

낙동강 하구 새섬매자기 군락지 지화학 연구

김윤지·강정원[†]·최재웅·박찬미·우한준

한국해양과학기술원

Geochemical Characteristics of *Scirpus planiculmis* Habitats in Nakdong Estuary, Korea

Yunji Kim·Jeongwon Kang[†]·Jae Ung Choi·Chan Mi Park·Han Jun Woo

Korea Institute of Ocean Science & Technology

(Received : 26 April 2019, Revised: 10 May 2019, Accepted: 10 May 2019)

요약

낙동강 하구는 다양한 하구개발로 인해 수리 및 지형적인 변화를 겪고 있는 지역으로, 이러한 물리화학적 변화는 낙동강 하구 생태계에 영향을 주고 있다. 특히 낙동강 하구에 도래하는 겨울철새들의 주요 먹이원인 새섬매자기 군락지 및 개체수는 지난 10여년간 지속적인 감소를 보이고 있다. 낙동강 하구의 새섬매자기 개체수 감소 원인 파악을 위해 6개 정점에서 2018년 6월과 8월에 약 30cm의 주상퇴적물을 채취하였다. 퇴적물은 사질이 80% 이상으로 매우 조립하였으며, 평균 염분은 6월 17.8±1.12 psu, 8월 18.4±1.83 psu였다. 을숙도 퇴적물의 탄소안정동위원소비($\delta^{13}\text{C}$)는 평균 $-24.7\pm 0.59\%$ 로 하구기원 입자성 유기물 특성을 보였다. 표층(0~1cm)에서 $\delta^{13}\text{C}$ 는 $-24.0\sim -22.6\%$ 로 새섬매자기 뿌리와 줄기의 $\delta^{13}\text{C}$ ($-25.2\pm 0.05\%$) 보다 다소 높았다. 이는 해양 유기물의 유입이 원인으로 판단된다. 식생지역과 비식생지역의 물리화학적 특성은 유의미한 차이를 보이지 않았으며, 이를 통하여 낙동강 하구 새섬매자기 군락지 환경이 비식생 지역과 거의 동일함을 유추할 수 있다. 결론적으로 낙동강 하구 퇴적물은 조립하고 염분이 15 psu 이상으로, 새섬매자기 생육에 불리한 환경이 유지되고 있음을 유추할 수 있다. 낙동강 염분 상승은 낙동강 하구둑 방류량의 감소가 원인으로 판단되며, 낙동강 하구 염분 상승이 새섬매자기 생산량의 점진적 감소에 영향을 주었을 것으로 보인다.

핵심용어 : 낙동강하구, 새섬매자기, 주상퇴적물, 탄소안정동위원소

Abstract

The Nakdong Estuary has experienced hydraulic and topographic changes over the last century, which have had negative effects of habitat loss and fragmentation. The population of *Scirpus planiculmis*, a major food plant for wintering birds in Nakdong Estuary, has decreased over the last decade. To identify factors that influence *S. planiculmis* population, 6 short core samples (about 30cm) were collected in June and August, 2018. The sand percentage was over 80% in every samples and the average sediment salinity in June and August were 17.8±1.12 psu and 18.4±1.83 psu, respectively. $\delta^{13}\text{C}$ of sediment cores varied from -25.4% to -22.6% which fall within the estuarine particulate organic matters. In cores collected in Eulsuk area, the highest $\delta^{13}\text{C}$ values were observed at the surface (0~1cm) indicating inputs of marine POM (particulate organic matter) to the Nakdong Estuary. No significant difference between vegetation and non-vegetation stations was observed in every items we investigated which might indicate that the physicochemical environment of vegetation area is almost same as that of non-vegetation area. Therefore, the high sand percentage and sediment salinity of Nakdong Estuary might affect the reduction in *S. planiculmis* population.

Key words : Nakdong Estuary, *Scirpus planiculmis*, sediment core, carbon stable isotope

1. 서 론

낙동강 하구는 삼각주 및 사주 등의 독특한 지형적 특성을 보이며, 높은 생물다양성 및 생산성, 지리적 중요도를 인정받아 1966년 천연기념물로 지정된 이후 법적 보호를 받고 있다. 낙동

강 하구의 사주 연안 및 사주와 사주 사이에는 갯벌이 발달되어 다양한 서식지를 형성하여 생물다양성 및 생산성이 높다. 다른 하구들과 마찬가지로 낙동강 하구 역시 높은 생산성과 외해로의 접근성으로 인해 예로부터 인간 활동의 중심지로 이용되어 왔으며, 최근 100년 동안 하구둑 및 방조제 설치, 간척, 매립 등의 다양한 하구개발을 겪고 있다. 특히 1987년 낙동강 하구둑 설치 이후 낙동강 하구는 기수역 및 기수층이 소실되고 지형이 급격히 바뀌는 등 다양한 환경변화가 일어나고 있다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
Korea Institute of Ocean Science & Technology
E-mail: jwkhang7@kiost.ac.kr

새섬매자기(*Scirpus planiculmis*)는 내염성이 있는 다년생 사초과 식물로, 우리나라에는 염도가 낮은 염습지에 주로 분포하는 것으로 알려져 있다(Yang et al., 1978; Lee et al., 1991; Yang and Kim, 1992; Shon et al., 2003). 새섬매자기는 덩이줄기인 괴경이 발달하여 여러 야생 동물의 주요 먹이원이 되는 식이식물이다(Fredrickson and Reid 1988; Essenlink et al., 1997). 낙동강 하구에서 새섬매자기는 겨울철새들의 주요 먹이원이다. 그러나 지난 10여년간 낙동강 하구의 새섬매자기 군락지 및 개체수가 점진적으로 감소하고 있는 추세이다(Kim et al., 2005).

새섬매자기를 비롯한 하구 먹이식물 생산량과 이를 섭취하는 생물 개체수에 대한 연구가 국내외에서 활발히 진행되어 왔다. 해외에서는 *Scirpus* spp. (*Bolboschoenus* spp.)의 서식 분포(Lubke, 1982; Edwards, 1992) 및 형태(Coops et al., 1996), *Scirpus* spp.와 이를 섭취하는 오리 및 어류 간의 상관관계(Atat, 1995; Bakker et al., 1999), *Scirpus* spp.의 염분 및 수심에 대한 적응력(Coops et al., 1994, 1996) 등 다양한 연구가 진행되어왔다. 국내에서는 새섬매자기의 생체량 변화와 조류 개체수 변화에 대한 연구가 주로 진행되어 왔다. Kim et al.(2005)은 낙동강 하구의 새섬매자기 생산량과 겨울 철새 개체수의 상관관계를 확인하였으며, You(2008)는 한강 하구역의 새섬매자기 군락지 감소가 철새 도래지 및 개체수에 미치는 영향을 연구하였다. Lim et al.(2009)은 한강 하구의 주요 식생 군락지의 퇴적물 특성 및 환경 요인에 대하여 조사하였다. Yi et al.(2011)은 낙동강 하구의 새섬매자기 군락지의 강수량과 기온, 서식지 염분 농도 및 퇴적물 특성을 조사하여 새섬매자기 개체수 변동과의 상관관계를 알아보았다.

과거 연구결과에 따르면, 낙동강 하구 새섬매자기 밀도는 2005년부터 2009년까지 점차 감소하였으며, 2010년에 다소 회복되었다(Yi et al., 2011). 특히 명지의 경우 2005년 대비 2008년 새섬매자기 밀도가 173% 증가하였으나, 2009년에 다시 급격히 감소하였다. 낙동강 하구에서는 겨울철새 개체수 유지를 위해 주요 먹이원인 새섬매자기 식재 사업이 2009년부터 진행되어 왔으며, 2011~2014년에는 을숙도 갯벌 및 일부 지역에서 새섬매자기 식재가 이루어졌다(Busan Metropolitan City, 2014). 그러나 낙동강 하구 새섬매자기 개체수는 계속 감소하고 있으며, 그 원인을 파악하기 위한 원인 분석이 필요할 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 새섬매자기 군락지 감소하는 원인을 파악하기 위하여 새섬매자기 서식지와 비서식지를 선정하여 탄소안정동위원소비를 비롯한 퇴적물의 지화학적 특성 및 환경인자를 조사하였다.

2. 재료 및 방법

낙동강 하구 을숙도와 명지 조간대에서 총 6개 정점을 선정하여 2018년 6월과 8월에 약 30 cm의 주상퇴적물과 새섬매자기 시료를 채취하였다(Fig. 1). 총 6개 정점 중 4개 정점(MJ02, MJ03, ES05, ES12)은 새섬매자기 군락지가 형성된 식생지역, 2개 정점(MJ01, ES11)은 새섬매자기가 서식하지 않는 비식생지역이었다. 주상퇴적물은 push-core 방식으로 채취하였으며, 현장에서 수직방향으로 갈라 퇴적물 pH를 측정

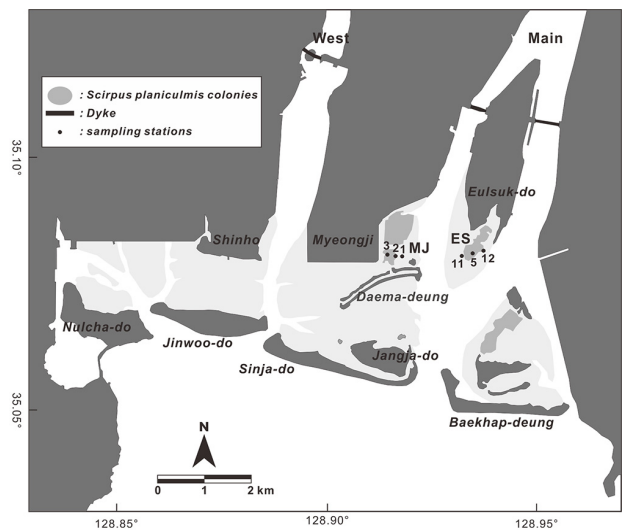


Fig. 1. The map of study area. MJ1 and ES11 are located in non-vegetation area and others are located in *Scirpus planiculmis* (*S. planiculmis*) vegetation area. The light gray areas are tidal flat and the dark areas are *S. planiculmis* habitats.

하였다(Direct Soil Measurement pH Portable Meter, HANNA Instruments, Romania). 이후 염분(Digital Hand-held "Pocket" SALT METER PAL-SALT, ATAGO, Japan)과 입도, 탄소동위원소비($\delta^{13}\text{C}$) 분석을 위해 주상퇴적물을 2 cm 간격으로 부표본 하였다.

퇴적물의 염분은 퇴적물 시료를 원심분리 하여 얻은 공극수를 이용해 측정하였다. 입도는 과산화수소와 염산을 이용하여 퇴적물 내 유기물 및 탄산염을 완전히 제거한 후 표준체와 SediGraph(SediGraph III PLUS, Micromeritics Instrument Corp., U.S.A.)를 이용하여 0.5 ϕ 간격으로 분리하였다. $\delta^{13}\text{C}$ 분석을 위하여 건조 후 곱게 간 분말시료를 1M HCl을 이용하여 하룻밤 동안 시약 처리한 후 건조시켰으며, 새섬매자기 시료는 뿌리, 줄기, 잎으로 나누어 건조하였다. 시약 처리한 퇴적물 분말시료와 새섬매자기 시료는 Iso-Analytical Ltd.(영국)에 의뢰하여 EA-IRMS(Elemental Analysis Isotope Ratio Mass Spectrometry)로 $\delta^{13}\text{C}$ 를 측정하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 주상퇴적물의 입도 및 염분 특성

퇴적물의 입자가 조립해질수록 토양의 수분 보유량이 감소하고 수분 증발률이 증가하여 토양의 염분을 증가시키는 경향이 있으며, 토양의 염분은 식물의 성장에 영향을 미친다(Yi et al., 2011). 특히 새섬매자기와 같은 사초과 식물은 점토질과 미사질이 각각 25~45%, 45% 이상인 미사질식토에서 가장 성장률이 높으며, 사질 함량이 높은 토양에서 가장 낮은 성장률을 보임이 보고된 바 있다(Barko and Smart, 1978; Yi et al., 2011).

2018년 6월 명지와 을숙도에서 채취한 주상퇴적물의 입도 분석 결과, 전 정점에서 사질(<4 ϕ) 함량이 80% 이상으로 매우 조립한 퇴적상을 보였으며, 식생 정점과 비식생 정점 간의 차이는 거의 보이지 않았다. 명지(MJ01, 02, 03)의 경우 17 cm

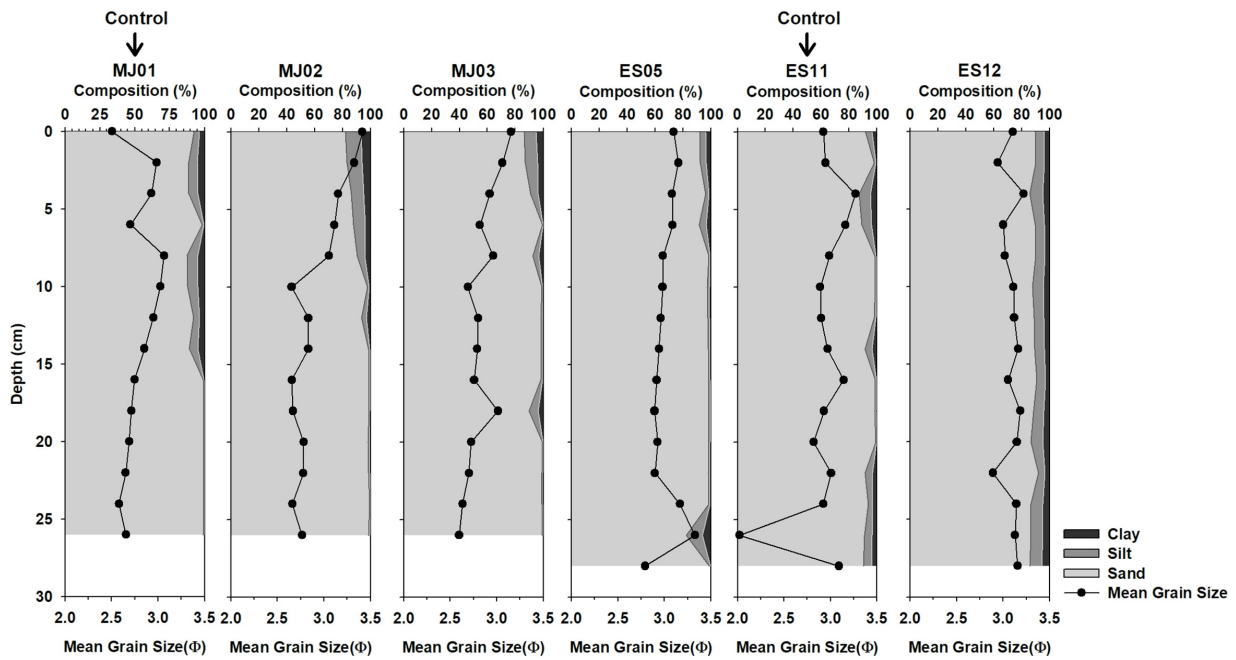


Fig. 2. The vertical profiles of grain-size composition and mean grain size of the sediment cores collected in June, 2018. The arrows indicate control stations which is non-vegetation area.

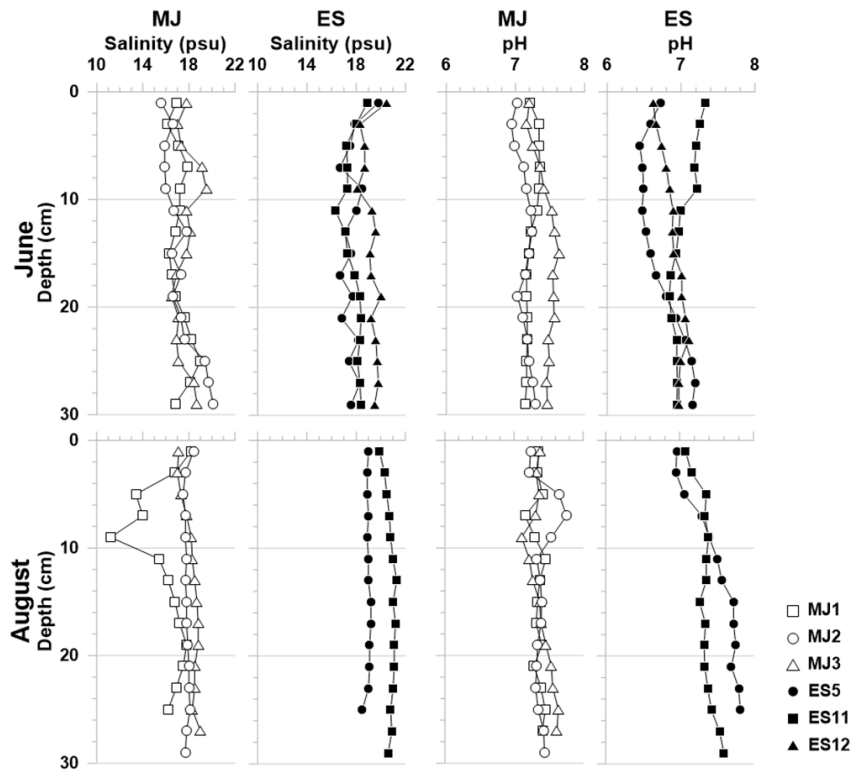


Fig. 3. The vertical profiles of salinity and pH of sediment cores collected in June and August, 2018.

깊이부터 세립질($>4\phi$)이 1% 미만으로 나타났으며, 을숙도의 ES12는 전 깊이에서 평균 세립질 함량이 11.5%로 상대적으로 세립질 함량이 높게 나타났다(Fig. 2). 명지의 깊이별 평균 입도는 깊이가 깊어질수록 감소하는 경향을 보였으나, 을숙도는 3ϕ 내외로 비교적 일정한 값을 보였다. 따라서 낙동강 하구의 퇴적물은 사질이 80%이상으로 매우 조립하여 사초과 식물 성

장에 좋지 않은 환경으로 판단된다.

한편 새섬매자기의 성장은 염분의 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있다. 새섬매자기는 4월~9월 사이에 성장하며, 지하부의 괴경이 남아 다음해에 다시 발아한다. 따라서 새섬매자기 서식지 퇴적물의 염분도는 새섬매자기 식생분포 및 성장률에 큰 영향을 미칠 것으로 사료된다. Lillebø et al.(2003)은 하구

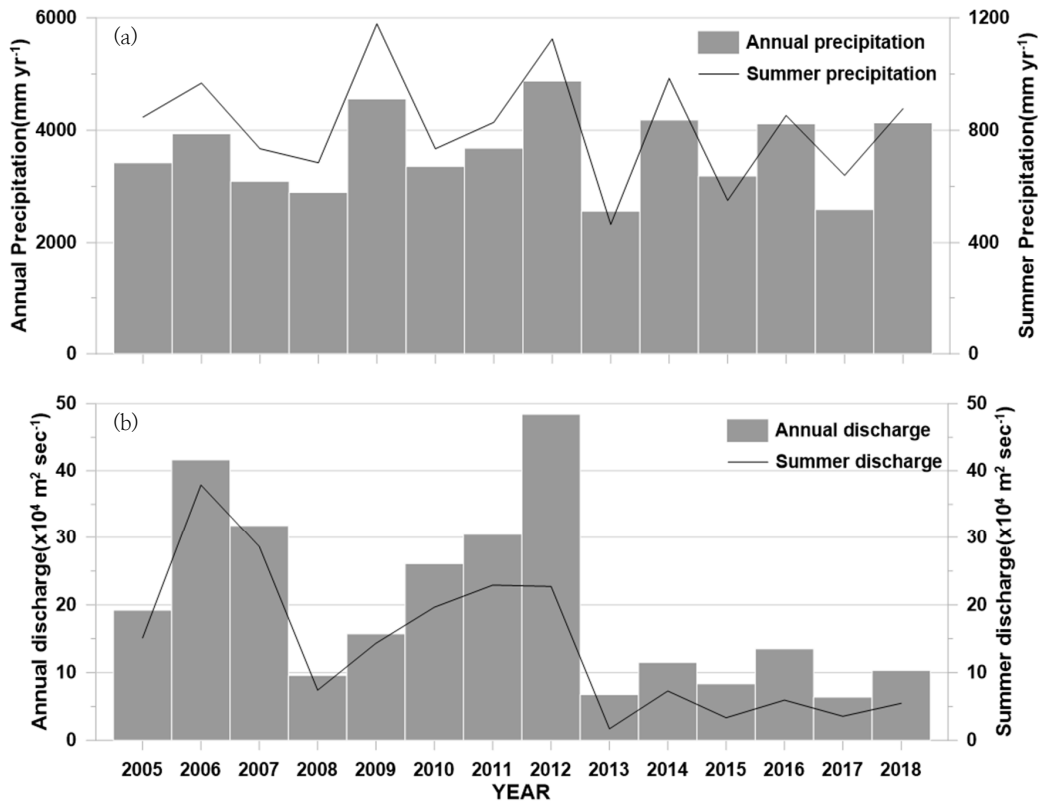


Fig. 4. (a) Annual and summer season (June~September) accumulated precipitation in Busan, (b) Annual and summer season accumulated discharge of Nakdong estuarine barrage from 2005 to 2018.

퇴적물의 염분이 증가할수록 새섬매자기 줄기 성장이 감소하며, 퇴적물 염분값이 20 psu 이상에서는 새섬매자기가 쇠퇴함을 확인하였다.

명지와 을숙도 주상퇴적물의 염분도는 8월 MJ01의 일부 구간을 제외하고 15 psu 이상으로, 명지보다 을숙도의 평균 퇴적물 염분값이 더 높게 관측되었다(Fig. 3). 깊이별 퇴적물 염분값은 6월보다 8월에 더 일정한 경향을 보였으며, 깊이별 퇴적물 염분 평균값은 6월 17.8±1.12 psu, 8월 18.4±1.83 psu였다. 새섬매자기 성장에 적합한 염분 범위는 0~15 psu으로(Lillebø et al., 2003; Kim et al., 2005) 낙동강 하구 퇴적물은 새섬매자기 성장에 부적합한 환경으로 판단된다.

퇴적물의 염분은 수분 증발, 강수량, 조석 강도 및 조석수의 염분 등의 영향을 받으므로(Adams and Bate, 1995) 낙동강 하구 퇴적물의 염분은 조석과 낙동강 하구둑 수문에 의해 조절될 것이다. 한국은 장마 등으로 인해 강수량 및 담수방류량이 여름철에 집중된다. 낙동강 하구가 접하고 있는 부산 역시 강우량이 여름철에 집중되므로 하구둑의 담수 방류량 역시 여름철에 높을 것으로 예상된다. 지난 2005년부터 2018년까지 부산지역의 강수량은 여름철(6~9월)에 집중되는 경향을 보였으나, 연도별 차이는 보이지 않았다(Fig. 4). 그러나 2005년부터 2018년까지의 낙동강 하구둑 방류량 조사 결과, 연 누적 방류량 및 하계 누적 방류량이 2008년과 2013년에 급격히 감소하였으며, 2013년 이후 그 방류량이 일정하게 유지되고 있었다. Yi et al.(2011)에 따르면, 2009년 상반기 방류량이 예년의 약 30%로 낮았으며, 이때 낙동강 하구의 염분 상승이 확인

되었다. Yeو(2009)는 2008년 이후 가뭄으로 인해 낙동강 하구둑 방류량이 감소하여 낙동강 하구 염분이 상승하였으며, 그 결과 새섬매자기 개체수 감소가 나타났다고 보고한 바 있다. 따라서 낙동강 하구둑 방류량 감소는 낙동강 하구 수층 및 퇴적물 염분 증가를 야기하였을 것으로 보이며, 이로 인해 낙동강 하구 새섬매자기 생체량이 감소하였을 것으로 판단된다.

3.2 주상퇴적물 내 pH 변화

퇴적물의 투수율은 분급도가 좋고 입자가 조립할수록 높은 것으로 알려져 있다(Shepherd, 1989). 명지와 을숙도 퇴적물의 평균 분급도는 0.80±0.32(0.33~1.59)로 비교적 양호하였으며 사질이 80% 이상인 조립한 퇴적상을 보였다. 따라서 낙동강 하구 퇴적물은 저층수가 유입되어 퇴적물의 지화학적 특성에 영향을 줄 것으로 예상된다. 이를 확인하기 위하여 국가 해양환경정보통합시스템(www.meis.go.kr)에서 낙동강 하구 을숙도와 명지 인근 8개 정점의 2018년 2월, 5월, 8월, 11월 수층 정보를 얻어 낙동강 하구 퇴적물의 염분 및 pH 값과 비교해 보았다. 낙동강 하구 저층수의 염분은 연평균 31.1±1.46 psu(26.9~33.6 psu) 였으며, 저층 pH는 연평균 8.16±0.12 (7.95~8.37)였다. 하계(8월) 저층수의 평균 염분은 31.1±1.09 psu(28.3~32.1 psu), 평균 pH는 8.07±0.03(8.02~8.12)였다.

본 연구에서 식생 지역 퇴적물 pH는 깊이가 깊어질수록 증가하는 경향을 보였으며, 비식생 정점 퇴적물 pH는 깊이가 깊어질수록 감소하는 경향을 보였다(Fig. 3). 또한 주상퇴적물 표층~10 cm 구간에서 퇴적물 pH는 비식생지역이 식생지역보다

높았다. 일반적으로 식생 지역의 퇴적물 pH는 식물 뿌리의 유기산 배출(Mucha et al., 2005; Koop-Jakobson et al., 2018), 미생물활동으로 인한 이산화탄소 유입(Blossfeld, 2013; Lenzewski et al., 2018) 등으로 인해 비식생지역보다 다소 낮은 퇴적물 pH를 보이는 것으로 알려져 있다. Mucha et al.(2005)과 Koop-Jakobson et al.(2018)는 식물 뿌리에서 구연산, 옥살산, 말론산과 같은 저분자 유기산이 분비됨을 확인하였으며, Hinsinger et al.(2003), Blossfeld(2013) 그리고 Lenzewski et al.(2018)는 뿌리와 미생물 호흡으로 발생한 이산화탄소가 퇴적물에 유입되어 근경 내 pH를 감소시킨다고 보고하였다. Yi et al.(2014)의 연구에서도 낙동강 하구의 식생 지역의 퇴적물 pH가 비식생 지역의 pH보다 낮고, 갈대 서식지보다 새섬매자기 서식지의 퇴적물 pH가 더 낮음이 보고된 바 있다. 따라서 비식생지역보다 식생지역의 pH가 낮은 원인은 새섬매자기 뿌리에서 일어나는 생화학적 반응의 결과로 생각된다.

3.3 주상퇴적물 내 유기물 기원

퇴적물의 탄소안정동위원소비($\delta^{13}C$)는 퇴적된 유기물의 기원을 확인에 유용한 지시자로 이용된다(Shin et al., 2012). 육상식물 기원 유기물, 하구기원 유기물 및 해양기원 유기물의 평균 $\delta^{13}C$ 은 각각 -26.3% , $-25.5 \pm 1.89\%$, $-18.9 \pm 2.08\%$ 이다(Kasai and Nakata, 2005). 2018년 6월 을숙도 주상퇴적물의 $\delta^{13}C$ 의 범위는 $-25.4 \sim -22.6\%$ 였으며, 표층을 제외한 전 깊이에서 일정한 경향을 보였다(Fig. 5). 을숙도에 위치한 세 정점 모두 하구기원 유기물 $\delta^{13}C$ 범위에 속하여 을숙도가 하구 환경에 속함을 알 수 있었다(Fig. 6).

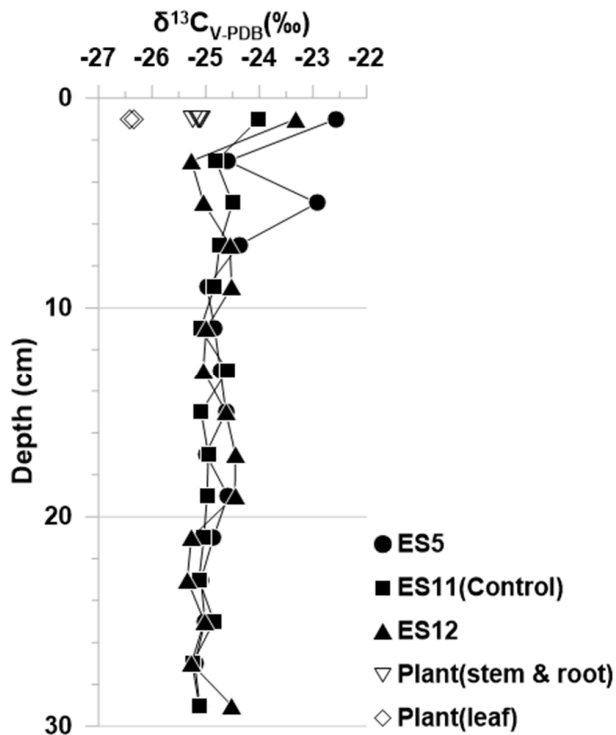


Fig. 5. The $\delta^{13}C$ values of *Scirpus planiculmis* and sediment cores collected at sampling stations in Eulsuk island in June, 2018.

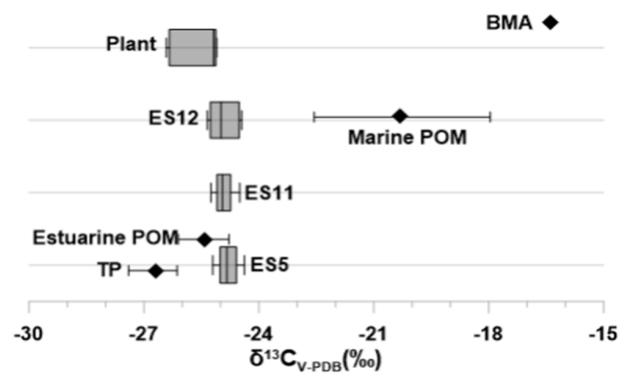


Fig. 6. The box plot of $\delta^{13}C$ in sediment cores and *Scirpus planiculmis* collected at Eulsuk island in June, 2018 together with marine and estuarine particulate organic matter (POM, \blacklozenge) by Shin et al.(2012).

일반적으로 식물은 ^{13}C 보다 가벼운 ^{12}C 를 우선적으로 사용한다. 새섬매자기 잎은 대기 중 이산화탄소를 이용하여 광합성을 하며, 이때 가벼운 ^{12}C 를 우선적으로 사용하여 잎의 $\delta^{13}C$ 가 낮은 값(-26.4%)을 보이는 것으로 생각된다. 잎에서 생성된 탄소유기물은 줄기를 통해 이동하며, 줄기에서 이루어지는 다양한 신진대사에서 가벼운 ^{12}C 가 우선적으로 이용된다. 이로 인해 줄기와 뿌리의 $\delta^{13}C$ (-25.2% , -25.1%)가 잎의 $\delta^{13}C$ (-26.4%)에 비해 높은 값을 보인 것으로 생각된다.

새섬매자기 줄기와 뿌리의 $\delta^{13}C$ 값(-25.2% , -25.1%)과 을숙도 주상퇴적물 $\delta^{13}C$ 값이 매우 비슷하여, 을숙도의 주된 유기물 기원은 새섬매자기의 줄기와 뿌리로 판단된다(Fig. 5). 그러나 새섬매자기 잎의 $\delta^{13}C$ (-26.4%)은 퇴적물보다 낮아 새섬매자기 잎은 을숙도에 퇴적되지 않고 이동할 것으로 생각된다(Figs. 5-6). 표층 퇴적물(1 cm)에서 특징적으로 높은 $\delta^{13}C$ 값을 보였으며, 이는 조석 등의 물리적 환경의 영향으로 해양기원 유기물이 유입되어 퇴적된 결과로 판단된다. 결론적으로 새섬매자기 군락지 분포는 퇴적 및 침식 작용보다 앞서 확인한 조립한 퇴적물 입도와 담수 유입 감소 등으로 인한 염분 상승의 영향을 받고 있는 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 명지와 을숙도의 새섬매자기 군락지와 비식생 지역의 퇴적물 지화학 특성을 통해 낙동강 하구의 새섬매자기 생산량 회복이 되지 않는 원인을 알아보았다. 낙동강 하구 퇴적물은 사질이 80% 이상인 조립한 입도를 보였으며, 평균 퇴적물 염분은 6월 17.8 psu, 8월 18.4 psu로 새섬매자기 생장에 적합한 염분 범위를 넘어서는 것으로 확인되었다. 이는 낙동강 하구둑의 담수 방류량 감소가 원인으로 판단되며, 2013년 이후 하구둑의 방류량이 적게 유지되고 있다. 한편 을숙도 주상퇴적물의 표층에서 높은 $\delta^{13}C$ 값을 보여 낙동강 하구가 해양의 영향을 많이 받고 있는 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국해양과학기술원 연구비 지원(해양공간 통

합관리 연구, PE99743)에 의해 수행된 연구이며, 논문을 심사해 주시고 귀한 의견을 주신 익명의 심사위원님들께 감사드립니다.

References

- Adams, JB, Bate, GC (1995). Ecological implications of tolerance of salinity and inundation by *Spartina maritima*, *Aquat. Bot.*, 52, pp. 183–191. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(95\)00496-3](https://doi.org/10.1016/0304-3770(95)00496-3)
- Amat, JA (1995). Effects of wintering greylag geese *Anser anser* on their *Scirpus* food plants, *Ecography*, 18(2), pp. 155–163. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.1995.tb00336.x>
- Bakker, L, Van der Wal, R, Esselink, P and Siepel, A (1999). Exploitation of a new staging area in the Dutch Wadden Sea by greylag geese *Anser anser*: the importance of food-plant dynamics, *Ardea*, 87, pp. 1–13.
- Barko, JW and Smart, RM (1978). The growth and biomass distribution of two emergent freshwater plants, *Cyperus esculentus* and *Scirpus validus*, on different sediments, *Aquatic Botany*, 5, pp. 109–117. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(78\)90054-2](https://doi.org/10.1016/0304-3770(78)90054-2)
- Blossfeld, S (2013). Light for the dark side of plant life:—Planar optodes visualizing rhizosphere processes, *Plant and soil*, 369(1–2), pp. 29–32. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-013-1775-0>
- Coops, H, Geilen, N, & van der Velde, G (1994). Distribution and growth of the helophyte species *Phragmites australis* and *Scirpus lacustris* in water depth gradients in relation to wave exposure, *Aquatic Botany*, 48(3–4), pp. 273–284. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0304-3770(94)90020-5)
- Coops, H, van den Brink, FW and Van Der Velde, G (1996). Growth and morphological responses of four helophyte species in an experimental water–depth gradient, *Aquatic Botany*, 54(1), pp. 11–24. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(96\)01025-X](https://doi.org/10.1016/0304-3770(96)01025-X)
- Edwards, GS (1992). Root distribution of soft-stem bulrush (*Scirpus validus*) in a constructed wetland, *Ecological Engineering*, 1, pp. 239–243. DOI: [https://doi.org/10.1016/0925-8574\(92\)90005-M](https://doi.org/10.1016/0925-8574(92)90005-M)
- Esselink, P, Helder, GJF, Aerts, BA and Gerdes, K (1994). The impact of grubbing by greylag geese on the vegetation dynamics of the tidal marsh in the Ems Dollard estuary, *Ophelia-Supplements*, (6), pp. 348–348.
- Fredrickson, LH and Reid, FA (1988). Nutritional values of waterfowl foods. Waterfowl management handbook, Fish and Wildlife Leaflet 13.
- Hinsinger, P, Plassard, C, Tang, C and Jaillard, B (2003). Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: a review. *Plant and soil*, 248(1–2), pp. 43–59. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1022371130939>
- Kasai, A and Nakata, A (2005). Utilization of terrestrial organic matter by the bivalve *Corbicula japonica* estimated from stable isotope analysis, *Fisheries Science*, 71, pp. 151–158. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1444-2906.2005.00942.x>
- Kim, GY, Lee, CW, Yoon, HS and Joo, GJ (2005). Changes of Distribution of Vascular Hydrophytes in the Nakdong River Estuary and Growth Dynamics of *Schenoplectus triqueter*, Waterfowl Food Plant, *Korean J. Ecol.*, 28(5), pp. 335–345. [Korean literature] DOI: <https://doi.org/10.5141/JEFB.2005.28.5.335>
- Koop-Jakobsen, K, Mueller, P, Meier, RJ, Liebsch, G and Jensen, K (2018). Plant-sediment interactions in salt marshes – an optode imaging study of O₂, pH, and CO₂ gradients in the rhizosphere, *Frontiers in plant science*, 9. DOI: [10.3389/fpls.2018.00541](https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00541)
- Lee, KS, Han, GH, Park, SH and Choi, SY (1991). Growth Habits of *Scirpus planiculmis* F. Schmidt in Poldered Paddy Field. *Korean J. of weed science*, 11(2), pp. 111–116. [Korean literature]
- Lenzowski, N, Mueller, P, Meier, RJ, Liebsch, G, Jensen, K and Koop-Jakobsen, K (2018). Dynamics of oxygen and carbon dioxide in rhizospheres of *Lobelia dortmanna* – a planar optode study of belowground gas exchange between plants and sediment, *New Phytologist*, 218(1), pp. 131–141. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.14973>
- Lillebø, AI, Pardal, MA, Neto, JM and Marques, JC (2003). Salinity as the major factor affecting *Scirpus maritimus* annual dynamics: evidence from field data and greenhouse experiment, *Aquatic Botany*, 77(2), pp. 111–120. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(03\)00088-3](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(03)00088-3)
- Lim, B, Ki, B and Choi, JH (2009). A Study on the Biogeochemistry of the Sediments in the Han River Estuary, *Environmental Engineering Research*, 31(10), pp. 839–844. [Korean literature]
- Lubke, RA and Avis, AM (1982). Factors affecting the distribution of *Scirpus nodosus* plants in a dune slack community, *South African J. of Botany*, 1, pp. 97–103. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-4618\(16\)30157-7](https://doi.org/10.1016/S0022-4618(16)30157-7)
- Busan Metropolitan City. (2014). Monitoring of *Bolboschoenus planiculmis* at restored sites on Eulsuk Island. [Korean literature]
- Mucha, AP, Almeida, CMR, Bordalo, AA and Vasconcelos, MTS (2005). Exudation of organic acids by a marsh plant and implications on trace metal availability in the rhizosphere of estuarine sediments, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 65(1–2), pp. 191–198. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.06.007>
- Shepherd, RG (1989). Correlations of permeability and grain size, *Groundwater*, 27(5), pp. 633–638. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(89\)90054-2](https://doi.org/10.1016/0304-3770(89)90054-2)

- doi.org/10.1111/j.1745-6584.1989.tb00476.x
- Shin, WS, Aikawa, Y and Nishimura, O (2012). Chemical Properties of Sediment in Nanakita Estuarine Tidal Flat: Estimation of Sedimentary Organic Matter Origin by Stable Isotope and Fatty Acid, *Environmental Engineering Research*, 17(2), pp. 77-82. DOI: <https://doi.org/10.4491/eer.2012.17.2.077>
- Shon, YG, Choi, SH, Kim, SR, Park, EJ, Park, DM and Lee, JJ (2003). Effect of NaCl Stress on the Alteration of Inorganic Ion and Soluble Amino Acid Level in Sea Club Rush and Rice Seedlings, *Kor. J. Wee Sci.*, 23(4), pp. 343-350. [Korean literature]
- Yang, HK and Kim, OK (1992). Environmental factors influencing on tuber germination in *Scirpus maritimus* L., *Korean J. Ecol.*, 15(2), pp. 127-135. [Korean literature]
- Yang, HS, Chun, JC and Moon, YH (1978). Control of Perennial Weed *Scirpus maritimus* L. in Reclaimed Paddy Fields of West Seashore - I. Distribution of *S. maritimus*, *Korean J. of Crop Science*, 28(3), pp. 255-263. [Korean literature]
- Yeo, US (2009). Preservation and restoration of *Scirpus planiculmis*, Strategy Seminar for Preservation of Salt Marsh Ecosystem, pp. 43-45. [Korean literature]
- Yi, YM, Yeo, US and Sung, K (2014). Soil properties of barrier island habitats in the Nakdong river estuary, *J. of Wetlands Research*, 16(3) pp. 355-362. [Korean literature] DOI: <https://doi.org/10.17663/JWR.2014.16.3.355>
- Yi, YM, Yeo, US, Oh, DH and Sung, K (2011). Annual Changes in *Scirpus planiculmis* and Environmental Characteristics of the Nakdong River Estuary, *J. of Wetlands Research*, 13(3), pp. 567-579. [Korean literature] DOI: <https://doi.org/10.17663/JWR.2011.13.3.567>
- You, YH (2008). Population decline cause of *Scirpus planiculmis* and its restoration plan in Han River Wetland Conservation Area, South Korea, *J. of Wetlands Research*, 10(2), pp. 165-172. [Korean literature]