태안군 황도교 건설에 따른 갯벌생태계 복원 영향평가

Evaluation of the Tidal-flat Ecosystem Restoration Effect on the Construction of Hwangdo Bridge in Taean

윤종주

충남연구원 기후변화대응연구센터

Jong-Joo Yoon

Climate Change Research Center, ChungNam Institute, Hongseong, Korea

Abstract

In 2011, a bridge was installed in Hwangdo, located in Taean-gun, Chungcheongnam-do, where seawater circulation was blocked for 30 years due to an inland dike. In this study, changes in the ecosystem of tidal-flats around the bridge were analyzed after the opening of the bridge(2011). To analyze the restoration effect, a survey of the marine environment around Hwangdo bridge was conducted and compared with the historical data before the restoration of Hwangdo bridge. After the construction of the bridge, the ecosystem of benthic community was changing due to the improvement of the tidal-flat environment around the bridge. The effect is manifested as a change of surface sediment grain-size in mudflat. The ratio of sand in the southern tidal-flats of Hwangdo bridge, which accounted for about 10 percent of the sand, has continued to increase since the sea-water circulation by the bridge. Due to the improvement of the tidal-flat environment, the number of species, habitat density, and biomass of the macrobenthos on the tidal-flat in Hwangdo is gradually increasing. The production of Manila clam(*Ruditapes philippinarum*) in the Hwangdo tidal-flat is also showing a steady increase. As the mudflat deposition environment, which had deteriorated due to the cutoff of sea-water circulation, has improved, more and more tourists are experiencing fishing activities such as manila clam digging. This shows that the effect of mudflat restoration due to seawater circulation continues. It is expected that the Hwangdo tidal-flat restoration project will be used as a success story in promoting similar tidal-flats restoration projects as sea-water circulation in the future.

Keywords : Hwangdo tidal-flat restoration, Sea-water circulation, Benthic community, Effect analysis, Hwangdo Bridge

1. 서론

갯벌은 연안생태계의 핵심구역이자 수산자원의 생태적 기반으로 연안지역 경제를 지탱하는 중요한 자연자본 중 하나이다. 우리나라 갯벌 면적은 총 2,487km²로 전체 국토면적의 2.5%에 이르며, 경제성장기인 1970년 이후부터는 농지 및 산업단지 조성을 위한 대규모 간척지 개발로 많은 갯벌이 매립되었다. 매립으로 인한 갯벌 훼손은 1978년부터 1998년까지 집중적으로 이루어졌으며, 1987년 이후 상실된 갯벌 면적은 810.5km²에 이른다. 지역별로는 경기 341km², 전북 208km², 충남 130km², 전남 125km², 경남 6.5km² 순으로 나타난다(KHOA, 2013). 그러나 매립으로 인한 환경생태적 부작용 발생 및 염해 피해 등이 일부에서 지속되고 있다. 특히 농지, 염전 등으로서의 활용성이 떨어지는 공간에 대한 갯벌 복원 사업은 서남해안을 중심으로 다양하게 추진되고 있다. 갯벌의 공간복원은 해양생물의 산란 및 부양공간을

확보할 수 있도록 하여, 연안지역의 생태적 생산성 확대를 통한 어촌경제 활력을 기대할 수 있다.

충남 태안군에 위치한 황도에는 2011년 12월 태안군 안면도와 황도를 연결하는 연륙제방을 철거하고, 해수유통이 가능한 연륙교를 건설하였다(Fig. 1). 황도교 개통 후, 황도 연륙교 주변 갯벌을 중심으로 황도교 해수유통에 따른 해양환경 개선 효과가 수산물 생산성 확대에 나타났다.

갯벌 복원사업의 직접적인 체감효과는 황도 주민들의 바지락 생산량 증가세로 나타나고 있다. 황도 연륙제방으로 해수소통이 단절되어 악화된 갯벌 퇴적환경이 개선되었기 때문에 평가된다. 갯벌 생태자원 증가에 따라 바지락 캐기 등 어촌활동 체험 관광객도 증가세에 있어 갯벌 복원의 효과는 지역 어촌의 경제 활성화에도 도움이 되고 있다. 그러나 갯벌 복원사업의 효과를 정량적으로 분석하여 평가하기 위한 연구·조사가 이루어지지 않아, 사업 효과를 검증하는데 한계가 있었다.

Fig. 1. Comparison before and after the opening of Hwangdo Bridge

본 연구에서는 2011년 황도교 개통 이후, 황도교를 통한 해수의 원활한 흐름 재개가 인접 해역의 갯벌생태계에 미치는 영향을 직접 조사하여 평가하였다. 이를 통해 갯벌 복원사업 시행 전·후, 황도 갯벌의 생태환경 변화를 비교하고, 사업의 효과를 정량적으로 분석하였다. 이를 위하여 당해 지역의 과거 해양환경 파악을 위해 기존문헌 자료를 분석하고, 현장 탐문조사를 실시하였다. 그리고 황도 주변의 해양환경 및 갯벌생태계 변화에 대한 현장조사를 진행하였다. 현장조사는 수질, 퇴적물, 저서생물에 대하여 복원대상지 주변 공간으로 구분하여 진행하였다. 이를 통해 황도 갯벌 복원사업 추진 후, 현재의 갯벌 생태특성을 파악하도록 하였다. 그리고 과거 자료와의 비교를 통하여 사업 추진 후의 갯벌생태계 변화를 함께 분석하도록 하였다. 본 연구에서의 해수유통형 갯벌 복원사업의 추진 효과 분석을 통해 향후 유사한 갯벌 복원사업 추진에 있어서 체계적인 방향 설정 및 계획수립의 근거를 마련하고자 하였다.

2. 황도 갯벌복원(연륙교 개통) 전후 선행연구

2.1 선행연구 검토

육지와 가까운 섬을 연결하는 연륙교가 과거에는 제방의 형태로 건설된 사례가 많았다. 이러한 연륙제방의 경우, 시공이 간단하였으나 해수의 유통을 단절시켜 제방 주변의 퇴적환경 변화를 초래하였다. 결과적으로 제방 주변 갯벌생태계 건강성 저하의 주요 원인이 되었다. 때문에 연륙제방을 철거하고 해수유통이 가능한 교량 형태의 연륙교를 설치하는 갯벌 복원사업이 황도를 비롯하여 국내에서도 그 사례를 찾아볼 수 있는데, 강화군 동검도 연륙교(2014~2016), 경남 사천시 비토섬 제방 교량화(2010~2012) 사업이 대표적이다. 그러나 이러한 사업 이후에, 사후 모니터링에 의한 체계적인 사업 효과성 평가는 이루어지지 않았다. 관련 국내 연구로는 갯벌 복원사업이 대규모로 이루어진 순천만에서 Shin *et al.*(2019), Cha *et al.*(2019)가 복원사업 효과평가를

위한 갯벌생태계 조사를 수행하였으며, Park and Lee(2018)의 복원사업의 경제적 가치평가 연구가 있었다. 이외에 갯벌 복원사업의 생태적 목표설정연구(Lee *et al.*, 2017), 복원 추진체계 구축(Nam *et al.*, 2015) 등의 연구사례가 있었다.

2.2 과거(황도 연륙교 개통 전후) 주변 해양환경조사

황도 연륙교 개통에 따른 해양환경 변화를 살펴보기 위하여, 연륙교 개통 전후의 황도 주변 해양조사 선행연구 자료를 살펴보았다. 해양수질은 2010~2011년 2년간 황도 주변을 조사한 박승운 등(2012)의 연구와 태안해안국립공원 해양수질을 측정한 Korea National Park Service(2014, 2016)의 연구가 있었다. 해양퇴적물은 Choi *et al.*(2005)의 연구사례가 있으며, MLTMA(2010)의 연안습지 기초조사, MOF and KOEM(2015, 2017)의 국가해양생태계 종합조사에서는 황도갯벌 퇴적물 및 갯벌 저서동물 조사 사례가 있었다. 황도 연륙교 개통에 따른 시공간적 해양환경 변동 특성 분석을 위해 이러한 선행연구 결과를 활용하였다.

3. 현장조사 및 결과

3.1 조사 항목

본 연구에서는 황도 주변 해역을 4개 구역으로 나누어 공간적으로 구분하였다(Fig. 2). I 구역은 황도 남동쪽 구역이며, II 구역은 황도 북동쪽, III 구역은 황도 북서쪽, IV 구역은 황도의 남서쪽 구역에 해당된다. I 구역은 황도의 남동쪽에 있는 구역으로 바지락 양식장을 중심으로 넓은 바지락 서식처가 분포하고 있다. II 구역은 황도의 북동쪽에 위치하며, 바지락 체험장과 바지락 양식장이 함께 위치하고 있다. III 구역은 황도의 북서쪽에 위치하는 구역으로 황도교 북쪽에 속한다. 안면도 측 갯벌을 중심으로 바지락 채취구역이 일부 분포한다. IV 구역은 황도의 남서쪽에 위치하며, 황도교 남쪽 구역에 속한다. I·II 구역은 갯벌생산성이 매우 높은 구역으로 주민들의 바지락 채취가 활발

한 곳이다. 이에 반해 III·IV 구역은 30년간의 해수유통 단절로 인해 I·II 구역에 비해 퇴적상이 다르며, 이로 인해 갯벌저서생물 생육환경이 다소 떨어지는 특징이 있다.

황도 주변 해양환경조사는 해양수질, 갯벌퇴적물, 갯벌저서동물 및 패류자원으로 구분하여, Fig. 2에 제시된 정점에서 2018년 5월과 7월에 각각 2회 실시하였다. 시료의 채취, 전처리와 분석은 해양환경공정시험기준에 따라 수행하였다(MOF, 2013). 해수, 해저퇴적물, 갯벌 저서생물에 대한 세부 조사항목은 Table 1에 제시한 바와 같다.

3.2 해수수질 분석 결과

2018년 황도 주변 해수 상태를 나타내기 위하여 생태기반 해수수질기준인 Water Quality Index(이하 WQI, 수질평가지수)를 산출하여 분석하였다. WQI는 해수수질 평가에 따라 1(매우 좋음)등급부터 5(아주 나쁨)등급까지 구분되며, 저층 산소포화도·식물플랑크톤 농도·투명도·용존무기질소·용존무기인 각 항목에 따라 산출된다(MOF, 2013). WQI를 살펴보면, 5월에 2등급(좋음)부터 4등급(나쁨), 7월에 3

등급(보통)부터 5등급(아주 나쁨)까지 나타났다. 공간적으로는 5월과 7월 모두 III 구역과 IV 구역에서 다소 수질이 떨어지는 것으로 나타났다(Fig. 3). 하계(7월)의 수질이 다소 악화된 것은 여름철 수온상승에 의한 식물플랑크톤 증식, 저층 용존산소 감소 등의 영향을 받은 것으로 나타났다. 특히, 7월에는 강우량 증가에 따라 황도 북측에 있는 대형 담수호인 부남호의 방류수도 황도의 해양수질에 영향을 주었다. 해수 내 미량금속은 5월·7월 조사 및 공간적(4개 정점) 구분으로도 해양생태계 보호기준 이하 수준으로 모두 분포하여, 전반적으로 양호한 수준을 보였다.

3.3 해저퇴적물 분석 결과

I 구역(황도 바지락 체험장), II 구역(바지락 양식장), III 구역(연륙교 북쪽)에서 모래(자갈 포함)의 함량(63.8~87.5%)이 펄(실트 포함)의 함량(12.5~36.2%)보다 높게, IV 구역(연륙교 남쪽)은 펄의 함량(50.4~60.6%)이 모래의 함량(39.4~49.6%)보다 다소 높게 조사되었다(Fig. 4). 특히 IV 구역은 다른 구역의 모래갯벌 특성에 비해 펄의 함량이 높은 혼성갯벌의 특성이 나타났다. 이는 30년간 해수유통이 차단되면서 유속이 작아진 IV 구역 갯벌 주변으로 펄이 많이 유입된 결과로 분석된다. 현재 IV 구역 갯벌의 퇴적환경이 해수유통 재개로 인해 변화 중인 것으로 분석되었는데, 이는 과거 퇴적물 자료와의 비교를 통해 살펴보았다.

Fig. 2. Survey points and survey items of marine environment around Hwangdo Island

* WQI : 1등급(매우 좋음), 2등급(좋음), 3등급(보통), 4등급(나쁨), 5등급(매우나쁨)

Fig. 3. Results of water quality analysis around Hwangdo

Table 1. Marine environment analysis items around Hwangdo

Category		Analysis item	Zone
Sea Water (top & bottom)	General item (15)	Temperature · Salinity, pH, DO, TN, DIN(NO ₂ -N, NH ₄ -N, NO ₃ -N), COD, TP, DIP(PO ₄ -P), SIO ₂ -SI, Transparency, SPM, Chlorophyll-a	4 Zones
	Trace metals (8)	Cu, Pb, Cd, Zn, Cr, As, Hg, CN	
Bed Sediment	General item (7)	Grain size, Ignition loss, water content, sulfide, COD, elementary analysis(TOC, TN)	
	Heavy metals (11)	Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, As, Ni, Al, Hg, Li, Fe	
Mudflat life	Zoobenthos	Species composition, Number of species appearing, Biomass, Dominant species, Habitat density, Community, MDS	
	Shellfish	Characteristics of objects (Full weight, Condition index-fatness, Shell length, Shell height, Shell width), Habitat density

Fig. 4. Analysis of tidal-flats sediments around Hwangdo

해저퇴적물 유기물 오염지수인 화학적산소요구량(COD, 기준치: 20mg/g)은 2.2~8.0mg/g, 강열감량(IL)은 2.2~4.3%, 산화발성황화물(AVS, 기준치: 0.2mg/g)은 0~0.01mg/g로 분석되었는데, 이는 모든 조사 정점에서 환경 기준치 이하를 의미한다. 즉, 해저퇴적물 내의 유기물 오염도가 낮은 상태인 것을 보여준다. 해양퇴적물 내 탄소 대 질소비(C/N 비)는 퇴적물에 포함된 유기물 기원의 규명에 많이 사용되는데, C/N 비가 12 이상의 경우 육상 기원 유기물 우세(Greaves and Schwartz, 1952), 6~9까지는 식물플랑크톤 기여 범위(Holligan et al., 1984), 5~12 범위의 C/N 비는 해양기원의 유기물 우세를 의미한다(Stein, 1991). 황도 갯벌퇴적물 내 C/N 비는 춘계(5월)에 10.5~18.1, 하계(7월)에 15.2~22.2 범위로, 전반적으로 10 이상으로 나타나 퇴적물 내 유기물이 육상 기원(인근 대형 담수호인 부남호, 간월호) 기여도가 높은 것으로 분석되었다. 이는 갯벌퇴적물 내 유기물의 양적(농도)인 오염도는 양호한 수준이나, 질적으로는 육상 기원의 유기물 기여도가 높다는 것으로 보여준다. 즉, 황도 갯벌퇴적물은 대형 담수호의 방류에 따른 육상 오염원의 영향을 받고 있는 것이다. 다만 퇴적물 내 중금속 분포는 대부분 중금속에서 국내 해양환경기준(MOF, 2011)을 하회하는 것으로 나타났는데, 주변에 퇴적물 중금속 오염원이 없기 때문으로 분석되었다.

Fig. 5. Classification of tidal-flat organisms according to the marine environment

3.4 해양생물 분석 결과

황도 갯벌에서 수행된 2018년 춘계와 하계 조사 결과를 바탕으로 저서동물 군집의 시·공간적인 변동 특성을 살펴 보았다. 출현종수의 경우, 전체 평균은 23 종/0.1 m²이며, 춘계(27 종/0.1 m²)가 하계(20 종/0.1 m²)보다 상대적으로 높은 종수를 보였다. 정점별로 살펴보면, 대부분 춘계가 하계보다 높은 계절성을 보였으며, 정점들 중 III 구역이 가장 높고 I 구역과 IV 구역이 낮은 수준을 보였다. 서식밀도의 경우, 전체 평균은 1,710 개체/m²이며, 춘계(1,985 개체/m²)가 하계(1,435 개체/m²)보다 상대적으로 높은 서식밀도를 보였다. 생체량의 경우, 전체 평균은 1,087.95 g/m²이며, 춘계(1,547.57 g/m²)가 하계(628.33 g/m²)보다 상대적으로 높은 생체량을 보였다. 생물다양성은 5월과 7월에서 비슷한 경향을 보였다. 서식밀도에서는 환경동물이, 생체량에서는 연체동물(패류)의 기여가 큰 것으로 나타났다. 황도 주변 해역의 저서동물 군집은 계절적인 요인보다 지리적 차이에 따라 군집 구조가 차이가 나고 있으며, 특히 퇴적물 유형에 따라(조립질, 혼합 및 세립질 퇴적물) 군집 분포가 결정된 것으로 나타났다. 대형저서동물의 군집분포를 공간적으로 구분하면 크게 두 공간 집단(A, B 그룹)으로 구분이 되는데, A 그룹(IV 구역)과 B 그룹(I · II · III 구역)으로 나뉜다(Fig. 5).

A 그룹 지역에서는 동다리(갯고둥)류가 우점하며 상업패류가 서식하지 않는데 반해, B 그룹 지역에서는 바지락 등 상업패류가 우점하고 있어, 두 지역 간의 차이가 뚜렷하게 나타났다. 다만 A 그룹과 B 그룹 지역 사이에 가무락 서식지가 분포하고 있었는데, 향후 A 그룹 갯벌의 저질환경이 개선된다면 가무락조개의 서식지 확대도 가능할 것으로 예상된다. 2018년 조사결과(Fig. 6)를 보면 IV 구역은 저서동물의 출현종수, 서식밀도, 생체량은 타구역(I · II · III 구역)에 비해 상대적으로 낮은 특성을 보여주고 있었다. 이는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 IV 구역의 갯벌퇴적물 특성이 다른 구역과 큰 차이를 보이고 있기 때문이다. 패류 자원(바

Fig. 6. Temporal and spatial distribution of the Macrobenthos Community Structure in 2018

Fig. 7. Temporal and spatial distribution of the biomass of shellfish(Manila clam) in 2018

지락) 분포 조사결과(Fig. 7)에서는 대부분 갯벌에서 바지락이 다량 분포(우점)하였으나, IV 구역에서만 바지락이 발견되지 않았다. 바지락 우점지역인(I · II · III 구역)에서는 서식밀도 5월(118 개체)과 7월(89 개체), 비만도 5월(0.79)과 7월(0.71), 각장 5월(34.12mm)과 7월(29.95mm), 전중량 5월(8.03g)과 7월(6.50g)의 분포 특성이 나타났으며, 모든 지표

에서 7월보다 5월에서 높게 나타났다. 이는 6~7월 산란기를 지나며 생체량이 줄어드는 바지락의 생리·생태적 특성이 반영된 것으로 분석된다.

I~IV 구역의 공간 비교조사를 통해 확인할 수 있는 점은 IV 구역만이 모래의 비율이 40~50% 정도인 혼성갯벌이며, 나머지 구역은 모래갯벌(모래 비율 70% 이상)의 특성인 점

이다. 이러한 갯벌퇴적물 입도특성에 따라 갯벌저서생물의 분포 특성 차이가 나고 있었다.

4. 황도 연륙교 건설 전후 해양환경 변화 분석

1982년 황도에는 육지로의 이동 수단 확보를 위해 해수의 흐름을 막는 연륙제방을 건설하였는데, 이후 해양환경 문제가 꾸준히 제기되었다. 이를 해결하고자 기존 연륙제방을 철거하고, 자유로운 해수유통이 가능한 교량으로 교체(2011년 12월)된 것이다. 유사한 사례로 경기도 안산시와 화성시 사이에 위치한 시화호의 경우도 해수를 막는 연륙제방을 건설한 이후에 저서환경의 유기물 오염물질 농도가 급격히 증가하였다. 또한 빈산소 수괴가 빈번히 출현함에 따라, 저서생태계가 점차 악화되어 무생물 상태까지 이르렀다. 그러나 이후에 해수 유통량을 증가시킨 결과, 저서환경이 크게 개선되며 점차 인근 해역의 저서생물상과 유사해지는 효과를 가져왔다.

4.1 황도 연륙교 건설 전후의 해양수질 변화

황도 연륙교 건설 전·후의 해양수질 변화를 생태기반 해수수질 평가지수(WQI)를 통해 살펴보았다(Fig. 8). 황도 연륙교 건설 전 선행연구 결과를 보면 WQI 지수가 모든 구역에서 3등급(보통)부터 5등급(매우 나쁨)까지 편차가 나타나고 있다. 다만 IV 구역은 선행조사 연구사례가 없어 비교에서 제외하였다.

황도 연륙교 건설 이후의 2014년, 2016년 조사에서는 모든 구역에서 2등급(좋음)~3등급(보통)을 보였다. 연륙교 건설 전·후의 황도 주변 수질을 비교해보면, 비슷하거나 일

부 개선된 결과가 나타났다. 하지만 2018년 수질 결과는 황도교 개통 직후보다 다소 나빠진 것으로 나타났는데, 당해년도 조사 시기에 부남호 등 주변 담수호의 고농도 유기물이 포함된 방류영향을 일시적으로 받은 것으로 분석되었다.

4.2 황도 연륙교 건설 전후의 갯벌퇴적물 변화

연륙교 건설 전·후의 퇴적물 변화를 입도분석을 통하여, 그 변화 특성을 비교하였다(Fig. 9). 연륙교 건설 전의 선행연구에서는 I 구역에서 모래 함량이 67.0~73.7%, 펄의 함량은 26.3~33.0%까지 분포했었다. II 구역은 모래 함량이 51.6~56.9%, 펄의 함량이 43.1~48.2%였다. III 구역은 모래 함량이 43.7%, 펄 함량은 56.3%였다. IV 구역에서는 모래 함량 10.7%이고, 펄 함량은 89.3% 정도였다. 연륙교 건설 이후(2015, 2017, 2018년) 연구를 보면 I 구역에서는 모래 함량이 59.9~81.1%, 펄 함량이 18.9~40.1%였다. II 구역에서는 모래 함량이 86.5%, 펄 함량은 13.5%였다. III 구역에서는 모래 함량이 69.4%, 펄 함량은 30.6%였다. IV 구역에서는 모래 함량이 44.5%, 펄 함량은 55.5%였다.

모든 구역에서 연륙교 건설 이후 갯벌퇴적물 내 모래의 비율이 늘어나고 있는 것으로 나타났으며, 이는 황도 갯벌의 주요 소득원인 바지락의 생장 환경에 유리하게 작용하고 있었다. 특히 IV 구역 조사지점에서 연륙교 건설 이후에 퇴적물 입도 변화가 크게 나타나고 있었다. 즉, 모래 입자의 비율이 연륙교 개통 후 IV 구역에 늘어났는데, 해수유통으로 빨라진 유속에 의해 쌓였던 펄이 상당부분 이동한 것으로 판단된다. IV 구역은 연륙교의 영향을 가장 크게 받는 지역이다. 연륙교 건설 전 연륙제방으로 막혀있어 조류의 흐름이 저하되고 펄 침전 등에 의해 펄 갯벌화되어 바지락

Fig. 8. Changes in marine water quality (WQI) before and after opening of Hwangdo Bridge

이 사라지고 갯지렁이가 우점했던 곳이었다. 이곳은 연륙교 개통전 모래함량 10.7%에서 개통후 44.5% 수준으로 모래 함량이 대폭 증가하였다. 이는 해수유통 단절 후, 펄이 지속적으로 쌓여왔던 IV 구역 갯벌의 퇴적환경이 원상태로 변화하고 있는 단계라는 것을 보여주는 것이다. 즉, 갯벌복원의 효과를 정량적으로 입증하는 것으로, IV 구역 갯벌의 모래 함량 변화분석을 위한 지속적인 추적 조사가 필요하다.

4.3 황도 연륙교 건설 전후의 저서생물상 변화

연도별 저서동물의 변화를 비교하기 위한 선행연구를 살펴보면, 황도 연륙교 건설 전·후 저서동물조사(2010, 2015, 2017년)는 I 구역 갯벌에 한해 수행되었다. 이에 따라 I 구역의 저서생물 변화를 비교분석하였다(Fig. 10).

황도 연륙교 건설 이전(2010년)의 출현 종수(종수/㎡), 저서동물의 우점종을 살펴보면 환형동물(지렁이 등 다모류),

연체동물(바지락 등 복족류), 절지동물(게 등 갑각류) 순으로 우점하였다. 출현종수는 8종/㎡, 서식밀도는 436개체/㎡였으며, 생체량은 129g/㎡였다. 한편 연륙교 건설 이후(2015, 2017, 2018년) 출현 종수, 저서동물의 우점종을 살펴보면 환형동물, 연체동물, 절지동물 순으로 과거와 유사한 우점 형태를 보였으나, 생산성 측면에서는 출현종수 17~21종/㎡, 서식밀도 770~1750개체/㎡, 생체량 147~1887g/㎡ 정도로 큰 변화가 나타났다. 즉, 연륙교 건설 이후 저서동물 출현 종수가 크게 늘어났으며, 서식밀도와 생체량 역시 연륙교 개통 전에 비해 지속적인 증가세에 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 추가로 황도 주민들에 있어서 갯벌복원 효과의 직접적인 지표가 될 수 있는 바지락 생산량을 황도 연륙교 건설 전후로 비교하였다. 해수유통 전(2009~2011년)에는 연평균 133톤의 생산량을 보였으나, 해수유통 후(2012~2017년)에는 연평균 194톤의 생산량을 기록하였다. 즉, 해수유

Fig. 9. Changes in sediment grain-size before and after opening of Hwangdo Bridge

Fig. 10. Macrobenthos changes before and after opening of Hwangdo Bridge

통 이후 61톤/년의 바지락 평균생산량 증가세를 나타나고 있는 것이다(Fig. 11). 같은 시기에 태안군 전체의 바지락 생산량은 완만한 감소추세를 보인 것과는 대조적인 결과이다. 이를 통해 황도 연륙교 건설에 따른 해수유통 재개가 바지락의 생산환경에 긍정적인 작용을 한 것을 알 수 있는데, 갯벌퇴적상의 변화(모래함량 증가)와 바지락 유생의 이동 경로 확대에 따른 결과로 구분될 수 있다. 다만 2011, 2014년도에는 황도의 바지락 생산량이 크게 줄어든 것을 보여주고 있는데, 이는 태풍 등 기상요인, 기생충 감염(폐킨수스), 겨울철 한파 및 여름철 고수온의 복합적 원인이 작용한 것으로 보인다. 이상의 변화분석 결과, 황도교 복원(연륙제방→교량)에 따른 해수유통 증가는 황도 주변 갯벌환경을 개선시키고 저서동물 군집 건강성을 높이는 긍정적인 효과를 보여준 것으로 평가할 수 있다.

4.4 갯벌생태계 복원효과 주민 설문조사

황도교 개통에 따른 갯벌생태계 복원 효과의 인식도를 분석하기 위하여 황도 주민을 대상으로 한 설문조사를 실시하였다. 설문조사는 어업에 종사하는 주민 27명을 대상으로 실시하였다. 설문지를 통한 1:1 개별면담 방식으로 진행하였다. 주요 항목은 조사자 일반항목, 연륙제방으로 인한 문제점, 갯벌생태계 회복여부 판단 및 회복이유, 복원 전후 주요 생산 어종 변화, 향후 황도갯벌의 위협요인 등으로 구성하였다(Fig. 12).

응답자의 85%가 60대 이상이였으며, 황도 평균 거주기간은 30년 이상으로 조사되었다. 해수유통 단절의 원인인 연륙제방으로 인한 문제점으로는 유속감소, 펄의 퇴적, 어족 자원 감소 순으로 나타났다. 66%의 응답자가 황도교 건설이 수산자원 회복에 도움이 되었다고 답하였으며, 56%의

Fig. 11. Comparison of changes in Manila clam production by year (Taean-county and Hwangdo)

Fig. 12. Results of Resident Survey

응답자가 바닷물의 흐름회복을 어족자원 회복의 이유라고 답하였다. 또한 농어, 감성돔, 망둥어 등 1982년 연륙제방 건설 이전에 많이 잡히던 수산자원이 황도 연륙교 건설 이후 다시 잡히고 있다는 의견이 많았다. 향후 황도갯벌의 위 협요인으로서는 68%의 응답자가 부남호와 간월호로부터의 오염수 대량방류 영향으로 답하여, 이에 대한 정책 대응이 반드시 필요한 것으로 나타났다. 설문조사 결과, 전체 응답자의 2/3가 황도교 개통의 갯벌복원 효과가 있다고 답하여, 복원사업에 대한 지역주민의 효과 체감 및 인식도는 매우 높은 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 황도 연륙교 건설(2011년 11월)에 따른 해수유통 효과가 인접한 황도 갯벌 생태계에 미치는 영향에 대해 정량적으로 평가하였다. 이를 통해 사업 시행 전·후, 해양환경 변화 및 저서생태계의 개선 효과를 살펴보았다. 본 연구의 결과, 충남 태안군 황도 연륙교 개통으로 인한 주변 갯벌의 생산성이 매우 크게 향상된 것으로 분석되었다. 과거 1982년 육지이동 목적으로 건설된 황도 연륙제방 건설은 해수의 소통을 차단함으로써, 제방 주변 갯벌로의 영양염류 유입 감소, 퇴적상 변화(죽빨화), 저서생태계 악화가 유발되었다. 해수유통 단절 후, 황도교 남측 갯벌(Ⅳ 구역)은 필이 많아져 바지락 등 패류가 살 수 없는 환경으로 변화되었다. 그러나 황도 연륙교 건설 후(2011년), 원활한 해수유통에 의한 갯벌 퇴적상 회복으로 갯벌 저서환경(특히 죽빨)의 개선이 나타나고 있다. 특히 황도교 남측에서의 빨 함량이 줄어드는 등 갯벌환경이 빠르게 개선되고 있으며, 황도교 주변 다른 지역의 퇴적물 입도분포와 점진적으로 유사한 형태로 변화추세가 나타나고 있었다. 이러한 추세는 황도 갯벌의 주요 생산 어종인 바지락 및 가무락 등의 생장환경에 유리하게 변화하고 있는 것을 알 수 있었다. 과거 자료와의 비교에서도 2011년 황도 연륙교 개통 이후, 저서동물의 출현종수, 서식밀도, 생체량 등 주요한 지표에서 완만한 증가가 지속되는 경향이 나타나고 있었다. 황도의 주요 어업생산물인 바지락의 연평균 생산량 역시 황도 연륙교 개통 이후 완만한 증가추세를 보이는 것으로 분석되었다.

이를 종합해 보면 태안 황도교 건설에 따른 갯벌생태계 복원 효과가 뚜렷이 나타나는 것을 정량적으로 확인할 수 있다. 이는 황도교 주변 갯벌의 환경 개선과 더불어 황도 바지락 생산량 및 어촌체형 활동이 급격히 늘어나는 긍정적인 효과를 유발하였다. 특히 사업의 효과를 지역 주민이 직접 체감함과 동시에 지역주민의 소득증대에 연계되는 정책적 시너지가 나타났다는 점에 주목할 필요가 있다. 황도 갯벌복원 사례는 향후 비슷한 유형의 해수소통형 갯벌복원 사업의 추진에 있어 중요한 시범사례가 될 수 있을 것으로 본다.

감사의 글

본 논문은 2018년 충청남도의 재원으로 수행된 황도 갯벌 생태계 모니터링 연구 사업 및 2020년 KMI Sea-Grant 사업의 일환으로 진행된 연구이다.

References

- Cha, S. S., Koh, Y. K., Lee, Y. G., Choi, J. M., Kim, H. G. and Oh, K. H. (2019). "Sedimentary Environments and Geochemical Characteristics of Suncheon Bay before the Restoration of Tidal Flat -Focused on Jangsan District-." *The Journal of Korean Island*, Vol. 31, No. 1, pp. 133-148 (in Korean).
- Choi, S. H., Kim, S. L., Wu, H. J., Choi, J. W. and Yu, J. H. (2005). "Sedimentary Environments in the Hwangdo Tidal Flat, Cheonsu Bay." *Journal of Korean Wetlands Society*, Vol. 7, No. 2, pp. 53-67 (in Korean).
- Greaves, C. and Schwartz, H. (1952). "The chemical utilization of wood." Department of Resource Development, Forest Branch, Ottawa, 28.
- Holligan, P. M., Harris, R. P., Newell, R. C., Harbour, D. S., Head, R. N., Linley, E. A. S., Lucas, M. I., Tranter, P. R. G. and Weekley, C. M. (1984). "Vertical distribution and partitioning of organic carbon In mixed, frontal and stratified waters of the English Channel." *Marine Ecology-Progress*, Vol. 14, pp. 111-127.
- Korea Hydrographic and Oceanographic Agency(KHOA). (2013). *Survey on the area of mudflats in Korea* (in Korean).
- Korea National Park Service. (2014). *A Report on the Measurement Network of Marine Environment Change in Taean Coast National Park* (in Korean).
- Korea National Park Service. (2016). *A Report on the Measurement Network of Marine Environment Change in Taean Coast National Park* (in Korean).
- Lee, S. M., Lee, D. J. and Seo, J. H. (2017). "Setting Ecological Goals and Success Criteria Items for Ecological Restoration Projects : Focusing on the Coastal Restoration Projects." *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, Vol. 20, No. 1, pp. 12-17 (in Korean).
- Nam, J. H., Son, K. H. and Khim, J. S. (2015). "Multiple Implications of the Restoration of Coastal Wetland Ecosystem and the Establishment of a Strategic Restoration Framework." *Ocean and Polar Research*, Vol. 37, No. 3, pp. 211-223 (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(MLTMA). (2010). *Basic survey of coastal wetlands*.
- Ministry of Oceans and Fisheries(MOF). (2011). "Marine Environment Standards in Korea." MOF, Seoul (in Korean).
- Ministry of Oceans and Fisheries(MOF). (2013). "Korean Standard

- Analytical Method for Marine Environment.*” MOF, Seoul (in Korean).
- Ministry of Oceans and Fisheries(MOF) and Korea Marine Environment Management Cooperation(KOEM). (2015). “*National investigation of marine ecosystem protocol.*” MOF and KOEM, Seoul (in Korean).
- Ministry of Oceans and Fisheries(MOF) and Korea Marine Environment Management Cooperation(KOEM). (2017). “*National investigation of marine ecosystem protocol.*” MOF and KOEM, Seoul (in Korean).
- Park, N. A. and Lee, S. M. (2018). “The Eco-economical Evaluation of Tidal Flat Restoration in Suncheon Bay.” *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, Vol. 21, No. 2, pp. 47-56 (in Korean).
- Park, S. Y., Heo, S., Yu, J., Hwang, U. K., Park, J. S., Lee, S. M. and Kim, C. M. (2013). “Temporal and Spatial Variations of Water Quality in the Cheonsu Bay of Yellow Sea, Korea.” *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 19, No. 5, pp. 439-458 (in Korean).
- Shin, S. E., Yoo, H. B., Cha, S. S., Choi, J. M., Oh, K. H. and Koh, Y. K. (2019). “Water Quality Environment of Suncheon Bay before the Restoration of Tidal Flat -Focused on Jangsan District-.” *The Journal of Korean Island*, Vol. 31, No. 1, pp. 133-148 (in Korean).
- Stein, R. (1991). “*Accumulation of Organic Carbon in Marine Sediments.*” Springer Verlag, Berlin, pp. 1-217.