

알칼리 활성화 슬래그 결합재의 강도 발현 인자에 관한 연구

A Study on the Factors Affecting the Strength of Alkali-Activated Slag Binders

황병일^{1*} · 강석표¹ · 김상준²

Byoung-Il Hwang^{1*} · Suk-Pyo Kang¹ · Sang-Jun Kim²

(Received June 1, 2018 / Revised June 18, 2018 / Accepted June 21, 2018)

In the construction industry, research on alkali activated cement using fly ash or blast furnace slag fine powder has been published in Korea and abroad as a way to reuse industrial byproducts without using cement at all and to obtain economical effects at the same time. the purpose of this paper is to evaluate the effect of the ratio and coefficient of hydration ratio and lime saturation degree on the strength of alkali activated slag cement by chemical quantitative analysis of alkali activated slag cement used in the management of existing portland cement. as a result, it was confirmed that the ratio and coefficient of hydration ratio and lime saturation are all within a certain range.

키워드 : 산업부산물, 활성 슬래그, 알칼리 활성화 슬래그 시멘트

Keywords : Industrial byproduct, Active slag, Alkali-activated cement

1. 서론

최근 녹색성장이 키워드로 부각됨에 따라 국제적으로 환경 부하 저감을 위한 노력이 활발하게 이루어지고 있다. 건설산업의 경우 건설재료의 대부분을 차지하고 있는 보통 포틀랜드 시멘트를 제조할 경우 많은 에너지를 소비하고 CO₂ 가스가 발생되어 환경 문제에 대한 주요 원인이 되고 있다. 이러한 연구의 일환으로 건설 산업에서는 시멘트를 전혀 사용하지 않고 산업부산물을 재사용하며 경제적인 효과를 동시에 얻을 수 있는 방법으로 플라이애시 또는 고로슬래그 미분말을 이용한 알칼리 활성화 무시멘트 연구가 국내외에서 활발히 이루어지고 있다(We et al, 2010; Lee et al, 2016; Han et al, 2016).

산업부산물에 대한 관심이 높아지고 있는 시점에서 고로슬래그 미분말은 이미 오래전부터 시멘트 대체 혼화재료로서 사용되고 있다. 고로슬래그 미분말을 사용한 지오폴리머 콘크리트의 경우 시공성 및 수축 등의 문제(Koh et al, 2011)가 있는 것으로 지적되

고 있으나, 상온에서도 강도 발현이 우수하여 압축강도 40~70MPa 범위의 고강도 콘크리트 제조가 가능한 것으로 보고된바 있다(Koh et al, 2010). 현재 건설 산업에서는 고로슬래그 미분말이 광범위하게 사용되고 있으며, 고로슬래그를 치환한 무시멘트에 대한 연구로서 공학적 특성 및 초기 자기수축 등 다양한 분야에서 연구되고 있다(Kim et al, 2016; Ryu et al, 2013).

석탄 화력발전소의 미분탄 연소 보일러에서 연소 후 전기집진 장치에서 포진되는 플라이애시는 시멘트 및 콘크리트 분야에서 낮은 수화열 및 뛰어난 내구성능 때문에 시멘트 대체 재료로서 다양하게 사용되고 있으며 많은 연구자들이 활발하게 연구를 진행하였다(Cho et al, 2017; Gweok et al, 2007; Jeon et al, 2018).

플라이애시는 유효한 포졸란 물질이며, 콘크리트의 내구성 향상, 환경부하의 관점에서 매우 유용한 건설재료이지만 S. Hanehara et al.(2009)의 연구 결과에 의하면, 발전소 설비의 변화, 연소온도의 저하 등에 의해 플라이애시의 품질 변동이 커지고 있다. 플라이애시의 품질 변동에 영향을 미치는 요인으로서 석

* Corresponding author E-mail: hbi0819@naver.com

¹우석대학교 건축학과 (Department of Architecture, Woosuk University, Chungcheongbuk-do, 27841, Korea)

²가천대학교 토목환경공학과 (Department of Civil & Environmental Engineering, Gachon University, Sunghnam, 13120, Korea)

탄의 종류, 연소조건 등 많은 요인이 있다. 플라이애시를 콘크리트에 사용하기 위하여 KS L 5405의 경우, SiO₂ 함량, 분말도, 밀도, 수분, 강열감량, 플로우비 및 활성화 지수 등 품질 항목을 선정하여 관리하고 있다. 이러한 KS 품질 항목 중에서 공기 투과장치에 의한 분말도를 기준으로서 플라이애시 1종(4,500cm²/g 이상), 2종(3,000cm²/g 이상), 3종(2,500cm²/g 이상) 및 4종(1,500cm²/g 이상)으로 구분하고 있다[Korean standard association, Korean Standard L 5405(fly ash), 2016].

보통 포틀랜드 시멘트의 경우 원료의 성분조정을 충분히 행하여도 천연광물을 원료로 사용하기 때문에 시멘트의 조성이나 성질은 상당한 변동을 피하기 어렵고 특성평가 또한 용이하지 않다. 보통 포틀랜드 시멘트 산업은 시멘트 제조 시 다량의 천연자원과 에너지를 소비한다는 단점을 가지고 있지만 조합 원료를 고온에서 소성하여 시멘트를 제조하므로 고용이 용이하다는 장점과 원료 조합 시 화학성분의 조정에 일정폭의 탄력성을 지니고 있어 화학적 조성이 약간 변동되어도 품질 안정에 미치는 영향이 어느 허용 범위 내에 있다는 장점이 있다(Moon 2004).

산업부산물로 제조된 알칼리 활성화슬래그 시멘트는 소성과정을 거치지 않기 때문에 기초 원료의 화학조성 범위가 불균질하여 화학적 조성이 조금만 변동되어도 강도에 큰 영향을 미칠 수 있다. 기초 원료의 화학적 조성이 변동된다면 알칼리 활성화슬래그 시멘트의 배합비율이 조정되어야 하지만 이는 제품의 품질 안정성 확보에 문제를 가져올 수 있다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는

기존 보통 포틀랜드 시멘트의 성분관리에 이용되고 있는 수경률, 석회포화도 등의 비율과 계수를 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 화학적 정량분석 결과에 적용하여 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 역학적 성능에 미치는 영향을 최소화하고 최적 화학조성 허용범위를 검토하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

산업부산물을 활용한 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 특성을 검토하고자 하는 실험계획을 Table 10에 나타내었다. 이를 위하여 결합재는 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)와 고로슬래그(BFS), 탈황석고(DG), 고칼슘 플라이애시-A타입(HFA-A), 고칼슘 플라이애시-B(HFA-B), 자극제로서 천연무수석고(AH), 소석회(HL)를 사용하였다. 실험항목으로는 재령 3일, 7일, 28일 압축강도와 품질안정성 확보를 위한 영향인자 해석을 실시하였다.

2.2 사용재료

1) 결합재

본 연구에서 사용한 보통 포틀랜드 시멘트의 물리·화학적 성질을 Table 2에 나타내었다. 보통 포틀랜드 시멘트는 국내 S사에서 시판하고 있는 비표면적 3,144cm²/g, 밀도 3.15g/cm³인 보통

Table 1. Experimental plan and mix design

Type of binder	Binder(%)							C:S	W/C (%)
	Cement	BFS	DG	HFA-A	HFA-B	AH	HL		
OPC	100	-	-	-	-	-	-	1:3	60
AAS1-1	-	80	20	-	-	-	-		
AAS1-2	-	85	15	-	-	-	-		
AAS1-3	-	90	10	-	-	-	-		
AAS1-4	-	95	5	-	-	-	-		
AAS2-1	-	70	20	10	-	-	-		
AAS2-2	-	50	20	20	-	-	-		
AAS2-3	-	60	20	30	-	-	-		
AAS2-4	-	70	20	-	10	-	-		
AAS2-5	-	50	20	-	20	-	-		
AAS2-6	-	60	20	-	30	-	-		
AAS3-1	-	80	10	-	-	5	-		
AAS3-2	-	80	10	-	-	-	5		
AAS3-3	-	80	10	-	-	-	10		

Table 2. Physical properties and chemical composition of OPC

Type of binder	Specific surface area(cm ² /g)	Density (g/cm ³)	Ig. loss	Chemical composition(%)					
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
OPC ¹⁾	3,144	3.15	1.32	21.7	5.7	3.2	63.1	2.8	2.2

1) OPC: Ordinary portland cement

Table 3. Chemical properties composition of Industrial by products

Type	Chemical composition(%)							
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
BFS ¹⁾	31.2	0.5	11.4	43.3	7.4	0.4	0.2	4.1
DG ²⁾	1.5	0.3	0.4	66.1	0.5	0.1	0.05	30.2
HFA-A ³⁾	22.5	7.8	16.4	38.2	3.9	0.8	1	7.6
HFA-B	28.4	2.4	16.5	33.4	1.7	1.2	2	4.8

1) BFS: Blast furnace slag, 2) DG: Desulfurized plaster, 3) HFA: High calcium fly ash

Table 4. Chemical properties composition of activator

Type	Chemical composition(%)							
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
AH ¹⁾	0.85	0.05	0.73	43.1	0.03	-	-	54.97
HL ²⁾	-	0.12	0.19	65.88	1.03	-	-	1.13

1) AH: Anhydrite, 2) HL: Hydrated lime

포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

알칼리 활성화 슬래그 시멘트를 구성하고 있는 산업부산물의 화학적 성분을 Table 3에 나타내었다. 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 주요성분인 SiO₂는 1.5~31.2%, Fe₂O₃는 0.3~7.8%, Al₂O₃는 0.4~16.5%, CaO는 33.4~66.1%, SO₃는 4.1~30.2%로 나타났다.

2) 자극제

알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 초기 강도 저하 문제를 해결하기 위해 사용한 자극제의 화학적 성질을 Table 4에 나타내었다.

3) 골재

본 논문에서 사용한 잔골재는 KS L 679에서 품질 규정하고 있는 ISO 표준사를 사용하였다.

2.3 실험방법

1) 압축강도

압축강도 시험은 KS L 5105 시멘트 모르타르의 압축강도 시험 방법에 따라 시험체를 제작하여 재령 3일, 7일, 28일에 압축강도를

측정하였다.

2) 품질안정성 확보를 위한 영향인자 해석

일반적으로 보통 포틀랜드 시멘트는 화학분석 결과로부터 시멘트의 성질을 추측할 수 있는 수치로서 Bogue의 계산식에서 얻어진 시멘트 화합물 조성이 가장 널리 사용되고 있다. 시멘트 제조 공장에서는 시멘트 원료의 조합관리나 시멘트 클링커의 성분관리에 이용되고 있는 수치로서 수경률, 철률, 활동계수, 석회포화도의 비율과 계수가 있다. 비율과 계수는 보통 포틀랜드 시멘트의 주요 성분 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO의 화학 분석으로부터 간단히 계산할 수 있으며, 시멘트의 물리·화학적 성질 또한 평가할 수 있다. 즉 이들 4성분의 합은 보통 포틀랜드 시멘트 화학성분의 90% 이상을 차지하며, 4성분의 비율에 따라 시멘트 강도 발현성, 수화열 화학 저항성 등 대부분의 성질이 결정되어 버리기 때문에 클링커의 제조 조건이나 품질의 판정에 있어 중요한 의미를 갖는다.

$$\text{수경률}(H.M) = \frac{CaO - 0.7 \times SO_3}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \text{석회포화도 (L.S.D)} \\ &= \frac{\text{CaO} - 0.7 \times \text{SO}_3}{2.8 \times \text{SiO}_2 + 1.2 \times \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.65 \times \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (2) \end{aligned}$$

여기서, 수경률(H,M)은 Hydraulic Modulus이며 석회포화도(L,S,D)는 Lime Saturation Degree이다.

3. 실험결과 및 분석

본 논문의 압축강도 측정 및 압축강도 영향인자 해석 결과를 Table 5에 나타내었다.

3.1 압축강도

AAS1 Type로 구성된 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 압축강도 측정 결과를 Fig. 10에 나타내었다. AAS 1Type로 구성된 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 평균 압축강도는 재령 3일에 6.9MPa, 재령 7일에 10.7MPa, 재령 28에 11.5MPa를 나타내었다. 알칼리 활성화 슬래그 시멘트와 보통 포틀랜드 시멘트의 압축강도 비를 Fig. 2에 나타내었다. 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 압축강도 비는 보통 포틀랜드 시멘트와 비교하여 AAS1-1에서 66.4%, AAS1-2에서 30.9%, AAS1-3에서 32.4%, AAS1-4에서 46.6%인 것으로 나

타났다. 또한 고로슬래그의 비율이 증가하고 탈황석고의 비율이 감소할수록 압축강도는 낮아지는 경향을 나타내었다.

AAS2 Type로 구성된 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 압축강도 측정 결과를 Fig. 30에 나타내었다. AAS 2Type로 구성된 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 평균 압축강도는 재령 3일에 6.5MPa, 재령 7일에 9.7MPa, 재령 28에 13.4MPa를 나타내었다. 알칼리 활성화 슬래그 시멘트와 보통 포틀랜드 시멘트의 압축강도 비를 Fig. 40에 나타내었다. 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 압축강도 비는 보통 포틀랜드 시멘트와 비교하여 AAS2-1에서 56.6%, AAS2-2에서 46.7%, AAS2-3에서 44.4%, AAS2-4에서 57.4%, AAS2-5에서 48.7%, AAS2-6에서 46.0%인 것으로 나타났다. 고로슬래그의 비율이 감소하고 플라이애시의 비율이 증가할수록 압축강도는 낮아지는 경향을 나타내었다. 이는 플라이애시의 비율이 증가할수록 포졸란 반응의 영향력이 커지기 때문으로 판단된다.

AAS3 Type로 구성된 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 압축강도 측정 결과를 Fig. 50에 나타내었다. AAS 3Type로 구성된 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 평균 압축강도는 재령 3일에 7.6MPa, 재령 7일에 9.5MPa, 재령 28에 10.7MPa를 나타내었다. 알칼리 활성화 슬래그 시멘트와 보통 포틀랜드 시멘트의 압축강도 비를 Fig. 60에 나타내었다. 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 압축강도 비는 보통 포틀랜드 시멘트와 비교하여 AAS3-1에서 42.5%, AAS3-2에서 40.3%, AAS3-3에서 37.0%인 것으로 나타났다.

Table 5. Experiment results

Type	Compressive strength(MPa)			Obtained evaluation modulus			
	3Day	7Day	28Day	H.M	L.S.D	CaO/SiO ₂	CaO+Al ₂ O ₃ +SO ₃ /SiO ₂
OPC	17.9	23.9	26.8	2.219	0.956	3.100	3.437
AAS1-1	8.42	14.7	17.8	1.184	0.504	1.895	2.628
AAS1-2	7.18	8.21	8.29	1.112	0.473	1.747	2.411
AAS1-3	6.70	8.59	7.58	1.048	0.446	1.615	2.217
AAS1-4	5.39	11.3	12.5	0.990	0.421	1.496	2.043
AAS2-1	6.59	10.5	15.1	1.218	0.518	1.966	2.733
AAS2-2	5.61	9.34	12.5	1.264	0.538	2.061	2.872
AAS2-3	5.07	7.41	11.9	1.085	0.501	2.045	2.976
AAS2-4	7.38	9.73	15.4	1.140	0.491	1.876	2.641
AAS2-5	7.27	11.0	13.0	1.098	0.479	1.857	2.654
AAS2-6	7.35	10.1	12.3	1.056	0.467	1.838	2.668
AAS3-1	7.86	10.9	11.4	1.070	0.455	1.808	2.643
AAS3-2	7.74	9.47	10.8	1.159	0.493	1.857	2.585
AAS3-3	7.44	8.26	9.93	1.248	0.531	1.905	2.526

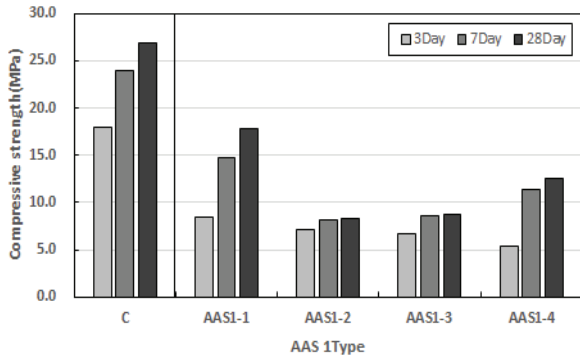


Fig. 1. Compressive strength AAS 1Type

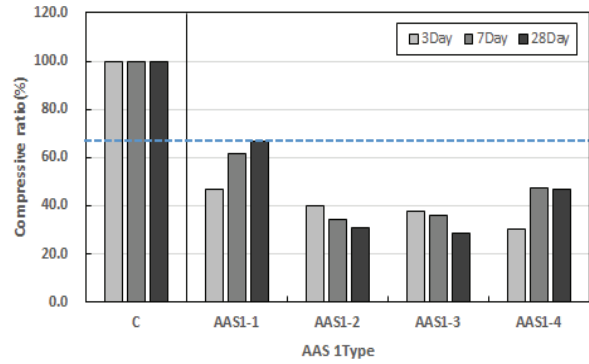


Fig. 2. Relative compressive strength ratio AAS 1Type

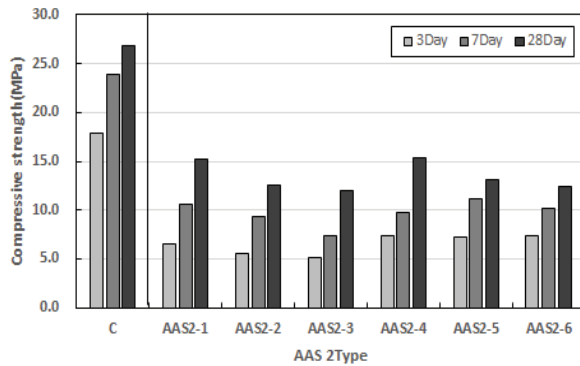


Fig. 3. Compressive strength AAS 2Type

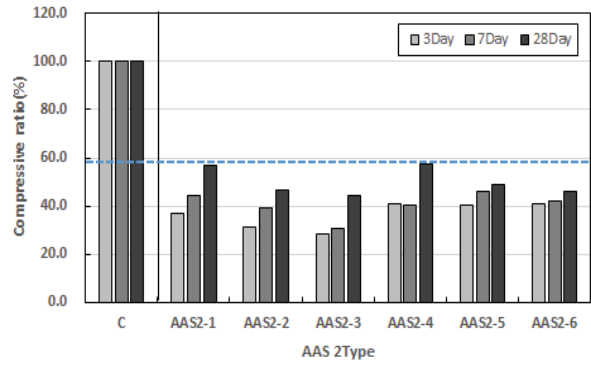


Fig. 4. Relative compressive strength ratio AAS 2Type

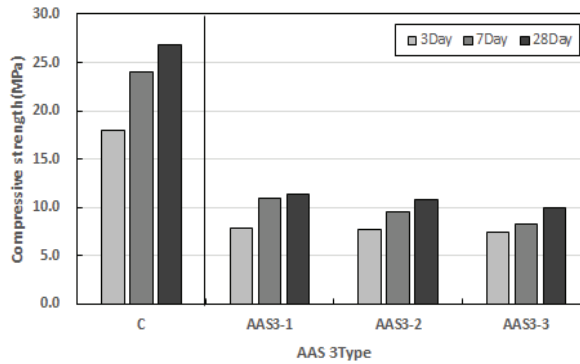


Fig. 5. Compressive strength AAS 3Type

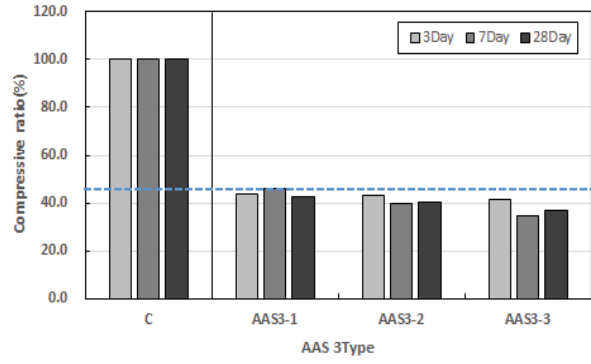


Fig. 6. Relative compressive strength ratio AAS 3Type

3.2 영향인자 해석 결과

산업부산물로 제조된 활성 슬래그 바인더를 활용한 알칼리 활성화 슬래그 시멘트 모르타르의 영향인자 해석 결과를 Fig. 7~10에 나타내었다.

3.2.1 수경률

알칼리 활성화 슬래그 시멘트 모르타르의 수경률과 압축강도 발현 비의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. 수경률은 염기성 성분 CaO

의 산성성분 $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ 에 대한 비율을 나타낸 것으로 일반적으로 보통 포틀랜드 시멘트의 비율·계수 중에서 가장 중요한 수치이다. 기존 연구 결과에서는 보통 포틀랜드 시멘트의 H.M이 큰 클링커일수록 CaO 함유량이 많아 C_3S 가 많이 생성될 것이므로 단기강도가 높고 수화열이 큰 시멘트가 된다고 보고하였다(Moon, 2004). 그러나 산성성분에 대해 CaO가 많이 존재하면 클링커 내의 유리 CaO가 남게 되어 시멘트로서 바람직하지 않기 때문에 H.M의 상한은 2.2~2.4 범위로 보고하였다.

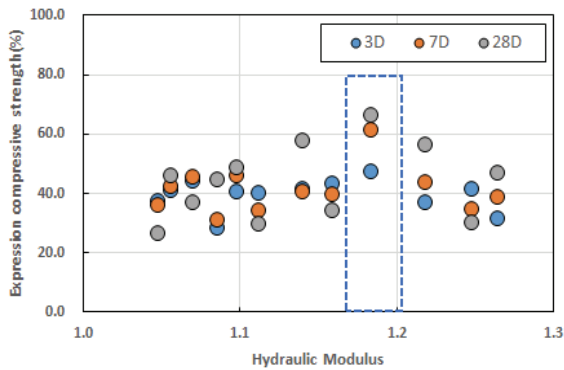


Fig. 7. Hydraulic modulus and expression compressive strength

기존 연구 결과의 경우 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 적정 H.M은 0.79~0.81 범위에 존재하는 것으로 보고하였으나 본 논문에서는 1.15~1.18 범위로 나타났다. 이는 소성과정을 거치지 않은 상태의 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 염기성 성분과 산성성분이 일정비율로 반응하는 CaO가 $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ 에 영향을 끼쳐 상이하게 나타난 것으로 판단된다. 본 논문에서 제시한 적정 H.M은 재령 3일, 재령 7일 재령 28일에서 1.15~1.18 범위 내에 존재하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 보통 포틀랜드 시멘트의 조합관리에 사용되고 있는 H.M을 알칼리 활성화 슬래그 시멘트 조합관리에 적용한다면 이용이 가능할 것으로 판단된다.

3.2.2 석회포화도

알칼리 활성화 슬래그 시멘트 모르타르의 석회포화도와 압축강도 발현 비의 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 석회포화도는 산성성분 $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ 와 결합할 수 있는 최대 CaO양을 의미한다. 보통 포틀랜드 시멘트의 석회포화도는 Table 5에 나타난 바와 같이 1.0에 가깝게 나타나고 있으나 알칼리 활성화 슬래그 시멘트 모르타르의 경우 0.48~0.51의 범위로 보통 포틀랜드 시멘트와 비교하여 약 50% 낮은 값을 나타내었다. 알칼리 활성화 슬래그 시멘트 모르타르의 L.S.D가 보통 포틀랜드 시멘트와 비교하여 약 50% 낮게 측정되었으나 보통 포틀랜드 시멘트보다 CaO 결합능력이 낮은 것을 나타내는 지표는 아니다. 그러나 0.48~0.51 범위를 벗어나는 경우 압축강도가 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 알칼리 활성화 슬래그 시멘트 모르타르의 L.S.D를 H.M과 유사한 개념으로 생각하여 본다면 CaO의 $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ 에 대한 비율은 최적구간이 존재한다는 것을 확인할 수 있다. 최적 압축강도를 발현하는 알칼리 활성화 슬래그 시멘트 모르타르의 L.S.D는 0.48~0.51 범위 내에 존재하고 있다는 점에서 하나의 계수로 인식하여

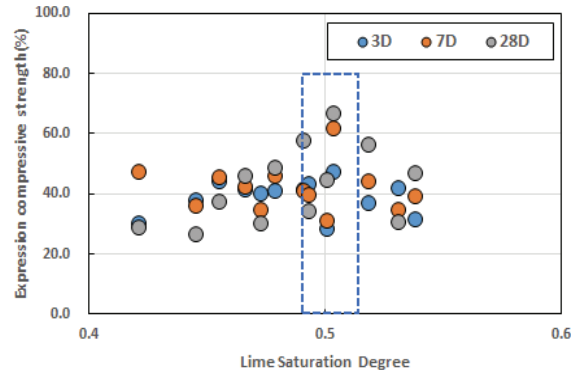


Fig. 8. Lime saturation degree and expression compressive strength

알칼리 활성화 슬래그 시멘트 모르타르의 조합 관리에 이용한다면 0.48~0.51의 범위 내로 원료조합이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 이에 대한 알칼리 활성화 슬래그 시멘트 모르타르의 조합 관리에 대해서는 향후 훨씬 많은 변수를 가진 다양한 조합 실험이 이루어져야 한다고 판단된다.

3.2.3 CaO/SiO₂

알칼리 활성화 슬래그 시멘트 모르타르의 CaO/SiO₂와 압축강도 발현 비의 관계를 Fig. 9에 나타내었다. 기존 연구 결과에서는 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 적정 CaO/SiO₂는 1.26~1.28 범위에 존재하는 것으로 보고하였으나 본 논문에서는 1.83~1.85 범위로 나타났다(Moon 2004). 이는 최적 강도 구간을 결정하는 SiO₂가 고로슬래그 미분말 이외 자극제에 포함되어 있어 큰 영향을 받지 않으나 CaO의 경우 석회류에 포함된 CaO 성분을 포함하기 때문에 최적 강도 구간이 상이하게 나타난 것으로 판단된다.

3.2.4 CaO+Al₂O₃+SO₃/SiO₂

일반적으로 KS 및 JIS 규격에서 채택하고 있는 CaO+Al₂O₃+MgO/SiO₂의 비율은 GBFS 염기도식에 MgO를 대신하여 SO₃의 양을 대입한 것이다. 우리나라에서 배출되는 BFS 및 MgO의 함량은 독일, 미국과 비교하여 함량이 적다. 또한 고로에서 용융상태로 배출되기 때문에 MgO에 의한 체적 불안정성 및 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 MgO의 함량은 고려하지 않는다. 알칼리 활성화 슬래그 시멘트 모르타르의 CaO+Al₂O₃+SO₃/SiO₂와 압축강도 발현 비의 관계를 Fig. 10에 나타내었다. 기존 연구 결과에서는 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 적정 CaO+Al₂O₃+SO₃/SiO₂ 구간은 1.86~1.90 범위에 존재하는 것으로 보고하였으나 본 논문에서는 2.61~2.62 범위로 나타났다(Moon 2004).

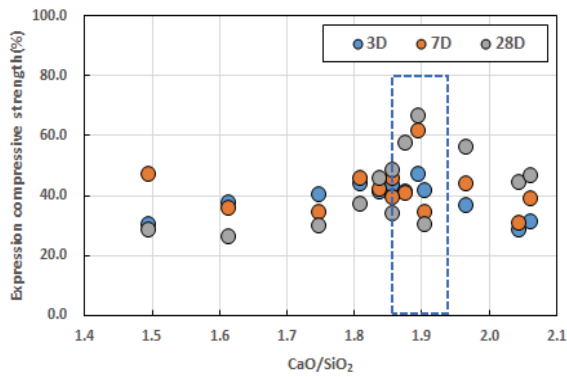


Fig. 9. CaO/SiO₂ and Expression compressive strength

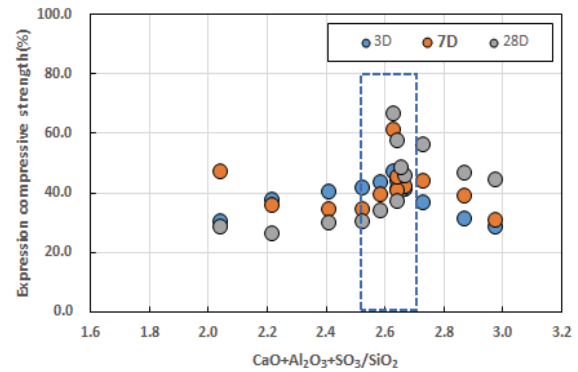


Fig. 10. CaO+Al₂O₃+SO₃/SiO₂ and Expression compressive strength

4. 결론

산업부산물로 제조된 활성 슬래그 바인더를 활용한 알칼리 활성화 슬래그 시멘트 모르타르의 압축강도, 품질안정성 확보를 위한 영향인자 해석에 대하여 검토한 결과는 다음과 같다.

1. 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 압축강도 측정 결과 보통 포틀랜드 시멘트의 압축강도와 비교하여 AAS1 Type에서 압축강도 발현 비율이 66.4%로 가장 우수하게 나타났으며, AAS2 Type에서 57.4%, AAS3 Type에서 42.5%로 나타났다.
2. 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 화학적 성분 분석 결과 SiO₂는 평균 14.0%, Al₂O₃는 평균 7.6%, CaO는 평균 48.1%, SO₃는 평균 17.1%로 나타났으며 이들의 양비가 소량 변화함에 따라 압축강도에 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다.
3. 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 주요성분인 CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, SO₃의 상호관계를 파악하여 수경률(H,M) 석회포화도(L,S,D) CaO/SiO₂ 및 CaO+Al₂O₃+SO₃/SiO₂ 등의 비율 및 계수를 이용하여 최적의 압축강도를 발현하는 구간을 검토한 결과 이들 모두 일정범위 내에 존재하고 있음을 확인할 수 있었다.
4. 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 조합 관리에 대해서는 향후 많은 변수를 가진 다양한 조합 실험이 이루어져야 한다고 판단된다.
5. 알칼리 활성화 슬래그 시멘트 조합관리에 이용할 경우 원료 배합물의 비율을 일정 범위내로 조정한다면 큰 품질 편차를 보이지 않아 품질 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업(16CTAP-

C115206-01), (18CTAP-C142091-01)의 연구비지원 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Cho, Y.K., Kim, H., Kim, Y.A. (2017). Effect of the fineness of fly ash on the compressive strength, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **5(3)**, 313-319 [in Korean].
- Gweok, G.H., Jee, N.Y., Yoon, S.C. (2007). The experimental study on the practical use of secondary product of concrete contained alkali-activated slag, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, **23(1)**, 121-128 [in Korean].
- Han, C.G., Lee, D.Y. (2016). Quality of high volume blast furnace slag mortar depending on desulfurization gypsum treating methods and fine aggregate type, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **4(2)**, 157-164 [in Korean].
- Hanehara, S., Asano, S., Yamamoto, T., Nozaki, T. (2009). Characters of recent 16 fly ashes and their compressive strength of fly ash cement, Cement Science and Concrete Technology, **63**, 120-126.
- Jeon, B.H., Kim, H.S., Lee, S.H. (2018). A study on the evaluation of the carbonation resistance and properties ternary blended concrete according to replacement ratio of blast furnace slag and fly ash, Journal of the Korea Concrete Institute, **30(1)**, 23-30 [in Korean].
- Kim, J.H., Park, B.S., Jung, S.H., Choi, Y.C. (2016). Effect of properties of fly-ashes on the characteristics of fly-ash mortars, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **4(4)**, 439-445 [in Korean].
- Koh, K.T., Ryu, G.S., Lee, J.H., Kang, H.J., Jeon, Y.S. (2011). Flowability and compressive strength of cementless alkali-

- activated mortar using blast furnace slag, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **6(1)**, 63–71 [in Korean].
- Koh, K.T., Ryu, G.S., Lee, J.H. (2010). Properties of the flowability and strength of cementless alkali-activated mortar using the mixed fly ash and ground granulated blast-furnace slag, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **5(4)**, 114–121 [in Korean].
- Korean Standard Association. (2016). Korean Standard L 5405 Fly ash.
- Lee, H.J., Suh, J.I., Yoo, S.W. (2016). Bond behavior of concrete according to replacement ratio of fly ash and compressive strength of concrete, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **4(1)**, 19–24 [in Korean].
- Moon, K.J. (2004). Properties of Non-Sintered Cement and Concrete Recycled with Industrial Waste, Ph.D Thesis, Chonbuk National University.
- Ryu, G.S., Koh, K.T., Lee, J.H. (2013). Strength development and durability of geopolymer mortar using the combined fly ash and blast-furnace slag, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **1(1)**, 35–41 [in Korean].
- We, J.W., KiM, S.H., Kim, S.H., Ji, S.W., Choi, S.K., Seo, C.H. (2010). An experimental study on lightweight aggregate blast furnace slag concrete by alkali-activated reaction, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, **26(9)**, 87–94 [in Korean].

알칼리 활성화 슬래그 결합재의 강도 발현 인자에 관한 연구

건설 산업분야에서는 시멘트를 전혀 사용하지 않고 플라이애쉬 또는 고로 슬래그 미분말을 이용한 알칼리 활성화 시멘트에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 논문에서는 보통 포틀랜드 시멘트 관리에 사용되는 화학적 정량 분석을 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 화학적 정량분석 결과에 적용하여 알칼리활성화 슬래그 시멘트의 역학적 성능에 미치는 영향을 최소화 하고 최적 화학 조성 허용범위를 검토하고자 하였다. 그 결과 수경율 및 석회포화도의 비율 및 계수는 모두 일정한 범위 내에 있음이 확인되었다.