Journal of Environmental Science International
34(6); 325~331; June 2025
pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2025.34.6.325

ORIGINAL ARTICLE

염해지에서 식생매트 유형에 따른 토양 특성 및 자생초화류의 발아 반응

박재현 · 임효인 · 조성모[1)] · 윤용한[1)] · 주진희[1)*]
국립산림과학원 산림생명정보연구과, [1)]건국대학교 녹색기술융합학과

Soil Characteristics and Germination Responses of Native Plants Across Vegetation Mat Types in Salt-damaged Areas

Jae-Hyun Park, Hyo-In Lim, Sung-Moh Cho[1)], Young-Han Yoon[1)], Jin-Hee Ju[1)*]
Forest Bioinformation Division, National Institute of Forest Science, Suwon 16631, Korea
[1)]Department of Green Technology Convergence, College of Science and Technology, Konkuk University, Chungju 27478, Korea

Abstract

This study aimed to evaluate the effects of different vegetation mat types on soil properties (pH and electrical conductivity [EC]) and the germination of native flowering plants in saline coastal soils. Three treatments, including control (C), blanket (B), and blanket vegetation mat (BV), were tested under simulated saline conditions (EC ~ 4 dS/m). No significant differences were observed in soil pH among treatments; however, soil EC was significantly reduced in the BV treatment, suggesting an effective reduction in salt accumulation ($p<0.05$). Among the tested native plant species, germination was observed only in *Dendranthema zawadskii*, whereas *Chrysanthemum seticuspe, Aster indicus* L., *Phragmites australis*, and *Pennisetum alopecuroides* did not germinate. Although overall germination rates were low, *D. zawadskii* exhibited the highest germination rate (1.05%) in the BV treatment. Regression analysis further showed that germination rate significantly increased as soil EC decreased ($R2 = 0.633,\ p<0.001$), highlighting the importance of managing soil EC for coastal restoration. These findings demonstrate that vegetation mats can partially mitigate soil salinity and enhance germination in saline coastal areas, underscoring the need for further research on salt-tolerant species and additional management techniques.

Key words : NaCl, Planting Substrate, Soil properties, Coastal area, *Dendranthema zawadskii*

1. 서 론

인간 활동과 기후 변화로 인해 담수 및 해안 생태계의 염분이 증가하고 있다. 이로 인해 생물 다양성 손실과 생태계 기능 장애가 발생하고 있으며, 특히 최근 기후변화로 인한 해수면 상승과 태풍 발생 빈도 증가로 해안가 지역의 토양 염분 피해가 더욱 심화되고 있다 (Melles, 2023). 해안가에서 발생하는 해수 비말(sea spray)은 지속적으로 염분을 토양 표면에 침적시켜 토양의 염류 축적을 가속화한다. 이는 결과적으로 식물의 발아 및 생육이 현저히 저하되는 문제를 야기한다(Du and Hesp, 2020). 일반적으로 토양 내 염류 축적 정도는 전기전도도(EC)를 이용해 평가되며, EC가 4 dS/m 이상이면 염류 피해가 심각한 saline soil로 간주된다

Received 24 April, 2025; **Revised** 27 May, 2025;
Accepted 2 June, 2025
***Corresponding author** : Jin-Hee Joo, Department of Green Technology Convergence, College of Science and Technology, Konkuk University, Chungju 27478, Korea
Phone : +82-43-840-3541
E-mail : jjhkkc@kku.ac.kr

(Nirmala et al., 2020). 염해 피해를 완화하고 해안가 생태계를 복원하기 위한 방안으로 최근 친환경적인 식생매트(Vegetation mat)의 활용이 주목받고 있다. 식생매트는 주로 코코넛 섬유나 황마 등 천연 섬유로 제작되어 토양 표면을 덮음으로써 염분의 침투 속도를 늦추고, 토양 표면의 수분 보유력을 높이는 역할을 수행한다(Jaafar et al., 2020). 특히 코코넛 섬유는 높은 리그닌 함량과 강한 물리적 내구성을 지녀 염류 축적을 효과적으로 억제하며(Reddy, 2005), 황마 섬유는 토양의 강도와 안정성을 향상시켜 토양 매트릭스 내 염분의 이동 및 유지에 잠재적으로 영향을 미칠 수 있다(Kumar & Mir, 2019). 그러나 해안가 염해환경을 복원하기 위한 식생매트를 활용하는 국내 연구는 미흡한 실정이다.

한편, 구절초(*Dendranthema zawadskii*), 산국(*Chrysanthemum seticuspe*), 쑥부쟁이(*Aster indicus* L.) 등 국화과 식물과 갈대(*Phragmites australis*), 수크령(*Pennisetum alopecuroides*) 등 벼과 식물은 염해환경에서의 생육 잠재력과 생태계 복원 가능성이 보고된 바 있다(Bandurska et al., 2022; Nguyen et al., 2023). 그러나 국내에서 이들 자생식물을 활용한 염해지역의 생존력과 적응성 연구가 부족하며, 다양한 식생매트 조건과 이들 식물의 토양 내 상호작용에 대한 구체적인 정보도 매우 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구는 해안가 염해 환경을 모의한 조건에서 식생매트의 종류가 국내 자생 국화과와 벼과 식물의 발아율 및 토양 화학적 특성 변화에 미치는 영향을 평가하고자 한다. 이를 통해 해안가 염해지의 생태적 복원과 관리 전략 수립에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험 재료

본 실험에 사용된 토양은 펄라이트(New PerlShine No. 3, Green Fire Chemicals Co., Ltd., Korea)와 원예용 상토(Hanpanseung, SGtech, Korea)를 사용하였다. 원예용 상토의 화학적 특성은 pH 6.5, EC 0.65 dS/m이하 , 유기물 함량은 50% 이상으로, 염해 토양 환경을 모사하는 데 적합한 것으로 판단하였다. 염화나트륨은 순도 NaCl ≥ 99.9%(NaOClean®, Naocryn Salt Co., Ltd., Korea)를 사용하였다. 자생 초화류 종자는 2017년 국립백두대간 수목원 채종 임분에서 채취한, 척박한 토양 환경 적응력과 내염성이 높은 구절초(*Dendranthema zawadskii*), 산국(*Chrysanthemum seticuspe*), 쑥부쟁이(*Aster indicus* L.) 등 국화과 3종 및 갈대(*Phragmites australis*), 수크령(*Pennisetum alopecuroides*) 등 벼과 2종을 선정하였다.

2.2. 실험구 조성

본 연구는 2019년 5월부터 10월까지 내부 환경조건(온도 30 ± 3℃, 상대습도 66 ± 2%, 조도 21,947 lux)이 유지되는 유리온실에서 수행하였다. 실험구는 토양의 과습 방지와 효율적인 배수를 위해 삽목상자(크기 50.0 × 35.0 × 8.5 cm) 하단에 펄라이트 290 g을 깔고, 그 위에 원예용 상토 1,600 g을 고르게 포설하여 조성하였다. 공식식물로 국립백두대간 수목원 채종 임분에서 채취한, 5종(*Dendranthema zawadskii*, *Chrysanthemum seticuspe*, *Aster indicus* L., *Phragmites australis, Pennisetum alopecuroides*) 우량종자 100립을 각 처리구별로 3반복씩 파종하여 총 9개의 실험구를 구성하였다. 실험 처리는 컨트롤구(C, Control), 식생 블랑켓(B, Blanket), 그리고 식생 블랑켓(Blanket)과 식생 매트(Vegetation mat)를 결합한 BV (Blanket Vegetation Mat)의 총 3가지 처리구로 구분하였다. 특히 BV 처리구는 천연섬유로 제작된 황마(Jute mat), 블랑켓 층(Blanket layer), 망(Net layer)의 다층 구조로 구성된 식생매트로, 내열성 및 내알칼리성이 뛰어나고 강도가 높은 특징을 가지고 있다(Kim et al., 2007). 이 BV 매트를 원예용 상토가 완전히 덮일 정도로 멀칭하였다. 또한, 염해지의 Sea spray 환경을 재현하기 위해 염화나트륨(NaCl) 10 g/L 농도의 수용액을 매회 약 200 mL씩 매일 2회 표면 살포법으로 처리하여 인공적인 염해 환경을 조성하였다(Fig. 1).

2.3. 데이터 분석

토양 화학적 특성을 평가하기 위하여 토양 시료는 드라이 오븐(Model OF-22GW, Jeio Tech, Daejeon, Korea)에서 105℃로 72시간 동안 건조한 후 2 μm 체를 이용하여 선별하였다. 토양의 산도(pH) 및 전기전도도(EC)는 농촌진흥청 토양화학분석법(NAAS, 2010)에 따라 분석하였다. pH와 EC 측정을 위해 토양 시료 5 g과 증류수를 1:5 비율로 혼합하여 30분간 진탕한 뒤,

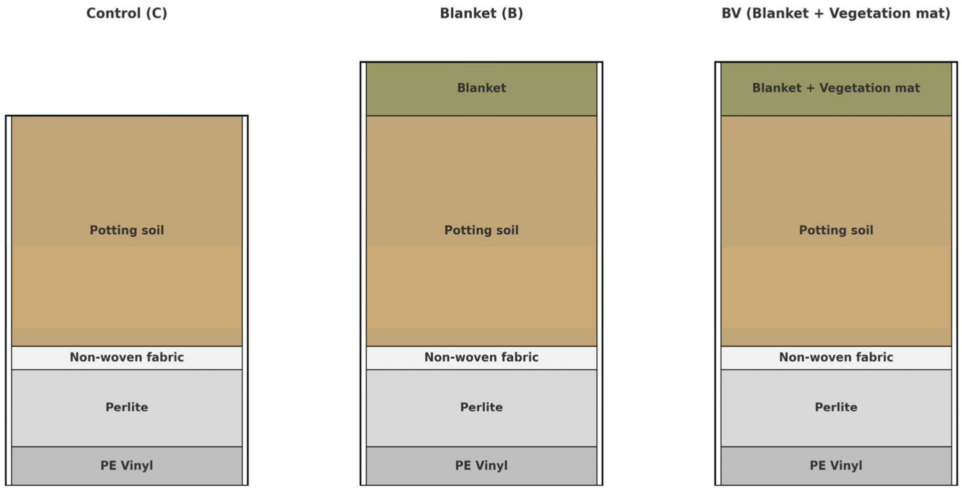

Fig. 1. Schematic diagrams of experimental plots according to vegetation mat treatments. (Control (C), Blanket (B), and Blanket + Vegetation mat (BV)).

5B 여과지(Adventec filter paper No. 5B, 110 mm)로 여과하였다. 여과된 용액의 pH와 EC는 각각 pH meter (ST3100, OHAUS, Japan) 및 EC meter (ST3100, OHAUS, Japan)를 사용하여 측정하였으며, pH 및 EC는 주당 2회(3~4일 간격) 측정하였다. 측정 전 pH/EC는 표준용액을 이용하여 매주 1회 주기적으로 교정(calibration)하였다. 종자 발아율은 유근 길이가 2 mm 이상인 개체를 기준으로 하여 주당 2회 발아율(Percent germination, PG)은 각 처리구에서 측정된 총 발아수(N)를 총 공시 종자수(S)로 나누어 100을 곱하여 평균값으로 산정하였다(Han et al., 2014).

2.4. 통계분석

본 연구에서는 Python (Pandas, SciPy, Statsmodels)을 이용하여 기술통계, Shapiro-Wilk 정규성 검정, ANOVA, Tukey 사후검정을 수행하였으며, 통계적 유의성은 $p < 0.05$ 수준에서 평가하였다. 추가적으로 토양 변수와 발아율 간의 관계는 Simple linear regression 분석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 식생매트 유형에 따른 토양 pH 비교 분석

토양의 pH 값은 처리구 간 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다($p > .05$, Table 1). 평균 pH 값은 무처리구(C)가 4.64 ± 0.17, 블랑켓 처리구(B)가 4.63 ± 0.12, 식생매트 처리구(BV)가 4.58 ± 0.16으로, 세 처리구 모두 유사한 수준이었다. Tukey의 사후검정 결과에서도 처리구 간의 모든 쌍별 비교는 통계적으로 유의하지 않았다($p > .05$). 구체적으로 B와 C 간 평균 차이는 0.013, B와 BV 간의 차이는 -0.046, C와 BV 간의 차이는 -0.059로 모두 유의하지 않았다. 이러한 결과는 본 연구의 실험 조건에서 블랑켓과 식생매트 처리(B, BV)가 토양의 pH 변화에 무처리구(C)와 비교하여 영향을 미치지 않았음을 시사한다.

식생매트 유형(블랑켓 및 식생매트)의 처리는 토양 pH에 유의미한 영향을 미치지 않았는데, 이는 식생매트와 같은 유기성 피복재료가 단기간의 처리 조건에서 토양의 화학적 특성, 특히 pH를 변화시키기 어렵다는 기존 연구 결과들과 일치한다(Benigno et al., 2013; Weil & Brady, 2016).

일반적으로 토양 pH 변화는 유기물 분해, 미생물 활성도, 토양의 이온교환능력과 같은 복합적이고 장기적인 화학적 과정에 의해 영향을 받는다(Marschner & Rengel, 2007). 또한 본 실험에서 사용된 블랑켓과 식생매트의 주요 구성 성분인 코코넛 섬유와 황마 섬유는 생분해가 상대적으로 느리고 초기 분해 과정에서의 유기산 방출량이 제한적이기 때문에 짧은 기간 내에 pH

Table 1. Summary of statistical analysis for pH

Treatment[y]	Mean[z]	Median	Min	Max	*p-value*
C	4.64 ± 0.17 a	4.64	4.31	4.98	〉.05
B	4.63 ± 0.12 a	4.63	4.36	4.85	〉.05
BV	4.58 ± 0.16 a	4.56	4.30	4.31	〉.05

[y]Control (C), Blanket (B), and Blanket + Vegetation mat (BV)
[z]Values represent the mean ± standard deviation(SD), Statistical signigicance was tested using ANOVA followed by Tukey's HSD test at p〈0.05 level

Table 2. Summary of statistical analysis for EC

Treatment[y]	Mean[z](dS/m)	Median	Min	Max	*p-value*
C	5.63 ± 1.47 a	5.49	2.65	8.01	〈.05
B	4.76 ± 1.02 b	4.53	3.72	6.18	〈.05
BV	3.56 ± 1.85 c	3.47	1.25	5.86	〈.05

[y]Control (C), Blanket (B), and Blanket + Vegetation mat (BV)
[z]Values represent the mean ± standard deviation(SD), Statistical signigicance was tested using ANOVA followed by Tukey's HSD test at p〈0.05 level

Table 3. Seed germination rate of five native plants under different vegetation mat treatments

Family	Species	Control(C)	Blanket(B)	Blanket+Vegetation mat(BV)
Asteraceae	Dendranthema zawadskii	0.06	0.67	1.05y
	Chrysanthemum seticuspe	0.00	0.00	0.00
	Aster indicus L.	0.00	0.00	0.00
Poaceae	Phragmites australis	0.00	0.00	0.00
	Pennisetum alopecuroides	0.00	0.00	0.00

[y]Values indicate percent germination(%)

를 변화시키는 데 한계가 있을 것으로 판단된다(Purwaningsih & Muliawati, 2022).

3.2. 식생매트 유형에 따른 토양 EC 비교 분석

토양의 EC 값은 처리구 간 통계적으로 유의한 차이를 나타냈다(*p〈.05*, Table 2). 각 처리구의 평균 EC 값은 무처리구(C, 5.63 ± 1.47 dS/m), 블랑켓 처리구(B, 4.76 ± 1.02 dS/m), 식생매트 처리구(BV, 3.56 ± 1.85 dS/m) 순으로 나타났다. 이는 무처리구에서 염류의 축적이 가장 심하고, 식생매트 처리구에서 가장 적다는 것을 의미한다. Tukey 사후검정 결과, BV와 C 간 EC 값의 차이가 2.08로 가장 크고 통계적으로 유의미했으며(*p〈.05*), BV 처리구의 염류 저감 효과가 가장 우수함을 나타냈다. 또한 BV와 B 처리구 사이의 차이도 1.20으로 유의하게 나타나(*p〈.05*), BV가 B보다 염류 축적 억제에 더 효과적임을 확인되었다. B 처리구 역시 무처리구(C)에 비해 EC 값이 평균적으로 0.87 낮았으며, 이 또한 통계적으로 유의하였다.

식생매트 처리구(BV)가 무처리구(C)와 블랑켓 처리구(B)에 비해 토양의 전기전도도(EC)를 유의미하게 감소시킨 결과는 식생매트가 토양 표면에서 염분의 침투를 물리적으로 차단하고, 수분 보유력을 향상시켜 염류의 축적을 억제하는 데 효과적임을 시사한다. 선행연구에 따르면, 코코넛 섬유와 같은 천연 재료로 제작된 식생매트가 토양의 염분 농도를 효과적으로 감소시킬 수 있다는 선행 연구 결과(Nirmala et al., 2020)와도 일치한다. 또한, 토양 유기물 함량과 수분 함량은 EC 값에 직접적인 영향을 미치며(Kim & Park, 2024), 이는 식

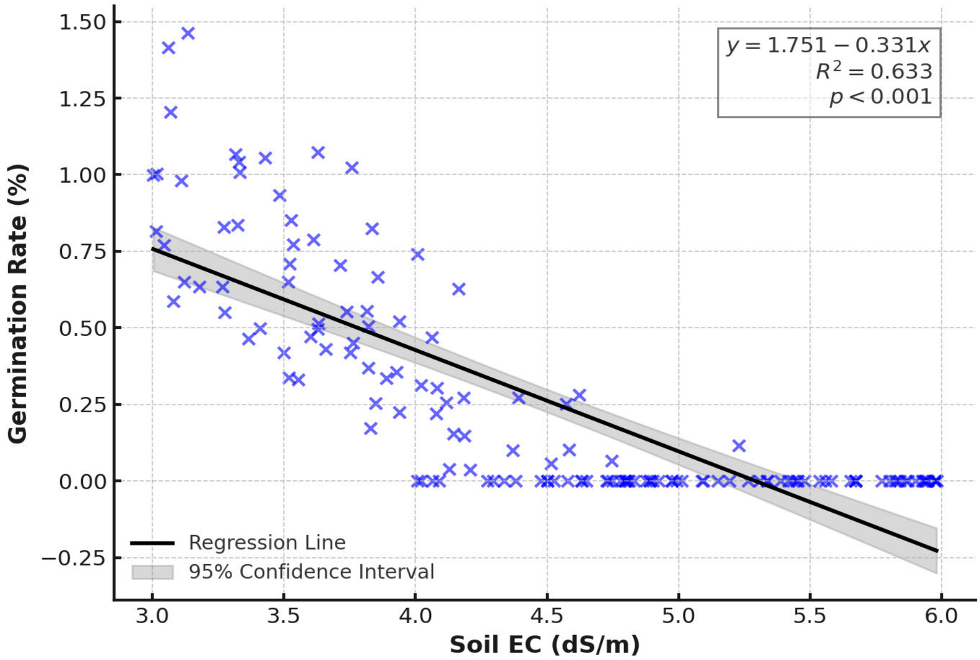

Fig. 2. Linear regression analysis between soil EC and germination rate of *Dendranthema zawadskii*; The shaded area indicates the 95% confidence interval.

생매트가 토양의 물리적 특성을 개선하여 염류 축적을 방지하는 데 기여할 수 있음을 뒷받침한다. 따라서 식생매트는 염해 지역의 EC 개선에 효과적인 수단으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

3.3. 식생매트 유형에 따른 식물 종자 발아율 비교 분석

국내 자생 초화류 5종의 발아율을 처리구(C, B, BV)에 따라 비교한 결과, 대부분의 종자에서 발아가 이루어지지 않았다(Table 3). 산국(*Chrysanthemum seticuspe*), 쑥부쟁이(*Aster indicus* L.), 갈대(*Phragmites australis*), 수크령(*Pennisetum alopecuroides*)은 모든 처리구에서 발아율이 0%로 나타났다. 이는 실험에서 설정한 염해 조건(EC 약 4 dS/m)이 해당 종들의 발아 허용 한계를 초과하는 강한 스트레스 조건이었음을 시사한다. 반면, 구절초(*Dendranthema zawadskii*)는 모든 처리구에서 발아가 확인되었으며, 발아율은 무처리구(C) 0.05%, 블랑켓 처리구(B) 0.67%, 식생매트 처리구(BV) 1.05%로 나타났다. 비록 모든 처리구에서 발아율이 매우 낮았지만, BV 처리구가 다른 처리구에 비해 상대적으로 높은 발아율을 보였다.

대부분의 자생 초화류가 설정된 염해 조건에서 발아하지 못한 결과는 해당 조건이 식물 종들의 발아 및 초기 생장에 심각한 스트레스로 작용했음을 의미하며, 오직 구절초만이 제한적인 내염성을 보였다(Bandurska et al., 2022). 식생매트 처리구(BV)에서 구절초의 발아율이 소폭 증가한 것은 식생매트의 염류 저감 효과 및 수분 스트레스 완화 효과가 종자 발아에 긍정적인 영향을 미친 것으로 사료된다. 추가로 수행한 회귀분석 결과, 토양 EC가 높아질수록 구절초의 발아율이 유의하게 감소하는 것으로 나타났으며(R^2=0.633, p<.05, Fig. 2), 이는 염해지 복원 시 EC 관리가 필수적인 요인임을 강조한다. 그러나 전반적인 발아율이 매우 낮아 실질적인 생태복원 효과로 연결되기에는 한계가 있다. 따라서 향후 추가 연구에서는 더욱 다양한 내염성 초화류를 대상으로 EC 조절과 함께 발아를 촉진할 수 있는 추가 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구는 식생매트 유형이 염해지 토양환경과 초화류 발아에 미치는 영향을 분석하였다. 실험 결과, 식생매트 처리는 단기간 내 토양 pH에는 유의미한 변화를 나타나지 않았다. 식생매트 처리구(BV)는 무처리구(C)와 블랑켓 처리구(B)에 비해 토양 EC 값을 감소시켜 염류 축적 저감 효과가 있는 것을 확인하였다. 발아 실험에서는 국내 자생 초화류 5종 중 오직 구절초만이 제한적인 발아를 보였으며, 특히 식생매트 처리구에서 상대적으로 높은 발아율을 나타냈다. 이는 구절초가 일정 수준의 내염성을 가지고 있으며, 식생매트의 염류 저감 효과가 발아 환경을 부분적으로 개선했음을 시사한다. 본 실험 조건에서는 대부분의 초화류 발아에 뚜렷한 효과를 기대하기 어려웠으나, 향후 염해지 생태 복원을 위해서는 식생매트의 장기적 적용 효과 분석과 함께 잠재적 내염성 식물종 선발 및 추가적인 기술 개발이 필요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

Bandurska, H., Breś, W., Tomczyk, A., Zielezińska, M., Borowiak, K., 2022, How chrysanthemum (Chrysanthemum × grandiflorum) ‘Palisade White’ deals with long-term salt stress, AoB PLANTS, 14(3), 1-10, https://doi.org/10.1093/aobpla/plac015.

Benigno, S. M., Dixon, K. W., Stevens, J. C., 2013, Increasing soil water retention with native-sourced mulch improves seedling establishment in postmine Mediterranean sandy soils, Restor. Ecol., 21(5), 617-626, https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2012.00926.x.

Du, J., Hesp, P. A., 2020, Salt spray distribution and its impact on vegetation zonation on coastal dunes: A Review, Estuaries Coasts, 43(8), 1885-1907, https://doi.org/10.1007/s12237-020-00820-2.

Han, J. J., Lee, K. S., Park, Y. B., Yang, G. M., Bae, E. J., 2014, Comparison of germination characteristics and various pre-treatment methods for enhancing germination on Zoysia grass, Weed Turf. Sci., 3(3), 232-239.

Jaafar, A., Rahman, M. F. A., Ahmad Jeni, M. L., Osman, M., Awang, Z., Abdullah, M. S., Ismail, T. N. H. T., Sanik, M. E., 2020, Coconut coir mat for slope vegetation, Proceedings of the Third International Conference on Separation Technology 2020 (ICoST 2020), Adv. Eng. Res., 200, 281-285, https://doi.org/10.2991/AER.K.201229.036.

Kim, H. N., Park, J. H., 2024, Monitoring of soil EC for the prediction of soil nutrient regime under different soil water and organic matter contents, Appl. Biol. Chem., 67, 1, https://doi.org/10.1186/s13765-023-00849-4.

Kim, S. W., Lee, M. H., Seo, C. H., 2007, Research for yielding the best mixture design and complemental strength of jutes mixed extrusion molding cement complex, J. Archit. Inst. Korea Struct. Constr., 23(10), 115-122.

Kumar, P., Mir, F. A., 2019, Use of jute fiber in improving geotechnical properties of soil, Springer, Singapore, 487-494, https://doi.org/10.1007/978-981-13-6713-7_38.

Marschner, P., Rengel, Z. (Eds.), 2007, Nutrient cycling in terrestrial ecosystems, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany, https://doi.org/10.1007/978-3-540-68027-7.

Melles, S. J., 2023, Documenting the impacts of increasing salinity in freshwater and coastal ecosystems: Introduction to the special issue, Limnol. Oceanogr. Lett., 8(1), 1-7, https://doi.org/10.1002/lol2.10307.

NAAS (National Academy of Agricultural Science), 2010, Method of soil chemical analysis, Rural Development Administration, Wanju, Korea.

Nguyen, D. Q., Tran, T. H. G., Do, H. D., Nguyen, H. H., 2023, Expression analysis of genes encoding salt induced transport proteins in two contrasting rice cultivars with different salt stress tolerance, Acad. J. Biol., 45, 59-67, https://doi.org/10.15625/2615-9023/18301.

Nirmala Mary, P. C., Murugaragavan, R., Ramachandran, J., Shanmugasundaram, R., Karpagam, S., Rakesh, S., 2020, Saline soil reclamation, Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci., 2(10), 1070-1072, https://www.researchgate.net/publication/345055605.

Purwaningsih, D. Y., Muliawati, E. C., 2022, Pemanfaatan serabut kelapa sebagai biosorben dalam removal cod pada limbah cair industri pewarna makanan, J. Ind. Process Chem. Eng., 2(1), 90-95, https://doi.org/10.31284/j.joiche.2022.v2i1.3151.

Reddy, N., Yang, Y., 2005, Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications, Trends Biotechnol., 23(1), 22-27, https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2004.11.002.

Weil, R. R., Brady, N. C., 2016, The nature and properties of soils, 15th ed., Pearson Education, Columbus, Ohio, USA, ISBN: 9780133254488.

• Post doctor researcher. Jae-Hyun Park
Forest Bioinformation Division, National Institute of Forest Science
jh2344@korea.kr
• Senior research officer. Hyo-In Lim
Forest Bioinformation Division, National Institute of Forest Science
iistorm@korea.kr
• Doctoral student. Sung-Moh Cho
Department of Green Technology Convergence, College of Science and Technology, Konkuk University
rebolt81@naver.com
• Professor. Young-Han Yoon
Department of Green Technology Convergence, College of Science and Technology, Konkuk University
yonghan7204@kku.ac.kr
• Professor. Jin-Hee Ju
Department of Green Technology Convergence, College of Science and Technology, Konkuk University
jjhkkc@kku.ac.kr