

베타글루칸과 잔탄검 계열 바이오폴리머 신소재의 국내 하천 식물종에 대한 생육 촉진 영향

β -Glucan- and Xanthan gum-based Biopolymer Stimulated the Growth of Dominant Plant Species in the Korean Riverbanks

정형순¹ · 장하영² · 안성주³ · 김은석^{4*}

¹광주과학기술원 지구환경공학부 박사과정, ²광주과학기술원 지구환경공학부 박사후 연구원,
³전남대학교 바이오에너지공학과 교수, ⁴광주과학기술원 지구환경공학부 교수

Hyungsoon Jeong¹, Ha-Young Jang², Sung-Ju Ahn³ and Eunsuk Kim^{4*}

¹School of Earth Sciences and Environmental Engineering, Gwanju Institute of Science and Technology, Gwanju 61005, Korea

²School of Earth Sciences and Environmental Engineering, Gwanju Institute of Science and Technology, Gwanju 61005, Korea

³Department of Bioenergy Science and Technology, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

⁴School of Earth Sciences and Environmental Engineering, Gwanju Institute of Science and Technology, Gwanju 61005, Korea

Received 19 September 2019, revised 25 September 2019, accepted 26 September 2019, published online 30 September 2019

ABSTRACT: The civil engineering materials used to stabilize the slopes of new riverbanks have a great impact on the types and growth of vegetation introduced after the completion of construction procedure. Recently, microbial-derived, β -glucan- and xanthan gum-based biopolymers are attracting attention as an ecofriendly strengthening material of riverbanks that can possibly stimulate plant growth. This study aimed to assess ecological effects of biopolymer application on native plants in Korean riverbanks. In particular, since dominant plant species could shape characteristics of an ecosystem, we examined the effects of biopolymer on the dominant plant species in riverbanks. Overall, biopolymer did not affect seed germination rates of testing plant species. In contrast, plants grew more vigorously in the soil mixed with biopolymer compared to those in the control soil. The biomass of *Echinochloa crus-galli* especially increased around two times more in the biopolymer treatment. Plants produced heavier root biomass and leaves with larger specific leaf area, which possibly contributes to the tolerance of environmental stress like drought. These results suggest that biopolymers treated on river banks are expected to stimulate plant growth and increase stress tolerance of domestic dominant plant species.

KEYWORDS: Biopolymer, Dominant plant species, Growth, Riverbank

요 약: 신설 제방의 사면 안정화를 위해 사용하는 토목 자재는 완공 이후 유입되는 식생의 종류 및 생장에 큰 영향을 미친다. 최근 미생물 유래 베타글루칸과 잔탄검 계열 바이오폴리머가 식물의 생육을 촉진시킬 수 있는 새로운 친환경 제방 사면 안정화 물질로 주목 받고 있다. 본 연구는 바이오폴리머 신소재의 생태성 평가를 목적으로, 특히 생태계 내에서 다수를 차지하는 우점 식물종들이 생태계의 특성을 크게 좌우하는 점에 주목하여, 바이오폴리머 신소재가 국내 하천에서 흔히 발견되는 자생 초본 식물 8종과 녹화용 식물 2종의 발아 및 생육에 미치는 영향을 시험하였다. 시험 식물종들의 종자 발아율은 바이오폴리머가 혼합된 토양의 영향을 받지 않았다. 반면 식물 생육은 바이오폴리머가 혼합된 토양에서 증가하였는데, 특히 돌피의 경우 약 2배정도의 총 생물량이 증가하였다. 식물 뿌리의 생육이 증가하는 경향을 보였고, 잎의 건조량 대비 엽면적이 증가하였다. 뿌리의 생육 증진과 잎의 건조량 대비 엽면적 증가가 환경 스트레스에 적응된 식물종들의 대표적 기능 형질인 점을 감안하면, 제방 사면에 처리된 바이오폴리머 신소재는 국내 하천 우점종들의 생육 및 환경 스트레스 저항성을 높일 것으로 예측된다.

핵심어: 바이오폴리머, 우점 식물종, 생장, 제방

*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.

1. 서론

국내외로 자연 생태계의 보존과 지속 가능한 발전에 대한 관심이 커지면서 친환경 기술 개발이 활발히 진행 중이다. 제방 건설 공법에서도 수질과 수변 환경 보호를 고려한 다양한 친환경 공법 개발 연구가 진행되고 있다. 제방이 위치한 하천변은 물억새, 갈대, 돌피 등 다양한 식물종들이 군락을 이루며 서식하고, 또한 다양한 동물의 서식지로서 생태적 중요성이 크다 (Schultz et al. 1997). 하지만 근래에 건설된 제방들은 주로 콘크리트와 철근 등으로 이루어져 하천 식생이 파괴되고 환경 오염의 위험성을 가지고 있다. 이에 따라, 콘크리트나 철근 등을 대체할 수 있는 친환경 신소재 연구가 필요한 실정이다.

이러한 노력의 일환으로 한국과학기술원에서는 자연계에 흔히 존재하는 베타글루칸과 잔탄검을 주 성분으로 하는 바이오폴리머 소재를 개발하였다 (Chang et al. 2006, Chang et al. 2015). 바이오폴리머는 토양 입자 사이에 강한 결합을 형성하여 토양의 응집력을 높임으로써 자연 제방의 사면을 견고하게 강화할 수 있다 (Chang et al. 2016). 이와 함께 바이오폴리머 처리는 다양한 식물종들의 생육을 촉진시킬 수 있는데 (An et al. 2018, Chang et al. 2015), 이러한 장점들을 이용하여 바이오폴리머를 친환경 제방 사면 강화 물질로 개발하려는 연구가 현재 진행 중이다 (Ko and Kang 2018).

하천 변에는 다양한 식물종들이 자생하고 있다. 화학 물질에 대한 식물 반응의 종 특이성을 고려할 때 (OECD 2006), 바이오폴리머의 실제적인 적용 시 나타날 수 있는 생태적 영향 평가를 위해서는 실제 하천 변에 자생하는 다양한 식물종을 대상으로 바이오폴리머의 영향을 연구할 필요가 있다. 특히 하천 주변 생태계의 우점 식물종에 대한 평가가 필수적이다. 첫째, 우점종은 식물 군집 내에서 수가 가장 많거나 피도가 높은 종, 즉 우점도가 높은 종을 의미하는데, 이러한 우점 식물종들은 생태계의 특성에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Mass ratio hypothesis) (Grime 1998). 따라서 바이오폴리머가 하천 생태계에 주는 영향을 평가하기 위해서는 우점종의 생육에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 것이 필요하다. 둘째, 신설 제방은 식생이 모두 제거된 상태로, 건설 이후에 인위적인 식재와 함께 주변 식생의 유입으로 새로운 식생 군락이 형성된다.

주변 식물 군집에서 피도가 가장 높은 우점종들은 신설 제방으로 유입될 가능성이 매우 높고, 따라서 바이오폴리머가 처리된 신설 제방에 새롭게 형성될 식생 군락의 예측을 위해서는 바이오폴리머가 우점종의 발아 및 생육에 주는 영향에 관한 정보가 필수적이다.

본 연구에서는 바이오폴리머의 생태성을 평가하기 위해 국내 하천 우점 식물 8 종과 대조 식물 2 종을 대상으로 바이오폴리머 혼합 토양이 종자 발아와 초기 생장에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험 대상종 및 종자 채집

본 연구에서는 국내 하천에 자생하는 야생 식물 8 종과 녹화용 식물 2 종을 실험에 사용하였다. 야생 식물종으로는 2017년에 수행한 식생조사 (An et al. 2018)를 바탕으로 자연 제방 주변에 우점하는 물억새 (*Miscanthus sacchariflorus* (Maxim.) Benth.), 갈대 (*Phragmites communis* Trin.), 강아지풀 (*Setaria viridis* (L.) P.Beauv.), 돌피 (*Echinochloa crus-galli* (L.) P.Beauv.), 익모초 (*Leomurus japonicus* Houtt.), 달맞이꽃 (*Oenothera biennis* L.), 망초 (*Erigeron canadensis* L.), 개밀 (*Agropyron tsukushiense* var. *transiens* (Hack.) Ohwi) 등 총 8 종을 선정하였다 (Table 1). 달맞이꽃과 개밀의 종자는 2017년 9월에 낙동강 상류에서 채집되었고, 다른 식물종들의 종자는 영산강 지류에서 채집되었다 (An et al. 2018). 야생 식물종과의 비교를 위해 녹화용 잔디인 큰김의털 (*Festuca arundinacea* Schreb)와 크리핑 레드웨스큐 (*Festuca rubra* L. ssp. *commutata*) 2 종을 실험에 포함하였다.

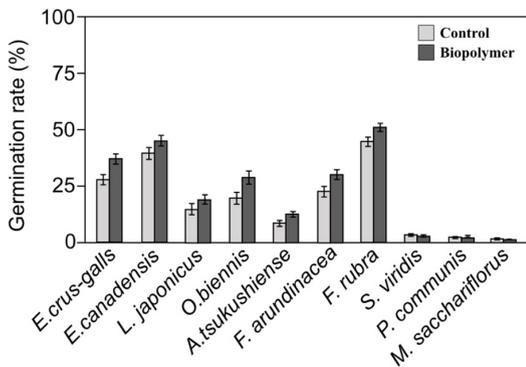
2.2 실험 방법

바이오폴리머와 토양은 한국과학기술원에서 제공된 제조법을 따라 바이오폴리머 용액: 바이오폴리머 분말: 물: 토양을 1.6 L: 0.1 kg: 9 L: 30 kg 의 비율로 혼합하였다. 실험에 사용된 토양은 원예용 상토 (한아름원예용상토, 신성미네랄, 충청북도, 대한민국)를 사용하였다.

바이오폴리머 혼합 토양의 영향과 함께 종자 전처리에 따른 발아율을 비교하기 위해 저온 처리를 실시하였

Table 1. List of collected plant species examined in this study

Species	Family	Seed source	Life history
<i>Agropyron tsukushiense</i> var. <i>transiens</i>	Poaceae	Nakdong River	Perennial
<i>Echinochloa crus-galli</i>	Poaceae	Youngsan River	Annual
<i>Miscanthus sacchariflorus</i>	Poaceae	Youngsan River	Perennial
<i>Phragmites communis</i>	Poaceae	Youngsan River	Perennial
<i>Setaria viridis</i>	Poaceae	Youngsan River	Annual
<i>Erigeron canadensis</i>	Asteraceae	Youngsan River	Biennial
<i>Leonurus japonicus</i>	Labiatae	Youngsan River	Biennial
<i>Oenothera biennis</i>	Onagraceae	Nakdong River	Biennial
<i>Festuca arundinacea</i>	Poaceae	Commercial seeds	Biennial
<i>Festuca rubra</i> ssp. <i>commutata</i>	Poaceae	Commercial seeds	Biennial

**Fig. 1.** Effect of biopolymer treatment on seed germination in testing plant species. Average germination rate across pre-treatment and standard error are given.

다. 저온 처리는 토양에 식재하는 식물종에 대하여 주로 사용되는 전처리 과정으로 발아율을 높이는 효과가 있다. 저온 처리는 페이퍼타월로 감싼 종자를 15 ml conical tube에 넣고 수분을 충분히 가한 후, 4°C 성장상(한백과학, 경기도, 대한민국)에서 일주일 동안 보관하는 방식으로 수행하였다(Kim and Um 1995). 수분 공급에 의한 발아율 차이를 배제하기 위하여, 저온 무처리 종자를 24시간 동안 1차 증류수에 담가 둔 이후 사용하였다.

발아율 조사를 위해 32개 구획으로 이루어진 종묘판을 이용하였다. 종묘판 내 각 구획에는 동일 종의 동일 발아 전처리를 거친 종자가 15 - 20립씩 파종되었다. 처리군 및 종묘판의 배치는 바이오폴리머 혼합 토양이나 상토가 채워진 종묘판을 1차 인자(main plot)으로 하고, 식물종과 전처리 과정을 2차 인자(split plot), 블록 반복 18회의 분할법(split-plot design)을 따랐다. 발아

전처리 조건과 식물종은 블록 내의 각 구획에 무작위로 배치되었다. 모든 종묘판은 온도 23°C와 12시간의 광 주기로 설정된 성장상에서 1달 간 생육되었고, 1 주에 2회 저면관수를 통해 수분을 공급하였다.

바이오폴리머 처리가 식물종들의 초기 성장 형질에 미치는 영향을 알아보기 위해 발아율 조사에서 발아한 유식물을 성장 조사에 사용하였다. 높은 발아율을 보인 개밀(*A. tsukushiense*), 들피(*E. crus-galli*), 망초(*E. canadensis*), 익모초(*L. japonicus*), 달맞이꽃(*O. biennis*), 큰김의털(*F. arundinacea*) 그리고 크리핀레드웨스큐(*F. rubra*) 중에서 바이오폴리머 처리 유무에 따라 각 30 개체씩, 총 420개체를 실험에 사용하였다. 물억새(*M. sacchariflorus*), 갈대(*P. communis*), 강아지풀(*S. viridis*)은 낮은 발아율을 보여 성장 조사에서 제외하였다. 모든 유식물들을 바이오폴리머 처리 혹은 무처리 토양이 채워진 플라스틱 화분(직경 90 mm, 높이 90 mm)으로 옮겨 식재하고, 식물 성장상 내에 배치하였다. 화분들은 발아시험과 동일하게 바이오폴리머 처리를 1차 인자(main plot)으로 하고, 식물종을 2차 인자(split plot)로 하는 분할법(split-plot design)에 따라 배치하였다. 발아율 조사와 동일한 조건으로 설정된 성장상에서 30일 동안 배양하였으며, 주 3회 저면관수를 통해 수분을 공급하였다. 생육기간 이후 모든 식물 개체를 수거하여 생육 형질을 측정하였다.

2.3 측정 형질 및 통계분석

종묘판에 파종된 씨앗 중 발아된 씨앗의 개수를 매주 2번 측정하였고, 발아율은 파종 1개월 이후 발아된 씨

앗의 개수를 파종 씨앗 개수로 나눈 비율로 계산하였다. 생육 형질로 지상부 크기, 뿌리 길이, 지상부 및 지하부 건중량 그리고 총 생물량을 측정하였다. 뿌리의 길이는 지하부의 시작부터 최하단까지의 길이를 측정하였다. 수거된 식물을 65°C 로 설정된 건조기 (한백과학, 경기도, 대한민국)에서 72시간 동안 건조한 이후 지상부, 지하부 및 총 생물량을 측정하였다. 측정 형질값을 이용하여 식물 기능 형질 (functional traits)인 지상부 대비 지하부 건중량 (root/shoot ratio), 지하부 건중량 대비 지하부 길이 (SRL, specific root length)를 계산하였다. 식물체 수거 직후에 각 개체들의 최장 잎을 분리하고, 디지털카메라 (Sony α7II, Tokyo, Japan)로 촬영 후 이미지 분석으로 엽면적을 측정하였다. 동일한 잎 시료를 65°C 로 설정된 건조기에서 72시간 동안 건조한 이후 건중량을 측정하였고, 측정 값을 이용하여 잎의 건중량 대비 엽면적 (SLA, specific leaf area)을 계산하였다 (Pérez-Harguindeguy et al. 2016).

통계분석은 R statistical package (R version 3.2.4; R core team 2016)을 이용하여 수행하였다. 발아율은 바이오폴리머 처리, 저온처리, 식물종과 이들의 상호작용에 대한 삼원분산분석 (Three-way ANOVA)을 이용하여 분석하였다. 바이오폴리머 처리 효과는 1차 인자 (main plot) 반복구의 영향을 고려한 오차항을 사용하여 평가하였다. 발아율 결과는 정규분포를 위해 arcsin 값으로 변환하여 분석하였다. Tukey 방법으로 바이오폴리머 처리에 따른 발아율의 최소제곱평균을 사후 검정하였다.

바이오폴리머 처리에 따른 생장 및 기능 형질값의 차이는 이원분산분석 (Two-way ANOVA)으로 비교하였다. 통계 모델은 발아율 분석과 동일하였고, 측정값의 정규분포를 위하여 SLA, 지상부 건중량 그리고 지하부 건중량은 log 변환, 식물체 크기와 지상부 대비 지하부 건중량은 square root 변환하였다. 종 내 바이오폴리머 처리에 따른 생장 차이를 규명하기 위하여, 최소제곱평균을 Tukey 방법으로 사후 검정하였다.

3. 결과

3.1 바이오폴리머 처리와 저온 처리가 발아율에 미치는 영향

시험 식물종들은 상이한 발아율을 나타냈는데, 물억

새 (*M. sacchariflorus*), 갈대 (*P. communis*), 강아지풀 (*S. viridis*)은 매우 낮은 발아율을 보인 반면 나머지 7개 실험종은 10 - 50%의 발아율을 보였다. 발아한 7종의 식물 종자들은 바이오폴리머 혼합 토양에서 대조군에 비해 상대적으로 높은 발아율을 보였지만 통계적으로 유의미하지는 않았다 ($F_{\text{biopolymer}} = 2.51, P = 0.07$). 저온 처리에 따른 발아율 차이나 바이오폴리머 처리 × 저온 처리 간의 상호작용 또한 통계적으로 유의미하지 않았다 ($F_{\text{cold treatment}} = 1.13, P = 0.12$; $F_{\text{biopolymer} \times \text{cold treatment}} = 0.72, P = 0.21$).

3.2 바이오폴리머 처리가 식물 생육에 미치는 영향

평균적으로 보았을 때, 시험 대상 식물종들은 바이오폴리머가 혼합된 토양에서 더욱 왕성한 생육을 하는 것으로 나타났다. 뿌리 길이를 제외하고 대조군 과 비교하였을 때, 식물의 높이는 8.6%, 잎의 개수 11.4%, 지상부 건중량 12.4% 및 지하부 건중량 357.6%가 증가하였고, 그 결과로 총 생물량이 57.6% 증가하였다 (Table 2, Fig. 2). 지하부 건중량의 증가에도 불구하고 뿌리의 길이는 바이오폴리머의 영향을 받지 않았고, 이로 인해 SRL은 감소하였다 (Fig. 2). SLA는 바이오폴리머 혼합 토양에서 감소하였고, 그 경향은 특히 망초 (*E. canadensis*)와 돌피 (*E. crus-galli*)에서 확연하게 나타났다.

지상부 건중량, 지하부 건중량 및 총 생물량에서 통계적으로 유의미한 바이오폴리머 × 식물종 처리가 나타났다. 이는 바이오폴리머의 영향이 식물종 별로 다르게 나타날 수 있음을 의미한다. 바이오폴리머는 돌피의 지하부 건중량을 특히 증가시켰고 ($t = 5.21, P < 0.001$), 지상부 건중량은 다소 감소시켰다 ($t = -2.72, P = 0.02$). 이에 반해 큰김의털 (*F. arundinacea*)와 달맞이꽃 (*O. biennis*)은 바이오폴리머 혼합 토양에서 생육되었을 때 지상부 건중량이 대조군에 비해 증가하였으나 (큰김의털 $t = 2.76, P = 0.02$; 달맞이꽃 $t = 3.29, P = 0.004$), 지하부 건중량은 유의미한 차이를 보이지 않았다 (큰김의털 $t = -1.84, P = 0.09$; 달맞이꽃 $t = -0.89, P = 0.10$). 지상부 대비 지하부 건중량 또한 바이오폴리머에 대해 종별로 상이한 반응을 보였는데, 돌피 (*E. crus-galli*)의 경우 통계적으로 유의미하게 증가하였지만 ($t = 13.05, P < 0.001$) 돌피를 제외한 다른 식물종들은 다소 감소

Table 2. Results of analyses of variance comparing morphological and physiological traits between biopolymer treatments in testing plant species. F ratios are given. Shoot biomass and SLA were log transformed and plant height and root/shoot ratio were square-root transformed to meet normality assumptions. d.f. = degrees of freedom. SLA, specific leaf area; SRL, specific root length. * P < 0.05, ** P < 0.01, *** P < 0.001

Trait	Biopolymer (d.f. = 1)	Species (d.f. = 6)	Biopolymer × Species (d.f. = 6)
Total biomass	26.65 ***	118.11 ***	14.56 ***
Plant height	12.58 ***	632.26 ***	3.14 **
Leaf number	12.68 ***	66.45 ***	0.75
SLA	17.52 ***	1401.7 ***	2.94 ***
Shoot biomass	5.35 *	48.56 ***	4.00 ***
Root length	0.46	18.36 ***	1.25
Root biomass	18.38 ***	68.10 ***	5.29 ***
SRL	14.45 ***	93.71 ***	1.54
Root/shoot ratio	18.79 ***	19.10 ***	25.39***

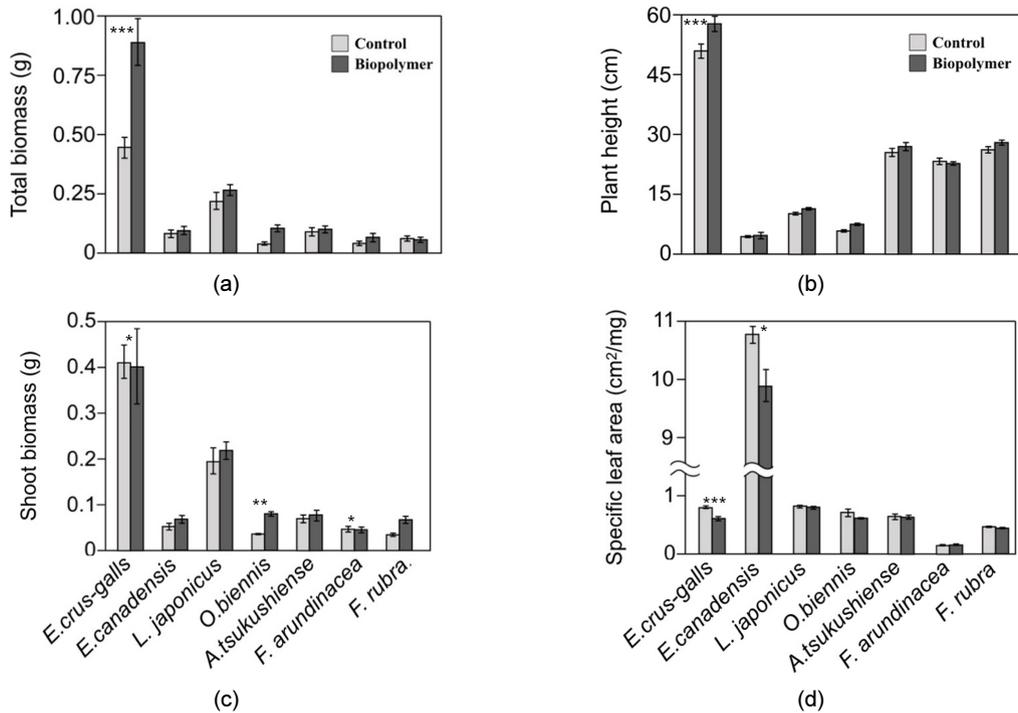


Fig. 2. Effect of biopolymer treatment on plant growth and specific leaf area in testing plant species: (a) total biomass, (b) plant height, (c) shoot biomass, and (d) specific leaf area. Unadjusted means and standard error are given. Asterisks at the top of bar graph represent significance level of the difference between biopolymer treatment and control for each species. * P < 0.05, ** P < 0.01, *** P < 0.001.

하는 경향을 나타냈으나 통계적으로 유의미하지는 않았다. 이러한 결과로 미루어 보았을 때, 바이오폴리머는 식물의 생육을 증가시키지만, 그 효과는 식물종 별로 지상부 건중량의 증가 혹은 지하부 건중량의 증가로 상이하게 나타나는 것으로 보인다.

4. 고찰

둘피 (*E. crus-galli*)를 제외한 6개 식물종의 생육 실험 결과에서 바이오폴리머 처리군의 총 생물량과 지상부 건중량이 대조군에 비해 높은 것으로 나타났다 (Table 2, Fig. 2). 총 생물량이나 지상부 건중량은 서식

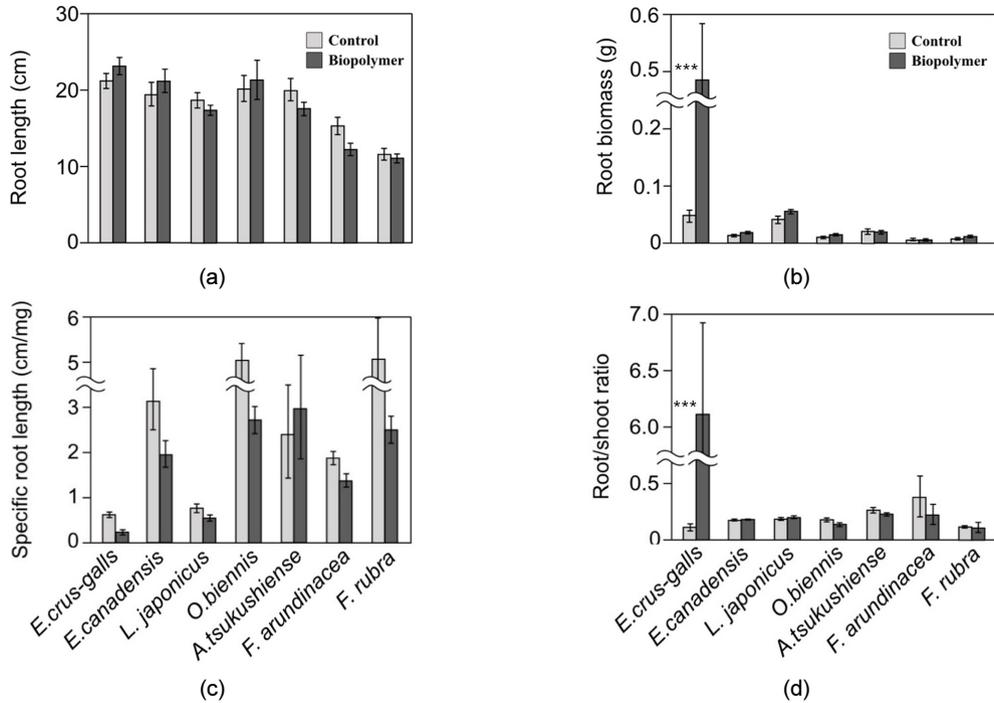


Fig. 3. Effect of biopolymer treatment on the root traits in testing plant species: (a) root length, (b) root biomass, (c) SRL, and (d) root/shoot ratio. Unadjusted means and standard error are given. Asterisks at the top of bar graph represent significance level of the difference between biopolymer treatment and control for each species. *** P < 0.001.

환경 내에서 식물의 생산성을 나타내는 중요한 지표로, 바이오폴리머가 우점종들의 성장에 대한 긍정적인 영향을 주는 것을 의미한다. 반면에 우점종이 아닌 야생 식물종을 대상으로 한 선행 연구에서는 한 종을 제외한 시험종에서 바이오폴리머가 총 생물량과 지상부 건중량에 영향을 주지 않았다 (An et al. 2018).

우점종은 탄소나 양분 순환, 교란에 대한 저항성, 수분 보존 등과 같은 생태계 특성에 큰 영향을 줄 수 있다 (Mass ratio hypothesis) (Grime 1998). 우점종이 정착된 장소에서는 홍수와 같은 요인에 의한 서식지 교란의 정도가 약화되고, 따라서 교란된 장소에 주로 서식하는 외래종이나 잡초류 식물의 침입을 저하시킬 수 있다. 또한 우점종 낙엽의 화학적 성질은 토양의 양분 순환에 큰 영향을 미친다 (Berendse 1998). 이와 함께, 우점종들은 동물의 먹이 및 서식처를 제공함으로써 각 식물종에 특이적인 하천 동물 생태계 구성에 기여한다. 하천 공사 시에 바이오폴리머가 처리된 제방에서는 우점종의 생육이 촉진됨에 비해 우점종이 아닌 식물종의 생육은 비슷하거나 약한 증가를 보일 것으로 예측되고, 이로 인해 바이오폴리머는 제방 공사로 인해 교란된 하천

생태계의 복원에 기여할 것으로 기대된다.

우점종들의 SLA 측정 결과에서, 바이오폴리머 처리군이 전체적으로 낮은 SLA 값을 나타내었다. SLA는 잎의 건중량 대비 엽면적을 나타낸 것으로 건조 스트레스에 대한 식물의 생존 전략을 설명할 때 주요하게 사용된다. 일반적으로 낮은 SLA를 가지는 식물종은 스트레스 내성이 높아 건조한 환경에서 이점을 갖고, 높은 SLA를 보이는 식물종은 생산성은 높지만 짧은 수명과 낮은 스트레스 내성을 보인다 (Wilson et al. 1999). 본 연구에서는 충분한 수분을 공급하여 수분 스트레스를 가하지 않았음에도 불구하고 바이오폴리머 처리군이 낮은 SLA 값을 보였는데, 바이오폴리머 처리에 의해 낮아진 SLA를 갖는 식물체들은 건조한 환경에 노출될 경우 높은 건조 저항성을 보일 것으로 예측된다. 제방에 자생하는 식물들은 하천과 가까운 거리에 위치함에도 불구하고 기상 조건에 따라 건조 스트레스에 노출될 가능성이 높고, 따라서 바이오폴리머는 제방 식물들의 SLA를 낮추고 건조 스트레스 내성에 기여함으로써 제방 식물의 생육 촉진 효과를 기대할 수 있다.

본 실험에서 바이오폴리머에 가장 큰 영향을 받은 식

물은 돌피 (*E. crus-galli*) 종으로 관찰되었다. 돌피 (*E. crus-galli*)는 화본과에 속하는 일년생 단자엽 식물로, 주로 하천 주변과 들판에 전국적으로 분포한다. 최근에는 돌피 (*E. crus-galli*)나 돌피 (*E. crus-galli*) 근연종을 오염된 토양 복원용 녹화식물로 이용하기 위한 연구가 활발히 진행 중이다 (Lee et al. 2012). 바이오폴리머는 돌피 (*E. crus-galli*)의 생장 형질들을 증가시켰는데 특히 뿌리 건중량을 크게 증가시켰다 (Fig. 3). 식물의 뿌리가 토양의 침식을 감소시키고 안정화시킬 수 있는 효과로 미루어 볼 때 (Evette et al. 2009), 바이오폴리머에 의해 지하부 생장이 촉진된 돌피 (*E. crus-galli*)는 제방의 안정화에 기여할 것으로 기대된다. 현재까지 제방 사면 안정화를 위한 식생매트의 주요 식재 식물로 수크령 (*Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng)이나 역새 (*Miscanthus sinensis* Anderss)가 많이 이용되어 왔으나 (Dang et al. 2017), 바이오폴리머가 처리된 돌피 (*E. crus-galli*) 또한 식생매트의 재료로 이용 가능할 것으로 사료된다. 이와 함께, 바이오폴리머는 최근 돌피 (*E. crus-galli*)를 녹화용으로 이용하고자 하는 노력에 도움이 될 것으로 보인다.

본 연구에서 시험된 바이오폴리머의 원물질인 베타글루칸과 잔탄검은 토양의 성질을 변화시키는 것으로 알려져 있다. 예를 들면 수분을 흡수하고 자연 증발량을 줄임으로써 토양 수분 보존 효과를 증진시키거나 (Chang et al. 2016), 토양 내 중금속과 결합할 수 있다 (S.J. Ahn, unpublished data). 이러한 토성 변화는 건조 환경이나 중금속 오염 토양에서의 식물 생장을 촉진시킬 수 있다. 그러나 본 연구에서는 기본 토양으로 원예용 상토를 이용하였고, 토양에 충분한 수분을 공급하였음에도 불구하고 시험 식물종의 생장이 촉진되었다. 이러한 결과는 기존에 알려진 바와 같은 베타글루칸과 잔탄검이 토성 변화를 유도하여 간접적으로 식물 생장을 촉진하는 메커니즘이 아닌, 새로운 생장 촉진 메커니즘의 가능성을 제시한다. 미생물 유래 베타글루칸과 잔탄검은 식물 내부로 흡수될 수 있고, 식물은 흡수된 물질을 병원균의 특성으로 인식하여 면역체계를 활성화시키는 현상이 보고되어 있다 (Bittel and Robatzek 2007). 그러나 흡수된 베타글루칸이나 잔탄검이 식물의 생육에 미치는 영향은 현재까지 알려진 바 없다. 향후 베타글루칸이나 잔탄검이 토양의 성격에 미치는 물리적 영향과 함께, 이들이 식물의 생육에 미치는 화학적 영향,

즉 이들 화합물이 식물에 흡수되었을 때 야기되는 식물의 생리적 변화를 연구할 필요가 있다.

5. 결론 및 제언

본 연구에서는 바이오폴리머가 국내 하천에서 흔히 발견되는 식물종의 생육에 기여하는 것을 실험적으로 증명하였다. 뿌리 건중량 증가와 SLA의 감소 경향 또한 발견되었는데, 이러한 변화는 우점종들의 환경 스트레스 저항성을 증가시킬 것으로 추정된다. 이러한 결과를 바탕으로, 바이오폴리머의 처리가 우점종들의 생육을 촉진시켜 제방 시공으로 인해 교란된 하천변 지역의 식물생태계가 보다 빠르게 복원될 것으로 예측된다. 그러나 실제 자연 환경에서 바이오폴리머의 효과를 예측하기에는 고려해야 할 추가적인 요소들이 많다. 식물의 생육에는 광량, 강수량 등 다양한 외부 환경 요인과 함께 하천 식물 군집을 구성하는 다양한 식물종들의 상호작용이 영향을 미칠 것이다. 또한 우점종이 생태계의 특성에 미치는 영향과 독립적으로 종 다양성이 생태계의 특성에 주는 영향이 최근 밝혀지고 있다 (Smith and Knapp 2003). 따라서, 본 연구 결과를 바탕으로, 바이오폴리머가 실제 하천변 제방 환경에서 자생 식물 생태계의 특성에 주는 영향을 연구할 필요가 있다.

감사의 글

식물의 형질 측정에 참여한 광주과학기술원 대학원 및 대학 학생들에게 감사의 말씀을 드립니다. 본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원 (19AWMP-B114119-04)으로 수행되었습니다.

References

- 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)
- Berendse, F. 1998. Effects of dominant plant species on soils during succession in nutrient-poor ecosystems. Biogeochemistry 42: 73-88.
- Bittel, P. and Robatzek, S. 2007. Microbe-associated molecular patterns (MAMPs) probe plant immunity. Current Opinion in Plant Biology 10: 335-341.

- 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.
- 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, I., Im, J. and Cho, G.C. 2016. Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering. *Sustainability* 8: 251-274.
- 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 banks. *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.
- Grime, J.P. 1998. Benefits of plant diversity to ecosystems: immediate, filter and founder effects. *Journal of Ecology* 86: 902-910.
- Kim, Y.H., Park, N.H., Jin, Y.H. and Kim, C. 2007. Development and application of evaluation technique for revetment for nature-friendly river improvement. *Journal of Korea water resources association* 40: 1007-1014. (in Korean)
- Kim, G.T. and Um, T.W. 1995. A Study for the utilization of wild herbaceous species - effects of gibberellic acid treatment on seed germination. *Korean Journal of Environment and Ecology* 9: 56-61. (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: 1059-1060.
- Lee, Y.H., Byun, J.Y., Na, C.S., Kim, T.W., Kim, J.G. and Hong, S.H. 2015. Moisture sorption isotherms of four *Echinochloa* species seeds. *Weed & Turfgrass Science* 4:111-117. (in Korean)
- OECD. 2006. OECD guideline for the testing of chemicals. <https://doi.org/10.1787/20745761>.
- Peirez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H. and Jaureguiberry, P. 2013. New handbook for standardized measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany* 61:167-234.
- R Core Team. 2008. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>.
- Schultz, R.C., Wray, P.H., Colleti, J.P., Isenhardt, T.M., Rodrigues, C.A. and Juchl, A. 1997. Stewards of our streams: Buffer strip design, establishment and maintenance. *Agriculture and Environment Extension Publications* 216.
- Smith, M.D. and Knapp, A.K. 2003. Dominant species maintain ecosystem function with non-random species loss. *Ecology Letters* 6: 509-517.
- 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.