainage line processing 결과 .....                            | 53 |
| 그림 31. Strahler와 Shreve의 차수 부여 방식 비교 .....                          | 54 |
| 그림 32. 유역 내 인공지형제거: 실선 안쪽부분만 유역으로 추출 .....                          | 55 |
| 그림 33. 함평만 내측 Stream definition 5000으로 설정 시 최상류 단면:                 | 56 |
| 그림 34. 함평만 내측 Stream definition 8000으로 설정 시 최상류 단면:                 | 56 |
| 그림 35. 차수별 갯골 수(좌측)와 결과지도(우측) .....                                 | 57 |
| 그림 36. 두 개 이상의 뱅크풀이 존재할 경우 기준면 예시 .....                             | 59 |
| 그림 37. 곡류구간의 비대칭 단면일 경우 기준면 예시 .....                                | 59 |
| 그림 38. 영광군 염산면 갯골의 차수 분석 결과 .....                                   | 63 |
| 그림 39. 고평만 갯골의 차수분석 결과 .....  | 65 |
| 그림 40. 함평만 외측 갯골의 차수 분석 결과 .....                                    | 66 |
| 그림 41. 함평만 내측 갯골의 수계망 분석 결과 .....                                   | 68 |
| 그림 42. 갯골 곡의 형태 예시 .....  | 72 |
| 그림 43. 영광군 염산면 갯골의 깊이와 너비의 평균, 최대, 최솟값 그래프                          | 74 |
| 그림 44. 고평만 죽도 갯골의 깊이와 너비의 평균, 최대, 최솟값 그래프                           | 77 |
| 그림 45. 함평만 외측 갯골의 깊이와 너비의 평균, 최대, 최솟값 그래프                           | 79 |
| 그림 46. 함평만 내측 갯골의 깊이와 너비의 평균, 최대, 최솟값 그래프                           | 81 |

# 제1장 서론

## 1. 연구배경 및 목적

최근 기후변화로 인해 발생하는 요소에 학계의 관심이 상당하다. 그 중에서도 해수면 상승은 IPCC<sup>1)</sup>에 의해 인간사회에 악영향을 미칠 요소로 평가됨에 따라 이와 관련한 해안지형 연구가 활발히 진행되고 있다. 우리나라에서는 지형학 관련 논문에서 해안지형 일반 주제<sup>2)</sup>에 관한 논문이 차지하는 비중은 2000년 이전에는 8%정도에 그쳤으나, 2000년 이후 70~80%로 급증하였다<sup>3)</sup>. 하지만 연구의 대부분은 사질해안지형에 집중되었으며, 갯벌은 서·남해안지형의 대부분을 차지함에도 불구하고 연구비중은 20% 미만으로 저조할 뿐만 아니라 소수의 연구자들에 의해 진행되고 있다<sup>4)</sup>.

갯벌을 포함한 해안습지의 가치는 생물적 생산성, 다양한 종들의 피난처 및 연구지역, 해안보호, 지하수충진, 범람 및 폭풍 조절, 수질정화, 수문학적 지지, 다양한 문화적 가치 등 많은 가치를 지닌다<sup>5)</sup>. 더 나아가 해수면 상승 측면에서 보았을 때 낮은 경사로 인하여 넓은 면적의 침수 가능성이 예상되므로 많은 연구가 필요하다.

조석에 영향을 받는 지역<sup>6)</sup>은 염습지(salt marsh), 갯벌(tidal flat), 갯골(tidal channel) 크게 세 가지 요소로 나뉘며, 각 요소들은 밀접하게 상호작용하며 발달과 형성에 영향을 미친다<sup>7)</sup>. 이 중에서 갯골은 육상생태계의 하천

1) IPCC, 2001, *Climate Change 2001: The Scientific Basis*

2) 김성환(2012)에 의하면 간석지와 해안단구를 제외한 해변, 사주, 사구, 하구역, 석호, 해안분류, 해안관리 등의 주제를 해안지형 일반 주제 관련 논문이라 통칭하였다.

3) 김성환, 2012, “한국의 지형학 연구 -해안지형 일반-,” 한국지형학회지, 19(1), pp. 1~15

4) 장동호, 2011, “한국의 간석지 연구,” 한국지형학회지, 18(4), pp. 59

5) Reppert, R.T, et al, 1979, *Wetland Values: Concepts and Methods for Wetlands Evaluation*, U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources

6) Fagherazzi et al.(1999)는 염습지, 갯벌, 갯골을 모두 포함하는 용어로써 ‘tidal basin’을 언급하였으나, 관련된 한국의 연구용어가 없는 관계로 포괄할 수 있는 범위의 용어로 대체했다.

7) Fagherazzi et al., 1999, Tidal networks I. Automatic networks preliminary scaling and features from digital terrain maps, *Water Resour. Res.*, 35(12), p.3891

과 같은 지형으로 갯벌을 사행하며 수력학적인 역할을 관장하고, 영양소 및 유기물 등을 운반할 뿐만 아니라 퇴적물을 운반하며 갯벌 전체의 퇴적형태를 결정한다<sup>8)</sup>. 갯골과 갯벌 및 염습지의 관계는 하천과 사면의 관계만큼이나 강한 상호의존성을 띄며 경관시스템과 밀접하게 연관된다<sup>9)</sup>.

이러한 이유에서 하천과는 다른 갯골만의 체계 및 지형적 특징을 밝히려는 연구가 진행되어 왔으나, 그 수가 적을 뿐 아니라 다음과 같은 한계점이 있었다. 먼저 연구지역과 관련하여 갯벌의 광활하면서도 접근성이 낮은 특성으로 인해 하구역 인근 연구로 제한되는 특성이 있었다. 연구방법 및 자료 측면에서 원격탐사의 활용이 활발해짐에 따라 접근이 어려운 갯벌에 대한 연구가 진행되어왔으나, 오래된 연구가 많아 자료의 공간해상도 문제가 존재한다. 또한 연구내용 측면에서는 갯골의 특성을 단순히 연구지역에 대한 분석으로 끝났을 뿐 다른 지역과의 비교 및 그를 통한 지리적인 요소와의 관련성을 유추하여 해석한 것은 없었다. 특히 갯벌의 지리적 위치 및 특성은 갯벌에 미치는 파랑과 조석에너지 비율의 차이를 유발하여 갯벌 표층 퇴적물에 영향을 미치게 된다. 이와 같은 차이는 퇴적물을 운반하며 갯벌형태를 결정하는 갯골의 차이를 발생시키므로 갯골을 연구함에 있어 갯벌의 지리적 입지 또는 유형에 따른 비교 연구가 필요하다.

따라서 기존 연구의 한계점을 극복하기 위하여 본 연구에서는 고해상도 항공LiDAR 자료를 사용하여 하천과 사면의 관계만큼이나 갯골 또한 갯벌 지형과 상관성을 갖는다는 가정 하에 갯벌 유형에 따른 갯골지형 비교 분석을 목적으로 한다. 목적을 달성하기 위한 세부 목표는 다음과 같다.

첫째, 연구대상 정립을 위하여 선행연구를 통해 갯벌과 갯골의 정의와 유

---

8) Evans G., 1965, Intertidal flat sediments and their environments of deposition in the Wash, *Quarterly Journal of the Geological Society*, 121, pp.209-240; 박정재, 1999b, "갯골퇴적물의 물리화학적 특성에 관한 연구: 순천만을 사례로," *지리학논총*, 33, p.46

9) Montgomery and Dietrich, 1988, Where do channels begin?, *Nature*, 336, pp.232-234; Rodriguez-Iturbe and Rinaldo, 1997, *Fractal River Basins: Chance and Self-Organization*, Cambridge Univ. Press, New York.

형을 정립 또는 분류하고자 한다.

둘째, 앞서 정립한 갯벌 유형을 토대로 각각의 연구지역을 탐색 및 선정한다.

셋째, 선정된 연구지역을 대상으로 갯골 지형 분석을 실시한다. 지형분석은 수계망 분석을 우선적으로 실시한 뒤에, 이를 토대로 횡단면분석을 실시한다.

넷째, 분석 결과를 통해 갯벌유형과 갯골 지형간의 상관성을 검토하여 본 연구의 결론을 내리고자 한다.

이를 통해서 갯벌 유형에 따른 갯골의 지형적 특성을 인식할 수 있을 것이다.

## 2. 연구방법 및 자료

본 연구는 상기의 목적을 달성하기 위해서 다음의 연구 방법과 자료를 이용하여 연구를 진행하였다. 먼저 연구방법으로는

첫째, 갯벌과 갯골의 정의와 유형을 정립 또는 분류하기 위하여 단행본, 학위논문, 학술지를 포함한 선행연구들을 분석하였다.

둘째, 갯벌 유형에 따른 각각의 연구지역 선정을 위하여 고해상도 위성사진을 제공하는 웹지도서비스<sup>10)</sup>를 이용하여 갯골이 잘 발달하는 지역을 탐색한다. 단 위성사진 촬영시기에 따라 달리 나타날 수 있으므로 위의 선행연구 고찰을 토대로 한다.

셋째, 갯골 지형을 분석하기 위하여 LiDAR자료를 분석에 적합한 형태로 구축하고 수계망분석과 횡단면분석을 실시하였다. LiDAR자료는 지형분석에 용이한 래스터(Raster) 형태의 수치고도모델(Digital Elevation Model: DEM)로 변환하였다. 자료 분석에 이용된 소프트웨어는 ESRI사의 ArcGIS ver.9.3.1이 사용되었다. 갯골의 수계망 분석에는 동일 소프트웨어 내의 ArcHydro Tool 9.3을 이용하였다. 횡단면분석은 차수분석을 토대로 차수별 단면에 대한 너비와 깊이를 계산하였으며, 이를 위해서 상기 소프트웨어 내의 [3D Analyst Tool]의 Interpolate line과 Create profile graph를 이용하였다.

넷째, 분석된 결과를 통하여 갯벌유형에 따른 갯골지형을 비교 분석하였다. 분석 시에는 유역별·유역간 갯골의 특성의 비교를 통해 이루어졌다.

본 연구에서는 갯골의 정밀한 분석을 위해서 고해상도의 항공LiDAR(Light Detection And Ranging)자료가 이용되었으며, 자료는 A사에서 제공되었다.

---

10) 네이버지도(<http://map.naver.com/>), 다음지도(<http://local.daum.net/>), 구글어스(Google Earth)

항공LiDAR의 촬영장비는 Optech사의 AMTM-3070을 이용하였으며, 레이저펄스의 파장은 1064 $\mu$ m이다. 촬영고도는 1300m이며, 촬영범위 오차는 수직으로  $\pm 0.25$ m이다<sup>11)</sup>. 촬영 시기는 2011년 6월에 걸쳐서 최저조위 2시간 동안에 촬영되었다. 촬영된 좌표값의 기준이 되는 고도는 국제수로기구에서 설정한 해도상 기준면인 수심기준면(DL; Datum Level)으로 약최저저조위(approximate lowest low water)면이다.

LiDAR의 원자료(original data)는 레이저펄스가 기록한 x,y,z 좌표값이 있는 점(point)형태로 존재하는데, 지형뿐만 아니라 바다 위 선박 등의 지물도 기록되어있으므로 지형분석에는 용이하지 않다. 따라서 원자료에서 지형을 기록한 포인트를 1m $\times$ 1m 간격으로 추출하여 만든 그리드(GRID)형태의 수치고도모델을 분석에 이용하였다.

이를 내용에 따라 도식화하여 표현하면 <그림 1>과 같다.

---

11) 항공LiDAR의 수평오차는 이론상으로는 존재하지만, 거의 영향을 주지 않으므로 생략하였다.

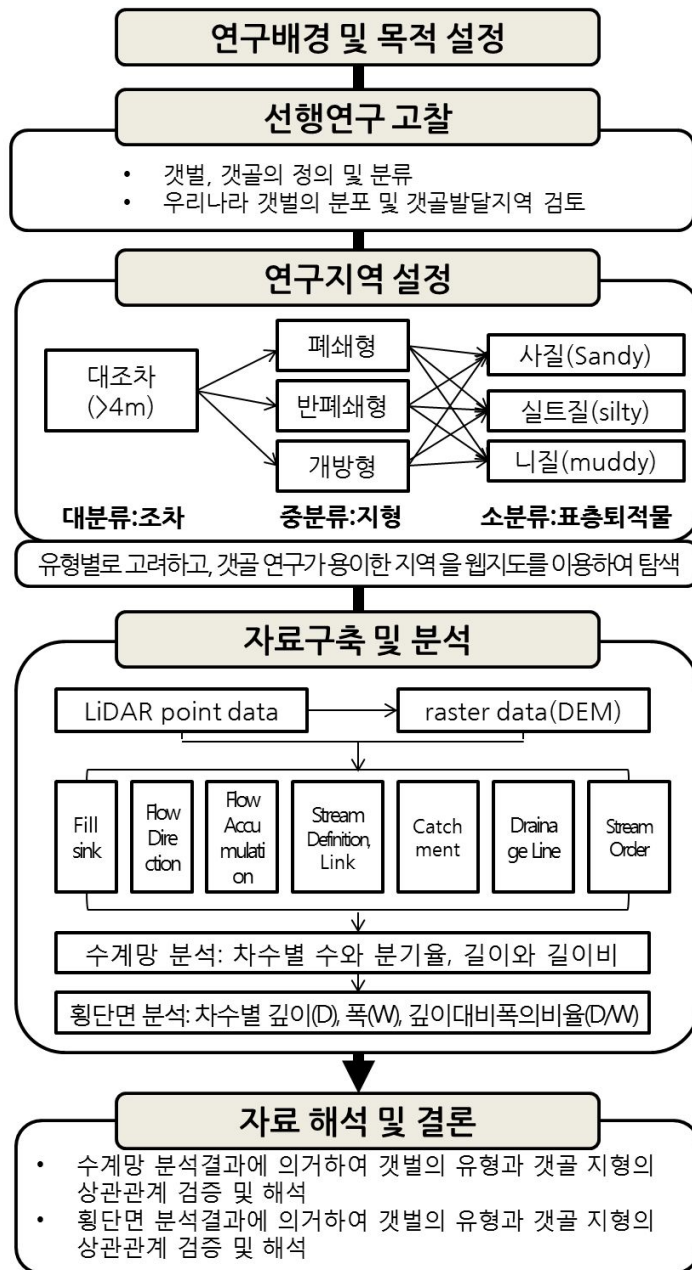


그림 1. 본 연구의 흐름도

### 3. 연구지역

#### 1) 연구지역 선정절차

본 연구의 연구지역은 갯벌 유형에 따라 각기 다른 지역을 설정하였다<sup>12)</sup>. 갯벌 유형은 조차, 지형, 퇴적물에 따라 분류할 수 있다. 그런데 갯골이 대규모로 잘 발달하는 지역은 대부분 서해안에 해당되며, 목포를 기점으로 북쪽은 모두 대조차이므로<sup>13)</sup> 조차에 따른 분류는 생략하였다. 따라서 지형과 퇴적물에 의해 연구지역을 설정하였다. 그 중에서 지형은 갯벌 형성에 영향을 미치는 조차와 파랑에너지의 비율을 결정하는데, 이는 퇴적물 분포에 영향을 미치므로 지형을 우선적으로 고려한 후에 퇴적물 유형을 고려하였다.

지형에 따른 분류에 의해 개방형에 해당되는 영광군 염산면 일대, 반폐쇄형에 해당되는 곶소만 일대, 폐쇄형에 해당되는 함평만 일대를 연구지역으로 각각 선정하였다. 지형에 따른 분류에서 하구형도 포함되어 있으나, 현재 인위적 간섭 없이 대규모 하구에 직접적으로 영향을 받는 곳은 한강밖에 없으며, 한강의 영향을 받아 형성된 강화도 남단 일대 갯벌은 개방형에 더 가까우므로 하구형은 생략하였다.

지형에 따른 연구지역 설정 후, 세부 갯골 유역 연구지역 설정 시 고려했던 점은 다음과 같다. 첫째, 만 또는 지역 내에서 퇴적물 분포가 상이한 지역은 퇴적물 분포에 따라 각각 다른 유역을 설정하였다. 퇴적물 분포는 국토해양부에서 연안습지 조사를 통해 제공하고 있어 가장 최근의 연구결과 자료를 바탕으로 참조하였다. 참조한 퇴적물 분류는 Folk(1967)의 분류를 따랐으며, 분류기준은 <그림 2>과 같다. 설정된 지역 중에서 함평만이 만 외측과 내측의 퇴적물 분포가 상이하어, 내측과 외측 각각 다른 갯골 유역을 선정하여 연구를 진행하였다. 둘째, 인공지물 및 지형에 의한 간섭을 받은 유역은

---

12) 선행연구를 통해 갯벌 유형을 정립한 후, 연구지역을 설정하였다. 갯벌의 유형은 제2장 3절을 참조.

13) 본 논문의 <그림 12> 참조.

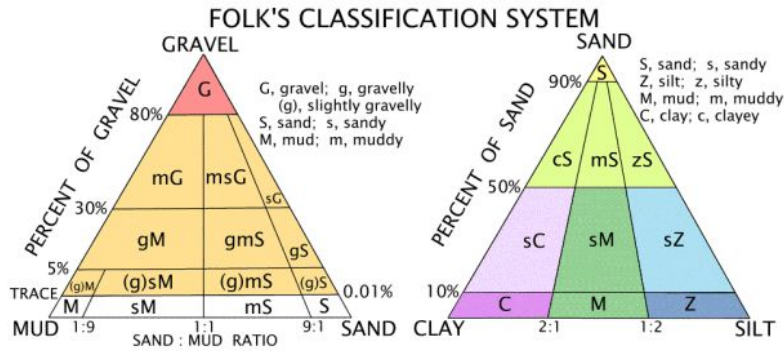


그림 2. Folk의 퇴적물 분류 (출처: <http://www.usgs.gov/>)

제외하였다. 예를 들면, 곰소만 북부, 곰소항 일대 갯벌은 염전이 위치하여 갯골 형태에 인위적인 간섭을 가해졌기 때문에 제외하였다. 또한 갯골 유역 내에서도 제방이 설치된 구간은 제외하였다. 셋째, 유역면적이 크게 다르지 않은 지역으로 선정하였다. 유역면적이 크게 다른 경우 차수에 따른 분기율에 차이가 발생하므로, 유역면적을 고려하여 크게 다르지 않은 유역으로 선정하였다.

위의 내용을 종합하여 영광군 염산면 갯골유역, 곰소만 죽도 갯골유역, 함평만 외측의 무안군 해제면 일대 갯골유역과 함평만 내측의 무안군 현경면 일대 갯골유역 총 4곳의 갯골 유역이 설정되었다.

## 2) 영광군 염산면 갯골

영광군 염산면 갯골 유역은 행정구역상으로 전라남도 영광군 염산면에 속하며, 지리적 위치 상으로는 위도 35° 10' 44" N~35° 13' 10" N, 경도 126° 19' 27" E~126° 23' 5" E에 해당된다(그림 3). 인문환경은 주 갯골의 합류지점 사이 봉남리 부근 일대가 대부분 염전 및 농경지로 간척되었다<sup>14)</sup>.

14) 이윤화, 2005, “한국 서·남해안의 갯벌 지형 연구,” 경북대학교 박사학위논문, p.148~150

지형적으로는 외해로 돌출되어 있어 겨울철 북서계절풍과 파랑의 영향을 받는 지역으로, 갯벌의 지형에 따른 분류에 의하면 개방형에 속한다. 가장 외해로 돌출된 부분은 파랑의 영향을 강하게 받아 변화가 심하여 갯골발달이 미미하며, 연구지역에 해당되는 부분은 내측으로 갈수록 갯골이 넓고 크게 발달하였다.

표층퇴적물 분포는 개방형 지형의 영향으로 겨울철에는 북서계절풍의 영향을 받아 사질이 외해로 확대되며, 여름철에는 니질이 내측으로 확대되는 경향이 있다(백영숙, 2002). 그러나 연구지역 일대의 평균적인 퇴적물 분포는 <그림 4>과 같으며, 4~9 $\phi$  (phi) 크기의 실트(silt)질이 우세하다.

조석은 인근의 영광 검조소에서 측정된 조석자료를 분석한 결과 소조차는 205.4cm, 평균조차는 315.3cm이며, 대조차는 425.3cm로 1964년에 Davies에 의해 정립된 분류기준<sup>15)</sup>에 의하면 대조차 환경에 해당된다(그림 5a).



그림 3. 연구지역(1): 영광군 염산면 일대 갯골유역(자료: 네이버지도)

15) Davies, 1984, What is a wave-dominated coast?, *Marine Geology*, 60, pp.314-315



그림 4. 영광군 염산면 갯골일대 표층퇴적물 분포 (자료: 국토해양부, 2009)

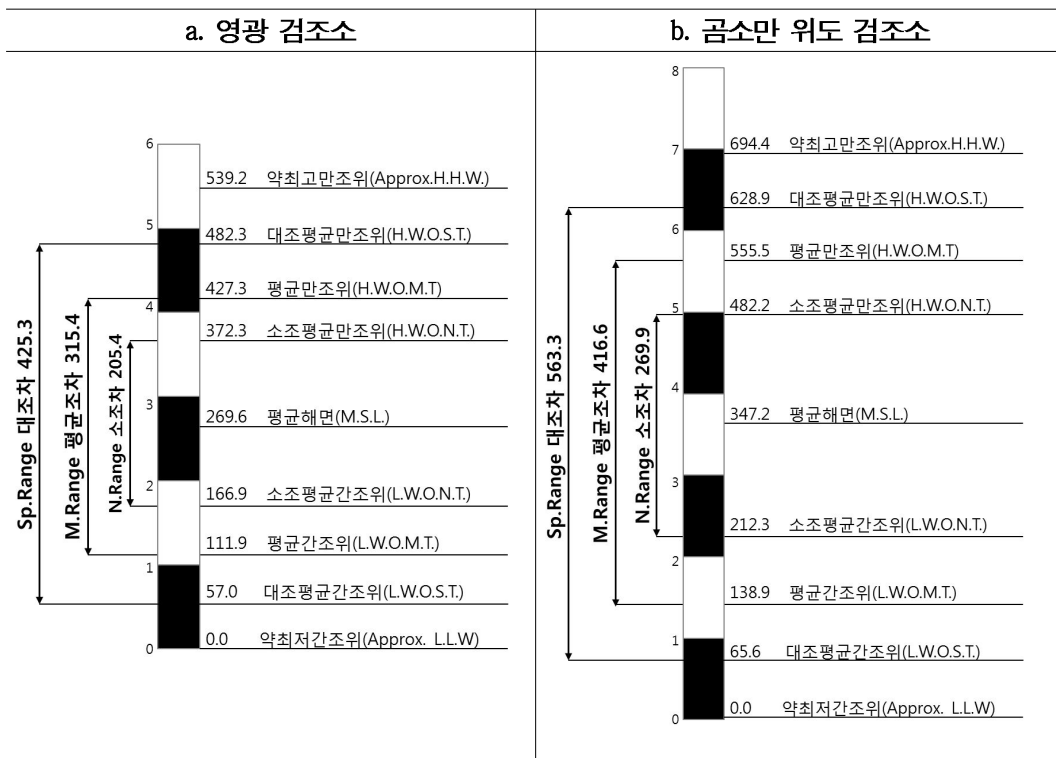


그림 5. 연구지역 인근 검조소의 조석자료 분석에 따른 조위표 (자료: 국립지리원, 1983; 국토해양부, 2009)

### 3) 곰소만 죽도 갯골

곰소만 죽도 갯골 유역은 행정구역상으로 전라북도 고창군 부안면에 속하며, 지리적 위치 상 위도  $35^{\circ} 33' 9'' \text{N} \sim 35^{\circ} 34' 38'' \text{N}$ , 경도  $126^{\circ} 36' 42'' \text{E} \sim 126^{\circ} 34' 46'' \text{E}$  에 해당된다(그림 6). 고창군 해안일대를 따라 간척지가 확인되나 현재 이 지역은 습지보호지역으로 보호되고 있다.

곰소만 전체를 놓고 보면 지형적으로 만 입구만 서해로 열린 반폐쇄형 만이다. 만의 형태는 내부에서 입구로 갈수록 넓어지는 깔때기 형태를 보이며, 만 입구(고창군 동호리)의 폭은 약 7.2km이고, 상암리 인근에서 약 2.0km로 급격하게 폭이 좁아진다. 만의 동쪽에서 서쪽까지의 길이는 약 19.5km이다. 주갯골은 동-서방향으로 발달하며, 연구지역인 죽도 갯골은 주갯골과 합류한다.

인문환경으로는 전체적으로 양식장과 간척지를 위해 조성된 방조제가 많아 해안선이 단조로운 편이며, 만 북측에는 염전이 많아 갯골의 모양이 다소 변형된 형태를 띤다.

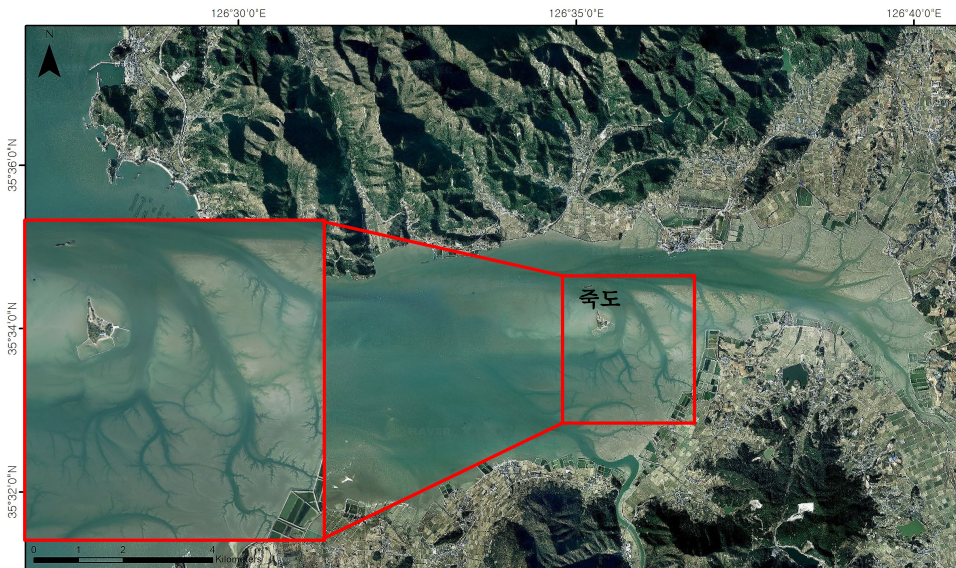


그림 6. 연구지역(2): 곰소만 일대와 죽도 갯골유역 (자료: 네이버지도)

표층퇴적물 분포는 반폐쇄형 만이나 서쪽으로 만입구가 열려있고 연구지역이 만의 주갯골과 바로 연결되어 있어 다소 조립질인 모래질실트(sZ; sandsilt)가 우세하다. 겨울에는 과량이 강해져 갯골저의 퇴적물이 실트질 모래(zS; silty sand)로 변화하나 전체적인 분포는 변화하지 않는다(그림 7).

조석은 곰소만 외곽의 위도 검조소에서 측정된 조석자료를 분석한 결과 조석은 하루에 두 번 만조와 간조가 반복되는 전형적인 반일주조이며, 뚜렷한 일조부등 현상이 관찰된다. 여름과 겨울에 약 80cm의 일조부등이 나타나며, 봄과 가을에 일조부등 현상이 크게 감소한다<sup>16)</sup>. 소조차는 269.9cm, 평균조차는 416.6cm이며, 대조차는 563.3cm로 1964년에 Davies에 의해 정립된 분류기준<sup>17)</sup>에 의하면 대조차 환경에 해당된다(그림 5b).

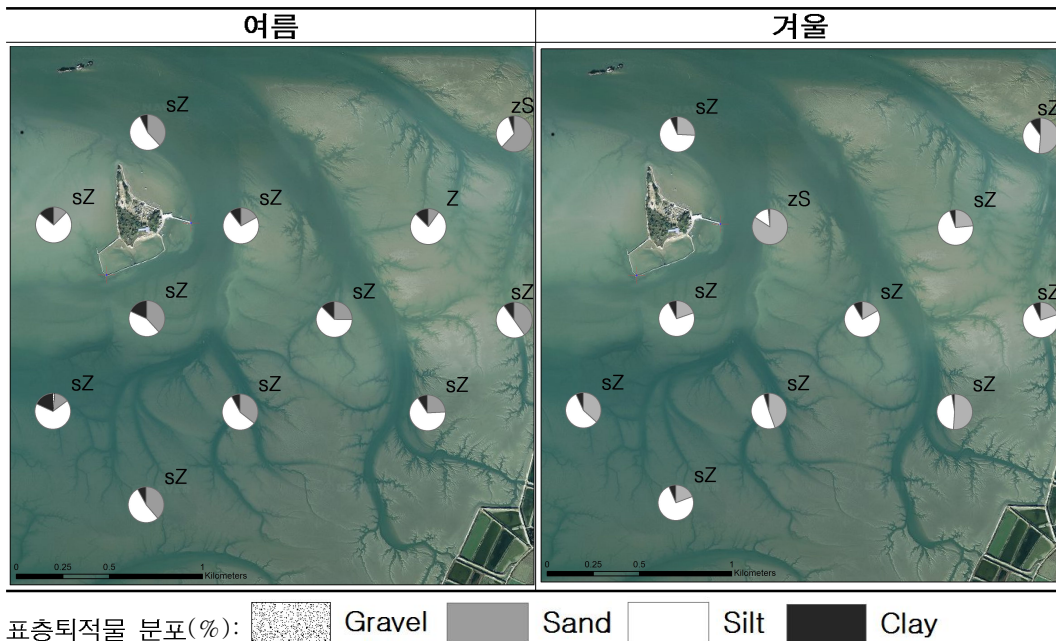


그림 7. 곰소만 죽도 갯골유역의 표층퇴적물 계절적 분포 (자료: 국토해양부, 2011)

16) 국토해양부, 2011, 연안습지 기초조사:습지보호지역모니터링

17) Davies, 1984, op. cit, pp.314-315

#### 4) 함평만

한반도 서해 남부에 위치한 함평만은 위도  $35^{\circ} 00' 00'' \sim 35^{\circ} 10' 00''$  N와 경도  $126^{\circ} 18' 00'' \sim 126^{\circ} 21' 00''$  E 범위에 위치하며, 행정구역상 전남 함평군과 무안군에 속한다(그림 8).

지형적으로는 북서쪽입구에서 남동 방향으로 안쪽으로 길게 만입되어 폐쇄형에 해당된다. 해안선의 길이는 125.9km이고, 폭은 12km로 큰 규모의 만이다. 만 입구에서 만의 중심부를 따라 발달한 주갯골은 북북서-남남동 방향으로 길게 뻗어있으며, 그 양편으로 니질갯벌이 넓게 발달해있다(국토해양부, 2009).

조석은 인근의 영광 검조소에서 측정된 조석자료를 분석한 결과 소조차는 205.4cm 평균조차는 315.3cm이며, 대조차는 425.3cm로 1964년에 Davies에 의해 정립된 분류기준<sup>18)</sup>에 의하면 대조차 환경에 해당된다(그림 5).

##### (1) 함평만 외측 갯골

함평만 외측 갯골 유역은 행정구역상으로 전라남도 무안군 해제면에 속하며, 함평만 입구와 바로 인접해있다. 지리적 위치는 위도  $35^{\circ} 6' 6'' \sim 35^{\circ} 8' 18''$  N이며, 경도  $126^{\circ} 19' 46'' \sim 126^{\circ} 21' 5''$  E에 해당된다(그림 8). 지형과 조석은 위의 함평만 개관 내용을 참조하면 된다.

표층퇴적물 분포는 폐쇄형 만에서도 만 입구에 바로 위치하여 계절에 따라 미치는 주요 퇴적작용이 달라지기 때문에 계절적인 변화가 나타난다. 여름에는 실트(silt)질 퇴적물이 우세하게 나타나나, 겨울에는 니질(muddy)퇴적물이 우세하게 나타나며 갯골 저 부분에는 역 또는 모래가 섞여 나타난다(그림 9).

---

18) Davies, 1984, op. cit, pp.314-315



그림 8. 연구지역(3),(4): 함평만과 함평만 외측 갯골(우상단), 함평만 내측 갯골(우하단) (자료: 네이버지도)

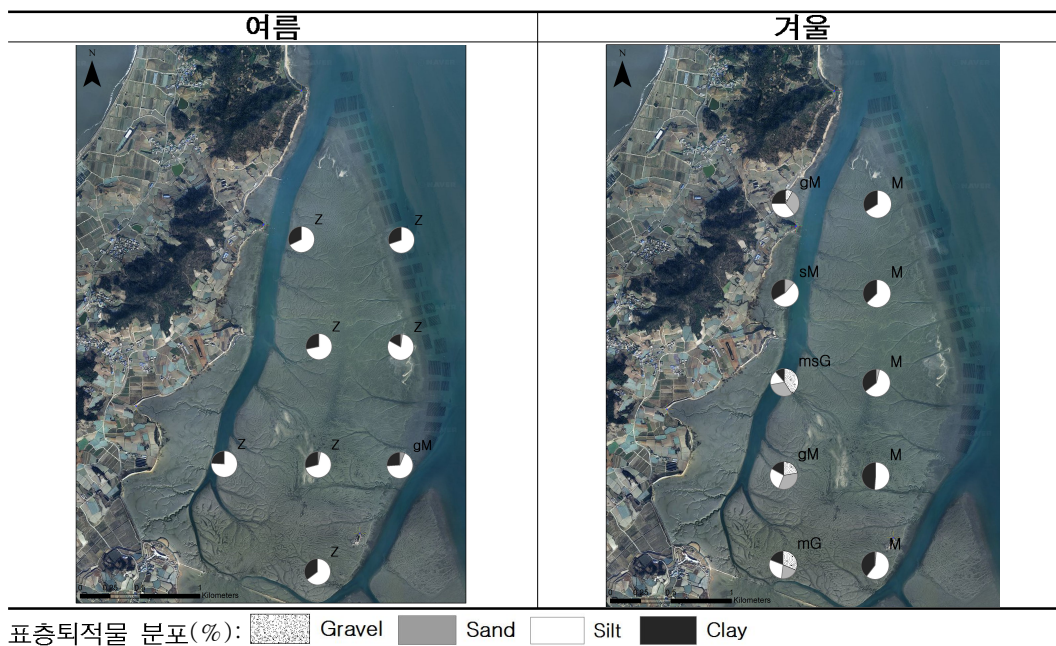


그림 9. 함평만 외측 갯골 일대 표층퇴적물의 계절적 분포 (자료: 국토해양부, 2009)

## (2) 함평만 내측 갯골

함평만 내측 갯골 유역은 행정구역상으로 전라남도 무안군 현경면에 속하며, 함평만에서도 가장 내측에 위치한다. 지리적 위치는 위도 35° 1' 33.5" N~ 35° 4' 6" N이며, 경도 126° 23' 30" E~ 126° 26' 29" E에 해당된다(그림 10). 지형적으로는 주갯골과 연결되는 부분에 양쪽으로 사주가 발달되어 있어 갯벌의 사질 퇴적물 공급원이 되며, 함평만을 구성하는 주갯골과 연결된다. 조석은 위의 함평만 개관 내용을 참조하면 된다.

표층퇴적물 분포는 폐쇄형 만에서도 만의 가장 내측에 위치하여 유역에 미치는 에너지의 양이 작으나, 만입구에 사질퇴적물의 공급원이 있어 계절에 따라 에너지가 미치는 방향 및 크기에 의해 표층퇴적물 분포가 변화한다. 파랑 및 조류 에너지가 비교적 약한 여름에는 니질(muddy) 퇴적물이 우세하게 나타나며 갯골저 일부에 사질(sandy)도 나타난다, 겨울에는 사질(sandy) 퇴적물이 우세하게 나타나며 역도 섞여 나타난다(그림 11).

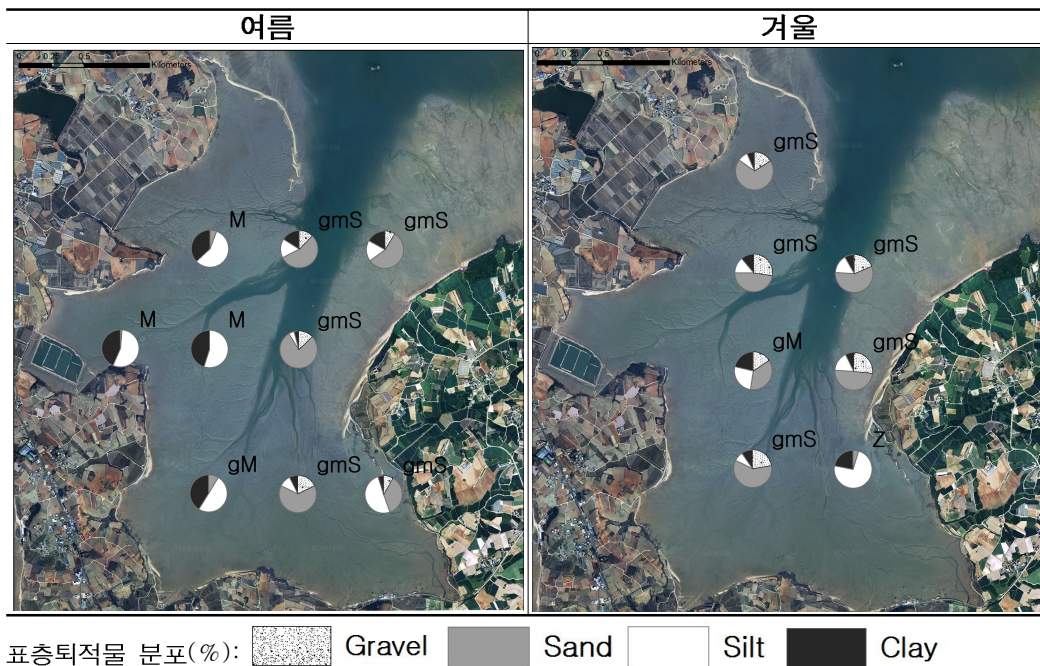


그림 10. 함평만 내측 갯골 일대 표층퇴적물의 계절적 분포 (자료: 국토해양부, 2009)

표 1. 연구지역의 갯벌 유형

|         | 조차       | 지형      | 표층퇴적물 분포                                    |
|---------|----------|---------|---|
| 영광군 염산면 | 대조차(>4m) | 개방형     | 실트질   |
| 곰소만 죽도  | 대조차(>4m) | 반폐쇄형    | 모래실트질                                       |
| 함평만 외측  | 대조차(>4m) | 폐쇄형(만입) | - 여름: 실트질<br>- 겨울: 니질우세, 갯골저부분 역포함          |
| 함평만 내측  | 대조차(>4m) | 폐쇄형(만내) | - 여름: 니질우세, 갯골저부분 사질분포<br>- 겨울: 역이 포함된 사질우세 |

위의 내용을 종합하여 조차, 지형, 표층퇴적물 분포에 따른 갯벌 유형에 따라 연구지역의 특성을 정리하면 <표 1>과 같다.

## 제2장 연구동향 및 이론적 배경

### 1. 연구 동향

갯벌 연구는 크게 지형학, 해양학, 생물학, 공학<sup>19)</sup>분야에서 시행되고 있으며, 갯벌 지형 중의 하나인 갯골 연구 또한 마찬가지이다. 갯골연구를 분야별로 보면 최근에는 원격탐사 기술의 발전에 따라 공학분야에서 위성영상을 이용하여 갯골을 추출하는 방법론적 연구가 많이 이루어지고 있다. 이는 갯골이 현장조사 시에 많은 위험이 따르며, 넓은 범위에 걸쳐서 보았을 때 형태적분석이 가능하기 때문이다. 주제별로 보면 하천과의 유사성을 비교 연구한 것이 가장 많으며, 최근에는 해수면 상승과 관련하여 갯골의 형성과정 및 시간 스케일에 따른 변이에 대한 연구도 많이 이루어지고 있다. 이는 지형학보다는 해양학 쪽에서 모델링을 고안하는 연구가 대부분을 차지하며, 염습지에 서식하는 생물학 연구에서도 많이 시행되고 있다.

하지만 갯골 관련 연구는 그 수가 지형학뿐만 아니라 갯벌 관련 논문에 비하여 턱없이 미미한 수준이다. 따라서 주제별로 편수가 적기 때문에 주제별로 나누어보지 않고 국내와 국외로 나눠서 선행연구 동향을 살펴보고자 한다.

#### 1) 국내 연구

갯골과 관련된 국내논문은 박동원·유근배(1980)<sup>20)</sup>에 의하여 처음 수행되었다. 박동원 외(1980)는 천수만일대 여섯 개 갯골유역을 대상으로 1:2,500 항공사진과 1:25,000 지형도를 이용하여 갯골의 형태를 계량적으로 분석하고 하천형태와 비교하였다. 갯골 수와 길이를 차수별로 회귀분석한 결

---

19) 위성영상 활용법을 연구한 토목 및 측량, 지구과학 등이 포함된다.

20) 박동원·유근배, 1980, “천수만의 갯골 형태에 관한 계량적 분석,” 지리학, 22, pp.1-9

과 6차수를 제외하고 갯골 수는 하천과 유사하였으나, 길이는 하천과는 다른 결과를 도출하였다. 분기율과 유량에 대한 수문학적 모수를 차수별로 값을 구한 결과 갯골은 하천과 하구역의 중간 값을 갖는다는 점을 도출하였다.

박정재(1999a, 1999b)<sup>21)</sup>는 순천만 주갯골과 지류갯골을 대상으로 갯골 퇴적물의 물리화학적 특성을 분석하였다. 갯골별 물리화학적 특성 분석을 위해 입도분석, 유기물함량, 산도, 전기전도도, 치환성양이온농도를 수행하였으며, 연구 결과 하천과 조류의 영향 유무 및 정도의 차이에 따라 다르게 나타났다. 갯골별로 보았을 때에는 다소 유속이 강한 조류가 드나드는 갯골저에서는 입도분포가 조립화되는 경향을 보였으며, 조류의 영향을 적게 받는 갯골 양안에서는 세립화되는 경향을 보였다. 이 같은 결과는 산도와 전기전도도에도 나타났다. 갯골의 종류별로 보았을 때에는 하구역에 해당되는 주갯골이 다른 지류갯골들과 여러 물리화학적 지표면에서 다르게 나타났으며, 식생의 유무에 따라서 유기물함량과 치환성양이온농도가 다르게 나타났다.

유주형 외(2004)<sup>22)</sup>는 강화도 남단 갯벌을 대상으로 6.6m 공간해상도를 갖는 Kompsat-1(아리랑1호) EOC영상을 이용하여 영상의 texture에 따라 갯벌의 표층 퇴적상을 펠 갯벌, 혼합 갯벌, 사질 갯벌로 구분하고, 이에 따른 조류로의 밀도를 구하였다. 연구 결과 펠 갯벌은 높은 밀도를 나타내며, 혼합 갯벌과 사질갯벌은 조류로가 단순하며 직선으로 발달함을 나타냈다. 펠 갯벌의 경우 세류들이 많이 발달하므로 더 나은 공간해상도 자료가 필요함을 한계점으로 제시하였다.

엄진아 외(2007)<sup>23)</sup> 및 엄진아(2008)<sup>24)</sup>는 강화도 남단 갯벌을 대상으로

---

21) 박정재, 1999a, “갯골퇴적물의 물리화학적 특성에 관한 연구: 순천만을 사례로,” 서울대학교 석사학위논문; 박정재, 1999b, op. cit, pp.45-65

22) 유주형·우한준·유홍룡·안유환, 2004, “EOC를 이용한 강화도 갯벌 조류로와 퇴적상과의 관계 연구,” 한국지형공간정보학회 학술발표자료집

23) 엄진아·이윤경·유주형·원중선, 2007, “고해상도 위성 영상을 이용한 조류로의 프랙털 분석,” 대한원격탐사학회, 23(6), pp.567-573

24) 엄진아, 2008, “고해상도 인공위성 영상과 프랙털 분석을 이용한 조간대 수로특성 연구,” 연세대학교 석사학위논문

IKONOS영상을 이용하여 박스계수법을 이용한 프랙털 분석을 실시하였다. 결과는 전체적인 분석과 입도에 따른 값 DEM을 이용한 고도에 따른 값을 나누어 도출하였으며, 프랙털 값이 높아질수록 지선이 잘 발달함을 의미한다. 전체적으로 개별조류로의 복잡성은 1.1에서 1.2사이를 나타내었고, 네트워크 차원에서는 1.46~1.62를 나타냈다. 입도분포에 따른 네트워크차원은 모래갯벌이 1.38에서 1.61, 펄갯벌은 1.73~1.87을 나타내었다. 마지막으로 고도가 낮은 곳은 모래갯벌과 비슷한 값을 고도가 높은 곳은 1.77에서 1.87사이의 값을 나타냈다.

국내연구 종합 결과 하천과 조류 그리고 파랑의 영향의 차이를 기인하는 갯골 분포의 지리적 특성에 따라 갯골 특성 또한 다르게 나타났다. 갯골의 입지는 하천, 조석 및 조류, 파랑을 포함하는 에너지 공급원의 차이를 보이게 되며 이는 표층 퇴적물과 같은 물리적 특성의 변화를 가져오기 때문으로 보인다. 따라서 갯골 연구에 있어서 갯골의 특성 차이를 가져오는 갯벌의 유형 및 물리적 특성에 따른 비교 연구가 필요하다.

## 2) 국외 연구

국외 연구 또한 마찬가지로 지형학, 해양학, 공학분야에서 시행하고 있다. 연구내용 측면에서는 갯골의 특성을 하천과 비교하여 밝히는 연구가 많으며, 최근에는 원격탐사 자료의 발달과 함께 원격탐사를 이용한 방법론적 측면의 연구가 많이 진행되고 있다. 또한 최근 기후변화와 관련하여 갯골의 발생 및 형성과정과 시간적 변이에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.

먼저 갯골에 관한 연구는 Myrick, M. and Leopold, L.B.(1963)에 의해 최초로 수행되었다. 이들은 알렉산드리아근처 Potomac 강의 하구역을 대상으로 횡단면의 너비, 깊이 유량 및 유속 분석을 실시하였고, 분석 결과 하구역의 하도는 육상의 하천과는 다른 특성을 나타낸다는 것을 밝혔다. 이후 갯

골을 하천과 비교하는 연구가 방법론적으로 주로 사용되었다. 유사한 연구로서 French, J.R. and Stoddart, D.R.(1992)는 영국의 Norfolk를 대상으로 수리기하학을 분석하여 갯골의 형성요인을 하천과 비교하였다.

2000년을 즈음하여 원격탐사(Remote Sensing) 자료의 이용이 활발해짐에 따라, 이를 이용한 갯골 연구들이 진행되기 시작하였다. 대표적인 것으로 Fagherazzi et al(1999)이 있으며, 이들은 베니스의 석호와 캘리포니아의 Petaluma Marsh, Barnstable Salt Marsh 하구역을 대상으로 갯골의 평면적 특성을 보기 위해 박스계수법을 이용한 프랙탈(fractal) 분석을 실시하였다. 그 결과 갯골체계는 하천과는 달리 스케일에 영향을 받는 것을 밝혀냈다. 또한 항공사진과 고도자료를 이용하여 영상에서 갯골을 추출하는 방법론을 제시하였다. 같은 그룹의 연구로써 Rinaldo et al(1999a)는 영상에서 갯골 유역을 추출하는 방법을 제안하였고, Hack' s law와 밀도, 너비, 길이를 분석하여 유역과 갯골의 관계를 확률분포를 통해 제시하였다.

이들의 연구 이후 원격탐사 자료에서 갯골을 추출하는 방법론적 연구가 많이 진행되었으며, 대표적으로 Lohani, B and Mason, D.C.(2001)과 Lohani, B. et al(2006)이 있다. 전자의 연구에서는 LiDAR자료를 이용하여 갯골 추출 방식의 알고리즘을 일부 수정한 방법을 제안하였고, 후자의 연구에서는 갯골을 추출하는데 적합한 자료를 탐색하기 위해 LiDAR와 LiDAR와 항공사진을 결합한 두 영상의 오차를 비교하였다. 결과 LiDAR 단독 자료가 오차가 적어, 갯골 연구에서의 LiDAR자료의 효용성을 검증하였다.

또한 2000년 이후 기후변화가 대두됨에 따라 기후변화에 따른 해수면상승과 관련하여 갯골의 발생(ontogeny) 및 형성과정(evolution)에 관한 시계열적 연구가 많이 진행되었다(D'Alpaos et al, 2001; Wallace, K.J. et al, 2005; Stefanon, L. et al, 2010; Vlaswinkel, B.M. and Alessandro Cantelli, 2011). 이 연구들은 시뮬레이션을 하는 것이기 때문에 고가의 실험장비 또는 수학적 모델링이 사용되었다.

### 3) 선행연구의 한계점 및 시사점

주요 선행연구를 종합하면 <표 2>와 같다. 먼저 연구내용적인 측면을 보면 하구역 논문 하나를 제외하고는 모두 갯골의 체계 및 수리기하학적 접근인 평면적 분석이 대부분을 차지한다. 또한 연구방법론적 측면의 연구들이 많다.

연구지역을 보면 국내논문이 적어 국내지역의 연구가 적을 뿐만 아니라 국외는 이탈리아 베니스 석호지역만 집중적으로 수행되었다. 갯벌은 조석과 지형 및 퇴적물에 따라 매우 상이한데, 특히 석호지역에 나타나는 섬 형태 (island basin)의 갯벌은 우리나라의 갯벌과 매우 다르므로 우리나라 갯벌에 적합한 연구가 필요한 실정이다.

마지막으로 연구방법 및 자료 측면에서 보았을 때 다소 오래된 연구가 많아 원격탐사 자료의 공간해상도가 떨어진다. 갯골은 갯벌에 나타나는 미지형이기 때문에 원격탐사자료로 연구 시에 자료의 높은 공간해상도를 필요로 한다. 그런데 최근에 수행된 연구에서 LiDAR 자료를 사용한 것을 확인할 수 있는데, LiDAR는 공간해상도가 높을 뿐만 아니라 지형분석에 용이하므로 갯골 분석에 적합하다고 볼 수 있다.

종합해보면 기존의 연구에서 내용적인 측면으로는 갯골의 체계 및 수리기하학적 분석 즉, 평면적인 분석이 대부분이며, 연구지역의 측면으로는 우리나라의 연구가 적고 유럽권에 치중되어 있다. 연구방법 및 자료 측면에서는 예전연구가 많아 자료의 공간해상도가 떨어지는 한계점이 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 한계점을 극복하기 위하여 연구 내용적인 측면에서 갯골의 체계 및 수리기하학적 분석뿐만 아니라 횡단면 분석을 통하여 갯골 지형을 3차원적으로 분석하고자 한다. 그리고 우리나라 서해안 갯벌을 대상으로 하여 우리나라 갯벌 특성에 적합한 갯골을 분석하고자 하며, 이를 위해서 현재 가장 높은 공간해상도를 보이며 지형분석에 적합한 LiDAR 자료를 이용하여 기존 연구의 한계점을 극복하고자 한다.

표 2. 갯골과 관련된 선행연구 요약

| 저자                                       | 년도      | 내용   | 연구지역                      | 연구방법 및 자료                                      |
|--|---------|--|---------------------------|--|
| 박동원·유근배                                  | 1980    | Strahler의 하천차수와 갯골의 수리기하를 분석하여 갯골의 계량적 특성을 하천, 하구역과 비교                   | 천수만                       | 1:2,500 항공사진, 1:25,000 지형도                     |
| 박정재                                      | 1999    | 갯골 표층퇴적물의 물리·화학적 특성을 분석하여 주갯골과 소갯골 특성의 차이를 밝힘                            | 순천만                       | 야외조사   |
| 유주형 외                                    | 2004    | 영상자료를 통하여 필갯벌과 모래갯벌의 texture, 밀도 비교                                      | 강화도남단                     | Kompsat EOC (6.6m)                             |
| 엄진아 외                                    | 2007    | 박스계수법을 이용한 프랙탈분석 필갯벌보다 지선이 잘 발달한 모래갯벌에서 프랙탈 값이 높게 나타남을 밝힘                | 강화도남단                     | IKONOS (1m)                                    |
| 엄진아                                      | 2008    | "  | "                         | "  |
| Myrick, M and Leopold, L.B.              | 1963    | 하구역 횡단면의 너비, 깊이, 유량 및 유속 분석을 통해 하천과 비교                                   | Potomac Riv. Estuary      | 야외조사   |
| French, J.R. and Stoddart, D.R.          | 1992    | 수리기하학을 이용하여 갯골의 지형형성 요인을 하천과 비교 분석                                       | Norfolk (UK)              |  |
| Fagherazzi et al                         | 1999    | 영상에서 갯골을 추출하는 방법론을 제시하고, 박스계수법을 이용한 프랙탈 분석을 통해서 스케일 의존적인 갯골체계 특성 연구      | Venice lagoon외<br>염습지 두 곳 | SPOT1(20×20m <sup>2</sup> ),<br>elevation data |
| Rinaldo et al.                           | 1999(a) | 영상에서 갯골유역 추출 방법제안 및 유역분지와 갯골체계와의 관계를 확률분포를 통해 밀도, Hack's law, 너비, 길이를 분석 | Venice lagoon             | 확률분포   |
| Rinaldo et al.                           | 1999(b) | 갯골의 간조·만조시 유량과 지형과의 관계 분석 및 모델구축   | Venice lagoon             | 통계자료   |
| Lohani, B. and Mason D.C.                | 2001    | LiDAR자료에서 갯골 추출 방식의 알고리즘을 수정한 반자동방식 제안                                   | Wrangle Flats et al       | LiDAR  |
| Lohani, B. et al.                        | 2006    | 갯골을 추출하기에 적합한 자료를 LiDAR와 항공사진과 LiDAR를 결합한 두 영상의 오차 비교                    | Venice lagoon             | LiDAR, 항공사진                                    |
| D'Alpaos et al.                          | 2001    | 수력학적 모델을 이용하여 갯골의 형성과정을 고안하고, 환경변화 갯골발달의 관계 추적                           | Venice lagoon             | 모델링  |
| Wallace, K.J. et al.                     | 2005    | 갯골 변화의 시계열 분석  | Venice lagoon             | 항공사진, 야외조사                                     |
| Stefanon, L. et al.                      | 2010    | 실험장비모델을 이용하여 갯골과 갯벌의 형성과정 고찰   | 가상지역(Venice)              | 실험장비   |
| Vlaswinkel, B.M. and Alessandro Cantelli | 2011    | 실험장비모델을 이용하여 갯골의 지형발달과정을 길이, 깊이, 너비관계를 중심으로 고찰                           | 가상지역                      | 실험장비   |

## 2. 조석에 대한 이론

조석(潮汐; tide)이란 달과 태양의 기조력에 의하여 발생하는 해면의 주기적 승강운동을 말한다<sup>25)</sup>. 조석으로 인하여 해수면이 높아진 상태를 만조(滿潮) 혹은 고조(high tide)라 하고, 낮아진 상태를 간조(干潮) 혹은 저조(low tide)라고 한다. 간조에서 만조로 바뀔 때 바닷물이 먼 바다에서 해안 쪽으로 밀려오게 되는데 이것을 밀물 혹은 창조류(漲潮流; flood current)라고 하며, 만조에서 간조로 바뀔 때 바닷물이 해안에서 외해로 흘러나가는 것을 썰물 혹은 낙조류(落潮流; ebb current)라고 한다<sup>26)</sup>.

기조력(起潮力; tide-generating force)은 천체가 회전운동을 할 때 생기는 원심력과 인력의 합에 의해 발생하는데, 인력은 거리의 세제곱에 반비례하므로 태양의 기조력보다 달의 기조력이 크다. 기조력은 태양, 달, 지구의 배열에 따라 달리 나타나는데 태양·지구·달이 일직선상에 위치할 때 기조력은 최대가 되며, 이때를 대조(大潮; spring tide) 또는 사리라고 한다. 반면 태양과 달이 지구에 대해 직각일 때 기조력은 최소가 되어 조차가 가장 작은 조석이 일어나며, 이때를 소조(小潮; neap tide) 또는 조금(neap tide)이라 한다(그림 11)<sup>27)</sup>. 달과 태양의 지구에 대한 인력은 지구상의 각 지점

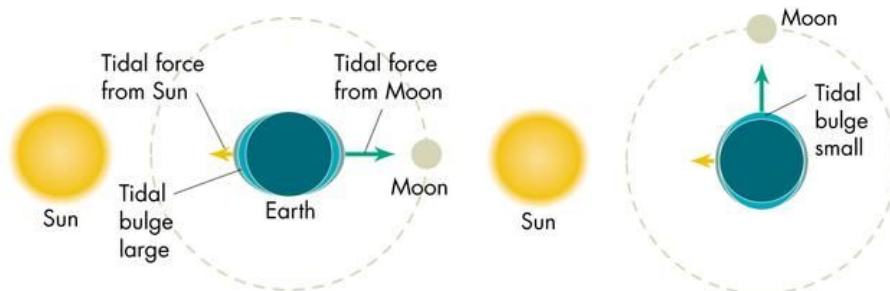


그림 11. 기조력 원리에 의한 대조 혹은 사리(좌측)와 소조 혹은 조금(우측)

(출처: <http://www.physics.unc.edu/>)

25) 국립해양조사원, 2011, 2011년 조석표

26) 이윤화, 2005, 한국의 서남해안 갯벌 지형 연구, 경북대학교 박사학위논문, p.6

27) 국립해양조사원 (<http://www.khoa.go.kr/>)

에서 조금씩 다르며, 그로 인해 해면의 승강은 보통 1일 약 2회이나 지역에 따라서는 1일 1회인 지역도 있다.

우리나라는 보통 1일 약 2회로 반일주조(半日週潮; semidiurnal tide)의 형태를 띠며, 지구는 자전하기 때문에 한 지점의 기조력은 시간에 따라 변하므로 일일의 고조와 저조가 같지 않은 형태로 나타나는데 이를 일조부등(日潮不等; Diurnal inequality)이라 한다. 일별과 월별 혹은 년별마다 조위가 다른 특성으로 인해 조위와 관련된 다양한 명칭과 정의가 있으며 아래의 <표 3>와 같다.

표 3. 조위와 관련된 명칭과 정의

| 명칭   | 정의  |
|--|---|
| 극조위 (highest high water level)             | 지금까지 관측된 고조위 중 가장 높은 조위   |
| 약최고 고조위 (approx. highest high water level) | 일년에 1~3회 정도 발생하는 최고조위로, 이 정선이 지형도에서 바다와 육지의 경계가 되는 해안선이 된다.         |
| 대조평균 고조위 (high water ordinary spring tide) | 매월 삭·망일로부터 약 5일 이내 발생한 대조 중에서 가장 높은 고조위를 1년 이상 평균한 것                |
| 소조평균 고조위 (high water ordinary neap tide)   | 매월 상·하현일로부터 약 5일 이내 발생한 고조위 중에서 가장 높은 고조위를 골라 1년 이상 평균한 것           |
| 평균해면 (mean sea level)                      | 조석이 없다고 가정했을 때의 해면의 정지면. 1년 이상의 연속된 총 검조 기록을 평균한 것으로, 육상 표고의 기준면이다. |
| 소조평균 저조위 (high water ordinary neap tide)   | 매월 상·하현일로부터 약 5일 이내 발생한 저조위 중에서 최저조위를 골라 1년 이상 평균한 것                |
| 대조평균 저조위 (high water ordinary spring tide) | 매월 삭·망일로부터 약 5일 이내 발생한 최저저조위를 골라 1년 이상 평균한 것                        |
| 약최저 저조위 (approx. lowest low water level)   | 1년에 1~3회 정도 발생하는 최저조위로, 약최저저조위가 해도상 수심의 기준면이 된다.                    |
| 저극조위 (lowest low water level)              | 지금까지 관측된 저조위 중 가장 낮은 조위   |

자료: 이윤화, 2005, op. cit, p.7 (농어촌진흥공사, 1995, 한국의 간척, pp.18~19 기초로 작성)

<표 3>에 의하면 약최저 저조위는 해도상 수심의 기준면이 되며, 본 연구에 사용되는 LiDAR기반 DEM자료의 기준면이 된다. 또한 연구의 범위가 연중 조석의 영향을 받는 갯벌지형을 모두 포함하므로, 조위 명칭과 관련하여 연구범위를 설정하면 약최고 고조위와 약최고 저조위 사이가 된다.

### 1) 조차에 기반한 해안 분류

조차(tidal range)는 대조와 소조의 차이를 말한다. 조차는 평균조차와 조차가 작은 소조 때의 소조차, 그리고 조차가 큰 대조 때의 대조차로 분류할 수 있다. Davies는 1964년 조차에 따라 해안 지형의 특성이 결정된다고 하였고, 대조차를 기준으로 해안을 분류하였다. 그는 조차가 2m 이하인 지역은 소조차(microtidal)해안, 조차가 2m에서 4m이내인 지역은 중조차(mesotidal)해안, 4m 이상인 지역은 대조차(macrotidal)해안으로 분류하였다. 이는 후에 Hayes(1975)에 의해서 다시 정립되었다. 위 분류는 추후에도 계속 입증되어 많은 연구에서 사용하는 있는 기준이다. 본 연구에서도 연구지역의 조차에 따른 분류 시에 참조하였다.

### 2) 연구지역의 조석

연구지역은 함평만, 영광군 염산면 일대, 곰소만으로 전라남·북도 서부권 갯벌에 해당된다<sup>28)</sup>. 한반도 주변의 조석은 진도를 기준으로 북쪽은 조차가 3m이상, 목포를 기준으로 북쪽은 4m 이상의 대조차 해안이다(그림 12).

---

28) 국토해양부, 2011, 연안습지 기초조사: 기본조사, p.134



그림 12. 우리나라의 등조시도(출처: 해양수산부, 2006)

표 4. 2011년 연구지역의 조석

| 조위관측소 |       | 영광      | 위도    |
|-------|-------|---------|-------|
| 조위    | 고조위   | 약최고고조위  | 695.5 |
|       |       | 대조평균고조위 | 639.4 |
|       |       | 소조평균고조위 | 602.5 |
|       |       | 평균고조위   | 565.9 |
|       | 저조위   | 소조평균저조위 | 77.7  |
|       |       | 대조평균저조위 | 32.4  |
|       |       | 평균저조위   | 97.7  |
|       | 평균해면  | 347.8   |       |
| 조차    | 평균대조차 | 663.4   |       |
|       | 평균소조차 | 262.4   |       |
|       | 평균조차  | 468.1   |       |

자료: 국립해양조사원, 2011

연구지역과 가장 인접하는 조위관측소는 영광, 위도 총 두 곳으로, 본 연구에서는 우리나라 조위관측소 중 위의 두 관측소의 조위만 참조하였다. 함평만과 영광군 염산면 일대는 영광조위관측소에, 곰소만은 위도조위관측소와 인접한다. 그리고 본 연구에서 분석할 연구지역의 LiDAR자료가 2011년 자료이므로, 2011년 조석표를 이용하였다. 목포, 영광, 위도 조위관측소의 2011년 조석을 정리하면 <표 4>와 같다. 세부항목은 앞서 언급한 정의를 기준으로 계산되었다.

### 3. 갯벌의 정의 및 유형

#### 1) 갯벌의 정의

갯벌(tidal flat)이란 밀물 시에는 바닷물로 덮여있으나 썰물 시에는 육지로 드러나는 연안가로서 바닥이 모래와 찰로 이루어진 평평한 지형을 말한다. 갯벌은 순우리말로써 ‘갯’은 갯가, 즉 바닷가를 의미하고 ‘벌’이란 넓은 들을 의미한다. 따라서 갯벌은 바닷가의 넓은 들이라는 말로, 저조시에 한국의 서해안에 펼쳐지는 지형을 묘사하는 용어이다<sup>29)</sup>.

갯벌은 육상생태계와 해양생태계가 접하는 전이지대의 특성으로 인하여 범위 또는 경계가 명확하지 않다. 때문에 학자들 간에 명칭이나 범위에 있어 약간의 차이를 보이며 아래와 같다.

고철환(2001)은 위의 정의와 함께 갯벌을 조위를 참조한 대상분포에 따라 구분하여 명명하였다. 육지 쪽으로부터 바다 쪽으로 향하면서 상부조간대갯벌(high-tidal flat), 중부조간대갯벌(mid-tidal flat), 하부조간대갯벌(low-tidal flat) 등으로 구분하였다. 이 구분의 기준 해면은 평균만조선(고조면)과 평균간조선(저조면)이며, 연중 대부분이 노출되어 있으며 사리 때의 폭풍에 의해 잠기는 평균만조선(고조면) 위와 연중 몇 회만 드러나는 평균간조선(저조면) 아래 지역도 갯벌에 포함시켜 각각 조상대 갯벌(supratidal flat), 조하대(subtidal zone)로 부르기도 한다(그림 13). 이와 같이 구분한 이유는 조류의 영향 유무와 하루 중 또는 연중 어느 정도 물에 잠기느냐에 따라 표층 퇴적물의 입도와 생물학적 특징에 차이가 발생하기 때문이다. 육지 쪽으로부터 바다 쪽으로 향하면서 조류와 파랑에너지의 영향이 커지기 때문에 점차 조립화되는 경향이 있으며, 식생은 조상대에만 분포하고 매일 물에 잠기는 평균만조선 아래 지역은 생물만 분포하며 그것도 대상에 따라 달리 분포한다.

---

29) 고철환, 2001, 한국의 갯벌, 서울대학교출판부:서울

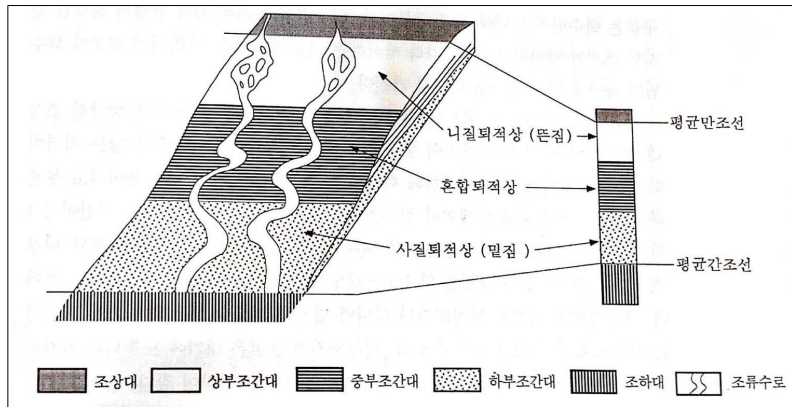


그림 13. 갯벌의 구분

(출처: 고철환, 2001, *op. cit.*, p.13)

박의준(1995)은 석사학위논문에서 염생습지와 갯벌을 모두 아우르는 용어로서 ‘간석지(tidal flat)’를 사용하였고, 간석지 내에서도 식생의 유무에 따라 식생이 존재하지 않는 곳은 갯벌(mud flat)로 식생이 존재하는 곳은 염생습지(salt marsh)라 명명하였다. 하지만 박사학위논문에서는 염생습지와 갯벌, 염하구를 통칭하는 용어로서 ‘해안습지’를 사용하였으며, 염생습지와 갯벌은 위와 마찬가지로 식생의 유무에 따라 구분하였다(박의준, 2000). 박정재(1999a, 1999b) 또한 염생습지와 갯벌을 모두 아우르는 용어로서 해안습지를 사용하였으며, 식생의 정착 유무에 따라 염생습지와 갯벌로 구분하였다.

해양학과 공학분야에서는 갯벌을 지칭하는 용어로서 ‘조간대’라는 용어를 주로 사용하며 다음과 같이 정의하고 있다(류주형, 2001; 엄진아 외, 2007; 엄진아, 2008; 유주형 외, 2004; 장진호, 1995 등). 조간대(tidal flat)는 평균고조선(mean high water level)과 평균저조선(mean low water level) 사이에 위치하고, 흔히 조류로(tidal channel) 혹은 조류세곡(tidal creek)에 의해 절단되는 광역의 완경사 지역으로서 조석(tide)에 의한 밀물과 썰물의 운동으로 노출과 침수가 주기적으로 반복되는 지역이다

(Gary et al., 1972). 따라서 고철환(2001)의 정의에 따르면 조상대와 조하대를 제외한 지역에 해당된다.

해외 사례로는 D'Alpaos et al.(2005)은 갯골이 나타나는 지역으로 조간대(intertidal platform)란 용어를 사용하였으며, Fagherazzi et al.(1999)와 Lohani(2001, 2006) 등이 갯벌(tidal flat)과 염생습지(salt marsh)를 모두 포함하는 용어로서 감조분지(tidal basin)를 언급하였다<sup>30)</sup>.

위와 같이 학자 또는 분야마다 갯벌 또는 간석지의 정의가 상이하다(그림 14). 본 연구에서는 조수의 영향을 받는 모든 지형을 대상으로 하며, 영구적인 갯골이 나타나지 않는 해안은 포함하지 않는다. 따라서 본 연구의 대상에 적합한 고철환(2001)의 정의를 사용하고자 한다. 학계에서는 조석간만의 차이에 의해 드러나는 지역임을 나타내는 말로 간석지(干潟地)라는 용어를 주로 사용하고 있으나 본 연구에서는 연구대상인 ‘갯골’과 부합하는 용어로서 갯벌을 사용하고자 한다.

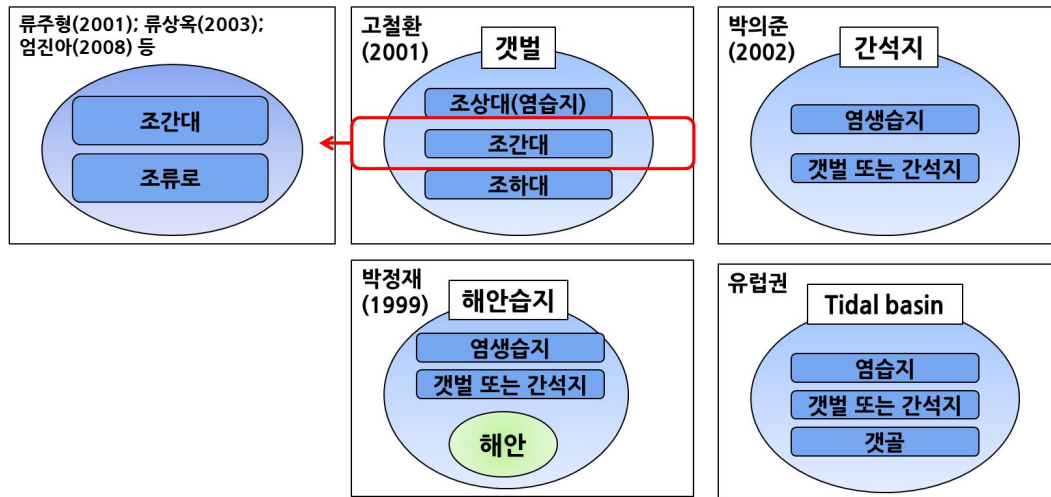


그림 14. 학자들간의 상이한 갯벌 또는 간석지의 정의

30) 해외사례로 제시한 용어로서 ‘intertidal platform’, ‘tidal basin’은 대체할만한 마땅한 학술용어가 없어 각각 가장 의미가 부합하는 ‘조간대’, ‘감조분지’로 명명하였다.

## 2) 갯벌의 유형

갯벌의 특성을 보다 쉽게 파악하기 위해서 갯벌 발달 및 형성에 영향을 미치는 주요 요인에 따라 분류할 수 있다. 갯벌 유형은 조차, 지형, 에너지/물질공급, 퇴적물 분포에 따라 분류를 할 수 있다<sup>31)</sup>. 이 중에서 에너지/물질공급은 곧 퇴적물 분포에 반영되므로 생략하고 조차, 지형, 퇴적물 분포에 의한 분류로 나누어 살펴보려 한다.

### (1) 조차에 의한 분류

갯벌을 이루고 있는 갯벌퇴적물은 주로 조수나 파랑의 흐름에 의한 입자의 이동, 침식 및 퇴적 등의 퇴적작용이 반복되어 형성된 것이다. 갯벌이 속하는 연안퇴적환경에서의 퇴적작용은 퇴적물의 공급량, 파도, 조류, 연안류의 세기, 기후, 해수면의 변화 및 지구조 운동 등에 의해 영향을 받는다. 특히 연안의 퇴적작용과 지형은 조수간만의 차이에 의한 영향을 가장 많이 받으므로 연안퇴적환경을 위에서 언급한 Davies의 분류에 따라 대조차(조차>4m), 중조차(조차=2~4m) 및 소조차(조차<2m) 지역으로 나눌 수 있다. 조차에 의한 분류에 따르면 서해안의 대부분은 대조차 환경, 남해안은 중조차 환경이며 동해안은 소조차 환경에 속한다. 갯벌은 만조와 간조의 차이가 커서 부유물의 퇴적이 잘 일어날 수 있는 환경, 즉 중조차 또는 대조차 환경이 지배하는 연안에 발달하므로, 대조차 지역에 해당되는 서해안의 연안에 넓게 갯벌이 발달할 수 있었다.

### (2) 지형에 의한 분류

갯벌은 황해나 북해처럼 대륙붕해로 이루어진 매우 완만한 해역의 연안이나 강의 하구나 만처럼 썰기형을 이루고 있어 조수가 해안으로 밀려들어가면

---

31) 해양수산부, 2005b, 우리나라 갯벌 -자연생태의 특성-, 시그마프레스, pp.

서 알아지거나 좁아져서 조수의 영향이 증가하는 지형에서 잘 발달한다. 지구조적인 운동에 의해 형성된 대규모의 지형을 제외하고는 대부분의 소규모 연안지형은 강, 파랑 또는 빙하의 영향에 의해 변형된 것에 제4기 해수면의 상승에 의한 결과로 형성된 것이다. 그러므로 지형의 특성에 의해 갯벌은 개방형, 하구형, 폐쇄형(만입형) 및 반폐쇄형 갯벌로 분류될 수 있다.

서해안에서는 주로 연안이나 섬의 서쪽과 북쪽에 분포하는 갯벌에서 이러한 형태를 보이고 있다. 개방형 갯벌은 조류의 영향은 물론 파랑의 영향도 매우 강하게 받음으로 최상부에 조수해빈이 빈번하게 발달하거나 모래갯벌이 매우 우세하게 발달하는 특징을 보이고 있으며, 서해안에 형성되어 있는 대부분의 해수욕장이 개방형 갯벌에 해당된다. 이들 모래갯벌은 여름철에는 일부가 펼질갯벌을 이루고 있으나 겨울철에는 대부분의 펼질갯벌이 침식되고 사질갯벌로 변하는 계절변화를 보이고 있다. 서해안에서는 대부분 해안선이 단조롭거나 직선형태를 갖는 해안지형을 보이고 경사도가 비교적 높은 해안을 이루고 있다. 남해안에서는 주로 남쪽면에 형성되어 있는 갯벌이 개방형 갯벌에 해당되며, 남해안의 해수욕장 또는 경사도가 높은 암벽에 바로 붙어 형성되는 좁은 역질, 사질 및 펼질 갯벌이 개방형 갯벌이다.

하구형 갯벌은 비교적 규모가 큰 하천이 유입하는 연안에 형성된 갯벌을 말하며 한강하구인 강화도 남단에 대규모로 발달한 갯벌, 새만금 하구에 발달한 갯벌이 대표적이며, 아산만과 남양만 사이에 아직 하구형 갯벌의 형태를 일부 포함하고 있는 사주섬, 금강하구의 사주섬, 도암만 내측, 여자만의 벌교와 순천의 작은 하구갯벌, 광양만의 섬진강 하구의 일부, 낙동강 하구의 일부에 부분적으로 발달한다. 하구갯벌은 특성상 하구를 향하여 길게 발달하며 갯벌로 노출이 되지 않은 경우도 있지만 대부분 하구 입구에 사주섬을 형성하고 있는 형태를 갖는다. 한강 하구에서는 한강이 매우 큰 하천이며 퇴적물의 공급량도 매우 많은 이유 때문인지 매우 광범위하게 하구형 갯벌이 거의 외해에까지도 발달하고 있는 형태를 보이고 있다.

폐쇄형 갯벌은 만입형 갯벌로도 불리우는 것으로 만의 입구가 좁아서 파랑으로부터 보호를 받는 만의 내측에 발달하는 갯벌로 대부분 펼질 갯벌이 우세하게 발달한다. 함평만의 동측, 탄도만의 동측, 가로림만의 동측 등 겨울철 북서계절풍의 영향을 강하게 받을 수 있는 만의 형태 및 방향에 따라 만의 일부에서는 모래갯벌이 상당히 넓게 발달하기도 한다. 남해안에서도 큰 만에서는 이러한 영향이 나타나기는 하나 서해안만큼 뚜렷하게 나타나지는 않는다. 서남해안의 많은 마들에는 거의 대부분 폐쇄형 펼질우세 갯벌이 매우 광범위하게 발달하였던 것으로 보이나 오랜 간척사업의 결과 상당히 많은 폐쇄형 갯벌이 사라지거나 그 특성을 잃어버린 것으로 판단된다. 또한 폐쇄형 펼질 갯벌은 삼국시대 이후로 논을 만들기 위한 간척사업의 중요한 대상이 되어 왔으므로 대부분 지난 1,500년간 많이 사라져 버렸던 것으로 보인다.

반폐쇄형은 만의 입구가 넓어서 만의 입구쪽에서는 파랑의 영향이 강하나 만의 안쪽으로 들어가면서 상대적으로 파랑에 비해 조류의 영향이 증가하여 전체적으로 만의 입구에서 만의 안쪽으로 점차 세립해지는 경향을 보이는 갯벌을 전형적인 반폐쇄형 갯벌로 정의할 수 있으며 곰소만이나 가로림만 갯벌이 전형적인 형태를 띄고 있다. 그러나 퇴적물의 특성으로 보거나 지형적인 특성으로 볼때에 서해안의 섬에서는 지형적으로 파랑의 영향으로부터 보호되는 섬의 동쪽해안에 발달하는 갯벌은 모두 반폐쇄형 갯벌로 분류할 수 있으며, 남해안의 다도해 및 연안에 분포하는 갯벌에서 남쪽의 외해로부터 들어오는 파랑의 영향이 감소하는 북쪽 갯벌이 반폐쇄형으로 분류된다, 이것은 부분적으로 파랑을 막아주어 상대적으로 조류의 영향이 강하게 나타나는 갯벌로서 만에 형성된 특징과 유사하기 때문이다. 특히 남해안의 육지와 섬 사이 또는 섬과 섬 사이에 분포하는 갯벌들은 모두 이러한 특성을 가지고 있으므로 반폐쇄형 갯벌로 분류될 수 있다.



그림 15. 개방형 갯벌 예시: 영광군 일대  
(출처: 다음지도)



그림 16. 폐쇄형 갯벌 예시: 함평만  
(출처: 네이버지도)



그림 17. 반폐쇄형 갯벌 예시: 곰소만 (출처: 네이버지도)



그림 18. 하구형 및 개방형 갯벌 예시: 강화도 남단 (출처: 네이버지도)

### (3) 퇴적물 분포에 의한 분류

퇴적물 분포 또는 퇴적상에 의한 분류는 갯벌을 구성하고 있는 물질의 분포양상과 퇴적구조의 우세성을 판단하여 갯벌을 펄갯벌(mud flat), 혼성갯벌(mixed flat) 및 모래갯벌(sand flat)로 분류하는 것을 말한다.

갯벌은 지형, 조류로, 조수의 세기, 파랑의 세기 및 방향, 퇴적물 공급지의 종류와 거리 등의 요인에 의해 다양한 물질들로 구성되어 있다. 우리나라에서 이들 구성성분에 의한 갯벌의 종류는 한 지역의 갯벌이라 하더라도 계절적 변화를 보인다. 또한 한 갯벌에 펄갯벌, 혼성갯벌과 모래갯벌이 모두 존재하는 경우도 있지만 이 셋 중의 하나 또는 두 종류의 갯벌이 우세하게 분포하는 것이 일반적이다. 갯벌 퇴적물 중에 간혹 역도 포함되고 있으나 이들은 주로 조수로를 중심으로 분포하며 조수로의 이동에 의해 잔류하는 역들이 전형적인 갯벌퇴적물에 협재한다.

## 4. 갯골의 정의 및 분류

### 1) 갯골의 정의

갯골은 갯벌 및 염습지 또는 맹그로브 습지 위를 사행하며 조수가 드나드는 지형으로 해안환경 또는 조수 환경에서 독특하며 중요한 지형이다. 갯골을 형성하는 수문학적인 과정은 밀물 시에는 조수가 흘러오면 초기에는 하도의 뱅크(bank)와 제방(levees)를 넘어 범람(overflow)할 때까지 갯골을 통해 흐르나, 이후엔 포상류(sheet flow)로 흐르게 된다. 썰물 시에는 반대의 과정이 일어나며, 처음엔 물이 포상류로 흘러나가다가 마지막에는 갯골을 통해 흘러나간다.

갯골은 습지 내, 습지 외에서 운반된 물, 퇴적물, 유기물, 영양소뿐만 아니라 오염물질까지 운반하는 주요 순환 체계로서 역할을 한다. 갯골에서 수문학적인 역할을 관장하는 조석은 갯골을 통해 외해로의 교환을 가능하게 하는 수단으로서 매우 중요하다. 갯골이 없다면 해안습지 생태계에 영양분과 동식물상의 피난처 및 재생산 공간을 제공하는 것이 가능하지 못할 것이다. 사실 갯골은 초기 하계망 변화 또는 지하수와 강수, 조수의 직접적인 영향에 의한 해안습지 형성에서 나타나는 첫 번째 특성 중 하나이다<sup>32)</sup>.

### 2) 갯골의 분류

갯골을 나타내는 용어로서 Tidal course, Tidal channel, Tidal creek 또는 Tidal rill, Tidal gully 등 다양한 용어들이 사용되고 있어 용어들에 대한 정확한 분류가 요구된다. 여기서 Tidal course는 갯골을 지칭하는 모든 용어를 아우르는 것으로, 정의는 다음과 같으며 갯골의 정의에 해당된다. Tidal course란 조수의 프로세스 또는 조수의 영향에 의한 물의 흐름으로 부터

---

32) Perillo, G.M.E. et al, 2009, *Coastal Wetlands: An Integrated Ecosystem Approach*, Elsevier Science, pp. 185~187

표 5. 갯골의 일반적 분류와 크기 범위 (Perillo, G.M.E. et al, 2009)

| 이름             | 저조시 물이<br>차 있는 여부 | 깊이(cm) | 폭(cm)  | 단면적(cm <sup>2</sup> ) |
|----------------|-------------------|--------|--------|-----------------------|
| Tidal rills    | 없음                | <1     | <2     | <2                    |
| Tidal grooves  | 없음                | 1-5    | 2-10   | <50                   |
| Tidal gullies  | 없음                | 5-100  | 10-100 | 50-1,000              |
| Tidal creeks   | 있음                | 10-200 | 10-200 | 100-4,000             |
| Tidal channels | 있음                | >100   | >200   | >2,000                |

기원된 갯벌의 길게 연장된 오목지형 또는 계곡을 의미한다<sup>33)</sup>. 갯골은 규모 측면에서 볼 때 길이는 변이가 크므로, 단면의 폭과 깊이를 기준으로 삼는다(표 5). 또한 갯골이 일시적이지 않고 발달할 수 있는 요인으로서 저조시 물이 차있는 여부를 중요한 기준으로 삼기 때문에, 이를 바탕으로 다음의 두 분류로 나누어 볼 수 있다.

먼저 Tidal rill은 갯골이 형성되는 초기형태로, 조위의 가장자리 부분에 주로 생긴다. 사면의 경사와 갯벌 퇴적물의 유형에 따라 형태가 직선형부터 수지상까지 다양하게 나타나며, 사질 갯벌에서는 지하수와 지표가 만나는 부분에 주로 생긴다. 깊이와 폭이 매우 작기 때문에, 조위에 따른 범람 정도에 따라 쉽게 소멸되고 생성된다. Tidal grooves는 Tidal rill과 크게 다르지 않으나, 크기 면에서 조금 더 크며 깊이가 약 1에서 5cm이고 폭이 2에서 10cm에 해당된다(표 5). 형태는 직선형을 나타낸다. 주로 Tidal channel의 최가장자리를 따라 다소 경사가 높은 3~7도의 지역에서 발달한다. Tidal gullies는 건조지역에서 발달하는 형태와 비슷하며, 깊이가 깊은 것은 1m 가까이 되는 것도 있고 Tidal rills, grooves보다는 폭이 훨씬 넓다(표 5). 저조위 동안에는 흐름을 관찰할 수 없기 때문에, 만조위의 범람에 의해서 형태가 보존되거나 강화된다. 위 세 가지 갯골유형은 갯골의 최상부 유역에 발달하며,

33) *ibid*, p.187

상대적으로 큰 경사를 가지는 지역에서 발견된다. 대부분 선형이거나 복잡한 형태를 나타내며, 미앤더(meander)는 거의 발달하지 않는다.

갯벌에서 역동성을 나타내는 주요 지표는 Tidal creeks과 channels이다. 앞서서도 언급했다시피 위의 세 가지 유형과 가장 큰 차이점은 저조와 만조에 상관없이 항상 갯골에 물이 차 있다는 것이다. 이는 지형의 보존과 발달에 큰 기여를 하며, 일시적으로 소멸되는 일이 없도록 한다. 이 중 Tidal creeks은 깊이가 최소 10cm에서부터 2m까지 나타나며, 폭은 다른 것과 유사하다. 일반적으로 저조에도 물이 차있으나 대조차의 저조시와 같은 때에는 물이 없거나 만수위의 10~30%정도 차있을 때도 있다. tidal channels의 지류가 되며, rills과 grooves, gullies와는 달리 만수위 고도는 갯벌과 염습지 고도와 같다.

반면 Tidal channels은 갯벌에서 가장 큰 갯골지형이며 위성사진에서도 쉽게 발견된다. 하도에는 항상 물이 차 있으며, 대조때의 저조에도 항상 물이 있다. 깊이는 최대 2m 까지 갯벌 퇴적물의 특성에 따라 다양하게 나타나나, 아주 큰 channels이더라도 모두 10m 미만이다. 폭은 깊이에 따라 다양하게 나타나며 값의 변이가 깊이보다 큰데, 2m부터 몇 킬로미터에 다다른 것도 있다<sup>34)</sup>.

일시적인 갯골은 갯골 유역의 수계망을 구성한다고 볼 수 없으므로, 본 연구에서는 갯골(Tidal courses)중에서도 저조시에도 물이 차 있어 지형이 계속적으로 보존되고 지속되는 갯골(tidal channels and creeks)을 대상으로 삼고자 한다. 이는 단면분석 시 다른 세 가지 유형의 갯골들과 구분하는 기준으로 삼고자 한다.

---

34) 예시: 부에노스아리에스와 아르헨티나 경계에 있는 Bahia Blanca Estuary, 호주의 Ord Estuary (Perillo, G.M.E. et al, 2009)

### 3) 갯골의 유역과 수계의 특성

갯골 유역의 체계특성은 형태적으로 보았을 때 하천과 유사하나, 조금 더 엄밀하게 조사하면 차이점을 발견할 수 있으며 차이점은 다음과 같다. 첫째, 갯골의 분기(branch)와 계층구조(channel hierarchy)의 수는 저지대의 해안습지 것보다는 산지유역의 것과 유사하다. 이 사실은 갯골에서 평탄한 지역의 수계와는 달리 산지처럼 거대한 양의 물이 짧은 시간 안에 빠져나간다는 것을 의미한다. 두 번째, 지형학적으로 정의된 분지가 명확하게 드러나지 않는다. 분지의 경계는 지형학적인 것보다는 수문역학적인 프로세스에 의해 영향을 받는다. 왜냐하면 갯벌의 물은 하루 중 대부분의 시간에서 갯골로 흐르기 보다는 갯골의 수위를 넘어 범람하여 표면으로 흐르기 때문이다.

갯골 수계 패턴은 일반적으로 선형, 직교형, 수지상으로 나타난다(그림 19). 이러한 다양성을 통해서 인공적인 영향을 제외하고 특정한 수계 패턴이 존재하게 됐는지를 설명할 수 있는 명확한 이론은 없다. 퇴적물의 특성, 과거의 퇴적상, 습지 경사가 중요한 역할을 하나, 각각이 실제적으로 특정한 패턴 형성에 어떠한 역할을 기여하느냐는 현재까지 알려지지 않았다.

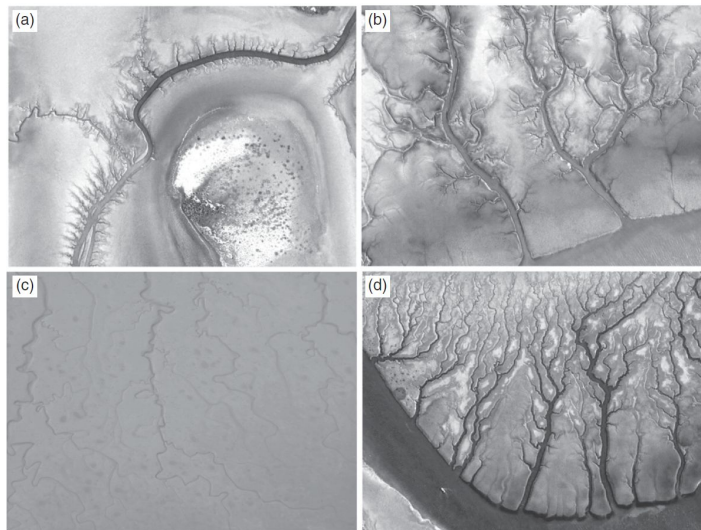


그림 19. 갯골 수계 패턴: (a) 직각상, (b)선형 수지상, (c)곡류형, (d)곡류형 수지상 (출처:Perillo, G.M.E. et al, 2009)

## 5. 하계망의 차수분석

갯골은 수문학적으로는 양방향의 흐름을 갖고, 매일 주기적으로 범람한다는 점에서 하천과 다르나, 형태적으로는 하천과 유사하다. 이 점에 착안하여 갯골을 분석하는 하나의 방법으로서 하계망 차수분석(Stream Order)을 많이 이용하고 있다.

차수분석은 하계망의 지류와 본류 등의 계층구조에 주목하여 하천의 등급을 결정하려는 방법이다. 하천의 계량적인 분석을 위해 시작되었으며, 많은 학자들이 각기 다른 분석방법을 시도 및 제안하였다. 최초의 시도는 Gravelius에 의해 이루어 졌다. Gravelius<sup>35)</sup>는 본류를 1등급으로 결정한 뒤, 본류에 직접 유입하는 지류를 2등급, 2등급 지류에 유입하는 지류를 3등급으로 매겼다. 상류로 올라가면서 순차적으로 분기함에 따라 등급이 올라가는 방법을 사용하였다(그림 20a)<sup>36)</sup>.

후에 Horton<sup>37)</sup>은 Gravelius와는 반대로 지류를 갖고 있지 않은 세류를 먼저 1차수 하천으로 결정한 뒤, 1차수 하천만을 지류로 하는 하천을 2차수로 정하였다. 단 본류는 최고 차수로서 발원지까지 같은 차수로 표현하였다. 따라서 1차수 하천 가운데 하나는 2차수 하천으로 다시 분류되고, 2차수 하천끼리 합류하면 그 가운데 하나는 3차수 하천으로서 발원지까지 올라가게 된다(그림 20b)<sup>38)</sup>.

Horton의 방법에서는 같은 차수의 하천이 합류하는 경우에만 차수가 올라가나 그때마다 합류하는 하천 가운데 하나는 차수를 다시 고쳐주어야 하는 번거로움이 따르게 되는데 이러한 단점을 개선한 것이 Strahler의 방법이다. Strahler<sup>39)</sup>는 우선 본류의 차수가 발원지까지 거슬러 올라가는 개념을 없애

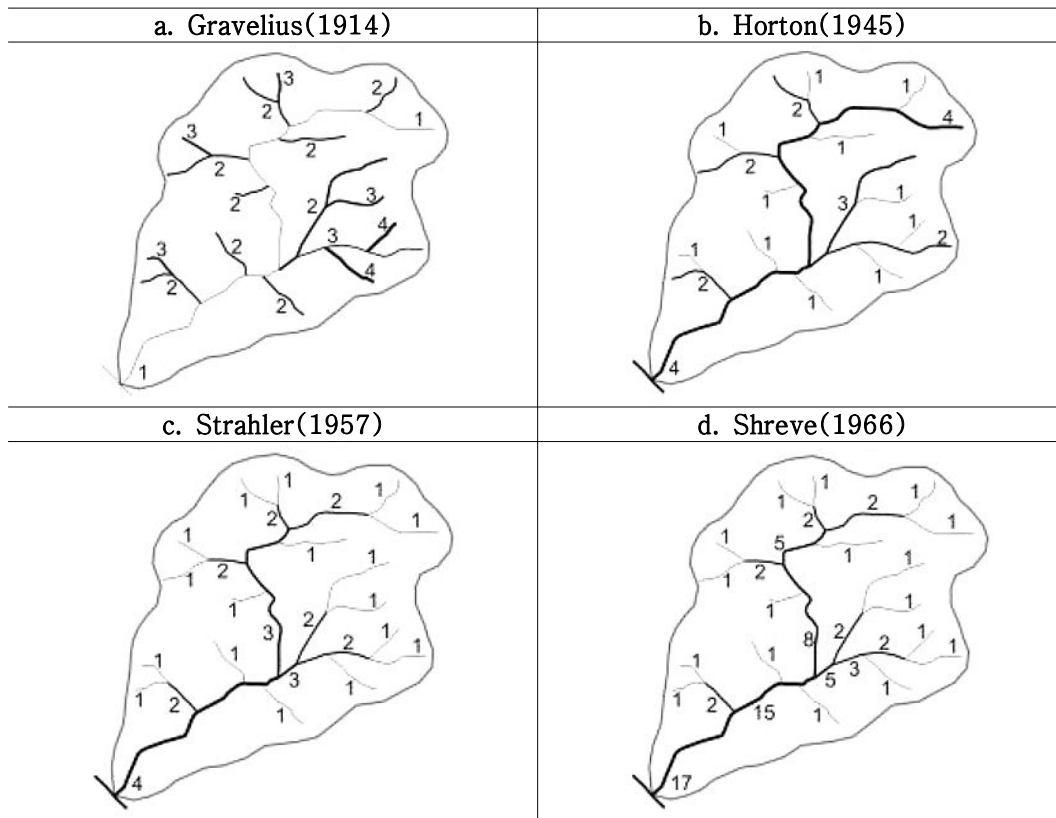
35) Gravelius, H. 1914, *Flusshunde*, Berlin

36) 김미령, 2003, 제주도 하천의 하계망 분석, 제주대학교 석사학위논문, p.20

37) Horton, R.E., 1945, Erosional development of streams and their drainage basin, *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), pp.275-300

38) 김미령, op. cit, p.21

39) Strahler, A.N., 1952, Hypsometric analysis of erosional topography, *Geological*



출처: Par Maurício MEURER, 2008

그림 20. 차수분석 방법

고, 하천을 합류점으로부터 합류점, 최상류 구역에서는 발원지로부터 최초의 합류점, 최하류 구역에서는 합류점으로부터 하구까지와 같이 하천구간으로 분할하였다. 발원지에서 시작하는 세류는 모두 1차수 하천이며, 1차수 하천끼리 합류하면 2차수 하천을 이루게 된다. Strahler 방법에서는 같은 차수의 하천이 합류하는 경우에만 차수가 올라가며, 낮은 차수의 하천과 합류하는 경우에는 차수의 변화는 일어나지 않는다(그림 20c)<sup>40)</sup>.

*Society of America Bulletin*, 63; Strahler, A.N., 1957, Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology, *Transaction, American Geophysical Union*, 38(6)

40) 김미령, op. cit, p.21

반면에 Scheidegger<sup>41)</sup>는 낮은 차수의 하천이 아무리 많이 합류하더라도 차수의 변화가 없는 Horton과 Strahler 방법에 대한 비판과 함께 모든 지류의 합류를 고려한 차수구분을 제안하였다. 즉 임의의 하천차수는 그보다 낮은 하천차수의 누적으로 표현할 수 있다고 보고 합류부 하천의 차수를 구하는 일반식을 고안하였다(식 1).

$$x = \frac{\log_{10}(2^w + 2^p)}{\log_{10}2} = \log_2(2^w + 2^p) = \log_2 I \dots\dots\dots (\text{식 1})$$

( $x$ : 합류부 하천의 차수,  $w, p$ :  $w$  및  $p$  차수 하천)

그러나 Scheidegger의 방법에서는 대수 값으로 차수가 구해지므로 계산이 번거로운 단점이 따르며 결과적으로 차수는 정수의 형태를 취하지 않을 수도 있다<sup>42)</sup>.

Shreve<sup>43)</sup>는 하천구간을 위상수학의 링크(link)로 대체하여 하계망 분석을 시도하였다. 즉 하천구간 가운데 발원지로부터 최초의 합류점까지의 구간을 외측링크(exterior link)로, 합류점 사이의 구간을 내측링크(interior link)로 구분하고 링크의 수를 발원지의 총수로서 표현하였다(식 2).

$$l = 2n - 1 \quad (l: \text{링크수}, n: \text{발원지의 총수}) \dots\dots\dots (\text{식 2})$$

Shreve는 링크등급(link magnitude)에 의하여 링크를 구분하였는데, 외측링크는 모두 1로 하였으며 두 개의 링크가 합류하면 그 하류의 링크등급은 두 링크의 등급을 더하여 구하였다. 따라서 이 방법은 지류의 합류를 모두 고려하고 있기 때문에 최하류의 링크등급은 외측링크의 수와 같아진다(그림 20d). 또한 Shreve의 유로등급은 Scheidegger의 차수와 상관관계를 지니고 있다<sup>44)</sup>.

41) Scheidegger, A.E., 1965, The algebra of stream order numbers, *U.S. Geology. Surv. Profess. Paper*, 525B.

42) 김미령, op. cit, p.21

43) Shreve, R.L., 1966, Statistical law of stream numbers, *Journal of Geology*, 74, pp.17~37

이 외에 Woldenberg<sup>45)</sup>는 Scheidegger의 공식을 개선하여 절대차수를 제안하고 있다(식 3). 그러나 이 방법은 Scheidegger의 방법보다 더욱 번거롭기 때문에 실질적으로는 거의 활용되지 않고 있다<sup>46)</sup>.

$$w = \frac{\log_{10}\mu}{\log_{10}R_b} - 1 \quad (w:\text{절대차수}, \mu:\text{링크등급}, R_b:\text{분기율}) \dots\dots\dots (\text{식 } 3)$$

이상의 방법을 비교하면 Shreve와 Scheidegger의 방법이 수학적 근거를 지니고 있어 합리적이지만 계산이 번거롭고 차수가 정수의 형태를 취하지 않는 등의 단점을 보인다. Shreve의 방법에서는 차수를 간단하게 구할 수 있지만 링크등급이 Scheidegger의 차수와 마찬가지로 불연속량이 되기 쉬운 결점을 지니고 있다. 이에 비하여 Horton이나 Strahler의 방법은 수학적 엄밀성을 갖고 있지는 않으나, 비교적 간단하게 차수구분이 가능하고 차수가 절대로 불연속량이 되지 않는다. 하지만 둘 중에서도 작업에 일관성이 있어 기계적으로 진행할 수 있으며, 구분한 결과를 기존의 자료와 비교하기 쉽고 차수의 값에 연속성이 유지되고 있는 Strahler의 방법이 장점이 많아 널리 사용되고 있다.

본 연구에서는 기존의 연구 결과와 비교가 가능하고, 차수의 값에 연속성이 유지되어 많은 수계양의 계산이 용이하며, ArcGIS를 이용하여 차수를 구할 수 있는 Strahler 방법을 사용하기로 하였다.

---

44)  $x = \log_2 2\mu$  ( $x$ : Scheidegger의 하천차수,  $\mu$ : Shreve의 링크등급)

45) Woldenburg, M.J., 1966, Horton's laws justified in terms of allometric growth and steady states in open systems, *Geological Society of America Bulletin*, 77

46) 김미령, 2003, p.22

## 제3장. 갯골의 수계망 및 횡단면분석 과정

### 1. 자료 구축

본 연구에서 사용되는 LiDAR는 레이저(laser)의 반사강도를 이용하여 고도를 기록하는 방식으로 점(point) 자료 형식으로 출력된다. LiDAR의 원 자료는 점 자료로 연속성이 없을 뿐만 아니라, 지형 외의 지물도 입력되므로 지형분석에 용이하지 않다. 따라서 점에 입력된 속성 값을 이용하여 지형 포인트만 추출하여 래스터(raster)파일 또는 그리드(grid)로 변환하였다. 래스터 파일로의 변환을 위해서는 Global Mapper S/W가 사용되었다.

구축된 래스터파일은 분석을 위해 ArcGIS S/W에서 확인하는 도중 다음과 같은 문제점이 있었다. 원 자료에서 포인트를 격자형태로 찍는 것이 아니므로 래스터로 변환시 포인트가 없는 부분이 발생한다. 그 부분의 그리드는 고도 값을 가지지 아니하거나 임의의 값을 가지므로 이 같은 그리드를 포함하여 분석 시에는 분석 결과 값에 문제가 발생한다. 따라서 포인트 또는 고도 속성 값이 없는 그리드는 제거하여 분석에 이용하였다(그림 21).

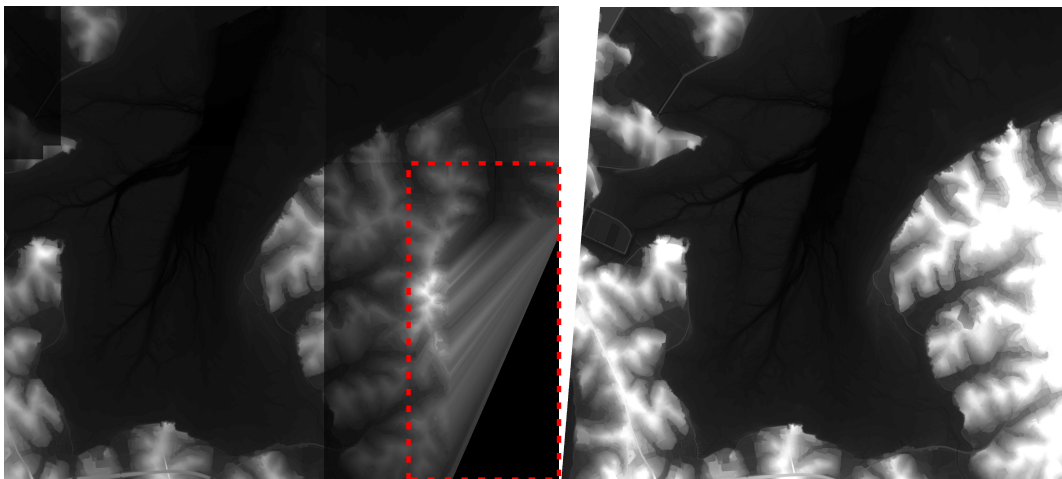


그림 21. 원자료(point data)를 래스터로 변환 시 발생하는 문제점(점선)과(좌) 제거후(우)

## 2. 수계망 분석

위의 과정을 거쳐 구축된 DEM을 이용하여 갯골의 수계망 분석(channel networks analysis)을 실시하였다. 수계망분석은 수계망을 나타내고 인식하기 위하여 수계 추출과 계량적으로 분석이 가능한 차수분석(stream order)을 중심으로 실시하였다. 여기서 수계 분석에 용이한 ArcGIS S/W의 ArcHydro Tool을 이용하였다. 수계망분석은 횡단면분석의 기초자료가 되므로 수계망분석을 우선적으로 실시하였다.

수계망 분석은 크게 수계를 추출하는 과정(명명의 편의상 Hydro Analysis라 통칭하고자 한다)과 추출된 수계를 이용한 차수 분석 크게 두 부분으로 나뉠 수 있다. 그리고 분석과정 시에 Tool 또는 자료의 형태로 인하여 발생한 제한점 및 문제점과 그에 대한 방안 및 수정사항은 뒤에 정리하였다.

### 1) Hydro Analysis

DEM에서 수계를 추출하는 과정인 Hydro Analysis는 수계분석을 위한 지형적 오차제거(Fill sinks), 고도에 따라 물이 흘러가는 방향 분석(flow direction), 흐름에 따른 누적지수(flow accumulation), 이에 따른 하천 정의(Stream Definition and stream segment), 유역 생성(catchment grid delineation, catchment polygon processing), 수계 추출(Drainage line processing)과정이 포함된다.

위 과정은 모든 연구지역의 DEM에서 갯골 유역에 해당하는 부분을 추출하기 위해 두 번 이상 수행되었다. 따라서 앞으로 사례로 나오는 지도는 한번 이상의 수문분석을 거친 자료이다. 갯골 전체 유역(watershed)은 주갯골 또는 최고차수 갯골로 흘러들어가는 수계의 흐름을 기준으로 물의 흐름이 바뀌는 분수계를 따라 추출하였다.

## (1) Fill Sinks

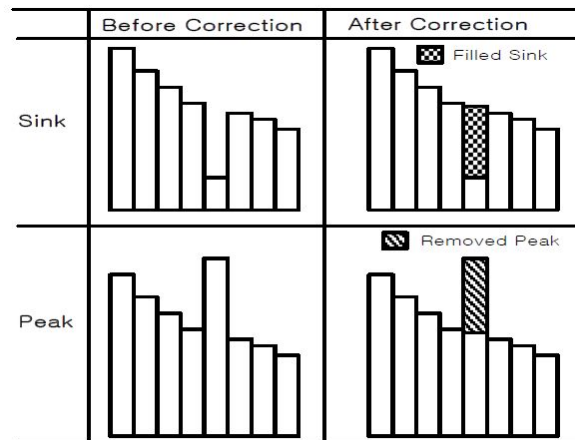


그림 22. Fill sinks의 오차보정 원리(한영한, 2008)

DEM에서는 정밀도에 따라 양의 차이는 있으나 미지형의 기복변위로 인하여 실제지형과 다른 소규모의 sink와 peak 에러가 다수 발생하게 된다. 이를 통칭하여 sinks라 부르며, 수계 흐름 형성을 방해하는 결과를 초래하므로 보정이 필요하다. sinks의 보정을 위해서 ArcHydro Tool의 Fill Sinks 함수를 사용한다. 이때 대상 격자에 부여되는 표고 값은 대상 격자 주위에 인접해 있는 8개의 격자 중 가장 낮은 표고 값을 갖는 격자를 찾아서 그 값을 부여하게 된다(그림 22).

## (2) Flow direction

Flow direction은 래스터 파일에서 모든 격자의 고도 값을 이용하여 물의 흐름방향을 결정하는 것으로, 수문분석의 기초가 될 뿐만 아니라 가장 중요한 기능이다. 기능이 실행되는 원리는 하나의 격자를 중심으로 유수의 방향을 8방위—동(E), 남동(SE), 남(S), 남서(SW), 서(W), 북서(NW), 북(N), 북동(NE)—로 정한다. 이 때 주위 8개의 격자에 대한 각각의 방향 값은 2의 제곱 값을 기준으로 동=1, 남동=2, 남=4, 남서=8, 서=16, 북서=32, 북

=64, 북동=128로 주어진다(그림 23). 이를 바탕으로 인접 격자의 고도 값을 비교하여 가장 낮은 고도 값을 갖는 격자의 방향으로 흐름의 방향이 정해지며, 이러한 과정이 모든 격자에 실행된다(그림 24). 중심격자에서 전체 유역에 대한 결과 값은 위의 알고리즘에 따라 복잡한 양상으로 나타나나, 고차수 하천에서는 같은 방향 값을 갖는 형태를 나타낸다(그림 25).

| Flow direction 알고리즘의 8방향 | GRID내 8방향 입력방식 |    |     |
|--------------------------|----------------|----|-----|
|                          | 32             | 64 | 128 |
|                          | 16             | 중심 | 1   |
|                          | 8              | 4  | 2   |

그림 23. Flow direction 알고리즘의 8방향과 GRID내의 입력방식

| DEM의 표고 값 |    |    |    | Flow direction 결과 |    |   |    |
|-----------|----|----|----|-------------------|----|---|----|
| 45        | 37 | 44 | 45 | 1                 | 4  | 8 | 16 |
| 40        | 34 | 50 | 60 | 1                 | 4  | 4 | 8  |
| 58        | 31 | 30 | 53 | 1                 | 1  | 2 | 4  |
| 50        | 45 | 32 | 22 | 128               | 64 | 1 |    |

그림 24. DEM의 표고값과 그에 따른 Flow direction결과 예시

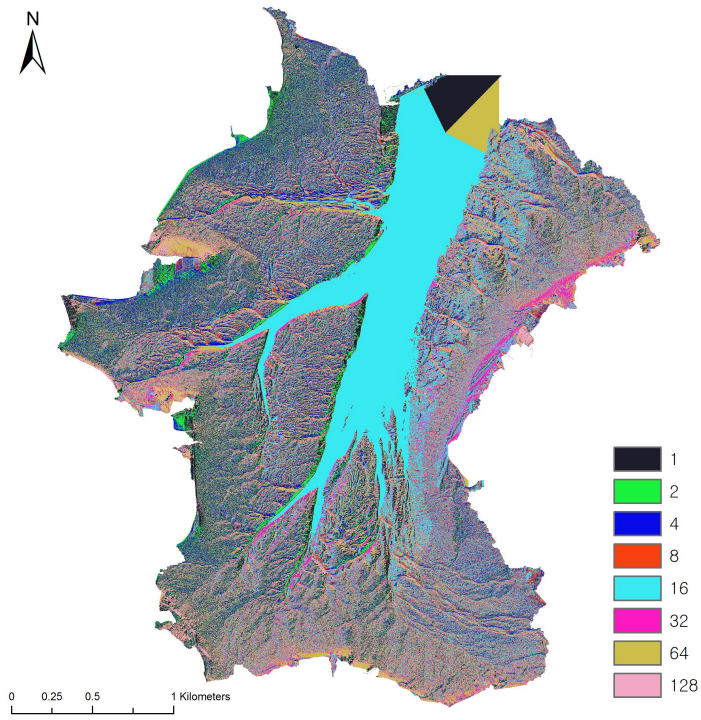


그림 25. Flow direction 결과예시

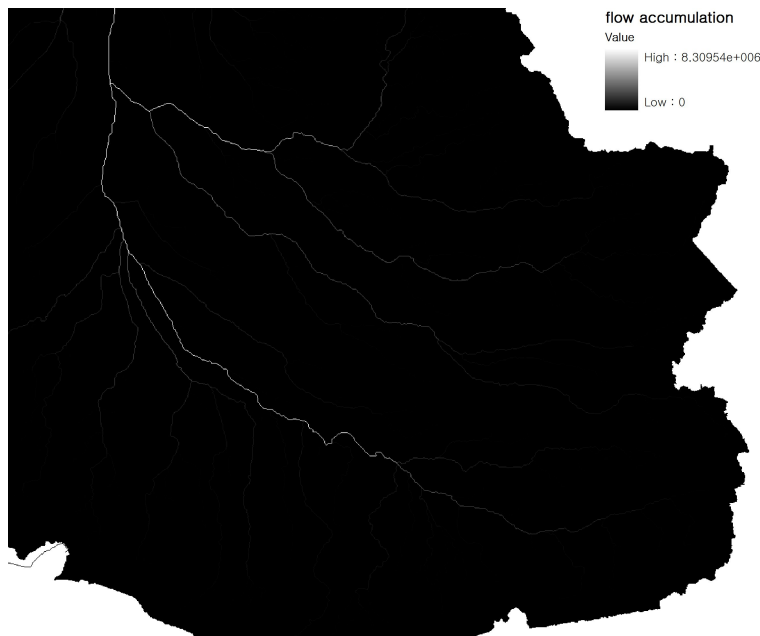


그림 26. Flow accumulation의 결과

### (3) Flow accumulation

Flow direction을 이용하여 흐름 방향을 생성했다면 그것을 토대로 Flow accumulation을 이용하여 흐름의 누적을 생성한다. 흐름누적격자를 생성해야만 누적 수에 따른 하천망을 추출할 수 있기 때문이다. Flow accumulation을 실행한 결과 값은 주어진 격자의 상류에 대한 모든 격자의 수를 합산한 것으로, 하류로 갈수록 누적량이 높아지게 된다. <그림 26>은 flow accumulation의 결과를 확대한 그림으로, 하류로 갈수록 값이 높아지기 때문에 밝은 값을 나타내고 있다.

### (4) Stream Definition and Stream Segmentation

Stream definition과 Stream Segmentation은 수계를 형성하고 유역을 추출하는 준비과정으로, 전자는 하천을 정의하고 그에 따라 Stream Segmentation은 유역별 단위로 하천을 쪼개는 과정이다(그림 27). 이를 통해서 수계를 추출할 수 있게 되는데, 이 과정은 래스터형태로 진행되므로 추후에 벡터(라인)형태로 변환하여 최종 수계 결과물을 얻는다.

먼저 Stream definition은 Flow accumulation의 값을 이용하여 하천으로 정의하는 과정이다. 하천으로 정의하는 방법은 사용자가 Flow accumulation 값을 토대로 최소 누적량 값을 임의로 설정하면, 그 이상의 누적량 값에 해당되는 셀은 모두 하천으로 정의된다. 예를 들면, Flow accumulation 결과 값의 범위가 1부터 1,000,000까지 나왔고 하천을 정의하는 Number of Cell 값을 8,000으로 설정한다면 8,000부터 1,000,000까지의 누적량 값을 지니는 모든 셀을 하천으로 정의되는 것이다(그림 28). 여기서 Area는 최소 누적 셀을 정의하면 그에 따라서 평방킬로미터 기준으로 설정된다. 따라서 결과적으로 최소누적 셀값을 크게 주면 큰 하천만 정의하게 되는 것이고, 값을 작게 주면 작은 하천까지 모두 추출하게 되는 것이다.

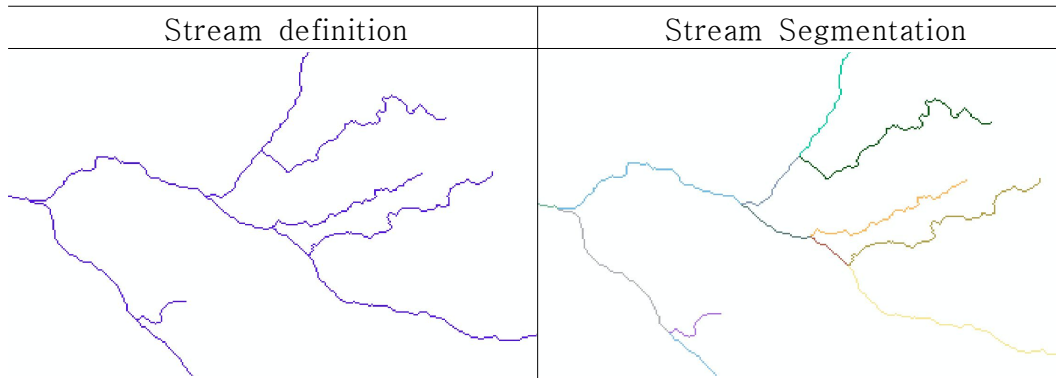


그림 27. Stream definition과 Stream Segmentation의 차이

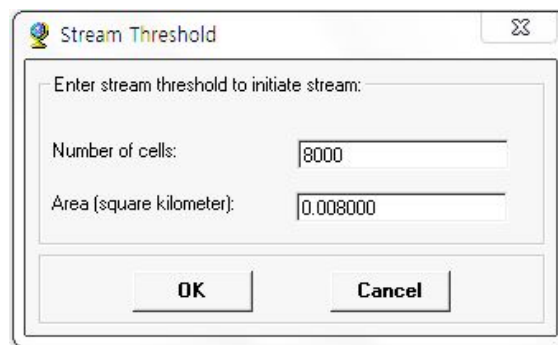


그림 28. 최소 누적격자 값 설정 예시

결과적으로 하천 정의 시 사용자 임의의 값이 설정된다. 그러므로 본인 연구에 적합한 값을 설정하거나 다양한 값을 여러 번 입력하여 결과를 비교하고 연구에 적당한 값을 찾는 것이 필요하다. 이에 대한 제한점과 본 연구에서의 방법은 뒤에서 자세히 설명하고자 한다.

Stream Segmentation은 Stream definition에서 정의된 하천을 바탕으로 하천의 유출점(pour point)을 따라 구간별로 분할하는 과정이다. 이는 다음 유역을 형성하는 과정의 기초가 되는 것으로, 분할 시 하나의 하천으로 유입되는 지역을 계산하기 위함이다.

**(5) 유역형성 (Catchment grid delineation, Catchment polygon processing)**

Catchment grid delineation과 Catchment polygon processing은 Stream segmentation으로 얻어진 분할된 하천을 바탕으로 유역을 형성하는 과정이다. 두 과정은 모두 유역을 추출한다는 데 있어 공통되나, 전자는 래스터 후자는 벡터자료로써 결과물이 얻어진다는 데 차이점이 있다(그림 29).

**(6) 수계완성 (Drainage line processing)**

위의 과정을 통해 유역이 벡터로 생성되었고, Drainage line processing과정을 통해서 수계가 벡터로 생성되게 된다. 이 수계는 Stream segmentation에서 나눠졌던 단위별로 합류하는 노드 간 번호와 HydroID 값을 갖게 되며, 이는 유역별 폴리곤의 번호와 부합하게 된다. 완성된 벡터자료의 수계는 래스터 수계보다 가시성이 양호하여 수문 분석 시 문제점과 결과의 문제점을 확인하기에 용이하다(그림 30).

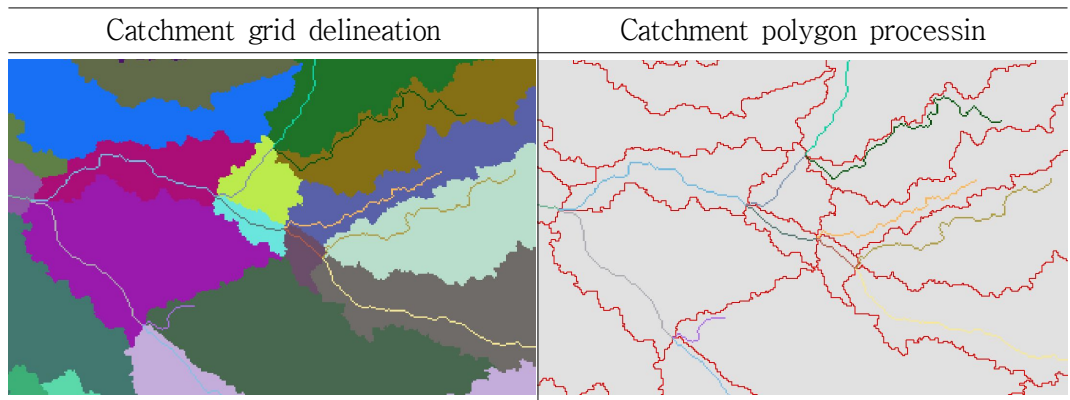


그림 29. Catchment grid delineation과 Catchment polygon processing의 차이

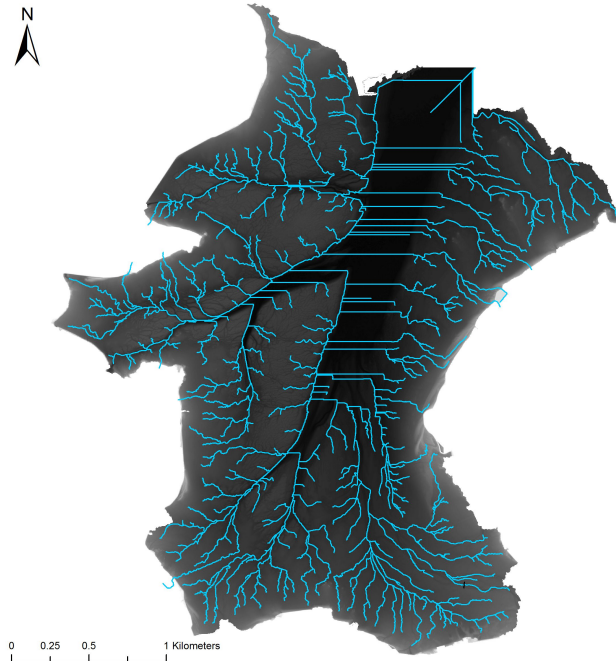


그림 30. Drainage line processing 결과

## 2) Stream Order

수문분석 후 추출된 수계의 계량적인 법칙을 파악하기 위하여 하천차수 (stream order) 분석을 실시하였다. ArcGIS S/W 내에서 Stream Order는 수문분석을 통해 얻어진 흐름 방향과 정의된 하천을 바탕으로 만들어지며, 차수를 부여하는 방법으로는 Strahler와 Shreve방식 두 가지가 있다(그림 31). 이 중 본 연구에서는 앞서 구축한 이론적 배경에 따라 Strahler의 방식을 적용하였다.

Stream Order 결과는 래스터 형태로 제작되므로 이를 수계의 선 즉, 벡터 자료로 변환해주어야 한다. 따라서 [Stream to Feature] 툴을 이용하여 래스터 자료를 벡터자료로 변환한다. 변환결과 자료는 차수에 따른 구분을 위해 차수가 부여된 속성 값에 따라 심볼을 분류하여 표현해주었다.

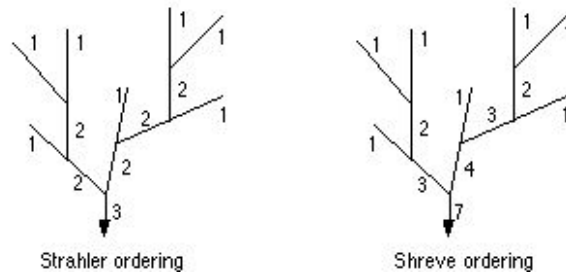


그림 31. Strahler와 Shreve의 차수 부여 방식 비교  
(출처: <http://webhelp.esri.com/>)

### 3) 한계점 및 대안

ArcGIS S/W를 이용한 자동화 분석과정에서 다음과 같은 세 가지 한계점이 발견되어, 각각의 한계점에 따라 대안을 마련하여 분석을 보완하였다. 제한점과 대안에 대한 내용은 다음과 같다.

첫째, 연구대상인 자연형 갯골만 추출하기 위해 유역형성 시 인공지형을 제거하였다. 갯벌은 오랫동안 간척의 대상이 되어왔으며, 풍부한 수산자원으로 인해 염전, 양식장 등으로 많이 이용하고 있다. 특히 연구대상인 곰소만과 영광군 갯벌은 많은 면적을 염전으로 이용하고 있다. 따라서 이로 인한 간섭을 최소화하고 오직 자연형 갯골 지형만을 분석대상으로 이용하기 위해 유역추출 시 위와 같은 인공지형을 모두 유역에서 제거하였다. 특히 LiDAR자료는 높은 해상도로 인하여 인공지형을 확연히 발견할 수 있었다. <그림 32>는 함평만 내측의 사례로, 왼편에 농경지와 수로가 확인된다. 따라서 이를 유역에서 제외하고 유역을 설정하였다. 굵은 빨간 실선이 최종적으로 설정된 유역 경계이다.

둘째, Stream definition시 임의성을 최소화하기 위해 연구대상 정의에 의거하여 하천을 정의하였다. 앞서 언급했던 것처럼 하천 즉, 수계를 정의하게 되는 Stream definition은 사용자가 원하는 값에 따라 결과가 도출된다.

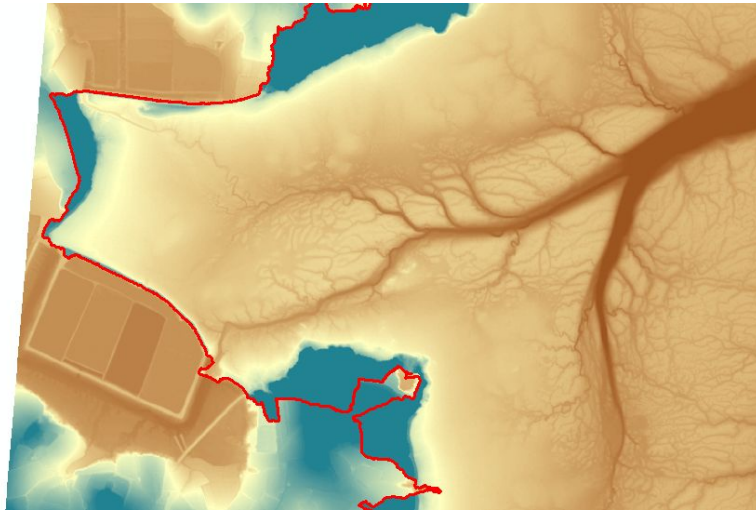


그림 32. 유역 내 인공지형제거: 실선 안쪽부분만 유역으로 추출

본 연구에서는 사용자가 입력하는 임의의 값 또는 디폴트(default) 값에 따라 임의적으로 연구결과가 나오는 것을 방지하기 위해 여러번 다른 값을 넣은 Stream definition을 수행하여 적절한 값을 도출해냈다.

그 결과 전체적으로 갯골을 추출할 수 있는 값은 8,000에서 2,500 사이였다. 이에 따라 갯골 유역마다 1,000~2,000 단위로 8,000~2,500사이의 값을 입력하여 연구대상의 정의에 맞는 갯골이 추출될 때까지 분석을 수행하였다. 본 논문의 ‘제2장 갯골의 정의’에서 갯골에 대한 본 연구의 대상을 Tidal channels와 Tidal creeks으로 정의하였고, 그에 따른 크기는 깊이가 10cm이상이었다. 따라서 Stream definition결과물의 최상위 차수의 단면을 모두 확인하여 10cm이하가 되는 기점 이상의 값으로 Stream definition을 설정하였다. <그림 33>은 Stream definition 결과물의 최상류 단면을 확인하는 함평만 내측의 사례로, 5,000값을 넣은 결과의 최상류 단면이다. 결과 대부분의 단면에서 갯골 형태의 단면을 확인할 수 없었을 뿐만 아니라, 갯골 형태가 나타나는 것은 10cm 미만 갯골에 해당되었다. 이에 따라 더 큰 최소셀 누적 값을 지정해야 함이 드러나 6,000, 7,000, 8,000값을 지정하여

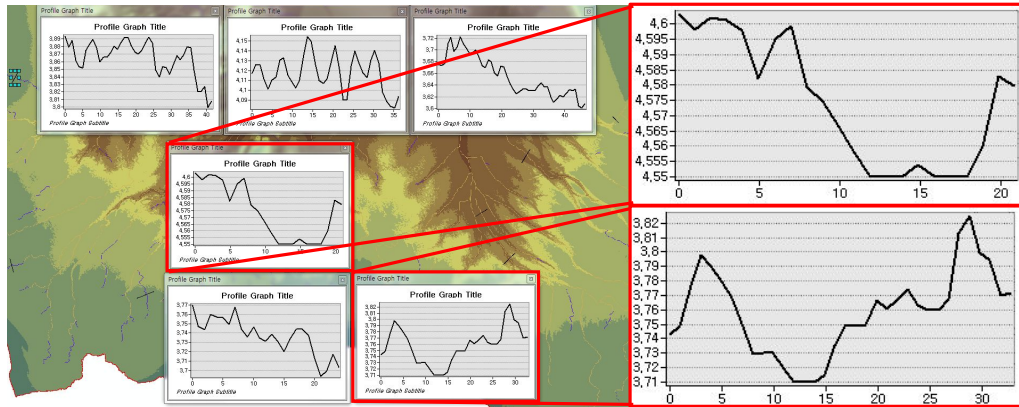


그림 33. 함평만 내측 Stream definition 5000으로 설정 시 최상류 단면: 10cm이하 및 하천의 단면형태도 잘 나타나지 않음

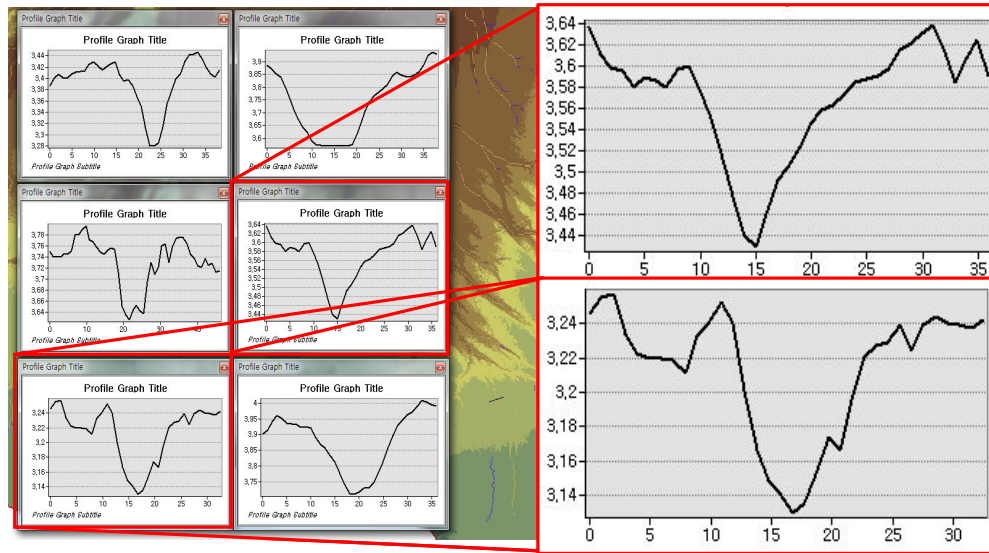


그림 34. 함평만 내측 Stream definition 8000으로 설정 시 최상류 단면: 갯골의 깊이가 10cm 이상으로 나타나기 시작하며, 단면의 형태도 갖추

표 6. 연구지역별 Stream definition 값

| 연구지역                | 영광군 염산면 | 곰소만 죽도 | 함평만 외측 | 함평만 내측 |
|---------------------|---------|--------|--------|--------|
| Stream definition 값 | 5000    | 5000   | 5000   | 8000   |

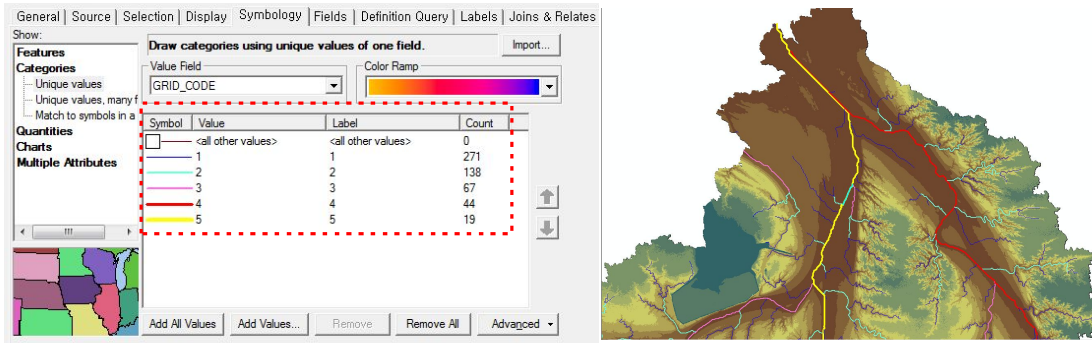


그림 35. 차수별 갯골 수(좌측)와 결과지도(우측):  
5차수가 1개임에도 불구하고, 19개로 계산되어 나온다.

확인하였다. 그 결과 8,000에서부터 갯골형태의 단면이 드러나기 시작하였으며 갯골의 깊이도 10cm이상이었다(그림 34). 나머지 연구지역도 위와 같은 과정을 통해 적절한 값을 도출하여 값을 지정하였다. 종합한 결과는 <표 6>과 같다.

마지막 제한점은 처음에 수계 및 차수가 래스터파일 형태로 제공되기 때문에 갯골의 수가 지류별로 계산되지 않고, stream segmentation때 형성된 구간별로 계산된다. <그림 35>를 통해 보면, Count라고 표기된 것이 차수(value)별 지류의 수이다. 우측의 분석결과와 5차수만 비교하여 보면, 5차수가 하나임에도 불구하고 ArcGIS S/W 내의 Count결과는 19개로 확인된다. 따라서 이러한 한계점을 극복하기 위하여, 결과 지도를 확대·출력하여 수동으로 결과를 하나의 라인으로 계산하여 입력하였다. 수동분석결과 1차수 하천을 제외하고 모든 차수에서 오류가 발생됨을 확인하였으며, 수동분석결과를 차수별 수 분석에 이용하였다.

## 2. 횡단면분석

본 연구에서는 앞서 시행한 차수분석을 기준으로, 각 차수별로 횡단면 분석(cross-section analysis)을 실시하였다. 횡단면분석에는 ArcGIS S/W 내 [3D Analyst Tool]의 [Interpolate line]을 이용하였다. 횡단면분석과정은 다음의 세 번의 절차를 거쳐 이루어졌다.

첫 번째 절차는 차수별로 각각 랜덤하게 단면 샘플을 선정하는 것이다. 샘플을 최대한 임의적으로 설정하기 위해 위치적으로는 분포를 다양하게 하였으며, 갯골수에 비례하도록 샘플수를 설정하였다. 또한 길이가 다소 긴 갯골에서는 두 개 이상의 단면샘플을 추출하였다. 단면은 갯골 흐름의 직각방향으로 그었으며<sup>47)</sup>, 단면을 너무 길게 설정할 시에는 추후에 단면 계산 시 오류가 발생할 수 있으므로 제방(levee)에 인접하여 양안의 직선을 그었다.

둘째, 단면을 추출할 시에 그림파일의 그래프로만 제공되어 정확도가 떨어지므로 단면의 좌표 값을 구축하였다. 그래프를 이용하여 너비와 깊이를 계산할 경우 정확도가 떨어져 발생할 수 있는 오류를 최소화하기 위하여 선정된 모든 단면샘플 그래프의 x, y값을 텍스트형태 파일로 내보내 좌표 값을 이용하여 다시 그래프를 정리 및 구축하였다.

마지막으로 구축된 단면 좌표 값을 이용하여 단면의 너비와 깊이를 계산하였다. 먼저 너비를 구하고, 너비의 기준이 되는 y값과 최소 y좌표 값을 구하여 둘의 값을 차(-)를 통해 깊이 값을 구했다. 너비는 만수위인 뱅크풀(bankfull)을 기준으로 계산하였다. 그런데 갯골의 수문학적 특성상 하루에도 주기적으로 범람이 발생할 뿐만 아니라, 매일 조차가 달라 여러 개의 뱅크풀이 발생하는 경우를 확인할 수 있었다. 이런 경우에는 최대 뱅크풀을 기준으로 너비를 계산하였다(그림 36). 또한 곡류하는 구간(meander)의 경우

---

47) Leopold, L.B. et al, 1995, *Fluvial Processes in Geomorphology*, Dover Publications, pp.198-202

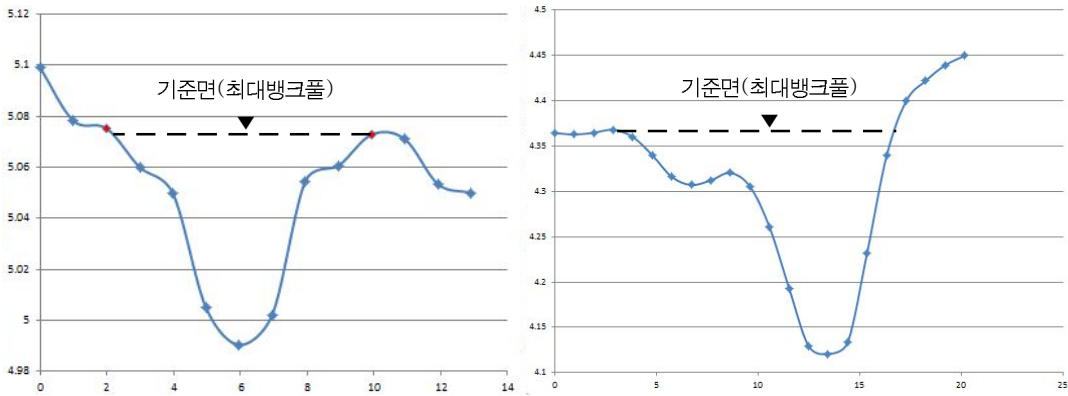


그림 36. 두 개 이상의 뱅크풀이 존재할 경우 기준면 예시(영광군 염산면 단면자료)

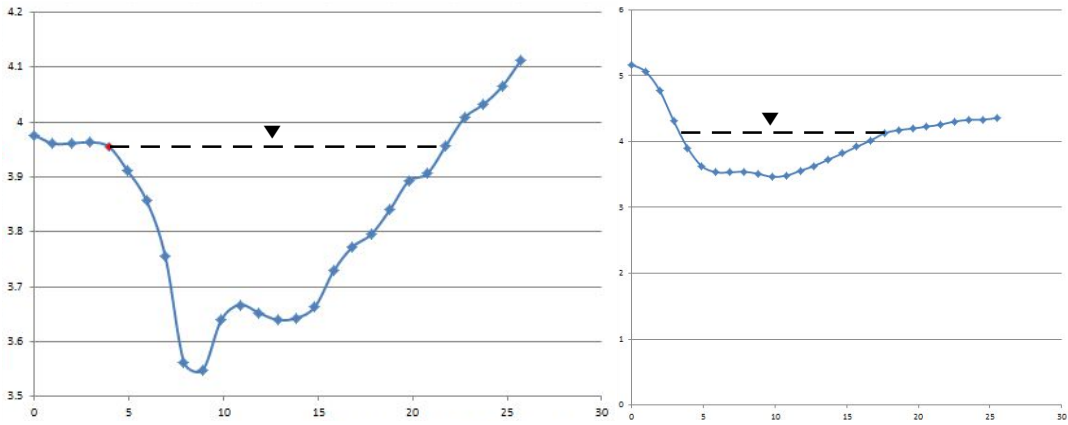


그림 37. 곡류구간의 비대칭 단면일 경우 기준면 예시(좌:영광군, 우:곰소만 단면자료)

표 7. 연구지역별 단면샘플 수

|        | 1차수 | 2차수 | 3차수 | 4차수 | 5차수 | 합계  |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 영광군    | 84  | 65  | 43  | 15  | 6   | 213 |
| 곰소만    | 59  | 64  | 74  | 30  | 5   | 232 |
| 함평만 외측 | 61  | 44  | 20  | 7   | 8   | 140 |
| 함평만 내측 | 42  | 29  | 20  | 8   | 5   | 104 |

양안 기준면의 비대칭이 발생하므로, 이 경우에는 양안 중에서 낮은 뱅크폴을 기준으로 너비를 계산하였다(그림 37).

위의 세 가지 절차를 거쳐 선정된 단면의 수는 <표 7>과 같다. 단면샘플의 수는 차수별 갯골수와 비례하여 선정하여, 대체적으로 고차수로 갈수록 샘플이 적어진다. 예외적으로 저차수보다 고차수 샘플이 많은 경우는 갯골의 길이가 길어 길이의 상류 또는 중류별로 선정한 경우이다. 5차수의 경우는 모두 한 개이기 때문에 단면샘플 수가 적으며, 4차수 또한 2~4개로 샘플수가 적다.

## 제4장. 갯골의 수계망 및 횡단면분석 결과

### 1. 수계망 분석

수계망분석은 수계망(channel networks)을 나타내는 것 중 계량적으로 분석이 가능한 차수분석(stream order)을 중심으로 실시하였다. ArcGIS S/W의 수문분석을 이용한 차수분석 결과물을 토대로 차수별 갯골수와 분기율, 갯골 길이와 길이비를 분석하였다.

그런데 앞서 분석과정의 한계점에서 언급한바와 같이 ArcGIS S/W에서 자동으로 계산된 차수별 개수는 오류가 있기 때문에 수동으로 계산하여 이를 보완하였다. 따라서 차수별 개수 분석 결과에는 자동으로 계산된 수와(auto) 자동으로 계산된 차수별 지도를 토대로 수동으로 계산한 것(semi-auto)을 병기하였다.

차수분석에서는 차수별 갯골수와 분기율, 갯골의 길이와 길이비를 구하였다. 값을 구하는 원리는 다음과 같다. 먼저 차수별 갯골 수( $N_w$ )는 차수가  $w$ 인 모든 갯골의 총 수이다. 갯골길이( $L_w$ )는 주어진 유역에서 차수가  $w$ 인 모든 갯골의 총 길이이다(식 4)<sup>48)</sup>.

$$L_w = \sum_{j=1}^{N_w} L_j \dots\dots\dots(\text{식 } 4)$$

평균길이( $\overline{L}_w$ )는 차수가  $w$ 인 갯골 수에 대한 갯골길이의 비이다(식 5)<sup>49)</sup>. 위의 한계에 의해 자동으로 계산된 수(auto)를 이용한 평균길이와, 반자동(semi-auto)방식으로 계산된 수를 이용한 평균길이를 병기하였다.

$$\overline{L}_w = \frac{L_w}{N_w} \dots\dots\dots(\text{식 } 5)$$

---

48) 국가수자원관리종합정보시스템 <http://www.wamis.go.kr/>

49) *ibid.*

분기율( $R_b$ )은 차수가  $w+1$ 인 갯골 수에 대한 차수가  $w$ 인 갯골수의 비이다 (식 6)<sup>50)</sup>.

$$R_b = \frac{N_w}{N_{w+1}} \dots\dots\dots (식 6)$$

갯골길이비( $R_L$ )는 차수가  $w-1$ 인 평균갯골길이에 대한 차수가  $w$ 인 갯골 길이의 비로 정의된다(식 7)<sup>51)</sup>.

$$R_L = \frac{L_w}{L_{w-1}} \dots\dots\dots (식 7)$$

### 1) 영광군 염산면 갯골

영광군 염산면 갯골의 차수분석 결과를 나타낸 지도는 <그림 38>과 같다. 영광군 염산면 갯골은 두 개의 주요 갯골이 해안에서 합류하여 바로 외해와 접하는 형태이다. 두 개의 주요 갯골 중 우측이 깊이와 너비면에서 더 큼에 따라 우측 갯골에서 4차수 갯골이 합류하여 5차수 갯골까지 나타난다.

영광군 염산면 갯골유역은 두 개의 주요 갯골 사이와 가장자리에 간척지와 내륙이 바로 접하는 특성으로 인하여 갯골과 인접주변의 고도차이가 크다. 이러한 큰 고도차이로 인해 흐름누적량(flow accumulation)이 쉽게 생성되고 높아질 수 있어 1차수와 2차수 갯골이 짧게 많이 나타남을 확인할 수 있다. 그 결과 고차수 하천이 다른 유역보다 빨리 나타난다.

---

50) *ibid.*

51) *ibid.*

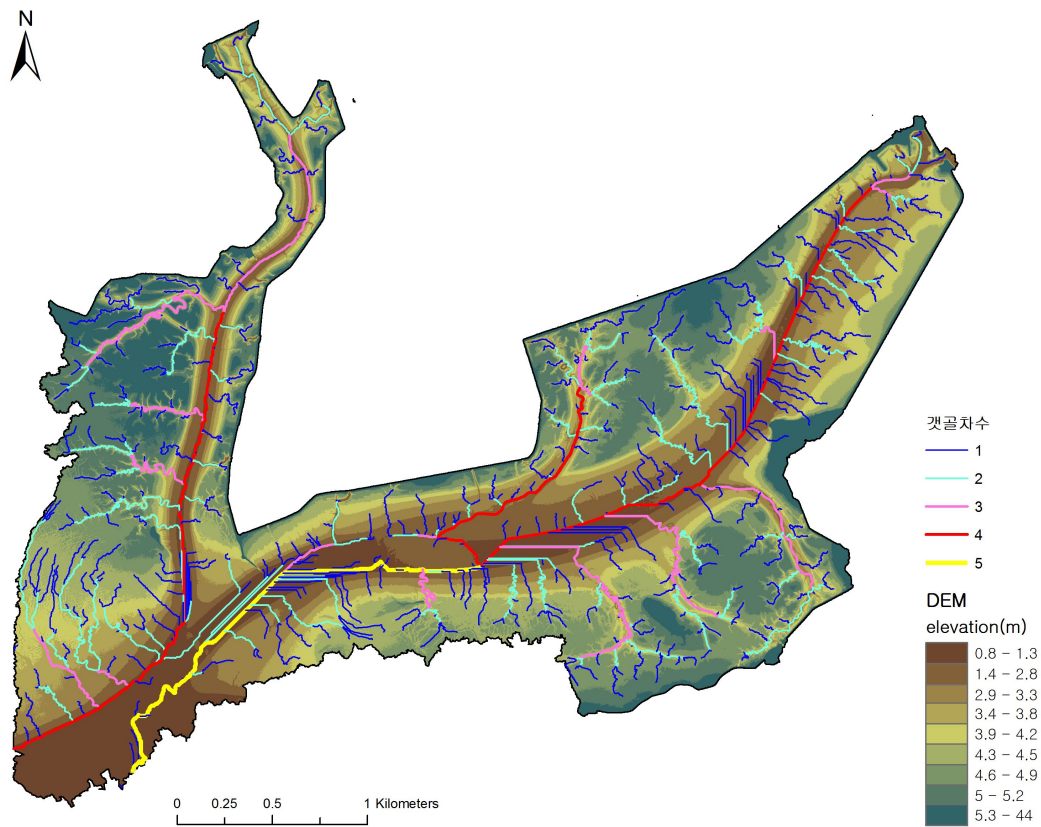


그림 38. 영광군 염산면 갯골의 차수 분석 결과

표 8. 영광군 염산면 갯골의 수계망분석 결과

(길이단위: m)

| 차수 | 수( $N_w$ )<br>(auto) | 수( $N_w$ )<br>(semi-auto) | 분기율<br>( $R_b$ ) | 길이( $L_w$ ) | 평균길이( $\bar{L}_w$ )<br>(auto) | 평균길이( $\bar{L}_w$ )<br>(semi-auto) | 길이비<br>( $R_L$ ) |
|----|----------------------|---------------------------|------------------|-------------|-------------------------------|------------------------------------|------------------|
| 1  | 458                  | 458                       | 5.03             | 57673.477   | 125.925                       | 125.925                            | 2.49             |
| 2  | 204                  | 91                        |                  | 5.35        | 28525.299                     | 139.830                            |                  |
| 3  | 91                   | 17                        | 5.67             | 10617.424   | 116.675                       | 624.554                            | 1.99             |
| 4  | 124                  | 3                         | 3.00             | 7733.459    | 62.367                        | 2577.820                           | 4.13             |
| 5  | 33                   | 1                         |                  | 2728.524    | 82.683                        | 2728.524                           | 1.06             |

<표 8>은 차수별로 갯골 수와 분기율, 길이와 길이비의 값을 나타낸 것이다. 지도를 통해 파악했던 것처럼 1차수 갯골의 수가 총 458개로 다른 유역이 200~300개 사이에 나타는 데에 비하여 많다. 이로 인해 분기율은 1차수부터 4차수까지 순서대로 5.03, 5.35, 5.67로 5내외의 큰 값을 보이나, 4차수와 5차수의 분기율에서만 3.00으로 낮은 값을 나타낸다. 길이비는 1차수에서 3차수까지는 2.49, 1.99로 2내외의 값을 보이나, 3차수와 4차수의 길이비는 4.13으로 높은 값을 나타낸다. 이는 앞서 언급한 유역특성에 의한 결과로 보인다. 마지막으로 4차수와 5차수의 길이비는 1.06으로 낮게 나타나는데 이는 외해와 바로 접하여 소멸되는 특성으로 인한 것으로 보인다. 실제 외해와 바로 접하는 곰소만 죽도 갯골 유역도 1.23으로 낮게 나타난다.

## 2) 곰소만 죽도 갯골

곰소만 죽도 갯골의 차수분석 결과를 나타낸 지도는 <그림 39>와 같다. 곰소만 죽도 갯골 또한 영광군 염산면 갯골과 마찬가지로 두 개의 주요 갯골이 해안에서 합류하여 바로 외해와 접하는 형태이다. 남동쪽이 내륙과 접하고 있어 서쪽은 경사도가 미미한데 비해 동쪽은 경사가 급한 형태를 보이며 동-서 방향으로 경사 차이가 발생한다. 이로 인해 우측의 주요 갯골은 직선형으로 길게 나타나며 저차수 갯골이 합류하는 형태를 띤다. 반면 죽도와 인접한 좌측의 갯골은 곡선의 수지상형태를 보이며, 동일차수의 갯골이 합류하는 형태가 잘 발달되어 5차수까지 나타난다.

<표 9>는 곰소만 죽도 갯골유역의 차수별 갯골 수와 분기율, 길이와 길이비의 값을 나타낸 것이다. 먼저 갯골 수에 따른 분기율을 보면, 1차수부터 5차수까지 순서대로 4.13, 5.17, 4.00, 3.00으로 나타난다. 평균길이에 따른 길이비는 2차수부터 5차수까지 순서대로 2.08, 1.92, 2.89, 1.23으로, 2내외의 값을 보이나 3차수에서 4차수로 갈 때 길이가 크게 증가하며, 4차수와 5차수의 길이는 크게 차이하지 않는다.

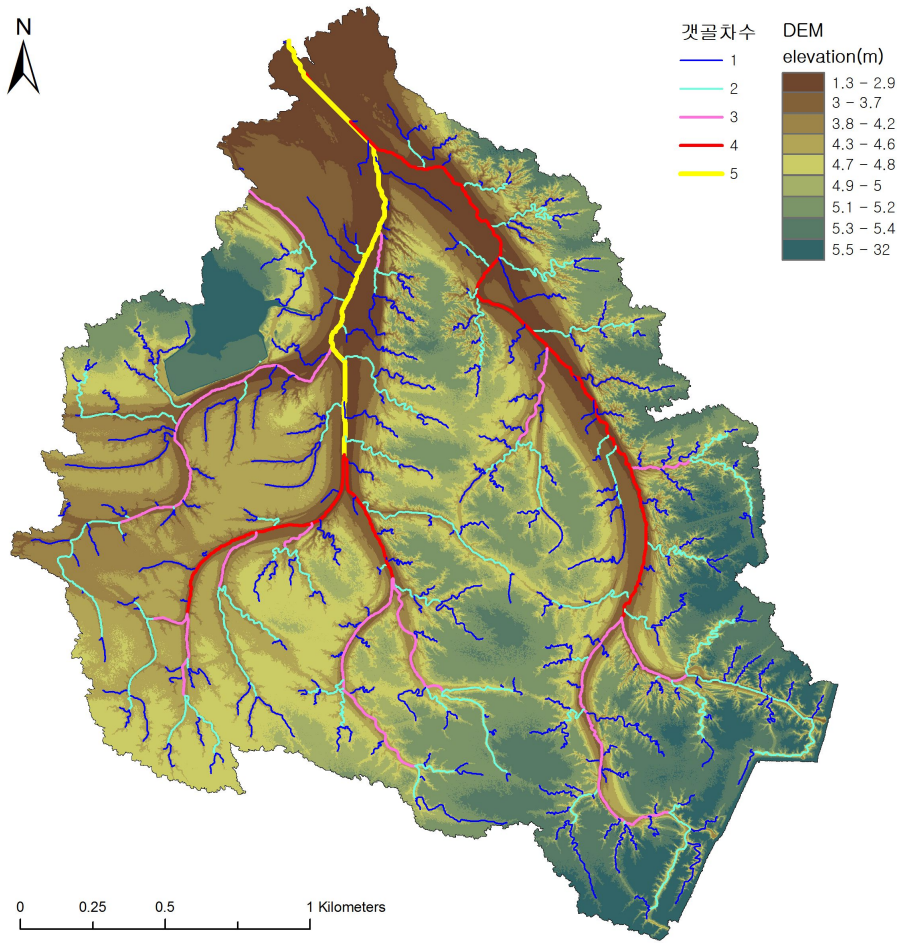


그림 39. 곰소만 갯골의 차수분석 결과

표 9. 곰소만 죽도 갯골의 수계망분석 결과

(길이단위: m)

| 차수 | 수( $N_w$ )<br>(auto) | 수( $N_w$ )<br>(semi-auto) | 분기율<br>( $R_b$ ) | 길이( $L_w$ ) | 평균길이( $\bar{L}_w$ )<br>(auto) | 평균길이( $\bar{L}_w$ )<br>(semi-auto) | 길이비<br>( $R_L$ ) |
|----|----------------------|---------------------------|------------------|-------------|-------------------------------|------------------------------------|------------------|
| 1  | 265                  | 256                       | 4.13             | 30,147.29   | 113.76                        | 117.76                             | 2.08             |
| 2  | 136                  | 62                        |                  | 15,166.82   | 111.52                        | 244.63                             |                  |
| 3  | 66                   | 12                        | 4.00             | 5,642.05    | 85.49                         | 470.17                             | 1.92             |
| 4  | 44                   | 3                         | 3.00             | 4,078.99    | 92.70                         | 1,359.66                           | 2.89             |
| 5  | 19                   | 1                         |                  | 1,666.75    | 87.72                         | 1,666.75                           | 1.23             |

### 3) 함평만 외측 갯골

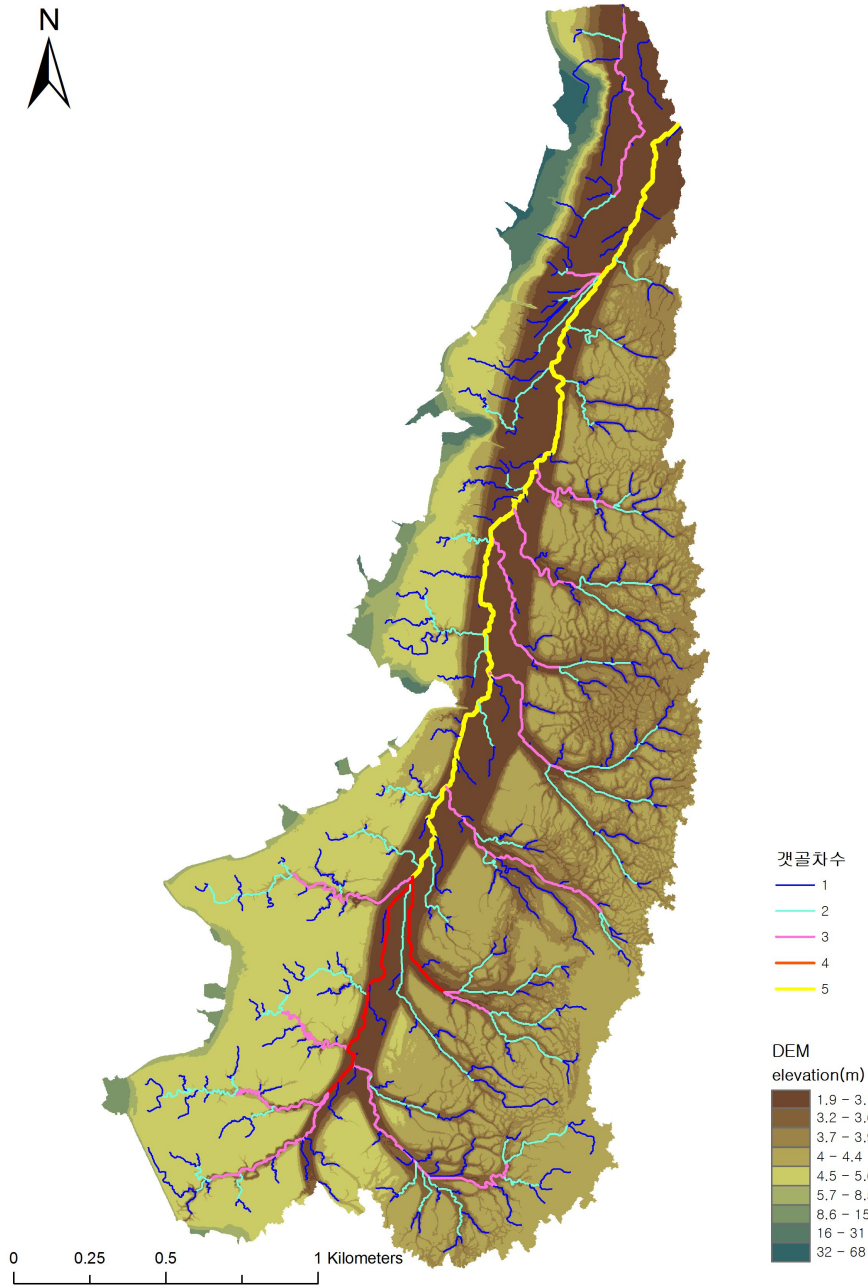


그림 40. 함평만 외측 갯골의 차수 분석 결과

함평만 외측 갯골의 차수분석 결과를 나타낸 지도는 <그림 40>과 같다. 함평만 외측 갯골은 좌측에 육지를 접하고 있으며, 수계 형태는 전형적인 직선형으로 직선형태의 중심 갯골에 저차수의 갯골이 합류하고 있는 형태를 띤다. 세부적으로 중심 갯골의 좌측과 우측으로 나누어서 보면 중심 갯골의 좌측보다 만내부의 넓은 갯골과 접하는 우측의 갯골이 복잡한 수지상 형태를 나타낸다. 최고차수인 중심 갯골이 직선의 긴 형태를 띠기 때문에 최고차수의 갯골이 나머지 차수의 갯골보다 길게 나타난다. 정확한 수치 및 차수별 길이비는 <표 10>을 통해서 확인할 수 있다.

먼저 차수별 갯골수에 대한 분기율을 보면, 1차수부터 5차수까지 순서대로 4.46, 3.39, 7, 2로 나타난다. 고차수 갯골로 모두 합류하는 직선형 수계 패턴의 형태로 인해 4차수에서 3차수의 분기율이 7로 크게 나타나는 점이 특징적이다. 평균길이는 앞서보았던 영광군 염산면과 곰소만 죽도 갯골과 비교하여보았을 때, 1차수는 89.49m로 길이가 짧으나 5차수는 3,124.66m로 약 1.5배에서 2배정도로 매우 긴 것을 확인할 수 있다. 이를 반영하며 길이비는 1차수에서 5차수까지 순서대로 2.40, 2.11, 1.50, 4.59이며, 4차수까지는 2내외로 앞서 보았던 유역과 큰 차이가 없으나 4차수에 대한 5차수의 길이비가 4.59로 높게 나타난다.

표 10. 함평만 외측 갯골의 수계망분석 결과

(길이단위: m)

| 차수 | 수( $N_w$ )<br>(auto) | 수( $N_w$ )<br>(semi-auto) | 분기율<br>( $R_b$ ) | 길이( $L_w$ ) | 평균길이( $\bar{L}_w$ )<br>(auto) | 평균길이( $\bar{L}_w$ )<br>(semi-auto) | 길이비<br>( $R_L$ ) |
|----|----------------------|---------------------------|------------------|-------------|-------------------------------|------------------------------------|------------------|
| 1  | 245                  | 245                       | 4.46             | 21,925.53   | 89.49                         | 89.49                              |                  |
| 2  | 124                  | 55                        | 3.93             | 11,807.84   | 95.22                         | 214.69                             | 2.40             |
| 3  | 67                   | 14                        | 7                | 6,340.65    | 94.64                         | 452.90                             | 2.11             |
| 4  | 13                   | 2                         | 2                | 1,361.13    | 104.70                        | 680.56                             | 1.50             |
| 5  | 38                   | 1                         |                  | 3,124.66    | 82.23                         | 3,124.66                           | 4.59             |

#### 4) 함평만 내측 갯골

함평만 내측 갯골의 차수분석 결과를 나타낸 지도는 <그림 41>과 같다. 함평만 내측 갯골은 내륙에 둘러싸여 있으며 중심 갯골이 외해와 접하는 부분은 사주(sand bar)에 의해 막혀 있어 유역경계가 된다. 수계 형태는 전체적으로 복잡한 수지상 형태를 띠나, 중심갯골이 길이가 길고 넓어 중심 갯골로 저차수의 수지상 갯골들이 짧고 복잡하게 합류하는 형상을 띤다. 이와 같은 수계형상에 대한 정확한 수와 길이 및 비율은 아래의 <표 11>과 같다.

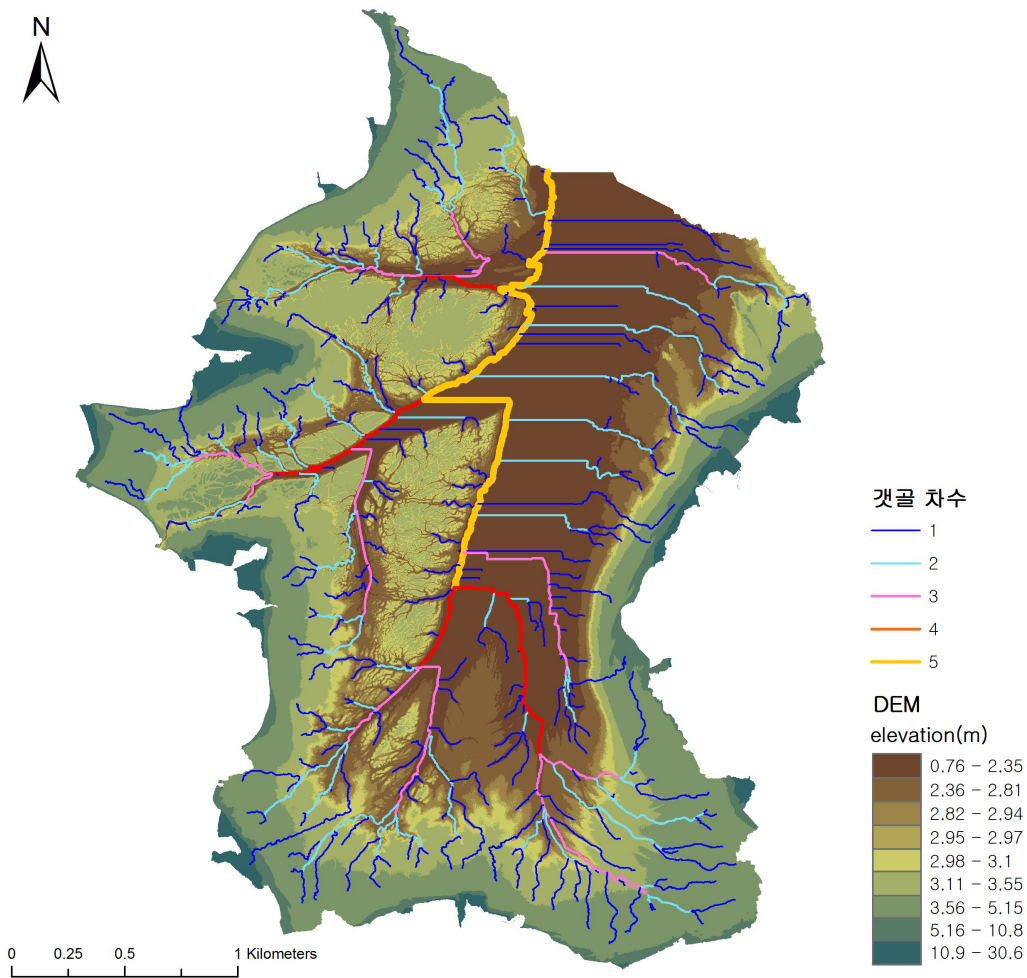


그림 41. 함평만 내측 갯골의 수계망 분석 결과

먼저 차수별 갯골수에 대한 분기율을 보면 1차수부터 5차수까지 순서대로 4.68, 5.18, 2.75, 4.00으로, 앞서 본 갯골들과 비교했을 때 큰 차이 및 특징을 나타내지 않는다. 평균길이에 대한 길이비는 2.05, 2.01, 1.12, 4.43으로 함평만 외측유역과 마찬가지로 1차수와 4차수까지의 길이비는 2 내외의 값을 나타내나, 4차수에 대한 5차수의 길이비는 4.43으로 높게 나타난다. 함평만 내측 갯골도 중심갯골이 유역의 주요 비중을 차지하고 있기 때문이다. 더불어 flow direction 알고리즘에 의해 5차수 갯골이 중간에 4차수 유역으로 꺾여 들어가는 부분이 있어 길이가 더욱 연장되어 나타난 것으로 보인다.

표 11. 함평만 내측 갯골의 수계망분석 결과

(길이단위: m)

| 차수 | 수( $N_w$ )<br>(auto) | 수( $N_w$ )<br>(semi-auto) | 분기율<br>( $R_b$ ) | 길이( $L_w$ ) | 평균길이( $\bar{L}_w$ )<br>(auto) | 평균길이( $\bar{L}_w$ )<br>(semi-auto) | 길이비<br>( $R_L$ ) |
|----|----------------------|---------------------------|------------------|-------------|-------------------------------|------------------------------------|------------------|
| 1  | 267                  | 267                       | 4.68             | 43,728.66   | 163.78                        | 163.78                             | 2.05             |
| 2  | 134                  | 57                        | 5.18             | 19,118.92   | 142.68                        | 335.42                             |                  |
| 3  | 67                   | 11                        | 2.75             | 7,417.73    | 110.71                        | 674.34                             | 2.01             |
| 4  | 26                   | 4                         | 4.00             | 3,019.34    | 116.13                        | 754.84                             | 1.12             |
| 5  | 37                   | 1                         |                  | 3,342.86    | 90.35                         | 3,342.86                           | 4.43             |

## 5) 종합

갯골의 유형별 수계망 분석을 위하여, 수계망 분석 방법 중 계량적이며 규칙성이 있어 널리 이용되는 차수분석 방법이 이용되었다. 먼저 차수분석은 차수별 갯골수와 분기율, 갯골의 길이와 길이비 도출을 중심으로 이루어졌다. 차수별 수와 길이분석 결과는 분기율과 길이비가 결과 및 특징을 함축하고 있어 종합분석은 분기율과 길이비를 중심으로 살펴보았다. 결과를 종합하면 다음과 같은 두 가지 특징으로 설명된다.

첫째, 차수분석결과 갯골의 지형적 분류에 따른 유형에 영향을 받지 않았다. 유형별 특징보다는 유역분지의 경사와 수계의 형상 및 패턴과 연관이 있었다. 먼저 분기율 분석결과 유역분지의 경사변이가 가장 커 분기율이 5내외로 높았던 영광군 염산면 갯골을 제외하고, 보통 4내외의 값을 나타냈다. 그러나 유역 내에서도 값이 유사하지 않고 차수별로 상이하였을 뿐만 아니라, 유역 간에도 뚜렷한 차이를 나타내지 않았다. 길이비는 대부분 1~2내외의 값을 나타냈다. 길이비는 분기율만큼은 아니지만 유역 내와 유역 간에도 뚜렷한 패턴을 발견하지 못했다. 평균 이상의 값, 즉 3~4의 값을 나타내는 것을 중심으로 이유를 분석하였을 때 분기율과 마찬가지로 갯골의 수계형상 및 패턴에 영향을 받은 결과였다.

둘째, 갯골의 차수분석 결과는 하천의 값과 유사하게 나타났다. 비교한 하천 유역은 대표적인 한강권역을 예시로 선택했다. 한강 전체유역 뿐만 아니라 한강유역에서도 낮은 경사를 지니며<sup>52)</sup> 서해로 바로 유입되는 한강서해유역과 백두대간에서 발원하여 동해로 바로 유입되어 경사가 급한<sup>53)</sup> 한강동해유역을 포함하였다(표 13). 먼저 하천의 분기율은 4내외의 값이 대부분을 차지하며 한강서해지역은 3내외의 값이 많다. 갯골과 비교하여보았을 때, 뚜렷한 차이는 없다. 길이비 또한 1에서 2내외의 값으로 갯골과 유사하게 나타

52) 한강서해 대권역의 유역평균경사 9.89% (자료: <http://www.wamis.go.kr>)

53) 한강동해 대권역의 유역평균경사 40.03% (자료: *ibid.*)

난다. 따라서 갯골의 수계망 형태는 하천과 유사한 것으로 나타났다. 특히 직선형 갯골보다는 수지상으로 발달한 갯골이 더욱 유사하게 나타난다.

표 12. 한강 유역별 유역특성

| 유역    | 구분              | 1차          | 2차          | 3차          | 4차          | 5차          | 6차          | 7차          | 8차          |
|-------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 한강    | 하천차수에 따른 하천수(개) | 45,011      | 11,094      | 2,485       | 561         | 132         | 34          | 6           | 1           |
|       | 하천길이(km)        | 21,240      | 8,984.6     | 4,708.4     | 2,435.8     | 1,426.0     | 695.2       | 415.7       | 335.93      |
|       | 평균하천길이(km)      | 0.47        | 0.81        | 1.89        | 4.34        | 10.8        | 20.45       | 69.28       | 335.93      |
|       | 하천길이비           |             | <b>1.72</b> | <b>2.34</b> | <b>2.29</b> | <b>2.49</b> | <b>1.89</b> | <b>3.39</b> | <b>4.85</b> |
|       | 하천분기율           | <b>4.06</b> | <b>4.46</b> | <b>4.43</b> | <b>4.25</b> | <b>3.88</b> | <b>5.67</b> | <b>6</b>    |             |
| 한강 서해 | 하천차수에 따른 하천수(개) | 3,145       | 786         | 201         | 52          | 12          | 2           |             |             |
|       | 하천길이(km)        | 1,503       | 744.28      | 318.57      | 159.68      | 54.74       | 3.5         |             |             |
|       | 평균하천길이(km)      | 0.48        | 0.95        | 1.58        | 3.07        | 4.56        | 1.75        |             |             |
|       | 하천길이비           |             | <b>1.98</b> | <b>1.67</b> | <b>1.94</b> | <b>1.49</b> | <b>0.38</b> |             |             |
|       | 하천분기율           | <b>4</b>    | <b>3.91</b> | <b>3.87</b> | <b>4.33</b> | <b>6</b>    |             |             |             |
| 한강 동해 | 하천차수에 따른 하천수(개) | 6731        | 1606        | 362         | 82          | 23          | 6           |             |             |
|       | 하천길이(km)        | 3546.8      | 1420.6      | 739.58      | 414.07      | 173.82      | 82.5        |             |             |
|       | 평균하천길이(km)      | 0.53        | 0.88        | 2.04        | 5.05        | 7.56        | 13.75       |             |             |
|       | 하천길이비           |             | <b>1.68</b> | <b>2.31</b> | <b>2.47</b> | <b>1.5</b>  | <b>1.82</b> |             |             |
|       | 하천분기율           | <b>4.19</b> | <b>4.44</b> | <b>4.41</b> | <b>3.57</b> | <b>3.83</b> |             |             |             |

자료: 국가수자원관리종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr>)

## 2. 횡단면분석

횡단면분석(cross-section analysis)을 위해 수계망분석을 토대로 차수별 깊이(D, depth)와 폭(W, width)을 구했다. 이를 통해서 차수별 깊이비( $R_D$ )와 폭비( $R_W$ )를 구하였으며, 깊이 대비 폭의 비율( $D/W$ )을 구하였다. 깊이 대비 폭의 비율은 갯골 곡의 형태(valley shape)를 식별할 수 있기 때문에 본 연구에서 특별히 추가하였다. 갯골 곡의 형태가 그림 폭이 좁고 깊이가 깊을수록 비율의 값이 낮게 나타나며(그림 42a), 깊이보다 폭이 넓을수록 값이 높게 나타난다(그림 42b).

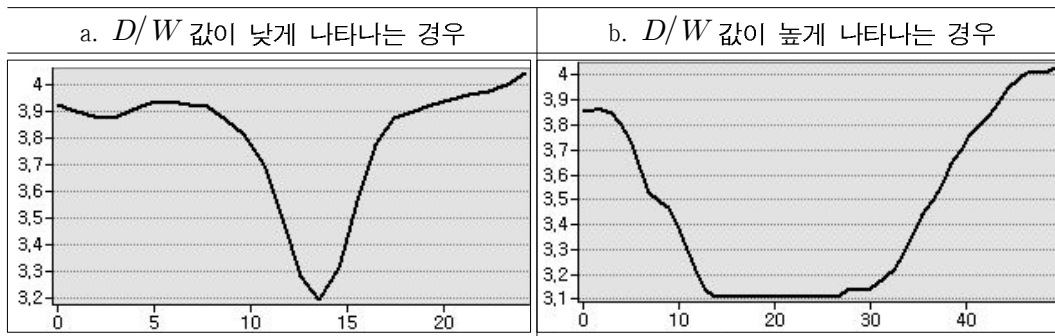


그림 42. 갯골 곡의 형태 예시

깊이비( $R_D$ )는 차수가  $w-1$ 인 평균갯골깊이에 대한 차수가  $w$ 인 갯골깊이의 비로 정의된다(식 8). 폭비( $R_W$ ) 또한 마찬가지로, 차수가  $w-1$ 인 평균갯골 폭에 대한 차수가  $w$ 인 갯골 폭의 비로 정의된다(식 9).

$$R_D = \frac{D_w}{D_{w-1}} \dots\dots\dots (식 8)$$

$$R_W = \frac{W_w}{W_{w-1}} \dots\dots\dots (식 9)$$

깊이 대비 폭의 비율은 차수가  $w$ 인 폭 값에 깊이를 나눈 값이다(식 10).

$$D/W = \frac{W_w}{D_w} \dots\dots\dots (식 10)$$

분석된 깊이와 폭, 깊이 대비 폭의 비율 값은 평균뿐만 아니라 최대 최솟 값까지 나타냈다. 깊이비와 폭비는 평균값을 이용하여 계산하였다. 구역별 자세한 결과는 다음과 같다.

### 1) 영광군 염산면 갯골

개방형 갯벌에 해당되는 영광군 염산면 갯골의 단면분석 결과는 <표 13>와 같다. 먼저 깊이는 1차수부터 5차수까지 순서대로 0.46, 0.875, 1.197, 1.902, 1.791로 값의 변이가 크지 않다. <그림 42>의 그래프를 통해보면 깊이의 최대와 최솟값의 스펙트럼은 크나, 평균값은 전체적으로 선형함수(linear) 형태를 보인다(식 11).

$$y = 0.3689x + 0.1383, R^2 = 0.9163 \dots\dots\dots (식 11)$$

특징적인 점은 5차수보다 4차수의 깊이가 더 깊다는 점인데, 이는 5차수 갯골이 외해로 노출되어 있어 조류의 영향을 적게 받아 곡 지형이 형성되기 어렵기 때문으로 여겨진다. 이에 따른 깊이비는 1차수부터 순서대로 1.90, 1.37, 1.59, 0.94이며, 1내외의 값으로 변이가 크지 않은 깊이 값을 잘 반영한다.

폭은 1차수부터 5차수까지 순서대로 10.406, 15.029, 30.976, 140.900, 308.906이며, 4차수부터 급격하게 증가함을 알 수 있다. <그림 43> 좌측의 폭 그래프를 통해보면 확연하게 드러나며, 4차수부터 급격히 증가함에 따라 지수함수(exponential)의 형태를 보인다(식 12).

표 13. 영광군 염산면 갯골의 단면분석 결과

(단위:m)

| 차수  |    | 깊이(D) | 깊이비( $R_D$ )<br>(평균) | 폭(W)    | 폭비( $R_W$ )<br>(평균) | 비율( $D/W$ ) |
|-----|----|-------|----------------------|---------|---------------------|-------------|
| 1차수 | 평균 | 0.460 | 1.90                 | 10.406  | 1.44                | 32.263      |
|     | 최대 | 1.459 |                      | 20.803  |                     | 92.104      |
|     | 최소 | 0.103 |                      | 0.220   |                     | 1.728       |
| 2차수 | 평균 | 0.875 | 1.37                 | 15.029  | 2.06                | 22.202      |
|     | 최대 | 3.032 |                      | 94.688  |                     | 90.997      |
|     | 최소 | 0.139 |                      | 0.171   |                     | 1.001       |
| 3차수 | 평균 | 1.197 | 1.59                 | 30.976  | 4.55                | 25.082      |
|     | 최대 | 2.900 |                      | 141.135 |                     | 60.301      |
|     | 최소 | 0.266 |                      | 5.940   |                     | 9.090       |
| 4차수 | 평균 | 1.902 | 0.94                 | 140.900 | 2.19                | 85.801      |
|     | 최대 | 3.983 |                      | 248.023 |                     | 170.396     |
|     | 최소 | 0.949 |                      | 32.873  |                     | 20.527      |
| 5차수 | 평균 | 1.791 |                      | 308.906 |                     | 173.871     |
|     | 최대 | 2.182 |                      | 445.157 |                     | 223.015     |
|     | 최소 | 1.353 |                      | 221.811 |                     | 121.268     |

주) 자료의 가산성을 위해 소숫점 셋째자리까지만 표현함

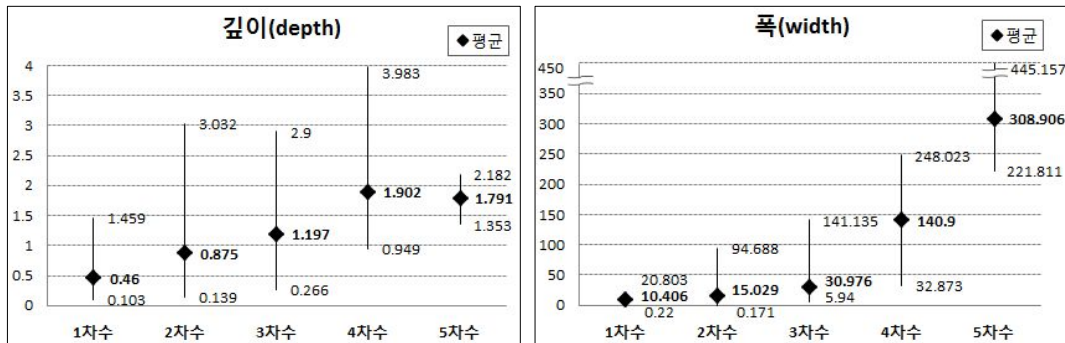


그림 43. 영광군 염산면 갯골의 깊이와 너비의 평균, 최대, 최솟값 그래프

$$y = 3.088^{e^{0.9019x}}, R^2 = 0.9575 \dots \dots \dots (\text{식 } 12)$$

이에 따른 폭비는 1차수부터 5차수까지 순서대로 1.44, 2.06, 4.55, 2.19로 1내지 2내외의 값을 보이거나, 3차수와 4차수의 큰 폭비는 4차수부터 급격히 증가한 폭을 반영하고 있다.

깊이와 폭의 비율은 1차수부터 5차수까지 순서대로 32.263, 22.202, 25.802, 85.801, 173.871로, 폭과 마찬가지로 4차수부터 급격히 증가한다. 그런데 2차수보다 1차수의 비율이 더 크게 나타나는데, 이는 2차수가 1차수보다 더 좁고 깊은 형태의 세곡(細谷)임을 나타낸다. 이와 같이 나타나는 이유는 1차수는 최상류로 평평한 갯벌과 마주하는 곳으로서, 조수가 갯골로 흘러 곡을 형성하는 릴류(rill flow)로 흐르기보다는 바로 범람하여 포상류(sheet flow)로 흐르기 때문이다.

## 2) 곰소만 죽도 갯골

반폐쇄형 갯벌에 해당되는 곰소만 죽도 갯골의 단면분석 결과는 <표 14>와 같다. 먼저 깊이는 1차수부터 5차수까지 순서대로 0.389, 0.550, 0.721, 1.536, 1.791로 값의 변이가 크지 않으나, 4차수에서 배 이상으로 깊어진다. <그림 44>의 깊이 그래프를 보면 평균값은 전체적으로 선형함수(linear) 형태를 보인다(식 13).

$$y = 0.472x - 0.3256, R^2 = 0.8992 \dots\dots\dots (식 13)$$

이에 따른 깊이비는 1차수부터 순서대로 1.41, 1.31, 2.13, 1.47이며, 앞서 언급했던 것처럼 1내외의 값으로 변이가 크지 않으나 4차수로 변화할 때의 값은 2.13으로 크게 깊어지는 깊이를 보여주고 있다.

폭은 1차수부터 5차수까지 순서대로 9.607, 15.151, 27.727, 125.531, 314.881이며, 1차수부터 3차수까지는 미미하게 증가하다가 4차수부터 급격하게 증가한다. <그림 44>좌측의 폭 그래프를 통해보면 확연하게 드러나며, 4차수부터 급격히 증가함에 따라 지수함수(exponential)의 형태를 보인다(식 14).

$$y = 2.8559^{e^{0.9094x}}, R^2 = 0.9575 \dots\dots\dots (식 14)$$

이에 따른 폭비는 1차수부터 5차수까지 순서대로 1.58, 1.83, 4.53, 2.21로 1내지 2내외의 값을 보이나, 3차수와 4차수의 큰 폭비는 4차수부터 급격히 증가한 폭을 반영하고 있다.

깊이와 폭의 비율은 1차수부터 5차수까지 순서대로 30.090, 28.993, 37.358, 76.504, 130.020로 폭과 마찬가지로 4차수부터 급격히 증가한다. 그런데 앞서 본 영광군 염산면 갯골과 마찬가지로 2차수보다 1차수의 비율이 더 크게 나타나고 있어, 2차수가 1차수보다 더 좁고 깊은 형태의 세곡임을 보여준다(표 14).

표 14. 금소만 갯골의 단면분석 결과

| (단위:m) |    |       |                      |         |                     |         |
|--------|----|-------|----------------------|---------|---------------------|---------|
| 차수     |    | 깊이(D) | 깊이비( $R_D$ )<br>(평균) | 폭(W)    | 폭비( $R_W$ )<br>(평균) | 비율(D/W) |
| 1차수    | 평균 | 0.389 | 1.41                 | 9.607   | 1.58                | 30.090  |
|        | 최대 | 1.049 |                      | 19.989  |                     | 63.341  |
|        | 최소 | 0.134 |                      | 4.220   |                     | 10.155  |
| 2차수    | 평균 | 0.550 | 1.31                 | 15.151  | 1.83                | 28.993  |
|        | 최대 | 1.402 |                      | 47.790  |                     | 69.353  |
|        | 최소 | 0.161 |                      | 4.009   |                     | 10.488  |
| 3차수    | 평균 | 0.721 | 2.13                 | 27.727  | 4.53                | 37.358  |
|        | 최대 | 1.739 |                      | 129.861 |                     | 74.667  |
|        | 최소 | 0.215 |                      | 7.573   |                     | 15.924  |
| 4차수    | 평균 | 1.536 | 1.47                 | 125.531 | 2.51                | 76.504  |
|        | 최대 | 2.386 |                      | 280.788 |                     | 130.049 |
|        | 최소 | 0.637 |                      | 26.997  |                     | 36.949  |
| 5차수    | 평균 | 2.256 |                      | 314.881 |                     | 130.020 |
|        | 최대 | 2.967 |                      | 659.798 |                     | 222.356 |
|        | 최소 | 1.707 |                      | 119.472 |                     | 70.002  |

주)자료의 가산성을 위해 소숫점 셋째자리까지만 표현함

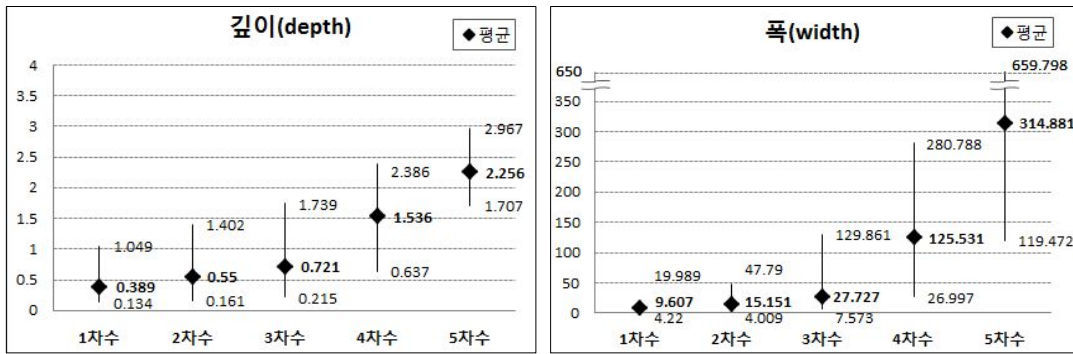


그림 44. 금소만 죽도 갯골의 깊이와 너비의 평균, 최대, 최솟값 그래프

### 3) 함평만 외측 갯골

폐쇄형 갯벌에 해당되는 함평만에서도 만입구 부분에 위치한 함평만 외측 갯골의 단면분석 결과는 <표 15>와 같다.

먼저 깊이는 1차수부터 5차수까지 순서대로 0.377, 0.672, 1.096, 1.395, 1.626으로 깊이의 값이 크지 않고 값의 변이도 크지 않다. 함평만 외측 갯골은 앞서 본 영광군 염산면 및 곰소만과는 달리 4차수부터 두 배 이상으로 급격히 증가하지 않기 때문에, <그림 45>의 깊이 그래프를 통해 보면 평균 깊이 값 선형함수(linear)의  $R^2$  값이 매우 높게 나타난다(식 15).

$$y = 0.3221x + 0.0669, R^2 = 0.9906 \dots\dots\dots(\text{식 15})$$

이에 따른 깊이비는 1차수부터 순서대로 1.78, 1.63, 1.27, 1.17이며, 앞서 언급했던 것처럼 깊이의 변이가 크지 않아 1내외의 값으로 작게 나타난다.

폭은 1차수부터 5차수까지 순서대로 13.560, 20.283, 35.960, 126.759, 242.133이며, 함평만 외측 갯골 또한 1차수부터 3차수까지는 미미하게 증가하다가 4차수부터 급격하게 증가한다. <그림 45> 좌측의 폭 그래프를 통해 확인하면 확연하게 드러나며, 4차수부터 급격히 증가함에 따라 지수함수(exponential)의 형태를 보인다(식 16).

$$y = 5.0888e^{0.7597x}, R^2 = 0.9653 \dots\dots\dots(\text{식 16})$$

이에 따른 폭비는 1차수부터 5차수까지 순서대로 1.50, 1.77, 3.53, 1.19로 1내외의 값을 보이나, 3차수와 4차수의 큰 폭비는 4차수부터 급격히 증가한 폭 수치를 반영하고 있다.

깊이와 폭의 비율은 1차수부터 5차수까지 순서대로 39.583, 32.953, 35.487, 88.913, 151.689로 폭과 마찬가지로 4차수부터 급격히 증가한다. 1차수부터 3차수까지 비율 값은 비슷하나, 앞서본 경우에서처럼 1차수보다

2차수의 값이 더 작게 나타나며 2차수가 더 세곡으로 나타난다.

표 15. 함평만 외측 갯골의 단면분석 결과

| (단위:m) |    |       |                      |         |                     |             |
|--------|----|-------|----------------------|---------|---------------------|-------------|
| 차수     |    | 깊이(D) | 깊이비( $R_D$ )<br>(평균) | 폭(W)    | 폭비( $R_W$ )<br>(평균) | 비율( $D/W$ ) |
| 1차수    | 평균 | 0.377 | 1.78                 | 13.560  | 1.50                | 39.583      |
|        | 최대 | 1.184 |                      | 24.132  |                     | 93.476      |
|        | 최소 | 0.103 |                      | 4.374   |                     | 13.730      |
| 2차수    | 평균 | 0.672 | 1.63                 | 20.283  | 1.77                | 32.953      |
|        | 최대 | 1.306 |                      | 46.447  |                     | 63.773      |
|        | 최소 | 0.267 |                      | 8.421   |                     | 10.715      |
| 3차수    | 평균 | 1.096 | 1.27                 | 35.960  | 3.53                | 35.487      |
|        | 최대 | 1.684 |                      | 91.783  |                     | 71.005      |
|        | 최소 | 0.381 |                      | 11.123  |                     | 13.813      |
| 4차수    | 평균 | 1.395 | 1.17                 | 126.759 | 1.19                | 88.913      |
|        | 최대 | 1.810 |                      | 188.019 |                     | 130.777     |
|        | 최소 | 0.929 |                      | 60.708  |                     | 64.518      |
| 5차수    | 평균 | 1.626 |                      | 242.133 |                     | 151.689     |
|        | 최대 | 1.866 |                      | 322.582 |                     | 244.158     |
|        | 최소 | 1.321 |                      | 209.672 |                     | 127.717     |

주)자료의 가산성을 위해 소숫점 셋째자리까지만 표현함

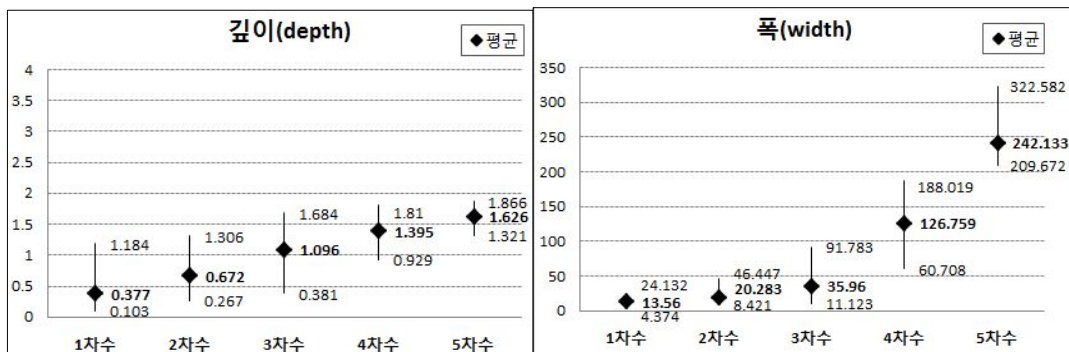


그림 45. 함평만 외측 갯골의 깊이와 너비의 평균, 최대, 최소값 그래프

#### 4) 함평만 내측 갯골

폐쇄형 갯벌에 해당되는 함평만에서도 만내부에 위치한 함평만 내측 갯골의 단면분석 결과는 <표 16>과 같다. 먼저 깊이는 1차수부터 5차수까지 순서대로 0.253, 0.511, 0.885, 1.515, 2.108로 5차수의 깊이는 2m이상으로 다소 깊으나, 전체적으로는 깊이의 값이 크지 않고 값의 변이도 크지 않다. 함평만 내측도 깊이가 차수별로 급격하게 증가하지 않기 때문에, <그림 46>의 깊이 그래프를 통해 보면 평균 깊이 값이 선형함수(linear)형태로 나타나며  $R^2$  값도 높게 나타난다(식 17).

$$y = 0.4714x - 0.3598, R^2 = 0.971 \dots\dots\dots(\text{식 } 17)$$

이에 따른 깊이비는 1차수부터 순서대로 2.20, 1.73, 1.71, 1.39이며, 깊이의 변이가 크지 않아 1내외의 값으로 작게 나타난다.

폭은 1차수부터 5차수까지 순서대로 15.162, 23.195, 39.084, 93.400, 858.015 값을 보인다(표 16). 5차수의 폭이 858.015m로 다른 유역보다 월등히 크게 나타나는데, 이는 함평만을 관통하는 주갯골이 이어지는 부분이기 때문이다. 또한 3차수까지는 미미하게 증가하다가 4차수에서 약 2배정도로 증가하나, 5차수에서 급격하게 증가한다. 이는 <그림 46> 좌측의 폭 그래프를 통해보면 확연하게 드러난다. 4차수부터 2배정도로 증가함에 따라 지수함수(exponential)의 형태를 보이거나 5차수에서 급격히 증가함에 따라  $R^2$  값은 다른 유역에 비하여 0.9 이상으로 높지 않다(식 18).

$$y = 3.7607e^{0.9465x}, R^2 = 0.8758 \dots\dots\dots(\text{식 } 18)$$

이에 따른 폭비는 1차수부터 5차수까지 순서대로 1.53, 1.69, 2.39, 9.19로 1에서 2내외의 값을 보이거나(표 16), 4차수와 5차수의 큰 폭비는 4차수부터 급격히 증가한 폭 수치를 반영하고 있다.

표 16. 함평만 내측 갯골의 단면분석 결과

(단위:m)

| 차수  |    | 깊이(D) | 깊이비( $R_D$ )<br>(평균) | 폭(W)     | 폭비( $R_W$ )<br>(평균) | 비율( $D/W$ ) |
|-----|----|-------|----------------------|----------|---------------------|-------------|
| 1차수 | 평균 | 0.253 | 2.02                 | 15.162   | 1.53                | 76.167      |
|     | 최대 | 0.667 |                      | 39.470   |                     | 222.513     |
|     | 최소 | 0.103 |                      | 4.171    |                     | 16.641      |
| 2차수 | 평균 | 0.511 | 1.73                 | 23.195   | 1.69                | 69.174      |
|     | 최대 | 1.699 |                      | 38.021   |                     | 148.969     |
|     | 최소 | 0.138 |                      | 11.793   |                     | 14.170      |
| 3차수 | 평균 | 0.885 | 1.71                 | 39.084   | 2.39                | 62.763      |
|     | 최대 | 2.233 |                      | 98.923   |                     | 146.705     |
|     | 최소 | 0.153 |                      | 13.460   |                     | 10.793      |
| 4차수 | 평균 | 1.515 | 1.39                 | 93.400   | 9.19                | 78.197      |
|     | 최대 | 2.428 |                      | 188.599  |                     | 199.901     |
|     | 최소 | 0.360 |                      | 33.586   |                     | 30.509      |
| 5차수 | 평균 | 2.108 |                      | 858.015  |                     | 426.480     |
|     | 최대 | 2.317 |                      | 1305.904 |                     | 780.996     |
|     | 최소 | 1.672 |                      | 668.670  |                     | 294.335     |

주)자료의 가산성을 위해 소숫점 셋째자리까지만 표현함

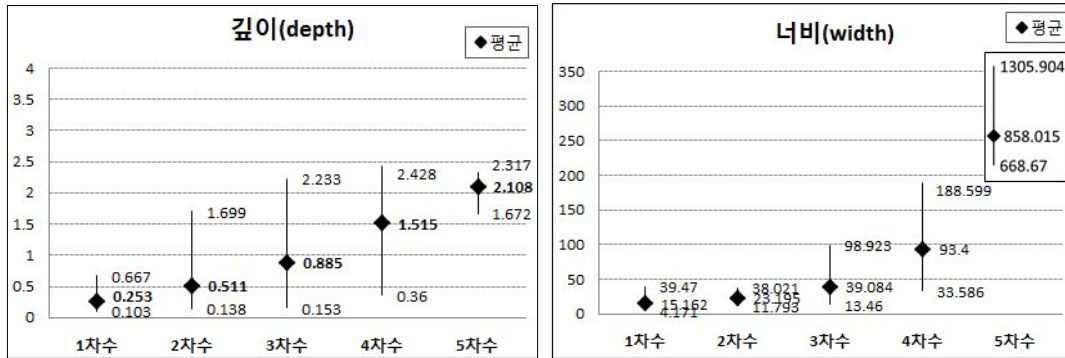


그림 46. 함평만 내측 갯골의 깊이와 너비의 평균, 최대, 최소값 그래프

깊이 대비 폭의 비율은 1차수부터 5차수까지 순서대로 76.167, 69.174, 62.763, 78.197, 426.480을 나타낸다(표 16). 앞서 본 세 개의 유역과는 달리 비율이 2배 정도로 크게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 함평만 최내측에 위치하여 조석과 파랑에너지가 강하게 미치지 않아, 갯골이 V자곡의 형태를 형성하기보다는 측방으로 넓게 침식 및 퇴적되기 때문이다. 또한 앞서 본 경우와 마찬가지로 1차수보다 2차수의 평균비율이 더 작게 나타남에 따라, 1차수보다는 2차수가 더 세곡으로 나타남을 확인할 수 있다. 함평만 내측 5차수 갯골의 큰 폭으로 인해 비율도 크게 나타난다.

## 5) 종합

횡단면 분석에는 연구지역의 차수별 깊이와 깊이비, 폭과 폭비를 구하고, 깊이 대비 폭의 비율을 구하는 분석이 수행되었다. 결과를 종합하면 갯골구역의 공통점과 구역별 차이점으로 나누어 볼 수 있다.

횡단면 분석 결과 갯골구역의 공통점은 다음과 같다.

첫 번째, 깊이(D)의 차수별 값은 선형함수(linear)를 나타냈으며,  $R^2$  값도 0.89~0.97로 유의하게 나타났다. 이는 갯벌의 낮은 경사로 인하여 값의 범위가 0.10~2.3m 내외로 크지 않고, 차수별로 값의 변이도 크지 않기 때문이다.

두 번째, 폭(W)의 차수별 값은 지수함수(exponential)를 나타냈으며,  $R^2$  값은 0.87~0.96로 유의하게 나타났다. 폭은 깊이와는 달리 10m내외부터 800m이상까지 값의 범위가 상당히 크게 나타났으며, 3차수에서 4차수로 올라갈 때 갯골의 폭이 급격히 넓어짐에 따라 지수함수 형태를 나타냈다.

마지막으로, 깊이 대비 폭의 비율(D/W)은 갯골의 수문학적 특성을 반영하였다. 반영한 결과는 첫째, 깊이보다 폭이 최소 30배에서 최대 800배까지 높게 나타난 것이다. 이는 갯골에 미치는 유속이 약하기 때문에 하방침식보다는 측방침식이 용이하기 때문이며, 유속이 약한 갯골 형성 특성을 잘 반영하였다. 또한 둘째, 폭의 비를 반영하며 전체적으로 1차수에서 5차수로 갈수록 높게 나타났으나, 2차수보다 1차수의 값이 더 크게 나타나는 점을 발견했다. 즉, 2차수가 1차수보다 더 좁고 깊은 횡단면 형태를 보였다. 이와같은 결과가 나타나는 이유는 1차수는 최상류 갯골로 평평한 갯벌과 마주하는 곳으로서, 조수가 갯골로 흐르기 보다는 바로 범람하여 포상류(sheet flow)로 흐르기 때문이다. 반면 2차수는 1차수보다 조수가 갯골만으로 흐르는 시간이 많고, 1차수가 집수되어 릴류(rill flow)로 흐르기 때문으로 보인다.

다음으로 유역별 특성을 반영하는 차이점은 모든 곳에서 나타난 것은 아니었다. 반폐쇄형 및 폐쇄형 만입에 위치한 중립적인 형태보다 개방형과 폐쇄형의 만내에서 뚜렷한 차이를 나타냈다. 차이점은 다음과 같다.

첫 번째, 개방형에 해당되는 영광군 염산면 갯골에서는 다른 곳과는 달리 5차수보다 4차수의 깊이가 더 깊게 나타났다. 이는 5차수 갯골이 외해로 노출되어 있어 조류보다는 파랑의 영향을 많이 받아 곡 지형이 형성되기 어렵기 때문으로 여겨진다.

두 번째, 폐쇄형에 해당되는 함평만 내측의 갯골에서는 깊이 대비 폭의 비율이 76.167, 69.174, 62.763, 78.197, 426.480로, 다른 세 개의 유역에서는 30부터 150까지 나타나는 데에 달리 비율이 2배 정도로 크게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 함평만 내측에 위치하여 조석과 파랑에너지가 강하게 미치지 않아, 곡 형태를 형성하기보다는 측방으로 넓게 침식 및 퇴적되기 때문으로 보인다.

## 제5장. 결론 및 향후과제

하천과 사면의 관계처럼 상호의존성이 높은 갯골과 갯벌의 상관성을 파악하기 위하여, 갯벌 유형에 따른 갯골 지형을 분석하였다.

갯벌 유형은 지형에 따른 분류를 중심으로 개방형, 반폐쇄형, 폐쇄형으로 나누어 각각 영광군 염산면 갯골, 곰소만, 함평만을 연구지역으로 선정하였다. 갯골 지형 분석으로는 수계망(channel networks)과 횡단면(cross-section) 분석을 실시하였다. 수계망 분석에는 차수분석과 수계밀도를, 횡단면 분석은 차수별 깊이와 폭 값의 도출을 중심으로 진행되었다.

갯골 지형 분석을 위해 고해상도의 항공LiDAR 자료가 이용되었다. 자료 분석을 위해서는 ArcGIS 9.3.1이 사용되었으며, 수계망 분석을 위해 동일 S/W 내의 익스텐션(extension)인 ArcHydro Tool이 사용되었다.

본 연구에서 얻어진 분석결과는 다음과 같다.

첫째, 차수분석 결과 갯벌의 지형적 분류에 따른 유형에 영향을 받지 않았다. 그보다는 직선형 또는 수지상 등 수계패턴 및 형태에 더욱 영향을 받았으며, 유역분지 경사 등의 지형에도 영향을 받았다. 또한 하천의 값과 비교해 보았을 때, 분기율과 길이비 모두 하천과 유사하였다. 특히 함평만 외측 갯골과 같은 직선형 갯골보다는 곰소만 죽도 갯골과 같은 수지상(dendritic pattern)으로 발달한 갯골이 더욱 유사하게 나타났다.

셋째, 갯골의 차수별 횡단면 분석 결과 연구지역의 모든 갯골유역에서 다음과 같은 공통점이 발견되었으며, 미립질의 유속이 약한 갯벌의 형성 특성을 반영하였다. 먼저 깊이(D)는 0.10~2.3m 내외로 값이 크지 않았으며, 1차수부터 5차수까지 선형함수(linear)를 나타냈다. 그에 반해 폭(W)은 10m 내외부터 800m이상까지 값의 범위가 상당히 크게 나타났으며, 4차수부터 급격히 폭이 넓어짐에 따라 지수함수(exponential) 형태를 나타냈다. 비율

(D/W)분석 결과 깊이보다 폭이 최소 30배에서 최대 800배까지 높게 나타났다. 깊이와 폭, 비율 분석 결과 유속이 약하여 곡을 형성하는 하방 침식보다는 측방으로 넓게 침식 및 퇴적되는 갯골 형성 특성을 잘 반영하였다. 또한 2차수보다 1차수의 비율 값이 더 크게 나타나, 2차수가 1차수보다 더 좁고 깊은 형태임을 발견하였다. 이와 같은 이유는 1차수에서는 조수가 갯골로 흐르기 보다는 바로 범람하여 포상류(sheet flow)로 흐르는데 반해, 2차수는 1차수보다 조수가 갯골만으로 흐르는 시간이 많고, 1차수가 집수되어 릴류(rill flow)로 흐르기 때문으로 보인다.

넷째, 갯골의 차수별 횡단면 분석 결과 갯벌의 지형적 분류에 따른 유형을 반영하였다. 그 중에서도 반폐쇄형 및 폐쇄형 만입에 위치한 중립적인 형태보다 개방형과 폐쇄형의 만내에서 뚜렷한 차이를 나타냈다. 차이점으로는 먼저 개방형에 해당되는 영광군 염산면 갯골에서는 다른 곳과는 달리 5차수보다 4차수의 깊이가 더 깊게 나타났다. 이는 5차수 갯골이 외해로 노출되어 있어 조류보다는 파랑의 영향을 많이 받아 곡 지형이 형성되기 어렵기 때문으로 여겨진다. 두 번째 차이점으로, 폐쇄형에 해당되는 함평만 내측의 갯골에서는 깊이 대비 폭의 비율이 다른 세 개의 유역보다 2배 정도로 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 함평만 내측에 위치하여 조석과 파랑에너지가 강하게 미치지 않아 곡 형태를 형성하기보다는 측방으로 넓게 침식 및 퇴적을 반영하였다.

종합해보면 갯골의 수계망은 갯벌의 지형적 분류에 따른 유형별 차이점이 발견되지 않았다. 반면 횡단면 분석결과 유역 간 공통점과 차이점이 나타났으며, 공통점은 모두 미립질의 유속이 약한 갯벌의 형성 특성을 반영하였다. 횡단면 분석결과 유역별 차이점은 갯벌의 지형적 특성에 따른 에너지의 차이를 반영하였다. 따라서 갯벌의 지형에 따른 파랑과 조류의 에너지 차이가 갯골의 횡단면인 수직적 형성에 크게 영향을 미침을 발견하였다. 이를 통해서 갯골의 횡단면 분석은 갯벌 형성에 미치는 에너지 차이 및 형성원리를 확인

할 수 있다는 결과를 얻었다.

본 연구는 다음과 같은 한계점이 있다. 첫째, 직접 퇴적물 분석을 실행하지 않아 퇴적물에 따른 분류를 정확히 하지 못했다. 퇴적물은 지형 및 조석과 파랑의 상대적 크기 및 육성기원의 퇴적환경 등을 반영하는 요소이기 때문에 갯벌의 지형적 분류에 따른 유형에도 추가적으로 보완되어야 할 내용이다. 따라서 추후 연구 시에는 퇴적물 분석에 따른 조금 더 세밀한 갯벌 특성의 분류가 필요할 것이다. 둘째, 자료 취득의 한계로 인하여 갯벌의 지형적 분류에 따른 유형별로 두 개 이상의 유역을 분석하지 못하였다. 따라서 우리나라 갯벌 유형에 모두 적용하기에는 한계가 있기 때문에 추후 연구 시에는 더 많은 지역의 자료를 획득하여 분석하고 일반화할 필요가 있을 것이다.

그럼에도 불구하고 본 연구는 다음의 의의가 있다. 첫째, 국내 지역을 대상으로 항공LiDAR를 이용하여 갯골을 분석한 최초의 시도로서 의의가 있다. 둘째, 위의 연구 자료와 관련하여 하구역을 제외하고 갯골의 횡단면 분석은 처음으로 시도되었다. 기존의 갯벌 및 갯골연구는 위성영상을 이용하였기 때문에 평면적인 분석에 그쳤다. 그러나 본 연구에서는 3차원 자료인 항공 LiDAR를 이용하여 평면뿐만 아니라 단면분석을 시도하였고, 위와 같은 의미 있는 결과를 얻어냈다. 둘째, 갯골을 갯벌의 지형적 분류에 따른 유형별 비교 분석을 실시하여 갯골을 접근하는 새로운 방향을 제시함에 의의가 있다. 기존 연구는 연구지역 하나의 단위별 갯골 분석만 있었고, 갯벌의 특성 또는 유형에 따른 갯골 비교 분석이 없었다.

이와 같은 의의에 따라 추후에 한계점을 보완한 지속적인 연구가 필요할 것이다.

## 참 고 문 헌

### <단행본>

- 고철환, 2000, 한국의 갯벌, 서울대학교출판부:서울
- 국토해양부, 2011, 연안습지 기초조사 -기본조사-
- 국토해양부, 2011, 연안습지 기초조사 -습지보호지역모니터링-
- 국토해양부, 2009, 연안습지 기초조사 -기본조사-
- 국토해양부, 2009, 연안습지 기초조사 -습지보호지역모니터링
- 한영환, 2008, 강원도 하천의 유역특성 분석, 강원발전연구원
- 해양수산부, 2005a, 갯벌 생태계조사 및 지속 가능한 이용방안 연구
- 해양수산부, 2005b, 우리나라 갯벌 -자연생태의 특성-, 시그마프레스
- IPCC, 2001, *Climate Change 2001: The Scientific Basis*
- Leopold, L.B., Wolman, M.G. and Miller, J.P., 1995, *Fluvial Processes in Geomorphology*, Dover Publications
- Mitsch, William J. and Gosselink, James G., 2007, *Wetlands(4th)*, John Wiley & Sons Inc
- Perillo, G.M.E and Eric Wolanski, 2009, *Coastal Wetlands: An Integrated Ecosystem Approach*, Elsevier Science
- Rodriguez-Iturbe and Rinaldo, 1997, *Fractal River Basins: Chance and Self-Organization*, Cambridge Univ. Press, New York.

### <학위논문>

- 김미령, 2003, “제주도 하천의 하계망 분석,” 제주대학교 석사학위논문
- 류상욱, 1998, “韓國 西南海岸 咸平灣의 堆積環境과 層序,” 전남대학교 박사학위논문

- 류주형, 2001, “원격탐사를 이용한 곰소만 조간대의 지형변화 및 퇴적물 특성 연구,” 연세대학교 박사학위논문
- 박의준, 1995, “강화도 염생습지 퇴적물에 관한 연구,” 서울대학교 석사학위논문
- 박의준, 2000, “순천만 염하구 퇴적과정의 시공간적 변이,” 서울대학교 박사학위논문
- 박정재, 1999a, “갯골퇴적물의 물리화학적 특성에 관한 연구: 순천만을 사례로,” 서울대학교 석사학위논문
- 엄진아, 2008, “고해상도 인공위성 영상과 프랙털 분석을 이용한 조간대 수로특성 연구,” 연세대 석사학위논문
- 이윤화, 2006, “한국 서·남해안의 갯벌 지형 연구,” 경북대학교 박사학위논문
- 장진호, 1995, “한국 서해안 곰소만 조간대의 퇴적작용,” 서울대학교 박사학위논문

#### <학술지 및 발표자료>

- 김남신 · 이민부, 2011, “함평만의 간석지 해안지형의 변화,” 한국지형학회지, 18(4), pp. 223-233
- 김성환, 2012, “한국의 지형학 연구 -해안지형 일반-,” 한국지형학회지, 19(1), pp. 1-15
- 류상옥 · 유환수 · 전승수, 1997, “한국 서해 남부 함평만 표층퇴적물의 분포 및 특성,” 한국지구과학회지, 18(5), pp. 367-378
- 류상옥 · 유환수 · 김민지 · 문병찬, 1998, “한국 서해 남부 함평만의 퇴적환경,” 한국지구과학회지, 19(3), pp. 343-353
- 류상옥 · 김주용 · 유환수, 2000, “반폐쇄된 무안만에서 부유물질의 계절적 변

- 동 및 운반양상,” 한국지구과학회지, 21(2), pp. 128~136
- 류상옥, 2003, “한반도 서해안과 남해안의 반폐쇄된 만에서 조간대 퇴적물의 계절변화에 관한 비교 연구: 서해안의 함평만과 남해안의 광양만,” 한국지구과학회지, 24(6), pp. 578-591
- 박동원 · 유근배, 1980, “천수만의 갯골 형태에 관한 계량적 분석,” 지리학, 제22호, pp. 1-9
- 박정재, 1999b, “갯골퇴적물의 물리화학적 특성에 관한 연구: 순천만을 사례로,” 지리학논총, 제33호, pp. 45-65
- 박의준, 2000, “해안습지 성장률의 공간적 특성에 관한 연구 -순천만 염하구 해안습지를 사례로-,” 한국지역지리학회지, 6(3), pp. 153-186
- 염진아 · 이윤경 · 유주형 · 원중선, 2007, “고해상도 위성 영상을 이용한 조류로의 프랙털 분석,” 대한원격탐사학회, 23(6), pp. 567-573
- 유주형 · 우한준 · 유홍룡 · 안유환, 2004, “EOC를 이용한 강화도 갯벌 조류로와 퇴적상과의 관계 연구,” 한국지형공간정보학회 학술발표자료집
- 이윤화 · 조화룡, 2005, “법성만 갯벌 퇴적물의 입도특성 분석,” 한국지형학회지, 12(1), pp. 63-76
- 장동호, 2011, “한국의 간석지 연구,” 한국지형학회지, 18(4), pp. 59-78
- Davies, J.L., 1964, A morphogenic approach to world shorelines, *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 8(127)
- \_\_\_\_\_, 1984, What is a wave-dominated coast?, *Marine Geology*, 60
- D'Alpaos, A., S. Lanzoni, M. Marani, S. Fagherazzi, and A. Rinaldo, 2005, Tidal network ontogeny: Channel initiation and early, *Journal of Geophysical Research*, 110
- Evans G., 1965, Intertidal flat sediments and their environments of deposition in the Wash, *Quarterly Journal of the Geological Society*,

121, pp. 209–240

Gravelius, H. 1914, *Flusshunde*, Berlin

Folk, R.L., and Ward, W.C., 1957, Brazos River Bar: A Study in the Significance of Grain Size Parameters, *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol.27, No.1, pp.3–26

French, J.R. and Stoddart, D.R., 1992, Hydrodynamics of salt marsh creek system: Implication for marsh morphological development and material exchange, *Earth Surface processes and landforms: the journal of British Geomorphological Research Group.*, 17(3), 235–252

Fagherazzi, S., A. Bortoluzzi, W. E. Dietrich, A. Adami, S. Lanzoni, M. Marani, and A. Rinaldo, 1999, Tidal networks1. Automatic networks preliminary scaling and features from digital terrain maps, *Water Resour. Res.*, 35(12), 3891–3904

Horton, R.E., 1945, Erosional development of streams and their drainage basin, *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), pp. 275–370

Lohani, B. and Mason, D.C. 2001, Application of airborne scanning laser altimetry to the study of tidal channel geomorphology, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56(2), 100–120

Lohani, B., Mason, D.C., T. R. Scott and B. Sreenivas, 2006, Extraction of tidal channel networks from aerial photo alone and combined with laser altimetry, *International Journal of Remote Sensing*, 27(1), 5–25

Myrick, M. and Leopold, L.B., 1963, Hydraulic Geometry of a Small

- Tidal Estuary, *Physiographic and hydraulic studies of rivers, Geological Survey professional paper*, B1–B18
- Montgomery and Dietrich, 1988, “Where do Channels Begin?,” *Nature*, 336(6196), pp. 232~234
- Par Mauricio MEURER, 2008, De l’hydro-écorégion au tronçon fluvial: recherche méthodologique, *Université Lumière Lyon 2, École Doctorale: Sciences Sociales*
- Reppert, R.T., Sigleo, W., Stakhiv, E., Messman, L. and Meyers, C.D., 1979, Wetland Values: Concepts and Methods for Wetlands Evaluation, *U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources*
- Rinaldo, A., Fagherazzi, S., Lanzoni, S., Marani, M. and Dietrich, W.E., 1999a, Tidal networks2. Watershed delineation and comparative network morphology, *Water Resour. Res.*, 35(12), 3905-3917
- Rinaldo, A., Fagherazzi, S., Lanzoni, S., Marani, M. and Dietrich, W.E., 1999b, Tidal networks3. Landscape-forming discharges and studies in empirical geomorphic relationships, *Water Resour. Res.*, 35(12), 3919-3929
- Scheidegger, A.E., 1965, The algebra of stream order numbers, *U.S. Geology Surv. Profess. Paper*, 525B, pp. B187-B189
- Shreve, R.L., 1966, Statistical law of stream numbers, *Journal of Geology*, 74(1), pp. 17-37
- Strahler, A.N., 1952, Hypsometric (area–altitude) analysis of erosional topography, *Geological Society of America Bulletin*, 63, pp. 1117-1142
- Strahler, A.N., 1957, Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology, *Transaction, American Geophysical Union*, 38(6)

- Stefanon, L., L. Carnielloa, A. D'Alpaos, and S. Lanzonia, 2010, Experimental analysis of tidal network growth and development, *Continental Shelf Research*, 30(8), 950-962
- Wallace, K.J., John C. Callaway and Joy B. Zedler, 2005, Evolution of Tidal Creek Networks in a High Sedimentation Environment: A 5-Year Experiment at Tijuana Estuary, California, *Estuaries*, 28(6), 795-811
- Woldenburg, M.J., 1966, Horton's laws justified in terms of allometric growth and steady states in open systems, *Geological Society of America Bulletin*, 77: 431-4
- Vlaswinkel, B.M., and Cantelli A., 2011, Geometric characteristics and evolution of a tidal channel network in experimental setting, *Earth Surface processes and landforms*, 36, 739-752

#### <인터넷 사이트>

국가수자원관리종합정보시스템 <http://www.wamis.go.kr/>

국립해양조사원 <http://www.khoa.go.kr/>

네이버지도 <http://map.naver.com/>

다음지도 <http://local.daum.net/>

<http://www.usgs.gov/>

<http://www.physics.unc.edu/>

<http://webhelp.esri.com/>

# Abstract

## A Tidal Channel and Creeks Analysis Using Airborne LiDAR

–Comparative Analysis on Tidal flat type–

Kim, Jeong soo

Department of Geography

Graduate School

Sungshin Women' s University

Tidal channels and creeks meander through tidal flats, controlling hydrodynamic. It transport not only nutrients and organic matter but also sediments, determining deposition facies of the tidal flats. Despite the importance of these tidal channels and creeks, study of tidal channels and creeks are few on the inside and outside of the country. Therefore, research subjects and research areas and research methods are limited.

In order to overcome such limitations, This study purposes quantitative analysis of the tidal channels and creeks geomorphology. Through the analysis of tidal channels and creeks order as well as cross-section on each order. Study area were selected the Yeonggwang-gun yeomsan-myeon, Gomso Bay, Hampyeong Bay outside and inside, classified according to geomorphology type of

tidal flat. For detail analysis of tidal channels and creeks, this study was using high-resolution aerial LiDAR data. Methods were used ESRI's ArcGIS 9.3.1 and within Extension ArcHydro Tool for data analysis.

The findings can be summarized as follows. First, channel networks were not affected by the type according to the geomorphological classification of the tidal flats. Rather, channel pattern and basin form as slope were affected. This result better shown such as linear or dendritic channels. Compared on rivers were similar. Second, cross-sectional analysis results reflect differences according to geomorphological classification of the tidal flats. Results were more distinct difference in the opening and inside on closed bay than semi-closed and outside on closed bay. Also similarities were also found, which to reflect the formation of a weak flow rate of the tidal flats.

Limitations of this study did not analyze the sediment analysis and did not analyze two or more basins by the type of tidal flats. But did comparison with the type of tidal flats by spatial characteristics, derived correlation from analysis. Also three-dimensional analysis of tidal channels and creeks using aerial LiDAR. This have significance as the first attempt.