

바이오폐리머 신소재가 하천 자생 식물 발아 및 생장에 주는 영향

Effects of the β -Glucan- and Xanthan gum-based Biopolymer on the Performance of Plants Inhabiting in the Riverbank

안주희¹ · 정형순² · 김은석^{3*}

¹광주과학기술원 지구환경공학부 박사후 연구원, ²광주과학기술원 지구환경공학부 박사과정, ³광주과학기술원 지구환경공학부 교수

Joo Hee An¹, Hyungsoon Jeong² and Eunsuk Kim^{3*}

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

³School of Earth Sciences and Environmental Engineering, Gwanju Institute of Science and Technology, Gwanju, 61005, Korea

Received 17 September 2018, revised 20 September 2018, accepted 20 September 2018, published online 30 September 2018

ABSTRACT: Biopolymer based on microbial β -glucan and xanthan gum is a rising geotechnical material that can enhance the cohesion between soil particles and consequently reduce soil erosion. Recently, biopolymer is proposed to utilize for the riverbank strengthening. As an effort of the ecological assessment of biopolymer application in civil engineering, this study examined the effects of biopolymer on seed germination and growth of nine plant species inhabiting in the Korean riverside. Responses of above-ground growth to the biopolymer differed among plant species. One species grew less but others maintained their growth when plants were grown in the soil with biopolymer. In contrast, root grew more vigorously and root/shoot ratio decreased in the biopolymer across testing plant species. These results indicate that biopolymer application on the river bank likely stimulate root growth of native plant species, which, in turn, possibly reinforces riverbank. Species specific responses of above-ground growth implies that ecological effects of biopolymer application would depend on the species composition of the ecosystem.

KEYWORDS: Biopolymer, Germination, Growth, Riverbank, Wild plants

요 약: 하천 제방의 토양 안정화 물질의 하나로, 미생물 유래 베타글루칸과 잔탄검 계열 바이오폐리머를 사용하고자 하는 연구가 현재 진행중이다. 본 연구의 목적은 바이오폐리머 신소재의 생태성 평가의 일환으로, 바이오폐리머가 국내 하천에 자생하는 식물의 씨앗 발아 및 생육에 미치는 영향을 평가하는 것이다. 낙동강과 영산강에 자생하는 총 9종의 식물을 대상으로 시험한 결과, 발아율, 총 건조량, 지상부 건조량, specific leaf area 등 지상부 형질에서는 식물종 별로 다양한 바이오폐리머에 대한 반응을 나타냈다. 애기똥풀의 총 건조량과 지상부 건조량은 감소한 반면 타 식물종들은 건조량을 유지하거나 다소 증가시켰다. 반면 대상 식물종들의 뿌리 성장 (뿌리 길이, 지상부 대비 지하부 건조량)은 바이오폐리머가 처리된 토양에서 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과로 보아, 본 연구에서 시험된 바이오폐리머는 토양 강화 효과와 함께 자생 식물의 뿌리 성장을 촉진시켜, 제방을 강화시키는 역할을 할 것으로 기대된다. 그러나 화학물질들에 대한 식물 반응의 종 특이성을 고려할 때, 보다 광범위한 식물종을 대상으로 하는 연구가 필요할 것이다.

핵심어: 바이오폐리머, 제방, 자생식물, 발아, 생장

*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

최근 이상 기후로 인한 집중 호우와 홍수가 빈발하면서, 이로 인한 피해를 효율적으로 줄이기 위한 제방의 중요성이 강조되고 있다. 제방 강화 물질로는 전통적으로 콘크리트와 같은 내구성이 뛰어난 재료를 이용하여 왔으나, 하천 주변 생태계에 대한 관심이 증가하면서 일정 정도의 강도를 유지하면서도 보다 자연 친화적인 재료의 개발이 요구되고 있다. 제방에 식물을 식재함으로써 하천 주변 생태계를 유지하고 이와 함께 식물 뿌리의 작용으로 제방을 강화하는 방법 또한 오랜 기간 연구되어 왔다 (Evette et al. 2009). 그러나 식물만을 이용한 제방 강화는 강도 증진의 측면에서 한계를 가지고 있고, 이를 보완하기 위해 다양한 보조재를 사용하는 방법이 고안되었으나, 제방 강화 및 생태계 보호의 측면에서 한계를 보이고 있는 실정이다.

베타글루칸과 잔탄검은 자연계에 널리 존재하는 탄소 폴리머이다 (Chang et al. 2006). 이들을 토양에 섞을 경우 폴리머들과 토양 입자들 사이에 수소결합이나 이온결합이 형성되어, 그 결과 토양 응집력을 높이게 된다 (Chang et al. 2016). 이러한 성질을 이용하여, 미생물에서 유래한 베타글루칸과 잔탄검을 토양 안정화 물질로 활용하고자 하는 연구가 최근 활발하게 진행되고 있다 (Chang et al. 2016). 토양 안정화 물질로서 베타글루칸과 잔탄검 기반 바이오폴리머의 장점 가운데 하나는, 이미 자연계에 널리 존재하는 물질이고 (Chang et al. 2006), 따라서 친환경적인 화합물이라는 점이다. 이와 함께 바이오폴리머를 처리한 토양에서 귀리의 생육이 증진되는 것이 실험적으로 밝혀졌다 (Chang et al. 2015). 바이오폴리머를 제방에 처리함으로써, 제방의 강도와 식물의 생육을 동시에 증진시키는 자연 친화적인 제방 강화 물질로 이용하고자 하는 연구가 현재 국토교통부의 주관 하에 진행중이다 (Ko and Kang 2018).

그러나 환경 조건이나 화학물질에 대한 식물종 반응

의 다양성을 고려해 볼 때 (OECD 2006, Sultan 2000), 바이오폴리머의 친환경성 평가를 위해서는 다양한 자생 식물종에 대한 평가가 필요하다. 또한 미생물 유래 베타글루칸의 경우, 자연계에 널리 존재함에도 불구하고 식물체가 병원균 유래 베타글루칸으로 인식, 식물체 내에서 면역 반응을 일으킬 수 있다고 알려져 있다 (Bittel and Robatzek 2007). 따라서 미생물 유래 바이오폴리머 소재가 오히려 식물들의 생육을 저해시킬 가능성 또한 제기된다. 본 연구에서는 한국과학기술원에서 개발중인, 미생물 유래 베타글루칸과 잔탄검을 기반으로 하는 바이오폴리머 소재가 국내 하천에 자생하는 야생종의 발아 및 생육에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 식물 씨앗 채집 장소

다양한 지역에 서식하는 식물종을 시험하기 위하여, 낙동강과 영산강에서 자생하는 식물종의 씨앗을 채집하였다. 낙동강 상류 경상북도 안동시 풍산읍의 세 장소와 영산강 지류 전라남도 담양군 봉산면 일대 두 곳에서 2017년 6월 열매를 맺은 식물의 씨앗을 채집하였다. 채집지 주변의 식생은 자연 제방의 시작점에서부터 하천까지 띠 조사구를 설치하여 조사하였다 (Table 1). 채집 시기에 메귀리 (*Avena fatua* L.), 개밀 (*Agropyron tsukushiense* var. *transiens* (Hack.) Ohwi), 이삭사초 (*Carex dimorpholepis* Steud.), 큰금계국 (*Coreopsis lanceolata* L.), 애기똥풀 (*Chelidonium majus* var. *asiaticum* (H. Hara) Ohwi), 지칭개 (*Hemistepta lyrata* Bunge), 소리쟁이 (*Rumex crispus* L.), 말냉이 (*Thlaspi arvense* L.), 사상자 (*Torilis japonica* (Houtt.) DC.) 등 총 9종에서 종자의 채집이 가능하였고, 채집된 종자는 밀봉 처리 후 아이스박스에 넣어 광주과학기술원으로 이송하였다. 식물체 또한 채집하여 Lee (2003)의 도감

Table 1. Sampling sites and their representative plant species

Site	Latitude/ Longitude	Representative plant species
Youngsan River 1	35°15'21"N/ 126°56'38"E	<i>Carex dimorpholepis</i> , <i>Miscanthus sacchariflorus</i> , <i>Salix koreensis</i>
Youngsan River 2	35°15'30"N/ 126°56'15"E	<i>Phragmites australis</i> , <i>Miscanthus sacchariflorus</i>
Nakdong River 1	36°33'34"N/ 128°34'42"E	<i>Coreopsis lanceolata</i> , <i>Phragmites australis</i>
Nakdong River 2	36°34'8"N/ 128°21'48"E	<i>Phragmites japonica</i> , <i>Chelidonium majus</i> , <i>Miscanthus sacchariflorus</i>
Nakdong River 3	36°32'26"N/ 128°33'35"E	<i>Salix koreensis</i> , <i>Phragmites japonica</i>

을 이용하여 동정하였으며, 학명과 국명은 국가표준식물목록 (KNA 2015)을 따랐다.

2.2 실험 방법

2.2.1 바이오폴리머와 토양 혼합

본 연구에 사용된 바이오폴리머는 한국과학기술원에서 제공되었고, 제공자의 권장 방법에 따라 바이오폴리머 토양 배지 (바이오폴리머 용액: 바이오폴리머 분말: 물: 토양 = 1.6 L: 0.1 kg: 9 L: 30 kg)를 제조하였다. 바이오폴리머와 혼합된 토양과 대조군 토양으로는 상용 원예용 상토 (한아름원예용상토, 신성미네랄, 충청북도, 대한민국)를 이용하였다.

2.2.2 발아율 조사

채집된 자생식물 개밀 (*A. tsukushiense*) 외 8종 (Table 2)을 대상으로 바이오폴리머 혼합 토양이 발아율에 주는 영향을 시험하였다. 실제 토양 안정화를 위한 식재의 과정에서는 씨앗의 발아를 촉진하기 위해 다양한 전처리를 하고 있고, 따라서 바이오폴리머와 종자 발아 촉진 처리에 대한 상호작용을 시험하기 위하여 바이오폴리머 처리와 함께 발아 촉진을 위한 전처리로 저온 처리 및 지베렐린 처리를 수행하였다. 저온 처리는 종자를 수분이 충분히 흡수된 페이퍼타월로 감싸고 이를 15 ml conical tube에 넣어 4°C의 성장상 (한백과학, 경기도, 대한민국)에서 일주일 동안 배양하였다. 지베렐린 처리는 종자를 지베렐린산 (Sigma-Aldrich, Darmstadt, Germany) 용액 100 µM에 24시간 동안 침지하였다 (Graham et al. 2007, Kim and Um 1995). 저온처리와 지베렐린 용액 처리군에서 종자는 파종 이전에 수분을

충분히 흡수한 상태이므로, 수분 공급에 따른 발아율 차이를 제거하기 위해 무처리 대조군 씨앗은 1차 증류수에 24시간 동안 침지 이후 파종하였다. 사상자 (*T. japonica*)를 제외한 8 식물종에는 저온 처리 및 지베렐린 처리를 수행하였으나, 사상자의 경우 종자의 수가 부족하여 저온 처리만 수행 하였다.

발아 전처리를 거친 씨앗은 바이오폴리머가 혼합된 상토 혹은 일반 상토로 채워진 종묘판에 파종되었다. 바이오폴리머 처리/ 무처리 종묘판이 mainplot, 3종류의 발아 전처리 및 식물종이 subplot인 split-plot design을 이용하여 하나의 종묘판에 9종의 식물과 3종류의 전처리군이 모두 들어가도록 하였다. 종묘판 내의 각 파종구에 10립의 종자를 파종하였고, 각 실험 처리 별 식물 종 별 15개의 반복구를 만들었다. 종묘판들은 배양대의 위치에 따라 3개의 구획으로 구분된 block 내에서 무작위로 배치되었다. 온도 22°C와 광주기 12시간으로 설정된 성장상에서 배양하였으며, 매일 저면관수를 통해 수분을 공급하고, 3일마다 발아 여부를 기록하였다.

2.2.3 성장 조사

발아를 완료한 개밀 (*A. tsukushiense*), 말냉이 (*T. arvense*), 소리쟁이 (*R. crispus*), 애기똥풀 (*C. majus*), 이삭사초 (*C. dimorpholepis*), 지칭개 (*H. lyrata*), 큰금계국 (*C. lanceolata*)을 바이오폴리머 처리 상토 혹은 일반 상토로 채워진 직경 90 mm, 높이 90 mm의 원형 플라스틱 화분에 화분당 한 개체씩 옮겨 심었다. 바이오폴리머 처리군과 대조군은 각 종별로 최소 20개체 이상을 포함하였다. 발아율이 낮은 메귀리 (*A. fatua*), 사상자 (*T. japonica*)는 실험에서 제외되었다. 모든 화분

Table 2. Collected plant species examined in the study

Species	Family	Site	Life history
<i>Avena fatua</i>	Poaceae	Youngsan River	annual
<i>Agropyron tsukusinese</i>	Poaceae	Youngsan River	Perennial
<i>Carex dimorpholepis</i>	Cyperaceae	Youngsan River	Perennial
<i>Coreopsis lanceolata</i>	Asteraceae	Nakdong River	Perennial
<i>Chelidonium majus</i>	Papaveraceae	Nakdong River	biennial
<i>Hemistepha lyrata</i>	Asteraceae	Nakdong River	biennial
<i>Rumex crispus</i>	Polygonaceae	Nakdong River	Perennial
<i>Thlaspi arvense</i>	Brassicaceae	Nakdong River	biennial
<i>Torilis japonica</i>	Apiaceae	Youngsan River	biennial

Table 3. Result of analysis of variance to compare germination rate among biopolymer treatment, testing species and pre-germination treatments. F ratios are given. The germination rate was arcsine transformed to meet normality assumption. d.f. = numerator / denominator degrees of freedom

Treatment	d.f.	Germination rate
Biopolymer	1/4	0.17
Species	7/754	272.87 ***
Treatment	2/754	9.91***
Biopolymer x Speices	7/754	3.32 **
Biopolymer x Treatment	2/754	2.81
Species x Treatment	14/754	7.83 ***
Biopolymer x Treatment x Speices	14/754	1.11

N = 720. *P < 0.05, **P < 0.01, ***P < 0.001.

은 발아 조사와 동일한 조건으로 맞춰진 성장상에 Completely randomized design으로 배치되었고, 일주일 2 번 저면 관수로 수분을 제공하였다. 식물들을 60 일 동안 배양한 후 수거하여 생육 형질들을 측정하였다.

생육 형질로 개체의 최장 잎 길이, 뿌리 길이, 총 건중량, 정상부 및 지하부 건중량을 측정하였다. 뿌리의 길이는 지하부 시작 부분에서 뿌리의 가장 끝까지의 길이를 측정하였다. 총 건중량, 정상부 및 지하부 건중량은 수거된 식물을 65°C로 설정된 건조기 (한백과학, 경기도, 대한민국)에서 72시간 동안 건조한 이후 측정하였다. 생리적 특성을 대표하는 형질로 정상부 대비 지하부 건중량 (root/shoot ratio), 뿌리 건중량 대비 뿌리의 길이 (specific root length, SRL), specific leaf area (SLA)를 계산하였다 (Pérez-Harguindeguy et al. 2016). SLA는 식물 잎의 면적을 잎의 건중량으로 나눈 값으로 계산된다. 각 식물종 별로 완전히 발달한 잎을 수거하고, 이를 디지털카메라 (Sony α7II, Tokyo, Japan)로 촬영, 이미지 분석 (Digimizer 4.3.4, MeadCalc software bvda, Belgium)을 통해 잎의 엽면적을 측정하였다. 잎의 건중량은 65°C로 설정된 건조기 (한백과학, 경기도, 대한민국)에서 72시간 동안 건조한 이후 측정되었다.

2.3 통계분석

통계분석은 R statistical (R version 3.2.4; R Core Team 2016)를 이용하여 실시하였다. 발아율은 바이오폴리머 처리, 종자 전처리, 식물종, 이들 세 변수의 상호작용, 그리고 block을 독립변인으로 포함한 삼원분산분석 (Three-way ANOVA)으로 분석하였다. 분석 결과 식물종과 바이오폴리머 처리, 식물종과 종자 전처리

의 상호작용이 유의미하게 나타났고 (Table 3), 이를 분석하기 위하여 추가적인 이원분산분석 (Two-way ANOVA)을 각 종별로 수행하였다. 종별 이원분산분석에서는 바이오폴리머 처리, 종자 전처리 및 이들의 상호작용이 독립변인으로 포함되었다. Tukey 방법을 이용하여 각 전처리 별 발아율의 최소제곱평균을 사후 분석 비교하였다. 종속 변수의 정규 분포 가정을 맞추기 위하여 발아율을 arcsine 변환하여 분석을 수행하였다.

바이오폴리머 처리 유무에 따른 각 성장 형질에 미치는 차이는 이원분산분석 (Two-way ANOVA)으로 검정하였다. 각 식물종 별 바이오폴리머 처리 효과를 규명하기 위하여, 형질값의 최소제곱평균을 Bonferroni 방법을 이용하여 사후 분석 비교하였다. 종속 변수의 정규 분포 가정을 맞추기 위하여 지하부 건중량과 SRL은 log 변환한 값을 이용하였고, 정상부 대비 지하부 건중량은 square root 변환값을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 바이오폴리머 및 발아 전처리가 발아율에 주는 영향

식물종과 전처리 효과를 고려하였을 때, 바이오폴리머 처리는 시험 야생식물 씨앗의 발아에 영향을 주지 않았고, 발아 전처리와 식물종 사이의 발아율은 유의한 차이를 보였다 (Table 3). 그러나 바이오폴리머 × 식물종, 전처리 × 식물종의 상호작용이 통계적으로 유의미한 영향을 나타냈는데, 이는 바이오폴리머 혹은 전처리가 종자 발아율에 주는 영향이 식물종 별로 상이함을 나타낸다. 바이오폴리머 × 전처리, 바이오폴리머 × 전처리 ×

Table 4. Results of analyses of variance comparing germination rates of each testing species among biopolymer treatment and pre-germination treatments. F ratios are given. d.f. = degrees of freedom

species	Biopolymer (d.f. = 1)	Treatment (d.f.= 2)	Biopolymer x Treatment (d.f. = 2)
<i>A. fatua</i>	0.00	10.71 ***	0.57
<i>A. tsukusinese</i>	0.00	29.65 ***	1.45
<i>C. dimorpholepis</i>	0.12	1.38	0.09
<i>C. lanceolata</i>	1.70	0.50	0.13
<i>C. majus</i>	7.85 *	2.87	2.18
<i>H. lyrata</i>	5.79	33.58 ***	0.89
<i>R. crispus</i>	5.68	1.27	1.54
<i>T. arvense</i>	0.52	12.66 ***	0.08
<i>T. japonica</i>	0.97	8.65** ¹	0.75

*P < 0.05, **P < 0.01, ***P < 0.001.

¹The degree of freedom was one because gibberellin pre-germination treatment was not applied to seeds of *T. japonica* due to the shortage of collected seeds.

Table 5. Results of post-hoc multiple comparisons of germination rate among pre-germination treatments. t values and adjusted P values based on Tukey's method are given. Multiple comparison was conducted for five plant species showing significant pre-germination effect (Table 4). Gibberellin treatment was not applied to *T. japonica*, so only effect of cold treatment is given. GA, gibberellin treatment; Cont, no treatment; d.f., degree of freedom

Speices	d.f.	Cold - Cont	GA -Cont	GA - Cold
<i>A. fatua</i>	76	4.248 ***	0.535	-3.713 **
<i>A. tsukusinese</i>	76	1.195	7.186 ***	5.991 ***
<i>H. lyrata</i>	76	0.139	7.166 ***	7.027 ***
<i>T. arvense</i>	76	4.152 ***	4.537 ***	0.384
<i>T. japonica</i>	38	-2.944 **		

*P < 0.05, **P < 0.01, ***P < 0.001.

식물종 상호작용은 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다.

식물종별 상이한 바이오폐리머 효과를 시험하기 위하여 각 종별로 이원분산분석을 실시하였다 (Table 4). 바이오폐리머는 애기뽕풀 (*C. majus*)의 발아율을 통계적으로 유의미하게 촉진시켰으나 다른 종은 유의한 차이를 보이지 않았다. 통계적으로 유의미하지는 않지만, 소리쟁이 (*R. crispus*)와 말냉이 (*T. arvense*)의 발아율을 제외한 모든 시험종의 발아율은 유지되거나 소폭 증가하였다 (Fig. 1).

세 종류의 발아 전처리 (무처리, 저온처리, 지베렐린 처리)에 대한 야생종 발아율은 개밀 (*A. tsukushiense*), 메귀리 (*A. fatua*), 지칭개 (*H. lyrata*), 말냉이 (*T. arvense*), 사상자 (*T. japonica*) 등에서 통계적으로 유의한 차이를 보였으며, 이삭사초 (*C. dimorpholepis*), 애기뽕풀 (*C. majus*), 큰금계국 (*C. lanceolata*), 소리쟁이 (*R. crispus*) 등은 차이가 없었다 (Table 4). 이원분산분석에서 발아

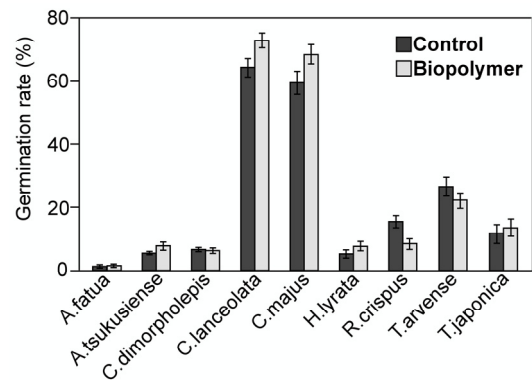


Fig. 1. Effect of biopolymer treatment and plant species on seed germination. See Table 3, 4 for significance test. Average germination rate across germination pre-treatment and standard error are given.

전처리에 유의한 차이가 있는 종에 대해 전처리 간의 발아율 차이를 사후 분석하였을 때, 사상자 (*T. japonica*)를 제외한 식물종들에서 지베렐린이나 저온처리가 무

Table 6. Results of analyses of variance comparing morphological and physiological traits among testing plant species and biopolymer treatment. F ratios are given. Root mass and specific root length (SRL) were log transformed and root/shoot ratio was square-root transformed to meet normality assumptions. d.f. = degrees of freedom. SLA, specific leaf area; SRL, specific root length; R/S ratio, root/shoot ratio

Trait	Biopolymer (d.f. = 1)	Species (d.f. = 6)	Biopolymer x Species (d.f. = 6)
Leaf length	0.069	217.645 ***	4.880 ***
Total biomass	0.637	28.655 ***	2.466 *
Shoot mass	3.029	28.076 ***	2.741 *
SLA	4.663 *	10.577 ***	10.732 ***
Root length	5.080 *	11.173 ***	1.002
Root mass	6.029 *	40.478 ***	3.022 **
SRL	3.377	69.444 ***	4.108 ***
R/S ratio	7.308 **	69.077 ***	0.656

*P < 0.05, **P < 0.01, ***P < 0.001.

처리에 비해 높은 발아율을 유도하였다 (Table 5). 사상자 (*T. japonica*)는 다른 야생종과 다르게 무처리기 저온처리에 비해서 발아율이 높은 결과를 보였다.

3.2 지상부 생장

바이오폴리머는 대조구와 비교하였을 때, 잎의 길이, 총 건중량, 지상부 건중량에 유의미한 영향을 주지 않았으나, SLA에는 유의미한 영향을 나타냈다 (Table 6). 그러나 바이오폴리머 x 식물종 처리가 모든 측정 형질에서 통계적으로 유의미하였고, 따라서 바이오폴리머의 영향은 식물종별로 상이하게 나타나는 것으로 보인다. 사후분석결과 통계적으로 유의미한 차이를 보면, 바이오폴리머가 혼합된 토양에서 생육된 애기뽕풀 (*C. majus*)은 일반 상토에서 생육되었을 때와 비교해서 잎 길이, 총 건중량, 지상부 건중량, 그리고 SLA가 감소하였다 (Table 7). 반면 말냉이 (*T. arvense*)의 잎 길이, 지칭개 (*H. lyrata*)의 SLA는 증가하였다. 애기뽕풀 (*C. majus*), 지칭개 (*H. lyrata*)를 제외한 다른 종들의 잎 길이, 총 건중량, 지상부 건중량은 통계적으로 유의미하지는 않았지만 다소 증가하는 경향을 나타냈다.

식물은 이동성이 없는 이유로, 외부의 환경 변화에 대응하여 생리적 형질, 생육, 발달의 변화가 능동적으로 이루어지는데, 이러한 환경 반응은 각 식물종 별로 상이하게 나타난다 (Sultan 2000). 이러한 특성은 빛이나 토양 수분과 같은 식물 서식지 자연 환경 조건들의 변화에 대한 식물의 대응 뿐만 아니라, 인간이 생성한 화학 물질에 대한 반응에서도 흔히 나타나는 현상이다

(OECD, 2006). 따라서 본 연구에서 시험된 식물종들이 바이오폴리머 처리에 대해 상이한 반응을 보이는 것은 기존 연구의 결과들에 부합한다고 할 수 있다. 바이오폴리머가 식물 생육에 주는 영향을 평가하기 위해서는 여러 식물종들을 대상으로 하여 종합적으로 평가할 필요가 있다.

본 연구 결과로 미루어보아, 바이오폴리머를 하천 제방에 처리할 경우 하천 생태계를 구성하는 다양한 식물종들은 다양한 생육 반응을 할 것으로 추정된다. 또한 바이오폴리머가 토양의 수분 함량과 같은 식물 서식지 환경에 영향을 준다면 (Chang et al. 2015), 바이오폴리머와 식물, 서식지 환경 조건 사이에 매우 복잡한 상호작용이 나타날 가능성이 있다. 여러 식물종들로 구성된 메소코즘을 실제 제방 환경 조건 하에서 구축하고, 바이오폴리머 처리가 메소코즘에 주는 영향에 대한 연구가 필요하다.

3.2.1 지하부 생장

바이오폴리머는 대조구와 비교하였을 때 식물의 뿌리 길이, 뿌리 건중량, 지상부 대비 지하부 건중량에서 유의미한 영향을 보였다 (Table 6). 바이오폴리머 x 식물종 상호작용은 뿌리 길이에서 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않았는데, 본 연구에서 테스트한 자생 식물종들 중에서 애기뽕풀 (*C. majus*)을 제외한 6종은 바이오폴리머가 혼합된 토양에서 뿌리 길이 생장이 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 3). 반면 뿌리 건중량과 SRL의 바이오폴리머에 대한 반응은 종별로 상이하게 나타났다. 뿌리 건중량의 경우, 통계적으로 유의미하지 않

Table 7. Results of post-hoc multiple comparisons of traits between biopolymer treatments. t values and adjusted P values based on Bonferroni method are given. Multiple comparison was conducted for traits showing significant species x biopolymer effect (Table 6)

Species	Leaf length	Total biomass	Shoot mass	SLA	Root mass	SRL
<i>E. tsukusinese</i>	0.49	1.24	1.31	-6.01 ***	-0.60	-1.18
<i>C. dimorpholepis</i>	-0.86	-2.17	-1.90	-1.84	1.74	2.40
<i>C. lanceolata</i>	0.11	0.65	0.37	-0.90	-0.78	-3.37**
<i>C. majus</i>	-3.42**	-2.85*	-3.69 **	-2.75*	0.71	1.54
<i>H. lyrata</i>	2.55	-0.18	-0.79	4.36**	-0.67	-1.06
<i>R. crispus</i>	-1.24	0.73	0.06	1.48	-1.33	-0.86
<i>T. arvense</i>	2.92 *	0.42	-0.04	-0.05	-0.86	-2.21

*P < 0.05, **P < 0.01, ***P < 0.001.

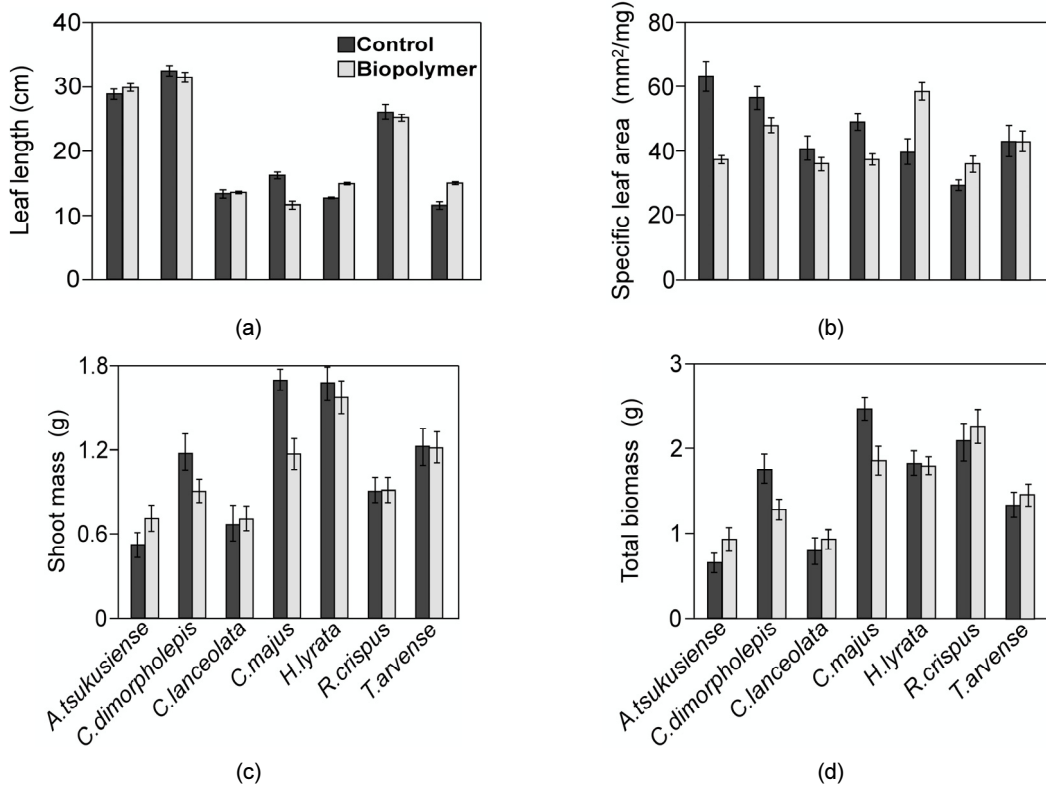


Fig. 2. Effect of biopolymer treatment and plant species on shoot traits and total dry biomass: (a) leaf number, (b) total dry biomass, (c) shoot dry biomass, and (d) specific leaf area. Unadjusted means and standard error are given.

았지만 이삭사초 (*C. dimorpholepis*)와 애기똥풀 (*C. majus*)은 다소 감소한 반면 다른 종들은 증가하는 경향을 보였다. SRL은 뿌리의 건중량 당 길이 비율로, SRL의 감소는 동일 길이의 뿌리 중량이 증가하는 것을 의미한다. 큰금계국 (*C. lanceolata*)의 SRL은 바이오폴리머가 처리되었을 때 통계적으로 유의미하게 감소하였다. 개밀 (*A. tsukushiense*)과 말냉이 (*T. arvense*)의

SRL도 큰 폭으로 감소하였으나 통계적으로 유의미하지는 않았고, 다른 종들의 SRL은 변화를 보이지 않았다 (Table 7). 개밀 (*A. tsukushiense*)을 제외한 식물종들의 지상부 대비 지하부 건중량은 대체로 증가하는 경향을 보였는데, 특히 큰금계국 (*C. lanceolata*)에서 통계적으로 유의미하게 증가하였다.

이러한 결과들로 미루어 볼 때, 바이오폴리머는 국내

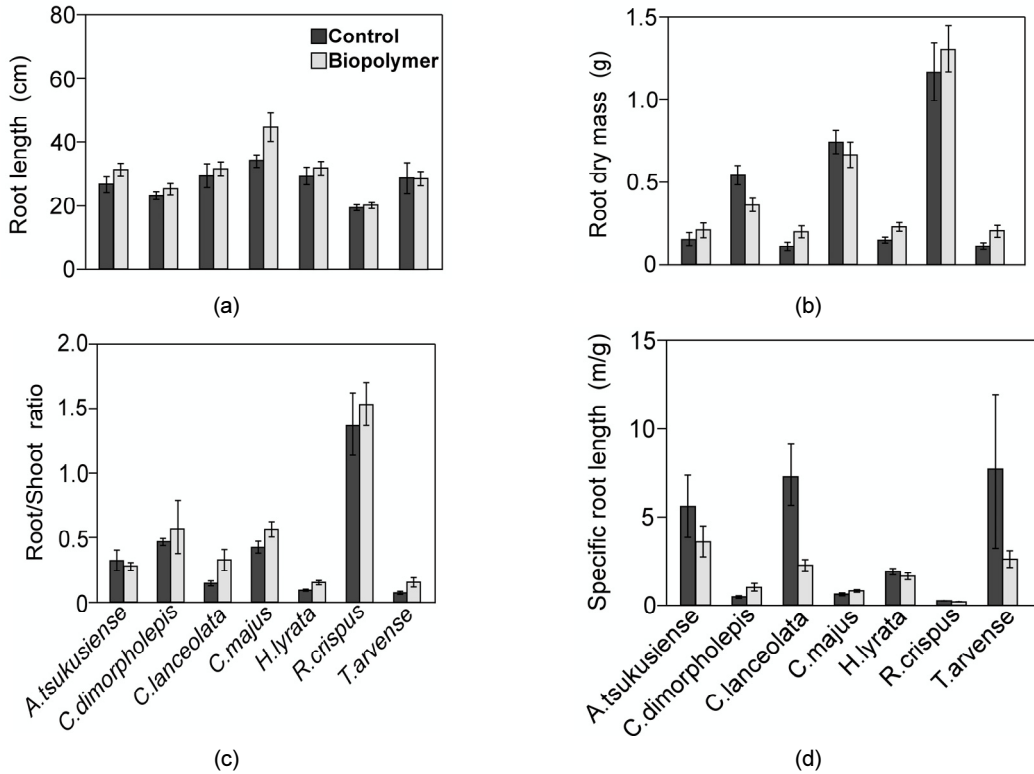


Fig. 3. Effect of biopolymer treatment and plant species on the root traits: (a) root length, (b) root dry biomass, (c) root/shoot ratio, and (d) specific root length. Unadjusted means and standard error are given.

하천에 자생하는 식물종들의 뿌리 생장에 도움을 주는 것으로 보인다. 식생을 이용한 제방 사면 보호 연구는 오랜 역사를 지니고 있다 (Evette et al. 2009). 식생의 뿌리는 제방 사면의 안정화에 기여하며 (Pollen, 2007), 식생에 의한 근모양 자체가 침식방지에 큰 효과가 있는 것으로 보인다 (Choi et al. 2014). 본 연구의 결과는 제방 사면에 바이오폐리머가 처리될 경우, 바이오폐리머 자체의 토양 강화 효과와 더불어, 우리나라 하천에 자생하고 있는 많은 야생종의 뿌리 생육을 촉진시킬 수 있고, 결과적으로 식생의 제방 사면 보호 효과를 증대시킬 수 있는 가능성을 제시한다.

바이오폐리머가 혼합된 토양이 식물의 뿌리 생육에 미치는 영향에 대한 기작은 현재까지 알려지지 않았으나, 바이오폐리머의 물리적, 화학적 성질을 기반으로 두 가지의 추론이 가능하다. Chang et al. (2015)에 의하면 바이오폐리머를 첨부할 경우 토양은 두 가지의 물리적 특성이 변하는데, 토양 입자들이 바이오폐리머와 수소결합이나 이온결합을 형성함으로써 토양의 응집력과 보

습 능력이 증가한다. 본 연구에서는 실험 대상 식물종들에 일주일에 두 번 저면 관수로 충분한 양의 수분을 공급하였고, 따라서 토양 수분 변화로 인한 영향은 미미할 것으로 판단된다. 따라서 증가된 토양의 응집력이 식물 뿌리 생육에 영향을 줄 수 있을 것으로 추정된다. 이러한 물리적 성질 변화와 함께 바이오폐리머는 토양의 화학적 성질에도 영향을 줄 수 있다. 베타글루칸과 잔탄검 계열의 바이오폐리머는 표면에 음전하를 띠는데, 이들이 양전하를 갖는 식물 영양 성분과 이온 결합을 하여, 식물의 양분 흡수를 방해할 수 있다. 이에 대한 능동적 반응의 일환으로, 식물은 양전하를 갖는 영양분의 흡수를 위해 뿌리의 생육을 촉진시킬 수 있다. 식물 뿌리 생육을 촉진시키는 바이오폐리머의 물리적, 화학적 특성 연구를 위해, 본 연구실에서는 뿌리의 생육 관찰이 가능한 시스템 개발과 함께, 바이오폐리머를 토양이 아닌 식물배양매지에 첨부, 바이오폐리머의 화학적 효과를 시험할 예정이다.

4. 결론

본 연구는 미생물 유래 바이오폴리머가 우리나라 2개의 하천에서 자생하는 야생종의 발아, 생존, 생장의 전과정에 미치는 영향을 조사하였다. 바이오폴리머는 대부분 시험 식물의 생육을 유지시키거나 혹은 촉진시키는 것으로 나타났다. 특히 뿌리의 길이와 무게를 증진시켰다. 대상 식물종들은 바이오폴리머 처리에 대해 상이하게 반응하였고 따라서 바이오폴리머가 실제 제방에 처리될 경우 자생하는 식물종들은 다양한 반응을 보일 것으로 추정된다. 현재 국내에서 진행되는 화합물에 대한 독성 연구의 대부분은 농작물을 대상으로 하고 있고, 자연계 내의 자생종을 대상으로 하는 연구는 거의 수행되지 않고 있다. 또한 하천에 자생하는 식물의 특성 연구도 매우 부족한 실정이다. 본 연구의 결과는 현재 개발 중인 바이오폴리머의 환경적 특성과 함께 국내 하천 자생 식물의 특성에 대한 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

식물의 형질 측정에 참여한 광주과학기술원 대학원 및 대학 학생들에게 감사의 말씀을 드립니다. 본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원 (18AWMP-B114119-03)으로 수행되었습니다.

References

- Bittel P. and Robatzek, S. 2007. Microbe-associated molecular patterns (MAMPs) probe plant immunity. *Current Opinion in Plant Biology* 10: 335-341
- 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.
- 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
- Choi, H.S., and Lee, W.H. 2014. Analyses of shear stress and erosion characteristic in a vegetated levee revetment with root fiber quantity. *Ecology and Resilient Infrastructure* 1: 29-38. (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.
- Kim, G.T. and Um, T.W. 1995. A Study for the utilization of wild herbaceous species - effects of gibberelic 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.
- Lee, T.B. 2003. *Coloured flora of Korea*. Hyang Mun Sa, Seoul. (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 Jaureguibery, P. 2013. New handbook for standardized measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany* 61: 167-234.
- Pollen, N. 2007. Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: accounting for soil shear strength and moisture. *Catena* 69: 197-205.
- R Core Team. 2008. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>.
- Sultan, S.E. 2000. Phenotypic plasticity for plant development, function and life history. *Trends in Plant Science* 12: 537-542.