

고로슬래그와 알칼리 활성화제를 이용한 모래 고결 및 조기강도에 관한 연구

A Study on Sand Cementation and its Early-Strength Using Blast Furnace Slag and Alkaline Activators

박 성 식¹ Park, Sung-Sik

최 선 규² Choi, Sun-Gyu

Abstract

In this study, a blast furnace slag with latent hydraulic property is used to cement granular soils without using Portland cement. When the blast furnace slag reacts with an alkaline activator, it can cement soils. The effect of amounts of blast furnace slag and types of alkaline activator on soil strength was investigated for resource recycling. Four different amounts of slag and six different activators (two naturals and four chemicals) were used for preparing specimens. The specimens were air-cured for 3 or 7 days and then tested for unconfined compressive strength (UCS). The UCS of cemented sand with slag increased, in the order of specimens mixed with potassium carbonate, calcium hydroxide, sodium hydroxide and potassium hydroxide. Chemical alkaline activator was better than natural alkaline activator. The maximum UCS of 3-days cured specimens was 3 MPa for 16% of slag with potassium hydroxide, which corresponded to 37% of one with 16% of high-early strength portland cement. As the amount of slag increased, the UCS and dry density of a specimen increased for all alkaline activator cases. As the curing time increased from 3 days to 7 days, the UCS increased up to 97%. C-S-H hydrates were found in the cemented specimens from XRD analyses. Cement hydrates were more generated with increasing amount of slag and they surrounded sand particles, which resulted in higher density.

요 지

본 연구에서는 자원 재활용을 위해 시멘트를 전혀 사용하지 않고 잠재 수경성을 지닌 고로슬래그를 이용하여 사질 토를 고결시키고자 하였다. 알칼리 활성화제에 의해 경화되는 고로슬래그의 함유량과 알칼리 활성화제의 종류를 달리 하여 이들이 사질토의 조기강도에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 고로슬래그의 함유량을 사질토의 4, 8, 12, 16%로 하고 여섯 종류(두 종류의 천연재료, 네 종류의 화학약품)의 알칼리 활성화제를 사용하여 공시체를 제작하였다. 제작한 공시체는 3일 또는 7일 동안 대기중 양생한 다음 일축압축강도시험을 실시하였다. 알칼리 활성화제 종류에 따른 일축압축강도는 탄산칼륨, 수산화칼슘, 수산화나트륨, 수산화칼륨 순으로 높게 측정되었으며, 동일한 성분을 가진 천연재료보다 화학약품을 사용한 공시체의 일축압축강도가 높게 나타났다. 3일 양생한 공시체 중 최대 일축압축강도가 발현된 것은 16%의 고로슬래그에 수산화칼륨을 사용한 경우로 3MPa 정도의 강도가 측정되었으며, 이는 초속경시멘트 16%를 사용한 공시체 강도의 37%에 해당된다. 알칼리 활성화제 종류에 관계없이 고로슬래그 함유량이 증가함에 따라 건조밀도가 증가하면서 일축압축강도도 증가하였으며, 양생기간이 3일에서 7일로 증가함에 따라 최대

1 정회원, 경북대학교 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, 교신저자)

2 비회원, 경북대학교 건축토목공학부 토목공학전공 박사과정 (Graduate student, Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

97%의 강도 증가가 발생하였다. 고결된 모래의 XRD 분석 결과 C-S-H 화합물이 생성되었으며, SEM 분석 결과에서는 고로슬래그 함유량이 증가할수록 생성되는 수화물도 증가하여 모래 입자를 에워싸는 형태를 보였다.

Keywords : Blast furnace slag, Alkaline activator, Sand, Unconfined compressive strength

1. 서론

고로슬래그 미분말은 선철을 제련하는 과정에서 발생하는 부산물로 그 자체는 경화하는 성질이 미약하나 알칼리 용액에 의해 경화하며, 시멘트 수화생성물인 수산화칼슘과 황산염의 작용에 의해서 경화가 촉진되어 압축강도를 증가시킨다. 이러한 고로슬래그를 이용한 연구는 주로 소량의 고로슬래그를 시멘트의 혼화제로 활용하거나 시멘트 사용량을 줄이기 위한 목적으로 수행되었다. 예를 들면, 고로슬래그 시멘트는 일반 포틀랜드 시멘트에 비해 조기강도는 낮지만 장기강도는 높은 것으로 나타났으며(Rim et al., 2000), 한편 조기강도 증진을 위하여 Cho(1998), Yang et al.(2008)은 고로슬래그의 미분말, 감수제 등을 사용하여 조기강도를 개선하였다. Lee et al.(2007)은 고로슬래그 시멘트에 에테르계 혼화제를 사용하여 내구성을 향상시켰으며, Jung et al.(2006)은 기존 콘크리트에 황토와 고로슬래그 미분말을 사용하여 콘크리트의 유동성을 개선하고자 하였다. Hong and Seo(2010)은 고로슬래그에 소성한 황토를 첨가하여 친환경 콘크리트를 개발하였으며, Son et al.(2008)은 고로슬래그의 치환율에 따른 건조수축을 연구하여 적정 치환율을 제시하였다. Park et al.(2007)은 폐기 처분되는 플라이애쉬와 슬래그를 이용하여 기존 시멘트와 유사한 특성을 지닌 플라이애쉬-슬래그 시멘트를 개발하였다. 최근에는 다양한 알칼리 활성화제를 활용한 고로슬래그 경화에 대한 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 굴폐각을 소성한 후 천연 수산화칼슘을 제조한 다음 고로슬래그와 혼합하여 점토 고결제로 사용하였으며, Lee(2011)는 레미콘 회수수를 이용하여 고로슬래그의 알칼리 활성화제로의 활용 가능성을 보여 주었다.

이처럼 고로슬래그를 고화제로 활용하기 위한 다양한 연구가 수행되었지만 대부분의 연구가 건축 분야에

서 수행된 시멘트 제로(zero) 콘크리트나 모르타르 제조와 관련되며(Kang et al., 2009), 고로슬래그만으로 점토나 사질토 지반을 고결시키는 연구는 미진할 뿐 아니라 친환경 알칼리 활성화제에 관한 연구도 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 시멘트를 첨가하지 않고 고로슬래그와 알칼리 활성화제만으로 사질토의 고결을 유도하였다. 사질토에 고로슬래그의 함유량(4, 8, 12, 16%)과 알칼리 활성화제의 종류(수산화칼슘, 탄산칼륨, 수산화칼륨, 수산화나트륨)를 달리하여 제작된 공시체를 3일 또는 7일 동안 양생한 다음 일축압축강도시험을 실시하여 고결모래의 조기강도 특성과 고결 형상을 분석하여 지반고결을 위한 고로슬래그의 현장 적용 가능성을 검토하였다.

2. 고결 재료 및 공시체 제작방법

2.1 고로슬래그(Blast furnace slag)

고로슬래그의 일반적인 성분은 포틀랜드 시멘트와 유사한 성분으로 구성되어 있으며 알루미늄 규산염이라 할 수 있다. 하지만 고로슬래그는 선철을 제련하는 과정에서 발생하는 부산물이기 때문에 철광석의 품질 및 제조과정에 따라 화학적 성분이 다소 차이 날 수 있

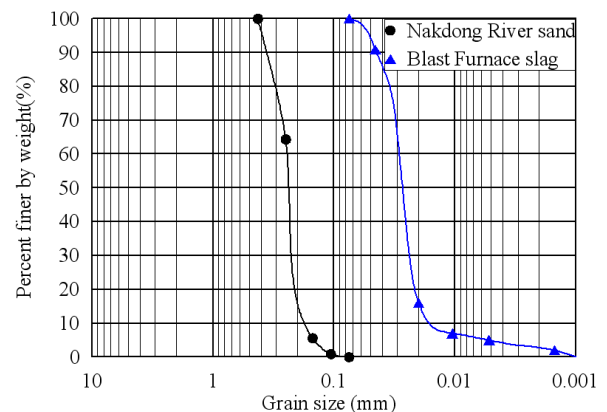


Fig. 1. Grain size distribution curve of Nakdong River sand and blast furnace slag

Table 1. Chemical composition of Blast furnace slag

Component	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe	MgO	S	MnO	TiO ₂
Content (%)	40.22	23.11	22.87	7.01	3.14	2.03	0.60	1.02

으며, 본 연구에 사용한 고로슬래그의 입도분포곡선은 Fig. 1과 같으며 화학적 구성은 Table 1과 같다.

2.2 알칼리 활성화제

고로슬래그의 미분말은 단독으로 물과 반응하여 경화하는 것이 아니라 pH 12 이상의 알칼리 활성화제가 필요하다. 지금까지 알려진 알칼리 활성화제는 수산화나트륨, 수산화칼륨 등의 수산기(OH⁻) 계열을 비롯하여 황산칼슘, 칼슘설포알루미늄네이트, 규산나트륨 등으로 알려져 있다. 이는 수용성 알칼리염으로 Ca⁺ 이온과 반응하여 칼슘 화합물을 만들어 낼 수 있는 음이온이 효과적인 알칼리 활성화제로 알려져 있다. 본 연구에서는 알칼리 활성화제로 수산화칼슘(Ca(OH)₂), 수산화칼슘과 동일한 화학성분을 가진 소성한 굴패각, 수산화칼륨(KOH), 수산화나트륨(NaOH), 탄산칼륨(K₂CO₃), 그리고 탄산칼륨과 동일한 화학성분을 포함하고 있는 나무젓물(Seo et al., 2005)을 사용하였다. 특히, 굴패각이나 나무젓물과 같은 천연재료는 친환경적인 측면에서 그 활용가치를 평가하기 위하여 사용하였다. 굴패각은 CaCO₃를 주성분으로 하며 1000°C로 소성시켰을 때 이산화탄소가 제거되어 생석회(CaO)만 남게 된다. 생석회에 증류수를 추가하면 Ca(OH)₂의 화학식을 가진 수산화칼슘이 된다. 수산화칼슘과 소성한 굴패각이 동일한

성분임을 XRF 분석을 통하여 Table 2와 같이 확인하였다. 즉, 네 종류의 화학약품과 두 종류의 천연재료를 수용액화한 알칼리 활성화제를 사용하였다.

수용액의 농도가 1몰(Mol)이 되도록 여섯 종류의 알칼리 활성화제에 증류수를 혼합하였으며, 탄산칼륨의 경우는 1몰로 혼합할 경우 pH가 12보다 낮아 1.5몰로 높여 pH가 12 이상이 되도록 하였다. Table 3은 각각의 알칼리 활성화제 수용액 제조에 사용한 무게와 증류수 그리고 수용액의 pH를 나타내고 있다.

2.3 모래

본 연구에서는 고로슬래그로 흙을 고결시키기 위해

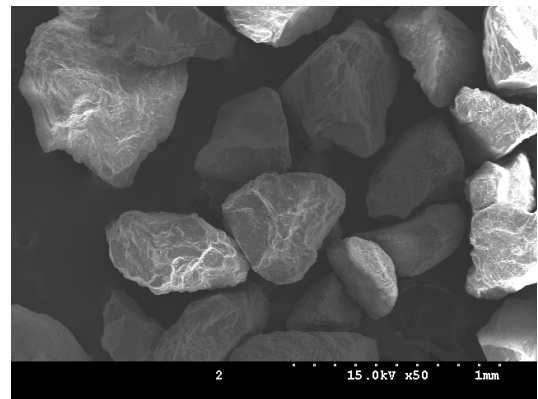


Fig. 2. SEM photo of Nakdong River sand

Table 2. Component of Calcium Hydroxide and Oyster shell

Alkaline activators	Component (%)				
	Ca	Sr	S	P	Si
Calcium Hydroxide	99.9	0.054	0.046	-	-
Oyster shell	98.905	0.52	0.44	0.119	0.016

Table 3. Types of alkaline activator and its pH

Chemical Symbol	Alkaline activator		Distilled water (g)	pH	Molarity
	Type	Weight (g)			
Ca(OH) ₂	Calcium hydroxide (chemical)	74.09	1,000	12.27	1 M
	Oyster shell (natural)	100.00	500	12.16	-
NaOH	Sodium hydroxide (chemical)	40.00	1,000	12.75	1 M
KOH	Potassium hydroxide (chemical)	37.05	1,000	13.54	1 M
K ₂ CO ₃	Potassium carbonate (chemical)	207.32	1,000	12.31	1.5 M
	Wood lye (natural)	500.00	500	12.25	-

낙동강모래를 사용하였으며, 낙동강모래의 전자현미경 사진은 Fig. 2와 같다. 낙동강모래의 성분분석(XRF) 결과에 의하면 낙동강모래는 실리카(이산화규소)가 78% 이상인 실리카질 모래로 입자는 약간 모난 형태를 하고 있으며 색깔은 다소 붉은 색을 띠고 있다. 낙동강모래의 입도분포곡선은 Fig. 1에 나타나 있으며, 통일분류법에 의하면 빈입도 모래(SP)로 분류된다. 체분석으로 0.425-0.075mm 사이의 모래를 사용하였으며, 낙동강모래의 최대간극비와 최소간극비는 각각 1.181과 0.65이다.

2.4 공시체 제작방법

공시체 제작방법은 모래와 고로슬래그를 비빈 다음 수용액 상태의 알칼리 활성화제를 최적함수비(15%)로 넣어 성형 몰드와 램머를 사용하여 5층으로 나누어 직경 5cm, 높이 10cm의 공시체를 제작하였다. 다짐에 사용한 램머의 직경은 4.7cm 이고 무게는 1kg이며, 저다짐방법으로 최종적으로 다짐이 완료되었을 시에 층당

높이가 2cm가 되도록 제작하였다. 제작된 공시체의 성형몰드는 1일 뒤 분리하였으며, 실내 평균 온도가 15°C로 유지되는 실험실에서 공시체가 공기에 직접 접촉하는 대기 중 양생을 실시하였다. 양생기간은 3일 또는 7일간 양생하였으며, 양생이 완료된 공시체는 1%/min의 전단속도로 일축압축강도시험을 실시하였다.

3. 일축압축시험 결과 및 분석

3.1 3일 동안 양생한 공시체의 종류

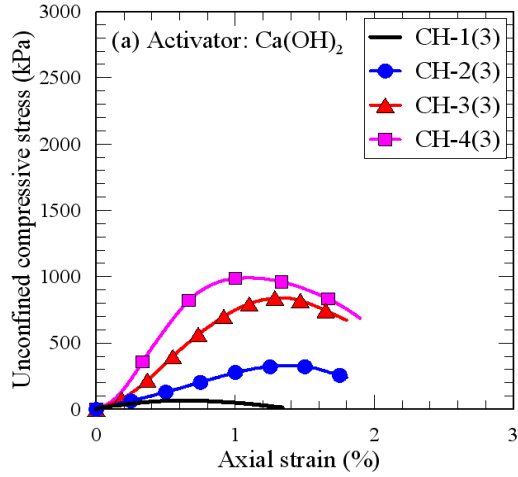
낙동강모래에 고로슬래그를 4, 8, 12, 16%로 혼합한 다음 여섯 종류의 알칼리 활성화제를 섞어 공시체를 제작하였으며, 이를 대기중에서 3일 동안 양생하였다. 각각의 공시체에 사용한 알칼리 활성화제, 건조밀도 등 실험조건은 Table 4와 같으며, 공시체의 건조밀도는 수산화칼슘을 사용한 경우 평균 1.66g/cm³으로 가장 높았으며 수산화나트륨을 사용한 공시체의 건조밀도가 1.58g/cm³

Table 4. Test condition and results of 3 days-cured specimens

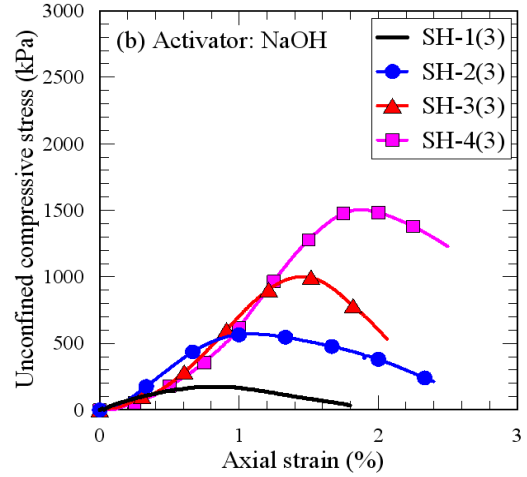
Test ID	Alkaline activator	Blast furnace slag ratio (%)	Dry density (g/cm ³)	Water content (%)	Unconfined compressive strength (kPa)	Axial strain at peak strength (%)	Elastic Modulus, E (MPa)
CH-1(3)	Calcium Hydroxide (Ca(OH) ₂)	4	1.61	2.17	65	0.55	19
CH-2(3)		8	1.63	2.89	330	1.38	27
CH-3(3)		12	1.68	3.81	840	1.38	73
CH-4(3)		16	1.72	3.40	992	1.13	118
SH-1(3)	Sodium Hydroxide (NaOH)	4	1.53	6.02	175	0.84	34
SH-2(3)		8	1.58	6.50	572	1.09	61
SH-3(3)		12	1.59	6.89	1,003	1.46	61
SH-4(3)		16	1.62	7.00	1,503	1.90	68
PH-1(3)	Potassium Hydroxide (KOH)	4	1.55	3.14	489	0.84	66
PH-2(3)		8	1.61	4.62	612	0.85	83
PH-3(3)		12	1.63	9.35	2,010	1.57	116
PH-4(3)		16	1.69	9.62	2,918	2.03	129
PC-1(3)	Potassium Carbonate (K ₂ CO ₃)	4	1.56	4.39	16	0.91	2
PC-2(3)		8	1.59	4.68	28	1.44	4
PC-3(3)		12	1.65	4.82	55	1.49	5
PC-4(3)		16	1.67	5.32	98	1.68	8
OS-1(3)	Oyster Shell (Ca(OH) ₂)	4	1.55	1.86	108	0.84	17
OS-2(3)		8	1.60	2.48	312	0.87	43
OS-3(3)		12	1.64	2.31	411	0.81	62
OS-4(3)		16	1.67	3.06	705	1.36	50
WL-1(3)	Wood Lye (K ₂ CO ₃)	4	1.57	2.04	44	1.21	4
WL-2(3)		8	1.63	2.09	59	0.95	7
WL-3(3)		12	1.67	2.34	96	1.06	11
WL-4(3)		16	1.73	2.36	149	1.34	12

으로 가장 낮았다. 실험한 공시체 모두 고로슬래그의 양이 4%에서 16%로 증가함에 따라 공시체의 건조밀도가 6-10%(0.09-0.16g/cm³) 정도 증가하였다. 이와 같은 건조밀도의 증가는 고로슬래그가 수화되면서 생성된 고

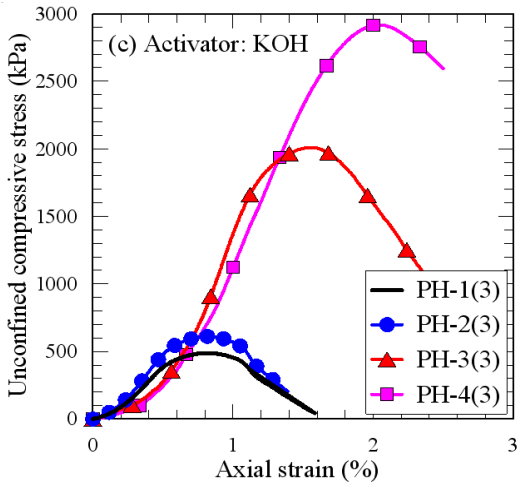
결물질이 증가하였기 때문으로 판단되며, 생성된 수화물로 공시체 내 공극이 감소하면서 증발하는 수분 또한 감소하여 양생 후 함수비는 증가한 것으로 나타났다.



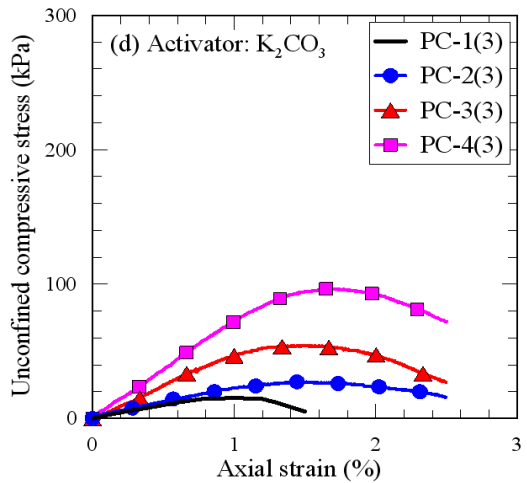
(a) Calcium hydroxide



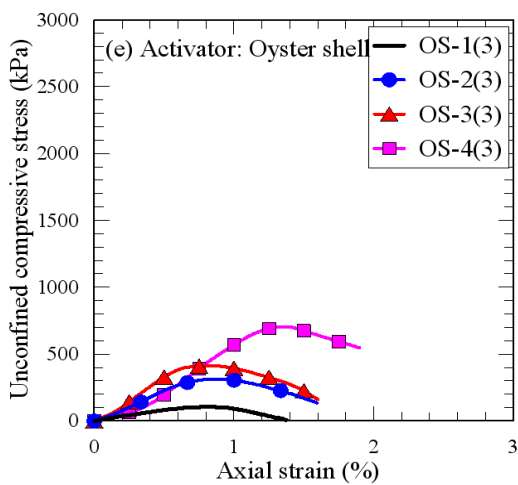
(b) Sodium hydroxide



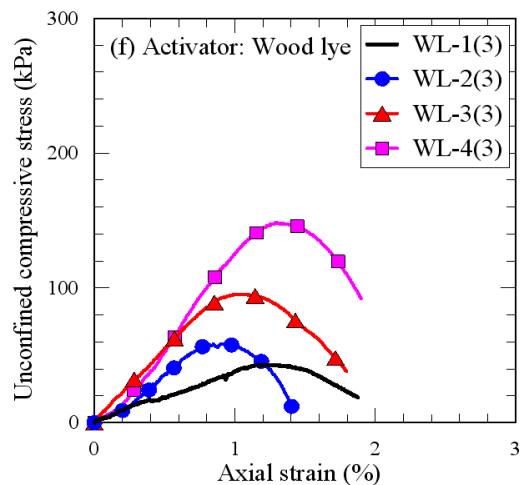
(c) Potassium hydroxide



(d) Potassium carbonate



(e) Oyster shell



(f) Wood lye

Fig. 3. Results of unconfined compression tests on 3-days cured specimens

3.2 3일 동안 양생한 공시체의 일축압축강도 분석

Fig. 3은 Table 4에 있는 3일 동안 대기중 양생한 공시체의 일축압축강도시험 결과이며, 각각의 그래프는 여섯 종류의 알칼리 활성화제에 대한 실험 결과이다. 알칼리 활성화제로 사용한 화학약품 종류에 따른 일축압축강도 비교에서는 탄산칼륨(PC로 표시), 수산화칼슘(CH로 표시), 수산화나트륨(SH로 표시), 수산화칼륨(PH로 표시) 순으로 높게 나타났다. 탄산칼륨을 사용한 경우에는 100kPa 이내로 강도가 전반적으로 낮게 나타났으며, 수산화칼륨을 사용한 경우에는 3MPa 정도로 가장 높게 나타났다. 즉, 본 연구에 사용한 알칼리 활성화제 종류에 따른 일축압축강도 차이는 고로슬래그를 16% 사용한 PC-4(3)와 PH-4(3)의 경우 최대 30배 정도 차이가 났다. 수산화칼슘과 수산화나트륨을 주성분으로 하는 알칼리 활성화제를 사용한 경우 일축압축강도는 2,918kPa로 이들보다 2배 이상 증가하였으며, 이는 높은 pH로 인하여 고로슬래그의 수화현상을 촉진시켜 강도가 증가한 것으로 판단된다. 또한 수산기(OH-)를 포함한 화학약품의 용해도(20°C 기준)는 수산화칼슘, 수산화나트륨, 수산화칼륨 순으로 수산화칼륨의 높은 용해도가 강도 발현에 영향을 미친 것으로 판단된다. 고로슬래그에 수산화칼륨을 알칼리 활성화제로 사용한 공시체의 강도를 초속경시멘트를 사용하여 동일한 방법으로 제작한 공시체의 강도(Park and Lee, 2012)와 비교하면 고로슬래그 함유량이 4, 8, 12, 16%로 증가함에 따라 강도는 동일한 양의 시멘트를 사용한 경우의 53% (489kPa/927kPa), 22%(612kPa/2,832kPa), 44%(2,010kPa/4,556kPa), 37%(2,918kPa/7,989kPa)로 나타났다.

알칼리 활성화제로 동일한 화학성분인 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 로 구성된 수산화칼슘(CH로 표시)과 소성한 굴패각(OS로 표시)으로 공시체를 제작한 경우, 수산화칼슘을 사용한 경우가 소성한 굴패각을 사용한 경우보다 일축압축강도가 1.4-2배 정도 높게 나타났다. 이와 같은 일축압축강도의 차이는 화학약품의 경우 pH가 굴패각을 이용하였을 때보다 0.1 정도 높아 고로슬래그의 수화반응을 촉진시킨 것으로 판단된다. Park et al.(2010)과 Kang et al.(2011)도 이와 유사하게 알칼리 활성화제의 농도가 증가할수록 고로슬래그 시멘트의 일축압축강도가 증가

한다는 결과를 얻었다.

동일한 화학성분인 K_2CO_3 로 구성된 탄산칼륨(PC로 표시)과 나무젓물(WL로 표시)을 알칼리 활성화제로 사용하여 제작한 공시체의 일축압축강도는 다음과 같다. 두 경우 모두 일축압축강도가 200kPa 미만이었으며 강도 발현은 다른 화학약품에 비해 상당히 미미하였다. 수산화칼슘과 탄산칼륨을 이용한 알칼리 활성화제의 pH는 12.16과 12.31로 서로 비슷한 상태였지만 일축압축강도는 최대 15배 정도로 차이를 보였다. 탄산칼륨은 알칼리 활성화제로 활용 가능한 것으로 알려져 있지만(Lee, 2011), 본 연구에서 실험한 결과 탄산칼륨과 나무젓물은 고로슬래그의 경화에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다. 고로슬래그 경화를 위해 요구되는 pH는 알칼리 활성화제의 종류에 따라 다르므로 본 연구에서는 추가적으로 탄산칼륨의 pH를 13.5까지 높인 다음 고로슬래그의 경화를 시도하였으나 강도 발현이 미미하였다. 따라서 기존 문헌(Lee, 2011)과 달리 본 연구에 사용한 탄산칼륨은 사질토 고결을 위한 알칼리 활성화제로 부적합한 것으로 확인되었다.

일축압축강도 발현 시의 축변형률은 1-2% 사이이며, 알칼리 활성화제에 관계없이 고로슬래그의 함유량이 증가할수록 일축압축강도 시의 축변형률도 증가하는 경향을 보였다. 탄성계수(E)도 Table 4에 표시하였으며, 고로슬래그 함유량이 증가함에 따라 일축압축강도와 유사하게 증가하는 경향을 보였다. 이는 기존 시멘트 혼합토의 실험 결과와 유사한 것으로 나타났다(Park and Lee, 2012).

3.3 7일 동안 양생한 공시체의 종류 및 일축압축강도 분석

Table 5는 7일 동안 양생한 공시체의 종류와 일축압축강도시험 결과를 정리하였다. 3일 동안 양생한 공시체를 이용한 강도시험 결과로부터 탄산칼륨과 나무젓물은 알칼리 활성화제로서의 기능이 약한 것으로 판단되어 이를 제외한 세 종류(수산화칼슘, 수산화칼륨, 수산화나트륨)의 화학약품과 한 종류(소성한 굴패각)의 천연재료로 공시체를 제작한 다음 7일 동안 양생시켰다. Fig. 4는 7일 동안 대기중 양생한 공시체의 일축압축강도시험 결과를 알칼리 활성화제 종류별로 비교하고 있다. 알칼리 활성화제 종류에 따른 일축압축강도는 3일 동안 양생한 공시체와 동일하게 굴패각, 수산화칼슘, 수산화나트륨, 수산화칼륨 순으로 높게 나타났으며, 이

Table 5. Test condition and results of 7 days-cured specimens

Test ID	Alkaline activator	Blast furnace slag ratio (%)	Dry density (g/cm ³)	Water content (%)	Unconfined compressive strength (kPa)	Axial strain at peak strength (%)	Elastic Modulus, E (MPa)
CH-1(7)	Calcium Hydroxide (Ca(OH) ₂)	4	1.56	0.80	173	0.83	37
CH-2(7)		8	1.62	1.72	572	1.08	61
CH-3(7)		12	1.64	3.00	1,041	1.41	87
CH-4(7)		16	1.66	4.65	1,502	1.79	74
SH-1(7)	Sodium Hydroxide (NaOH)	4	1.53	4.78	429	1.56	28
SH-2(7)		8	1.61	5.17	759	1.31	46
SH-3(7)		12	1.63	5.66	2,645	1.69	145
SH-4(7)		16	1.64	7.41	2,967	1.78	161
PH-1(7)	Potassium Hydroxide (KOH)	4	1.56	1.59	642	1.02	59
PH-2(7)		8	1.62	2.39	1,519	1.33	115
PH-3(7)		12	1.67	4.26	2,088	1.63	133
PH-4(7)		16	1.71	6.62	2,917	1.33	243
OS-1(7)	Oyster Shell (Ca(OH) ₂)	4	1.57	2.16	158	0.61	30
OS-2(7)		8	1.62	2.98	398	0.87	55
OS-3(7)		12	1.66	3.54	916	1.30	67
OS-4(7)		16	1.68	4.79	1,249	1.32	105

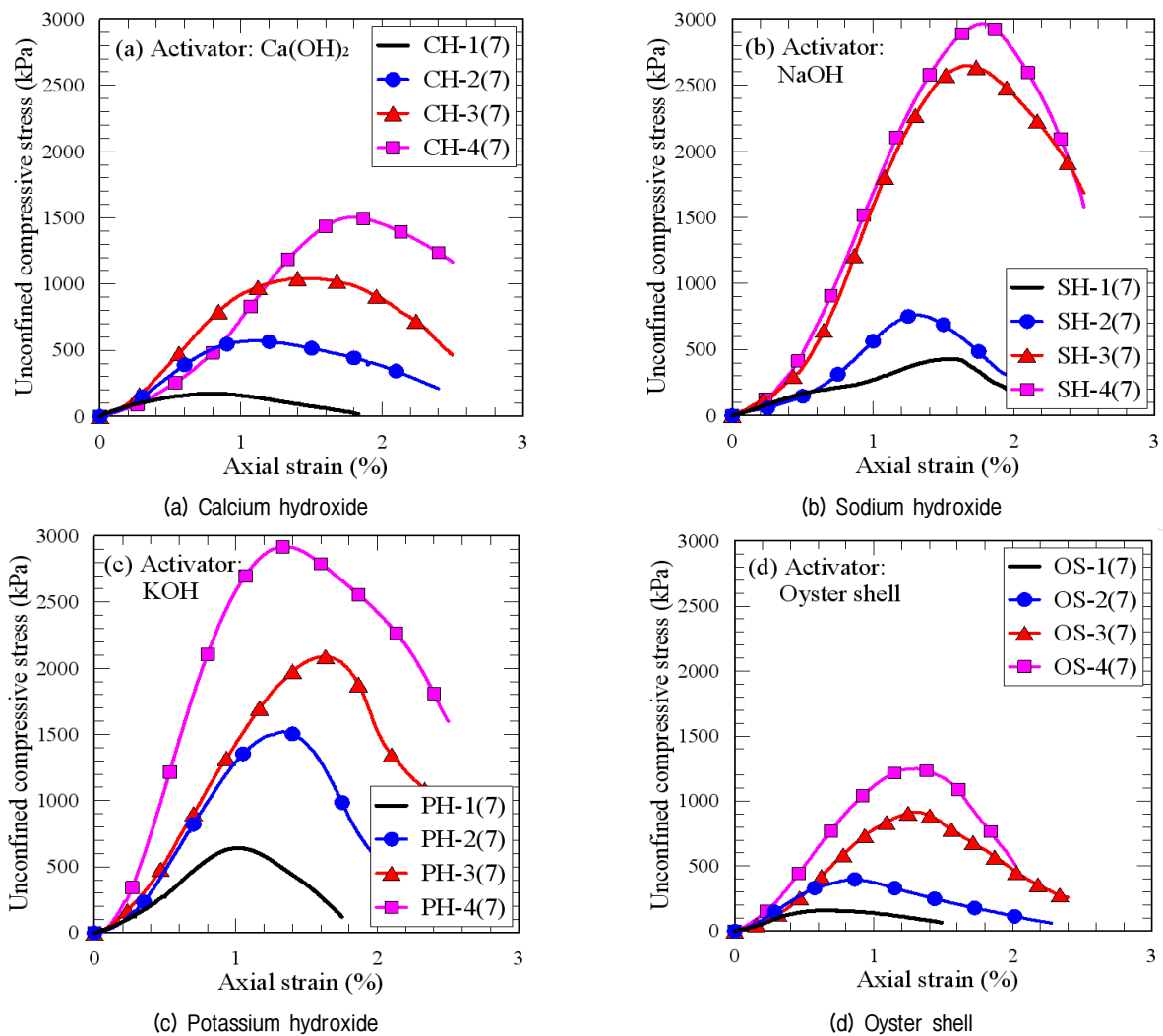


Fig. 4. Results of unconfined compression tests on 7-days cured specimens

는 앞서 설명한 바와 같이 알칼리 활성화제의 pH와 용해도 차이에 의한 것으로 판단된다. 3일 동안 양생한 공시체와 동일하게 알칼리 활성화제 종류에 관계없이 고로슬래그의 함유량이 증가할수록 공시체의 건조밀도가 증가하면서 일축압축강도와 탄성계수가 증가함을 알 수 있었다.

3.4 3일 및 7일 동안 양생한 공시체의 일축압축강도 비교

Fig. 5는 3일 및 7일 양생한 공시체에 대하여 고로슬래그 함유량에 따른 일축압축강도를 비교하고 있다. 공시체의 일축압축강도는 모든 알칼리 활성화제에 대해 고로슬래그의 양이 증가할수록 증가하였으며, 고로슬래그가 4%에서 16%로 증가함에 따라 일축압축강도는 평균 8배 정도 증가하였다. 이는 고로슬래그 양이 증가하

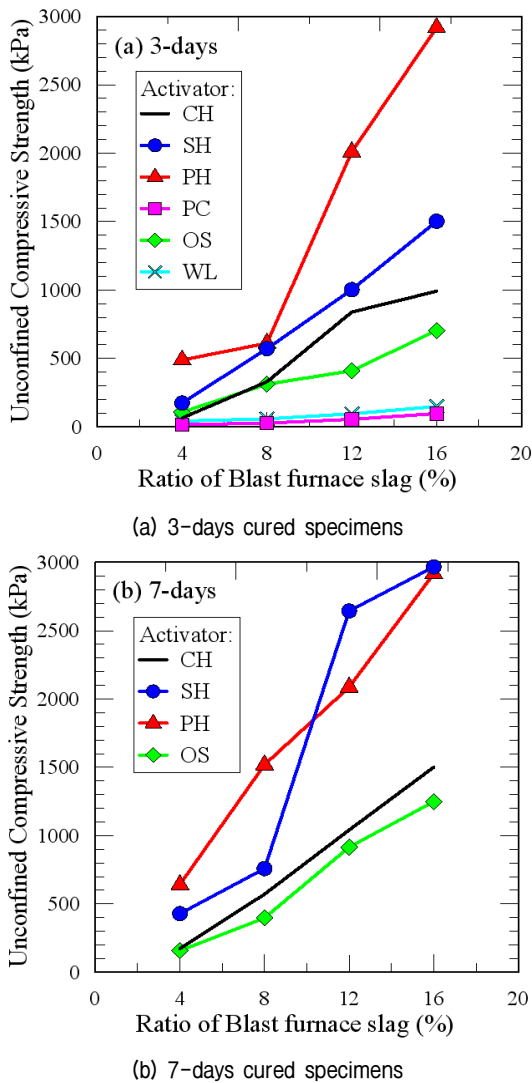


Fig. 5. Unconfined compressive strength with curing time

면서 공시체 내 C-S-H(calcium silicate hydrate, 규산 칼슘 수화물)와 같은 수화물이 더 많이 생성되면서 입자간의 고결력과 건조밀도가 증가했기 때문으로 판단된다.

Fig. 6은 동일한 알칼리 활성화제를 사용한 경우 3일 및 7일 양생한 공시체의 양생시간에 따른 강도 차이를 비교하고 있다. 그림에서 PH로 표시된 수산화칼륨의 경우에는 양생기간(3일 또는 7일)에 따른 강도 증가가 미미하였다. 이는 수산화칼륨의 pH와 용해도가 다른 알칼리 활성화제보다 높아 초기에 고로슬래그와 빠르게 반응하면서 단기간에 많은 수화물이 생성되면서 상당한 강도가 발현된 것으로 판단된다. 수산화칼륨을 제외하면 양생기간이 3일에서 7일로 증가하면서 활성화제로 수산화칼슘, 수산화나트륨, 굴패각을 사용함에 따라 일축압축강도는 각각 51, 97, 77% 정도 증가하였다.

Fig. 7은 고로슬래그를 16% 혼합한 공시체의 일축압축시험 전과 후의 공시체 모습이다. 고로슬래그 함유량이 증가함에 따라 공시체의 색깔은 크게 차이가 나지 않으나, 알칼리 활성화제 종류에 따라 다소 차이가 났다. 시멘트 고결토는 시멘트 함유량이 증가함에 따라 응력이 최대값에 도달한 이후 급작스럽게 감소하는 취성 파괴 경향을 보이지만(Park and Lee, 2012), 고로슬래그로 고결된 모래는 고로슬래그 함유량에 관계없이 최대 응력에 도달 후 서서히 감소하는 연성파괴의 경향을 보였다. 고로슬래그를 사용하여 7일 이내로 짧게 양생한 공시체를 대상으로 한 본 연구 결과에서 고로슬래그가 시멘트에 비해 조기강도 증진이 약하다는 것이(Rim et al., 2000) 이와 같은 차이를 나타낸 것으로 판단된다.

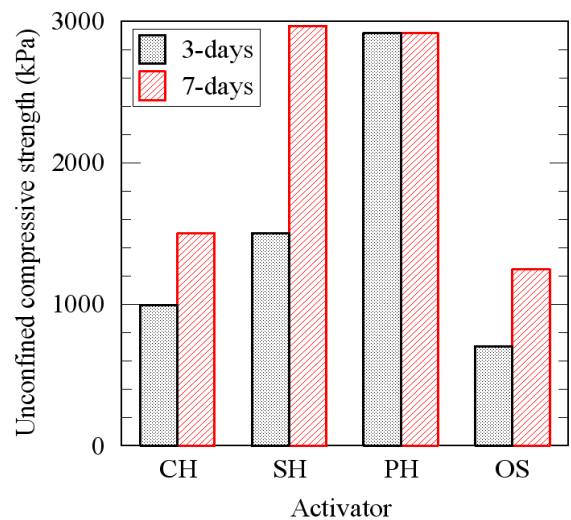


Fig. 6. Variation of unconfined compressive strength with curing period

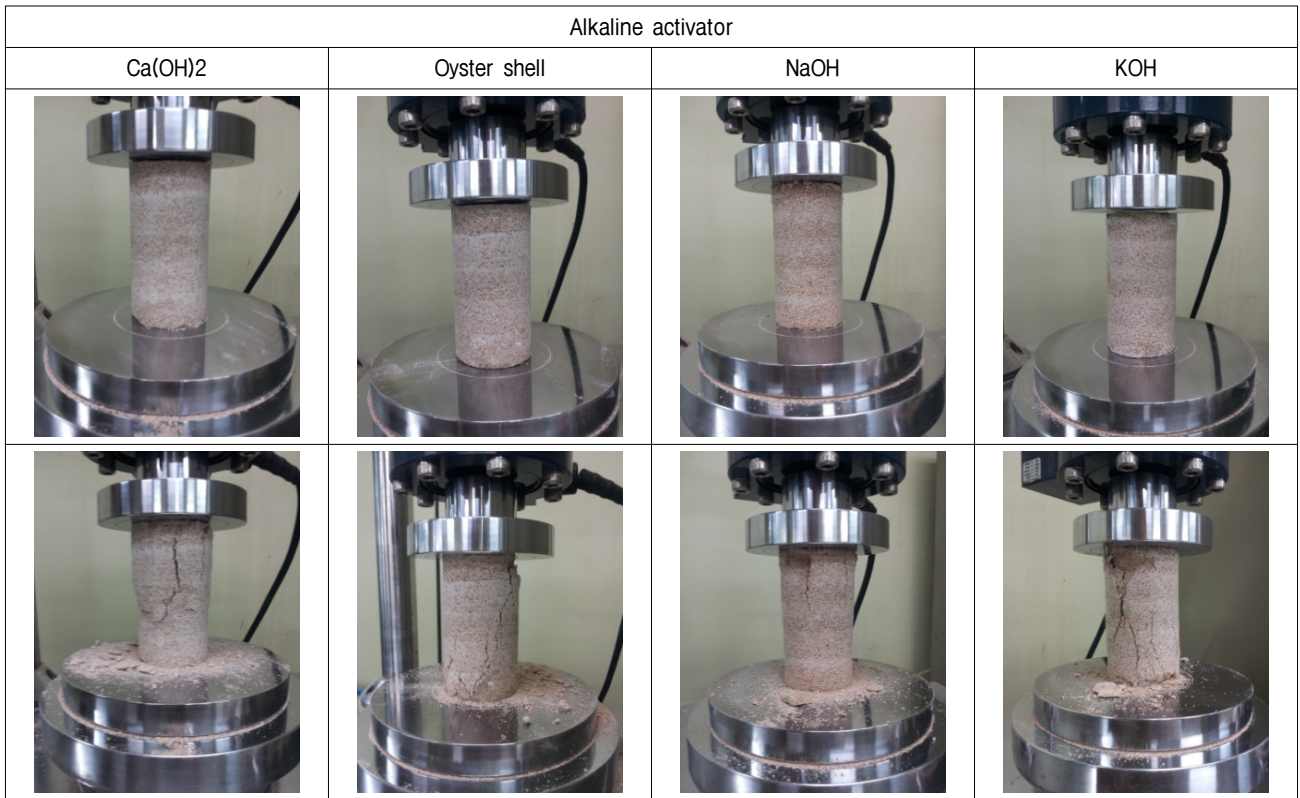


Fig. 7. Test specimens before and after testing

4. XRD 및 SEM 분석 결과

4.1 XRD 분석 결과

고로슬래그를 16% 혼합하여 3일간 양생한 공시체를 대상으로 일축압축강도시험이 완료된 후 공시체 내부에서 시료를 채취하여 XRD 분석을 실시하였다. Fig. 8은 각 시료의 XRD 분석 결과로 C는 C-S-H 수화물의 피크(peak)를 나타낸다. 고로슬래그와 알칼리 활성화제가 반응하면 시멘트의 C-S-H 수화물과 유사한 비결정질의 C-S-H 수화물이 생성되는 것으로 알려져 있다 (Lee, 2011). 수산화칼슘, 굴패각, 수산화나트륨, 수산화칼륨 모두 C-S-H 수화물의 피크가 여러 곳에서 나타났지만, 탄산칼륨은 C-S-H 수화물 피크가 단 한 곳에서만 나타났다. 이것은 탄산칼륨과 나무젓물이 고로슬래그의 경화반응을 약하게 일으켜 수화물 생성이 미미한 것으로 판단된다. XRD 분석을 통하여 수산화칼슘, 굴패각, 수산화나트륨, 수산화칼륨은 알칼리 활성화제로 활용 가능하지만, 탄산칼륨과 나무젓물은 알칼리 활성화제로 부적합한 것으로 확인되었다.

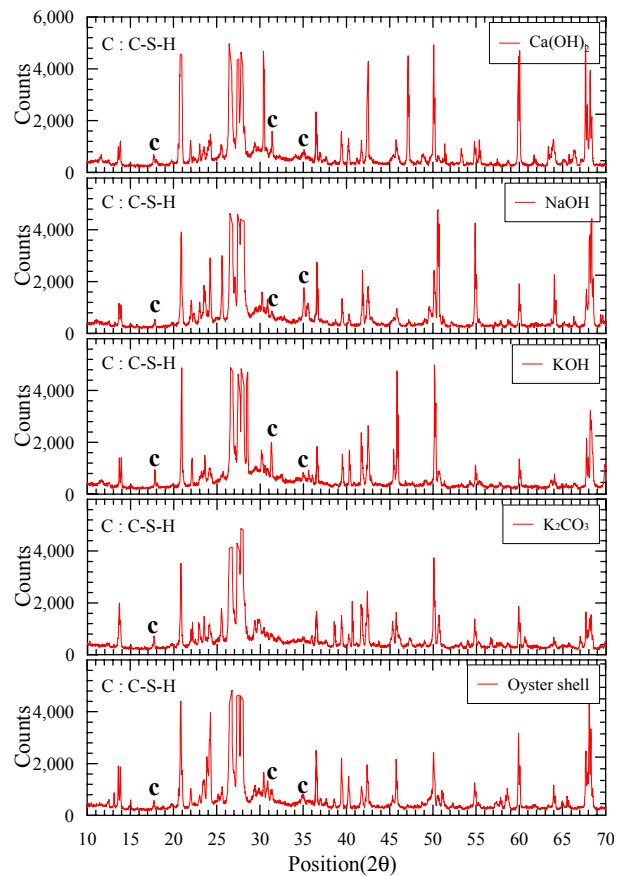
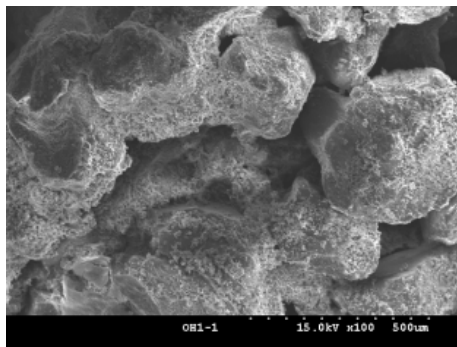


Fig. 8. Results of XRD analyses of cemented sands with blast furnace slag

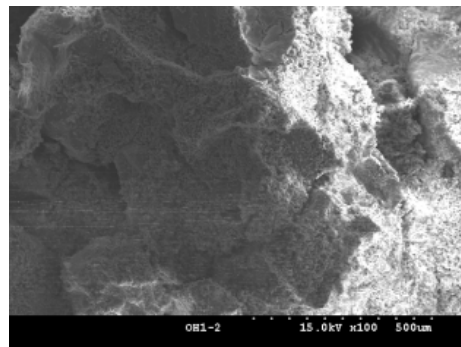
4.2 SEM 분석 결과

알칼리 활성화제 종류에 따른 고결도를 시각적으로

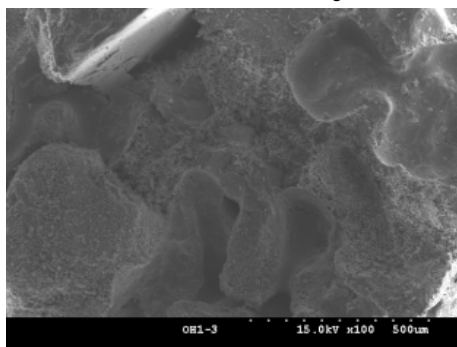
분석하기 위해 SEM 분석을 실시하였다. Fig. 9와 10은 고로슬래그를 4, 8, 12, 16% 혼합하여 3일간 양생한 공시체를 대상으로 알칼리 활성화제로 활용 가능한 수산



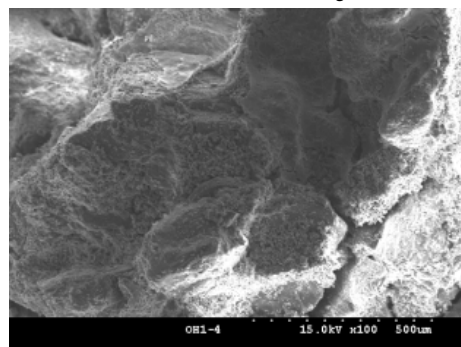
(a) 4% of blast furnace slag used



(b) 8% of blast furnace slag used

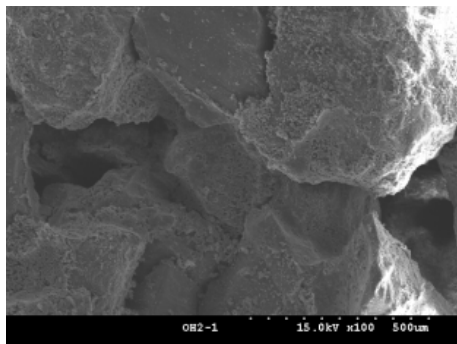


(c) 12% of blast furnace slag used

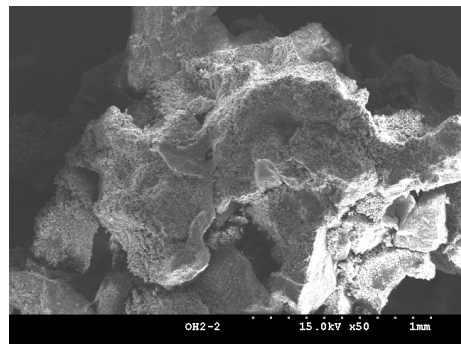


(d) 16% of blast furnace slag used

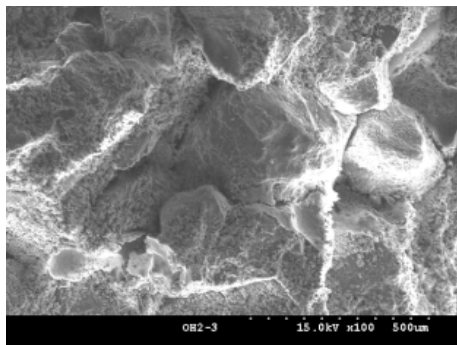
Fig. 9. SEM images of cemented sands with blast furnace slag and calcium hydroxide



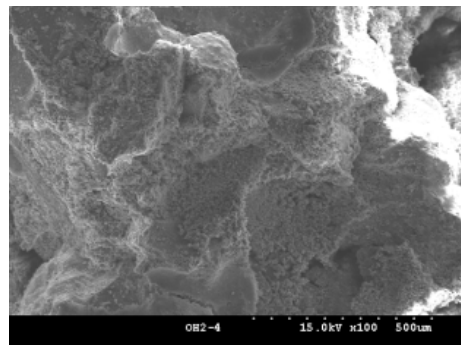
(a) 4% of blast furnace slag used



(b) 8% of blast furnace slag used



(c) 12% of blast furnace slag used



(d) 16% of blast furnace slag used

Fig. 10. SEM images of cemented sands with blast furnace slag and oyster shell

화갈슘과 굴패각의 시편을 100배의 배율로 확대한 전자현미경사진이다. 모든 알칼리 활성화제 경우에 고로슬래그의 양이 증가할수록 모래 입자 사이에 고로슬래그 경화로 생성된 수화물이 점점 증가하면서 모래 입자 주위를 에워싸는 경향을 보이고 있다. 이와 같이 고로슬래그가 알칼리 활성화제에 의해 무정형의 C-S-H 수화물을 모래 입자 사이에 생성하는 것으로 확인되었다. 그리고 수화물이 모래 입자 주위에 생성되면서 공극을 채워 입자 간의 고결력뿐 아니라 건조밀도를 증가시켰으며, 이는 일축압축강도의 증가로 이어진 것을 SEM 분석을 통하여 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 논문은 시멘트를 전혀 사용하지 않고 여러 종류의 화학약품과 친환경 재료로 만든 알칼리 활성화제를 이용하여 고로슬래그의 수화반응을 유도하여 사질토를 고결시키기 위한 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 고로슬래그로 사질토를 경화시키는 알칼리 활성화제로는 수산화칼슘, 수산화나트륨, 수산화칼륨, 굴패각이 적합하며, 탄산칼륨과 나무젓물은 부적합한 것으로 나타났다. 한편 3일 동안 양생한 공시체 중에서 알칼리 활성화제로 수산화칼륨 수용액을 사용한 경우 다른 활성화제에 비해 동일한 1몰 농도에서 pH와 용해도가 높아 높은 조기강도를 발휘하였다.
- (2) 모든 알칼리 활성화제에 대해 고로슬래그의 양이 증가할수록 일축압축강도는 증가하였다. 한편, 알칼리 활성화제로 수산화칼륨을 사용한 경우 일축압축강도가 3MPa 정도로 가장 높게 측정되었으며, 이는 초속경시멘트를 사용하여 동일한 방법으로 제작된 공시체 강도의 약 37% 정도에 해당되었다. 통상 2MPa 정도의 강도를 요구하는 연약지반 고화에 고로슬래그가 사용 가능할 것으로 판단된다.
- (3) 동일한 화학성분을 가진 알칼리 활성화제 비교에서는 수산화칼슘(화학약품)과 소성한 굴패각(천연재료)을 사용한 공시체의 일축압축강도 비교 결과 수산화칼슘을 사용한 경우가 더 높게 측정되었다.
- (4) 양생기간이 3일에서 7일로 증가함에 따라 일축압축강도는 알칼리 활성화제로 수산화칼륨을 사용한 경우를 제외하면 51 - 97% 정도 증가하였다.

- (5) 고로슬래그는 알칼리 활성화제에 의해 C-S-H 화합물을 생성하였으며, 고로슬래그의 양이 증가할수록 생성된 화합물이 모래 입자 사이 공극을 채우면서 건조밀도와 조기강도가 증가함을 XRD와 SEM 분석을 통하여 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 국토해양기술연구개발사업의 연구비지원(11기술혁신 F01)에 의해 수행되었으며, 일부는 2012학년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 공공복지안전기술개발사업 지원을 받아 수행되었으며(No. 2012-050982) 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Cho, J. C. (1998), "Improvement of the low early hydration property in the blast furnace slag cement", Ph.D Thesis, Chonnam National University.
2. Hong, G. H. and Seo, M. C. (2010), "Bond Performance Evaluation of the Eco-friendly Concrete Mixed with Hwang-toh and Blast Furnace Slag", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol.26, No.3, pp.19-26.
3. Jung, Y. B., Yang, K. H., Hwang, H. Z., and Chung, H. S. (2006), "An Evaluation of Mechanical Properties of Fresh and Hardened Concrete Mixed with Hwang-toh and Ground Granulated Blast Furnace Slag", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol.22, No.5, pp.13-20.
4. Kang, H. J., Park, J. J., Koh, K. T., and Ryu, G. S. (2009), "A study on the Improvement for Workability of Alkali-activated Slag Mortar", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers conference*, Vol.2009, No.10, pp.1386-1389.
5. Kang, H.Y., Park, S.B., and Park, S. S. (2011) "Strength Behavior and Microstructure of Alkali-activated Gypsum/Slag Cement", *Korea Solid Wastes Engineering Society*, Vol.28, No.3, pp.294-302.
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. R., Lim, S. J., Song, I. M., Yun, J. H., and Jung, S. J. (2007), "An Evaluation on Concrete incorporating blaine blast furnace slag powder adding Durability Improvement Agent", *The Korea Institute of Building Construction conference*, Vol.7, No.1, pp.147-150.
8. 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.
9. Park, S. S., Kang, H.Y., Kang, H. B., Park, S. M., Park, S. B., Sim, K. S., Moon, C. Y., Joo, K. H., Kim, H. J., and Kim, T. Y. (2010) "Development of concrete using alkaline activated Blast

- furnace”, *Spring conference of Korea Solid Wastes Engineering Society conference*, Vol.2010, pp.289-293.
10. Park, S. S. and Lee, J. W. (2012), “Effect of Sea Water on Curing and Strength of Cemented Sand”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.6, pp.71-79.
 11. Rim, C. J., Seol, G. W., Choi, H. B., Boo, C. Y., and Lee, S. G. (2000), “An Experimental Study on the Properties of High-Strength Concrete using the Blast-Furnace Slag”, *Journal of the Korea institute for structural maintenance inspection conference*, pp.147-153.
 12. Seo, H. S., Jeon, D. W., and Kim, J. J. (2005), “Caesalpinia Sappan Natural Dyeing using Camellia Ash Solution and Rice Straw Ash Solution as Mordants”, *Journal of the Korean Home Economics Association*, Vol.43, No.8, pp.1-12.
 13. Son, H. J., Noh, S. K., Kim, S. H., Han, M. C., Baek, J. H., and Han, C. G. (2008), “Properties of Shrinkage and Strength of Concrete Incorporating Blast-furnace Slag”, *Journal of the Korea Institute of Building Construction conference*, Vol.8, No.1, pp. 99-102.
 14. Yang, D. O, Park, H. K., and Go, S. S. (2008), “A Study on Physics of Blast Furnace Slag Concrete”, *Journal of the Architectural Institute of Korea conference*, Vol.28, No.1, pp. 443-446.
 15. 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.
 16. 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.

(접수일자 2012. 12. 21, 심사완료일 2013. 4. 1)