

Article

<https://doi.org/10.7850/jkso.2017.22.4.172>
pISSN : 1226-2978

하구둑이 낙동강 하구 표층 퇴적물 생규소(BSi) 분포에 미치는 영향

김윤지 · 안순모*
부산대학교 해양학과

The Impact of Nakdong Estuarine Barrage on Distribution of Biogenic Silica (BSi) in Surface Sediment

YUNJI KIM AND SOONMO AN*

Department of Oceanography, Pusan National University, Busan 46241, Korea

*Corresponding author: sman@pusan.ac.kr

Editor Kyung-Hoon Shin

Received 13 July 2016; Revised 20 September 2016; Accepted 11 December 2016

ABSTRACT

본 연구는 하구둑으로 인한 육상으로 부터의 규소(Si) 플럭스의 변화가 하구 및 연안생태계에 미치는 영향을 알아보기 위한 사전연구로, 하구둑이 존재하지 않는 섬진강 하구와 하구둑이 존재하는 낙동강 하구 표층퇴적물 및 퇴적물 코어 분석을 통해 하구둑이 입도와 유기물, 그리고 BSi 분포에 어떠한 영향을 미쳤는지 알아보았다. 2014년 11월과 2015년 3월 낙동강과 섬진강 표층 퇴적물의 입도, 유기물, BSi 분포를 조사하였고, 퇴적물 코어를 이용하여 낙동강 하구둑 건설 전 후의 퇴적상의 변화를 알아보았다. 전반적으로 BSi 농도 변화는 퇴적환경에 따른 입도 변화와 좋은 상관관계를 보였다. 자연하구인 섬진강 하구 표층 퇴적물은 상류에서 하류로 갈수록 니질(실트질과 점토질), 유기물, BSi 함량이 점진적으로 증가하였으며, 특히 조석의 영향이 미치는 중부하구 정점부터 그 변화가 뚜렷하게 나타났다. 낙동강 하구 표층 퇴적물은 하구둑을 기준으로 내측과 외측의 입도와 유기물 분포가 뚜렷한 차이를 보였다. 하구둑 내측은 정점 간 차이가 크지 않았으나, 우안배수문 내측은 높은 니질, 유기물, BSi 함량을 보여 하구둑에 의한 물질 정체 현상이 두드러지게 나타났다. 하구둑 외측은 전체적으로 사주 쪽으로 갈수록 표층 퇴적물 내 니질과 유기물, BSi 함량이 감소하는 경향을 보였다. 낙동강 퇴적물 코어 분석 결과, 하구둑 건설 이후 입도와 유기물, BSi 함량이 급격히 감소하였으며, 대규모 공사에 의한 퇴적물 교란 및 하구둑에 의한 물질 유입량 감소가 원인으로 보인다. 우안배수문 인근 정점(ND2) 코어는 을숙도 대교 건설과 우안배수문 증설의 영향으로 약 38 cm 부근에서 퇴적상이 한 번 더 급격히 변화하였다. 하구둑으로 인한 물리적 환경의 변화가 BSi 분포에 미치는 영향을 제거하고 정체효과를 보기 위하여 BSi_{exc}를 구한 결과, 자연하구인 섬진강 하구는 연구지역의 상류에서 하류로 갈수록 BSi_{exc}가 점차 감소하였으며, 중부하구 정점부터 음의 값을 보였다. 낙동강 하구는 하구둑을 기준으로 내측은 양의 값을, 외측은 음의 값을 보였다. 이는 하구둑에 의한 외측의 규소 플럭스 감소와 내측과 외측의 구조 조성의 급격한 변화 등을 원인으로 볼 수 있다. 우안배수문 외측 정점(ND2) 코어의 BSi_{exc}는 하구둑 건설 이후 일정한 음의 값을 보였으며, 이는 낮은 유속으로 인한 니질 퇴적의 증가가 원인으로 판단된다. 그러나 하구둑 건설 이후 BSi_{exc}가 크게 변동하였으며, 이는 을숙도 대교 및 우안배수문 건설로 인한 것으로 추정된다.

Current study is a part of the efforts to assess the estuarine barrage effects on the coastal ecosystem induced by the Si flux changes. Surface sediments from Seomjin and Nakdong estuary and sediment cores from Nakdong estuary was analysed to investigate the effect of estuarine barrage on the distribution of grain size, organic matter (loss on ignition: LOI) and biogenic silica (BSi). The samples of Seomjin estuary were collected in March, 2015 and those of Nakdong estuary were collected in November, 2014. Generally, the longitudinal distribution of grain size, LOI and BSi in Seomjin estuary, natural estuary, was gradually changed. However mud (silt and clay), LOI and BSi increased from station mid-estuary where tide reaches year-round. The distribution of grain size, LOI and BSi in Nakdong estuary, however, were entirely different between inside and outside of estuarine barrage. The mud percentage and LOI were low and consistent in inside of the barrage except R05, inside of right gate, yet those of outside of the barrage were higher and varied by adjacent sluices. Mud, LOI and BSi of ND1 and ND2 decreased immediately after the construction of Nakdong estuarine barrage due to disturbance of sediment and decrease of sediment supply. To exclude the physical effects by the barrage, BSi excess (BSi_{exc}) was calculated using regression equation of BSi-LOI and BSi-mud of Seomjin estuary. BSi_{exc} of Seomjin estuary decreased gradually from upper estuary to lower estuary. BSi_{exc} of Nakdong estuary were positive in inside of the barrage and negative in outside of the barrage. BSi retention and shift of species composition of diatom by the barrage would affect BSi_{exc} distribution. Before the construction of

Nakdong estuarine barrage, BSi_{exc} of ND2 was negative and consistent owing to high mud sedimentation. After the construction, BSi_{exc} of ND2, however, fluctuated due to continuous disturbance of sediment due to construction of Eulsuk bridge and East gate.

Keywords: Nakdong estuary, Nakdong estuarine barrage, Biogenic silica, BSi retention

1. 서론

하구는 육상과 해양을 연결해주는 전이지역으로, 조석과 파랑, 기후 등의 다양한 자연적 요인에 의해 복잡한 환경을 보이는 지역이다(Kim and Ha, 2001; MOE, 2015a; Park *et al.*, 2016). 하구는 생산성이 높고 외해와의 접근성이 뛰어나 예로부터 인간 활동의 중심지로 이용되어 왔다(Teal, 1962; Elliott and McLusky, 2002; An, 2005; Park *et al.*, 2016). 하구에서는 인간의 편의를 위해 하구둑 및 교각, 방조제 건설, 간척, 매립 등 다양한 개발이 이루어져 왔으며, 이로 인해 하구는 지형 변화, 기수역 소실, 생태계 훼손 등 다양한 환경 문제를 겪게 되었다(Chang and Oh, 1991; Choi *et al.*, 1995; Kim *et al.*, 1996; Williams *et al.*, 2013; MOE, 2015a).

하구에 설치되는 주요 인공구조물인 하구둑은 도심 재생, 조력발전, 담수저장, 수질개선 등의 다양한 목적을 위해 건설되었다(Burt and Rees, 2001). 국내에는 낙동강과 금강, 영산강 하구를 포함하여 국내 하구의 약 50%에 용수 공급 및 염해 방지 목적으로 하구둑이 설치되어 있다(Bae, 2002; Lee *et al.*, 2011). 하구둑은 담수와 해수 교환을 차단하므로, 기수역이 소실되어 하구의 높은 생물 다양성 및 서식지가 감소하게 된다(Burt and Rees, 2001; MOE, 2015a). 또한 하구둑은 강과 바다 간의 물질 교환을 차단하여 댐 내측의 물질 정체 및 외측의 물질 유입량 감소를 유발하며, 결국 하구 지형 변화 및 하구둑 내외측의 생지화학적 순환에 영향을 미친다(Meade and Parker, 1985; Friedl and Wüest, 2002; Walling and Fang, 2003).

하구둑은 연안의 주요 일차생산자인 규조의 생산성에 영향을 미칠 수 있다. 규조는 피각 형성을 위해 규산염을 이용하며, 규산염은 주로 육상의 규질광물의 풍화과정을 통해 유입된다(Guillard and Kilham, 1978; Del Amo and Brzezinski, 1999; Ragueneau *et al.*, 2006). 육상에서 유입된 규산염은 하천을 통해 외해로 공급되며, 하구둑이나 댐이 위치한 하천의 경우 규산염은 댐 내측에 정체되는 경향을 보인다. 하구둑에 의한 낮은 유속과 높은 규산염 농도는 하구둑 내측의 규조 생산을 증가시키며(Conley *et al.*, 1989), 이는 규조의 생물기원물질인 생규소(Biogenic silica; BSi) 생산의 증가와 수층 규산염 감소로 이어진다. 일반적으로 BSi는 다른 생물기원물질에 비해 비중이 높고 용해율이 낮아 재생산율이 매우 낮고 퇴적물 내에 잘 보존된다(Teodoru *et al.*, 2006). 이로 인해 하구둑 내측에 BSi가 정체되고, 하구둑 외측으로 유출되는 규소 플럭스가 감소하여 수층의 Si:N, Si:P 비가 감소한다(Teodoru *et al.*, 2006). 하구둑 외측 영양염 비의 감소는 연안 생태계를 규조류가 우세한 환경에서 와편모조류 등 비규질 식물플랑크톤이 우세한 환경으로 바꾸며, 이와 같은 일차생산자의 변화는 먹이망의 변화를 야기한다(Cociasu *et al.*, 1996; Humborg *et al.*, 1997; Teodoru *et al.*, 2006). 또한 하구둑에 의한 규소 플럭스 감소로 인해 우점종이 된 비규질 식물플랑크톤의 대부분은 적조를 일으키는 유해성 조류가 주를 이루어 하구둑 외측 및 연안역의 유해성 적조 발생 빈도 및 규모가 증가하며, 이는 연안 생태계에 큰 영향을 미치게 된다(Bologa *et al.*, 1995; Bouvier *et al.*, 1998; Bodeanu, 1992). 따라서 하구둑이 하구 및 연안 생태계에 미치는 영향을 알아보기 위해 규소 플럭스의 변화를 알아보는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 낙동강 하구둑 건설로 인한 규소 플럭스 변화가 하구 및 연안역에 어떠한 영향을 미치는지 알아보려고 하였다. 루마니아와 불가리아를 지나는 다뉴브강은 Iron Gates의 건설로 인해 댐 내측의 BSi 정체 및 흑해 연안의 규산염 감소가 확인되었으며(Cociasu *et al.*, 1996; Teodoru *et al.*, 2006), 이로 인해 흑해 연안의 식물플랑크톤 종조성이 변하였다(Cociasu *et al.*, 1996; Humborg *et al.*, 1997; Teodoru *et al.*, 2006). 낙동강 하구 역시 하구둑 건설 이후 하구둑 내측의 BSi 정체가 일

어났을 것으로 예상되며, 이는 하구둑 외측 및 연안역의 영양염 비의 변화와 식물플랑크톤 우점종 및 종 조성의 변화를 야기할 것으로 예상된다. 하지만 지금까지 국내의 하구둑이 설치된 하구에서 규소 플럭스 및 영양염 비의 변화 그리고 하구둑 건설 전 후의 식물플랑크톤 종 조성의 변화에 대한 연구는 거의 없으며, 하구둑의 건설이 하구 생태계에 미치는 영향 파악 또한 미비하다. 본 연구에서는 자연하구인 섬진강 하구와 하구둑이 설치되어 있는 낙동강 하구 표층 퇴적물과 낙동강 하구둑 외측의 퇴적물 코어분석을 통하여 하구둑이 낙동강 하구의 규소 플럭스에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 먼저 하구둑에 의한 물리적 환경의 변화가 표층퇴적물 내 입도, 유기물, BSi 분포에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 자연하구인 섬진강 하구와 하구둑이 설치된 낙동강 하구의 표층 퇴적물 분석을 실시하였다. 또한 하구둑 건설 전 후의 퇴적 환경의 변화를 알아보기 위하여 하구둑 외측에서 퇴적물 코어를 채집하여 퇴적물 분석을 수행하였다. 마지막으로 하구둑 건설로 인한 낙동강 하구역 환경 변화 외에 다른 요인에 의한 BSi 분포 변화를 알아보기 위하여 잉여 BSi인 BSi excess (BSi_{exc})를 구하였다. 이 결과들을 바탕으로 낙동강 하구둑이 규소 플럭스에 미치는 영향을 알아보려고 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구지역

낙동강은 총 유로연장이 약 520 km, 배수면적이 약 26,000 km²으로 대한민국에서 두 번째로 큰 강이다(Jeong *et al.*, 2007; Williams *et al.*, 2013). 낙동강 하구는 대도시인 부산과 접하고 있으며, 1934년 녹산 수문과 대동 수문 건설을 시작으로 현재까지 개발이 꾸준히 진행되는 지역이다. 낙동강 하구둑은 1983-1987년에 건설되었으며, 2009년에 우안배수문이 증설되었다(MOE, 2015a). 좌안배수문과 우안배수문, 녹산 수문은 각각 운영방식이 달라 하구둑 외측은 접하고 있는 수문에 따라 물리적 환경이 다를 것으로 판단된다(Williams *et al.*, 2013; MOE, 2015a). 섬진강은 총 유로연장이 약 210 km, 유역면적이 약 4,960 km²으로 대한민국에서 네 번째로 큰 강이다(MOE, 2015b). 섬진강 하구는 국내의 다른 대형 강들과 달리 하구둑이 설치되어 있지 않아 자연하구의 특성을 띤다(Kim and Lee, 2009). 섬진강 하구는 조석에 의해 최대 하동 부근까지 염수 켜기가 침투하여 넓은 기수역을 형성하며(Kwon *et al.*, 2002), 섬진강 본류는 대도시나 공업단지가 인접하지 않아 오염이 되지 않은 건강한 하구이다(Kim *et al.*, 2008). 그러나 하구 입구는 광양시와 주변 임해공업단지로부터 유입되는 생활하수 및 폐수 등으로 인한 환경 오염 문제가 대두되는 지역이다(Lee *et al.*, 2001; Na and Son, 2005).

2.2 시료 채집 및 보관

표층 퇴적물 시료는 2015년 3월 섬진강 하구 13개 정점, 2014년 11월 낙동강 하구 13개 정점에서 pony grab을 이용하여 채집하였다. 퇴적물 코어 시료는 2014년 11월 낙동강 하구둑 외측 진우도 인근 조간대의 ND1과 우안배수문 외측의 ND2, 2개 정점에서 push core 방식으로 채집하였다(Table 1, Fig. 1). 각 시료에 대하여 입도와 강열감량, BSi 분석을 수행하였다.

표층 퇴적물 시료는 현장에서 입도 분석용과 유기물 및 BSi 분석용으로 구분해 밀봉하여 냉동보관 하였다. 퇴적물 코어 시료는 실험실에 돌아와 일주일 이내에 부표본하였으며, 표층에서 30 cm 깊이까지 1 cm 간격으로, 30 cm 깊이 이후로는 2 cm 간격으로 부표본하였다. 퇴적물 코어 부표본은 입도 분석용과 유기물 및 BSi 분석용으로 나누어 밀봉하여 냉동보관 하였다. 표층 퇴적물과 퇴적물 코어 시료 중 유기물 및 BSi 분석용 시료는 70°C에서 건조 후 부산대학교 공동실험실습관 소재의 암석 분쇄기(CMT co., Ltd., TI-100)를 이용하여 분말형태로 상온 보관하였다.

Table 1. The coordinates of ND1 and ND2 in DMS system

Station	Latitude	Longitude
ND1	35° 4'14.23"N	128°52'36.69"E
ND2	35° 5'14.75"N	128°55'53.90"E

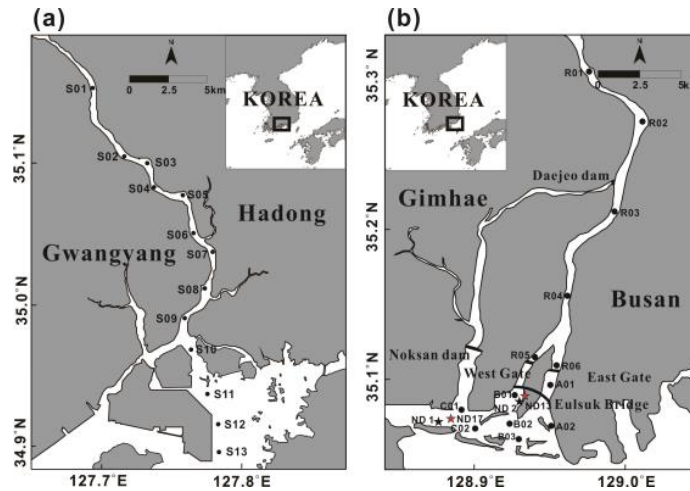


Fig. 1. The map of sampling stations of (a) Seomjin estuary and (b) Nakdong estuary. Solid circle means sampling stations of surface sediment and star means coring stations. Red stars mean core stations from Williams *et al.* (2013).

2.3 입도분석

입도 분석은 과산화수소수 원액(34.5%)과 10% HCl 용액을 이용하여 퇴적물 시료 내 탄산염과 유기물을 제거한 뒤 진행하였다. 4 ϕ 표준체를 이용한 습식체질을 통해 조립질(<4 ϕ)과 니질(>4 ϕ)을 구분하였다. 사질은 70°C에서 건조 후 표준체를 이용하여 -2 ϕ 부터 4 ϕ 까지 1 ϕ 간격으로 분리하였으며, 니질은 부산대학교 지구관 소재의 입도분석기(Micromeritics, SediGraph III 5120)를 이용하여 5 ϕ 부터 12 ϕ 까지 분리하였다. 이후 ϕ 별 무게를 이용하여 시료의 입도를 사질, 실트질, 점토질로 나누어 백분율로 환산하였다.

2.4 강열감량 분석

퇴적물 시료 내 유기물 함량을 알아보기 위하여 강열감량 분석을 실시하였다. 강열감량은 퇴적물을 고온으로 가열하여 소실되는 유기탄소의 양을 통해 퇴적물 내의 유기물 함량을 추산하는 방법으로, 본 연구에서는 해양환경공정시험법에 따라 분석하였다. 약 5 g의 분말시료를 550°C에서 약 2시간 가열 후 그 손실량을 백분율로 환산하였다.

2.5 BSi 분석

BSi 분석은 DeMaster (1981)의 분석법을 토대로 부분 수정하여 실시하였다. 퇴적물 분말시료 30 mg을 덜어 0.5 M NaOH 용액 40 ml에 넣고 85°C에서 가열하여 시료 내 Si를 추출한다. 이때 녹아나오는 Si는 광물기원Si (Lithogenic silica; LSi)와 BSi가 혼재하므로, 용해율 차이를 고려하여 시간별 Si 농도 추이를 통해 LSi를 보정하였다. 이를 위해 30분, 60분, 90분, 120분, 180분, 240분에 Si 추출액을 부표본 하였으며, 각 시료별, 시간별 Si 추출 시료는 몰리브데이트 시약을 이용한 발색법을 통해 분광광도계(Shimadzu, UV-1650PC)를 이용하여 농도를 구한 뒤 %로 환산하였다.

3. 결과

3.1 퇴적물 입도 분포

담수 환경인 섬진강 연구지역의 상류와 하구둑 내측에서 매우 높은 사질 함량을 보였으며, 해수환경인 섬진강 연구지역의 하류와 하구둑 외측으로 갈수록 실트질과 점토질의 비율이 증가하였다(Fig. 2(a)-(c)). 섬진강 연구지역의 입도는 하류로 갈수록 점진적으로 니질의 함량이 증가하였으나, S07 정점을 기준으로 그 변화가 뚜렷하게 나타났다(Fig. 2(a)). 섬진강의 S11 정점에서 실트질이 60.7%, 점토질이 9.1%로 가장 세립한 입도를 보였다. 낙동강 하구의 R01-R04 정점과 R06 정점의 입도는 정점 간 차이를 보이지 않았으며, 사질이 평균 97.4%로 매우 조립한 퇴적상을 보였다(Fig. 2(b)). 그러나 우안배수문 내측의 R05 정점은 실트질 52.4%, 점토질 2.9%로 매우 세립한 퇴적상을 보였다(Fig. 2(c)). 낙동강 하구둑 외측은 내측보다 니질 함량이 높았으나, 대체로 사질이 우세한 환경이었다(Fig. 2(b), (c)). 또한 낙동강 하구둑 외측은 접하는 수문에 따라 입도 분포가 차이를 보였으나, 대체로 수문에서 사주 쪽으로 갈수록 세립해지는 경향을 보였다. 좌안배수문 외측은 사질이 평균 88.5%로 정점 간 차이를 보이지 않았으며, 우안배수문 외측은 B01 정점에서 실트질이 5.2%, 점토질이 40.5%로 매우 세립한 입도를 보였다. 녹산 수문 외측은 사질 함량이 각각 85.4%, 92.3%였다.

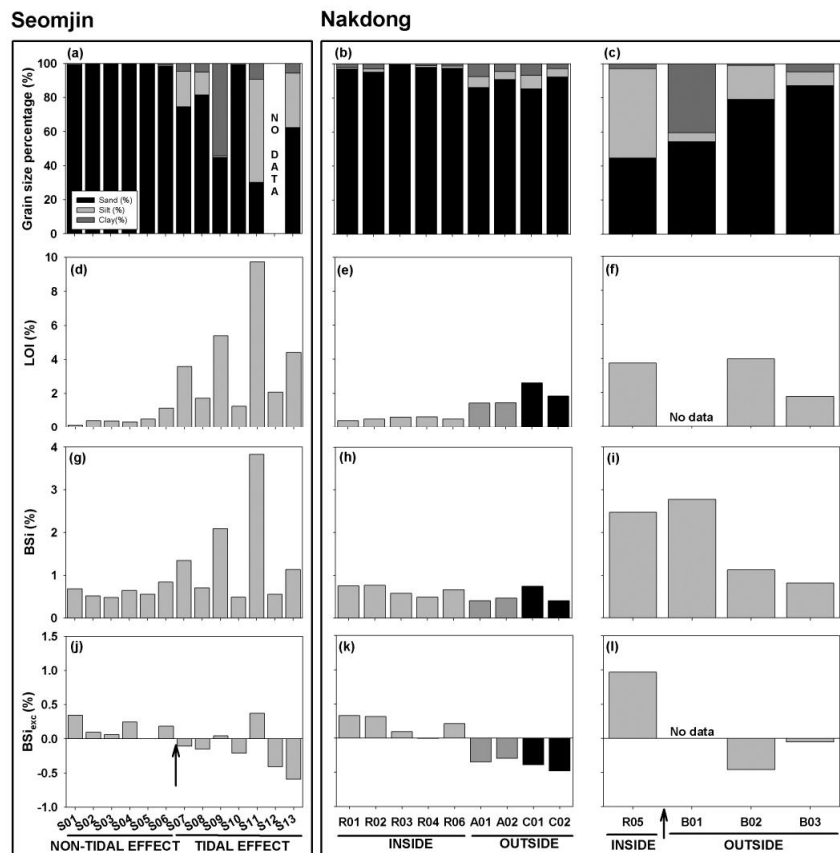


Fig. 2. Grain size, loss on ignition (LOI), Biogenic silica (BSi) and Biogenic silica excess (BSi_{exc}) in Seomjin and Nakdong estuary (see Fig. 1 for the sampling locations). The graphs in the first box are from Seomjin estuary, and those in the second and the third box are from Nakdong estuary. Inside stations are located inside the barrage and outside stations are located outside the barrage. B01 sample was not enough to analyse LOI.

퇴적물 코어는 ND1에서 약 75 cm를 기준으로, ND2에서 약 120 cm와 38 cm를 기준으로 그 분포 경향이 달라졌다(Fig. 3(a), (e)). ND1 코어는 120 cm에서 70 cm까지 사질 함량이 57.3-95.9%로 비교적 세립한 퇴적상을 보였으며, 70 cm 이후 사질이 평균 96.1%로 매우 조립하고 일정한 퇴적상을 보였다(Fig. 3(a)). ND2 코어는 140 cm에서 120 cm까지 사질 함량이 52.9%로 다소 세립한 퇴적상을 보인 뒤, 120 cm 이후 94.7%로 급격한 니질의 감소가 나타났다(Fig 3(e)). 120 cm부터 38 cm까지 사질이 감소하여 30.2%로 가장 낮은 값을 보였다. 38 cm 이후 다시 사질이 급격히 증가하여 사질이 평균 85.5%로 매우 조립하고 일정한 퇴적상을 보였다.

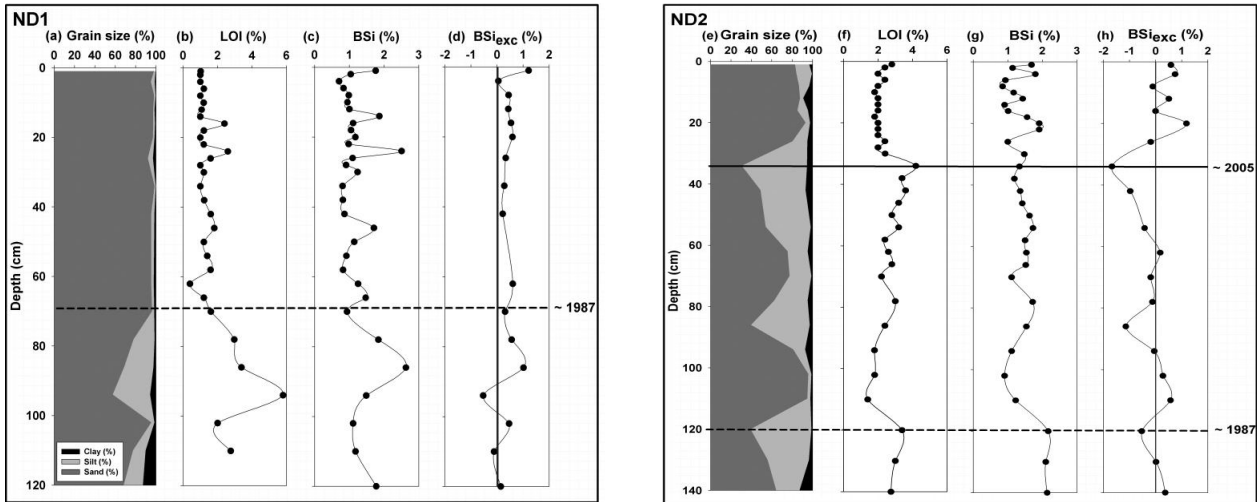


Fig. 3. The profiles of grain size, LOI, BSi and BSi_{exc} of ND1 and ND2. Approximate dates are based on sediment rates of Williams *et al.* (2013).

3.2 퇴적물 내 유기물 함량의 변화

유기물 함량은 니질과 마찬가지로 담수 환경인 섬진강 하구 상류정점(S01-06)과 낙동강 하구둑 내측에서 매우 낮았으며, 해수환경인 섬진강 하구 하류정점(S07-13)과 낙동강 하구둑 외측에서 높은 유기물 함량을 보였다(Fig. 2(d)-(f)). 섬진강 연구지역은 상류에서 하류로 갈수록 유기물 함량이 점진적으로 증가하였으며, 특히 S07 정점부터 뚜렷한 변화를 보였다(Fig. 2(d)). S11 정점에서 9.7%로 가장 높은 유기물 함량을 보였다. 낙동강 하구둑 내측은 R01-R04 정점과 좌안배수문 내측의 R06 정점의 유기물 함량이 평균 0.5%로 매우 낮고 일정한 분포를 보였으나, 우안배수문 내측의 R05 정점은 3.7%로 매우 높은 유기물 함량을 보였다(Fig. 2(e), (f)). 하구둑 외측은 입도와 마찬가지로 내측보다 유기물 함량이 높았으며, 대체로 사주 쪽으로 갈수록 감소하였다. 좌안배수문 외측은 평균 1.4%로 정점 간 차이를 보이지 않았으며(Fig. 2(e)), 우안배수문 외측의 B02 정점은 4.0%로 매우 높은 유기물 함량을 보였다(Fig. 2(f)). 녹산 수문 외측은 유기물 함량이 각각 2.6%, 1.8%였다(Fig. 2(e)).

퇴적물 코어는 ND1에서 약 75 cm를 기준으로, ND2에서 약 120 cm, 38 cm를 기준으로 그 분포 경향이 달라졌다(Fig. 3(b), (f)). ND1 코어는 120 cm에서 70 cm까지 유기물 함량이 1.6-3.4%로 높고, 변동이 비교적 크게 나타났다(Fig. 3(b)). 70 cm 이후 유기물 함량은 평균 1.3%로 비교적 낮고 일정한 분포를 보였다. ND2 코어는 140 cm에서 120 cm까지 유기물 함량이 평균 3.1%로 높고 일정하게 분포한 뒤, 120 cm 이후 1.4%로 유기물 함량이 급격히 감소하였다(Fig. 3(f)). 120 cm부터 38 cm까지 유기물 함량이 점차 증가하여 4.2%로 최대값을 보인 후, 2.4%로 다시 급격히 감소하여 평균 2.1%로 일정하게 분포하였다.

3.3 퇴적물 내 생규소(BSi)의 변화

BSi는 섬진강 하구에서는 입도와 유기물 분포와 마찬가지로 연구지역의 상류에서 하류로 갈수록 점차 BSi 함량이 증가하였다(Fig. 2(g)). 그러나 낙동강 하구는 입도와 유기물과 달리 내측과 외측의 차이가 뚜렷하게 나타나지 않았다(Fig. 2(h), (i)). 낙동강 하구둑 내측의 R01에서 R04 정점까지 BSi는 0.8%에서 0.5%까지 소폭 감소한 뒤 좌안배수문 내측의 R06 정점에서 0.7%, 우안배수문 내측의 R05 정점에서 2.5%로 증가하였다. 좌안배수문 외측은 BSi가 평균 0.4%로 정점 간 차이를 보이지 않았으며(Fig. 2(h)), 우안배수문 외측의 B01 정점은 2.8%로 가장 높은 BSi 함량을 보였다(Fig. 2(i)). 녹산 수문 외측은 BSi 함량이 각각 0.7%, 0.4%였다(Fig. 2(h)).

퇴적물 코어의 BSi 분포 양상은 입도, 유기물과 마찬가지로 ND1에서 약 75 cm, ND2에서 약 120 cm와 38 cm 깊이에서 급격한 변화를 보였다. ND1 코어는 120 cm부터 70 cm까지 BSi 범위는 0.9-2.6%였으며, 70 cm부터 표층까지는 평균 1.0%로 낮고 일정한 BSi 분포를 보였다(Fig. 3(c)). 이와 달리 ND2 코어는 140 cm부터 120 cm까지 BSi가 평균 2.1%로 높고 일정한 값을 보였으며, 120 cm에서 BSi 함량이 급격히 감소한 뒤, 38 cm까지 평균 1.4%로 낮고 일정한 분포를 보였다(Fig. 3(g)). 38 cm부터 표층까지 BSi 범위는 0.9-1.9%로 매우 큰 폭으로 변동하였다.

4. 토 의

4.1 하구둑이 입도와 유기물의 분포에 미치는 영향

하구에서 물질 유입량은 기후 및 강수, 하천 유량 등에 의해 달라지며, 물질 퇴적량은 하구의 지형, 조석작용, 파랑 그리고 하구 내 해수의 유동 등 다양한 물리적 요인에 의해 결정된다(Kim and Ha, 2001). 섬진강과 낙동강 연구지역 표층 퇴적물의 니질과 유기물은 매우 좋은 양의 상관관계를 보였으며(Fig. 4), 이를 통해 두 물질의 퇴적에 영향을 미치는 물리적 요인이 같음을 추론할 수 있다. 섬진강과 낙동강 하구 모두 해양의 영향이 미치는 섬진강 하구의 하류 정점(S07-13)과 낙동강 하구둑 외측에서 표층 퇴적물 내 니질과 유기물 비율이 증가하였으며(Fig. 2(a)-(f)), 이를 통해 하구에서 입도와 유기물 퇴적에는 조석 등의 해양의 영향이 크게 작용함을 알 수 있었다.

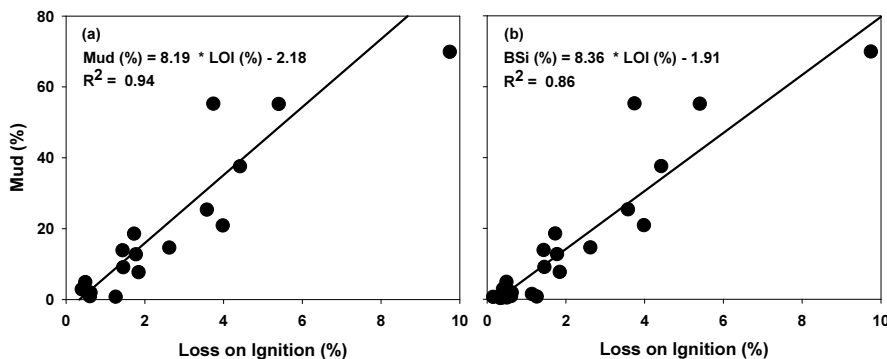


Fig. 4. The relationship between mud percentage and LOI of (a) Seomjin and (b) Nakdong estuary. Each solid line means the correlation of Seomjin and Nakdong estuary.

자연하구인 섬진강 하구는 조석의 영향을 받는 조석 우세 하구로, 강수량과 조시에 따라 기수역의 범위가 달라진다(Kim and Lee, 2009; Park *et al.*, 2012; MOE, 2015a). 조석의 영향을 받는 하구에서 수층의 수온과 염분, pH, 용존산소 등은 해양의

영향이 미치는 정도에 따라 달라지므로(Kwon *et al.*, 2002; Park *et al.*, 2012), 섬진강 하구는 상류에서 하류로 갈수록 물리, 화학적 환경이 점진적으로 변화할 것으로 보인다. MOE (2015a)에 따르면 섬진강 하구는 갈수기에 S05 정점까지, 풍수기에 S09 정점까지 조석의 영향이 미친다. 따라서 섬진강 하구는 S05-S09 정점부터 물리, 화학적 환경의 변화가 나타날 것으로 판단되며, 외측으로 갈수록 점진적인 환경 변화가 일어날 것으로 판단된다. 섬진강 하구의 입도 및 유기물은 전반적으로 연구 지역의 하류로 갈수록 니질과 유기물 함량이 점차 증가하였으며, 특히 S07 정점부터 그 변화가 뚜렷하게 나타났다(Fig. 2(a), (d)). 이는 S07 정점부터 조석으로 인해 물리적 환경이 니질과 유기물 퇴적에 유리한 환경으로 바뀌어 나타난 결과로 보인다. 또한 섬진강 하구 표층 퇴적물의 니질 및 유기물 함량은 가장 외측정점인 S12, S13 정점보다 S11 정점에서 가장 높았다. 이는 조류로 인한 니질과 유기물의 재부유 및 퇴적이 원인으로 판단된다(Oh, 1999). 창조 시 S12 정점과 S13 정점 퇴적물 내 니질과 유기물이 조류에 의하여 광양만 안쪽으로 이동하여 퇴적되고, 퇴적된 니질과 유기물의 일부만이 낙조 시 외측으로 재이동하여 이러한 분포 양상을 보인 것으로 추정된다. 또한 S11 정점은 주변에 광양제철소를 비롯하여 임해산업단지들과 접하고 있어 하수 및 폐수의 유입이 많이 받을 것으로 보이며, 그 결과 S11 정점에서 매우 높은 유기물 함량을 보인 것으로 판단된다.

낙동강 하구는 하구둑으로 인해 해수의 침입이 차단되어 내측과 외측의 물질 교환이 제한된 환경이다(Chung and Youn, 2013; MOE, 2015a). 하구둑에 의한 강과 바다간의 물질 교환 저해는 낙동강 하구역의 물리, 화학, 생물학적 환경을 변화시켰으며, 이는 퇴적 환경에도 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 하구둑과 댐 설치로 인한 내측의 물질 정체는 전 세계 여러 강에서 보고된 바 있으며(Conley *et al.*, 1993; Walling and Fang, 2003; Teodoru *et al.*, 2006), 본 연구 결과 낙동강 하구는 간헐적으로 수문이 운영되는 우안배수문 내측에서 하구둑에 의한 니질과 유기물의 정체가 뚜렷하게 나타났다(Fig. 2(c), (f)). 그러나 좌안배수문 내측 정점인 R06 정점은 다른 내측 정점들(R01-04)과 니질과 유기물 함량이 비슷하였으며(Fig. 2(b), (e)), 이는 좌안배수문이 수위조절을 위해 간조시마다 운영되어(Williams *et al.*, 2013; MOE, 2015a) 니질과 유기물이 내측에 정체되지 않고 외측으로 유출된 결과로 판단된다. 이를 통해 하구둑의 수문 운영방식이 물질 정체에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다.

낙동강 하구둑 외측은 좌안배수문과 우안배수문, 그리고 녹산 수문과 접하고 있으며, 각 수문 운영방식에 따라 물리, 화학적 환경이 매우 다르게 나타난다(Williams *et al.*, 2013; MOE, 2015a). 섬진강 하구 표층 퇴적물 분석 결과에서 알 수 있듯이 물질의 퇴적은 물리적 환경과 밀접한 상관관계를 가지므로, 낙동강 하구둑 외측 역시 접하는 수문에 따라 입도와 유기물 분포 양상이 서로 다르게 나타난 것으로 판단된다(Fig. 2(b), (c), (e), (f)). 좌안배수문 외측의 입도와 유기물은 다른 외측 정점들에 비해 낮고 일정한 분포를 보였으며(Fig. 2(b), (e)), 이는 좌안배수문이 간조시마다 방류하여 유속이 빨라 물질의 퇴적이 잘 일어나지 않아 나타난 결과로 보인다(Williams *et al.*, 2013; MOE, 2015a). 녹산 수문 외측은 1934년 경 수문을 설치한 이래로 수문이 운영되지 않고 있어 강으로부터 직접적으로 유입되는 담수와 물질이 없으며, 주로 조류를 통해 낙동강 본류와 외해의 물질이 소량 유입된다(Williams *et al.*, 2013; MOE, 2015a). 녹산 수문 외측은 담수 유입이 없어 유속이 낮아 퇴적에 매우 유리한 환경으로, 물질 유입량은 적지만 좌안배수문 외측과 유사한 니질 및 유기물 함량을 보인 것으로 판단된다(Fig. 2(b), (e)). 홍수기에만 운영되는 우안배수문의 외측은 갈수기 동안 내측에 정체되어 있던 물질이 홍수기에 외측으로 유출되어 퇴적되므로 니질과 유기물 함량이 매우 높은 것으로 판단된다(Fig. 2(c), (f)). 또한 낙동강 하구둑 외측의 입도와 유기물은 수문에서 사주 쪽으로 갈수록 입도가 조립해지고, 유기물 함량이 감소하였다. 이는 조석에 의해 창조 시에 사주 인근의 니질과 유기물이 수문 쪽으로 이동하여 퇴적된 후, 낙조 시 그 중 일부만이 재부유하여 외측으로 제거된 결과이다(Oh, 1999). 따라서 낙동강 하구둑 외측의 입도, 유기물, BSi 분포는 수문에 의한 방류 주기 및 방류량, 조석 등의 물리적 요인에 의해 그 양상이 달라진다는 결론을 내릴 수 있다.

4.2 하구둑이 BSi 분포에 미치는 영향

낙동강 하구 표층 퇴적물의 BSi 농도는 0.4-2.8%로, 외양보다는 낮으나 육상기원 물질의 유입이 많은 전형적인 연안의 BSi 농도와 일치하였다(DeMaster, 1981; Norris and Hackney, 1999; Liu *et al.*, 2002). 낙동강 하구에서 BSi 분포는 입도, 유기물 분포와 달리 하구둑 내측과 외측의 차이가 거의 나타나지 않았다(Fig. 2(h), (i)). 우안배수문 내측의 R05 정점을 제외한 하구둑 내측의 BSi 평균 농도는 0.65%였으며, 우안배수문 외측의 B01 정점을 제외한 하구둑 외측의 BSi 평균 농도는 0.66%로, 하구둑 내측과 외측의 평균 BSi 농도가 매우 유사하게 나타났다. 하구둑 내측의 경우 가장 상류의 R01 정점에서 R04 정점까지 BSi가 소폭 감소하였으나, 우안배수문 내측의 R05 정점과 좌안배수문 내측의 R06 정점에서 BSi가 증가하여 하구둑에 의해 BSi가 하구둑 내측에 정체됨을 확인할 수 있었다. 니질, 유기물과 달리 BSi가 좌안배수문 내측에서도 소량 정체된 것은 BSi가 니질이나 유기물보다 비중이 높아 퇴적에 더 유리하게 작용한 것으로 보인다. 우안배수문의 운영 방식으로 인해 R05 정점에서 BSi가 정체되어 가장 높은 농도를 보였다(Fig. 2(i)).

낙동강 하구둑 외측의 BSi 분포는 접하고 있는 수문의 운영 방식에 따라 지역별로 다르게 나타났다(Fig. 2(h), (i); Williams *et al.*, 2013). 좌안배수문 외측은 주기적인 방류로 인해 유속이 빠르며(MOE, 2015a), 그 결과 BSi의 정점 간 차이가 나타나지 않았다(Fig. 2(h)). 그러나 우안배수문과 녹산 수문 외측은 조류에 의하여 BSi가 수문에서 사주 쪽으로 갈수록 감소하였다(Fig. 2(h), (i); Oh, 1999). 또한 우안배수문 외측은 BSi 함량이 다른 정점들보다 높았으며, 이는 우안배수문 내측에 분포한 고농도의 BSi가 유입된 결과로 추정된다(Fig. 2(i)).

4.3 하구둑이 하구 퇴적 환경에 미치는 영향

낙동강 하구는 1983-1987년 하구둑 건설을 비롯하여 2005년 을숙도 대교 건설, 2009년 우안배수문 증설 등 대규모 인간 활동이 최근 30년 동안 연달아 일어났다(MOE, 2015a). 이는 퇴적환경 변화에 큰 영향을 미쳤을 것으로 판단되므로, 퇴적물 코어에서 입도, 유기물, BSi 분포 양상이 급격히 바뀌는 지점들을 대규모 공사가 이루어진 시점으로 보았다. Williams *et al.* (2013)의 연구 결과에 따르면, ND1 정점 인근 코어(ND17; Williams *et al.*, 2013)의 퇴적률은 약 2.5 cm yr^{-1} 였으며, ND2 정점 인근 코어(ND13; Williams *et al.*, 2013)의 퇴적률은 약 4.0 cm yr^{-1} 였다. 이를 이용하여 각 퇴적물 코어의 퇴적상이 급격히 변하는 깊이의 시기를 계산했을 때, ND1 코어의 75 cm와 ND2 코어의 120 cm는 하구둑이 건설된 1983-1987년에 해당하였으며, ND2 코어의 38 cm는 을숙도 대교가 건설된 2005년경에 해당하였다. 하구둑 건설의 영향은 ND1 코어와 ND2 코어 모두에서 나타나 그 영향이 광범위한 지역에 미쳤음을 알 수 있었으나, 을숙도 대교 건설의 영향은 ND2 코어에서만 나타나 지역적인 인간 활동임을 알 수 있었다(Fig. 3).

두 코어 모두 대규모 인간 활동 이후 니질과 유기물 함량이 급격히 감소하는 경향을 보였다(Fig. 3). 이는 대규모 공사로 인해 퇴적물이 교란되어 나타난 결과로 판단된다. 하구둑 건설 이후 ND1 코어는 니질과 유기물이 급격히 감소한 뒤 일정하게 유지되었으나(Fig. 3(a), (b)), ND2 코어는 니질과 유기물이 급격히 감소한 뒤 38 cm 부근까지 점차 증가하여(Fig. 3(e), (f)) 두 정점이 서로 다른 퇴적 양상을 보였다. 이는 ND1 정점과 ND2 정점의 퇴적환경이 서로 달라 나타난 결과로 판단된다. ND1 정점은 진우도 인근의 조간대에 위치하여 유수의 흐름이 자유로운 곳이며, 조류에 의한 물질 재부유로 인해 니질과 유기물 함량이 낮고 일정하게 분포한 것으로 보인다(Fig. 3(a), (b); Oh, 1999). 이에 반해 ND2 정점은 우안배수문 외측 을숙도 인근 조간대에 위치하며, ND1 정점에 비해 유수의 흐름이 자유롭지 못하고, 직접적인 담수 유입이 없으므로 유속이 느린 지역이다. 낮은 유속은 니질과 유기물 퇴적에 유리하게 작용하므로 표층 퇴적물 내 니질과 유기물 함량이 점차 증가한 것으로 판단된다(Fig. 3(e), (f)). 또한 ND2 코어의 약 70 cm 부근에서 다시 니질의 함량이 급격히 증가하였다. Williams *et al.* (2013)의

퇴적물을 이용하였을 때, 이는 명지단지와 녹산단지 조성을 위하여 간척 사업이 시작된 약 1990년에 해당된다(Williams *et al.*, 2013). 따라서 ND2 코어의 70 cm에서 니질의 급격한 증가는 간척사업으로 인한 퇴적물 교란에 의한 것으로 추정된다.

을숙도 대교 건설 이후 ND2 코어는 니질과 유기물이 급격히 감소한 후 일정하게 유지되는데(Fig. 3(e), (f)), 이는 을숙도 대교 건설과 우안배수문 증설이 연달아 진행된 결과로 판단된다(MOE, 2015a). 연이은 대규모 공사로 인하여 퇴적물 교란이 지속적으로 일어났을 것으로 판단되며, 이로 인해 ND2 코어의 니질과 유기물 함량이 낮고 일정하게 유지된 것으로 추정된다. 또한 ND2 정점 일대는 을숙도 대교 건설시 지반강화를 위해 외부 토사를 주입하였으며(Cho *et al.*, 2005), 이는 연이은 공사와 함께 BSi 변동이 크고 지속적으로 일어나는데 영향을 주었을 것으로 보인다.

ND1 코어와 ND2 코어의 BSi는 하구둑 건설 이후 그 농도가 감소한 뒤 일정하게 나타났다(Fig. 3(c), (g)). 이를 통해 ND1 정점에서 하구둑의 영향이 니질, 유기물과 마찬가지로 BSi 분포에도 지속적으로 미쳤음을 알 수 있다(Fig. 3(a)-(c)). 그러나 ND2 코어에서 니질과 유기물 분포는 하구둑의 영향을 일시적으로 받았으나(Fig. 3(e), (f)), BSi는 하구둑의 영향이 지속적으로 받은 것으로 보이며(Fig. 3(g)), 이는 BSi가 니질, 유기물과는 다른 특성을 가져 나타난 결과로 보인다. 니질과 유기물은 BSi와 달리 무게가 가벼워 하구둑에 의해 정제되는 비율이 낮고, 인간 활동으로 인해 하구로 유입되는 양이 많은 것으로 알려져 있다. 반면 BSi는 밀도가 상대적으로 높아 하구둑 내측에 정제되는 비율이 높고, 외측으로 유출되는 비율이 낮다. 또한 BSi 생산에 필수적인 규산염은 대체로 육상의 규질광물의 풍화작용으로 유입되며, 인위적인 공급은 거의 없다(Ragueneau *et al.*, 2006). 따라서 하구둑에 의한 BSi 정제는 외측의 규소 플럭스 감소를 지속적으로 유발하게 되며, 이로 인해 하구둑 외측에서 얻은 두 퇴적물 코어의 BSi 함량이 하구둑 건설 이후 감소하여 유지된 것으로 추정된다.

4.4 인위적인 활동이 BSi 분포에 미치는 영향

앞에서 기술된 바와 같이 섬진강과 낙동강 하구 인근 퇴적물에서 물리적 퇴적환경에 따라 퇴적물의 입도와 유기물 함량이 달라졌다. 또한 물리적 퇴적 환경의 차이에 따른 퇴적물 특성은 BSi 농도와도 좋은 상관관계를 보였다. 본 섹션에서는 이러한 물리적 요인 외에 BSi 농도 분포에 영향을 줄 수 있는 인위적 요인인 댐에 의한 BSi 플럭스 감소나 구조류 중 조성 변화를 살펴보고자 하였다.

BSi 분포에 물리적 요인이 미치는 영향을 배제하기 위하여 BSi와 입도, BSi와 유기물 분포 간의 상관관계식을 이용하여 잉여 BSi (BSi excess; BSi_{exc}) 분포를 알아보았다(Fig. 2(k), (l)). 각 상관관계식을 이용한 BSi 예상 값과 실제 BSi 농도 간의 차를 BSi_{exc} 로 보았으며, BSi_{exc} 가 양의 값을 보이는 것을 BSi 과잉 환경, 음의 값을 보이는 것을 BSi 부족 환경으로 판단하였다. 본 연구에서는 섬진강 하구 표층퇴적물만을 고려한 상관관계식(Fig. 5), 낙동강 하구 표층퇴적물만을 고려한 상관관계식, 그리고 섬진강과 낙동강 하구 표층퇴적물 모두를 고려한 상관관계식을 이용하여 각각의 BSi_{exc} 를 산출하였다(Fig. 6). 각 식에 대한 BSi_{exc} 값은 그 경향과 값이 매우 유사하였으므로, 세 식 중 어느 것을 이용하여도 무관할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 상관관계식의 R^2 값이 가장 높고, 자연하구인 섬진강 하구 표층퇴적물만을 고려한 상관관계식을 통해 얻은 BSi_{exc} 값을 이용하였다(Fig. 2(j)-(l), 3(d), (h)). 표층 퇴적물의 BSi_{exc} 는 R^2 값이 더 높은 BSi와 유기물 간의 상관관계식을 이용하였으나(Fig. 5(a)), 퇴적물 코어의 BSi_{exc} 는 유기물 초기 속성작용을 고려하여 BSi와 입도 간의 상관관계식을 이용하였다(Fig. 5(b)).

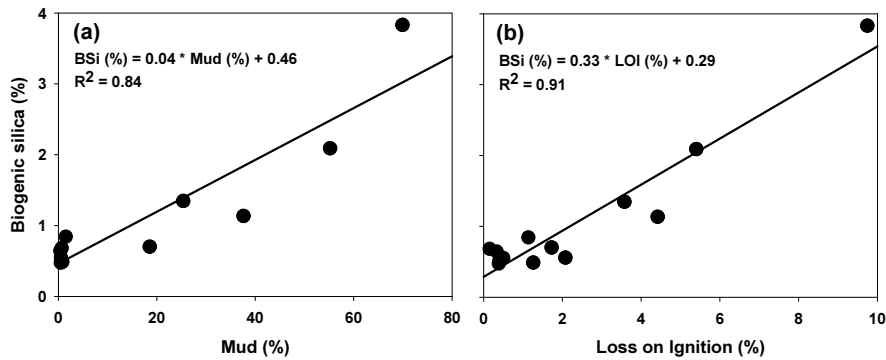


Fig. 5. The correlations of (a) BSi : mud percentage and (b) BSi : LOI of Seomjin estuary.

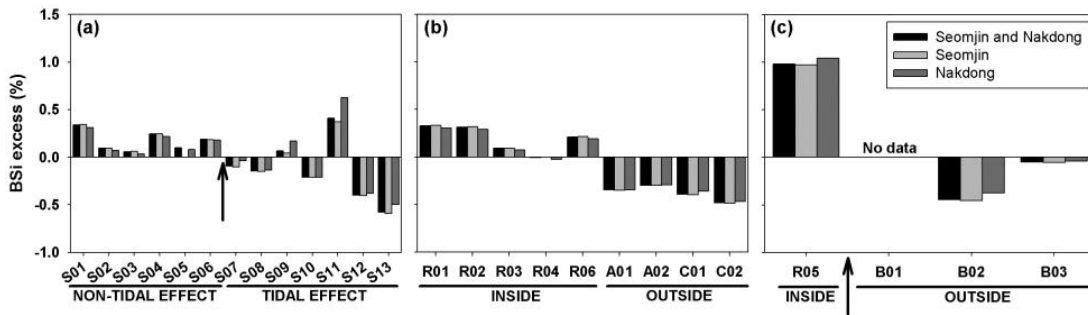


Fig. 6. BSi excess using correlation between BSi and Loss on Ignition (LOI) in Seomjin and Nakdong estuary (see Fig. 1 for the sampling locations). Black bars are found using correlation of Seomjin and Nakdong estuary, light grey bars are found using correlation of Seomjin estuary only, and dark grey bars are found using Nakdong estuary only.

자연하구인 섬진강 하구에서 BSi는 연구지역의 상류에서 하류로 갈수록 점진적으로 증가하였으나(Fig. 2(g)), BSi_{exc}는 연구지역의 상류에서 하류로 갈수록 점진적으로 감소하였다(Fig. 2(j)). 섬진강 하구에서 BSi_{exc}는 연구지역의 상류정점(S01-06)에서 양의 값을 보이고 하류정점(S07-13)에서 음의 값을 보였다. 이를 통해 해양의 영향을 받는 지역은 BSi의 농도는 높지만, 물리적 영향을 배제하였을 때 BSi가 부족한 환경임을 알 수 있었다. 이는 규모 종조성의 변화가 원인으로 보인다. 담수 환경에 서식하는 담수성 규조류는 기수성과 해산성 규조류에 비해 피각 내 규질 함량이 매우 높으며(Conley *et al.*, 1989), 이는 담수 환경에서 BSi_{exc}가 양의 값을 가지는데 긍정적으로 작용한 것으로 판단된다.

하구둑이 설치된 낙동강 하구는 하구둑을 기준으로 내측에서 양의 값, 외측에서 음의 값을 보였다(Fig. 2(k), (l)). 이를 통하여 하구둑 내측은 BSi 과잉 환경, 외측은 BSi 부족 환경이라는 것을 알 수 있다. 하구둑은 내측에 물질의 정체를 야기하며(Humborg *et al.*, 1997; Teodoru *et al.*, 2006), 특히 BSi는 니질이나 유기물 보다 높은 비중으로 인해(Ross *et al.*, 1987; Sommer, 1988; Mehta, 1991) 정체되는 비율이 더 높을 것으로 추정된다. 그 결과 하구둑 내측에 BSi 과잉 환경이 조성된 것으로 보인다. 이와 같은 하구둑에 의한 BSi 정체는 하구둑 외측의 규모 플럭스 감소로 이어지며(Humborg *et al.*, 1997), 그 결과 하구둑 외측의 BSi 생산 및 퇴적이 감소되는 것으로 알려져 있다(Ragueneau *et al.*, 2006). 또한 규모 플럭스 감소는 Si:N 비와 Si:P 비를 감소시키며, 이는 규모의 피각의 규질 함량 감소와 규모 종조성의 변화를 유발하게 된다(Ragueneau *et al.*, 2006). 현재 낙동강 하구의 Si:N비는 Redfield ratio인 1:1보다 낮지만, Si 제한 환경에 속할 정도로 수층 규산염 농도가 낮지 않고, 규조류가 우점하고 있다(MOE, 2015a). 그러나 이전 연구에 따르면 하구둑 건설 이후 규조류의 풍도가 감소하였으며(Moon and Choi, 1991), 이는 하구둑 외측에서 BSi_{exc}가 음의 값을 보이는 데에 영향을 준 것으로 보인다. 또한 하구둑은 강

과 해양을 차단하여 기수역 소실을 일으키며, 내측은 담수 환경, 외측은 해수 환경으로 단절시켰다(MOE, 2015a). 이로 인하여 하구둑 내측은 피각의 규질화 정도가 높은 담수성 구조류만 분포하며, 외측은 담수성 구조류와 기수성, 해산성 구조류가 다양하게 분포하게 된다. 이와 같은 구조 종 조성비의 급격한 변화는 낙동강 BSi_{exc}의 분포가 섬진강과 달리 하구둑을 기준으로 급격히 달라지는데 영향을 준 것으로 추정된다.

BSi_{exc}가 하구둑 건설 이전과 이후에 어떻게 달라졌는지 알아보기 위하여 하구둑 외측의 ND1 코어와 ND2 코어의 BSi_{exc}를 구하였다(Fig. 3(d), (h)). 입도, 유기물, BSi 분포와 마찬가지로 하구둑 건설 이후 BSi_{exc}의 변동 양상이 달라져 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$). ND1 코어는 하구둑 건설 이전에는 BSi_{exc}의 변동이 다소 크게 나타났으나, 낙동강 하구둑 건설 이후 양의 값으로 일정하게 나타났다(Fig. 3(d)). 이는 낙동강 하구둑에 의한 물질 유입량과 그 변동 폭의 감소가 원인으로 판단된다. 하구둑 건설 이후 하구둑 외측으로 유입되는 담수 및 물질의 양이 감소하였으며(Kim and Ha, 2001), 이는 입도, 유기물, BSi 분포에서도 잘 나타났다(Fig. 3). 하구둑 외측은 하구둑 건설 이후 물질 유입량의 감소와 더불어 조석 에너지 역시 감소하였으며(Ryu and Chang, 1979; Yang *et al.*, 2002; Williams *et al.*, 2013), 이는 ND1 정점의 물질 유입량의 감소와 퇴적상의 변동 폭 감소에 영향을 주었을 것으로 판단된다. 따라서 하구둑에 의한 하천으로부터 유입되는 물질의 양의 감소와 조석 에너지의 감소는 ND1에서 BSi_{exc}가 양의 값으로 일정하게 나타나는데 긍정적으로 작용한 것으로 추정된다.

ND2 코어는 ND1 코어와 다소 다른 BSi_{exc} 분포 양상을 보였으며, 낙동강 하구둑 건설 전 후 BSi_{exc}가 유의한 차이를 보였다(Fig. 3(h); $p < 0.05$). 낙동강 하구둑 건설 이전 ND2 코어의 BSi_{exc}는 0에 가까운 값으로 거의 일정하였으나, 하구둑 건설 이후 BSi_{exc}가 음의 값을 보이며 완만하게 변동하였다. ND2 정점은 우안배수문 외측 정점으로, 낙동강 하구둑 건설 이전 주수로였으나, 하구둑 건설 당시 수문이 설치되지 않아 직접적인 물질 유입은 없는 지역이었다(MOE, 2015a). 이로 인해 ND2 정점은 직접적인 물질 공급은 없었으나, 주수로인 좌안배수문과 거리가 가깝고 유속이 느려 물질 퇴적에 매우 유리한 환경이 되었으며, 그 결과 퇴적물 내 니질 함량이 높아 BSi_{exc}가 음의 값을 보인 것으로 판단된다. ND1 코어와 달리 을숙도 대교 건설 이후 ND2 코어의 BSi_{exc}는 양의 값을 보이며 큰 변동을 보였으며, 이는 을숙도 대교 건설과 우안배수문 증설이 연달아 진행되어 퇴적물 교란이 지속적으로 일어난 결과로 판단된다(MOE, 2015a).

현재 낙동강 하구의 식물 플랑크톤 군집 변화를 볼 수 있는 장기 자료는 매우 부족하여 규소 플럭스 변화가 어떤 영향을 미쳤는지 명확하게 밝히는 것은 쉽지 않다. 향후 규소 플럭스 변화와 연안 일차 생산자 변화에 대한 면밀한 연구가 필요하며, 이는 장기 연안 생태 변화를 가늠하는 척도가 될 수 있을 것이다.

5. 결론

자연하구인 섬진강 하구의 표층퇴적물의 입도, 유기물, BSi 분포는 해양의 영향이 미치는 정도에 따라 연구지역의 상류에서 하류로 갈수록 점진적인 변화를 보였다. 특히 조석의 영향이 연중 미치는 S07 정점부터 니질과 유기물, BSi 함량의 증가가 뚜렷하게 나타났으며, 이를 통하여 하구의 물리적 환경 변화가 물질 분포를 결정하는 주요 요인임을 알 수 있었다. 낙동강 하구 역시 물리적 환경에 의해 입도, 유기물, BSi 분포 양상이 다른 모습을 보였다. 하구둑 내측은 우안배수문 내측에서 물질 정체가 두드러지게 나타났으며, 이는 갈수기에 우안배수문이 운영되지 않아 BSi 생산 및 퇴적이 증가하고 유출되는 양이 적어 물질 정체 현상이 두드러지게 나타난 결과였다. 낙동강 하구둑 외측은 조석의 영향이 큰 사주 쪽으로 갈수록 니질, 유기물, BSi 함량이 감소하였으며, 이는 조석에 의한 물질의 재부유 및 퇴적이 원인이었다. 또한 하구둑 외측은 접하고 있는 수문에 따라 입도, 유기물, BSi 분포 양상이 다르게 나타났으며, 이는 각 수문의 운영방식이 서로 달라 물리적 환경의 차이로 인한 것이었다. 낙동강 하구둑 외측에서 얻은 두 개의 퇴적물 코어 분석을 통하여 하구둑 건설 전 후 퇴적환경이 달라졌음을 알 수 있었다. 하구

독 건설 직후 입도, 유기물, BSi가 전체적으로 급격히 감소하였으며, 이는 공사로 인한 퇴적물 교란에 의한 것으로 판단된다. 이후 두 코어의 퇴적상 변화 양상이 다르게 나타났으며, 이를 통하여 ND1 정점과 ND2 정점의 퇴적 환경이 서로 다름을 알 수 있었다. ND2 코어는 하구둑의 영향이 일시적으로 작용하였으며, 이후 2005년 시작된 을숙도 대교 건설과 2009년 시작된 우안배수문 증설로 인한 급격한 환경 변화로 인해 퇴적상의 변화가 한 번 더 나타났다.

이와 같은 물리적 환경 변화에 의한 BSi 농도 변화 효과를 제거하기 위해 BSi-입도, BSi-유기물 간의 상관관계식을 이용하여 BSi_{exc}를 구하였다. 자연하구인 섬진강 하구는 연구지역의 상류에서 하류로 갈수록 BSi_{exc}가 점차 감소하였으며, 이는 해양의 영향에 따른 구조류 중 조성 변화가 원인으로 생각된다. 낙동강 하구의 BSi_{exc}는 하구둑을 기준으로 내측에서 양의 값, 외측에서 음의 값을 보였으며, 정점 간 차이가 거의 나타나지 않았다. 이를 통하여 하구둑 내측에서는 전반적으로 BSi가 정체되고 있으며, 외측에서는 규소 플럭스 감소로 인해 BSi가 부족한 환경임을 알 수 있음을 추론할 수 있다. 정점 간 BSi_{exc}의 차이를 보이지 않음을 통해서 국지적인 유기물 오염은 없음을 알 수 있었다. 하구둑 외측의 두 퇴적물 코어의 BSi_{exc}는 서로 다르게 나타났다. ND1 코어의 BSi_{exc}는 하구둑 건설 이후 양의 값으로 일정하게 나타났으며, 이는 하구둑에 의한 니질 유입량의 감소 및 변동의 감소가 원인으로 생각된다. ND2 코어의 BSi_{exc}는 하구둑 건설 이후 음의 값으로 거의 일정하게 나타났으며, 이는 낮은 유속으로 인해 좌안배수문을 통해 유입되는 니질이 잘 퇴적된 결과로 판단된다. 을숙도 대교 건설 이후 BSi_{exc}가 큰 폭으로 지속적인 변동을 보였으며, 이는 을숙도 대교 건설 이후 우안배수문 증설이 연달아 일어난 결과로 판단된다.

사 사

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의해 연구된 과제입니다. 심사를 맡아 좋은 의견을 주신 심사 위원 분들께 깊이 감사드립니다.

참고문헌(References)

- An, S., 2005. Seasonal variations of sediment oxygen demand and denitrification in Kanghwa tidal flat sediments. *J. of the Korean Society of Oceanography*, **10**(1): 47-55.
- Bae, H.M., 2002. Environment design of an Esutary dike on the Youngsan-River. *J. of the Korean Institute of Landscape Architecture*, **30**(1): 44-51.
- Bologa, A.S., N. Bodeanu, A. Petran, A. Tiganus and Y. Zaitsev, 1995. Major modifications of the Black Sea benthic and planktonic biota in the last three decades. *Bulletin de l'Intstitut Océanographique, Monaco*, **15**: 85-10.
- Bouvier, T., S. Becquevort and C. Lancelot, 1998. Biomass and feeding activity of phagotrophic mixotrophs in the northwestern Black Sea during the summer 1995. *Hydrobiologia*, **363**: 289-301.
- Bodeneau, N. 1992. Algal blooms and the development of the main phytoplanktonic species at the Romanian Black Sea littoral in conditions of intensification of the eutrophication process. In: *Marine coastal eutrophication: The response of marine transitional systems to human impact-Problems and perspectives for restoration*. ELSEVIER, 891-906 pp.
- Burt, N. and A. Rees, 2001. *Guidelines for the assessment and planning of estuarine barrages*. Thomas Telford Publishing, 483 pp.
- Chang, H.D. and J.K. Oh, 1991. Depositional sedimentary environments in the Han River estuary and around the Kyunggi bay posterior to the Han River's developments. *J. of the Oceanological Society of Korea*, **26**(1): 13-23.
- Choi, J.Y., H.Y. Choi and M.S. Seo, 1995. Physical and sedimentological changes in the Keum estuary after the gate-close of Keum River weir. *J. of the Korean Society of Oceanography*, **30**(4): 262-270.

- Cociasu, A., L. Dorogan, C. Humborg, and L. Popa, 1996. Longterm ecological changes in romaniam coastal waters of the black sea. *Marine Pollution Bulletin*, **32**(1): 32-38.
- Conley, D.J., C.L. Shelske and E.F. Stoemer, 1993. Modification of the biogeochemical cycle of silica with eutrophication. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **101**: 179-192.
- Conley, D.J., S.S. Kilham and E. Theriot, 1989. Differences in silica content between marine and freshwater diatoms. *Limno. Oceanogr.*, **34**(1): 205-213.
- Del Amo, Y. and M.A. Brzezinski, 1999. The chemical form of dissolved Si taken up by marine diatoms. *J. of Phycology*, **35**: 1162-1170.
- DeMaster, D.J., 1981. The supply and accumulation of silica in the marine environment. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, **45**(10): 1715-1732.
- Elliott, M. and D.S. McLusky, 2002. The need for definitions in understanding estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **55**: 815-827.
- Friedl, G. and A. Wüest, 2002. Disrupting biogeochemical cycles-consequences of damming. *Aquatic Sciences*, **64**(1): 55-65.
- Guillard, R.R.L. and P. Kilham, 1978. The ecology of marine planktonic diatoms. In: *The biology of diatoms*. University of California Press, pp. 372-469.
- Humborg, C., V. Ittekkot, A. Cociasu and B.V. Bodungen, 1997. Effects of danube river dam on black sea biogeochemistry and ecosystem structure. *Nature*, **386**: 385-388.
- Jeong, K.S., D.K. Kim and G.J. Joo, 2007. Delayed Influence of dam storage and discharge on the determination of seasonal proliferations of microcystis aeruginosa and stephanodiscus hantzschii in a regulated river system of the lower Nakdong River (South Korea). *Water Research*, **41**: 1269-1279.
- Chung, M.H. and S.H. Yoon, 2013. Temporal and spatial variability of phytoplankton communities in the Nakdong River Estuary and coastal area, 2011-2012. *J. of the Korean Society of Oceanography*, **18**(4): 214-226.
- Cho, C.Y., S.W. Choi, D.I. Lee and K.U. Eom, 2005. Design of Myeong Gi Bridge by private investment project. *Korean Society of Steel Construction*, 586-591 pp.
- Kim, J.K., G.I. Kwak and J.H. Jeong, 2008. Three-dimensional mixing characteristics in Seomjin River Estuary. *J. of the Korean Society*, **11**(3): 164-174.
- Kim, S.J., D.C. Kim, H.I. Yi and I.C. Shin, 1996. Changes in sedimentary process and distribution of benthic foraminifera in the eastern part of Kwangyang Bay, South Sea of Korea. *J. of the Korean Society of Oceanography*, **1**(1): 32-45.
- Kim, S.Y. and B.K. Lee, 2009. The Distribution and behaviors of suspended matters in Seomjin River Estuary-compared with rainy and wet season-. *J. of Korean Society on Water Quality*, **25**(6): 935-942.
- Kim, S.Y. and J.S. Ha, 2001. Sedimentary facies and environmental changes of the Nakdong River Estuary and adjacent coastal area. *J. Korean Fish. Soc.*, **34**(3): 268-278.
- Kwon, K.Y., C.H. Moon, C.K. Kang and Y.N. Kim, 2002. Distribution of particulate organic matters along the salinity gradients in the Seomjin River Estuary. *J. Korean Fish. Soc.*, **35**(1): 86-96.
- Lee, K.H., B.H. Rho, H.J. Cho and C.H. Lee, 2011. Estuary classification based on the characteristics of geomorphological features, natural habitat distributions and land uses. *J. of the Korean Society of Oceanography*, **16**(2): 53-69.
- Lee, Y.S., J.S. Lee, R.H. Jung, S.S. Kim, W.J. Go, K.Y. Kim and J. Park, 2001. Limiting nutrient on phytoplankton growth in Gwangyang Bay. *J. of the Korean Society of Oceanography*, **6**(3): 201-210.
- Liu, S.M., X.W. Ye, J. Zhang and Y.F. Zhao, 2002. Problems with biogenic silica measurement in marginal seas. *Marine Geology*, **192**(4): 383-392.
- Norris, A.R. and C.T. Hackney, 1999. Silica content of a mesohaline tidal marsh in north carolina. *Estuarine. Coastal and Shelf Science*, **49**(4): 597-605.

- Meade, R.H. and R.S. Parker, 1985. Sediment in rivers of the United States. US Geological Survey Water-Supply Paper, **2275**: 49-60.
- Mehta, A.J., 1991. Understanding fluid mud in a dynamic environment. *Geo-Marine Letters*, **11**: 113-118.
- Ministry of environment (MOE), 2015a. A study for the restoration ecosystem of Nakdong River Estuary. Pusan National University.
- Ministry of environment (MOE), 2015b. The operating management of discharge of Yeongsan River and Seomjin River. Yeongsan River Environment Research center.
- Moon, C.H. and H.J. Choi, 1991. Studies on the environmental characteristics and phytoplankton community in the Nakdong River Estuary. *J. of the Oceanological Society of Korea*, **26**(2): 144-154.
- Na, C.K. and C.I. Son, 2005. Groundwater quality and pollution characteristics at Seomjin River Basin: Pollution Source and Risk Assessment. *Econ. Environ. Geol.*, **38**(3): 261-272.
- Oh, G.H., 1999. Landform Changes of Terminal Area of the Nakdong River Delta, Korea. *The Korean Journal of Quaternary Research*, **13**(1): 67-78.
- Park, M.O., S.S. Kim, S.G. Kim, J. Kwon, S.M. Lee and Y.W. Lee, 2012. Factors controlling temporal-spatial variations of marine environment in the Seomjin River Estuary through 25-hour continuous monitoring. *J. of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, **15**(4): 314-322.
- Park, S., J. Lee, J.U. Choi, N. Heo and S. An, 2016. Study on the long-term changes in water quality and benthic ecology and evaluation on effect of the barrage in Nakdong River Estuary. *J. of Wetland Research*, **18**(1): 58-67.
- Ragueneau, O., D.J. Conley, A. Leynaert, S.N. Longphuir and C.P. Slomp, 2006. Response of coastal ecosystems to anthropogenic perturbations of silica cycling. in: *the silicon cycle: human perturbations and impacts on aquatic systems*, edited by V. Ittekkot, D. Unger, C. Humborg and N.T. An, Island Press Washington DC, 197-213 pp.
- Ross, M.A., C.P. Lin and A.J. Mehta, 1987. On the definition of fluid mud, in: *hydraulic engineering*, American Society of Civil Engineers, New York, 231-236 pp.
- Ryu, C.R. and S.D. Chang, 1979. Tide and tidal current in the estuary of the Nakdong River. *J. of the Oceanological Society of Korea*, **13**: 71-77.
- Sommer, U., 1988. Growth and survival strategies of planktonic diatoms. in: *growth and reproductive strategies of freshwater phytoplankton*, edited by C.D. Craig, Cambridge University Press, Cambridge, 227-260 pp.
- Teal, J.M. 1962. Energy flow in the salt marsh ecosystem of Georgia. *Ecology*, **43**: 614-624.
- Teodoru, C., A. Dimopoulos and B. Wehrli, 2006. Biogenic silica accumulation in the sediments. *Aquatic sciences*, **68**(4): 469-481.
- Walling, D.E. and D. Fang, 2003. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*, **39**: 111-126.
- Williams, J.R., Dellapenna, T.M. and G.H. Lee, 2013. Shifts in depositional environments as a natural response to anthropogenic alterations Nakdong Estuary, South Korea. *Marine Geology*, **343**: 47-61.
- Yang, H.S., D.W. Hwang and G. Kim, 2002. Factors controlling excess radium in the Nakdong River Estuary, Korea : submarine groundwater discharge versus desorption from riverine particles. *Marine Chemistry*, **78**: 1-7.