한국지반공학회논문집 제30권 1호 2014년 1월 pp. 93 ~ 101
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.30, No.1, January 2014 pp. 93 ~ 101

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X (Online)
http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2014.30.1.93

고로슬래그와 극한미생물을 이용한 모래의 고결화 연구

A Study on Cementation of Sand Using Blast Furnace Slag and Extreme Microorganism

박 성 식[1] Park, Sung-Sik
최 선 규[2] Choi, Sun-Gyu
남 인 현[3] Nam, In-Hyun

Abstract

In this study, a blast furnace slag having latent hydraulic property with an alkaline activator for resource recycling was used to solidify sand without using cement. Existing chemical alkaline activators such as $Ca(OH)_2$ and NaOH were used for cementing soils. An alkaliphilic microorganism, which is active at higher than pH 10, is tested for a new alkaline activator. The alkaliphilic microorganism was added into sand with a blast furnace slag and a chemical alkaline activator. This is called the microorganism alkaline activator. Four different ratios of blast furnace slag (4, 8, 12, 16%) and two different chemical alkaline activators ($Ca(OH)_2$ and NaOH) were used for preparing cemented specimens with or without the alkaliphilic microorganism. The specimens were air-cured for 7 days and then tested for the experiment of unconfined compressive strength (UCS). Experimental results showed that as a blast furnace slag increased, the water content and dry density increased. The UCS of a specimen increased from 178 kPa to 2,435 kPa. The UCS of a specimen mixed with $Ca(OH)_2$ was 5-54% greater than that with NaOH. When the microorganism was added into the specimen, the UCS of a specimen with $Ca(OH)_2$ decreased by 11-60% but one with NaOH increased by 19-121%. The C-S-H hydrates were found in the cemented specimens, and their amounts increased as the amount of blast furnace slag increased through SEM analysis.

요 지

본 논문에서는 자원 재활용을 위해 시멘트를 전혀 사용하지 않고 잠재 수경성을 지닌 고로슬래그와 알칼리 활성화제를 이용하여 모래를 고결시키는 연구를 수행하였다. 기존 수산화칼슘이나 수산화나트륨과 같은 화학적 알칼리 활성화제뿐 아니라 pH 10 이상에서 생존하는 극한미생물을 화학적 알칼리 활성화제에 혼합한 미생물 알칼리 활성화제를 개발하여 흙의 고결 가능성을 평가하였다. 낙동강모래에 고로슬래그의 함유량을 네 종류(4, 8, 12, 16%)로 달리하면서 화학적 또는 미생물 알칼리 활성화제를 혼합하여 공시체를 제작한 다음 7일 동안 대기중 양생시킨 후 일축압축시험을 실시하였다. 알칼리 활성화제의 종류에 관계없이 고로슬래그의 함유량이 4%에서 16%로 증가함에 따라 건조밀도가 증가하면서 일축압축강도는 평균 178kPa에서 2,435kPa까지 증가하였다. 화학적 알칼리 활성화제를 사용한 경우, 수산

1 정회원, 경북대학교 공과대학 건축토목공학부 토목공학전공 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ., Tel: +82-53-950-7544, Fax: +82-53-950-6564, sungpark@knu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)
2 비회원, 경북대학교 공과대학 건축토목공학부 토목공학전공 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ.)
3 비회원, 한국지질자원연구원 지질재해연구실 선임연구원 (Senior Researcher Geologic Hazards Dept., Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2014 by the Korean Geotechnical Society
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.

화칼슘이 포함된 공시체의 일축압축강도가 수산화나트륨을 사용한 경우보다 5-54% 정도 높게 나타났다. 한편 본 연구에서 개발한 미생물 알칼리 활성화제를 사용한 경우, 수산화칼슘 성분이 포함된 공시체의 경우에는 화학적 알칼리 활성화제보다 일축압축강도가 11-60% 감소하였으나, 수산화나트륨이 포함된 경우에는 일축압축강도가 19-121% 증가하였다. 고결된 공시체에서 C-S-H 화합물이 생성되었으며, SEM분석에서 고로슬래그 함유량이 증가할수록 수화물의 양도 증가하였다.

Keywords : Blast furnace slag, Extreme microorganism, Alkaline activator, Unconfined compressive strength

1. 서 론

최근 국내외적으로 시멘트를 사용하지 않고 친환경적으로 지반을 고결시키기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다. 예를 들면, 지반 내에 존재하는 칼슘이온과 요소를 분해하는 미생물의 대사활동을 이용하여 흙 입자 사이에 칼사이트(calcite)를 석출시켜 지반의 고결을 유도하는 연구가 수행되고 있다(Kim et al., 2012; Park et al., 2011; Mitchell and Santamarina 2005; Whiffin et al., 2007; Terajima et al., 2009; Kawasaki et al., 2010; Van Paassen et al., 2010). Kim et al.(2011)과 Lee(2013)는 유기산을 이용하여 지반 내에 존재하는 미생물의 반응을 촉진시켜 흙 입자 사이에 칼사이트를 석출시키는 고결 메카니즘을 제시하기도 하였다. 생물체로부터 생산되는 다당류인 바이오폴리머(biopolymer)의 고분자 사슬과 흙 입자 간에 작용하는 결합력을 이용하여 흙을 안정화시키는 연구(Jang, 2010; Cole et al., 2012)도 수행되고 있다.

한편 자원 재활용을 위해 잠재 수경성을 지닌 고로슬래그에 다양한 알칼리 활성화제를 이용하여 지반을 고결시키는 연구도 수행되고 있다. Yang and Sim(2008)은 알칼리 활성화제로 석고를 사용한 모르타르의 압축강도 발현 및 건조 수축 제어에 관한 연구를 수행하였다. Yoon and Kim(2006)은 버려지는 굴패각을 소성한 후 천연 수산화칼슘을 제조한 다음 고로슬래그와 혼합하여 점토 고결제로 사용하였으며, Lee(2011)는 레미콘 회수수를 이용하여 고로슬래그의 알칼리 활성화제로의 활용 가능성을 보여주었다. 또한 Park and Choi(2013)는 모래 고결을 위해 고로슬래그에 수산화칼슘이 주성분인 굴패각과 수산화기(OH^-) 계열의 다양한 화학약품을 이용하여 고결을 유도하였으며, 고로슬래그가 16% 포함된 모래의 경우 일축압축강도가 3MPa까지 증가하였다.

본 연구에서는 앞서 언급한 고로슬래그에 수산화칼슘 및 수산화나트륨과 같이 기존에 사용되고 있는 화학적 알칼리 활성화제뿐 아니라 수산화기 계열의 화학약품에 높은 pH에 생존하는 극한미생물을 혼합한 미생물 알칼리 활성화제를 개발하여 모래의 고결 가능성을 평가하였다. 낙동강모래에 고로슬래그의 함유량(4, 8, 12, 16%)을 달리하면서 화학적 또는 미생물 알칼리 활성화제를 혼합하여 소형 공시체를 제작한 다음 7일 동안 양생한 후 일축압축시험을 실시하였다. 이와 같이 고로슬래그로 고결된 모래의 일축압축강도와 XRD 및 SEM 분석을 통하여 본 연구에서 새롭게 개발한 미생물 알칼리 활성화제의 성능 및 현장 적용 가능성을 검토하였다.

2. 모래 및 고결 재료

2.1 모래

본 연구에서는 낙동강모래를 사용하였으며, XRF 성분분석 결과에 의하면 낙동강모래는 실리카(이산화규소)가 78% 이상인 실리카질 모래이다. 모래 입자는 약

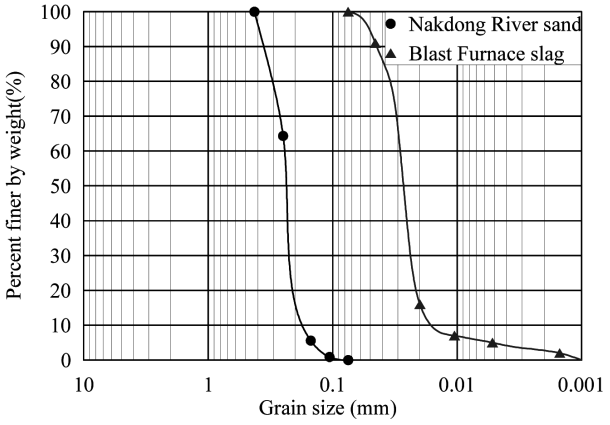


Fig. 1. Grain size distribution curves of Nakdong River sand and blast furnace slag

간 모난 형태를 하고 있으며 색깔은 다소 붉은 색을 띠고 있다. 낙동강모래의 입도분포곡선은 Fig. 1과 같으며 최대간극비와 최소간극비는 각각 1.181과 0.849이다. 통일분류법에 의하면 빈입도 모래(SP)로 분류된다.

2.2 고로슬래그

고로슬래그의 일반적인 성분은 포틀랜드 시멘트와 유사한 성분으로 구성되어 있으며 알루민산 규산염이라 할 수 있다. 하지만 고로슬래그는 선철을 제련하는 과정에서 발생하는 부산물이기 때문에 철광석의 품질 및 제조과정에 따라 화학적 성분이 다소 차이 날 수 있다. 본 연구에 사용한 고로슬래그의 화학적 구성은 Table 1과 같이 SiO_2, CaO, Al_2O_3이 약 86% 함유되어 있으며, 입도분포곡선은 Fig. 1과 같다. 슬래그는 분말을 그대로 물과 접촉시켜도 수화반응은 거의 진행되지 않지만 알칼리 존재 하에 물과 반응하면 슬래그의 막이 파괴되고 CaO와 SiO_2 성분이 용출되어 C-S-H계와 C-A-H계 수화물을 생성하게 되며, 강도 발현에 기여하는 수화물은 C-S-H계로 반응식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} &6(2CaO\cdot Al_2O_3\cdot SiO_2) + 68.5H_2O \\ &\rightarrow 5CaO\cdot 6SiO_2\cdot 10.5H_2O(C\text{-}S\text{-}H) \\ &\quad + 5(CaO\cdot Al_2O_3\cdot 10H_2O)(C\text{-}A\text{-}H) \\ &\quad + 2CaO\cdot Al_2O_3\cdot 8H_2O(C\text{-}A\text{-}H) \end{aligned} \quad (1)$$

2.3 알칼리 활성화제

2.3.1 화학적 알칼리 활성화제(Chemical alkaline activator)

고로슬래그 미분말은 단독으로 물과 반응하여 경화하는 것이 아니라 pH 12 이상의 알칼리 활성화제가 필요하다. 지금까지 알려진 알칼리 활성화제는 수산화나트륨, 수산화칼륨 등의 수산화기 계열을 비롯하여 황산칼슘, 칼슘설포알루미네이트, 규산나트륨 등으로 알려져 있다. 이는 수용성 알칼리염으로 Ca^+ 이온과 반응하여 칼슘 화합물을 만들어 낼 수 있는 음이온이 효과적인 알칼리 활성화제로 알려져 있다. 본 연구에서는 기존에 알려진 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)과 수산화나트륨(NaOH)을 이용하여 알칼리 활성화제를 제조하였다.

수산화칼슘과 수산화나트륨을 이용한 알칼리 활성화제를 '화학적 알칼리 활성화제(Chemical alkaline activator)'로 표기하였으며, 화학적 알칼리 활성화제 수용액의 농도가 1몰(Mol)이 되도록 Table 2와 같이 두 종류의 알칼리 활성화제(Ca 및 Na)에 증류수를 혼합하였다. Table 2는 화학적 알칼리 활성화제 수용액 제조에 사용한 각종 성분과 수용액의 pH를 나타내고 있다.

2.3.2 미생물 알칼리 활성화제(Microorganism alkaline activator)

기존의 화학적 알칼리 활성화제에 극한미생물을 혼합하여 새로운 알칼리 활성화제를 개발하였으며, 이를 '미생물 알칼리 활성화제(Microorganism alkaline activator)'로 표기하였다. 극한미생물은 온도, 압력, 방사선 등 물리적인 극한환경(extreme environment) 또는 pH, 염도, 건조성, 산소농도 등 지구화학적 극한환경 등 일반적인 자연환경이 아닌 특수환경에서 서식하거나 그러한 환경과 동일한 조건에서 증식할 수 있는 미생물이다. 이런 환경에서 생장 혹은 생존할 수 있는 미생물을 포함한 생물체를 통틀어 Extremophile이라고 한다. 본 연구에서 활용한 *Bacillus halodurans* 균주는 지구화학적 극한환

Table 1. Chemical composition of blast furnace slag

Component	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe	MgO	S	MnO	TiO_2
Content (%)	40.22	23.11	22.87	7.01	3.14	2.03	0.60	1.02

Table 2. Types of alkaline activator and its pH

Name	Type	Chemical		Mixing solution		pH	Molarity
		Symbol	Weight (g)	Distilled water (ml)	Microbial culture (ml)		
Ca	Chemical alkaline activator	$Ca(OH)_2$	74.09	1,000	0	12.27	1 M
CaMicro	Microorganism alkaline activator	$Ca(OH)_2$	74.09	0	1,000	12.24	1 M
Na	Chemical alkaline activator	NaOH	40.00	1,000	0	12.52	1 M
NaMicro	Microorganism alkaline activator	NaOH	40.00	0	1,000	12.56	1 M

경 요인 중 pH와 관련된 것으로 pH 10-12에서 Fig. 2와 같이 생존할 수 있는 대표적인 호알칼리성(Alkaliphile) 미생물이다. 형태는 막대 모양(rod-shaped)이며, Gram-positive 균주이다. 이 균주가 최초로 분리 및 동정된 것은 1975년 *Bacillus* sp. strain C-125(JCM9153)로 β-galactosidase와 xylanase를 생산하는 것으로 알려져 있다. 근래에 와서 16S rDNA 서열 분석 및 DNA-DNA hybridization 분석 등을 통해 *Bacillus halodurans*라는 이름으로 재분류되었다. 본 균주의 가장 큰 특성으로는 pH 10-12에서 생존 가능하고 호알칼리성을 지니는 유용한 효소들을 생산하는 데 있다. 대표적인 것들로는 단백질 분해효소인 protease, cellulose를 분해할 수 있는 cellulase, 전분(starch)을 분해할 수 있는 amylase 등이다.

Table 2의 미생물 알칼리 활성화제(CaMicro 및 NaMicro) 제조를 위한 미생물 배양액(Microbial culture)의 제조과정은 다음과 같다. 먼저 증류수 1 L에 Beef Extract 3.0g과 Peptone 5.0g을 혼합하여 1차 배지(미생물의 영양분 역할)를 제조하며, 증류수 100mL에 $NaHCO_3$ 4.2g과 Na_2CO_3 5.3g을 혼합하여 2차 배지를 제조하는데 2차 배지는 미생물의 성장을 촉진시키며 최적의 pH로 유지시켜주는 역할을 한다. 제조된 1, 2차 배지를 혼합한 후 멸균을 통하여 최종 액체 배지를 제조하였다. 이와 같이 조성한 액체 배지에 독일유전자은행(DSM, Deutsche Sammlumg von Microorganismunt Zellkulturen GmbH)으로부터 분양 받은 *Bacillus halodurans*(DSM 9757) 균주를 접종하여 2일 간 28°C에서 160rpm으로 교반시켜 배양하였다. 미생물 접종 직후는 미생물의 수가 극히 적어 배양액이 투명하게 보이지만 시간이 지남에 따라 미생물의 개체수가 증가하면서 Fig. 3과 같이 미생물 배양액이 혼탁해지는 것을 볼 수 있다.

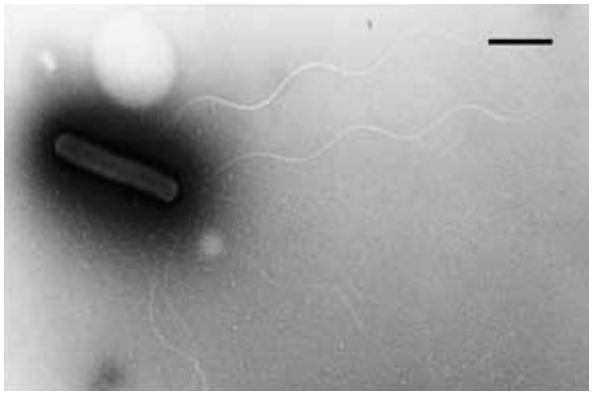


Fig. 2. Photo of *Bacillus halodurans*

3. 극한미생물 pH 내성실험 및 공시체 제작방법

3.1 pH 조건에 따른 *Bacillus halodurans* 균주 생장 실험

Bacillus halodurans 균주의 최적생장 조건은 pH 9.8로 알려져 있으며, pH 12 이상의 강알칼리 환경에서도 생존 및 생장하는 것으로 알려져 있다. 강알칼리 조건에서 *Bacillus halodurans* 균주의 생장곡선 차이를 관찰하기 위해 pH에 따른 생장률을 실험하였으며, pH 조절에는 수산화나트륨을 이용하였다. 그 결과, Fig. 4에서 보는 바와 같이 pH 11과 같은 강알칼리 조건에서도 극한미생물의 생장이 활발하며, pH 13.0의 조건에서 생장은 매우 미미한 것으로 확인되었다. 따라서, pH 13.0을 넘어서는 pH 조건에서의 *Bacillus halodurans* 균주 생장은 거의 이루어지지 않는 것으로 판단되었다. 한편, pH 12.5의 조건에서는 미생물이 초기에 빠르게 생장을 하고 5시간이 지나면서 생장이 일정하게 유지되는 것을 확인하였다. 즉, pH 12.5 조건에서도 미생물이 사멸하지

(a) Microorganism inoculation (b) After 1 day (c) After 2 days

Fig. 3. Microbial culture with time

않고 유지되는 경향을 보이므로 미생물 알칼리 활성화제의 가능성을 확인할 수 있었다.

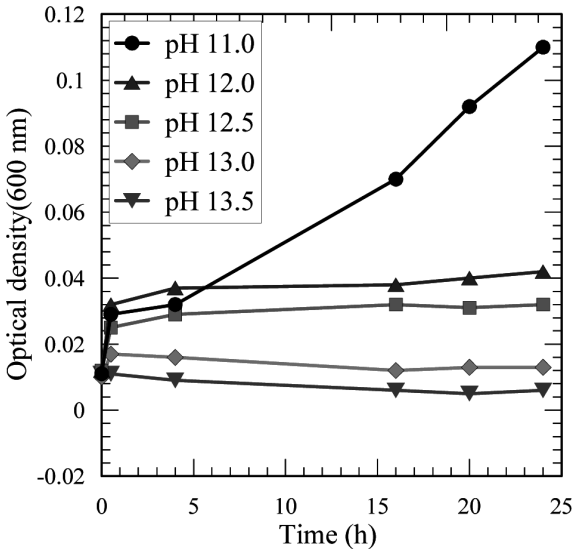


Fig. 4. Growth curve of Bacillus halodurans with time

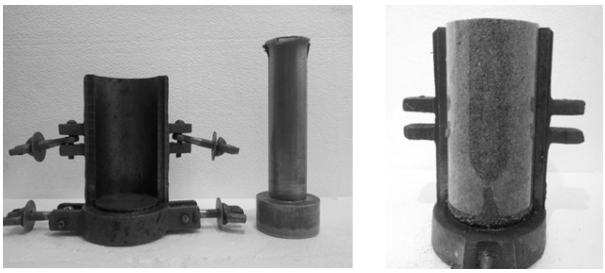


Fig. 5. Rammer and mold for sample preparation

3.2 공시체 제작방법

공시체 제작방법은 모래와 고로슬래그를 비빈 다음 Table 2의 수산화칼슘을 이용한 화학적 알칼리 활성화제(Ca)와 미생물 알칼리 활성화제(CaMicro) 그리고 수산화나트륨을 이용한 화학적 알칼리 활성화제(Na)와 미생물 알칼리 활성화제(NaMicro)를 각각 최적함수비 15%로 넣어 성형 몰드와 램머를 사용하여 5층으로 나누어 직경 5cm, 높이 10cm의 공시체를 제작하였다. Fig. 5와 같이 다짐에 사용한 램머의 직경은 4.7cm이고 무게는 1kg이며, 저다짐방법으로 최종적으로 다짐이 완료되었을 시에 층당 높이가 2cm가 되도록 제작하였다. 공시체의 몰드는 제작 6일 후에 분리하였으며, 평균 온도가 28°C로 유지되는 실내에서 공시체를 대기 중 양생하였다. 양생기간은 7일이며 양생이 완료된 공시체는 1%/min의 전단속도로 일축압축시험을 실시하였다.

4. 일축압축시험 결과 및 분석

4.1 일축압축시험 조건 및 결과

낙동강모래에 고로슬래그를 4, 8, 12, 16%로 혼합한 다음 Table 2와 같은 네 종류의 알칼리 활성화제(Ca, CaMicro, Na, NaMicro)를 사용하여 고결을 유발하였으며, 각각의 공시체에 사용한 알칼리 활성화제, 건조밀도

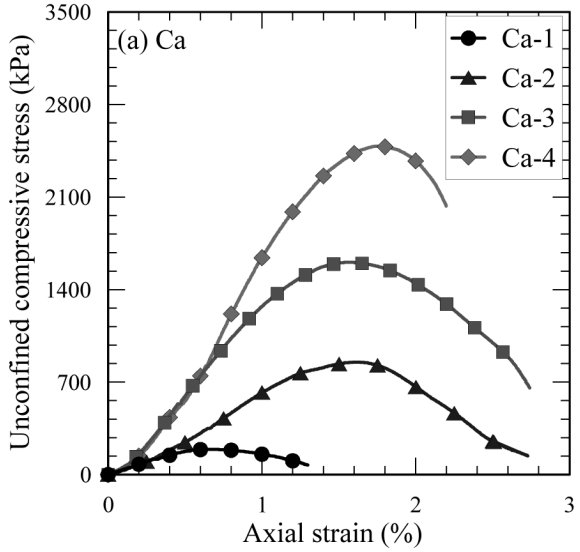
Table 3. Test condition and results of unconfined compression tests

TEST ID	Alkaline activator	Blast furnace slag ratio (%)	Water content (%)	Dry density (g/cm^3)	Unconfined compressive strength (kPa)	Axial strain at peak strength (%)
Ca-1	Chemical alkaline activator with $Ca(OH)_2$	4	4.77	1.483	192	0.68
Ca-2		8	6.02	1.55	851	1.61
Ca-3		12	6.27	1.596	1,605	1.56
Ca-4		16	6.53	1.668	2,484	1.75
CaMicro-1	Microorganism alkaline activator with $Ca(OH)_2$	4	4.64	1.476	119	0.57
CaMicro-2		8	5.21	1.528	337	1.01
CaMicro-3		12	5.59	1.574	1,296	1.34
CaMicro-4		16	6.22	1.634	2,212	1.66
Na-1	Chemical alkaline activator with NaOH	4	5.87	1.491	125	0.60
Na-2		8	7.01	1.55	807	1.10
Na-3		12	7.17	1.602	1,423	1.29
Na-4		16	8.8	1.674	2,000	1.68
NaMicro-1	Microorganism alkaline activator with NaOH	4	5.77	1.519	276	1.06
NaMicro-2		8	7.27	1.604	1,129	1.17
NaMicro-3		12	8.31	1.621	1,690	1.72
NaMicro-4		16	9.31	1.666	3,042	1.69

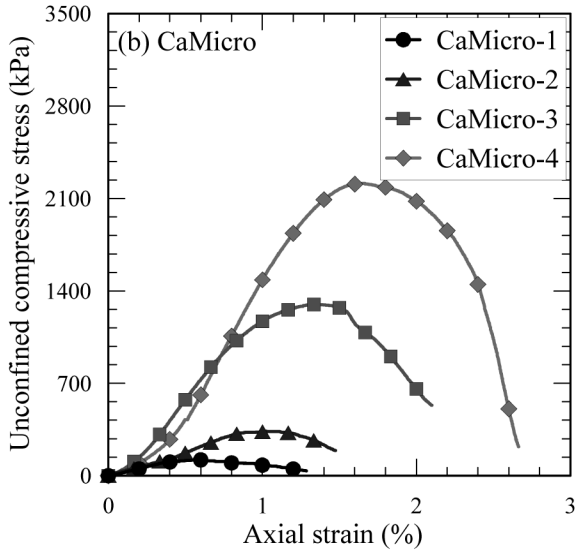
등 실험조건은 Table 3과 같다. 각각의 경우에 대해 동일한 공시체를 2개씩 제작한 다음 평균값을 Table 3에 비교 분석하였다. 공시체의 건조밀도는 CaMicro-1의 경우 1.476g/cm^{3}로 가장 낮았으며, Na-4의 경우 1.674g/cm^{3}로 가장 높았다. 모든 공시체에서 고로슬래그의 양이 증가할수록 건조밀도가 증가하였으며, 이는 고로슬래그가 수화되면서 생성된 고결물질이 증가하였기 때문으로 판단된다. 또한 생성된 수화물로 공시체 내 공극이 감소하면서 증발되는 수분이 감소하여 양생 후 함수비는 최대 9.31%로 나타났으며, 기존 연구사례(Park and Choi, 2013)에서도 이와 동일한 경향이 나타났다.

Fig. 6과 7은 알칼리 활성화제에 수산화칼슘과 수산화나트륨이 각각 포함된 공시체에 대한 일축압축시험으로부터 얻은 응력-변형률 곡선이다. 알칼리 활성화제의 종류에 관계없이 고로슬래그의 함유량이 4%에서 16%로 증가함에 따라 일축압축강도가 평균 178kPa에서 2,435kPa로 증가하였으며, 화학적 알칼리 활성화제의 종류에 따른 비교는 다음과 같다.

먼저, 화학적 알칼리 활성화제를 고로슬래그 고결에 사용한 경우에는 Fig. 6(a)의 수산화칼슘이 혼합된 경우(Ca-1, 2, 3, 4)가 Fig. 7(a)의 수산화나트륨을 혼합한 경우(Na-1, 2, 3, 4)보다 일축압축강도가 5-54% 정도 높게 나타났다. 이 결과는 유사한 연구사례(Park and Choi, 2013)와 상반되는 결과이다. 이러한 차이는 기존 연구에서 사용한 공시

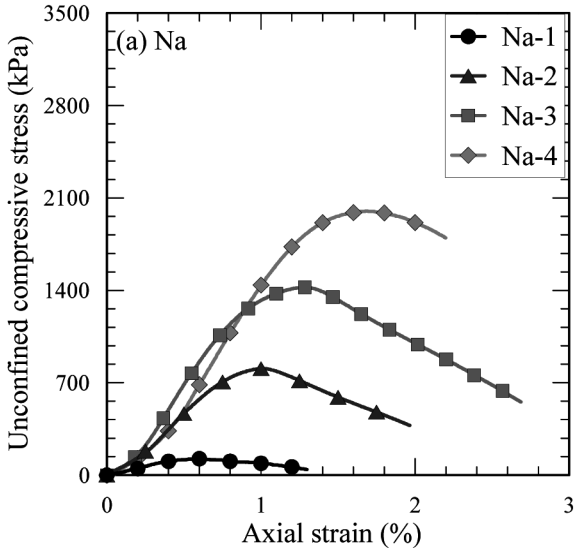


(a) Chemical alkaline activator

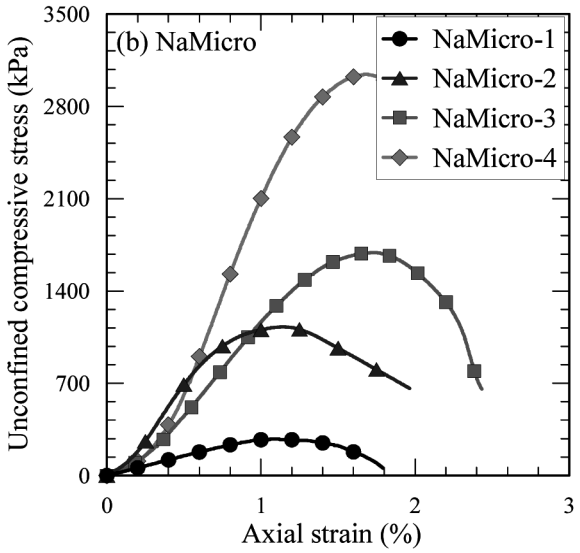


(b) Microorganism alkaline activator

Fig. 6. Results of unconfined compression tests for specimens with $Ca(OH)_2$



(a) Chemical alkaline activator



(b) Microorganism alkaline activator

Fig. 7. Results of unconfined compression tests for specimens with NaOH

체의 제작 및 양생 시 평균 실내 온도는 20°C이고 습도는 75%이지만, 본 연구에 사용한 공시체의 경우에는 온도는 28°C, 습도는 67%이었다. 이와 같은 공시체의 제작시기에 따른 온도나 습도 차이가 화학약품의 반응에 영향을 미치면서 강도 차이를 보인 것으로 판단된다.

Fig. 6은 수산화칼슘으로 화학적 알칼리 활성화제(Ca)와 미생물 알칼리 활성화제(CaMicro)를 제조하여 고로슬래그의 고결을 유도한 강도시험 결과로 미생물 알칼리 활성화제의 경우 화학적 알칼리 활성화제를 사용한 경우보다 일축압축강도가 약 11-60% 정도 감소하였다. 수산화칼슘의 용해도는 0.16g/100ml로 약 2%(1.6g)만 용해되고 용해되지 못한 수산화칼슘 분말이 미생물 배양액 내에 상당량 존재하면서 미생물의 활동성을 저하시킨 것으로 판단된다. 이러한 미생물의 활동력 저하 또는 사멸로 pH가 0.03 감소된 것으로 판단된다. pH 변화는 고로슬래그의 경화 및 강도 발현에 중요한 역할(Park et al., 2007)을 할 뿐 아니라 고로슬래그의 경화 시 사멸된 미생물도 강도 발현에 일부 영향을 미친 것으로 판단된다.

Fig. 7은 수산화나트륨으로 화학적 알칼리 활성화제(Na)와 미생물 알칼리 활성화제(NaMicro)를 제조하여 고로슬래그의 고결을 유도한 강도시험 결과로 미생물 알칼리 활성화제의 경우 화학적 알칼리 활성화제를 이용한 경우보다 일축압축강도가 약 19-121% 정도 증가하였다. 이는 수산화나트륨의 용해도가 119g/100ml로 미생물 배양액에 수산화나트륨은 모두(40g) 용해되고 극한미생물이 좀 더 자유롭게 활동하면서 Table 2와 같이 pH가 12.52에서 12.56으로 약간 증가한 것도 강도 증가에 일부 기여한 것으로 판단된다. 또한, pH가 증가하는 상황에서 *Bacillus halodurans* 균주가 극한 환경에서 생존하기 위한 최소 조건을 균주 자체의 보호기작으로 만들어서 세포 밖으로 특정 물질을 분비한 것으로 판단된다. 이와 같이 세포 밖으로 분비되는 단백질, 지질, Biosurfactant 등의 생체물질이 흙의 고결 및 강도증진에 기여한 것으로 판단된다(Jang, 2010; Cole et al., 2012). 실제로 기존 연구에서 Bacillus 균 등이 세포 외부로 분비하는 물질에 의해 배지 내 pH 등의 조건과 특정 물질에 대한 흡착 현상들이 보고된 바 있다(Yokoi et al., 1995; Wu and Ye, 2007).

4.2 XRD 및 SEM 분석

알칼리 활성화제의 종류에 따른 고결물질 및 고결도를 분석하기 위해 XRD 및 SEM 분석을 실시하였다. Fig. 8은 화학적 알칼리 활성화제와 미생물 알칼리 활성화제를 이용하여 제작한 공시체의 XRD 분석 결과이며, 두 경우 모두 C-S-H 수화물이 확인되었다(Lee, 2011; Park and Choi, 2013). 확인된 고결물질에 의한 고결도를 시각적으로 분석하기 위하여 SEM 분석을 실시하였으며, Fig. 9는 수산화나트륨으로 제조한 알칼리 활성화제와 미생물 알칼리 활성화제를 고로슬래그 4, 8, 12, 16%로 혼합하여 양생한 공시체를 100배 확대한 전자현미경 사진이다. 알칼리 활성화제의 종류에 관계없이 고로슬래그의 양이 증가할수록 모래 입자 사이에 고로슬래그의 경화로 생성된 수화물이 점점 증가하였으며 모래 입자 주위를 에워싸는 경향을 보이고 있다. XRD 분석을 통하여 C-S-H 수화물을 확인할 수 있었으며, SEM 분석을

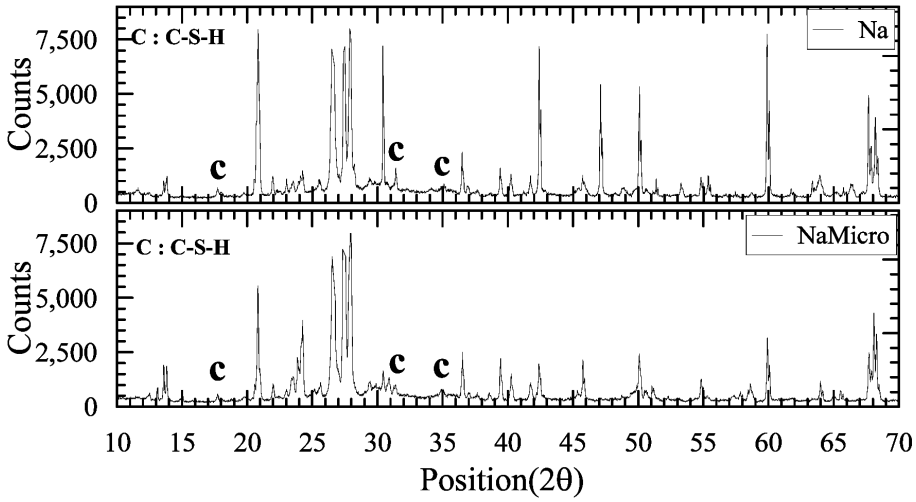


Fig. 8. Result of XRD analyses of cemented sands with blast furnace slag

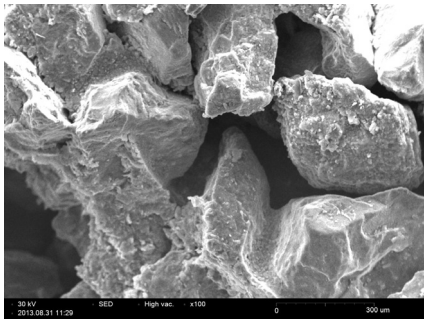
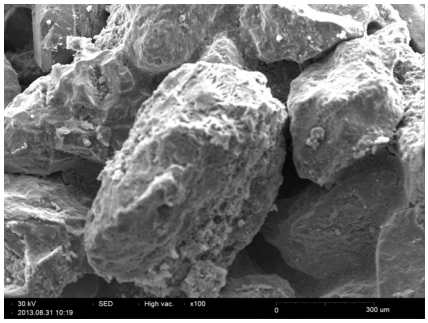
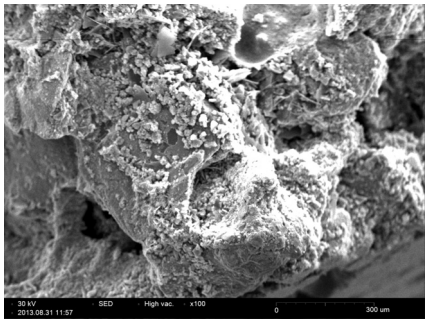
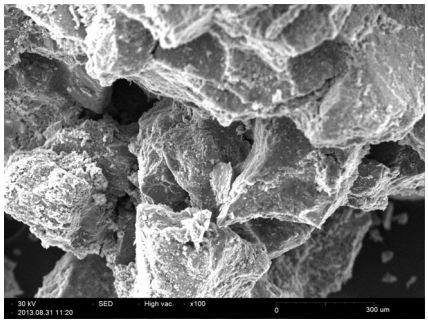
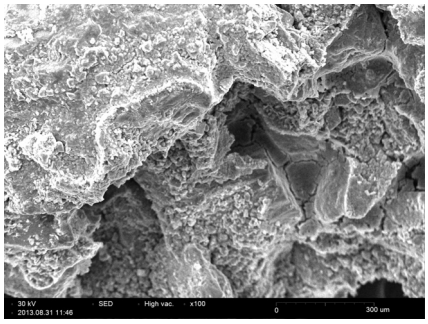
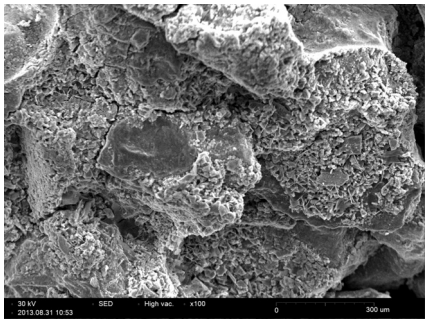
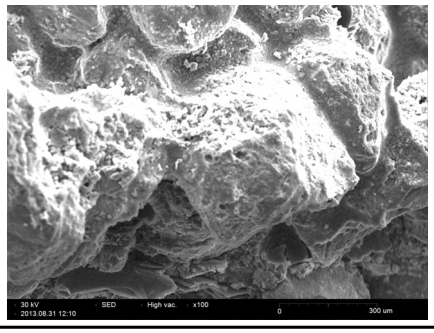
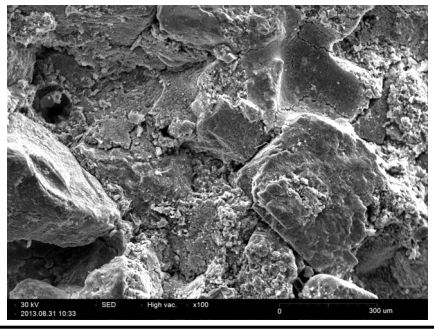
Blast furnace slag ratio (%)	Alkaline activator with NaOH	
	Microorganism alkaline activator	Chemical alkaline activator
4		
8		
12		
16		

Fig. 9. SEM images of cemented sands with blast furnace slag

통하여 생성된 수화물이 모래 입자 주위의 공극을 채워 입자 간의 고결력뿐 아니라 건조밀도를 증가시켰으며, 이는 일축압축강도의 증가로 이어진 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 고로슬래그의 수화반응을 일으키는 수산화기 계열의 화학적 알칼리 활성화제에 극한미생물을 혼합한 미생물 알칼리 활성화제를 개발하여 모래의 고결을 유도하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) pH 10 이상에서 활동하는 극한미생물을 이용하여 미생물 알칼리 활성화제를 개발하였으며, 미생물 알칼리 활성화제의 pH별 내성실험을 통하여 고로슬래그의 경화를 유발할 수 있는 알칼리 활성화제로 사용 가능함을 확인하였다.

(2) 고로슬래그를 경화시키는 수산화기 계열의 화학적 알칼리 활성화제를 이용하여 공시체를 제작하여 7일 동안 양생하였으며, 수산화칼슘을 사용한 공시체의 일축압축강도가 수산화나트륨을 사용한 경우보다 5-54% 정도 높았다.

(3) 고로슬래그에 수산화칼슘을 이용한 화학적 알칼리 활성화제 또는 미생물 알칼리 활성화제를 혼합하여 모래를 고결시킨 결과, 미생물 알칼리 활성화제를 사용하였을 때 11-60% 정도 강도가 감소하였으며, 이는 용해되지 않은 수산화칼슘 미분말로 인한 미생물의 활동력 저하 또는 사멸 그리고 pH 감소로 인하여 고로슬래그의 경화반응이 약해지면서 낮은 강도를 나타낸 것으로 판단된다.

(4) 고로슬래그에 수산화나트륨을 이용한 화학적 알칼리 활성화제 또는 미생물 알칼리 활성화제를 혼합하여 모래를 고결시킨 결과, 미생물 알칼리 활성화제를 사용하였을 때 19-121% 정도 강도가 증가하였으며, 이는 수산화나트륨의 높은 용해도로 미생물의 활동을 향상시키고 pH가 높아지면서 강알칼리 환경에서의 생존을 위한 미생물의 보호기작으로 분비된 물질로 강도 증진이 발생한 것으로 판단된다.

(5) 고결된 공시체를 XRD 분석을 통하여 C-S-H 화합물을 확인하였으며, SEM 분석에서 고로슬래그 함유량이 증가할수록 수화물의 양도 증가한 것을 시각적으로 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 국토해양기술연구개발사업의 연구비지원(11기술혁신 F01)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Cole, D. M., Ringelberg, D. B., and Reynolds, C. M. (2012), "Small-Scale Mechanical Properties of Biopolymers", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, No. 138, pp. 1063-1074.
2. Jang, I. H. (2010), "*Biopolymer treated Korean Residual Soil – Geotechnical behavior and Applications*", Ph.D Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology.
3. Kawasaki, S., Ogata, S., Hiroyoshi, N., Tsunekawa, M., Kaneko, K., and Terajima, R. (2010), "Effect of temperature on precipitation of calcium carbonate using soil microorganisms", *Journal of Japan Society of engineering Geology* ,Vol.51, No.1, pp.10-18.
4. 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 Geoenvironmental Engineering*, Vol.13, No.5, pp.51-57.
5. Kim, S. T., Do, J. N., Jo, H. S., and Chun, B. S. (2011), "Effect of Ground Strength Increase using Polysaccharide Environmentally Friendly Soil Stabilizer", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.12, No.11, pp.13-21.
6. Lee, H. J. (2011), "*An Experimental study on the Alkali-activated Slag Cement Using Recycling Water of Ready mixed Concrete*", Master Thesis, Hanyang University.
7. Lee, J. H. (2013), "*A Study on Soil Improvement by proliferation of Microbes*", Ph.D Thesis, Hanyang University.
8. Mitchell, J. K. and Santamarina, J. C. (2005), "Biological Considerations in Geotechnical Engineering", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.131, No.10, pp.1222-1233.
9. Park, S. S. and Choi, S. G. (2013), "A Study on Sand Cementation and and its Early-Strength Using Blast Furnace Slag and Alkaline Activators", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.4, pp.45-56.
10. Park, S. S., Kang, H. Y., and Han, K. S. (2007), "Development of Fly Ash/slag Cement Using Alkali-activated Reaction(1) - Compressive strength and acid corrosion resistance -", *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol.29, No.7, pp. 801-809.
11. Park, S. S., Kim, W. J., and Lee, J. C. (2011), "Effect of Bio-mineralizaion on the Strength of Cemented Sands", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.27, No.5, pp.75-84.
12. Terajima, R., Shimada, S., Oyama, T., and Kawasaki, S. (2009), "Fundamental study of siliceous biogrout for eco-friendly soil improvement", *Journal of Japan Society of Civil Engineers C*, Vol. 65, No.1, pp.120-130.
13. Van Paassen, L. A., Ghose, R., van der Linden, T. J. M., van der Star, W. R. L., and van Loosdrecht, M. C. M. (2010), "Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogrout experiment", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.136, No.12, pp.1721-1728.
14. Whiffin, V. S., van Paassen, L. A., and Harkes, M. P. (2007), "Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique", *Geomicrobiology Journal*, 24, pp.417-423.
15. Wu, J. Y. and Ye, H. F. (2007), "Characterization and flocculating properties of an extracellular biopolymer produced from a Bacillus subtilis DYU1 isolate", *Process Biochemistry*, Vol.42, pp.1114-1123.
16. Yang, K. H. and Sim, J. I. (2008), "Compressive Strength and Shrinkage Strain of Slag-Based Alkali-Activated Mortar with Gypsum", *Journal of the Korean Institute of Building Construction*, Vol.8, No.1, pp.57-62.
17. Yokoi, H., Natsuda, O., Hirose, J., Hayashi, S., and Takasaki, Y. (1995), "Characteristics of a Biopolymer Flocculant Produced by Bacillus sp. PY-90", *Journal of Fermentation and Bioengineering*, Vol.79, No.4, pp.378-380.
18. Yoon, G. L. and Kim, B. T. (2006), "Stabilizing Capability of Oyster Shell Binder for Soft Ground Treatment", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.22, No.11, pp.143-149.

Received : November 6th, 2013
Revised : January 8th, 2014
Accepted : January 14th, 2014