

규산소다 및 수산화칼슘을 적용한 고로슬래그 그라우트의 적용성 및 물리화학적 특성

김정식¹, 윤남식¹, 신진화², 문준호², 박영복², 김영욱^{2*}

¹지성이씨에스, ²명지대학교 토목환경공학과

Physiochemical Characteristics and its Applicable Potential of Blast Furnace Slag Grout Mixtures of Sodium Silicate and Calcium Hydroxide

Joung-Souk Kim¹, Nam-Sik Yoon¹, Zhen-Hua Xin², Jun-Ho Moon²,
Young-Bok Park², Young-Uk Kim^{2*}

¹ZiSung ECS

²Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University

요약 토목 및 건설업에서 시멘트는 대표적인 재료로써 가장 많이 쓰이며 생산되고 있다. 시멘트의 생산에 따른 이산화탄소의 배출로 인해 지구온난화 및 환경오염 문제는 오래 전부터 해결하지 못한 문제이다. 이러한 시멘트의 대체재로써 철강사업의 산업부산물인 고로슬래그를 활용하여 건설재료 및 토목재료로써 활용하기 위해 많은 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이에 대한 일환으로 이 연구에서는 고로슬래그 분말을 활용하여 친환경 그라우트의 개발 및 활용성을 위하여 물리화학적 특성을 규명하는 것을 연구목적으로 정하였다. 고로슬래그는 분말자체가 가지고 있는 잠재수경성으로 인해 시멘트 그라우트 대체 재료로 활용되며 장기강도의 증진과 내부조직의 치밀화 등이 가능하다는 장점을 가지고 있으며, 매년 대량 생산되는 산업부산물인 고로슬래그를 그라우트재료로 활용한다면 친환경성과 더불어 큰 경제성을 확보 가능하다는 장점이 있다. 그라우트재료로서 고로슬래그의 물리화학적 특성을 알아보기 위해 겔화타임 측정 실험, 일축압축강도실험과 내구성 실험, 중금속 용출시험 등을 통하여 환경성 평가실험을 진행하여 고로슬래그를 활용한 무시멘트 그라우트의 최적 배합비 및 물리적 특성에 대하여 고찰하였다.

Abstract Cement is one of the most commonly used materials in the construction and civil engineering industry. However, emissions of carbon dioxide generated during the production of cement have been linked to climate change and environment pollutants. In order to replace cement, many studies have been actively performed research to utilizing Blast Furnace Slag(BFS), which is a byproduct of the steel industry. This study aims to investigate the physiochemical properties of the BFS powder based grout to determine whether it can be used as an environment-friendly grout material. As a fine powder, BSF can be used instead of cement grout due to its potential hydraulic property. BSF has also been known for its ability to strengthen materials long-term and to densify the internal structure of concrete. In order to investigate the physicochemical properties of the BFS powder based grout as a grout material, in this study assessment tests were performed through a gel-time measurement, uniaxial compressive strength, and chemical resistance tests, and heavy-metal leaching test. Characteristics and advantages of the slag were studied by comparing slag and cement in various methods.

Keywords : Blast furnace slag, Sodium silica, Gel time, Uniaxial compressive strength, Durability

본 연구는 국토교통부 건설기술 혁신사업의 “고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발 (18SCIP-B066321-06)” 과제와 중소기업청에서 지원하는 2018년도 산학연협력 기술개발사업(No. C0566005)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

*Corresponding Author : Young-Uk Kim(Myongji Univ.)

Tel: +82-10-3153-6417 email: yukim@mju.ac.kr

Received September 27, 2018

Revised (1st October 25, 2018, 2nd November 5, 2018)

Accepted January 4, 2019

Published January 31, 2019

1. 서 론

전 세계적으로 진행되는 기후변화 및 지구온난화는 국제적인 문제로 대두되고 있다. 그중 온실효과를 일으키는 온실기체인 이산화탄소가 가장 대표적이며 인류의 산업화로 기후변화에 대한 영향은 갈수록 심화되고 있다. 온실가스에 해당하는 이산화탄소(CO_2)의 경우, 시멘트 1톤을 생산하려면 약 1톤의 CO_2 가 배출된다[1]. 우리나라는 해저터널, 항만, 고속철도 공사와 같은 대규모 기반구축 공사가 시공 또는 계획되고 있다. 아울러 터널붕락 주변지반 부등침하 구조물변위에 대한 안전사고에 대비하기 위해 많은 그라우트 시공이 진행되고 있다[2][3]. 이러한 많은 양의 시멘트 사용에 따른 CO_2 배출의 증가에 대응하기 위하여 산업부산물을 적극 활용하여 시멘트를 대체할 수 있는 건설재료를 개발하기 위한 연구가 현재 다양하고 활발하게 진행되고 있다.

그중 고로슬래그와 플라이애시와 같은 산업부산물을 이용한 자원재활용과 에너지절감을 위한 그라우트제가 주목을 받고 있다[4][5]. 이에 콘크리트 제조 시에 첨가되는 시멘트 재료를 고로슬래그와 플라이애시를 알칼리 조건에서 활성화하여 시멘트 대체용으로 사용하였다[6][7]. 플라이애시는 조건에 따라 품질의 편차가 크고 콘크리트 내구성 및 강도를 저하시킬 수 있는 요소를 포함하고 있어 사용 시 주의해야 한다[8][9]. 고로슬래그는 알칼리 활성화와 반응하여 강도를 발휘하고 콘크리트와 같은 성능을 가진다. 하지만 알칼리 자극제의 종류와 농도에 따라 pH와 다른 압축강도 및 내구성에 차이를 보인다[6][7]. 콘크리트 구조물이 해수환경 하에서 축조될 때 콘크리트 구조물은 해수 중의 황산이온 등에 의한 화학적 침식 작용으로 콘크리트 구조물의 내구성을 떨어뜨린다. 이런 문제점에 대하여 포틀랜드 시멘트에 고로슬래그 분말이나 플라이애시를 혼합하여 콘크리트 구조물의 내구성 저하를 억제하기도 하였다[10].

시멘트 대체제로서 고로슬래그의 활용은 오랫동안 개발되어져 왔지만 주로 시멘트 콘크리트 분야에서 시멘트 역할을 대체하는 연구에 집중되었다. 장기강도, 화학적 내구성 등의 많은 장점에도 불구하고 응결지연, 초기 강도 저하 등에 대한 약점이 분명하다. 하지만 지반 개량을 목적으로 하는 그라우트 대체제로서 고로슬래그의 급속한 유동성 저하 그리고 짧은 겔화는 오히려 장점이 될 수 있다.

본 연구에서는 포틀랜드 시멘트 사용 없이 고로슬래그를 활용하여 무시멘트 그라우트를 조성하여 이의 다양한 공학적 특성을 분석하였다. 알칼리성 자극제 농도에 따른 겔타임(GeL time)측정과 일축압축강도시험, 내구성, 내구성 시험 중급속 용탈시험을 통하여 차수용 그라우트제의 사용가능 최적 배합비 범위를 제안하고자 하였다.

2. 이론적 고찰

국내의 고로슬래그는 KS F 2563 표준에 의하여 규격화되었다. Table 1에서 나타낸 것과 같이 비표면적의 크기에 따라 3종류로 나뉜다. 일반적으로 고로슬래그의 비표면적이 클수록 유동성 및 강도발현성이 좋은 것으로 나타난다. 3급 고로슬래그는 일반 콘크리트용으로 사용이 가능하고, 2급 고로슬래그는 유동특성에 따라 고유동 콘크리트에의 적용이 가능하며, 1급 고로슬래그는 강도발현이 우수해 고강도 콘크리트에 적용이 가능하다. 포틀랜드 시멘트의 분말도는 2500-3000이고 4000이상이면 마이크로 시멘트로 분류된다[12]. 본 연구에서는 경제성 측면과 시멘트 비교를 위하여 3급의 고로슬래그를 사용하여 시멘트 그라우트제 대용성을 고찰하였다.

Table 1. KS of Blast Furnace Slag(BFS)

BFS	Lv3	Lv2	Lv1
Specific gravity	2.8above	2.8above	2.8above
Specific surface area (m^2/kg)	3000~5000	5000~7000	7000~10000
Activity index(%)	7D	55above	75above
	28D	75above	95above
	91D	95above	105above

고로슬래그는 pH 12이상의 알칼리성 용액 중에 노출되면 수화가 시작된다. 알칼리성 자극제가 어느 정도 소모가 되면 고로슬래그의 수화 반응은 정지하게 된다. 이와 같은 작용을 지속하기 위하여 $\text{Na}(\text{OH})$, KOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 같은 알칼리성 물질을 첨가한다. 또한 물유리라고 불리는 규산소다는 수용액중의 부동한 전하를 띤 규산콜로이드(-) 입자와 고로슬래그 입자가 혼합될 때 방전하면서 응결되는 겔화 현상이 일어난다[13]. 규산소

다는 분자식으로 $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ (n 은 Mole비)로 나타낼 수 있는데 몰비에 의해 1호부터 4호로 나뉘는데 경제성을 고려하여 범용으로 가장 많이 사용되고 있는 3호 물유리를 사용하였다. 알칼리자극제는 수화와 겔화특성을 고려하였을 Ca이온이 겔화반응을 촉진시키는 점을 고려하여 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 알칼리성 자극제로 사용하였다.

3. 실험 및 결과

고로슬래그의 잠재수경성을 유도 발현시켜 무시멘트 그라우트재로 사용하기 위하여 알칼리 활성 재료들이 혼합된 혼합물을 활용하였다. 실제 시공을 위해 규산과 물의 혼합액을 A액이라 하고 고로슬래그, 소석회, 물의 혼합액을 B액이라 정하고 설계 제원상(m^3) A액과 B액의 부피비를 1:1로 맞추었다. 현장에서 이루어지는 실제 배합비에 맞춰 A액:규산나트륨 100L(138kg)+물 100L(100kg), B액:고로슬래그+소석회 108kg(38L)+물 162kg(162L) 비율에 따라 실험 배합비를 조성하였다. 또한 B액의 고로슬래그 대비 소석회 중량비를 변화시켜 소석회 중량비를 5%에서 50%까지 구분하여 조건별 30case를 도출하여 실험을 시행하였다. 알칼리성 자극제인 소석회를 함량을 변화시키면서 겔타임 실험, 강도 실험, 내구성 실험, 중금속 용출실험을 진행하여 무시멘트 그라우트재의 물리화학적 특성을 고찰하였다.

3.1 겔타임 시험

본 실험에 따른 겔화실험에 대한 표준화된 기준과 방법은 실제현장에서 현재 수행하고 있는 겔화실험을 준수하여 진행하였다. 실험방법은 Fig. 1과 같이 두 컵에 A액과 B액을 190ml씩 넣고 충분히 믹싱을 한후 두컵의 용액을 섞기 시작해서부터 시간을 측정한다. 혼합된 용액을 한 컵에서 다른 컵으로 붓는 동작을 반복하여 일정시간이 지나면 컵안의 용액이 2초 이상 다른 컵으로 흘러내리지 않게 되며 이를 그라우트의 유동성 상실 상태로 판단하고 이 과정에 소요된 시간을 겔화시간으로 정한다. 실험의 오차를 최소화하기 위해 상온($22 \pm 2^\circ\text{C}$)에서 실험을 진행하였고 동일 조건의 실험을 2회 이상 실시하여 평균값을 취하였다. 또한 시공상 특수한 환경에 따라 급결 성능을 발현하는 배합비를 찾기 위해 물유리, 소석회, 물 등의 양을 조절하여 실험을 수행하였다.



Fig. 1. Gel time test
(a) A&B solution (b) Repetitive mixing

소석회 함량에 따른 겔타임 변화를 측정하여 결과 Fig. 2와 같이 정리하였다. 소석회의 함량이 증가할수록 겔타임은 급격히 감소하였다. 소석회 함량이 15%에서부터는 완만한 감소추세를 보였다. 소석회의 함량은 겔타임에 초기에 큰 영향을 끼치지만 한계값 15%를 초과하면 겔타임 변화에 대한 영향이 적어지는 것을 알 수 있다.

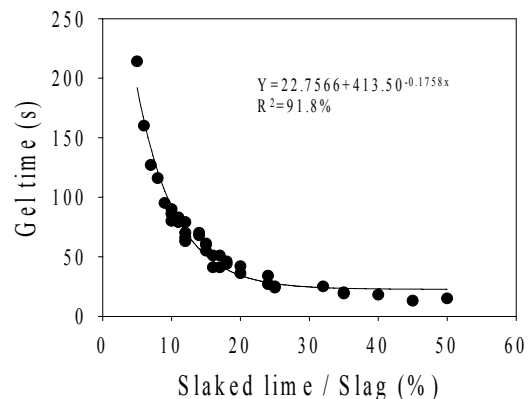


Fig. 2. Gel time with concentrate of slaked lime

다양한 배합 조건에 따라 6~15초 급결을 발현하는 배합비를 조사하여 Table 2에 정리하였다. Table 2에 보는 것과 같이 급결 배합비 검토에서 2번과 3번 조건에서 기존 A 액과 B 액의 조성이 같더라도 배합하는 용적 기준 B 액 25% 이하에 달하는 A 액을 혼합했을 때는 5~6초 이내에 겔화하는 현상을 보였다. 추가로 줄어든 A 액의 용적(75%)만큼의 물량을 B 액에 더하여 실험을 진행하였는데 약 37%의 물을 추가한 경우 4번 조건에는 여전히 양호한 겔타임을 얻었으나 75%의 물을 추가한 경우 5번 조건에는 약 2배가량 증가한 겔타임이 나타났다. 시험결과 A 액과 B 액이 혼합되는 과정에서 A 액의 양이 적어질수록 겔타임이 짧아지는 경향을 보였다. 위 결과

값을 토대로 하였을 때 3번 조건에서 겔타임이 가장 적게 나타났으며 1m³ 기준으로는 규산나트륨 48L, 소석회 33%의 고로슬래그 혼합물 316kg, 물 836L의 배합 양이라 할 수 있다.

Table 2. Rapidly hardening mixing for field

No.	A solution		B solution			Gel time(s)
	Water	Glass	Water	Slag	Ca(OH) ₂	
	(g)	(g)	(ml)	(g)	(g)	(ml)
1	54		146	72	0	172
2	20		20	60	20	177
3	12		32	60	20	177
4	20		20	60	20	251
5	30		30	60	20	311
6	12		32	60	20	177
7	20		20	20	20	261
8	16		43	66	13	243

3.2 일축 압축강도 시험

배합에 따른 일축 압축강도를 측정하였다. 실험을 위한 공시체는 Fig. 2에서 보는 것과 같이 물유리 용액 A와 고로슬래그 용액 B를 배합비에 따라 개량하여 그라우트 믹서기를 이용하여 겔화되기 전까지 충분히 반응할 수 있도록 교반하여 준비하였다. 고로슬래그 그라우트는 5×5×5cm인 큐빅몰드에 부은 후 표면을 마무리하여 양생 준비시켰다. 상온환경에서 하루 공기 중에서 양생을 시킨 후 Fig. 3에서와 같이 탈형 하여 수중 양생을 시킨다. 수중 양생 된 공시체는 만능시험기를 이용하여 일축 압축시험을 진행한다. 일축 압축강도 시험은 Fig. 4와 같이 YUL-5T모델의 일축 압축시험기에 1m/min의 재하속도로 강도 테스트하였다. 실험은 각 배합 별 다양한 강도 특성을 확인하기 위하여 3일, 7일, 28일의 강도를 측정하였고 각 조건별 강도는 3회 시행한 값의 평균으로 결정하였다.



Fig. 2. Fabrication of test specimens
(a) Specimen(A&B) (b) Grout curing

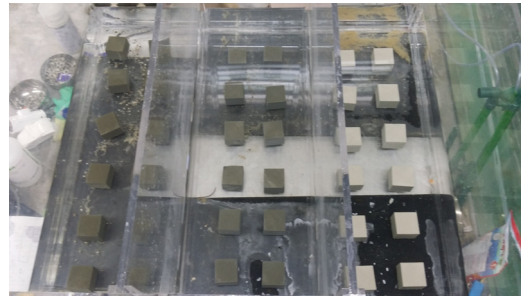


Fig. 3. Underwater curing



Fig. 4. Uniaxial compressive strength test

고로슬래그 그라우트의 소석회의 함량을 5%~50%까지 변화시켜 상온 조건에서 수중 양생을 시킨 재령 일에 따른 일축 압축강도를 Fig. 5와 같이 나타내고 Fig. 6은 Fig. 5의 일축 압축강도의 평균값을 보여주었다. 결과에 따르면 소석회의 함량이 일정하게 커지면 많을수록 강도가 증가한다. 소석회 함량이 20%~25%의 정점 값 구간을 벗어나면 각 재령 일별 강도는 감소한다. 이로부터 고로슬래그 그라우트의 최대 강도를 발현할 수 있는 배합비 또는 배합비에 따른 강도를 예측할 수 있을 것이다.

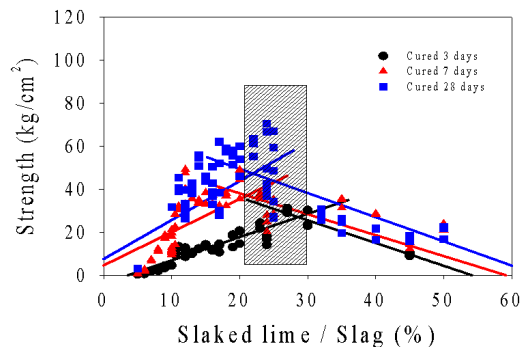


Fig. 5. Uniaxial compressive strength according to the slaked lime ratio

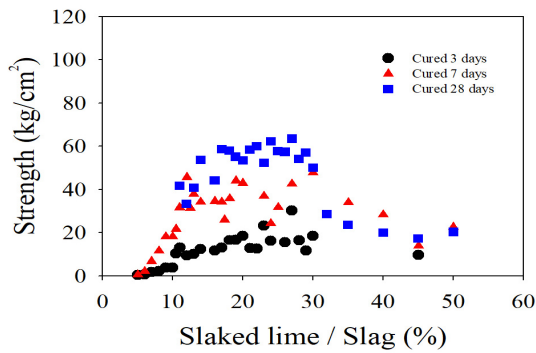


Fig. 6. Uniaxial compressive strength average according to the slaked lime ratio

3.3 내구성 시험

시간에 따른 고로슬래그 그라우트재의 내화학 저항성을 측정하기 위하여 내구성 시험을 수행하였다. 시험조건별 배합비는 Table 3에서와같이 나타냈고 현장 주입 장비 조건에 따라 A 용액과 B 용액을 같은 체적 조건으로 배합비를 맞추었다. 시멘트 용액은 현장 배합비 함수비를 150%로 하였을 때 Cement-A는 규산나트륨과 물을 각각 100L이고 Cement-B 규산나트륨 36L와 물 100L의 배합기준에 따라 실험 중량을 맞추었다. 고로슬래그의 현장 배합비는 함수비를 100% 하였을 때 BFS-A 조건의 B 용액의 소석회 함유율은 5%, BFS-B 조건의 B 용액의 소석회 함유율은 6%로 하였다. 내구성 시험용 시료공시체는 물유리(A) 액과 고로슬래그 현탁(B)액을 각각 계량하여 혼합된 그라우트 액을 큐빅몰드 (5×5×5cm)에 부은 후 윗면을 반듯하게 마무리한다. 탈형 후 공시체는 내구성 실험에 사용되는 해수의 10배에 해당하는 $MgSO_4(25g/L)$ 용액에 침수, 양생하며 부피 변화에 대하여 측정하였다[14].

Table 3. Mixing ratio by conditions of cement and BFS

Classify	G_s	Cement-A	Cement-B	BFS-A	BFS-B
A					
Na_2SiO_3	1.38	100L	36L	100L	100L
Water	1	100L	100L	100L	100L
B					
Cement	3.15	110kg	110kg	-	-
Water	1	165L	165kg	163L	162L
BFS	2.95	-	-	104L	102L
$Ca(OH)_2$	2.3	-	-	5kg	6kg

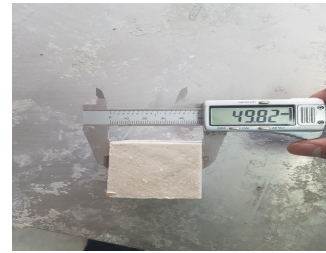


Fig. 7. Durability change test

Table 4. Durability change of Cement and BFS

Classify	Cement-A	Cement-B	BFS-A	BFS-B
Volume (cm³)				
Initial	122.5	123.75	125	123.8
1 day	-	-	-	-
	125.0	123.75	127.5	126.3
3 days	2.0%	0.0%	2.0%	2.0%
	125.0	125.0	127.5	126.3
1 week	2.0	1.0%	2.0%	2.0%
	125.0	126.25	126.3	126.3
2 weeks	1.0%	4.0%	1.9%	-1.0%
	123.8	128.78	127.5	122.5
8 weeks	×	×	126.2	120.1
	-	-	0.9%	-3.0
12 weeks	×	×	126.2	117.6
	-	-	0.9%	-4.9

양생 된 시료는 염해 수에서 양생하면서 주기적으로 부피의 변화를 고찰하였고 염해 수는 1달을 주기로 바꾸었다. Fig. 7과 같이 부피는 버니어 캘리퍼스를 이용하여 다른 위치별로 길이, 너비, 높이를 각각 2단씩 측정하여 체적변화율을 고찰하였다. 시료의 형상변화를 측정하여 결과를 정리하면 Table 4와 같다. Table 3에서 먼저 공시체 체적의 초기값을 제시하였고 주기적으로 체적을 측정하여 초기값과 비교하여 변화율을 나타냈다. 여기서 플러스 값은 체적의 팽창, 마이너스 값은 체적의 수축을 뜻한다. 전반적으로 고로슬래그 공시체가 염해 수에 잠겼을 때 부피는 팽창하는 효과를 보이다가 다시 수축하는 경향을 보인다. 시멘트와 고로슬래그 공시체의 형상을 비교한 결과 고로슬래그의 내구성이 더 우수함을 확인할 수 있다. Fig. 8과 Fig. 9로부터 시멘트로 구성된 시료는 4주 후 급격히 붕괴하는 현상을 보였다. 초기 1~2주 구간에서의 시료의 경화 작용으로 팽창되고 4~12주에서는 알칼리금속의 용탈에 의해 수축하는 것으로 판단된다. 시멘트 시료는 4주 차 이후에는 붕괴하는 현상을 보였지만 고로슬래그 공시체는 그 형태와 변화율에

있어 우수한 내구성을 보였다. 또한, 소석회 함유율이 낮은 고로슬래그 혼합용액 조건에서 체적변화율이 적게 나타났다.

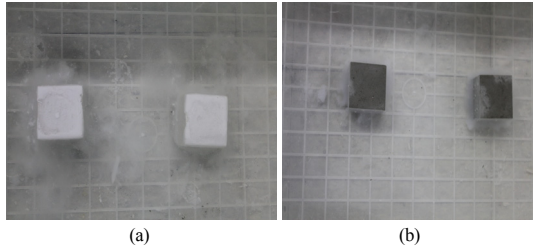


Fig. 8. Initial state of test specimen
(a) Slag specimen (b) Cement specimen

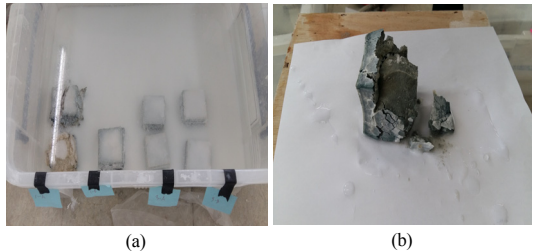


Fig. 9. After 4 weeks state of test specimen
(a) Slag specimen (b) Cement specimen

3.4 중금속 용출실험

중금속 용출실험은 친환경시험원에서 의뢰하여 진행하였으며 6가 크롬(Cr^{6+})과 카드뮴(Cd) 두 가지 중금속 성분만 대해서만 검출하였다. 시료는 검출시험 전 용탈 과정을 거친 후 강도시험 후 시편을 가지고 진행하였다. 시험은 국제 표준 시험 방법인 IEC 62321 : 2008, UV / VIS와 IEC 62321 - 5 : 2014, ICP-OES에 의하여 진행되었으며 검출한계 값인 $Cr^{6+} < 1mg/kg$, $Cd < 0.5mg/kg$ 을 넘지 않았다. Table 5로부터 주입제로서 중금속 성분이 검출되지 않았고 유해성이 없다고 판단할 수 있다.

Table 5. Heavy metal test

Component	Unit	Detection limit	Result
Cr^{6+}	mg/kg	0.5	Undetected
Cd	mg/kg	1	Undetected

4. 결론

본 연구에서는 슬래그 활용복합 그라우트재를 개발하고 이의 겔화 경화 특성을 연구, 발전시켜서 친환경적이며 우수한 그라우트 기능을 담당하도록 하였다. 아울러 다양한 배합비율의 시료에 대한 실험을 수행하여 그 성능을 평가하고 검증하였다.

1. A 액(규산+물)과 B 액(물+고로슬래그+소석회)으로 인한 혼합과정에서 알칼리자극제인 $Ca(OH)_2$ 로 인한 알칼리성 환경과 칼슘이온의 작용으로 겔타입이 짧아지는 경향을 보였다.
2. 소석회 배합비 함량을 5~50%까지 일축 압축강도 시험을 진행하여 그라우트 알칼리자극제의 최적 배합비 구간을 제시하였다. 소석회의 함량이 증가할수록 강도 값이 증가하지만 일정 구간에서 다시 감소하는 추세를 보인다. 즉, 20%~25%의 구간에서 각 재령 일별 강도가 제일 높게 발현되고 소석회 함량이 계속 증가하면 강도가 낮아진다. 이는 고로슬래그의 활용가능성 검증 자료로 사용할 수 있을 것으로 예상된다.
3. 내구성 시험결과 시멘트 시료의 경우 4주 이후 급격히 붕괴하는 현상을 보이며 형태와 체적의 변화율에 있어 고로슬래그의 내구성이 더 우수함을 확인할 수 있었다. 전반적으로 1~2주 구간에서의 팽창은 시료의 경화 작용에 따른 것으로 판단되며 4~12주 구간에서의 수축 현상은 알칼리금속의 용탈에 의한 것으로 판단된다.

References

- [1] G. Y. Kim, K. S. Shin, C. H. Lim, J. S. Nam, M. H. Kim, "Properties of Engineering and Durability Concrete with Fly-ash and Blast Furnace Slag in Normal Strength Level", Magazine of RCR, pp. 103-110, March, 2010. DOI: <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2013.28.4.058>
- [2] C. S. Hwang, "Stability Analysis of Upper Structures by Soil Grouting", Journal of the Korean of Safety, Vol.28, No.4, pp.58-65, August, 2013.
- [3] J. C. Kim, M. Sagong, "Damage and grouting reinforcement of the ground surrounding the tunnel", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol.10, No.3, pp.50-61, 2008.
- [4] G. Li, X. Zhao, "Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag", Cement & Concrete Composites, Vol.25, pp.293-299, 2003.

DOI: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00058-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00058-6)

- [5] P. S. Deb, P. Nath, P. K. Sarker, "The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature", *Materials and Design*, Vol.62, pp.32-39, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.05.001>
- [6] F. Puertas, S. Martinez-Ramirez, S. Alonso, T. Vazquez, "Alkali-activated fly ash/slag cement Strength behaviour and hydration products", *Cement and Concrete Research*, Vol.30, pp.1625-1632, 2000.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00298-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00298-2)
- [7] C. Shi, R. L. Day, "A Calorimetric Study of Early Hydration of Alkali-Slag Cements", *Cement and Concrete Research*, Vol.25, No.6, pp. 1333-1346, 1995.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00126-W](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00126-W)
- [8] S. S. Park, H. Y. Kang, S. H. Han, Y. S. Rim, D. K. Kim, S. H. Kim, "Influence of Water Glass on Strength of Fly Ash-Cements", *Journal of Korean Society of Environment Engineers*, Vol.28, No.6, pp. 661-666, June, 2006.
- [9] R. Siddique, "Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.34, pp. 487-493, 2004.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.09.002>
- [10] H. Y. Moon, S. T. Lee, H. S. Kim, "Evaluation on the Deterioration and Resistance of Cement Matrix due to Seawater Attack", *Journal of the Korean Concrete Institute*, Vol.13, No.2, pp. 175-183, April, 2001.
DOI: <https://doi.org/10.4334/JKCI.2018.30.4.383>
- [11] KS F 2563, "Ground granulated blast-furnace slag for use in concrete", 2009.
- [12] Y. B. Park, "Physio-Chemical characteristics of Slag based Zero-Cement Grout", *Myongji University Master thesis*, pp. 13-17, 2017.
- [13] H. K. Kim, Y. H. Kim, B. S. Chun, "Characteristics Strength of Silicasol-cement Grout Material for Ground Reinforcement", *Journal of Korean Geo-Environment Society*, Vol.11, No.9, pp. 47-53, 2010.
- [14] B. H. Lee, Y. H. Kim, B. S. Chun, "Environmental Impact Review and Improvement of Durability of Silicasol-cement Grout Material", *Journal of Korean Geo-Environment Society*, Vol.11, No.12, pp. 13-18, December, 2010.

김 정 석(Joung-Souk Kim)

[정회원]



- 1998년 8월 : 고려대학교 지구환경 공학과 (공학사)
- 2000년 8월 : 고려대학교 지구환경 공학과 환경 및 응용지질 (공학석사)
- 2000년 3월 ~ 2012년 4월 : (주)중앙개발 개발 및 기초사업부 근무
- 2016년 1월 ~ 현재 : (주)성이씨에스 이사

<관심분야>

기초공학, 토질역학

윤 남 식(Nam-Sik Yoon)

[정회원]



- 1988년 2월 : 고려대학교 토목환경 공학과 (공학사)
- 1996년 2월 : 중앙대학교 지반공학 (공학석사)
- 2008년 2월 : 명지대학교 지반공학 (공학박사)
- 1996년 3월 ~ 1999년 2월 : (주)세길엔지니어링 지반사업부 이사
- 1999년 3월 ~ 2002년 4월 : (주)중앙개발 기초사업부 이사
- 2002년 4월 ~ 현재 : (주)성이씨에스 대표이사

<관심분야>

기초공학, 토질역학

신 진 화(Zhen-Hua Xin)

[정회원]



- 2013년 8월 : 대련민족대학(중국) 공정관리 (공학사)
- 2013년 9월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 (석박사통합과정)

<관심분야>

환경공학, 토질역학

문 준 호(Jun Ho Moon)

[정회원]



- 2013년 3월 : 명지대학교 토목환경 공학과 (공학사)
- 2013년 3월 ~ 2015년 2월 : 명지 대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 박사과정

<관심분야>

토질역학, 지반공학

박 영 복(Young-Bok Park)

[정회원]



- 2017년 8월 : 명지대학교 토목환경 공학과 (공학석사)
- 2018년 7월 : 서신엔지니어링 지하 안전영향평가팀 주임

<관심분야>

토질역학, 사면안정

김 영 욱(Young-Uk Kim)

[종신회원]



- 1991년 2월 : 고려대학교 토목환경 공학과 (공학석사)
- 2000년 5월 : The Pennsylvania State University 토목환경공학과 (공학박사)
- 2001년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 교수

<관심분야>

토양오염 복원, 환경공학, 토질역학