

Note

낙동강하구 새섬매자기(*Bolboschoenus planiculmis*) 복원 모니터링: 식물체(shoot) 식재를 이용한 습지복원

김구연^{1,2,*} · 박희순^{3,4} · 김화영⁵ · 이지영⁵

¹경남대학교 과학교육과, ²경남대학교 생물다양성센터, ³부산대학교 생명시스템학과,
⁴낙동강하구에코센터, ⁵한국수자원공사 (K-water)

Monitoring on *Bolboschoenus planiculmis* Restoration in Nakdong River Estuary: Implications for Wetland Restoration Using Shoot Transplantation. Gu-Yeon Kim^{1,2,*} (0000-0003-1071-0383), Hee Sun Park^{3,4} (0000-0002-9649-5196), Hwa Young Kim⁵ (0000-0002-6894-4388) and Ji-Young Lee⁵ (0000-0003-0812-9864) (¹Department of Sciences Education, Kyungnam University, Changwon 51767, Republic of Korea; ²Biodiversity Center, Kyungnam University, Changwon 51767, Republic of Korea; ³Department of Integrated Biological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea; ⁴Nakdong Estuary Eco Center, Busan 49435, Republic of Korea; ⁵K-water, Busan office, Busan 49300, Republic of Korea)

Abstract *Bolboschoenus planiculmis* has been acknowledged as a key species in whooper swans (*Cygnus cygnus*) habitat by providing food for this migratory waterfowl. *B. planiculmis* wetlands are being degraded by water shortages and salinization caused by anthropogenic activities and climate changes. In 2004, the distribution of *B. planiculmis* in the tidal flats of the Nakdong Estuary was 2,475,568 m², and in 2021, the distribution area was 798,731 m², which decreased by 32.3%. In order to restore the degraded *B. planiculmis* wetlands, shoot transplantation and seed sowing were tentatively used in three places with different salinity and water levels. The average density per unit area in September at the optimal growth period after planting were A (fresh water level 50 cm) 58 ± 15.65 m⁻², B (brackish water level 0~5 cm) 188 ± 63.83 m⁻², C (brackish water level 0 cm or less) 188 ± 45.13 m⁻². The tubers were observed as A 0 g dw m⁻², B 25.32 ± 2.94 g dw m⁻², and C 13.39 ± 0.91 g dw m⁻². Tubers were distributed in the soil, with only 3.0% at the 10~20 cm depth but 97.0% at the 0~10 cm depth. In contrast, the germination rate of *B. planiculmis* seeds was observed to be 0%. Results of this study provide technical support for the restoration of *B. planiculmis* wetland and the improvement in the quality of whooper swans habitat.

Key words: *Bolboschoenus planiculmis*, Nakdong River Estuary, transplantation, restoration

서 론

Manuscript received 25 October 2022, revised 4 November 2022,
revision accepted 4 November 2022
* Corresponding author: Tel: +82-055-249-2447, Fax: +82-0505-999-2150
E-mail: kimguyeon@kyungnam.ac.kr

낙동강하구는 크고 작은 해안사구가 발달한 독특한 지형적 특성과 하구식생을 비롯한 다양한 어류와 패류 그리고 수서곤충 등이 풍부하여 생물다양성이 높고, 동아시아 철새 이

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provide the original work is properly cited.

동경도로 지리적 중요도를 인정받아 1966년 천연기념물 지정을 시작으로 연안오염특별관리해역, 자연생태계보전지역, 자연환경보전지역, 습지보호지역으로 중복 지정되어 법적 보호를 받고 있는 지역이다. 하구는 세계적으로 보전 가치가 높게 평가됨에도 불구하고 기후변화와 인간활동의 중심지로 이용되어 간척, 매립 그리고 하굿둑 건설 등 다양한 개발로 자연을 훼손하였고 하구습지에 심각한 문제를 초래하고 있다(Dwire *et al.*, 2018; Lou *et al.*, 2018). 특히 식물 개체군 특성의 변화로 이어지는 주요 비생물적 압력으로서 수문학적 과정은 잠재적으로 습지 식물 개체군에 영향을 미치는 가장 중요한 요소 중 하나이다(Zhou *et al.*, 2018). 낙동강하구는 1987년 낙동강하굿둑 설치 이후 기수역 소실과 급격한 지형변화로 자연환경이 급격히 변화하여 많은 면적의 습지가 훼손되거나 소멸되어 황폐화가 가속화되고 있는 실정이다.

낙동강하구는 국제적으로 중요한 습지이며 동아시아 철새의 중요한 휴식처이다. 천연기념물 고니와 큰고니 등 다양한 법적보호종은 에너지 보충과 휴식을 위해 낙동강하구에서 겨울 동안 휴식을 취한다. 따라서 희귀조류 서식지의 복원 및 관리를 위해서는 수문과 습지 식물의 생태적 특성에 미치는 영향을 파악하는 것이 중요하다. 토착 다년생종인 새섬매자기는 낙동강하구의 간조 시 드러나는 갯벌에 널리 분포하는 식물이다.

새섬매자기 (*Bolboschoenus planiculmis*)는 4~5월에 종자 발아를 통한 무성생식과 지하부의 괴경(tuber)을 통한 영양 번식을 통해 무성번식을 하는 사초과의 다년생 정수성 수생 식물이다(Kim *et al.*, 2005; An *et al.*, 2018). 염분에 대한 내성을 가진 식물로, 우리나라에는 염도가 낮은 염습지 하구역에 주로 분포하는 것으로 알려져 있다. 낙동강하구에서 새섬매자기 지하부의 영양이 풍부한 괴경(tuber)은 천연기념물로 보호받는 고니와 큰고니를 비롯하여 봄철 통과조류인 도요물떼새류의 주요 먹이자원이다(Kim *et al.*, 2005, 2013; Nam and Kim, 2017). 따라서 새섬매자기 지하부의 괴경 분포는 희귀 조류 서식지의 질을 결정하는 중요한 인자이다.

새섬매자기에 대한 연구는 국내외에서 활발히 진행되어 서식분포(Lubke and Avis, 1982; Edwards, 1992; Kim *et al.*, 2005)와 형태 특성(Coops *et al.*, 1996)을 시작으로, 퇴적물 특성(Kim *et al.*, 2019), 염분 및 수심에 대한 적응력(Coops *et al.*, 1994, 1996), 경쟁종 유무에 따른 분포(Yang *et al.*, 2020), 영양분에 대한 내성(Hroudová *et al.*, 2014; Ma *et al.*, 2020), 홍수와 조석 그리고 인공제방 영향(Yang *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022), 수문류와 방류량 그리고 식물의 상관관계(Kim *et al.*, 2013; Kim and Kim, 2021)에 이르기까지 다양한 연구가 진행되어 왔다. 지금까지 연구는 현장 조사 분석을 통한 식물의 서식분포양상과 계절적 성장과 생산량에 대

한 연구가 대부분이며, 식물의 환경요인에 대한 특성연구는 대부분 화분을 이용한 실험실 실험으로 진행되어 왔다. 연구 결과를 바탕으로 현장에 적용하여 복원 성공 여부 모니터링 연구는 거의 이루어지지 않았다. 실험실은 다른 요인이 배제된 환경으로 자연생태계에서 다양한 환경의 영향에 노출되어 있는 곳과 동일한 결과를 예상하기는 곤란하다. 따라서 수집된 결과를 바탕으로 자연훼손으로 실제 밀도가 낮아진 지역의 생태계에 현장적용 후 평가가 무엇보다 필요한 것으로 판단된다.

지난 10여 년간 낙동강하구의 새섬매자기 분포면적과 단위면적당 생체량은 급격하게 감소 후 회복되지 않고 있는 실정이다(Kim, 2020). 과거 연구 결과에 따르면, 낙동강하구 새섬매자기 분포감소는 오랜기간 동안 방류량 감소와 갈수기 등 염분농도의 상승으로 인한 결과이다(Yi *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2019; Kim and Kim, 2021). 새섬매자기 군락의 급격한 감소 이후 오랜기간 비식생지역을 유지하고 있는 새섬매자기 군락지 갯벌의 식생 회복을 위하여 식물의 괴경이나 식물체를 이용한 식재를 통한 복원이 시급한 실정이다(Kim, 2020). 낙동강하구 복원을 위하여 2021년 하굿둑 개방과 함께 기존 자연서식지로 조석에 의해 수위가 매일 두 번씩 침수와 건조가 일어나는 율속도와 명지 갯벌 그리고 신규 하굿둑 상부의 집중강우 시 인공제방에 의해 침수가 유지되는 담수역의 맥도준설장에 식물체 식재를 통한 복원 사업이 진행되었다. 식재시기와 방법은 과거 결과를 참고하여 3~4개체씩 20 cm 간격으로 식물체 식재가 진행되었으며, 염분농도가 높은 식물성장기를 피해서 강수량과 방류량이 많아 염분농도가 급감하는 일반적 식재 시기인 봄 계절이 아닌 여름 계절 8월에 식물체 식재가 진행되었다. 따라서 본 연구는 훼손된 낙동강하구 새섬매자기의 분포를 정량적으로 조사하고, 여름 계절의 식물체 식재를 통한 복원 후 식물의 발달 및 확대 가능 여부 평가와 함께 방류량과 수위에 따른 새섬매자기 식물의 성장과 정착에 대하여 연구하였다. 본 연구의 복원 평가 결과는 낙동강하구 새섬매자기 습지 복원 및 보존을 위한 관리지침을 제공할 것으로 기대한다.

재료 및 방법

1. 연구대상지 및 조사시기

본 연구의 대상지역은 부산광역시 사하구에 위치한 낙동강 최하류 지역의 낙동강하구 일대이다. 낙동강하구는 해안 사구가 발달되었고, 조석의 영향을 받는 넓은 갯벌에는 새섬매자기 군락이 발달하고 있다(Kim, 2020). 식물체(shoot)를 이용하여 식재를 통한 복원이 이루어진 곳은 낙동강하굿둑

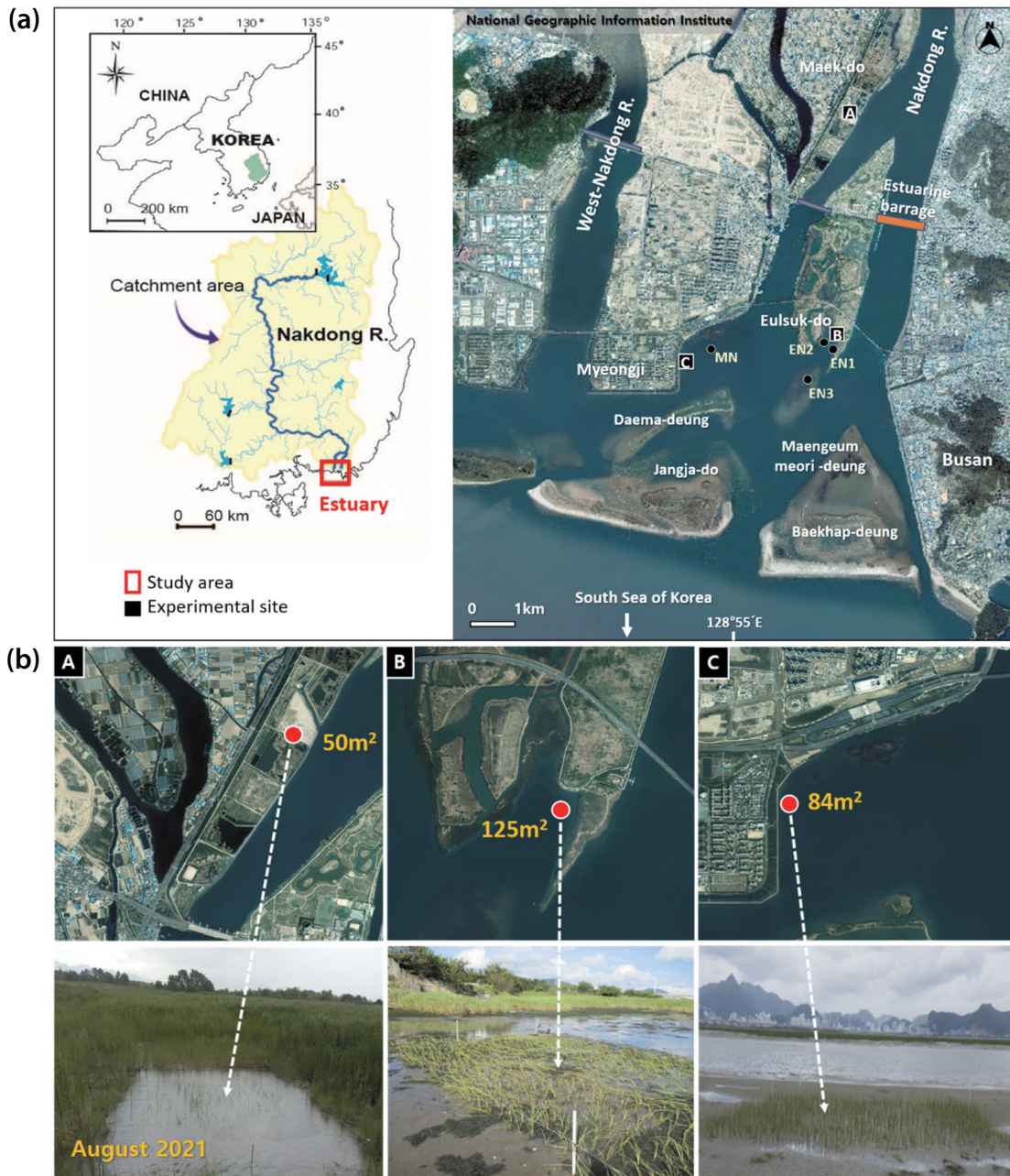


Fig. 1. Map of the study area. (a) Nakdong River estuary and location of sampling sites, (b) location of experimental sites and photos of *B. planiculmis* stands (A, Yeommak; B, Eulsukdo; C, Myeongji).

을 경계로 상부의 담수의 영향을 받는 맥도(염막) 준설토 적치장(맥도생태공원 하류부), 하단부의 염분농도의 영향을 받는 을숙도 남단 갯벌과 명지 갯벌 총 3개소이다(Fig. 1). A지점 맥도(염막)는 인공제방으로 인해 여름 집중강우로 유입된 물이 식재 후 모니터링 기간 동안 물이 빠지지 않고 50~60 cm 수심을 계속 유지하여 항상 침수된 조수 제한의 조건이다. B지점 을숙도는 자연적인 조수의 영향으로 토양이 드러

나는 곳으로 간조 시 갯벌은 토양 0~5 cm 수위로 항상 축축한 곳, C지점 명지는 수로가 있는 간조 시 토양이 완전히 드러나 지하수위가 0 cm 이하인 곳이다. A지역 맥도(염막) 준설토 적치장은 하굿둑 상부에 위치하여 염분의 영향을 받지 않는 담수지역이다. B지역 을숙도 남단 갯벌과 C지역 명지 갯벌은 조석의 영향지역으로 하루 두 번 간조 시에 갯벌이 완전히 드러나는 곳으로 바다의 조석 영향을 많이 받는 기수

역 지역이다.

식물체 식재를 이용한 복원은 3개소 총 면적 259 m², A 적치장 50 m²에 5,000본, B 을숙도 125 m²에 35,200본, C 명지 84 m²에 10,000본으로 총 50,200본이 2021년 8월 17일과 18일에 식재되었다. 복원지 조사기간은 2021년 8월부터 10월까지 총 5회 현장 조사를 실시하였다. 을숙도와 명지 복원지는 기존 새섬매자기 군락지로 자연성이 높고 인간활동에 따른 교란이 적으며, 겨울철 하구를 찾는 고니를 비롯한 수금류가 가장 먼저 이용하는 지역이다(Kim *et al.*, 2005). 맥도(염막) 준설토 적치장은 새섬매자기가 분포하지 않는 지역으로 식재 전 토양을 갈아엎어 갈대를 비롯한 주변 식생을 모두 제거하여 비식생으로 처리 후 식재가 이루어졌다.

연구지역은 남부지역의 해안에 위치하고 있어 해양성 기후의 특징을 가지며, 사계절이 뚜렷한 온대기후이다. 평균기온과 강수량은 30년(1991년부터 2020년까지) 평균기온 14.5°C, 평균강수량 1,395 mm이며, 2021년 평균기온은 30년 평년값보다 1.85°C가 높았고, 7월과 8월의 강수량은 400 mm 이상을 기록하여 하계집중형 강우패턴을 보였다(AMO, 2021).

새섬매자기 발아 및 생장에 중요한 환경조건인 수온과 염분 측정을 위해 새섬매자기 식재지 3개소에 수온 및 염분 센서(CTD-diver)를 설치하였다. 수온과 전기전도도 그리고 염분은 10분 간격으로 측정하였으며, 측정된 값은 간조기 값을 제외하고 나머지 측정값으로 1일 평균값을 구하였다.

2. 새섬매자기 분포 및 복원 모니터링

낙동강하구에 분포하는 새섬매자기 군락 면적을 파악하기 위해서 드론 항공사진을 기초자료로 활용하여 현장 조사를 병행하였다. 드론 촬영은 새섬매자기가 최대로 성장한 시기(9월)의 간조 시간대(가덕도 기준, 간조수위 50 cm 이하)에 맞춰 무인항공기(Phantom 4 pro, Mavic 2 pro) 2대로 촬영하였다. 드론 촬영 시, 중중복도와 횡중복도는 75%와 60%로 설계하여 해상도(Ground resolution)는 최대 11 cm의 영상을 촬영하였고, Agisoft Metashape Professional 1.7.3 (Geoscan group, Russian) 소프트웨어를 이용하여 정사영상을 구축하였다. 낙동강하구 정사영상을 기초자료로 현장 조사를 병행하여 새섬매자기 군락의 경계를 확인 후 확정하였으며, QGIS 3.10 (QGIS Development Team) 소프트웨어를 이용하여 분포도를 작성하고 새섬매자기 면적을 계산하였다.

새섬매자기의 복원지의 계절별 밀도 및 길이성장 관찰은 2021년 8월부터 10월까지 연구대상지 3개 복원지에서 식물체 식재 후 50일 동안 5회에 걸쳐서 현장 조사를 수행하였다. 새섬매자기의 밀도 조사는 식재지역에서 각각의 20개의

방형구(0.5 m×0.5 m)를 이용하여 조사하였으며, 단위면적당(1 m×1 m) 밀도로 환산하였다. 길이생장은 무작위로 식물을 50개체 선정하여 채취하였다. 채취한 식물의 지상부는 실험실로 운반한 후 줄자를 이용하여 식물의 길이를 측정하였고, 개화 유무를 관찰하였다. 새섬매자기 생산성 조사는 9월과 10월에 총 2회 조사하였다. 조사지점별로 각각 5개의 방형구를 설치하고, 방형구 내 새섬매자기를 지하부의 뿌리까지 채취하여 지상부와 지하부를 분리하였다. 지하부의 괴경은 22 cm×12 cm×30 cm(가로×세로×깊이)의 자체 제작한 캔코어 채집통을 이용하여 채집하였으며, 매립되어 있는 저토의 깊이에 따라 0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm로 구분하여 각 깊이별 괴경의 출현 개수와 건중량을 측정하여 평균값으로 나타내었다. 식물의 각 기관은 80°C에서 항충이 될 때까지 건조시킨 후 건중량을 측정하였다.

새섬매자기 복원지역의 환경요건(수심 50 cm 이상의 침수된 담수, 조석으로 매일 2회의 침수와 노출이 반복되는 염분 영향지역)에 따른 성장 비교 통계분석은 SPSS 프로그램을 활용하여 one-way ANOVA와 Tukey's test로 유의성을 검정하였으며, 통계적 유의수준은 $p < 0.05$ 를 기준으로 하였다.

결과 및 고찰

낙동강하구의 새섬매자기 복원지 3개소에서 연구기간 동안 식물의 식재 후 일별 강수량과 염분 그리고 방류량과 염분 특성을 Fig. 2에 나타내었다. A지점은 낙동강하굿둑 상부에 위치하여 방류량과 무관하여 강수량과 염분을 비교하였으며, 나머지 두 곳은 낙동강하굿둑 하부에 위치하여 방류량의 영향을 받는 곳에 위치하여 방류량과 염분농도 변화를 비교하였다. 식재지별 월별 평균염분을 분석한 결과, 을숙도 복원지(B) 갯벌 8월(20일부터 31일까지 12일 동안) 평균 염분 3.14 psu, 9월(30일) 10.55 psu, 10월(5일) 13.30 psu로 관찰되었으며, 명지 복원지(C) 갯벌 8월 3.02 psu, 9월 11.99 psu, 10월 14.65 psu로 관찰되었다. 맥도(염막) 준설토 적치장(A)의 경우 0.05 psu에서 0.11 psu의 범위로 염분변화가 거의 없는 담수 상태였다(Fig. 2A). 2021년 낙동강하굿둑 방류량과 염분농도 변화는 을숙도 복원지(B) 피어슨 상관계수 $R = -0.781$, 명지 $R = -0.769$ 로 강한 음의 상관성이 관찰되었다(Fig. 2). 방류는 비가 온 이후 연속적으로 이루어졌으며, 염분농도는 을숙도 복원지(B)에서 방류 전 12.76 psu에서 1 psu 이하로(Fig. 2B), 명지 복원지(C) 15.61 psu에서 1 psu 이하로(Fig. 2C) 급감하였다. 이후 방류량 감소와 함께 두 복원지의 염분농도는 이전 염분농도로 회복되었다(Fig. 2). Kim and Kim (2021)의 2008년부터 2018년까지 낙동강하굿둑 방

방류량과 염분농도의 음의상관 결과와 일치하였다. 새섬매자기 서식처 회복과 새섬매자기 서식처 확장을 위해서는 낙동강 하굿둑의 수문조절이 중요한 요인으로 작용할 수 있을 것으로 판단된다.

방류량과 염분변화 결과 방류량이 커지면서 염분농도는 담수확산에 따라 급진적으로 낮아지고 방류량이 낮아지면 염분은 급진적으로 상승하여 기존값으로 회복되어 방류량과

염분은 강한 음의 상관관계를 나타내었다(Fig. 2). Kim *et al.* (2019)은 2008년과 2009년의 방류량 급감과 2013년 이후 방류량 급감으로 낙동강하구의 퇴적물은 염분농도 15 psu 이상 관찰되어 새섬매자기 생육 억제를 보고하였다(Lee *et al.*, 2008). 또한 낙동강하굿둑의 2009년부터 2018년까지 방류량과 염분농도 그리고 새섬매자기의 분포의 관계분석 결과 강수의 직접적인 영향이 아니라 방류의 양에 의해 조절되는 것으로 보고되었다(Kim and Kim, 2021). 낙동강하구의 연구기간 동안 일 방류량 $100 \text{ (m}^3 \text{ sec}^{-1})$ 이하의 경우 새섬매자기의 생육 저해 염분기준 15 psu 이상이 관찰되었으며, $500 \text{ (m}^3 \text{ sec}^{-1})$ 이상 방류 시 염분농도가 낮아져서 적절한 염분농도가 관찰되었다. 이러한 결과는 방류량 증가는 식물의 분포 확대 가능성을 의미하며, 연간 매일 일정하게 일정량 이상의 지속적 방류가 고려된다면 하구생태계가 기수역으로서 안정된 생태계를 유지할 수 있을 것으로 판단된다.

낙동강하구의 크고 작은 사주와 사주의 갯벌에 분포하는 새섬매자기의 분포는 Fig. 3과 Table 1에 나타내었다. 낙동강하구의 새섬매자기군락은 2004년에 $2,475,568 \text{ m}^2$ 면적이 분포하였으나 2021년은 총 면적 $798,731 \text{ m}^2$ 로 32.3%로 크게 감소하였다. 을숙도는 $400,925 \text{ m}^2$ 에서 $95,240 \text{ m}^2$ 로 약 23.8%, 명지 $563,266 \text{ m}^2$ 에서 $358,695 \text{ m}^2$ 로 63.7%로 감소하였으며, 백합등, 도요등에서는 새섬매자기의 군락 분포가 더 이상 관찰되지 않았다. 본 연구 결과는 이전의 하굿둑으로부터 멀리 떨어진 갯벌에 분포하는 새섬매자기의 분포 감소 결과와 일치하였다(Kim *et al.*, 2016). 최근 들어 기후변화로 가을과 봄철의 가뭄으로 낙동강하굿둑 방류량의 급격한 감소와 이로 인한 염분상승으로 기수생태계의 피해가 보고되고 있어 하구생태계 관리 기술 개발이 시급한 것으로 판단된다(Yi *et al.*, 2011; Park *et al.*, 2016). 또한 고니를 비롯한 멸종위기 야생생물의 먹이원으로 중요한 새섬매자기 분

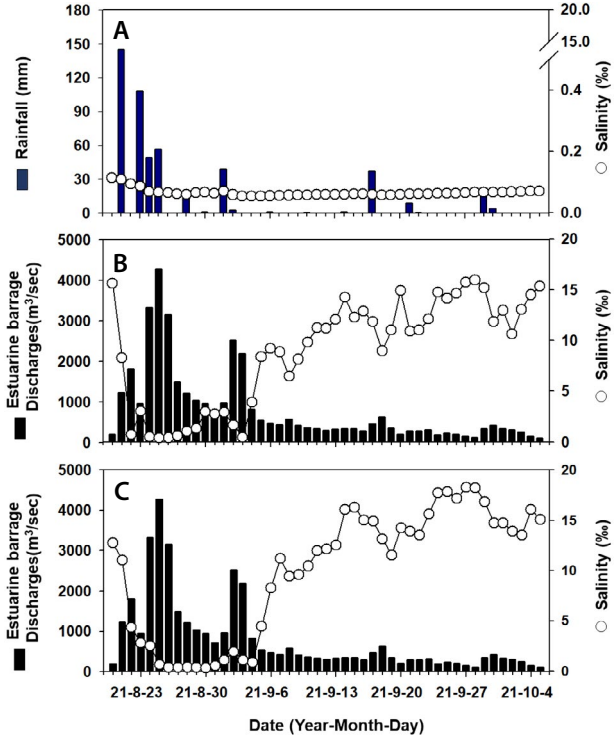


Fig. 2. Relationships between discharges of the estuarine barrage and mean salinity during the growing season of *B. planiculmis* (A, Yeommak; B, Eulsukdo; C, Myeongji).



Fig. 3. Change of distribution of food plant (*B. planiculmis*) on the Nakdong River Estuary.

Table 1. Comparison of distribution area of food plant (*B. planiculmis*) on the Nakdong River Estuary.

	2004* (m ²)	2021 (m ²)
Eulsuk-do	400,925	95,240
Myeongji	563,266	358,695
Daema-deung	290,714	23,813
Maengeummeori-deung	527,180	253,768
Jangja-do	467,890	0
Baekhap-deung	225,593	0
Total	2,475,568	798,731

*Data from Kim *et al.* (2005)

포 급감은 하구생태계의 안정성을 위협할 수 있어 낮은 밀도 및 비식생지역은 식물체 식재를 통한 복원과 생태계의 효율적 관리가 시급한 것으로 판단된다.

낙동강하구의 간조 시 수위와 염분농도 환경이 다른 복원지 3곳에 식재한 새섬매자기의 계절별 밀도변화는 Fig. 4에 나타내었다. B지점은 식재 5일 후 단위면적당 밀도 121 ± 13.03 m⁻², 10일 후 153 ± 41.37 m⁻², 20일 후 188 ± 63.83 m⁻²으로 새로운 식물체 형성으로 밀도가 증가하였다. C 복원지는 식재 5일 후 단위면적당 밀도 83 ± 11.33 m⁻², 10일 후 166 ± 42.02 m⁻², 20일 후 188 ± 45.13 m⁻²으로 새로운 식물체 형성으로 밀도가 증가하였다. A복원지는 식재 5일 후 단위면적당 밀도 71 ± 13.19 m⁻², 10일 후 70 ± 11.49 m⁻², 20일 후 58 ± 15.65 m⁻²으로 새로운 식물체 형성이 관찰되지 않고 사망에 이르는 개체가 늘어나면서 밀도는 감소하였다.

복원지 3곳의 새섬매자기의 계절별 길이변화는 Fig. 4에 나타내었다. B와 C복원지의 식재 5일 후 길이는 각각 55.52 ± 11.60 cm, 58.66 ± 1.26 cm, 10일 후 길이는 40.4 ± 16.35 cm, 39.6 ± 13.22 cm로 시간이 지남에 따라 길이 평균은 감소하였다. 이러한 결과는 두 지역에서 새로운 개체가 활발하게 생성됨을 의미한다. 반면에 맥도에서는 식재식물 이외의 새로 형성된 개체(어린개체)가 발견되지 않아 길이변화가 관찰되지 않았다.

서식환경이 다른 3곳에 식재한 새섬매자기의 간조 시 수위환경에 따른 식물의 단위면적당 9월 평균 밀도는 수위 50 cm로 항상 침수된 수심이 깊은 A복원지점에서 58 ± 15.65 m⁻², 간조 시 토양이 거의 드러나는 B복원지(수위 0~5 cm), C복원지(수위 0 cm 이하)에서 각각 188 ± 63.83 m⁻², 188 ± 45.13 m⁻²으로 구분되었다(Fig. 5, n = 20, p < 0.001). 새섬매자기의 9월 평균길이는 A복원지에서 60.18 ± 9.98 cm로 가장 높게 나타났으며, B복원지 43.36 ± 12.21 cm, C복원지 45.62 ± 12.60 cm 순으로 관찰되어, A와 B, C로 그룹이 구분

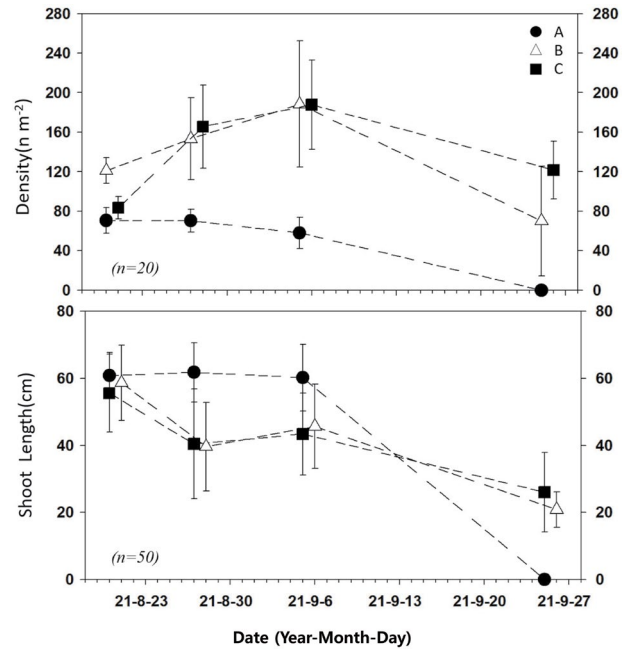


Fig. 4. Seasonal Change of shoot density and length of *B. planiculmis* at each site (A, Yeommak; B, Eulsukdo; C, Myeongji).

되었다(Fig. 5, n = 50, p < 0.001). 새섬매자기 식재를 통한 복원 이전 2020년 B지점의 을숙도 갯벌 자연군락의 새섬매자기의 단위면적당 출현 개체수는 166.90 ± 149.62 m⁻², 식물의 길이 평균값은 44.39 ± 5.45 cm로 본 결과와 거의 유사한 성장이 관찰되었다(Kim, 2020). 10월 지하부 괴경은 단위면적당 무게와 밀도에서 3곳 모두 각각 유의수준에서 구분되었으며, B > C > A 순으로 관찰되었다(Fig. 5, n = 5, p < 0.001). 특히 수심 50 cm를 유지하여 항상 침수되어 있는 A지점의 새섬매자기는 괴경 형성이 관찰되지 않았다.

새섬매자기의 길이, 밀도변화 그리고 괴경의 형성은 침수되는 수위의 정도에 따라 성장활동에 방해받을 것으로 관찰되었다. 간조 시 수위가 완전히 드러나는 토양의 지하수위가 0 cm 이하인 곳과 간조 시에 0~5 cm 수심이 유지되는 수위보다 식재 20일 후 높은 밀도가 관찰되어 An *et al.* (2018)의 결과와 일치하였다. 홍수에 의해 교차로 침수되는 지역과 연속적으로 침수된 지역에서 길이성장, 괴경 생체량 모두 침수된 곳에서 성장이 억제되었고(Zang *et al.*, 2022), 지하수위 0~10 cm 유지되는 곳이 수위 20 cm보다 밀도, 길이 지하부 생산이 높은 것으로 보고되어 본 연구 결과와 일치하였다(An *et al.*, 2018). 또한 새섬매자기의 성장과 번식을 위한 최적의 수심이 11.2~36.1 cm로 제안하였다(An *et al.*, 2022). 특히 저지대에 분포하는 새섬매자기는 집중강우로 제방 등의 조수 제한과 수위 상승으로 인한 장기간 침수로 식

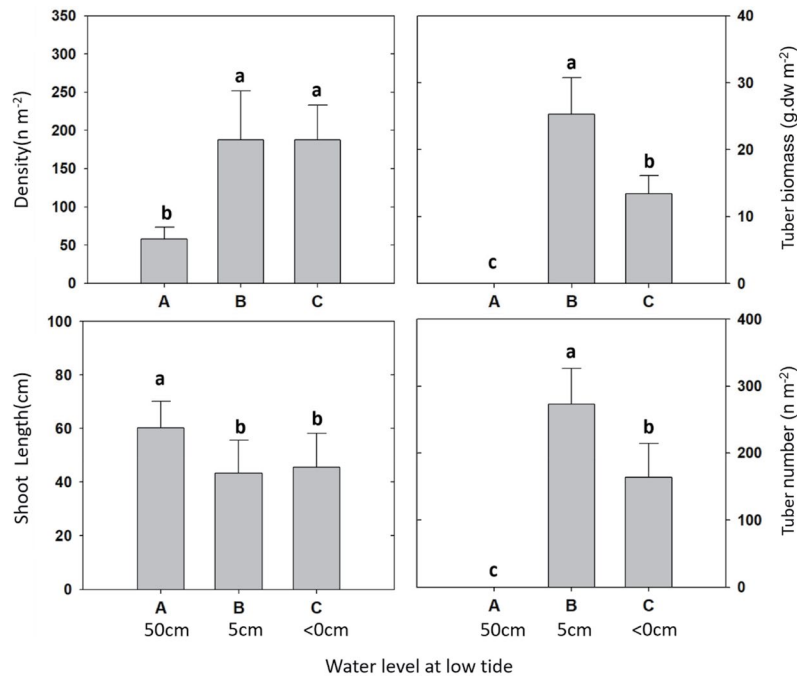


Fig. 5. Effect of water level on *B. planiculmis* growth at each site (A, Yeommak; B, Eulsukdo; C, Myeongji; $p < 0.05$).

물의 성장에 방해받을 수 있으므로 관찰되었다 (Yang *et al.*, 2021). 높은 수위는 빛 투과를 방해하며 (Das *et al.*, 2009) 지하부의 뿌리에서 산소 가용성 감소로 식물의 성장에 대한 주요 스트레스로 작용하는 것으로 판단된다 (Ferreira *et al.*, 2009; Pan *et al.*, 2012). 따라서 새섬매자기의 번식과 확장을 위한 수위관리는 복원을 위한 초기단계의 핵심요소로 판단된다.

토양에 매립되어 있는 괴경 생체량의 깊이별 분포비율을 각각의 자연군락과 비교한 결과 을숙도 식재지(ER) 25.32 ± 2.94 (g dw m⁻²), 을숙도 자연군락의 밀도가 낮은 지점(EN1) 8.05 ± 3.14 g dw m⁻², 중간지점(EN2) 25.98 ± 7.30 g dw m⁻²으로 식재지와 유사한 값으로 분류되었으며, 가장 바깥쪽의 분포가 넓은 지점(EN3)에서는 130.78 ± 29.54 g dw m⁻²으로 약 5.2배의 무게가 관찰되었다 (Fig. 6, $p < 0.001$). 명지의 경우 식재지(MR) 13.39 ± 0.91 g dw m⁻², 자연군락(MN) 181.18 ± 3.22 g dw m⁻²으로 식재지의 약 13.5배의 무게가 관찰되었다. 새섬매자기 군락이 훼손된 지점은 식재 후 성장에서 낮은 밀도와 유사한 성장이 관찰되는 것으로 보아 훼손 지역의 다른 환경적 인자가 새섬매자기의 성장을 방해하는 것으로 판단된다. 괴경의 토심에 따른 분포비율은 을숙도 복원지(ER)는 표층 0~10 cm 94.0%, 10~20 cm 깊이 6.0%, 20~30 cm 깊이 0%로 분포하였으나, 가장 식물의 성장상태가 양호한 EN3의 자연군락에서는 표층 0~10 cm 깊이에서 34.6%, 10~20 cm 깊이에서 43.6%, 20~30 cm 깊이에서

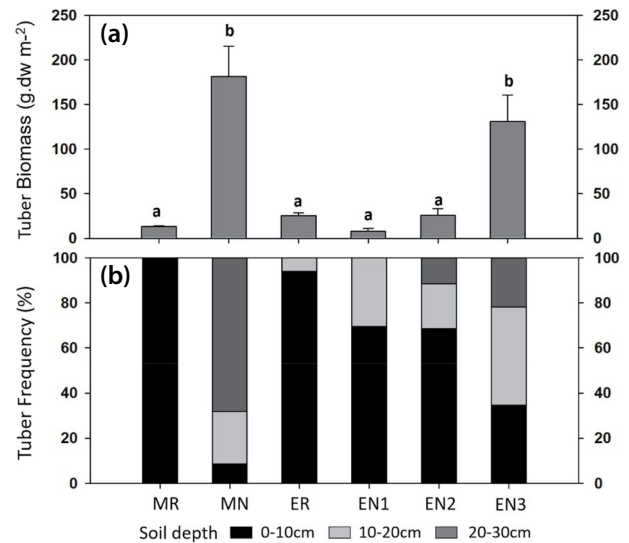


Fig. 6. Distribution of tuber of *B. planiculmis* in the study site. (a) Total tuber biomass of *B. planiculmis* at each site. (b) Appearance frequency of tuber of *B. planiculmis* according to sediment depth (M, Myeongji; E, Eulsukdo; R, restore (planting); N, nature). Treatment differences were tested with one-way ANOVA and significance levels are shown. Homogeneous groups were separated using the Tukey's test, and different letters indicate significant differences ($p < 0.05$).

21.8% 분포하였다. 명지 식재지(MR)에서는 괴경의 100%가 표층 0~10 cm 깊이에 분포하였으나, 자연군락에서는 표층

0~10 cm 8.6%, 10~20 cm 깊이 23.3%, 20~30 cm 68.2%로 모든 깊이에서 분포가 관찰되어 식재지와 비교되었다(Fig. 6, $p < 0.001$).

복원지의 새섬매자기 괴경의 토양분포 깊이는 대부분 0~10 cm 깊이에 분포하여 다른 연구 결과와 일치하였다(Lee *et al.*, 1991; Choi *et al.*, 2000). 그러나 자연군락의 괴경 형성은 Kim *et al.* (2005), Yi *et al.* (2011)에서 본 연구와 유사하게 표층보다 하층에서 높은 비율의 분포가 관찰되었다. Choi *et al.* (2000)은 새섬매자기 괴경의 분포는 0~5 cm에서 76.7%, 5~10 cm에서 21.2% 그리고 10~15 cm에서 2.1%가 분포한다고 보고하였다. Lee *et al.* (1991)에 의하면 새섬매자기 괴경 형성은 토양으로부터 82%가 8 cm 이내에 분포하며 평균분포심도는 6.51 cm였다. You (2008)의 한강 하구에서 새섬매자기 괴경은 주로 표층인 6~10 cm (69%)에 집중 분포하며 16 cm 이상의 깊이에서는 전혀 분포하지 않았다. You (2008)는 하구의 빠른 퇴적으로 괴경의 매몰 깊이가 깊어지는 것으로 보고하였으나 본 연구 결과와 다른 결과가 나타났다. 같은 지역에서 밀도가 높은 자연군락은 하층부에 집중되었으며, 낮은 밀도의 자연군락과 본 복원지는 표층에 괴경이 분포하였다. 따라서 이 식물의 괴경이 분포하는 토양의 깊이가 정해져 있는 것이 아니라 환경 특성에 따라 달라지는 것으로 보인다. 새섬매자기 지하부 괴경의 분포는 괴경 발아를 통한 군락 유지에 중요한 요인이므로, 세밀하고 다양한 비생물적 요인을 심도 있게 분석할 필요가 있다.

본 연구를 종합해보면 지난 2004년 이후 각종 개발과 기후 및 자연환경 변화로 고니를 비롯한 멸종위기종의 주요 먹이 자원인 낙동강하구 새섬매자기 군락은 2021년 67.7%가 훼손되어 32.3%만이 남아있어 원인분석과 하구생태계 복원 노력이 시급한 실정이다. 훼손지역과 신규 담수지역에 새섬매자기 식재를 통한 복원사업이 염분농도를 고려하여 장마기간 8월 여름 계절에 실시하였다. 여름 계절 식물체 식재 복원은 성공적인 것으로 관찰되었다. 그러나 계절별 식재시기에 따른 성장패턴과 괴경 형성 정도를 파악하여 효율적인 관리 방안을 확립하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 수위에 따른 성장은 간조기에 완전히 토양이 드러나는 환경에서 식물의 밀도와 길이, 괴경 생체량 모두 효과적인 것으로 관찰되었다. 그러나 집중강우와 제방으로 항상 침수되어 수위 50 cm로 유지되면 식물의 밀도, 길이, 생체량이 모두 감소하였다. 이러한 결과는 미묘한 수위 변동이 식생패턴, 특성 및 생태학적 과정을 극적으로 변화시켜 결과적으로 얕은 습지 서식지에 영향을 줄 수 있음을 나타낸다. 수문학과 식생 서식지 간의 결합 메커니즘을 명확히 하기 위해서는 추가 조사가 필요하다. 본 결과는 극심한 가뭄으로 인한 고염분 농도를 해결하는 데 도움이 되는 동시에 습지 보호 및 복원 평가 및 방법

에 도움이 될 것으로 보인다. 결론적으로 훼손된 새섬매자기 군락의 복원을 위하여 성장기간 동안 하굿둑 방류량 조정과 식재시기 조절을 통한 고염분농도 회피 방법을 고려하여 낮은 밀도의 분포지에 식물체 식재를 통한 복원을 제안한다.

저자정보 김구연(경남대학교 과학교육과 조교수, 경남대학교 생물다양성센터 센터장), 박희순(부산대학교 생명시스템학과 박사수료, 낙동강하구에코센터 전시교육팀 주무관), 김화영(한국수자원공사 부산권지사 지사장), 이지영(한국수자원공사 부산권지사 차장)

저자기도 연구설계: 김구연, 박희순, 자료수집 및 분석: 김구연, 박희순, 검토: 김화영, 이지영, 원고작성: 김구연, 박희순

이해관계 본 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없음.

연구비 본 연구는 환경부와 한국수자원공사(K-water)의 낙동강하구기수생태계 복원 사업의 일환으로 수행되었습니다.

사사 현장 조사를 비롯하여 복원 및 시료채취에 도움을 주신 낙동강하구에코센터, 한국수자원공사, 경남대학교 그리고 부산대학교 학생 모두에게 고마움을 전합니다.

REFERENCES

An, Y., Y. Gao and S. Tong. 2018. Emergence and growth performance of *Bolboschoenus planiculmis* varied in response to water level and soil planting depth: implications for wetland restoration using tuber transplantation. *Aquatic Botany* **148**: 10-14.

An, Y., T. Song, Y. Zhang, S. Tong and B. Liu. 2022. Optimum water depth for restoration of *Bolboschoenus planiculmis* in wetlands in semi-arid regions. *Hydrobiologia* **849**(1): 13-28.

Choi, S., Y. Shon, G. Ju, J. Choi, M. Kim, Y. Yu and J. Lee. 2000. Sprouting and growth characteristics of sea club rush (*Scirpus planiculmis*). *Korean Journal of Weed Science* **20**(4): 276-283. (in Korean with English abstract)

Coops, H., N. Geilen and G. van der Velde. 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): 273-284.

Coops, H., F.W. van den Brink and G. van Der Velde. 1996. Growth and morphological responses of four helophyte species in an experimental water-depth gradient. *Aquatic Botany* **54**(1): 11-24.

Das, K.K., D. Panda, R.K. Sarkar, J.N. Reddy and A.M. Ismail. 2009. Submergence tolerance in relation to variable flood-water conditions in rice. *Environmental and Experimental Botany* **66**(3): 425-434.

Dwire, K.A., S. Mellmann-Brown and J.T. Gurrieri. 2018. Poten-

- tial effects of climate change on riparian areas, wetlands, and groundwater-dependent ecosystems in the Blue Mountains, Oregon, USA. *Climate Services* **10**: 44-52.
- Edwards, G.S. 1992. Root distribution of soft-stem bulrush (*Scirpus validus*) in a constructed wetland. *Ecological Engineering* **1**: 239-243.
- Ferreira, C.S., M.T. F. Piedade, A.C. Franco, J.F.C. Gonçalves and W.J. Junk. 2009. Adaptive strategies to tolerate prolonged flooding in seedlings of floodplain and upland populations of *Himatanthus sucuuba*, a Central Amazon tree. *Aquatic Botany* **90**(3): 246-252.
- Hroudová, Z., P. Zákřavský and M. Flegrová. 2014. The tolerance to salinity and nutrient supply in four European *Bolboschoenus* species (*B. maritimus*, *B. laticarpus*, *B. planiculmis* and *B. yagara*) affects their vulnerability or expansiveness. *Aquatic Botany* **112**: 66-75.
- Kim, G.Y., C.W. Lee, H.S. Yoon and G.J. Joo. 2005. Changes of distribution of vascular hydrophytes in the Nakdong river estuary and growth dynamics of *Schenoplectus triqueter*, waterfowl food plant. *Korean Journal of Ecology* **28**: 335-345. (in Korean with English abstract)
- Kim, G.Y., J.Y. Kim, G.G. Ganf, C.W. Lee and G.J. Joo. 2013. Impact of over-wintering waterfowl on tuberous bulrush (*Bolboschoenus planiculmis*) in tidal flats. *Aquatic Botany* **107**: 17-22.
- Kim, G.Y. 2020. Growth Characteristics of *Bolboschoenus planiculmis* on the Eulsuk Tidal Flat of the Nakdong River Estuary, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **53**(4): 453-460. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.Y., R.Y. Im, Y. Do, G.Y. Kim and G.J. Joo. 2016. Above-ground Biomass estimation of tuberous bulrush (*Bolboschoenus planiculmis*) in mudflats using remotely sensed multispectral image. *Ocean Science Journal* **51**(1): 151-158.
- Kim, J.Y. and G.-Y. Kim. 2021. Effects of regulated dam discharge on plants and migratory waterfowl are mediated by salinity changes in estuaries. *International Review of Hydrobiology* **106**(1): 58-63.
- Kim, Y., J. Kang, J.U. Choi, C.M. Park and H.J. Woo. 2019. Geochemical Characteristics of *Scirpus planiculmis* Habitats in Nakdong Estuary, Korea. *Journal of Wetlands Research* **21**(2): 125-131. (in Korean with English abstract)
- Lee, K.S., K.H. Han, S.H. Park and S.Y. Choi. 1991. Growth Habits of *Scirpus planiculmis* F. Schmidt in Poldered Paddy Field. *Korean Journal of Weed Science* **11**(2): 111-116. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.J., K.S. Ryoo, M.H. Hwang and S.U. Lee. 2008. Analysis of the water quality by various gate operation effects at Nakdong estuary barrier. *Journal of Korean Society on Water Environment* **24**(6): 651-658. (in Korean with English abstract)
- Lou, Y., C. Gao, Y. Pan, Z. Xue, Y. Liu, Z. Tang and H. Rydin. 2018. Niche modelling of marsh plants based on occurrence and abundance data. *Science of The Total Environment* **616**: 198-207.
- Lubke, R.A. and A.M. Avis. 1982. Factors affecting the distribution of the *Scirpus nodosus* plants in a dune slack community. *South African Journal of Botany* **1**: 97-103.
- Ma, H., L.J. Cui, X. Pan, W. Li, Y. Ning and J. Zhou. 2020. Effect of nitrate supply on the facilitation between two salt-marsh plants (*Suaeda salsa* and *Scirpus planiculmis*). *Journal of Plant Ecology* **13**(2): 204-212.
- Nam, H.K. and M.H. Kim. 2017. Determinations of Shorebirds Diets during Spring Migration Stopovers in Korean Rice Fields. *Korean Journal of Environmental Biology* **35**(4): 452-460. (in Korean with English abstract)
- Pan, Y., Y. Xie, X. Chen and F. Li. 2012. Effects of flooding and sedimentation on the growth and physiology of two emergent macrophytes from Dongting Lake wetlands. *Aquatic Botany* **100**: 35-40.
- 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. *Journal of Wetlands Research* **18**(1): 58-67. (in Korean with English abstract)
- Yang, H., J.H. Kim and E.J. Lee. 2020. Effects of tides on interspecific interactions and plastic growth responses of *Bolboschoenus planiculmis*. *Flora* **264**: 151568.
- Yang, H., J.H. Kim and E.J. Lee. 2021. Impacts of tidal restriction caused by embankments on the plastic growth responses of *Bolboschoenus planiculmis* in Korea. *Regional Studies in Marine Science* **41**: 101616.
- Yi, Y.M., U.S. Yeo, D.H. Oh and K.J. Sung. 2011. Annual changes in *Scirpus planiculmis* and environmental characteristics of the Nakdong river estuary. *Journal of Wetlands Research* **13**(3): 567-579. (in Korean with English abstract)
- You, Y.H. 2008. Population decline cause of *Scirpus planiculmis* and its restoration plan in Han River Wetland Conservation Area, South Korea. *Journal of Wetlands Research* **10**(2): 165-172. (in Korean with English abstract)
- Zhang, M., D. Zhang, Q. Qi, S. Tong, X. Wang, Y. An and X. Lu. 2022. Flooding effects on population and growth characteristics of *Bolboschoenus planiculmis* in Momoge wetland, northeast China. *Ecological Indicators* **137**: 108730.
- Zhou, J., L.D. Zheng, X. Pan, W. Li, X.M. Kang, J. Li and L.J. Cui. 2018. Hydrological conditions affect the interspecific interaction between two emergent wetland species. *Frontiers in Plant Science* **8**: 2253.