

제방 환경 조건에서 베타글루칸-잔탄검 계열 바이오폴리머가 식물 생장 및 경쟁에 미치는 영향

Effects of β -glucan and Xanthan gum-based Biopolymers on Plant Growth and Competition in the Riverbank

정형순¹ · 신혜지¹ · 장하영² · 김은석^{3*}

¹광주과학기술원 지구환경공학부 박사과정, ²광주과학기술원 지구환경공학부 박사 후 연구원,
³광주과학기술원 지구환경공학부 교수

Hyungsoon Jeong¹, Haeji Shin¹, Ha-young Jang² and Eunsuk Kim^{3*}

¹Doctoral Student, School of Earth Sciences and Environmental Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju 61005, Korea

²Postdoctoral Researcher, School of Earth Sciences and Environmental Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju 61005, Korea

³Assistant Professor, School of Earth Sciences and Environmental Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju 61005, Korea

Received 15 September 2020, revised 21 September 2020, accepted 24 September 2020, published online 30 September 2020

ABSTRACT: A biopolymer based on microorganism-derived β -glucan and xanthan gum is being studied as a new eco-friendly material that stabilizes the riverbank slope, and also promotes vegetation growth. However, it is still inconclusive whether biopolymers have a positive effect on plant performance in the riverbanks which are subjected to various climatic factors and plant competitions. For a practical ecological evaluation of the biopolymers, their effect on plant growth promotion was studied in a natural environment. Considering the relationship between competition and plant community formation, the effects of biopolymers on competition were also investigated. For four plant species (*Echinochloa crus-galli*, *Pennisetum alopecuroides*, *Leonurus japonicus*, and *Coreopsis lanceolata*), the biopolymer effects under intra/interspecific competition were tested at the riverbank (20 m \times 10 m) near Samjigyo Bridge in Damyang-gun, Jeollanam-do. A biopolymer powder was mixed with water and commercial soil following the manufacturer's recommendations. The soil mixed with the biopolymer was filled in a pot or applied to the surface of the commercial soil with a thickness of 3 cm. Across the competition treatments, the biopolymer treatment promoted root growth of the target plant species and decreased the specific leaf area. The total biomass and shoot dry weight of *P. alopecuroides* increased in response to the biopolymer treatment. The competition treatment decreased the total biomass and shoot dry weight compared to the case without competition. Notably, such a competitive effect was similar in all the biopolymer treatments. Thus, biopolymers, when mixed with soil, promote the growth of some plant species, but do not appear to affect the competitive ability of plants.

KEYWORDS: Biopolymer, Intra/interspecific competition, Plant growth, Riverbank

요 약: 최근 미생물 유래 베타글루칸과 잔탄검을 주성분으로 하는 바이오폴리머는 제방 사면을 안정화할 뿐 만 아니라, 하천 식생의 생장을 촉진하는 친환경 신소재로 활발히 연구되고 있다. 그러나 다양한 환경요인과 개체간 경쟁관계가 존재하는 제방 환경에서 바이오폴리머가 식물 군집에 주는 영향은 알려져 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 바이오폴리머의 실제적인 생태성 평가를 목적으로, 바이오폴리머가 식물 생장 촉진에 미치는 영향을 제방 환경에서 확인하고, 경쟁관계가 식물 군집 형성에 미치는

*Corresponding author: eunsukkim@gist.ac.kr, ORCID 0000-0001-8059-7334

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. 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, provided the original work is properly cited.

영향을 고려하여 경쟁조건에 따른 바이오폴리머 효과도 조사하였다. 연구 목적을 위하여 4종의 식물종 (돌피, 수크령, 익모초 그리고 큰금계국)을 대상으로 전라남도 담양군 삼지교 부근의 자연 제방 (20 m x 10 m)에서 종내/종간 경쟁 조건에 따른 바이오폴리머 효과를 실험하였다. 바이오폴리머 처리는 바이오폴리머 분말, 물, 일반 상토를 일정 비율로 혼합한 바이오폴리머 혼합토를 화분에 채우거나 일반상토 화분의 표면에 3 cm 두께로 도포하는 방법이 사용되었다. 경쟁 조건과 관계없이 바이오폴리머 처리로 대상 식물종들의 뿌리 생육이 촉진되었고 잎의 건조량 대비 엽면적이 감소하였다, Ehgks 수크령의 총 생물량과 지상부 건조량이 증가하였다. 대상종들의 총생물량과 지상부 건조량은 경쟁조건에서 대조구에 비해 감소하였지만, 이러한 경쟁 효과는 모든 바이오폴리머 처리군에서 유사하게 나타났다. 따라서 바이오폴리머는 토양과 혼합되었을 때 일부 식물종의 생장을 촉진시키지만, 식물의 경쟁능력에는 영향을 주지 않는 것으로 보인다.

핵심어: 바이오폴리머, 종내/종간 경쟁, 식물 생장, 제방 환경

1. 서론

국내에 시공된 제방들은 기존의 식생을 제거하고 주로 콘크리트나 철근 등을 이용하기 때문에 생태계 교란과 수변 환경 오염의 위험이 크다 (Kang et al. 2011). 하천 생태계와 환경 관리의 중요성을 고려한 보다 친환경적인 공법 개발의 필요성이 꾸준히 제기되어 왔다. 친환경 제방 건설을 위한 노력의 일환으로 최근 미생물에서 유래한 베타글루칸과 잔탄검을 주성분으로 한 바이오폴리머를 토양과 혼합하여 제방 사면을 안정화하는 친환경 공법 연구가 활발히 진행 중이다 (Ko and Kang 2018). 특히 바이오폴리머는 토양 입자와 결합하여 사면을 견고하게 안정화하는 효과가 있다 (Chang et al. 2006, Ko and Kang 2018). 또한, 하천 우점 식물종 8종을 대상으로 한 사전 연구결과, 바이오폴리머 처리 시 일부 식물종의 초기 지하부 생장이 촉진되고 총 생물량이 증가하였다 (Jeong et al. 2019). 특히, 화본과 식물의 일종인 돌피 (*E. crus-galli*)의 지하부 생장이 뚜렷하게 관찰되었으며, 이에 따른 2차적인 토양 안정화를 기대할 수 있다.

바이오폴리머가 제방 자생 식물의 생육을 촉진하는 효과를 실험실 수준에서 확인하였지만, 바이오폴리머의 생태적 영향을 확인하기 위해서는 실제 식물 자생지의 환경 요소 및 기타 식물과의 상호작용을 고려해야 한다. 이전 연구에서는 식물이 일정한 환경 조건 하의 식물 성장상에서 생육 되었지만 (Jeong et al. 2019), 실제 자연 제방을 이루는 식생의 생장과 생식은 계절 변화와 함께 다양한 환경 요소의 영향을 받는다. 식물종들은 자연 환경의 일교차, 강수량, 일조량 등의 요소에 영향을 받는 까닭에 (Sultan 2000), 따라서 환경조건이 통제된 성장상 내의 연구 결과는 자연 환경 조건의 결과와 상이할

수 있다. 따라서 보다 적합한 바이오폴리머의 생태성 평가를 위해서, 제방 환경에서 바이오폴리머 처리가 식물 생장에 미치는 영향을 실험적으로 규명할 필요가 있다.

이와 함께, 식물들 간의 상호작용을 고려한 연구가 필요하다. 자연 제방을 구성하는 식물 생태계는 다양한 식물 종들이 상호작용하며 복합적인 구조를 이루고 있다. 대표적으로 식물 개체들은 한정된 자원으로 생장, 번식하기 위해 이웃한 개체와 경쟁 관계를 형성하는데, 식물 간 경쟁관계는 하천 식생의 종다양성을 결정하는 중요한 상호작용 중 하나이다 (Pierik et al. 2013). 다양한 환경 요소들이 경쟁의 결과에 영향을 미치는 것을 고려하면 (Brooker 2005), 자연 환경에서 바이오폴리머에 의해 변화된 토양 구조는 식물 간 경쟁관계의 결과를 변화시킬 수 있고, 그로 인해 식물 군집 구조 또한 주변 자연 식생과 달라질 수 있다. 개체 수준이 아닌 군집 수준에서의 생태성 평가를 위해서는, 바이오폴리머의 처리가 식물종들의 종내/종간 경쟁 결과에 미치는 영향을 평가할 필요가 있다.

따라서 본 연구의 목적은 바이오폴리머 처리가 식물 종의 생육과 종내/종간 경쟁에 미치는 영향을 자연 환경하에서 규명하여 바이오폴리머의 생태성을 평가하는 데에 있다. 이를 통해 바이오폴리머의 생장 촉진 효과가 향후 제방 식물 군집의 종 다양성 유지에 기여할 수 있는가에 관한 정보를 탐색하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험 대상종 및 실험 지역

본 연구를 위해 하천 제방에서 주로 발견되는 4종의 식물종인, 화본과에 속하는 돌피 (*Echinochloa crus-galli*

(L.) P.Beauv.)와 수크령 (*Pennisetum alopecuroides*), 꿀풀과 익모초 (*Leomurus japonicus* Houtt.), 국화과 큰금계국 (*Coreopsis lanceolata*)을 연구 대상종으로 사용하였다. 돌피는 이른 봄에 발아하는 일년생 식물로 80-100 cm 까지 성장한다. 이년생 식물로 알려진 익모초는 여름에 발아하며 약용으로 사용된다. 큰금계국은 다년생이며 북미 원산의 외래식물로 국내에서는 제방 조성용으로 널리 사용되고 있다. 이들 세 식물종들은 하천변에서 흔히 발견되는 종으로, 자연 제방 주변에 대한 식생 조사를 통해 종자를 수집하였다 (An et al. 2018). 수크령은 화분과에 속하는 다년생 식물로 하천 제방의 녹지화 식물로 주로 사용되고 있다 (Cho et al. 2015).

자연 제방과 동일한 환경을 조성하기 위하여 전라남도 담양군 삼지교 (35°16'16.5"N 126°56'19.0"E) 부근 20 m × 10 m 규모의 제방 사면을 실험 지역으로 사용하였다. 실험을 위해 기존의 식생을 정리하고, 실험 기간 동안 대상종 이외의 식물들을 주기적으로 제거하였다.

2.2 실험 방법

2.2.1 바이오폴리머 혼합 토양 및 처리 방법

본 연구에 사용된 바이오폴리머는 한국과학기술원에서 제공되었고, 권장 제조법에 따라 바이오폴리머 혼합 토양 (바이오폴리머 용액: 바이오폴리머 분말: 물: 토양 = 1.6 L: 0.1 kg: 9 L: 30 kg)을 제조하였다. 바이오폴리머와 혼합한 토양과 대조군으로 사용된 토양으로 원예용 상토 (한아름원예용상토, 신성미네랄, 충청북도, 대한민국)를 사용하였다. 현재 제방에 바이오폴리머를 처리하는 공법으로 제방 표면에 바이오폴리머를 3 cm 두께로 도포하는 방법이 연구되고 있다 (Seo et al. 2019). 바이오폴리머가 실제 제방 조성에 사용되었을 경우를 모사하기 위해, 바이오폴리머 처리군은 바이오폴리머 혼합 토양을 가득 채운 화분 (FBP 집단)과 일반 원예용 상토로 채워진 화분의 상단 3 cm를 바이오폴리머 혼합 토양으로 도포한 화분 (CBP 집단)으로 구분하였다 (Seo et al. 2019). 대조군으로는 원예용 상토만을 채운 화분 (N 집단)을 이용하였으며, 실험에 사용된 화분으로 19 cm × 17 cm 규격의 플라스틱 화분을 사용하였다.

2.2.2 종내/종간 경쟁

바이오폴리머가 식물 개체간 경쟁관계에 미치는 영

향을 알아보기 위하여, 대조군으로 경쟁이 없이 각종의 개체들을 한 화분에 하나씩 식재한 mono-culture 집단, 종내 경쟁조건으로 한 화분에 동일한 종의 두 개체를 식재한 intraspecific competition 집단, 종간 경쟁조건으로 한 화분에 서로 다른 종의 두 개체를 식재한 interspecific competition 집단을 만들었다. 발아된 4종의 유식물을, 총 14가지의 종내/종간 경쟁 조합에 맞도록 화분에 식재하였다. 한 화분에 두 개체가 포함된 경쟁 집단은 개체 사이에 7 cm 간격을 두고 식재하였고, monoculture 대조군은 하나의 개체를 화분의 중앙에 식재하였다.

2.2.3 실험 설계 및 측정 형질

위의 모든 실험 처리를 각각 20회 반복하여 총 1,440 개체를 식재한 840개 화분을 실험 지역에 배치하였다. 본 실험에서는 randomized complete block design (RCBD)에 따라 실험 지역에 10개의 block을 설치하고, 각 block 마다 84개 화분을 모든 실험 조건이 포함되도록 임의 배치하였다 (Altman and Krzywinski 2015). 화분 내 토양 높이와 실험지 표면 높이를 동일하게 하기 위해, 실험지에 화분 높이의 구멍을 파고 화분을 그 안에 넣는 방식으로 화분들을 고정하였다.

2019년 5월부터 9월까지 식물의 생육을 주기적으로 관찰하였고, 생육 후 모든 개체를 수거하여 성장 형질을 측정하였다. 측정 형질로 식물체의 높이 (plant height)를 비롯하여 지상부 건중량 (shoot dry mass)과 뿌리 건중량 (root dry mass) 그리고 지상부 및 뿌리 건중량을 합한 총 생물량 (total biomass)을 측정하였다. 또한 생리 형질로 뿌리 건중량 대비 지상부 건중량 비율 (root/shoot ratio, R/S ratio)와 엽 건중량 대비 엽면적 (specific leaf area, SLA)을 측정하였다. 엽 건중량 대비 엽면적을 계산하기 위해, 수집된 잎의 잎자루와 주맥을 제외하고 엽편을 일정한 면적으로 절단한 후 건중량을 측정하였다. 모든 건중량은 65°C로 설정된 건조기 (한백과학, 경기도, 대한민국)에서 72시간 동안 건조한 이후 측정하였다 (Pérez-Harguindeguy et al. 2016).

2.3 통계분석

통계분석은 R statistical (R version 3.2.4; R Core Team 2016)을 이용하여 실시하였다. 모든 종에 대해서 바이오폴리머 처리와 종내/종간 경쟁에 따른 생육 형질

을 비교 분석하기 위해 식물종, 바이오폴리머 처리 (FBP, CBP 또는 N 집단), 경쟁조건 (대조군, 종내 경쟁 또는 종간 경쟁)을 독립변인으로 하는 삼원분산분석 (Three-way ANOVA)을 수행하였다. 삼원분산분석 결과에서 바이오폴리머와 경쟁의 영향이 식물종에 따라 다르게 나타났고 (Table 1), 이를 분석하기 위해 각 식물종 별로 경쟁조건과 바이오폴리머 처리를 독립변인으로 하는 이원분산분석 (Two-way ANOVA)을 실시하였다. Block은 독립변수로 모든 통계 모델에 포함되었다. 분산분석 결과는 Tukey 방법을 이용하여 각 바이오폴리머 처리와 경쟁 조건에 따른 측정 형질의 최소 제곱평균을 사후 분석 비교하였다. 종별 분석에서 측정값의 정규분포를 위해 익모초의 지상부 건중량과 큰금계국의 SLA은 log 변환하였다.

3. 결과

3.1 제방 환경에서 바이오폴리머가 식물 성장에 미치는 영향

바이오폴리머는 연구 대상 식물종의 뿌리 건중량과 잎 건중량 대비 엽면적의 비인 SLA에 영향을 주었다 (Fig. 1, Table 1). 평균적으로, 바이오폴리머 혼합 토양으로 가득 채운 FBP 집단의 뿌리 건중량이 평균 9.90 mg으로 대조군인 N 집단과 비교하여 20.58% 증가하였다 ($t=3.27, P=0.003$) (Fig. 1 (a)). 화분의 상단 3 cm를 바이오폴리머 혼합 토양으로 도포한 CBP 집단의 뿌리 건중량 또한 N 집단보다 15.71% 증가였지만, 차이가 유의미하지 않았다 ($t=2.31, P=0.063$). SLA에서는 FBP 집단과 CBP 집단이 N 집단보다 각각 7.23% ($t=-2.51, P=0.037$), 8.25% ($t=-3.56, P=0.001$)만큼 감

Table 1. Results of analyses of variance comparing growth traits among testing plant species and biopolymer treatment and competition. In this analysis, competition involved three competition condition; mono-culture, intraspecific and interspecific competition. F values are given. d.f. = degrees of freedom. SLA, specific leaf area; R/S ratio, root/shoot ratio. N = 1,218. * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

Source	d.f	Total biomass	Root dry mass	Shoot dry mass	Plant height	R/S ratio	SLA
Biopolymer (BP)	2	1.80	5.65**	1.29	2.41	1.68	6.72**
Competition (Comp)	2	26.90***	23.59***	24.92***	3.07*	17.99***	3.86*
Species (Spp)	3	777.99***	445.90***	732.14***	2,881.8***	23.64***	57.83***
BP × Comp	4	0.41	0.63	0.36	2.10	1.51	0.87
BP × Spp	6	0.68	2.78*	0.52	0.55	0.59	0.72
Comp × Spp	6	23.05***	24.29***	20.15***	4.93***	2.31*	0.33
BP × Comp × Spp	12	0.39	0.44	0.39	1.12	0.95	1.22

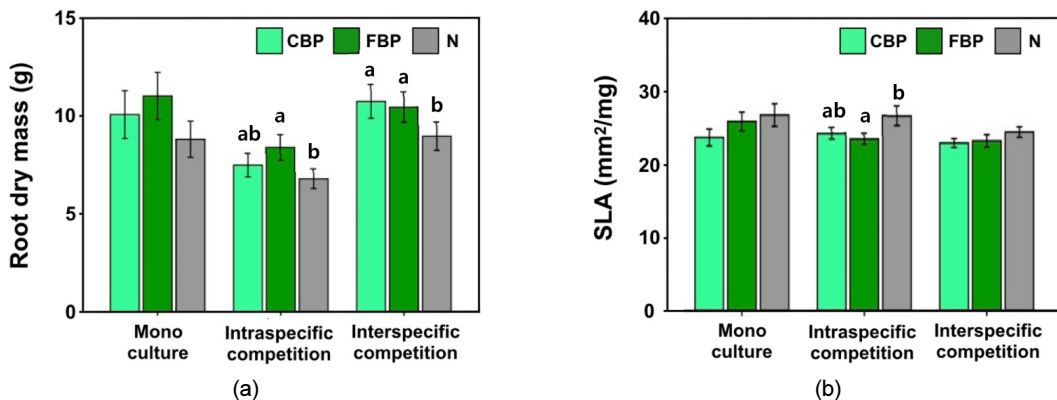


Fig. 1. Effect of biopolymer treatment and competition on (a) Root dry mass and (b) specific leaf area (SLA). Unadjusted means of all individuals and standard error are given. CBP-a pot coated with 3 cm biopolymer mixed soil on commercial soil; FBP- a pot filled with biopolymer mixed soil; N-a pot full with commercial soil without biopolymer mixed soil as control.

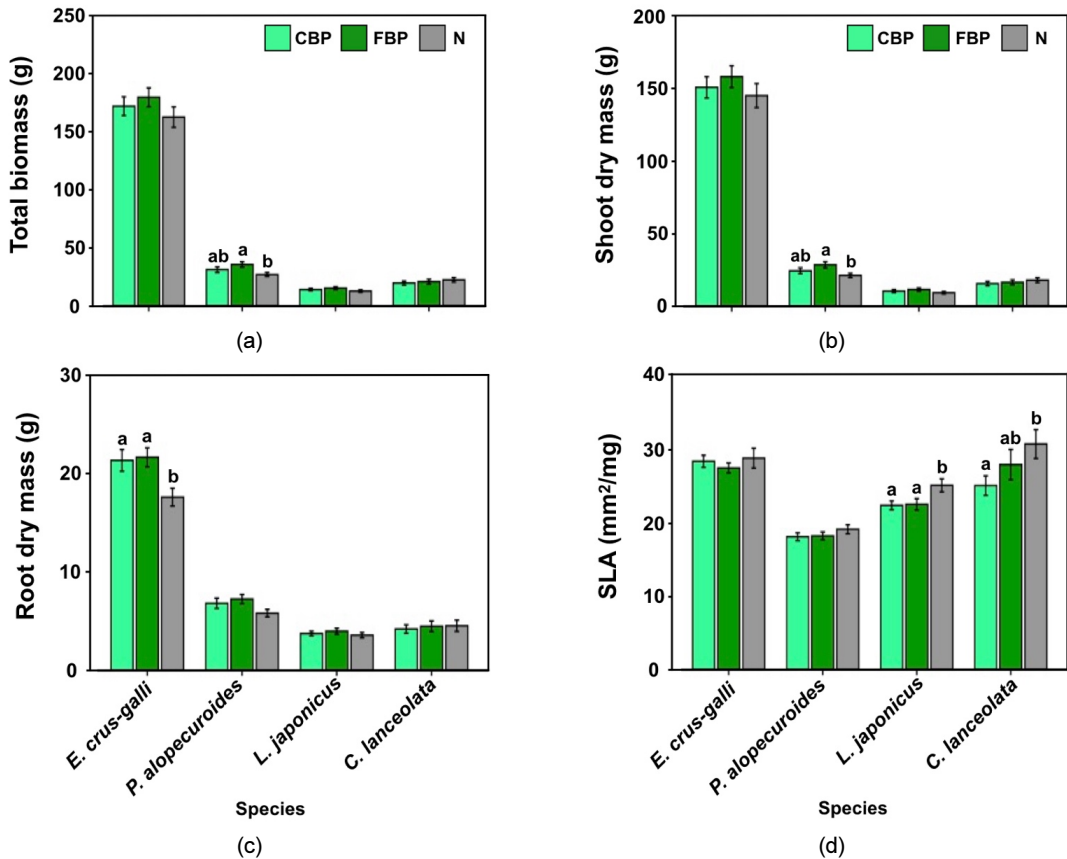


Fig. 2. Effect of biopolymer treatment and plant species on (a) total biomass, (b) shoot dry mass, (c) root dry biomass, and (d) specific leaf area (SLA). Unadjusted means of all competition conditions and standard error are given. The results of Tukey post hoc are indicated in alphabet based on $P < 0.05$. CBP-a pot coated with 3 cm biopolymer mixed soil on commercial soil; FBP- a pot filled with biopolymer mixed soil; N-a pot full with commercial soil without biopolymer mixed soil as control.

소하였다 (Fig. 1 (b)). 총 생물량, 정상부 건중량, 식물체 높이, 지상부 대비 뿌리 건중량에서는 바이오폴리머의 효과가 나타나지 않았다 (Table 1).

삼원분산분석 결과 뿌리 건중량에 대한 바이오폴리머와 식물종 영향의 상호작용이 통계적으로 유의미하게 나타났는데 ($FBP \times Comp = 2.78, P < 0.05$) (Table 1), 이는 바이오폴리머 효과에 의한 뿌리 건중량의 증가가 각 종별로 상이하게 나타난다는 것을 의미한다. 돌피의 경우 FBP 집단과 CBP 집단의 뿌리 건중량은 N 집단보다 각각 22.93% ($t = 3.35, P = 0.027$), 21.18% ($t = 3.16, P = 0.051$)만큼 증가하였다. 수크령 또한 N 집단에 비해 FBP 집단에서 뿌리 건중량이 24.66% 증가하는 경향을 보였지만, 수크령의 뿌리 건중량 증가는 사후 검정에서 유의미한 결과를 보이지 않았다 ($t = 2.21, P = 0.082$) (Fig. 2 (c)).

삼원분산분석 결과에서 바이오폴리머와 식물종의 상호작용이 통계적으로 유의미하게 나타나지는 않았지만, 각 종별로 이원분산분석을 수행한 결과 지하부 건중량 이외의 형질들도 바이오폴리머의 영향이 받았고, 그 영향은 종 별로 상이하게 나타났다. 수크령의 경우 총 생물량과 지상부 건중량이 바이오폴리머 처리의 영향을 받았다 (Table 2, Fig. 2). 수크령의 총 생물량은 N 집단보다 FBP 집단이 31.70% 증가하였고 ($t = 3.58, P = 0.001$), 지상부 건중량은 수크령의 FBP 집단이 N 집단보다 34.54% 증가하였다 ($t = 3.53, P = 0.001$). 익모초의 지상부 건중량도 FBP 집단이 23.02% 증가하였지만 통계적으로 유의미하지 않았다 ($t = 1.75, P = 0.225$). 바이오폴리머 처리가 SLA를 감소시키는 영향은 익모초에서 뚜렷하게 나타났다 (Table 2).

Table 2. Results of analyses of variance comparing growth traits among biopolymer treatment (BP) and competition (Comp) for each species. F values are given. Shoot dry mass of *L. japonica* and specific leaf area (SLA) of *C. lanceolata* were log transformed to meet normality assumptions. d.f. = degrees of freedom. SLA, specific leaf area; R/S ratio, root/shoot ratio. *E. crus-galli*, N = 332; *P. alopecuroides*, N = 329; *L. japonicus*, N = 319; *C. lanceolata*, N = 238. * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

Source	d.f	Total biomass	Root dry mass	Shoot dry mass	Plant height	R/S ratio	SLA
<i>E. crus-galls</i>							
Biopolymer (BP)	2	1.41	5.87**	0.94	1.41	0.27	1.52
Competition (Comp)	2	26.63***	38.30***	23.90***	1.15	0.37	1.40
BP × Comp	8	0.51	0.38	0.35	1.45	0.85	3.49
<i>P. alopecuroides</i>							
Biopolymer (BP)	2	6.52**	3.20*	6.27**	0.66	0.67	0.91
Competition (Comp)	2	48.68***	5.77**	52.47***	9.82***	14.53***	0.74
BP × Comp	8	0.94	0.66	0.98	2.05	0.09	0.57
<i>L. japonica</i>							
Biopolymer (BP)	2	2.18	1.55	1.82	1.04	0.18	4.19*
Competition (Comp)	2	4.06*	2.16	6.85**	1.02	2.33	1.36
BP × Comp	8	1.72	0.74	2.12	1.15	1.83	1.26
<i>C. lanceolata</i>							
Biopolymer (BP)	2	1.16	0.54	1.14	1.82	1.30	3.00
Competition (Comp)	2	13.38***	0.06	18.89***	4.75*	5.37**	1.28
BP × Comp	8	0.95	0.51	1.00	0.82	1.01	0.44

3.2 경쟁이 식물 생육에 미치는 영향

측정한 모든 형질들은 경쟁 처리의 영향을 받았다 (Table 1). 삼원분산분석에서 바이오폴리머 처리와 경쟁 처리의 상호작용은 통계적으로 유의미하지 않았는데 (Table 1), 이는 바이오폴리머 처리가 종간 혹은 종내 경쟁으로 인한 생육 변화에는 영향을 주지 않는 것을 의미한다.

SLA를 제외한 모든 측정 형질에서 경쟁 처리와 식물종의 상호작용이 통계적으로 유의하였고 (Table 1), 이는 경쟁 처리의 효과가 식물종 별로 상이하게 나타남을 의미한다. 돌피의 경우, 총 생물량이 경쟁이 없는 대조군 (Mono culture)과 종간 경쟁 집단 (interspecific competition)과의 차이는 없었지만 종내 경쟁 (intra-specific competition)에서 38.11% 감소하였다 ($t = -5.65, P = 0.000$). 지상부 건중량과 뿌리 건중량도 유사한 결과를 보였다. 반면 수크령의 경우에는, 총 생물량의 감소가 종간 경쟁 집단에서 종내 경쟁 집단보다 더 크게 나타났다 (Fig. 3 (a)). 지상부 건중량 또한 종내 경쟁 집단이 50.70% ($t = -5.32, P < 0.001$), 종간 경쟁 집

단이 61.87% ($t = -9.97, P < 0.001$)만큼 대조군에 비해 감소하였고, 뿌리 건중량은 대조군과 종간 경쟁 집단만 유의미한 차이를 보였다 ($t = -3.39, P = 0.002$). 익모초와 큰금계국의 총 생물량과 지상부 건중량 또한 경쟁 처리로 인해 감소하였으나 종간 경쟁과 종내 경쟁의 차이는 보이지 않았고 (Fig. 3 (a), 3 (b)), 뿌리 건중량은 경쟁 처리의 영향을 받지 않았다 (Fig. 3 (c)). 뿌리 건중량 대비 지상부 건중량 비율은 수크령과 큰금계국에서 유의미한 경쟁 효과를 보였는데, 종간 경쟁 집단이 대조군에 비해 107.69% ($t = 3.948, P < 0.001$), 190.47% ($t = 2.99, P = 0.009$) 증가하였다. 익모초는 통계적으로 유의미하지는 않았지만, 유사하게 뿌리 건중량 대비 지상부 건중량이 경쟁 처리에서 증가하는 경향을 보였다. 경쟁이 지상부 및 지하부 건중량에 미치는 영향을 고려해 볼 때 (Fig. 3 (b), 3 (c)), 이러한 뿌리 건중량 대비 지상부 건중량 비율의 변화는 뿌리 건중량의 변화보다는 경쟁에 따른 지상부 건중량의 감소에 의한 것으로 보인다. 돌피는 시험 식물종들 중 가장 무거운 생물량과 높은 식물체 길이를 보였는데, 식물종들은 와 경쟁 시 다른 식물종들과 경쟁할 때 보다 낮은 총 생물량 값을 보였다.

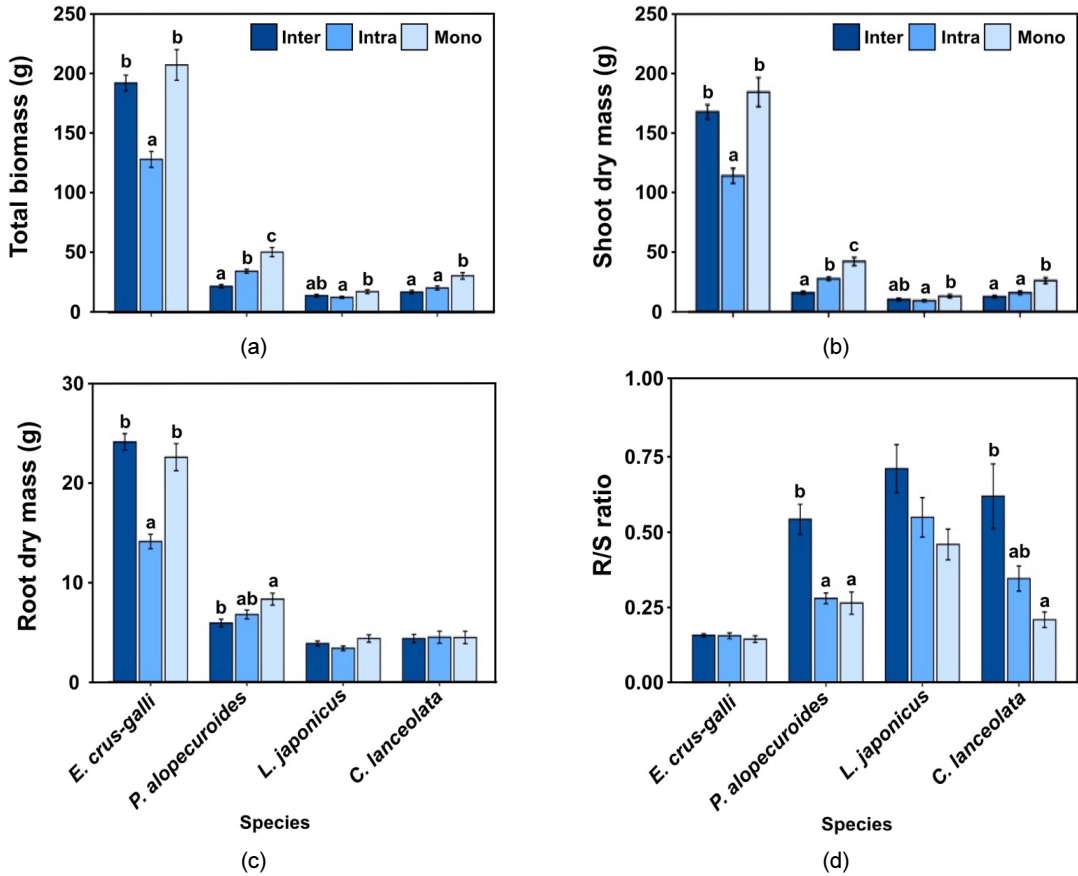


Fig. 3. Effect of competition conditions and plant species on (a) total biomass, (b) shoot dry mass, (c) root dry biomass, and (d) root/shoot dry mass ratio (R/S ratio). Unadjusted means of all biopolymer treatments and standard error are given. The results of Tukey post hoc are indicated in alphabet based on $P < 0.05$. Inter-six interspecific competition, in which two individuals of different species were cultured; Intra-four intraspecific competition, in which two individuals of same species were cultured; Mono-non competition conditions, in which mono-cultured individuals as control.

4. 고찰

본 연구를 통해 바이오폴리머 혼합 토양이 제방 환경 조건에서 시험 식물종들의 뿌리 건중량을 증가시키는 것을 확인하였다(Fig. 1 (a)). 이러한 지하부 생장은 식물 생육에 중요한 특성으로 서식지 내에서 식물의 적합도와 생산성에 영향을 미친다(Pérez-Harguindeguy et al. 2016). 따라서 바이오폴리머의 지하부 성장 촉진 효과가 식물종들의 제방 활착에 기여할 것으로 기대된다. 또한 식물 지하부의 직경, 무게, 깊이 등이 서식지 토양의 인장강도나 인발강도를 직간접적으로 향상시킬 수 있는 점을 고려할 때 (Choi and Lee 2011, Kim et al. 2012), 바이오폴리머에 의한 지하부 성장 촉진으로 하천 제방의 2차적인 토양 안정화를 기대할 수 있다 (Evette et al. 2009).

종 수준의 분석에서, 바이오폴리머 처리에 따른 뿌리 건중량 증가는 특히 돌피와 수크령에서 확연히 나타났다. (Table 2). 선행 연구에서 화본과 식물 4종을 대상으로 바이오폴리머의 생육 증진 효과를 분석하였는데, 바이오폴리머의 뿌리 건중량 증가 효과는 4식물종 중 1종에서만 나타났다(Jeong et al. 2019). 이로 보아 바이오폴리머의 뿌리 건중량 증진 효과는 화본과 식물의 특성이라기 보다는 종 수준에서 상이하게 나타나는 것으로 보인다. 돌피는 식물 성장상 환경조건하에서도 바이오폴리머 처리로 지하부 생장이 촉진되는 결과를 보인 자생 식물종으로(Jeong et al. 2019), 녹화 또는 토양 복원용 식물종으로 연구되고 있다(Lee et al. 2015b). 화본과 다년생 식물인 수크령은 제방 사면의 안정화를 위하여 주로 사용되는 종으로 (Dang et al. 2017), 식생매트 공법에서 이용되는 주요 식물종 중 하나이다. 돌피나

수크령을 이용하는 기존 공법에 바이오폴리머를 처리할 경우 보다 효율적인 식생 활착과 토양 안정화에 기여할 것으로 기대된다.

바이오폴리머 혼합 토양에서 대상 식물들은 건조 스트레스와 관련이 있는 잎 건조량 대비 엽면적 (SLA)이 대조군에 비해 감소하였다 (Fig. 1 (b)). SLA 값은 식물의 생존 전략에 중요한 특성 중 하나로, 식물 개체의 자원 획득과 보존 방법을 반영한다. 낮은 SLA를 보이는 식물은 획득한 자원 보존에 유리하여 건조 스트레스에 대한 잠재적 저항성이 있다고 알려져 있다 (Wilson et al. 1999, Pérez-Harguindeguy et al. 2016, Liu and Stützel 2004). 따라서 바이오폴리머는 식물의 건조 저항성을 증가시켜 식물 생존을 향상시킬 것으로 기대된다. 또한, 바이오폴리머는 토양 입자들과 결합하여 토양의 수분 증발을 저해함으로써 수분 함량을 유지할 수 있다 (Chang and Cho 2012, Chang et al. 2015, Lim et al. 2018). 그러므로 바이오폴리머 처리는 토양 수분 보호와 함께 식물 자체의 건조 저항성 증진으로, 건조한 환경에서 제방 식생의 생존에 기여할 것으로 추정된다.

환경 조건, 토양, 식물 간 상호작용 등은 자연 환경에서 식물 군집 구성에 중요한 역할을 한다 (Lamb and James 2008). 특히, 식물 간 경쟁관계는 식물 군집 내 상대적인 우점도와 종 다양성을 결정하는 주요 요인으로 알려져 있다 (Brooker 2005). 환경 인자들이 식물 간 경쟁 강도 (intensity of competition)에 영향을 줄 수 있는 것을 고려하면 (Welden and Slauson 1986), 환경 인자의 영향으로 경쟁 관계가 변화하는 것은 식물 군집 구조의 변화로도 이어질 가능성이 있다. 본 연구의 바이오폴리머 역시 토양 구조에 영향을 주어 식물의 지상부 또는 지하부 경쟁을 변화시킬 수 있고, 이는 바이오폴리머가 처리된 지역의 식물 군집 구조에 영향을 줄 수 있다. 이러한 환경조건-경쟁-식물군집구조의 상관관계를 고려하여, 본 연구에서는 바이오폴리머 처리에 따른 종내/종간 경쟁관계를 파악, 군집 형성에 미치는 영향을 추론하고자 하였다.

경쟁 처리는 모든 시험 식물종의 성장을 저해하였지만, 경쟁처리와 바이오폴리머의 상호작용이나 경쟁처리, 바이오폴리머와 식물종의 상호작용은 통계적으로 유의미하지 않았다 (Table 1). 이는 경쟁으로 인한 식물 성장의 저하가 바이오폴리머 처리와 관계없이 일정하게 발생하였다는 것을 나타낸다. 예를 들면 바이오폴리

머 처리는 돌피의 뿌리 건조량을 증가시키지만 (Fig. 2 (c)), 돌피가 다른 종의 성장을 저해하는 경쟁능력 (competitive ability)은 바이오폴리머로 인해 증가하지 않았다. 만약 바이오폴리머가 특정 식물종의 경쟁능력을 증가시킨다면, 바이오폴리머 처리 제방에서는 경쟁능력이 증가된 특정종의 우점화가 발생할 가능성이 높고, 이로 인해 바이오폴리머 처리 제방의 식생 구조가 자연제방의 식생구조와는 상이하게 나타날 가능성이 증가할 것이다. 비록 제한된 식물종을 대상으로 비교적 짧은 기간 동안 수행되었지만, 본 연구에서는 바이오폴리머 신소재가 식물종간의 경쟁강도에는 영향을 주지 않고, 따라서 식물종간 경쟁강도 변화가 야기할 수 있는 식생 구조의 변화를 최소화할 수 있는 소재임을 확인하였다.

본 연구에서는 바이오폴리머가 대상 식물종간의 경쟁관계에 영향을 주지 않는다는 것을 보였다. 그러나 자연 제방의 종 다양성을 고려할 때, 보다 많은 식물종들의 상호작용을 포함하지 못했다는 점은 이 연구의 한계라 할 수 있다. 예를 들면, 제방 시공 후 주변 잡초의 침입은 식재된 식물 군집의 정착에 영향을 줄 수 있다 (Okuda and Sasaki 1996). 인위적으로 식재된 수크령은 3년 간의 침입종 관리 후에야 안정적인 군락 형성과 유지가 가능하였고 (Yang 2014), 돌피는 국내 대표적 생태계 교란 식물인 환삼덩굴 (*Humulus japonicus*, Siebold & Zucc.)의 침입으로 생육이 저해되는 현상이 관찰되었다. 또한, 생태계교란식물 가시박 (*Sicyos angulatus*) 군락의 피압으로 기존 식물들의 피해가 보고되고 있으며, 하천 식생의 종 다양성이 위협받고 있다 (Lee et al. 2015a). 따라서 바이오폴리머 처리가 하천 제방 식생 군집에 주는 생태적 영향을 보다 정확히 평가하기 위해서는, 식재 식물의 경쟁 강도와 함께 침입종을 고려한 연구가 필요하다. 이를 고려한 연구의 일환으로, 현재 본 연구팀에서는 바이오폴리머를 시험 시공한 제방의 식생 군집을 지속적으로 모니터링하고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 바이오폴리머의 처리가 실제 제방 환경에서 식물종 성장에 기여하는지를 실험적으로 검증하였다. 또한, 바이오폴리머 처리 효과가 식물 종간/종

내 경쟁에 따라 달라지는지를 확인하였다. 바이오폴리머의 처리로 실험 식물종들의 총 생물량, 지상부 건중량 그리고 뿌리 건중량을 통계적으로 유의미하게 증가시키는 한편 대조군보다 낮은 잎 건중량 대비 엽면적 (SLA)가 확인되었다. 이를 통해 다양한 환경 요인이 존재하는 제방 환경에서도 바이오폴리머의 성장 촉진 효과가 검증되었다. 그리고, 바이오폴리머의 효과는 종별로 차이가 있었다. 바이오폴리머 처리로 성장 촉진이 확인된 돌피와 수크령은 바이오폴리머 처리 제방의 주요 녹지화 식물로 사용될 수 있을 것이다. 바이오폴리머의 성장 촉진 효과는 중간/중내 경쟁조건과 관계없이 나타났으며, 이 결과로 바이오폴리머 처리 제방에서 주변 자연 식생과 생태적으로 유사한 구조가 형성될 것으로 보인다.

감사의 글

식물의 형질 측정에 참여한 광주과학기술원 대학원 및 대학 학생들에게 감사의 말씀을 드립니다. 본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원 (20AWMP-B114111-05)으로 수행되었습니다.

References

- Altman, N. and Krzywinski, M. 2015. Points of significance: split plot design. *Nature Methods* 12(3): 165.
- An, J.H., Jeong, H., and Kim, E. 2018. Effects of the β -Glucan- and Xanthan gum-based biopolymer on the performance of plants inhabiting in the riverbank. *Ecology and Resilient Infrastructure* 5: 180-188. (in Korean)
- Brooker, R., Kikvidze, Z., Pugnaire, F.I., Callaway, R.M., Choler, P., Lortie, C.J., and Michalet, R. 2005. The importance of importance. *Oikos* 109: 63-70.
- Chang, I. and Cho, G.C. 2012. Strengthening of Korean residual soil with β -1,3/1,6-glucan biopolymer. *Construction and Building Materials* 30: 30-35.
- Chang, I., Prasadhi, A.K., Im, J., Shin, H.D., and Cho, G.C. 2015. Soil treatment using microbial biopolymers for anti-desertification purposes. *Geoderma* 253-254: 39-47.
- Chang, Y.J., Lee, S., Yoo, M.A., and Lee, H.G. 2006. Structural and biological characterization of sulfated-derivatized oat β -glucan. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54: 3815-3818.
- Cho, S.R., Kim, J.H., and Shim, S.R. 2015. Practical use of several ground covers on a slope revegetation construction - *Miscanthus sinensis* var. *purpurascens*, *Festuca arundinacea*, *Pennisetum alopecuroides*, *Zoysia japonica* -. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology* 18(3): 97-107. (in Korean)
- Choi, H.S. and Lee, W.H. 2011. Analysis of the erosion characteristics with root fiber of a vegetated levee revegetment. *Journal of Korea Water Resources Association* 44(6): 487-495. (in Korean)
- Dang, J.H., Cho, Y.H., and Lee, C.S. 2017. Effect of soil reinforcement on shear strength by *Pennisetum alopecuroides* and *Miscanthus sinensis* roots on loamy sand at river bank. *Journal of Korean Society of Environmental Restoration Technology* 20: 79-91. (in Korean)
- Evette, A., Labonne, S., Rey, F., Liebault, F., Jancke, O., and Girel, J. 2009. History of bioengineering techniques for erosion control in rivers in Western Europe. *Environmental Management* 43: 972-984.
- Jeong, H., Jang, H.Y., Ahn, S.J., and Kim, E. 2019. β -Glucan-and xanthan gum-based biopolymer stimulated the growth of dominant plant species in the Korean riverbanks. *Ecology and Resilient Infrastructure* 6(3): 163-170. (in Korean)
- Kang, H., Lee, Y.S., and Jeon, S.H. 2011. A study on the evaluation method of ecologically fragmented section for restoration of the riverine ecobelt. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers* 31(4B), 383-391.
- Kim, T.G., Chae, S.K., Chun, S.H., and Jeong, J.C. 2012. A study of pull-out strength increasement by root of grasses, *Journal of Wetlands Research* 14(2): 199-210. (in Korean)
- Ko, D. and Kang, J. 2018. Experimental studies on the stability assessment of a levee using reinforced soil based on a biopolymer. *Water* 10: 1059.
- Lamb, E.G. and Cahill Jr, J.F. 2008. When competition does not matter: grassland diversity and community composition. *The American Naturalist* 171(6): 777-787.
- Lee, C.W., Kim, D., Cho, H., and Lee, H. 2015a. The riparian vegetation disturbed by two invasive alien plants, *Sicyos angulatus* and *Paspalum distichum* var. *indutum* in South Korea. *Ecology and Resilient Infrastructure* 2(3): 255-263.
- Lee, Y.H., Byun, J.Y., Na, C.S., Kim, T.W., Kim, J.G., and Hong, S.H. 2015b. Moisture sorption isotherms of four *Echinochloa* species seeds. *Weed & Turfgrass Science* 4: 111-117. (in Korean)
- Lim, H.G., Kim, H.S., Lee, H.S., Sin, J.H., Kim, E.S., Woo, H.S. and Ahn, S.J. 2018. Amended soil with biopolymer positively affects the growth of *Camelina sativa* L. under drought stress. *Ecology and Resilient Infrastructure* 5(3): 163-173 (in Korean)

- Liu, F. and Stützel, H. 2004. Biomass partitioning, specific leaf area, and water use efficiency of vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to drought stress. *Scientia Horticulturae* 102(1): 15-27.
- Okuda, S. and Sasaki, Y. 1996. Stream environment and riparian plants: conservation and aintenance of vegetation. Tokyo: Soft Science. pp. 142-162. (in Japanese)
- Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., Bret-Harte, M.S., Cornwell, W.K., Craine, J.M., Gurvich, D.E., Urcelay, C., Veneklaas, E.J., Reich, P.B., Poorter, L., Wright, I.J., Ray, P., Enrico, L., Pausas, J.G., de Vos, A.C., Buchmann, N., Funes, G., Quétier, F., Hodgson, J.G., Thompson, K., Morgan, H.D., ter Steege, H., Sack, L., Blonder, B., Poschlod, P., Vaieretti, M.V., Conti, G., Staver A.C., Aquino S., and Cornelissen, J.H.C. 2016. Corrigendum to: new handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of botany* 64(8): 715-716.
- Pierik, R., Mommer, L., and Voesenek, L.A. 2013. Molecular mechanisms of plant competition: neighbour detection and response strategies. *Functional Ecology* 27(4): 841-853.
- R Core Team. 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>.
- Seo, S., Jin, S., Chang, I., and Chung, M. 2019. The analysis of effect of biopolymer treated soils in seed spray method in the river embankment. *Ecology and Resilient Infrastructure* 6(4): 304-313.
- Sultan, S.E. 2000. Phenotypic plasticity for plant development, function and life history. *Trends in Plant Science* 5: 537-542.
- Welden, C.W. and Slauson, W.L. 1986. The intensity of competition versus its importance: an overlooked distinction and some implications. *Quarterly Review of Biology* 61: 23-44.
- Wilson, P.J., Thompson, K.E.N., and Hodgson, J.G. 1999. Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plant strategies. *The New Phytologist* 143: 155-162.
- Yang, H.M. 2014. Community formation comparison of herbaceous perennials planted on urban stream levee slope. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 42(1): 133-148. (in Korean)