

바이오그라우팅 주입재를 이용한 현장 배합비에 관한 연구

A Study of Field Mixing Ratio using Bio-grouting Injection Material

박일훈¹, 김대현^{2*}

Ilehoon Park¹, Daehyeon Kim^{2*}

¹Member, Ph.D. program, School of Civil and Environmental Engineering, Geotechnical and Study, Chosun Univ., 309, Pilmundae-ro, Dong-gu, Gwangju, Republic of Korea

²Member, Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Geotechnical and Study, Chosun Univ., 309, Pilmundae-ro, Dong-gu, Gwangju, Republic of Korea

ABSTRACT

This study aims to develop a bio-grouting material in a powder form like cement. Sand gel samples were produced with the ratio of sodium silicate No.3 to water (50 : 50, 35 : 65, 20 : 80), and the ratio of cement to bio-grouting material (100 : 0, 90 : 10, 70 : 30) to select a mixing ratio of bio-grouting, respectively, and then analyzed the geltime over time. The uniaxial compressive strength was evaluated to select and suggest a mixing ratio optimized for construction conditions. The indoor test reveals that preferred geltime and uniaxial compressive strength is obtained in 35 : 65 with respect to the ratio of sodium silicate No.3 to water, and 90 : 10 with respect to the ratio of cement to bio-grouting material to demonstrate best optimal mixing ratios.

요 지

본 연구에서는 바이오주입재를 시멘트와 같은 분말 형태로 주입재를 개발하였다. 바이오그라우팅의 배합비를 선정하기 위해 규산소다 3호 : 물의 비율(50 : 50, 35 : 65, 20 : 80), 시멘트 : 바이오주입재의 비율(100 : 0, 90 : 10, 70 : 30)로 각각 샌드겔 공시체를 제작하여 시간 경과에 따른 geltime을 분석하였다. 그리고 geltime에 따른 일축압축강도를 평가하여 시공조건에 맞는 배합비를 선정할 수 있도록 제시하였다. 실내실험 결과, 규산소다 3호 : 물의 비율이 35 : 65, 시멘트 : 바이오주입재의 비율이 90 : 10일 때 겔타임과 일축압축강도가 잘 나타나 적절한 최적배합비로 확인하였다.

Keywords : Bio-grouting material, Geltime, Uniaxial compressive strength, Sodium Silicate, Mix proportioning

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

최근 원자재 값 상승과 천연소재의 고결, 건설 재료의 부족으로 인해 건설산업 발전은 날이 갈수록 어려워지고 있으며, 급속한 산업발전에 따라 국가 기간산업의 양적, 질적 확대에 인하여 넓은 대지의 나라의 비해 국내에서는

부지확보에 어려움을 겪고 있다. 이에 효율적인 토지 이용을 위해 그동안 건설부지로 고려치 않았던 느슨한 사질토나 연약한 실트질로 구성된 연약지반 개량 공법에 대한 관심이 상당히 높아지고 있다. 그리고 해외수주 등으로 중동 지역에 많은 건설업체가 진출하고 있어 연약지반의 개량을 위한 새로운 공법 개발이나, 신소재의 개발이 필요한 실정이다(Jeon, 2013).

그 중, 그라우팅공법은 토목 분야에서 주로 댐, 사면보강, 제방, 준설, 매립지역 등의 연약지반 보강, 구조물의 보수 보강, 치수의 목적으로 사용되었고, 최근에는 고속철도, 지하철, 고속도로, 항만, 공항, 공업단지 조성 등 대규모

Received 23 Mar. 2017, Revised 18 Apr. 2017, Accepted 13 Jun. 2017

*Corresponding author

Tel: +82-62-230-7607; Fax: +82-62-220-2684

E-mail address: dkimgeo@chosun.ac.kr (D. Kim)

모 국가 산업시설물 건설공사가 진행되고 있다.

그라우팅공법은 주입재의 재료적 한계로 인하여 여러 문제점이 제기되어 왔으며, 재료적 한계를 극복하기 위해 연구되고 있다. 이에 지반 공학적으로 문제가 되는 연약한 점토지반, 느슨한 모래지반에 친환경 신소재인 미생물의 생화학 반응을 통해 생성된 고결물(바이오주입재)을 치환하여 흙을 고결화(Cementation)시키는 소재를 개발하고자 하였다.

본 연구에서는 바이오주입재를 시멘트와 같은 분말형태로 주입재를 개발하였으며, 바이오그라우팅의 배합비를 선정하기 위해 규산소다 3호와 물(50:50, 35:65, 20:80), 시멘트와 바이오주입재(100:0, 90:10, 70:30)의 각각의 비율로 호모겔 공시체에 혼합 성형하여 시간경과에 따른 겔타임을 분석하였다. 또한 겔타임에 따른 일축압축강도를 평가하여 시공조건에 맞는 배합비를 선정할 수 있도록 제시하였다.

1.2 국내외 선행연구

미생물을 이용한 흙의 고결화 연구는 최근 십여 년에 걸쳐 다양한 연구가 진행 중이다. 특히 땅 속에 존재하는 수많은 미생물 중 *Sporosarcina Pasteurii* 균(KCTC 3558)의 생화학 반응을 통해 생성된 바이오주입재를 이용하여 연약지반을 고결화 시키는 연구가 국내 연구자들(Kim et al., 2012, 2013; Park and Kim, 2012, 2013; Park et al., 2014; Kim et al., 2014; Park, 2015; Park and Kim, 2016)에 의해서 진행되었다. 또한 최근에는 인도, 말레이시아, 포르투갈, 미국, 호주 등 Bio-cement를 개발하여 적용하고 있는 연구자들(Varalakshmi and Devi, 2014; Pedreira, 2014; Reddy et al., 2015; Nordin et al., 2015)이 활발하게 연구를 수행하고 있다.

바이오주입재를 이용하여 느슨한 사질토 지반에 혼합 성형으로 강도 증진효과를 나타내는 기술을 Microbial Calcite Precipitation (MCP) 기술로 명명하나 최근에는 Bio-cement, Bio-grouting, Bio-concrete 등 다양하게 명명하고 있다. 이러한 MCP 기술은 느슨한 사질토 지반의 강도를 개선하거나, 고결물이 입자의 간극을 침투하여 메움으로 차수를 통해 연약지반을 개량할 수 있는 친환경 공법으로 인식되었다. 또한, 시멘트를 근본적으로 감소시킬 수 있는 Biopolymer, 유기산 재료, 식물추출액 등을 활용한 지반개량 공법이 다양하게 연구되었다.

MCP 기술은 순수한 사질토 지반을 대상으로 강도개선을 확인하였으나, 느슨하거나 연약한 지반에 바이오주입재를 침전시키기 위해서는 여러 번 반복해서 주입해야 하는 번거로움과 현장 적용성에 대한 한계점을 가지고 있다 (Dejong et al., 2006, 2010; Soon et al., 2013).

따라서 친환경 미생물 고결화 공법인 MCP 기술을 보다 효율적이고 실용적으로 현장에 적용하고자 연약지반 처리 공법인 그라우팅공법과 MCP 기술을 접목해 바이오그라우팅공법을 개발하였다(Paassen et al., 2009; Kim and Park, 2013).

국내의 대표적 선행연구를 살펴보면, Kim and Park(2013)는 느슨한 모래와 실트질모래(SM)시료로 제작한 공시체에 미생물 용액과 염화칼슘 수용액을 1:1 비율로 주입하여 차수효과를 확인하였다. 실험결과, 느슨한 모래에서는 무처리 시료보다 일반농도로 처리된 시료에서 약 30%의 차수효과가 나타났으며, SM시료에서는 약 35%의 차수효과가 나타났다.

국외에서는 Pedreira(2014)는 본 연구에서 사용된 미생물인 *Sporosarcina Pasteurii*를 이용하여 시료에 혼합 반응용액과 혼합 후 37도의 오븐에서 재령하여 일축압축강도를 분석하였다. 실험결과, 무처리 시료에 비해 미생물 용액 및 반응용액으로 처리된 공시체에서 약 26배 이상의 강도가 증진되는 것을 확인하였으며, Reddy et al.(2015)의 Bio-cement 실험은 실내에서 샌드 코어가 완전히 포화될 때 까지 가압하여 미생물 용액 및 반응용액을 주입하여 강도의 증가를 확인하였다.

Paassen et al.(2009)는 현장 적용성을 검토하고자 (폭 B)0.9m × (길이 L)1.1m × (높이 H)1m의 컨테이너 박스에 동일한 상대밀도(Dr)의 모래를 채워 실험을 수행하였다. 실험결과, 수동콘관입실험(Manual cone penetration test)를 통하여 표면에서 5,000kPa 보다 높은 강도를 나타냈고, 탄산칼슘의 정량화를 통해 탄산칼슘의 양에 따라 강도 증진효과를 확인하였다. 그러나 강도의 증가는 바이오주입재가 침투되는 걸 표면에서만 강도가 증가되었고, 침투가 되지 않은 중앙에서는 강도의 증가가 미미한 결과를 나타내었다.

현재까지 국내외에서 시도되고 있는 연구는 대부분 실내실험을 바탕으로 한 결과이며, 실제 현장에서 적용한 결과는 나타나지 않았다. 따라서 본 연구에서는 실내에서 현장 배합비를 선정하고자 한다.

2. 바이오그라우팅 공법

2.1 바이오그라우팅 개요

미생물에 의한 흙의 고결화는 친환경 소재인 미생물의 요소분해효소 반응을 통해 이산화탄소(CO_2)와 암모늄(NH_4)을 생성하여 탄산염(HCO_3)를 만들고, 반응용액인 염화칼슘 수용액($CaCl_2$)의 혼합으로 바이오주입재($CaCO_3$)가 흙속의 간극 내에 침전되어 흙 입자들을 단단한 고결물로 형성하도록 하는 것이다. 바이오그라우팅은 연약지반의 고결화를 이루는 공법으로 주로 주입공법이 사용되고 있다.

바이오그라우팅공법은 환경오염에 많은 영향을 미치는 시멘트와 약액 등의 사용량을 줄이거나 대체하여 친환경 소재인 미생물을 이용함으로써 바이오주입재 침전을 통해 입자 사이의 간극을 채움으로 지반의 강도 증가효과와 차수효과를 증대하는 공법이다(Park, 2015).

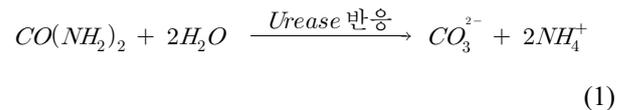
Fig. 1은 흙 입자 주변에 바이오주입재가 고결되어지는 과정을 나타내고 있다.

2.2 미생물에 의한 바이오주입재 생성 이론

미생물을 이용한 흙의 고결화는 미생물의 생화학 반응을 통해 고결물인 바이오주입재가 흙 입자 사이에 침전되어 나타난다. 본 연구에서는 미생물을 배양하기 위해 배양 배지를 만들었으며, 영양배지(Nutrient Broth)와 요소를 혼합하여 사용하였다. 미생물 성장 요소 중 하나인 영양배지는 식물의 성장에 필요한 물질을 용해시킨 수용액이다. 요소(Urea)는 화학식($CO(NH_2)_2$)로 나타내고, 무색의 결정성 물질로 물과 반응성이 좋아 물에 잘 녹는다. 이러한 요소는 모든 포유동물과 일부 어류의 단백질 대사 최종 분

해 산물로 이용되고 있으며, 단백질이 분해되고 나면 암모니아가 생성된다.

요소분해효소는 Urease라고도 하며, 요소를 가수분해하여 암모니아와 이산화탄소를 생성시키는 반응에 관여한다. 이러한 요소분해효소는 미생물, 고등식물, 하등식물, 고등동물의 위정액과 적혈구에 널리 분포하며 식물에도 존재하기도 한다. 미생물과 요소의 반응식은 아래 식 (1)과 같으며, 미생물 성장을 통해 아래와 같이 탄산이온과 두 개의 암모니아 이온으로 가수분해 된다.



이때 발생하는 2개의 암모늄은 수용액 상태인 물과 다시 결합하여 2개의 수산화이온이 발생한다. 이러한 수산화이온은 이산화탄소와 결합하여 탄산염을 생성하게 된다. 이러한 탄산염의 생성 정도가 높을수록 칼슘이온과 결합하여 결과적으로 바이오주입재를 생성한다. 바이오주입재의 생성과정은 반응식 (2)와 같다.



3. 실내실험

3.1 겔타입 측정을 위한 배합비

일반적으로 그라우팅용인 시멘트 현탁액형 주입재의 급결제로 규산소다 3호와 같은 물유리계를 주로 사용한다. 본 연구에서는 급결제인 규산소다 3호와 상기 개발한 바이오주입재, 시멘트의 배합비에 따른 겔타임을 분석하고자 규산소다 3호의 함유량에 따른 겔타임을 측정하였다.

주입재 제조는 A액(62.5ml) 속의 규산소다3호의 함량을 물 대비 각각 31.25ml(50%), 21.88ml(35%), 12.5ml (20%)로 변화시키고, B액(62.5ml)에 상기 개발된 바이오주입재는 시멘트 대비 0g(0%), 2.5g(10%), 7.5g(30%)를 첨가하였으며, 보조제로 벤토나이트를 2.5g 고정으로 첨가하였다. 벤토나이트는 물에 분산되면 높은 점도를 발현한다.

겔타임은 A액, B액을 각각 200ml 종이컵에 62.5ml식 채운 후 연속적으로 좌, 우 혼합시켜 종이컵에서 유동성이 정지되는 시간을 3회 측정하여 평균값으로 나타내었다.

Table 1은 겔타임 측정을 위한 주입재 배합비이다.

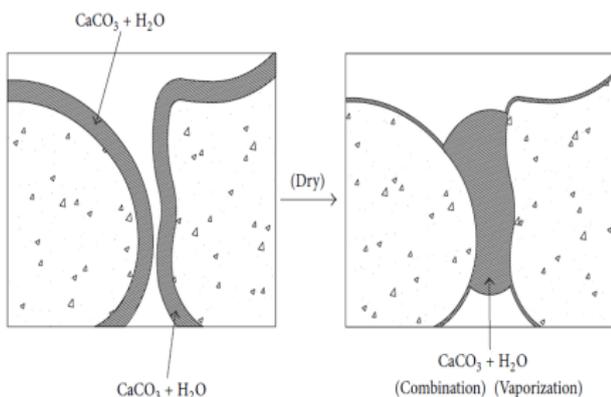


Fig. 1. The finite element mesh and geological configuration used for the analysis

Table 1. Mixing ratios of injection materials for geltime test

A-liquid (62.5 ml)			B-liquid (62.5 ml)				
sodium silicate (ml)		Water (ml)	Ordinary portland cement (g)	Bio-injection material (g)		Bentonite (g)	Water (ml)
50%	31,25	31,25	25	0%	-	2,5	53,75
35%	21,88	40,62	22,5	10%	2,5	2,5	53,75
20%	12,5	50	17,5	30%	7,5	2,5	53,75

Table 2. Mixing ratios of injection materials for uniaxial compressive strength test

A-liquid (125 ml)			B-liquid (125 ml)				
sodium silicate (ml)		Water (ml)	Ordinary portland cement (g)	Bio-injection material (g)		Bentonite (g)	Water (ml)
50%	62,5	62,5	50	0%	-	5	107,5
35%	43,75	81,25	45	10%	5	5	107,5
20%	25	100	35	30%	15	5	107,5

3.2 호모겔 일축압축강도를 측정하기 위한 배합비

본 연구에서 측정하고자 하는 호모겔 공시체는 흙 시료를 사용하지 않고 주입재료만의 순수한 일축압축강도를 측정하여 주입재료의 타당성을 확인하기 위한 실험으로, LW공법 시 사용되는 규산소다 3호와 시멘트의 사용량을 절감시킬 수 있는 혼화재 개념으로 바이오주입재를 혼합하여 일축압축강도를 측정하고자 하였다.

바이오주입재는 MCP 기술에서 언급한 바와 같이 입자 사이의 간극에 고결물이 침투하여 간극의 사이를 조밀하게 채움으로 강도를 증진하나, 시멘트와 같이 수화반응이나 포졸란 반응은 나타나지 않기 때문에 시멘트의 사용량을 줄임으로서 시멘트 100% 보다 큰 강도 증진효과를 기대하기는 어렵다. 그러나 강도증진 이외에 차수효과 등에는 바이오주입재가 효과적일 것으로 판단된다.

공시체의 강도를 평가하기 위해서 (D)5cm × (H)10cm 원주형 몰드에 성형하여 호모겔 형태의 공시체를 제작하였다. 공시체를 건조기에서 20C°로 건조하여 하루 후 탈형

해 다시 건조기에서 양생하고, 재령 3일, 7일, 21일, 28일 강도를 평가하였다.

주입재의 혼합비율은 Table 2와 같으며, 급결재인 A액과 경화재인 B액을 부피비 1:1로 혼합 성형하여 준비된 몰드에서 양생되도록 하였다. A액(125ml) 속의 규산소다3호의 함량을 물 대비 각각 62.5ml(50%), 43.75ml(35%), 25ml(20%)로 변화시키고, B액(125ml) 속의 상기 개발된 바이오주입재는 시멘트 대비 0g(0%), 5g(10%), 15g(30%)를 첨가하였으며, 보조제로 벤토나이트를 5g 고정으로 첨가하였다. 일축압축강도는 만능재하시험기를 이용하였으며, 압축속도는 1mm/min 수준으로 일축압축강도를 측정하였다.

4. 실내실험 결과

4.1 배합비에 따른 겔타임 분석

Fig. 3에서 시멘트는 “C”로 표기하였으며, 바이오주입재는 “B”로 표기하였다. 또한, 규산소다 3호는 “SS”로, 물

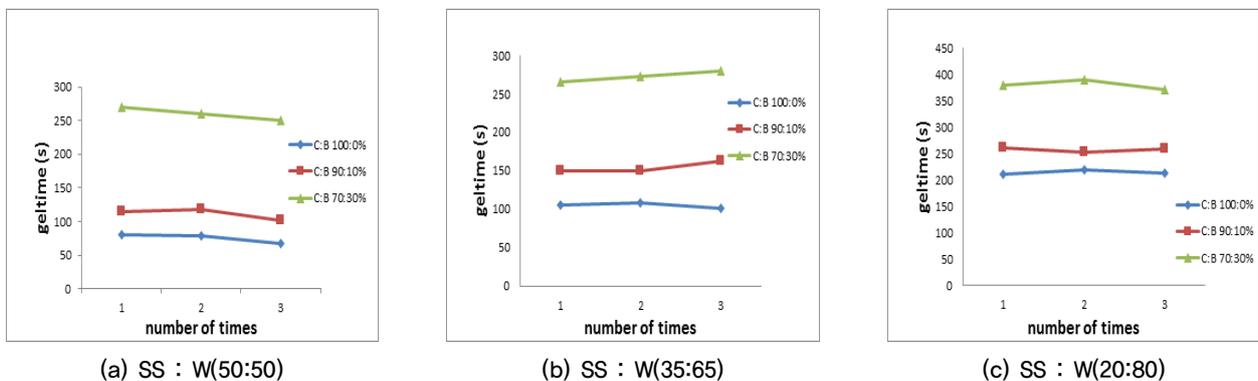


Fig. 3. Results of respective mixing ratio geltime test

은 “W”로 약식 표기하였다. Fig 3(a)의 SS : W의 배합비가 50:50일 경우 시멘트 : 바이오주입재(100:0, 90:10, 70:30) 비율에 따라 젤타임을 분석하였다. C : B 100:0에서 3회 측정 평균 75초로 가장 젤타임이 가장 빨랐으며, C : B 90:10에서는 평균 111초, C : B 70:30에서는 평균 260초로 바이오주입재의 양이 증가할수록 젤타임이 약 1.5배, 3.5배 증가하는 경향이 나타났다.

Fig. 3(b)의 C : B 100:0에서는 3회 측정 평균 105초로 가장 젤타임이 빨랐으며, C : B 90:10에서는 평균 154초, C : B 70:30에서는 평균 272초로 바이오주입재의 양이 증가할수록 젤타임이 약 1.5배, 2.5배 증가하는 경향이 나타났다.

Fig. 3(c)의 C : B 100:0에서는 3회 측정 평균 214초로 가장 젤타임이 빨랐으며, C : B 90:10에서는 평균 257초, C : B 70:30에서는 평균 380초로 바이오주입재의 양이 증가할수록 젤타임은 약 1.2배, 1.8배 증가하는 경향이 나타났다.

일반적으로 시멘트는 Alite($3CaO \cdot SiO_2; C3S$), Belite($2CaO \cdot SiO_2; C2S$), Filite($4CaO \cdot Al_2O_3; C3A$)의 주요 조성물로 이루어지는데, 특히 시멘트 강도의 대부분을 차지하는 것은 $C3S$ 및 $C2S$ 이다. 이러한 조성물은 시멘트의 주원료가 되는 석회(CaO), 실리카(SiO_2), 알루미늄(Al_2O_3), 산화철(Fe_2O_3)의 혼합비에 따라 시멘트의 성질들이 변화하게 된다(Lee, 2013).

따라서 시멘트 양이 감소함에 따라 수화반응과 포졸란 반응이 약해지는 결과로 젤타임이 증가하는 경향이 나타났으며, 바이오주입재는 앞서 언급한 바와 같이 탄산칼슘($CaCO_3$) 광물로서 자체적인 수화반응과 포졸란 반응은 발생하지 않는 것으로 나타났다.

바이오주입재의 첨가는 젤타임을 지연시킴으로 급결시

보다 완결시에 사용하는 것이 적절할 것으로 판단되며, LW그라우팅 시 급결시에는 30초대의 젤타임으로 혼화제인 석회질(CaO)의 양을 증가시켜 급결시키는 방법을 사용하여야 한다. 급결로 그라우팅을 사용하고자 할 때에는 혼화제의 비율을 높여 목표 젤타임을 확보해야 한다.

SS : W의 배합비(50:50, 35:65, 20:80)를 비교하면 규산소다 3호의 양이 감소할수록 젤타임은 상당히 증가하는 경향을 보였으며, LW그라우팅 시 완결시에는 300초(5분)대의 젤타임으로 SS : W의 배합비 20:80에서 C : B의 배합비 70:30 조건을 제외한 나머지 배합비에서 만족하는 것으로 나타나 바이오그라우팅은 급결시 보다 완결시에 가까운 배합비임을 확인할 수 있었다.

4.2 배합비에 따른 일축압축강도 분석

4.2.1 규산소다 3호의 함유량에 따른 일축압축강도 시험 결과

Fig. 4(a) 분석결과, 규산소다 3호가 20%일 때 초기강도(재령 3일)는 8.48kgf/cm^2 로 가장 낮게 나타났으며, 규산소다 3호가 50%일 때 10.98kgf/cm^2 로 가장 높게 나타났다. 또한 장기강도(재령 28일)는 규산소다 3호가 20%일 때 15.82kgf/cm^2 로 가장 낮게 나타났으며, 규산소다 3호가 35%일 때 17.43kgf/cm^2 로 가장 높게 나타났다.

Fig. 4(b) 분석결과, 규산소다 3호가 20%일 때 초기강도(재령 3일)는 6.45kgf/cm^2 로 가장 낮게 나타났으며, 규산소다 3호가 50%일 때 9.76kgf/cm^2 로 가장 높게 나타났다. 또한 장기강도(재령 28일)는 규산소다 3호가 20%일 때 14.34kgf/cm^2 로 가장 낮게 나타났으며, 규산소다 3호가 35%일 때 16.99kgf/cm^2 로 가장 높게 나타났다.

Fig. 4(c) 분석결과, 규산소다 3호가 20%일 때 초기강도

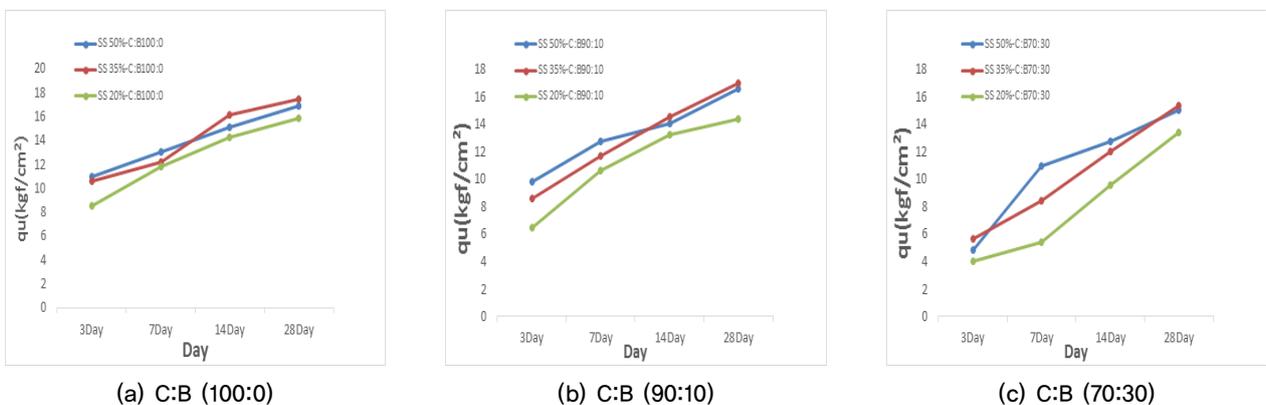


Fig. 4. Results of uniaxial compressive strength test with Sodium silicate No.3

(재령 3일)는 4.03kgf/cm²로 가장 낮게 나타났으며, 규산소다 3호가 50%일 때 5.61kgf/cm²로 가장 높게 나타났다. 또한 장기강도(재령 28일)는 규산소다 3호가 20%일 때 13.35kgf/cm²로 가장 낮게 나타났으며, 규산소다 3호가 35%일 때 15.31kgf/cm²로 가장 높게 나타났다.

규산소다 3호의 함유량이 감소할수록 초기강도에는 겔타임이 길어져 3일, 7일 호모겔 일축압축강도 값이 감소하는 경향이 나타났다. 특히 3일의 경우 함유량이 감소할수록 강도가 감소하는 경향이 매우 뚜렷하게 나타났다. 이는 Lee(2013)와 유사한 결과를 나타냈다.

초기강도에서는 규산소다 3호의 영향으로 인해 겔타임이 빨라 규산소다 3호 50%에서 가장 높은 강도를 나타내었으나, 장기강도에서는 규산소다 3호가 미미한 시멘트의 균열을 가져오기 때문에 일축압축강도가 낮아지는 것으로 판단된다. 따라서 가장 적절한 배합비는 규산소다 35%가 적합할 것으로 판단된다.

4.2.2 바이오주입재의 함유량에 따른 일축압축강도 시험 결과

Fig. 5(a)의 규산소다 3호가 50%일 때 실험결과, C : B가 100:0일 때의 장기강도 대비 C : B가 90:10의 장기강도는 약 98%의 강도를 나타내며, C : B가 70:30의 장기강도는 약 89%의 강도를 나타냈다.

Fig. 5(b)의 규산소다 3호가 35%일 때 실험결과, C : B가 100:0일 때의 장기강도 대비 C : B가 90:10의 장기강도는 약 97.5%의 강도를 나타내며, C : B가 70:30의 장기강도는 약 87.8%의 강도를 나타냈다.

Fig. 5(c)의 규산소다 3호가 20%일 때 실험결과, C : B가 100:0일 때의 장기강도 대비 C : B가 90:10의 장기강도는 약 91%의 강도를 나타내며, C : B가 70:30의 장기강도

는 약 84%의 강도를 나타냈다.

바이오주입재의 경우 시멘트와 같이 물과 혼합되는 과정에서 수화반응 및 포졸란 반응은 없으나, 바이오주입재가 시멘트에 첨가되면 강도가 증가하는 경향을 보이는데 이는 탄산칼슘이 시멘트의 광물질 중에 칼슘실리케이트의 수화반응을 촉진시키는 역할을 한다. 이는 탄산칼슘의 성분과 시멘트의 알칼리 성분(CaOH₂)과 실리카(SiO₂)와의 포졸란 반응이 복합적으로 작용하여 미소수화열이 발생하면서 응결반응이 촉진되기 때문이다. 또한 바이오주입재는 매우 미소한 알갱이로 이루어져 있기 때문에 시멘트와 규산소다 3호의 반응으로 생겨난 균열을 바이오주입재의 알갱이가 메움으로써 강도가 증진된 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Park(2015), Kim and Noh(2000)에 나타난 결과와 유사함을 확인하였다. 따라서 C : B가 90:10일 때 C : B 100:0과 강도차이가 미미하므로 때문에 바이오주입재를 통해 시멘트의 10%를 대체하여 사용할 수 있을 것으로 확인되었다.

4.3 일축압축강도와 겔타임 상관관계 분석

겔타임의 빠르고 늦음에 따라, 강도의 크고 작음에 따라, 침투범위의 넓고 좁음에 따라 급결 차수의 목적으로 사용하는지, 완결 보강의 목적으로 사용하는지에 대한 기준을 결정할 필요가 있다. 본 연구에서는 침투범위보다는 겔타임과 강도에 따라 목적을 분석하였다.

Fig. 6은 3일차 겔타임에 따른 압축강도의 결과를 도시하였다. 시멘트의 비가 낮아질수록 겔타임은 증가하고 강도는 감소하는 경향을 나타내었지만, 바이오주입재에 혼합에 따라 탄산칼슘이 시멘트의 칼슘 실리케이트와 미소 발열반응을 통해 호모겔의 일축압축강도 값이 증가하는

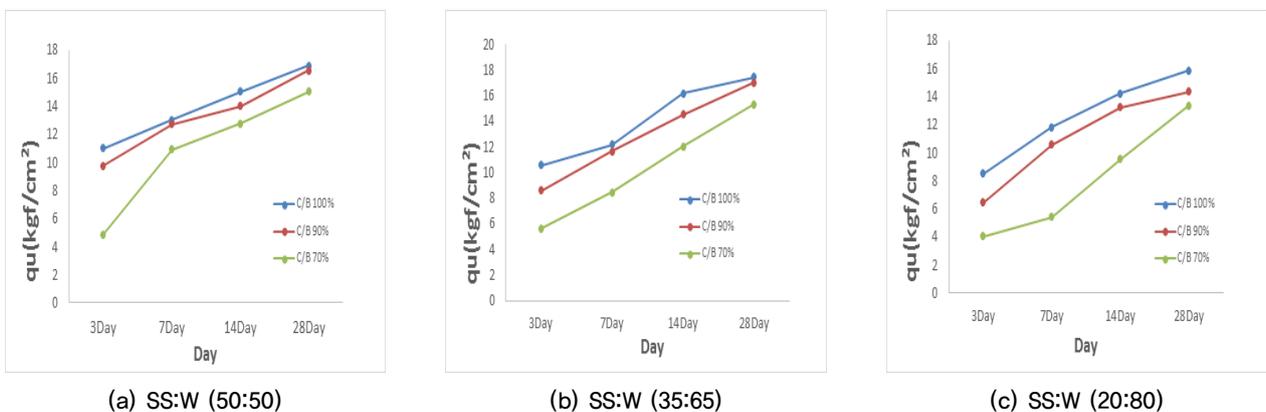


Fig. 5. Results of uniaxial compressive strength test with bio-injection material

Table 3. Results of homogel strength and geltime with day

Classification	q_u (kg/cm^2)	Day				Geltime (s)
		3	7	14	21	
C : B (100:0)	SS 50%	10.98	13.02	15.03	16.87	65~85
	SS 35%	9.76	12.69	14.01	16.51	110~120
	SS 20%	4.84	10.90	12.74	15.03	250~270
C : B (90:10)	SS 50%	10.57	12.15	16.15	17.43	95~115
	SS 35%	8.59	11.64	14.52	16.99	145~165
	SS 20%	5.61	8.43	12.00	15.31	260~280
C : B (70:30)	SS 50%	8.48	11.82	14.19	15.82	200~220
	SS 35%	6.45	10.57	13.20	14.34	250~270
	SS 20%	4.03	5.4	9.53	13.35	370~390

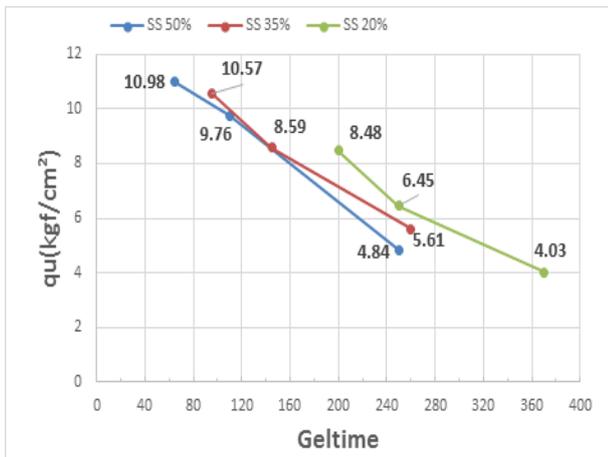


Fig. 6. Results of Correlation of geltime and uniaxial compressive strength test with 3day

것으로 나타났다.

그러나 이러한 미소 발열반응은 시멘트의 수화반응 및 포졸란 반응에 비하여 매우 미소한 효과이므로 겔타임에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 보다 빠른 급결(30초대)을 만족시켜야 하는 지반조건이라면 본 배합비에 혼화재인 석회(CaO)를 첨가하여 사용하면 급결시간을 만족할 것으로 나타났다.

본 연구에서는 겔타임에 따른 일축압축강도를 분석하여 가장 효과적인 배합비를 찾고자 하였으며, 규산소다 3호 35%에서 C : B가 90:10이 효율대비 가장 효과적인 배합비로 분석되었다.

겔타임에 따른 분석 결과, 바이오그라우팅을 완결시에 사용하기 위해서는 300초(5분)대의 겔타임으로 규산소다 20%에서 C : B의 배합비는 70:30의 조건을 제외하고 나머지 배합비에서는 만족하게 하는 것으로 나타났으며, 급결시에 사용하기 위해서는 30초대의 겔타임으로 규산소

다 50%에서 C : B의 배합비는 90:10일 때 가장 근접한 조건으로 나타났다. 또한 W/C의 비율을 200%로 적용하였으나, W/C의 비율을 175%, 150%로 적용할 경우 강도의 증가와 겔타임을 상당히 단축할 수 있는 것으로 Lee (2013)를 통해 나타낸바 있다.

Table 3은 재령일에 따른 호모겔 강도 및 그에 따른 겔타임을 나타내었다. 이때의 겔타임을 실험값의 ± 10 으로 오차범위를 선정하였다.

5. 결론

본 연구에서는 바이오주입재를 시멘트와 같은 분말형태로 주입재를 개발하였으며, 바이오그라우팅의 최적 배합비를 선정하기 위해 규산소다 3호 : 물의 양을 50:50, 35:65, 20:80와 기존 주입재인 시멘트 : 바이오주입재를 100:0, 90:10, 70:30 비율로 호모겔 공시체에 혼합 성형하여 시간경과에 따른 겔타임을 분석하였다.

- (1) 규산소다 3호 함량에 따른 바이오그라우팅 일축압축강도 측정시, 규산소다 3호의 함유량이 감소함에 따라 초기 강도의 발현 시간이 증가하여 3일차, 7일차에는 일축압축강도 값이 감소하는 경향이 있다. 그러나 장기강도에는 규산소다 3호 함량이 35%일 때 가장 크거나 큰 차이는 없는 것으로 확인되었다.
- (2) 각 배합비 별 겔타임 및 일축압축강도를 분석한 결과, 시멘트를 대체하여 바이오주입재를 10%, 30%정도 배합할 경우 겔타임이 증가하지만 일축압축강도는 장기강도일 때 시멘트 100% 대비 98%, 85%의 강도를 확인하였다. 이는 바이오주입재인 탄산칼슘이 시멘트 성

분의 칼슘 실리케이트를 만나 미소 발열반응을 나타낸 결과로 판단되며, 규산소다 3호가 장기적으로 시멘트의 Crack을 만드는데 바이오주입재의 미소 입자들이 공극을 메워 강도가 증가한 것으로 확인되었다.

- (3) 겔타임 및 일축압축강도를 분석한 결과, 규산소다 3호 함유량을 35%, 시멘트 대비 바이오주입재 90:10의 배합비가 가장 적절한 표준배합비로 나타났다.

References

- Dejong, J. T., Fritzges, M. B., and Nüsslein, K. (2006). "Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear", *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, Vol.132, No.11, pp.1381-1392.
- Dejong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., and Nelson, D. C. (2010), "Bio-mediated Soil Improvement", *Journal of Ecological Engineering*, Vol.36, pp.197-210.
- Jeon, S. J. (2013), *Effect of Strength Evaluation of Soil Treated with Calcium Carbonate Created by Microbial Reaction*, Master Degree, Chosun University, Gwangju, Korea.
- Kim, D. H., Park, K. H., Kim, H. C., and Lee, Y. H. (2012), "Effect of Microbial Treatment Methods on BiogROUT", *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, Vol.13, No.5, pp.51-57.
- Kim, D. H. and Park, K. H. (2013), "Injection Effect of Bio-Grout for Soft Ground", *Advanced Science Letters*, Vol. 19, pp.468-472.
- Kim, D. H., Park, K. H., and Kim, D. W. (2014), "Effects of Ground Conditions on Microbial Cementation in Soils", *Materials*, Vol.7, pp.143-156.
- Kim, D. H., Sagong, M., and Park, K. H. (2013), "Improvement Method of Sand Ground Using an Environmental Friendly Bio Grouting Material", *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.16, No.6, pp.473-481.
- Kim, D. S. and Noh, J. S. (2000), "Characteristic of Cement Mortar addition CaCO₃", *Korea Concrete Institute Symposium*, pp.14-20.
- Lee, K. H. (2013), *A Study of Injected Material for Tunnel Enforcement Using Slag Cement*, Ph. D. thesis, Baejae University, Daejeon, Korea.
- Nordin, N., Wong, L. S. and Regunathan, P. (2015), "A Review on The Compressive Strength of Biomineralized Mortar", *The 3rd National Graduate Conference Univ. Tenaga Nasional, Malaysia*, 8-9 April, pp.234-239.
- Paassen, L. A., Harkes, M. P., Zwieter, G. A., Zon, W. H., Star, W. R. L., and Loosdrecht, M. C. M. (2009), "Scale Up of BiogROUT: A Biological Ground Reinforcement Method", *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp.2328-2333.
- Park, K. H. (2015), *Evaluation of Applicability of Environment Friendly BiogROUTing Methods in Loose Frictional Soils*, Ph. D. thesis, Chosun University, Gwangju, Korea.
- Park, K. H., Jun, S. J., and Kim, D. H. (2014), "Effect of Strength Enhancement of Soil Treated with Environment-Friendly Calcium Carbonate Powder", *The Scientific World Journal*, Vol.2014, pp.1-11.
- Park, K. H. and Kim, D. H. (2012), "Verification of Calcium Carbonate by Cementation of Silt and Sand using Bacteria", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.6, pp.53-61.
- Park, K. H. and Kim, D. H. (2013), "Strength and Effectiveness of Grouting of Sand Treated with Bacteria", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.2, pp.65-73.
- Park, K. H. and Kim, D. H. (2016), "Analysis of Homogel Uniaxial Compression Strength on Bio Grouting Material", *Materials 2016*, Vol.9, pp.1-12.
- Pedreira, R. (2014), "Bio-cementation of Sandy Soils for Improving their Hydro-mechanical Characteristics", *Geotechnique*, Vol.64, No.12, pp.1-5.
- Reddy, L., Manjusha, A. and Arun kumar, M. (2015), "Bio Cement - An Eco Friendly Construction Material", *International Journal of Current Engineering and Technology*, Vol.5, pp.1-4.
- Soon, N. G., Lee, L. M., Khun, T. C., and Ling, H. S. (2013), "Improvements in Engineering Properties of Soils through Microbial-Induced Calcite Precipitation", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.17, No.4, pp.718-728.
- Varalakshmi and Devi, A. (2014), "Isolation and Characterization of Urease Utilizing Bacteria to Produce Biocement", *IOSR Journal of Environmental Science*, Vol.8, No.4, pp.52-57.