

산업부산물을 사용한 저탄소 무기결합재의 조건별 강도특성

Strength Properties According to the Conditions of Low Carbon Inorganic Composite Using Industrial By-product

이 윤 성 이 상 수* 송 하 영

Lee, Yun-Seong Lee, Sang-Soo* Song, Ha-Young

Department of Architectural Engineering, Hanbat National University, Yuseong-Gu, Daejeon, 305-730, Korea

Abstract

The purpose of this study is to examine the potential for reducing the environmental load and CO₂ gas when cement is produced by using cement substitutes. These substitutes consisted of blast furnace slag, red mud and silica fume, which were industrial by-products. The most optimum mix was derived when alkali accelerator was added to low carbon inorganic composite mixed with industrial by-product at room temperature. It is determined that hardened properties and the results of compressive strength tests changed based on CaO content, Si/Al, the mixing ratio and the amount of alkali accelerator, curing conditions and W/B. The results of test analysis suggest that the optimum mix of low carbon inorganic composite is CaO content 30%, Si/Al 4, the mixed ratio of alkali accelerator (NaOH:Na₂SiO₃) 50g:50g, the amount of alkali accelerator 100g and W/B 31%. In addition, if contraction is complemented, low carbon inorganic composite with superior performance could be developed.

Keywords : low carbon, inorganic composite, alkali accelerator, optimum mix

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

2005년 스위스 다보스에서 열린 세계경제포럼에서 발표된 환경지속성 평가에 따르면 우리나라는 146개국 중 122위, OECD 29개국 중 29위였으며, GDP 대비 에너지 소비량과 재생에너지 비율로 결정되는 생태 효율성은 119위로 최하위권인 것으로 확인되었다. 특히 우리나라의 2004년 온실가스 배출량은 Table 1에 나타낸 바와 같이 1990년 대비 90.4%가 증가한 5억 9천만톤이며, 에너지 부분이 전체의 83.4%로 가장 큰 비중을 차지하고 있고, 시멘트 산업의 온실가스 배출량은 국내 산업 총 배출량(2004년 기준 2만

650만톤)의 18.9%(3,900만톤)로 철강 산업에 이어 두 번째로 많은 CO₂가스를 배출하고 있다. 또한 생산과정에서 시멘트 1톤당 중유 100ℓ, 전력 120kwh를 소비하여 에너지 사용량이 다른 산업분야에 비해 매우 큰 에너지 소비 업종이라 할 수 있다[1].

정부는 현재의 지구 온난화 상황을 위기이자 기회로 인식하여 '저탄소 녹색성장' 정책을 향후 60년 국가발전 전략으로 설정하였으며, 범부처 차원의 추진체계 마련 및 기후변화 대응전략 수립·시행을 통해 범정부 대응기반구축을 추구하고 있다. 이에 따라 건설업계에서도 시멘트 생산시 배출되는 CO₂ 발생을 저감시키는 노력이 지속되고 있는 실정이다. 즉 CO₂ 배출량 감소 및 환경오염 해소 문제를 해결할 수 있는 방법으로, 산업부산물인 고로슬래그, 플라이애시, 실리카 흙, 레드머드 등의 광물질 혼화재를 시멘트 대체재로 다량 사용하는 방안이 검토되어지고 있다[2].

이에 본 연구의 목적은 Figure 1과 같으며 산업부산물인 고로슬래그, 실리카 흙, 레드머드 등을 사용하여 콘크리트의 혼화재가 아닌 시멘트 패널에서의 시멘트 대체재로 사용

Received : August 26, 2011

Revision received : November 25, 2011

Accepted : November 30, 2011

* Corresponding author : Lee, Sang-Soo

[Tel: 82-42-821-1635, E-mail: sslee@hanbat.ac.kr]

©2012 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

하여, 시멘트 제조시 사용되는 에너지와 배출되는 CO₂가스 및 산업부산물의 매립에 따른 환경부하를 저감하고자 하였다. 또한 고로슬래그, 실리카 흙, 레드머드 등 단점을 상호 보완하여 알칼리 자극제만으로 고온의 소성과정없이 상온에서 제조 가능한 무시멘트계 저탄소 무기결합재를 제조하기 위한 최적배합을 도출하고자 하였다[3,4,5].

Table 1. Carbon emission present condition and prospect in Korea

(Unit : million tons CO₂)

	1990	2000	2004	2010	2020
Energy	247.7	438.5	490.2	567.6	676.1
Industry	19.9	58.33	69.4	53.4	74.2
Waste	25.5	15.6	15.1	19.0	27.0
Agro-livestock	17.5	16.2	15.9	14.0	14.0
Total emission	310.6	528.63	590.6	654	791.3

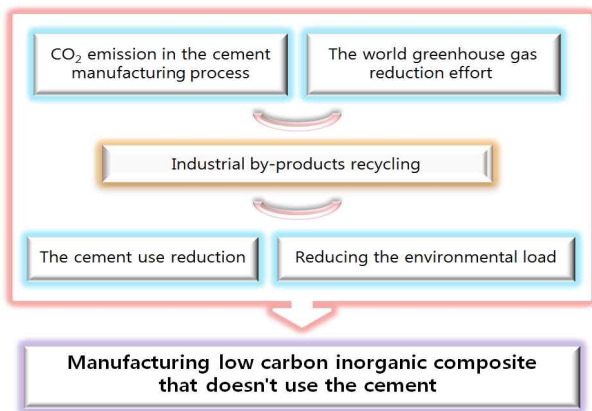


Figure 1. Purpose of the study

1.2 국내·외 연구 동향

국외의 경우 플라이애쉬 및 기타 폐기물을 활용한 무기계 결합재에 대한 연구는 1960년대부터 시작되었으며, 제품으로 판매할 수 있는 수준의 무기계 결합재는 1980년대부터 생산되었으나, 아직까지는 시멘트를 대체하여 사용되지 않고 있다. 국내에서는 1990년대 슬러지 및 고로슬래그와 물 유리를 이용한 경화재 관련 특허를 시작으로 연구가 활발히 진행되고 있으며[6], 기존 연구에서는 고로슬래그와 플라이애시를 단독으로 사용하여 알칼리 자극제에 대한 반응성 및 경화에 대한 연구가 주를 이루었으나[7,8], 본 연구에서는 기존의 고로슬래그 베이스에 산업부산물인 레드머드, 실리카 흙 등을 사용하여 3성분계 무기결합재에 대해 연구하고자 하였다.

1.3 연구의 방법 및 범위

기초실험으로 고로슬래그, 실리카 흙, 레드머드 등을 각각 사용하여 5가지 알칼리 자극제와의 반응성을 확인하였으며, 기초실험을 바탕으로, 본 실험에서는 저탄소 무기결합재의 CaO 함유량 및 Si/Al 변화와 알칼리 자극제 비율 및 양 변화에 따른 강도특성을 확인하여 최적배합을 도출하였다. 또한 양생조건 및 W/B 변화에 따른 공시체의 경화성상 및 강도특성을 분석하여 2차 제품 제작 및 시공가능성을 검토하였다[9].

2. 기초실험계획 및 분석

2.1 기초실험계획

본 연구의 기초실험으로서 각각의 산업부산물과 알칼리 자극제를 사용하여 경화성상을 확인하고자 하였으며, 실험 요인 및 수준은 Table 2와 같이 설정하였다.

무기결합재 종류에 따른 알칼리 자극제의 영향을 알아보기 위하여 콘크리트 혼화재로 사용하고 있는 산업부산물인 고로슬래그(Blast Furnace Slag), 레드머드(Red Mud), 실리카 흙(Silica Fume) 3수준으로 설정하였으며, 알칼리 자극제의 종류로는 액상의 NaOH, Na₂SiO₃, K₂SiO₃ 규상의 Na₂SO₄, Na₂CO₃ 등의 5수준으로 설정하였다.

Table 2. Basic experimental plan

Experimental factor	Experimental level	
Inorganic composite	· Blast Furnace Slag	3
	· Red Mud	
	· Silica Fume	
Alkali accelerator	· NaOH, Na ₂ SiO ₃ , K ₂ SiO ₃ (Liquid)	5
	· Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃ (Solid)	
Alkali accelerator addition	· 1, 3, 5, 7, 10(%)	5
Test item	· Setting time	1

2.2 기초실험분석

알칼리 자극제의 첨가율에 따른 무기결합재의 경화성상을 확인하기 위하여 알칼리 자극제의 첨가율을 1, 3, 5, 7, 10% 등의 5수준으로 설정하여 경화성상을 확인한 결과는 Figure 2와 Table 3과 같다. 고로슬래그의 경우 모든 알칼리 자극제에서 경화가 되었으나, 실리카 흙의 경우 모든 알칼리 자극제에서 고로슬래그에 비해 경화가 늦게 진행되었다. 한편 레드머드의 경우 NaOH와 Na₂SiO₃ 2수준의 알칼

리 자극제에서만 경화가 되었다. 이는 레드머드를 구성하는 성분중 SiO₂가 부족하여, Na₂SiO₃이 SiO₂를 보충하였으며, 레드머드를 구성하는 성분중 Na₂O가 활성화 되어 이러한 결과가 나타난 것으로 판단된다. 따라서 본 실험에서는 고로슬래그, 실리카 흙, 레드머드 등을 혼합한 저탄소 무기결합재에 NaOH와 Na₂SiO₃를 혼합하여 만든 액상의 알칼리 자극제를 사용하여 저탄소 무기결합재의 최적배합을 도출하기 위한 실험을 계획하였다.

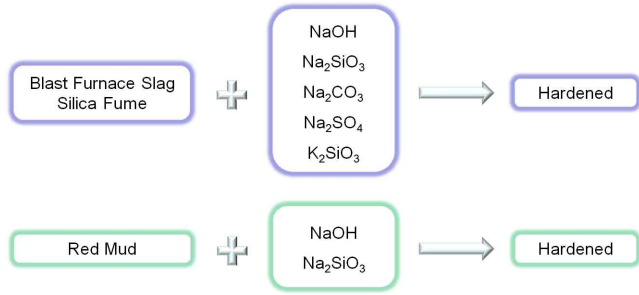


Figure 2. Result of checking the hardening property

Table 3. Final Setting times of industrial byproduct according to the alkali accelerator addition

Alkali accelerator addition	Final setting times(min)			
	BFS	RM	SF	
NaOH (Liquid)	1	365	450	1091
	3	305	353	854
	5	288	315	749
	7	240	298	576
	10	238	277	499
Na ₂ SiO ₃ (Liquid)	1	385	441	1078
	3	287	304	746
	5	285	317	684
	7	229	312	641
	10	227	293	590
Na ₂ CO ₃ (Solid)	1	380	-	1064
	3	338	-	966
	5	315	-	910
	7	282	-	837
	10	275	-	764
Na ₂ SO ₄ (Solid)	1	357	-	1035
	3	302	-	975
	5	290	-	845
	7	283	-	813
	10	271	-	785
K ₂ SiO ₃ (Liquid)	1	312	-	934
	3	263	-	845
	5	212	-	812
	7	141	-	756
	10	136	-	679

3. 실험계획 및 방법

3.1 실험계획

본 연구는 기초실험의 결과를 바탕으로 고로슬래그, 레드머드, 실리카 흙 등을 혼합한 저탄소 무기결합재에 NaOH와 Na₂SiO₃를 결합한 액상의 알칼리 자극제를 사용하여 시멘트를 사용하지 않은 저탄소 무기결합재의 최적배합을 도출하기 위한 실험이다. 또한 Table 4에 나타난 무기결합재의 화학적 구성성분은 XRF 즉 X선 형광분석법에 의해 분석된 고로슬래그, 레드머드, 실리카 흙 등의 화학적 구성성분인 CaO, SiO₂, Al₂O₃와 무기결합재 400g내 고로슬래그, 레드머드, 실리카 흙 각각의 중량으로 곁한 후 다시 400g으로 나누는 후의 비율이다.

Table 4는 저탄소 무기결합재의 CaO 함유량 및 Si/Al 변화에 따른 강도특성을 알아보기 위한 것이며, 배합은 Table 5와 같다. Si/Al를 4로 고정된 후 CaO 함유량을 20, 25, 30, 35(%) 등의 4수준으로 설정하였고, CaO 함유량을 30%로 고정된 후 Si/Al를 3, 4, 5, 6 등의 4수준으로 설정하였다.

Table 4. Experimental plan and method according to CaO content and Si/Al ratio

Experimental factor	Experimental level		
Inorganic composite conditions	· CaO content (%)	· 20, 25, 30, 35	4
	· Si/Al [*] ratio	· 3, 4, 5, 6	4
Alkali accelerator conditions	· NaOH:Na ₂ SiO ₃ (100g standard)	· 50g:50g	1
	· Amount (binder 400g standard)	· 100	1
Curing conditions	· Relative humidity(80±5)%	Temperature (20±2)°C	1
	W/B	· 31%	1
Test item	· Compressive strength, Setting time		1

* Si/Al : SiO₂(molecular weight)/Al₂O₃(molecular weight)

Table 5. Mix proportion of inorganic composite according to CaO content and Si/Al ratio

W/B (%)	W (g)	Alkali accelerator (g)		Experimenta l level [*]	Inorganic composite chemical component		
		NaOH	Na ₂ SiO ₃		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃
31	60	50	50	CaO 20%	20.5	37.1	17.9
				CaO 25%	25.0	35.3	17.1
				CaO 30%	29.6	33.5	16.3
				CaO 35%	34.9	33.0	14.7
				Si/Al 3	29.8	29.4	17.8
				Si/Al 4	29.6	33.5	16.3
				Si/Al 5	30.2	38.9	13.9
				Si/Al 6	30.2	42.1	12.7

* CaO 20~35(%) : Blast Furnace Slag 43.8~50.0% mix in binder
Si/Al 3~6 : Blast Furnace Slag 25.0~57.5% mix in binder

Table 6은 저탄소 무기결합재의 알칼리 자극제 혼합비율 및 양 변화에 따른 강도특성을 알아보기 위한 것이며, 배합은 Table 7과 같다. CaO 함유량 30%, Si/Al 4로 고정된 후 알칼리 자극제의 혼합비율 (NaOHg:Na₂SiO₃g, 100g)을 0g:100g, 25g:75g, 50g:50g, 75g:25g, 100g:0g 등의 5수준으로 설정하였고, 알칼리 자극제 혼합비율을 50g:50g으로 고정한 후 알칼리 자극제의 양(무기결합재의 양이 400g일 때 알칼리 자극제의 양)을 50, 75, 100, 125, 150g 등의 5수준으로 설정하였다.

Table 6. Experimental plan and method according to alkali accelerator conditions

Experimental factor	Experimental level		
Inorganic composite conditions	CaO content (%)	30	1
	Si/Al [†] ratio	4	1
Alkali accelerator conditions	NaOH:Na ₂ SiO ₃ (100g standard)	0g:100g, 25g:75g, 50g:50g, 75g:25g, 100g:0g	5
	Amount (binder 400g standard)	50, 75, 100, 125, 150	5
Curing conditions	Relative humidity(80±5)%	Temperature (20±2)°C	1
W/B	31%		1
Test item	Compressive strength, Setting time		1

* Si/Al : SiO₂(molecular weight)/Al₂O₃(molecular weight)

Table 7. Mix proportion of inorganic composite according to alkali accelerator conditions

W/B (%)	W (g)	Alkali accelerator (g)		Experimenta l level	Inorganic composite chemical component		
		NaOH	Na ₂ SiO ₃		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃
31	60	0	100	CaO 30% Si/Al 4	29.6	33.5	16.3
		25	75				
		50	50				
		75	25				
		100	0				
		25	25				
		37.5	37.5				
		50	50				
		62.5	62.5				
		75	75				

Table 8은 저탄소 무기결합재의 W/B 및 양생조건 변화에 따른 강도특성을 알아보기 위한 것이며, 배합은 Table 9로, CaO 함유량 30%, Si/Al 4, 알칼리 자극제 혼합비율

(NaOHg:Na₂SiO₃g, 100g)을 50g:50g으로 고정한 후 W/B를 23, 27, 31, 35(%)등 4수준으로 설정하였으며, W/B 31%일 때 양생조건 A(상온 20°C에서 24시간 전치양생), 양생조건 B(상온 20°C에서 6시간~고온 60°C에서 18시간 전치양생), 양생조건 C(상온 20°C에서 6시간~고온 80°C에서 18시간 전치양생), 양생조건 D(상온 20°C에서 12시간~고온 60°C에서 12시간 전치양생), 양생조건 E(상온 20°C에서 12시간~고온 80°C에서 12시간 전치양생) 5수준으로 설정하였다.

Table 8. Experimental plan and method according to curing conditions and W/B

Experimental factor	Experimental level		
Inorganic composite conditions	CaO content (%)	30	1
	Si/Al [†] ratio	4	1
Alkali accelerator conditions	NaOH:Na ₂ SiO ₃ (100g standard)	50g:50g	1
	Amount (binder 400g standard)	100g	1
Curing conditions	A, B, C, D, E		5
W/B	23, 27, 31, 35 (%)		4
Test item	Compressive strength, Setting time		1

* Si/Al : SiO₂(molecular weight)/Al₂O₃(molecular weight)

Table 9. Mix proportion of inorganic composite according to W/B

W/B (%)	W (g)	Alkali accelerator (g)		Experimenta l level	Inorganic composite chemical component		
		NaOH	Na ₂ SiO ₃		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃
23	28			CaO 30% Si/Al 4	29.6	33.5	16.3
27	44						
31	60	50	50				
35	76						
31	60						

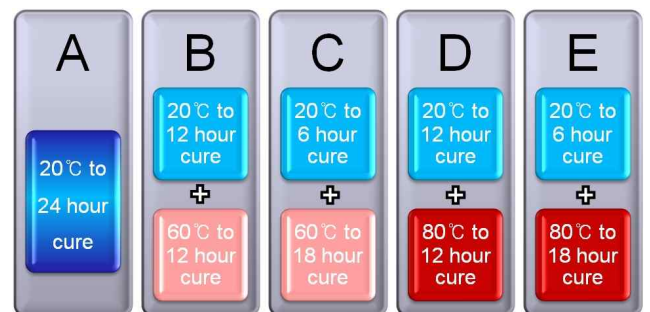


Figure 3. Conditional curing method of inorganic composite

3.2 실험방법

고로슬래그, 레드머드, 실리카 흙 등을 혼합한 저탄소 무기결합재의 비빔시험은 18ℓ 모르타르 혼합 믹서기를 사용하였으며, 고로슬래그, 레드머드, 실리카 흙 등을 투입 후 20rpm의 속도로 60초간 비빔을 실시하였다. 그 후 NaOH와 Na₂SiO₃가 결합된 액상의 알칼리 자극제와 배합수를 첨가하여 30rpm 속도로 120초, 40rpm 속도로 120초로 총 300초간 비빔을 실시한 후 토출하였다[Figure 4].

재령별 경화성상을 측정하기 위하여 압축강도(KS L 5105) 측정용 5×5×5cm 몰드에 제작하여, 온도 20±2℃, 상대습도 80±5% 및 시험 조건에 맞게 양생을 실시하였다. 또한 응결시험은 KS L 5102(Vicat 침) 방법을 이용하였다.



Figure 4. Mixing process of inorganic composite

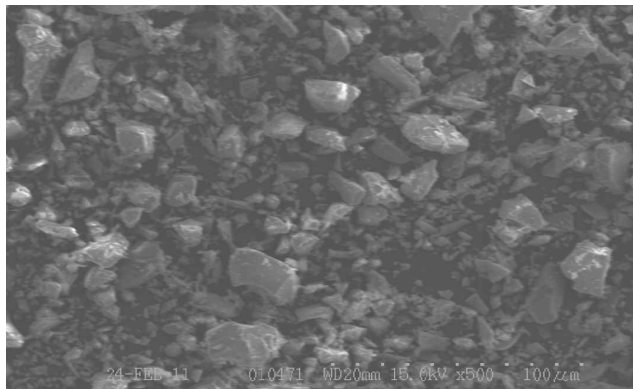


Figure 5. SEM of blast furnace slag

3.3 사용재료

3.3.1 고로슬래그(Blast Furnace Slag)

고로슬래그는 선철 제조시 발생하는 부산물로서 콘크리트의 혼화재로 사용할 경우 장기강도 향상, 수화열 감소 등의

장점을 가지고 있는 반면에 수산화칼슘(Ca(OH)₂), 황산염(CaSO₄·2H₂O), 알칼리(Na₂O, K₂O)등의 외부 자극이 없는 조건에서는 수화반응을 개시할 수 없는 잠재수경성 물질이므로 이에 따른 응결지연, 초기강도 저하 등의 단점이 존재한다. 본 실험에서 사용된 고로슬래그는 밀도 2.91g/cm³, 분말도 4,464cm²/g인 국내 G사의 제품으로 화학적 성질은 Table 10과 같다[10,11].

Table 10. Chemistry components of blast furnace slag

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂
26.03	10.96	0.18	54.07	4.21	3.28	0.22

3.3.2 레드머드(Red Mud)

레드머드[Figure 6]는 보크사이트로부터 수산화알루미늄 / 알루미늄 제조과정에서 부산물로 발생하는 산업부산물이다. 주성분인 산화철(Fe₂O₃)과 알루미늄(Al₂O₃), 규소(SiO₂)가 주를 이루고 있으며, 알칼리 성분인 Na₂O성분을 약 10% 정도 함유하기 있기 때문에 고가의 알칼리 자극제의 사용량을 줄이는 동시에 단가가 낮은 장점이 있다. 또한 산화철 성분이 많아 붉은색을 띄어 레드머드라는 명칭이 붙여졌다. 레드머드의 밀도는 3.37g/cm³, 분말도는 3,483cm²/g인 국내 K사의 제품으로 화학적 성질은 Table 11과 같다 [12,13,14].

Table 11. Chemistry components of red mud

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O
14.20	29.12	25.12	13.99	0.40	0.43	9.60

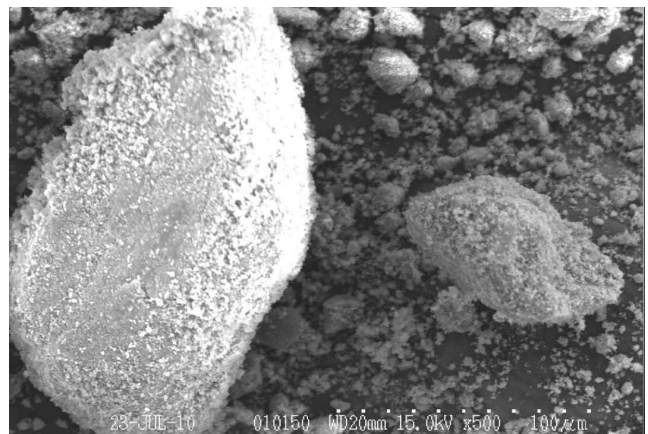


Figure 6. SEM of red mud

3.3.3 실리카 흙(Silica Fume)

실리카 흙[Figure 7]은 제강요의 탈산제로 사용되는 페로실리콘 합금이나 실리콘 금속 등의 규소합금을 전기로에서 제조할 때 발생하는 폐가스를 집진하여 얻어지는 산업부산물이나 국내에서는 생산되지 않아 전량 수입에 의존하며, 높은 강도발현과 수밀성을 가지고 있으나 단가가 다른 혼화재에 비해 비싼 단점이 있다. 본 연구에 사용된 실리카 흙은 국외의 C사에서 생산된 것으로 밀도는 2.30g/cm³, 분말도는 220,000cm²/g이며, 화학적 성질은 Table 12와 같다[15].

Table 12. Chemistry components of silica fume

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂
94.00	2.60	1.69	0.31	1.03	0.15	-

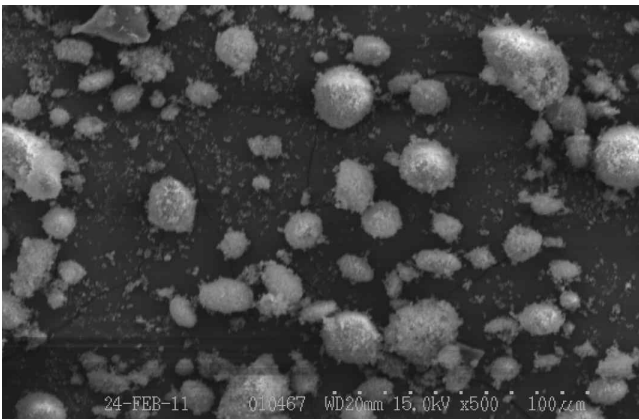


Figure 7. SEM of silica fume

4. 실험결과 및 분석

4.1 CaO함유량 변화에 따른 압축강도

Figure 8은 저탄소 무기결합재의 CaO 함유량 변화에 따른 압축강도시험 결과를 나타낸 것으로, 저탄소 무기결합재 내의 CaO함유량이 증가할수록, 알칼리 활성화 반응이 빠르게 진행되어 비경질의 C-S-H겔 및 나트륨상의 수화물이 형성되게 된다. 또한 CaO 함유량이 증가할수록 무기결합재 내의 Ca이온이 증가하여 Si를 모두 소비할 수 없어 C-S-H겔 형성이 많아지고 반응이 빠르게 진행되며, 일반적인 콘크리트의 수화생성물보다 낮은 용해성을 갖는 나트륨상이 증가하여 압축강도가 증가하는 것으로 판단된다. CaO 함유량이 35%일 때 강도발현은 우수하나 빠른 알칼리 활성화 반응으로 인한 빠른 종결시간으로 시공성에 대한 문

제점이 나타났으며, CaO 함유량이 30% 일 때 60MPa 이상의 강도발현과 가사시간 확보로 인해 저탄소 무기결합재의 최적 CaO 함유량이라고 판단된다.

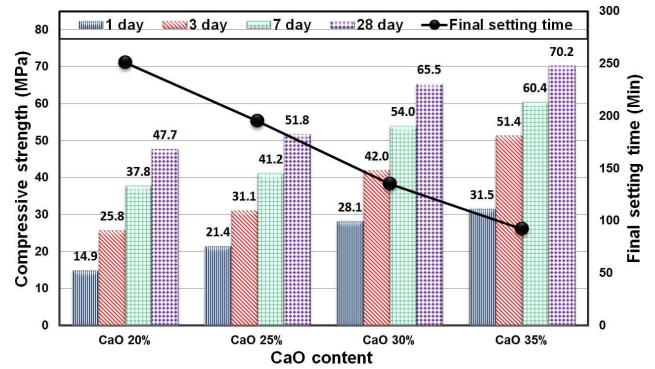


Figure 8. Compressive strength according to CaO content

4.2 Si/Al 변화에 따른 압축강도

Figure 9는 저탄소 무기결합재의 Si/Al 변화에 따른 압축강도시험 결과를 나타낸 것으로, 재령 28일의 경우 Si/Al가 4일 때 압축강도가 가장 높았으며, Si/Al 6의 경우 재령 7일 때 약 60MPa 이상의 고강도화가 가능한 것으로 나타났다. 한편 Si/Al가 증가할수록 저탄소 무기결합재의 SiO₂ 함유량도 증가하여 초기강도 발현은 우수하였으나, 28일 강도발현은 Si/Al가 4일 때 가장 우수한 것으로 나타났다. 이는 Si/Al가 4일 경우 무기결합재 구성성분의 비율 및 알칼리 활성화 반응이 다른 Si/Al에 비해 안정적이어서 이러한 경향이 나타난 것으로 판단된다.

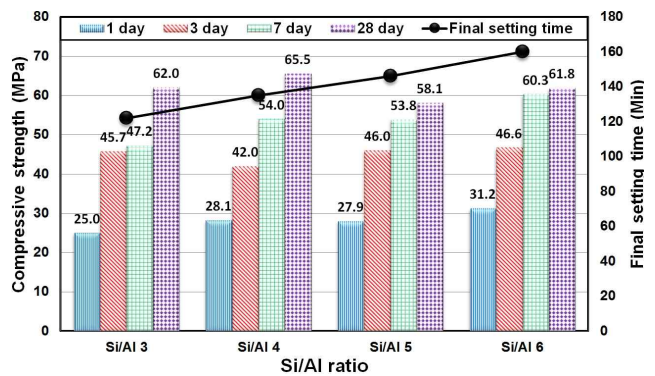


Figure 9. Compressive strength according to Si/Al ratio

4.3 알칼리 자극제 혼합비율 변화에 따른 압축강도

Figure 10은 저탄소 무기결합재의 알칼리 자극제 혼합비

을($\text{NaOH}:\text{Na}_2\text{SiO}_3$, $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{SiO}_3=100\text{g}$) 변화에 따른 압축강도시험 결과를 나타낸 것으로, 모든 비율에서 재령이 경과할수록 압축강도가 증가하는 경향을 나타냈다. 한편 알칼리 자극제의 혼합비율이 $\text{NaOH } 50\text{g}:\text{Na}_2\text{SiO}_3 \ 50\text{g}$ 과 $\text{NaOH } 75\text{g}:\text{Na}_2\text{SiO}_3 \ 25\text{g}$ 일 때 재령 28일 압축강도의 발현이 가장 우수한 것으로 나타났으나, 재령 1, 3, 7일의 경우 알칼리 자극제의 혼합비율이 $\text{NaOH } 50\text{g}:\text{Na}_2\text{SiO}_3 \ 50\text{g}$ 일 때 압축강도의 발현이 가장 우수하여, 저탄소 무기결합재에 가장 적합한 알칼리 자극제 혼합비율이라고 판단된다. 한편 Na_2SiO_3 가 100g일 경우에는 알칼리 활성화 반응 저하 및 나트륨상 형성이 감소하여 강도발현이 낮으며, NaOH 이 100g일 경우에는 알칼리 활성화 반응 및 C-S-H겔이 형성되나, 강도발현에 필요한 나트륨상 및 SiO_2 성분이 부족하여 강도가 낮은 것으로 판단된다. 또한 알칼리 자극제의 혼합비율에서 Na_2SiO_3 보다는 NaOH 가 강도발현 및 경화성상에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

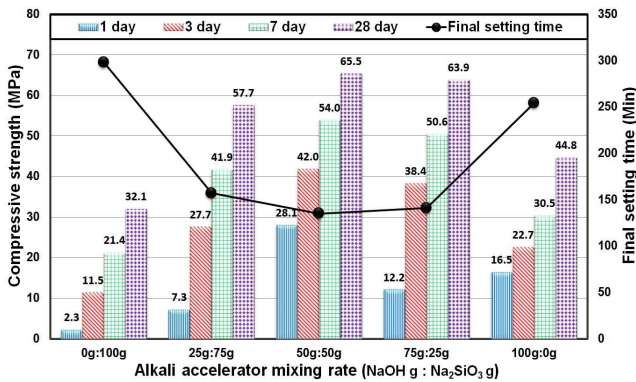


Figure 10. Compressive strength according to alkali accelerator mixing rate

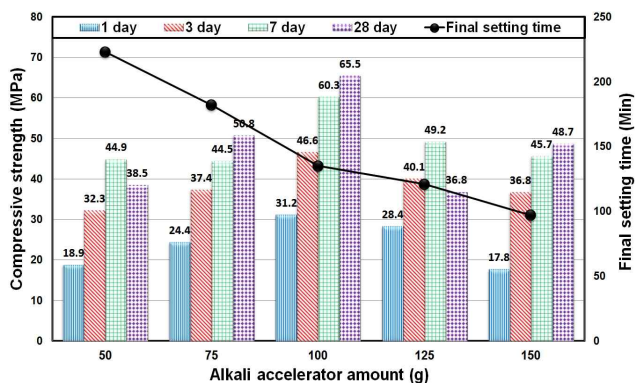


Figure 11. Compressive strength according to alkali accelerator amount

4.4 알칼리 자극제 양의 변화에 따른 압축강도

Figure 11은 저탄소 무기결합재의 알칼리 자극제 양 ($\text{NaOH}:\text{Na}_2\text{SiO}_3=50\text{g}:50\text{g}$) 변화에 따른 압축강도시험 결과를 나타낸 것으로, 알칼리 자극제의 양이 75, 100, 150g 일 경우에만 재령이 경과할수록 압축강도가 증가하는 경향을 나타냈으며, 알칼리 자극제의 양이 100g일 때 가장 높은 압축강도 발현을 나타내었다. 한편 알칼리 자극제의 양이 50, 125g의 경우 재령 7일보다 재령 28일에서 압축강도가 저하되는 경향을 나타내었다. 이는 알칼리 활성화 반응이 진행되지 않고 남은 나트륨상이 공시체 표면에 백색의 고체로 용출 때문인 것으로 사료되며, 본 연구에서 저탄소 무기결합재에 사용되는 알칼리 자극제 최적의 양은 100g인 것으로 판단된다.

4.5 W/B 변화에 따른 압축강도

Figure 12는 저탄소 무기결합재의 W/B 변화에 따른 압축강도시험 결과를 나타낸 것으로, 일반적으로 시멘트를 사용한 콘크리트에서 나타나는 경향과 동일하게 W/B가 낮을수록 압축강도 발현이 우수한 것으로 나타났다. 또한 재령 7일까지는 W/B 23, 27, 31(%)의 경우 압축강도는 유사하였으며, 60MPa 이상의 압축강도를 나타내어 고강도화가 가능할 것으로 판단된다. 한편 W/B가 낮을수록 압축강도 발현은 우수하나 그 차이가 미미하며, 경화성상에 따른 시공성 및 2차 제품 제작을 고려할 경우 저탄소 무기결합재의 적정 W/B는 31%인 것으로 판단된다.

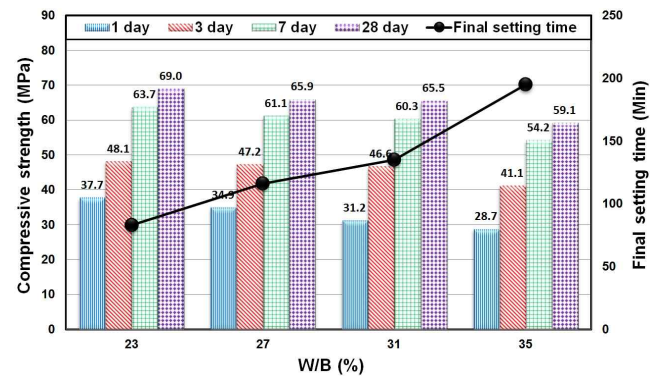


Figure 12. Compressive strength according to W/B

4.6 양생조건 변화에 따른 압축강도

Figure 13 및 Figure 14는 저탄소 무기결합재의 양생조건 변화에 따른 압축강도시험 결과를 나타낸 것으로, 양생

조건 A(20℃에서 24시간 전치양생)의 경우 육안으로 살펴본 결과, 균열이 없으면서 안정적인 강도를 발현하였다. 하지만 양생조건 B, C, D, E의 경우 고온양생에 따른 급격한 알칼리 활성화 반응으로 초기재령에서 50MPa 이상의 강도 발현을 나타냈으나, 공시체 표면 및 내부의 수분 증발로 인해 공시체에 균열이 관찰되었다. 또한 전치양생에서 발생된 균열로 인해 재령이 경과할수록 강도발현은 저하되었으며, 양생조건 B, C, E의 경우 재령 28일에서 70MPa 이상의 압축강도를 나타내었으나, 재령 초기에 비하여 공시체에 균열의 폭과 길이가 증가한 것으로 나타났다.

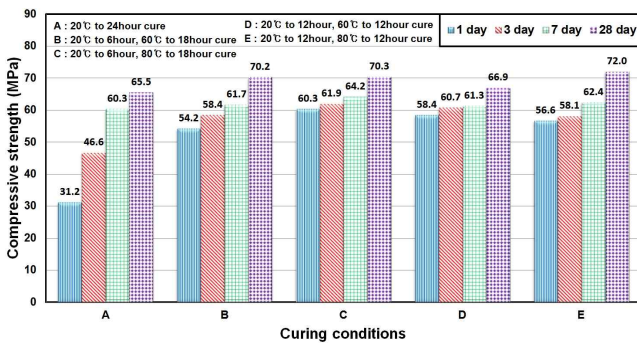


Figure 13. Compressive strength according to curing conditions

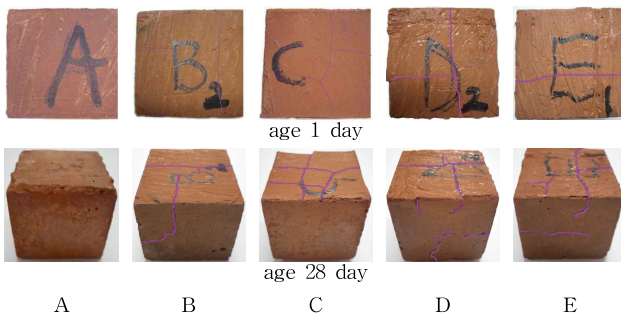


Figure 14. Specimen photo according to the curing conditions

5. 결론

본 연구에서는 시멘트의 사용량을 저감하고자 산업부산물인 고로슬래그, 레드머드, 실리카 흙 등을 사용하여 시멘트가 사용되지 않은 저탄소 무기결합재의 최적배합을 도출하기 위한 실험으로서 본 연구 범위 내에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) CaO 함유량 변화에 따른 압축강도시험 결과, CaO 함

유량이 증가할수록 알칼리 활성화 반응이 빠르게 진행되고 나트륨상이 증가하여 강도발현은 우수하나, 속경성 때문에 CaO 함유량이 30%일 때 저탄소 무기결합재 최적 CaO 함유량이라고 판단된다.

- 2) Si/Al 변화에 따른 압축강도시험 결과, Si/Al가 증가할수록 저탄소 무기결합재의 SiO₂ 함유량도 증가하여 초기강도 발현은 우수하나, 장기강도 발현은 미미한 것으로 나타났다.
- 3) 알칼리 자극제 혼합비율(NaOH:Na₂SiO₃) 변화에 따른 압축강도시험 결과, 50g:50g일 때 모든 재령에서 가장 우수한 압축강도를 나타냈으며, 알칼리 자극제의 혼합비율에서 Na₂SiO₃ 보다는 NaOH가 강도발현 및 경화성상에 영향을 미치는 것으로 판단된다.
- 4) 알칼리 자극제 양(NaOH+Na₂SiO₃) 변화에 따른 압축강도시험 결과, 알칼리 자극제 양이 100g일 때 가장 우수한 압축강도 발현을 나타냈으며, 알칼리 자극제 양이 증가할수록 NaOH 양도 증가하여 경화가 빨리 진행되는 경향을 나타내었다.
- 5) W/B 변화에 따른 압축강도시험 결과, W/B가 낮을수록 압축강도 발현은 우수하나 그 차이가 미미하고, 경화성상에 따른 시공성 및 2차 제품 제작 가능성을 고려할 경우 저탄소 무기결합재의 적정 W/B는 31%인 것으로 판단된다.
- 6) 양생조건 변화에 따른 압축강도시험 결과, 양생조건 B, C, D, E의 경우 초기재령에서 50MPa 이상의 강도발현을 나타내었으나, 공시체 표면에 균열이 발생되었다. 한편 양생조건 A의 경우 균열이 발생되지 않았으며, 재령 28일의 경우 65MPa 이상의 압축강도를 나타내어 고강도화가 가능할 것으로 판단된다.

이상의 결론을 종합하여 볼 때 저탄소 무기결합재의 최적 배합은 CaO 30%, Si/Al 4, 알칼리 자극제 혼합비율 50g:50g, 알칼리 자극제 양 100g, W/B 31%인 것으로 판단된다. 이에 본 연구를 바탕으로 무기결합재를 제조하여 기존 패널에서 시멘트 대체재로 사용할 경우 시멘트가 생산 시 사용되는 에너지 및 CO₂가스 배출량이 저감될 것으로 사료되며, 무기결합재의 단점인 수축을 보완한다면 보다 우수한 성능의 저탄소 무기결합재를 개발할 수 있을 것으로 사료된다.

요 약

본 연구에서는 산업부산물인 고로슬래그, 레드머드, 실리카 흙 등을 사용하여 콘크리트의 혼화재가 아닌 시멘트 대체재로 사용하여 시멘트 제조시 배출되는 CO₂가스 및 환경 부하를 저감하고자 하였다.

고로슬래그, 레드머드, 실리카 흙 등을 혼합한 저탄소 무기결합체에 알칼리 자극제만으로 고온의 소성과정없이 상온에서 제조하기 위한 최적배합을 도출하고자 하였다. 이를 위해 CaO 함유량 및 Si/Al, 알칼리 자극제 혼합비율 및 양, 양생조건 및 W/B 변화에 따른 경화성장 및 압축강도시험을 실시하였다. 시험분석 결과, 저탄소 무기결합체의 최적배합은 CaO 함유량 30%, Si/Al 4, 알칼리 자극제 혼합비율 (NaOHg:Na₂SiO₃g) 50g:50g, 알칼리 자극제 양 100g, W/B 31%인 것으로 판단된다. 또한 무기결합체의 단점인 수축을 보완한다면 보다 우수한 성능의 저탄소 무기결합체의 개발이 가능할 것으로 판단된다.

키워드 : 저탄소, 무기결합체, 알칼리 자극제, 최적배합

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MEST) (No. 2011-0006113)

References

1. Lee JH, A Study on GHG emissions and mitigation potentials of the industrial sector in Korea [master's thesis], daegu (Korea): University of Keimyung; 2010. 77 p.
2. Lee SS, A study on the strength and flowing properties of cementless type eco-friendly inorganic composites by using alkali accelerator, Journal of the Architectural Institute of Korea, 2010 May;26(5):67-74.
3. Lee YS, Lee KP, Lee SS, Song HY, A study on the strength and flowing properties of the non-cement inorganic composite by using blast furnace slag and red mud, Proceeding of the Korea Institute of Building Construction Conference; 2010 Nov 12; Daejeon (Korea), Seoul (Korea): the Korea Institute of Building Construction; 2010. p. 91-4.
4. Han CG, Lee GC, Heo YS, A comparison study between evaluation methods on the rheological properties of cement paste, Journal of the Korea Institute of Building Construction, 2006 Sep;21(3):75-82.
5. Jeong SW, Lim NG, Study of non sintered cement mortar using nanoslag and alkali activator, Journal of the Korea Institute of Building Construction, 2010 Dec;44(6):61-6.
6. Kim CM, A Study on the ways of practically using geopolymer concrete [master's thesis], gwangju (Korea): University of Chonnam; 2009. 45 p.
7. Kim YS, Moon DI, Lee DW, An experimental study on alkali-silica reaction of alkali-activated ground granulated blast furnace slag mortars, Journal of the Korea Institute of Building Construction, 2011 Aug;48(4):345-52.
8. Lee KP, Do YS, Lee SS, Song HY, A study on optimum mixing derivation of the environment-friendly high performance geopolymer paste, Proceeding of the Korea Institute of Building Construction Conference; 2009 Nov 14; Cheongju, Seoul (Korea): the Korea Institute of Building Construction; 2009. p. 107-10.
9. Sim JI, Yang KH, Practical Application of GGBS-Based Alkali-Activated Binder to Secondary Products of Concrete, Journal of the Korea Institute of Building Construction, 2010 Oct;43(5):37-44.
10. Yoo JW, Lee JS, Park BK, Pei CC, Han MC, Han CG, Improvement of early age concrete strength using blast furnace slag powder, Proceeding of the Korea Institute of Building Construction Conference; 2009 May 23; Seoul, Seoul (Korea): the Korea Institute of Building Construction; 2009. p. 77-80.
11. Yang KH, Sin JI, Compressive Strength and Shrinkage Strain of Slag-Based Alkali-Activated Mortar with Gypsum, Journal of the Korea Institute of Building Construction, 2008 Feb;27(1):57-62.
12. Kim TC, Kim J, Yeon KW, Yoon GW, Shin DA, Filed application of the color concrete panel with red mud and pigment, Proceeding of the Korea Institute of Building Construction Conference; 2009 Nov 14; Cheongju, Seoul (Korea): the Korea Institute of Building Construction; 2009. p. 19-22.
13. Jeong DY, Choi GR, Kim MH, Hong JH, An experimental study on development of eco-friendly color concrete using industrial waste red mud, Journal of the Environmental Sciences, 2007 July;16(8):929-39.
14. Kim TC, Kim J, Yeon KW, Yoon GW, Shin DA, The study

about colored concrete corresponding to the various temperatures for plasticity and additive volume on the red mud. Proceeding of the Korea Concrete Institute; 2008 Nov 7; Goyang, Seoul (Korea): the Korea Concrete Institute; 2008. p. 585-8.

15. Heo JW, Lim NK. The basic study for the proposal standard of Nano-Slag on an alternation material for Silica-fume. Proceeding of the Korea Concrete Institute; 2008 Nov 7; Goyang (Korea). Seoul (Korea): the Korea Concrete Institute; 2008. p. 67-71.