친환경 지반 보강을 위한 바이오폴리머 구아검 수용액의 주입특성

Characteristics of Biopolymer Guar Gum Solution Injection for Eco-Friendly Ground Reinforcement

유재은* · 정종원**

Ryou, Jae-Eun*, and Jung, Jongwon**

Abstract

Recently, research on the use of biopolymers for environmentally friendly soil improvement has been actively conducted. Biopolymer soil treatment has various effects, such as the enhancement of soil strength, reduction of hydraulic conductivity, and enhancement of vegetation. In this study, the flow and injection characteristics of guar gum solutions were analyzed to develop biopolymer-based injection materials. Viscosity measurements and micromodel experiments were conducted to analyze the flow and injection properties. Viscosity measurements indicated that the guar gum solution showed a tendency of shear-thinning, in which the viscosity decreased as the shear rate increased. By applying the Power-law, the consistency index tended to increase as the concentration of aqueous guar gum solution increased. However, no clear trend was observed for the behavior index. As a result of the micromodel experiment, the pore saturation tended to increase as the volumetric flow rate and concentration of the guar gum solution increased. This is because of an increase in the injection pressure and apparent viscosity. When applied to an actual field, the required injection pressure varies depending on the ground conditions. Therefore, the results of this study will be used as fundamental data for determining the concentration of aqueous guar gum solution suitable for ground conditions.

Key words : Biopolymer Soil Treatment, Guar Gum, Viscosity

요 지

최근 친환경 지반 개량을 위한 바이오폴리머 활용 연구가 활발히 수행되고 있다. 바이오폴리머 지반 처리는 지반의 강도 증진, 투수계수 저감, 식생 증진 등 다양한 효과를 보인다. 본 연구에서는 바이오폴리머 기반 주입재 개발을 위해 구아검 수용액의 유동 및 주입특성을 분석하였다. 유동 및 주입특성 분석을 위해 점도 측정, 마이크로모델 실험을 수행하였다. 점도 측정 결과, 구아검 수용액은 전단 변형률 속도 증가에 따라 겔보기 점도가 감소하는 전단담화의 경향을 보인다. 또한, 대표적인 전단담화 유체 모델인 Power-law 적용 시 구아검 수용액의 농도가 증가할수록 Consistency index가 증가하는 경향을 보이나 Behavior index는 뚜렷한 경향을 찾을 수 없었다. 마이크로모델 실험 결과, 주입 유량 및 구아검 수용액의 농도가 증가할수록 공극 포화도가 증가하는 경향을 보였다. 이는 주입압력 및 겔보기 점도의 증가에 기인한다. 실제 현장에 적용 시 지반 조건에 따라 요구되는 주입압력은 달라진다. 따라서, 본 연구 결과는 지반 조건에 맞는 구아검 수용액의 농도 결정을 위한 기초 자료로 활용될 것으로 사료된다.

핵심용어 : 바이오폴리머 지반 처리, 구아검, 점도, 주입특성

*정회원, 충북대학교 토목공학과 박사과정(E-mail: jaeeunryou@chungbuk.ac.kr)

Member, Graduate Student. Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

**교신저자, 정회원, 충북대학교 토목공학부 부교수(Tel: +82-43-261-2405, Fax: +82-43-261-2405, E-mail: jjung@chungbuk.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

1. 서 론

최근 부족한 건설 부지 확충 및 도시공간의 효율적인 확보를 위해 지하공간, 연약지반 등의 활용이 점진적으로 증가하고 있다. 지하공간 및 연약지반의 토지 활용을 위해서는 지반 개량이 필요하며 재하공법, 치환공법, 탈수공법, 약액주입공법 등 다양한 지반 개량 공법에 대한 연구가 수행되어왔다. 이 중 약액주입공법은 적용대상 토질 선정 제한에 대해 자유로우며 인접 구조물 및 지하 매설물에 미치는 영향이 적고, 경화재의 밀도가 높은 경우 지하수 흐름에도 유실되지 않는 장점이 있다. 약액주입공법은 대상 지반의 조건 및 목적에 따라 다양한 주입재의 활용이 가능하다. 약액주입공법에 활용되는 주입재 선택에 고려되는 사항은 침투성, 개량 효과, 내구성, 무공해성, 취급용이성, 경제성 등이 대표적이다(Kim, 2010). 그러나, 현재까지 위의 특성을 완전하게 만족하는 주입재는 개발되지 않았으며 개량 효과, 내구성 및 경제성에 장점을 갖는 시멘트계 주입재가 주로 활용되었다.

최근 환경 문제의 중요성이 대두됨에 따라 친환경 지반 개량이 많은 관심을 받고 있다. 바이오폴리머(Biopolymer)는 생분해성 물질로 기원은 유기체의 세포를 통해 생성되는 천연 물질이다. 바이오폴리머는 식품 산업, 포장, 제조, 의학 등 다양한 분야에서 응용되고 있다. 지반 개량에 활용된 바이오폴리머는 잔탄검(Xanthan gum), 아가검(Agar gum), 구아검(Guar gum), 베타글루칸(β -glucan), 카제인(Casein) 등 다양하며 이들은 전단강도 증가, 투수계수 저감, 표면 침식 저항성 증가, 사막화 방지, 지반 복원, 석유 회수 증진(Enhanced Oil Recovery) 등의 효과가 있다(Bouazza et al., 2009; Jung et al., 2014; Chang, Im et al., 2015; Chang, Prasadhi et al., 2015; Ayeldeen et al., 2016; Jung et al., 2016; Jang et al., 2017; Lee et al., 2017; Chang and Cho, 2018; Fatehi et al., 2018; Ham et al., 2018; Ko and Kang, 2020). 바이오폴리머의 지반공학적 적용에는 현장 분사 공법을 활용한 제방의 보수가 대표적이며 범용성 증진을 위한 추가 연구가 필요한 실정이다(Seo et al., 2019).

침투 그라우팅은 높은 유동성을 갖는 주입재를 활용하여 지반의 간극에 스며들도록 주입하는 공법으로 수압할렬 및 지표면 융기 방지에 효과적이다(Idriss and Boulanger, 2008; Bruce, 2012). Park and Lim (2016)은 필댐 체제의 성능 개선을 위한 저압 침투 그라우팅을 활용하여 불규칙적으로 열화가 진행된 코어층의 효과적인 차수능 개선을 보였다. Jeoung et al. (2016)은 미세균열 보강을 위한 마이크로시멘트와 고분자계 주입재에 대해 주입 성능을 비교한 결과, 마이크로시멘트의 경우 필터 케이크 형성으로 인한 공극막힘(clogging)이 발생하였고 고분자계 주입재의 경우 상대적으로 안정적인 주입 양상을 보였다(Jeoung et al., 2016; Hwang et al., 2018). 위의 선행 연구 결과는 미세균열 및 점토층

지반과 같은 작은 크기의 공극 충진을 위한 고유동성 주입재의 활용은 효과적이라고 시사하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 지반 개량에 활용되는 친환경 바이오폴리머 중 구아검 수용액의 주입재로 활용을 위한 유동 및 주입특성을 분석하였다.

2. 점 도

점도는 유체의 흐름에 저항하는 성질을 의미하며, 공극 내 유체의 흐름 양상을 결정하는 중요한 요인 중 하나이다. 공극 내에서 유체의 점도에 따라 점성수(Viscosity number) 및 모세관수(Capillary number)가 변화하며 이는 점성핑거링(Viscous fingering) 또는 모세관핑거링(Capillary fingering)의 주입 형태를 결정한다(Lenormand and Zarcone, 1989; Jung et al., 2014; Cao et al., 2016). 또한, 주입되는 유체의 점도는 지반의 파쇄 형태 및 주입 유량 결정에 영향을 주는 직접적인 요소이다. 따라서, 주입재로 활용을 위한 점도 측정은 중요하다.

구아검 수용액은 전단 변형률 속도에 따라 겔보기 점도가 일정하지 않은 비뉴턴 유체의 거동을 보인다. 비뉴턴 유체 중 전단담화(Shear-thinning)의 거동을 나타낸다. 비뉴턴 유체의 거동은 여러 요인으로 인해 발생할 수 있으며 대표적으로 흐름으로 인한 유체 분자의 구조적 재구성(reorganization)과 관련이 있다. 구아검 수용액의 유동 특성 분석을 위해 전단담화의 대표적인 모델인 Power-law 모델을 활용하였으며 식은 Eq. (1)과 같다. 또한, 식에서 활용되는 파라미터 consistency index (k), behavior index (n)에 대한 분석을 수행하였다.

$$\tau = k(\dot{\gamma})^n \quad (1)$$

Eq. (1)에서 τ 는 전단응력, $\dot{\gamma}$ 는 전단 변형률 속도, k 는 Consistency index, n 은 Behavior index이다.

3. 실험 재료 및 방법

본 연구에서 주입재 제조에 사용된 바이오폴리머는 파우더 형태의 구아검이며 물과 0.3~1%의 중량비로 혼합하여 수용액을 제조하였다. 제조 시 24시간 동안 70 °C의 온도를 유지하며 전자력 교반기를 활용하였다. 농도는 구아검과 물의 중량비를 의미하며 농도별 구아검 수용액의 점도 측정, 마이크로모델 주입실험을 수행하였다.

3.1 구아검(Guar gum)

구아검(Guar gum)은 콩의 종류인 구아에서 발생된 galactomannan polysaccharide를 의미한다. 구아검의 화학적 구조는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1. The Chemical Structure of Guar Gum

구아검의 가장 중요한 특징은 온도에 따라 빠르게 수화되어 낮은 농도에서도 고점성을 발현이 가능한 점이다(Mudgil et al., 2014). 지반공학적 관점에서 구아검은 사막화 모래 및 팽창성 지반의 개량을 위해 활용도 가능하다(Acharya et al., 2017; Puppala and Pedarla, 2017).

3.2 점도 측정

Fig. 2는 Brookfield사의 회전형 점도계(LV-DVE)를 나타낸다. 회전형 점도계를 활용하여 구아검의 농도에 따라 걸보기 점도를 측정하였다. 점도 측정방법은 구아검 수용액의 농도별 용액의 점도에 맞는 스펀들을 선택하여 1~100 RPM의 일정한 회전을 주어 전단 저항을 측정하였다. 이후 측정된 전단 저항 및 RPM을 통해 전단 변형률 속도에 따른 점도 및 전단응력을 계산하였다.

3.3 마이크로모델 주입실험

마이크로모델 주입실험의 전체 구성은 유체 주입 장치, 마이크로모델, 이미지 분석 장비로 이루어진다. 유체 주입 장치는 증류수(Distilled water, DI)와 바이오폴리머 수용액의 주입속도 조절이 가능한 주사기 펌프(Syringe pump, KatsScientific, NE-1010) 및 이물질 제거를 위한 필터를 활용하였다. 마이크로모델(Micromodel, Micronit, Uniform network)은 대칭적인 이산화규소(SiO_2) 유리판으로 이루어지며 유리판의 폭과 길이는 각각 10, 20 mm이다. 576개의 원반형 입자의 직경은 590 μm 이고, 원반형 입자 사이 영역의 높이와 폭은 각각 20, 30 μm 이다(Jang et al., 2017). 원반형 입자는 지반 흙 입자의 표면특성을 유사하게 구현할 수 있으며 원반형 입자의 사이 영역은 공극을 의미하며 각각의 위치에 존재하는 공극은 3개의 서로 다른 공극과 인접해 있다. 구아검 수용액 주입에 따른 마이크로모델의 공극 포화도 분석을 위한 이미지 분석 장비로는 암실 및 고해상도 카메라를 활용하였다. 암실은 이미지 처리 간 밝기에 의한 오차 감소를 위해 활용되었고 고해상도 카메라를 통해 마이크로모델 내 주입 양상을 분석하였다. 마이크로모델 주입실험의 전체 과정은 구아검 수용액을 주사기에 충전한 뒤 주사기 펌프를

Fig. 2. Viscosity Measurement Apparatus

Fig. 3. Schematic Diagram of Micromodel Experiment

통해 유량에 따라 DI 및 구아검 수용액을 마이크로모델에 주입하였다. 이후 고해상도 카메라를 활용하여 마이크로모델 내 구아검 수용액의 공극 포화도를 계산하였다. 마이크로모델 주입실험은 공극이 공기로 찬 상태로 수행하였으며 주입된 용액으로 인한 마이크로모델 내의 공극 변화가 일어나지 않을 때까지 주입하였다. 모든 실험은 수행되기 전에 에탄올을 주입하여 유체 주입부 및 마이크로모델을 세척하여 이물질로 인한 실험오차를 최대한 감소시켰다. 주사기 펌프의 주입 유량은 1, 10, 100, 1,000 $\mu\text{L}/\text{min}$ 로 변화하여 공극 포화도 변화를 분석하였다. 전체적인 마이크로모델 주입실험의 모식도는 Fig. 3과 같다.

마이크로모델 주입실험으로 얻어진 원본 이미지의 픽셀 값은 인접해 있는 픽셀에 영향을 미치며 이미지는 각각 명암의 차이를 보인다. 이러한 오차는 불명확한 구분을 야기하며 최종적으로 이미지 세분화 및 이원화에 치명적인 오류를 발생시킬 수 있다. 이미지의 세분화는 골격화(skeletonize) 및 외곽선 구분 작업(outlining)이 포함되며 시료의 공극을 백색, 이외의 부분을 흑색으로 이진화 및 경계화를 수행하였다. 전체 이미지 처리 과정은 원본 이미지를 8-bit gray 이미지

로 변환한 뒤, 필터링을 통해 최소 및 최대 픽셀의 범위를 지정하여 경계화(thresholding)를 통해 이원화된 잔류 유체와 주입 유체의 비를 산정하여 공극 포화도를 계산하였다. 이미지 처리 과정 간 ImageJ (Public domain software, v1.52) 및 Matlab (Mathworks, R2021a) 소프트웨어 기반의 이미지 처리 코드를 활용하였으며 이미지 처리 과정 작업은 Fig. 4와 같다.

4. 실험 결과 및 고찰

실험 결과는 점도 측정 및 마이크로모델 주입 결과를 포함한다. 점도 측정은 구아검 수용액의 농도에 따른 겔보기 점도, 전단응력의 값을 활용하여 비뉴턴 유체 모델의 파라미

Fig. 4. Image Treatment Process

Fig. 5. Viscosity Changes with Shear Rate of Guar Gum Solutions

터 분석을 수행하였다. 마이크로모델 주입실험은 구아검 수용액의 농도에 따른 공극 포화도를 분석하였다.

4.1 점도 측정

Fig. 5는 전단 변형률 속도에 따른 겔보기 점도의 값을 나타낸다. 모든 농도에서 구아검 수용액은 전단 변형률 속도가 증가함에 따라 겔보기 점도가 감소하는 전단담화 유체의 성질을 띠며 일정 전단 변형률 속도 이상에서 겔보기 점도는 수렴하는 경향을 보인다. 또한, 농도가 증가함에 따라 동일 전단 변형률 속도에서의 겔보기 점도는 증가하는 경향을 보인다. 구아검 수용액은 농도가 0.3, 0.5, 0.8, 1%인 경우 11.55~58, 24.15~100, 168.1~500, 296.4~725 mPa·s의 겔보기 점도 값을 보인다. 구아검 수용액의 겔보기 점도는 구아검 농도가 0.3 및 0.5%, 0.8 및 1% 결과에서 유사한 범위를 갖는다. 구아검의 농도 증가에 따른 겔보기 점도의 증가는 높은 분자량 및 폴리머-물 간 결합으로 인해 농도에 따라 겔보기 점도 값의 증가를 보이는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 구아검 수용액의 전단 변형률 속도에 따른 전단응력을 나타낸다. 구아검 수용액의 경우 모든 농도에서 전단 변형률 속도가 증가할수록 전단응력이 증가하는 경향을 보이며 농도 증가에 따라 동일 전단 변형률 속도에서 높은 전단응력의 값을 보인다. 구아검 수용액의 전단응력의 범위는 농도가 0.3, 0.5, 0.8, 1%일 때 각각 0~0.5, 0~1.2, 0~7.9, 0~8.1 Pa의 값을 보인다. 이는 농도에 따른 겔보기 점도 증가의 일환이다.

Table 1은 구아검 수용액의 농도에 따른 Power-law 파라미

Fig. 6. Rheological Curve of Guar Gum Solutions

Table 1. Power-law Parameters of Guar Gum Solution

Biopolymer	Concentration [%]	Behavior index n [dimensionless]	Consistency index k [Pa · s ⁿ]	R ²
Guar gum	0.3	0.9188	0.0169	0.9982
	0.5	0.8105	0.0650	0.9995
	0.8	0.8221	0.4063	0.9998
	1	0.9375	0.3927	0.9999

터 값을 나타낸다. 구아검 수용액의 Power-law 식 적용 결과, 평균 R^2 값이 0.998 이상으로 높은 정확도를 보인다. 또한, Power-law 지수 파라미터인 behavior index n 은 0.8105~0.9375의 값을 갖으며 농도에 따른 경향은 보이지 않는다. 반면, Power-law 계수 파라미터인 k 값은 0.0169~0.3927의 값을 나타내며 농도에 따라 증가하는 경향을 보인다.

4.2 마이크로모델 주입실험

Fig. 7은 구아검 수용액의 마이크로모델 주입실험 결과를 나타낸다. 구아검 수용액과 비교를 위한 물의 주입 유량에 따른 공극 포화도는 42.62~91.29%로 계산된다. 또한, 구아검 수용액의 경우 공극 포화도는 농도에 따라 68.91~98.48, 83.38~97.66, 77.41~98.72, 81.94~100%로 계산된다. 주입 유량이 1~1,000 $\mu\text{L}/\text{min}$ 범위에서 0.3, 0.8, 1% 농도의 구아검 수용액은 농도에 따라 공극 포화도가 증가하는 경향을 보였으나 0.5%의 농도에서는 100 $\mu\text{L}/\text{min}$ 에서 감소하는 상이한 결과를 보였다. 이는 실험 및 이미지 분석에 의한 오차라고 사료된다. 이를 제외한 모든 유체는 주입 유량 증가에 따라

Fig. 7. Pore Saturation Changes with Volumetric Flow Rate

Fig. 8. Normalized Velocity Profile of Guar Gum Solutions

포화도가 증가하는 경향을 보이며 이는 주입 유량 증가에 따른 주입압력의 증가에 기인한다. 또한, 동일한 주입 유량에서 농도가 구아검 수용액의 농도가 증가할수록 포화도가 증가하는 경향을 보인다.

4.3 구아검 수용액 농도에 따른 유속

Fig. 8은 구아검 수용액의 농도에 따른 정규화된 유속 분포를 나타낸다. 구아검 수용액의 주입특성 분석을 위해 지반의 공극을 2차원 튜브로 단순화하여 유속 분포를 계산하였다. 식에서 q 는 주입유량, n 은 Behavior index, k 는 Consistency index, ΔP 는 흐름 간 주입압력, R 은 튜브의 반지름을 의미한다. 계산 시 흐름은 층류로 가정하며, 주입 유체는 Power-law 거동을 따르고, 동일한 주입압력으로 주입한다고 가정하였다(Sochi, 2007). 최대 유속은 구아검 수용액의 농도가 낮을수록 증가하는 경향을 보인다. 0.3% 농도 구아검 수용액의 최대 유속은 다른 농도와 비교하였을 때 1% 농도에 비해 32.1배, 0.8% 농도에 비해 24.55배, 0.5% 농도에 비해 2.47배 빠르다. 또한, 관 마찰로 인한 영향은 구아검 수용액의 농도가 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. 이는 동일한 공극 구조를 갖는 지반에서 구아검 수용액의 농도가 낮을수록 높은 유속을 갖는다고 할 수 있다. 최종적으로, 동일한 유속으로 주입 시 구아검 수용액의 농도가 낮을수록 낮은 주입압력을 요구한다는 것을 의미한다.

Fig. 7의 결과에서 구아검 수용액의 주입 유량에 따라 공극 포화도가 증가하는 경향을 보인다. 주입 유량의 증가는 동일한 체적을 갖는 공극에서의 주입압력 증가를 의미하기 때문이다. 그러나 실제 현장에서 높은 주입압력은 지반의 할렬 파쇄 및 침하를 유발할 수 있다. Fig. 7의 결과에서 동일한 주입 유량으로 주입 시 구아검 수용액과 공기 간 점성 비 차이에 기인하여 구아검 수용액의 농도가 증가할수록 공극 포화도가 증가하였다. 그러나, Fig. 8의 결과에 따라 구아검 수용액의 농도가 증가할수록 높은 주입압력을 요구한다. 결론적으로, 구아검 수용액의 농도가 증가할수록 공극 포화도는 증가하나 높은 주입압력을 요구한다. 따라서, 현장 지반조건에 따라 보강을 위한 최적의 구아검 수용액 농도는 변화하며 추가적인 연구를 통해 주입 및 주입성능의 정량적 평가가 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 구아검 수용액을 주입재로 활용하기 위한 유동 및 주입특성에 대한 기초 연구를 수행하였다. 농도별 구아검 수용액의 점도 측정을 통해 유동 특성을 분석하였으며 마이크로모델 주입실험을 통해 주입특성을 분석하였다. 본 연구의 결론은 아래와 같다.

- (1) 구아검 수용액은 전단 변형을 속도 증가에 따라 겔보기 점도가 감소하며 전단응력이 증가하는 전단담화의 경

향을 보인다. 전단담화의 대표적 모델인 Power-law 적용을 한 결과, 구아검 수용액의 농도 증가에 따라 Consistency index가 증가하는 경향을 보이며 Behavior index는 경향이 관찰되지 않는다.

- (2) 구아검 수용액은 농도가 증가할수록 높은 공극 포화도 값을 나타내며 이는 점도 증가에 따라 구아검 수용액과 공기 간 점성 비 차이로 판단된다.
- (3) 모든 구아검 수용액은 주입압력 증가에 따라 공극 포화도가 증가하는 경향을 보인다. 그러나 실제 현장에서 그라우팅 시공 적용 시 높은 주입압력은 지반의 파쇄 및 균열을 발생시킨다. 따라서, 현장 조건이 요구하는 주입압력에 따라 최적의 구아검 수용액 농도를 결정할 수 있으며 본 연구의 결과를 통해 바이오폴리머 주입재 개발을 위한 기초 자료로 활용이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 충북대학교 국립대학육성사업(2020) 지원을 받아 작성되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Acharya, R., Pedarla, A., Bheemasetti, T.V., and Puppala, A.J. (2017). Assessment of guar gum biopolymer treatment toward mitigation of desiccation cracking on slopes built with expansive soils. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2657, pp. 78-88.
- Ayeldeen, M.K., Negm, A.M., and El-Sawwaf, M.A. (2016). Evaluating the physical characteristics of biopolymer/soil mixtures. *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 9, No. 5, pp. 1-13.
- Bouazza, A., Gates, W.P., and Ranjith, P.G. (2009). Hydraulic conductivity of biopolymer-treated silty sand. *Geotechnique*, Vol. 59, No. 1, pp. 71-72.
- Bruce, D.A. (2012). *Specialty construction techniques for dam and levee remediation*. CRC press.
- Cao, S., Bate, B., Hu, J., and Jung, J. (2016). Engineering behavior and characteristics of water-soluble polymers: Implication on soil remediation and enhanced oil recovery. *Sustainability*, Vol. 8, No. 3, pp. 205.
- Chang, I., and Cho, G.-C. (2018). *Cementless soil stabilizer-biopolymer*. The 2018 World Congress on Advances in Civil, Environmental, & Materials Research (ACEM18), Songdo Convensia, Incheon, Korea.
- Chang, I., Im, J., Prasidhi, A.K., and Cho, G.-C. (2015). Effects of xanthan gum biopolymer on soil strengthening. *Construction and Building Materials*, Vol. 74, No. 15, pp. 65-72.
- Chang, I., Prasidhi, A.K., Im, J., and Cho, G.-C. (2015). Soil strengthening using thermo-gelation biopolymers. *Construction and Building Materials*, Vol. 77, No. 15, pp. 430-438.
- Fatehi, H., Abtahi, S.M., Hashemolhosseini, H., and Hejazi, S.M. (2018). A novel study on using protein based biopolymers in soil strengthening. *Construction and Building Materials*, Vol. 167, No. 10, pp. 813-821.
- Ham, S.-M., Chang, I., Noh, D.H., Kwon, T., and Muhunthan, B. (2018). Improvement of surface erosion resistance of sand by microbial biopolymer formation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 144, No. 7, 06018004.
- Hwang, S.-P., Yoo, W.-P., and Kim, C.-Y. (2018). Experimental study on characteristics of penetration into microcrack depending on viscosity. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, Vol. 7, No. 3, pp. 227-232.
- Idriss, I.M., and Boulanger, R.W. (2008). *Soil liquefaction during earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute.
- Jang, J., Lee, J., and Jung, J. (2017). Characterization of agar for soil remediation. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 17, No. 6, pp. 351-358.
- Jeoung, J.-H., Hwang, S.-P., Lee, J.-H., and Lee, T.-H. (2016). The study on evaluation of injection performance in micro crack depending on viscosity of grouting material. *Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 16, No. 5, pp. 239-245.
- Jung, J., Cao, S., and Ahn, J. (2014). Characterization of biopolymer solution used for soil remediation and petroleum production. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 14, No. 5, pp. 109-114.
- Jung, J., Jang, J., and Ahn, J. (2016). Characterization of a polyacrylamide solution used for remediation of petroleum contaminated soils. *Materials (Basel)*, Vol. 9, No. 1, p. 16.
- Kim, J.S. (2010). *Behavioral characteristics of cement-based permeation grouting*. Ph.D. dissertation, Korea University, Seoul, Republic of Korea.
- Ko, D., and Kang, J. (2020). Biopolymer-reinforced levee for breach development retardation and enhanced erosion control. *Water*, Vol. 12, No. 4, 1070.
- Lee, S., Chang, I., Chung, M.-K., Kim, Y., and Kee, J.

- (2017). Geotechnical shear behavior of xanthan gum biopolymer treated sand from direct shear testing. *Geomechanics and Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 831-847.
- Lenormand, R., and Zarcone, C. (1989). Capillary fingering Percolation and fractal dimension. *Transport in Porous Media*, Vol. 4, pp. 599-612.
- Mudgil, D., Barak, S., and Khatkar, B.S. (2014). Guar gum: Processing, properties and food applications-a review. *Journal of Food Science and Technology*, Vol. 51, No. 3, pp. 409-418.
- Park, D., and Lim, H.-D. (2016). Stabilization of dam embankment by low pressure permeation grouting. *Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 16, No. 6, pp. 325-338.
- Puppala, A.J., and Pedarla, A. (2017). Innovative ground improvement techniques for expansive soils. *Innovative Infrastructure Solutions*, Vol. 2, 24.
- 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*, Vol. 6, No. 4, pp. 304-313.
- Sochi, T. (2007). *Pore-Scale modeling of Non-Newtonian flow in porous media*. Ph.D. dissertation, Imperial College London, London, England.

Received	November 22, 2021
Revised	November 23, 2021
Accepted	November 30, 2021