

화산재 기반 지오폴리머의 최적배합 도출 및 강도 특성

남창식
서울시립대학교 토목공학과

Evaluation of Optimum Mix Proportion and Strength of Volcanic Ash based Geopolymer

Chang-Sik Nam

Department of Civil Engineering, University of Seoul

요약 본 연구에서는 화산재 기반 지오폴리머의 최적배합을 도출하기 위하여 유동성, 응결 및 압축강도를 분석하였다. 알칼리 활성화제로 Na_2SiO_3 와 NaOH 를 사용하였고, NaOH 는 2, 4, 6, 8M을 사용하였으며, A/B 비는 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 화산재와 고로슬래그의 결합재 비는 7:3, 6:4, 5:5를 사용하여 진행하였다. 상기의 실험 결과, NaOH 의 몰농도가 증가할수록 유동성은 떨어지고, 응결시간은 짧아졌으며, 압축강도는 증가하여 NaOH 의 최적 몰농도는 4M인 것으로 나타났다. A/B 비의 변화에 따른 특성도 검토하였는데 A/B 비가 증가할수록 응결시간은 짧아지는 경향을 보였고, 압축강도 발현은 높은 것으로 나타났지만 응결시간의 확보와 압축강도 발현에 유리한 A/B 비는 0.35인 것으로 확인되었다. 화산재의 비율이 증가할수록 응결시간이 길어지는 것으로 확인되었고, 강도발현에는 불리한 것으로 나타났으며, 실험 결과를 종합했을 때, 6:4의 결합재 비를 사용하는 것이 응결과 압축강도에 가장 적합한 것으로 판단된다. 따라서, 화산재 기반 지오폴리머는 NaOH 4M을 사용하고, A/B 비는 0.35, 결합재 비는 6:4를 사용하는 것이 유동성, 응결시간 확보 및 압축강도 발현에 적정할 것으로 판단된다.

Abstract This study determined the optimum mix proportions for volcanic-ash-based geopolymer by analyzing the flow, setting time, and compressive strength. Na_2SiO_3 and NaOH were used as alkali activators, and NaOH concentrations of 2, 4, 6, and 8M were used for different experimental cases. The A/B ratios examined were 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, and 0.45, and the ratios of volcanic ash to blast furnace slag binder were 7:3, 6:4, and 5:5. In the experiment, the flow and setting time tended to decrease and the compressive strength increased as the molarity of NaOH in the geopolymer increased. The optimum molarity of NaOH was determined to be 4M. As the A/B ratio increased, the setting time decreased and the compressive strength increased. The most advantageous A/B ratio for the setting time and strength was 0.35. Increasing the ratio of volcanic ash resulted in a longer setting time and lower compressive strength. The optimum binder ratio was chosen as 6:4 based on the setting time and compressive strength. Thus, 4M of NaOH , an A/B ratio of 0.35, and binder ratio of 6:4 are considered as the proper parameters for the volcanic-ash-based geopolymer

Keywords : A/B Ratio, Binder Ratio, Blast Furnace Slag, Geopolymer, NaOH , Volcanic Ash

1. 서론

전 세계적으로 환경문제에 대한 관심이 높아짐에 따라 건설 산업에서도 온실가스 배출 감축을 위해 노력하고 있으며, 시멘트 제조 공정에서의 CO_2 발생량 저감, 산업부산물 등을 재활용하는 제로에미션(Zero emission) 화 차원의 방안이 검토되고 있다[1].

이에 따라 건설 산업에서는 시멘트의 사용량을 줄이기 위한 연구가 다양하게 진행되고 있으며 시멘트 대체재로서 고로슬래그(Blast Furnace Slag), 플라이 애쉬(Fly Ash) 및 메타카올린(Metakaolin) 등을 활용한 지오폴리머(Geopolymer)에 대한 연구가 진행되고 있다[2].

지오폴리머는 SiO_2 와 Al_2O_3 성분이 풍부한 천연 포졸란이나 산업 부산물과 알칼리 활성화제의 강한 알칼리성

*Corresponding Author : Chang-Sik Nam(University of Seoul)

Tel: +82-2-6490-5563 email: deus7020@uos.ac.kr

Received April 21, 2017

Revised May 30, 2017

Accepted June 9, 2017

Published June 30, 2017

이 반응하여 경화한 콘크리트이며[3], 일반적으로 고로슬래그와 플라이 애쉬를 활용한 지오폐리머 콘크리트 관련 연구들이 진행되고 있다[4].

제철소에서 발생하는 고로슬래그는 입자 표면에 유리질의 피막으로 둘러싸여 있어 시멘트 같은 수경성 물질이 아닌 잠재수경성을 갖고 있는 물질이며, 강알칼리 환경에 있을 경우 피막이 파괴되고 수화반응을 일으키는 특징을 갖고 있다. 하지만 알칼리 활성화제와 고로슬래그를 혼합하게 될 경우 높은 압축강도 발현을 보이거나 유동성의 손실이 크고 빠른 경화로 인한 수축의 문제가 있는 것으로 보고되고 있다[5].

화력발전소에서 발생하는 플라이 애쉬는 수경성이 없으나 알칼리 활성화제를 사용하고 고온양생을 시킴으로써 중합반응(Polymerization)을 일으켜 강도를 발현시킨다[6]. 하지만 상온에서는 중합반응을 일으킬 수 없는 문제가 있으며 이를 보완하기 위해 고로슬래그와 플라이 애쉬를 혼합사용한 지오폐리머에 대한 연구가 진행되고 있다.[7]

지오폐리머에 사용되는 알칼리 활성화제는 규산나트륨(Sodium Silicate, Na_2SiO_3), 수산화나트륨(Sodium Hydroxide, NaOH) 등이 사용되고 있으며, 기존 연구에서 수산화나트륨의 단독사용보다는 수산화나트륨과 규산나트륨을 혼합하여 사용하였을 때 지오폐리머의 물리적 성질을 향상 시킨다고 하였다[8]. 또한 분말 형태의 규산나트륨 보다 액상의 규산나트륨을 사용할 경우 강도 발현에 더 효과적이라고 하였다[9].

본 연구에서는 플라이 애쉬와 화학적 성질이 비슷한 천연 포졸란(Natural Pozzolan)인 화산재(Volcanic Ash)를 결합재로 활용하고 고로슬래그를 혼합 사용함으로써 상온에서의 양생이 가능한 지오폐리머를 제조하고, 규산나트륨과 수산화나트륨을 알칼리 활성화제로 사용하여 화산재 기반 지오폐리머의 결합재 구성, 알칼리 활성화제의 최적비율 및 물리적 특성 등을 검토하여 최적 배합을 찾고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 사용재료

2.1.1 결합재

본 연구에서 사용된 결합재는 필리핀산 화산재(VA),

포항제철소에서 발생하는 고로슬래그(BS)를 사용하였고, 화산재는 좀 더 수월한 중합반응을 유도하기 위하여 불밀로 분쇄하였으며 각각의 물리·화학적 성질은 Table 1에 나타내었다.

2.1.2 골재

지오폐리머 배합을 위해 사용된 잔골재는 KS L ISO 679의 규격에 맞는 주문진산 표준사(밀도 $2.61\text{g}/\text{cm}^3$, 흡수율 2.4%)를 사용하였다.

2.1.2 알칼리 활성화제

알칼리 활성화제는 국내 D사에서 판매하고 있는 규산나트륨(Sodium Silicate, Na_2SiO_3) 수용액, 수산화나트륨(Sodium Hydroxide, NaOH)을 사용하였고, 알칼리 활성화제의 종류별 화학 구성은 Table 2와 같으며, 지오폐리머의 배합 전 1일간의 전처리 과정을 거쳐 알칼리 활성화제를 제조하고 혼합하였다.

Table 1. Chemical and physical properties

Chemical composition(%)	Volcanic ash (VA)	Blast furnace slag (BS)
CaO	5.12	42.1
SiO ₂	62.65	33.3
Al ₂ O ₃	14.65	15.3
Fe ₂ O ₃	4.66	0.4
MgO	2.26	5.7
SO ₃	-	2.1
Na ₂ O	5.55	-
Loss of Ignition(%)	1.47	0.33
Density(kg/m ³)	2.54	2.90
Blaine(cm ² /g)	3,800	4,200

Table 2. Alkali activators used in this study

Alkali activators	Chemical formula	Chemical composition
Sodium silicate	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	SiO ₂ 33%
		Na ₂ O 13%
		H ₂ O 54%
Sodium hydroxide	NaOH	Na ₂ O 75%
		H ₂ O 22%

2.2 실험계획

2.2.1 NaOH 몰농도에 따른 지오폐리머 특성

화산재 기반 지오폐리머에 사용되는 알칼리 활성화제 중 NaOH의 몰농도가 압축강도 및 응결특성에 미치는

영향에 대하여 분석하기 위해 Table 3과 같이 실험을 계획하고 Table 4와 같이 배합하였다. Table 5는 배합별 몰비(Molar ratio)를 나타낸 것이다. 결합재는 화산재와 고로슬래그의 비율을 6:4로 고정하였고, 알칼리 활성화 화제와 결합재의 비는 0.35, Na₂SiO₃와 NaOH의 비율은 1:1로 고정하고 NaOH의 몰농도를 2, 4, 6, 8M로 조절하였다. 측정항목으로는 재령 1, 3, 7, 28, 90일의 압축 강도를 측정하였고 유동성을 확인하기 위해 플로 테스트를 진행하였으며 알칼리 활성화제의 반응성을 검토하기 위하여 응결시간을 측정하였다.

Table 3. Experimental plan for molarity of NaOH

Experimental Factor		Level of Experimental	
Proportion	Binder	2	• VA(50) • BS(50)
	A/B	1	• 0.35
	B:S	1	• 1:2
	Alkali Activator	4	• Na ₂ SiO ₃ Solution • NaOH : 2, 4, 6, 8M
Workability		1	• Flow
Setting time		2	• Initial setting • Final setting
Strength		5	• Compressive Strength 1, 3, 7, 28, 90 Days
Curing		1	• 23±2°C(Air curing)

Table 4. Mix design for molarity of NaOH

Mix No.	W	VA	BS	S	Na ₂ SiO ₃	NaOH
1	150	400	400	1600	140	140(2M)
2	150	400	400	1600	140	140(4M)
3	150	400	400	1600	140	140(6M)
4	150	400	400	1600	140	140(8M)

Table 5. Activated system for molarity of NaOH(Molar ratio)

Mix No.	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Na ₂ O/SiO ₂	Na ₂ O/Al ₂ O ₃	H ₂ O/Na ₂ O
1	6.10	0.107	0.65	25.86
2	6.10	0.123	0.75	22.04
3	6.10	0.139	0.85	19.06
4	6.10	0.156	0.95	16.69

2.2.2 A/B 비에 따른 지오폐리머 특성

알칼리 활성화제와 결합재의 비인 A/B 비가 지오폐리머에 의 물리적 특성에 미치는 영향을 분석하기 위한

실험계획, 배합 및 배합별 몰비를 Table 6~8에 나타내었다. 화산재와 고로슬래그의 비율은 5:5, NaOH는 4M을 사용하였으며, A/B가 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45로 변화함에 따라 Na₂SiO₃의 사용량에도 변화를 주었다.

Table 6. Experimental plan for A/B ratio

Experimental Factor		Level of Experimental	
Proportion	Binder	2	• VA(50) • BS(50)
	A/B	5	• 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45
	B:S	1	• 1:2
	Alkali Activator	2	• Na ₂ SiO ₃ Solution • NaOH : 4M
Workability		1	• Flow
Setting time		2	• Initial setting • Final setting
Strength		5	• Compressive Strength 1, 3, 7, 28, 90 Days
Curing		1	• 23±2°C(Air curing)

Table 7. Mix design for A/B ratio

Mix No.	A/B	W	VA	BS	S	Na ₂ SiO ₃	NaOH (4M)
5	0.25	150	400	400	1600	60	140
6	0.3	150	400	400	1600	100	140
7	0.35	150	400	400	1600	140	140
8	0.4	150	400	400	1600	180	140
9	0.45	150	400	400	1600	220	140

Table 8. Activated system for A/B ratio(Molar ratio)

Mix No.	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Na ₂ O/SiO ₂	Na ₂ O/Al ₂ O ₃	H ₂ O/Na ₂ O
5	5.73	0.107	0.61	23.72
6	5.92	0.115	0.68	22.85
7	6.10	0.123	0.75	22.04
8	6.29	0.131	0.82	21.39
9	6.48	0.138	0.89	20.84

2.2.3 결합재 비에 따른 지오폐리머 특성

본 연구에서는 반응성이 낮은 저칼슘 계열의 화산재와 반응성이 높은 고칼슘 계열의 고로슬래그의 비율에 따라 지오폐리머의 압축강도, 응결특성을 분석하고자 하였다. 실험계획은 Table 9에 나타내었고, 배합과 결합재의 비에 따른 SiO₂/Al₂O₃, Na₂O/SiO₂ 등의 몰비는 Table 10, 11에 나타내었다.

Table 9. Experimental plan for binder ratio

Experimental Factor		Level of Experimental	
Proportion	Binder	3	• VA(70) : BS(30) • VA(60) : BS(40) • VA(50) : BS(50)
	A/B	1	• 0.35
	B/S	1	• 1:2
	Alkali Activator	2	• Na ₂ SiO ₃ Solution • NaOH : 4M
Workability		1	• Flow
Setting time		2	• Initial time • Final time
Strength		5	• Compressive Strength 1, 3, 7, 28, 90 Days
Curing		1	• 23±2°C (Air curing)

Table 10. Mix design for binder ratio

Mix No.	W	VA	BS	S	Na ₂ SiO ₃	NaOH(4M)
10	150	560	240	1600	140	140
11	150	480	320	1600	140	140
12	150	400	400	1600	140	140

2.3 실험방법

2.3.1 유동성

화산재 기반 지오폐리머의 유동성을 측정하기 위하여 플로우 테스트를 진행하였으며 KS L 5105에 의하여 측정하였다.

Table 11. Activated system for binder ratio(Molar ratio)

Mix No.	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Na ₂ O/SiO ₂	Na ₂ O/Al ₂ O ₃	H ₂ O/Na ₂ O
10	6.82	0.13	0.88	18.91
11	6.46	0.127	0.82	21.14
12	6.10	0.123	0.75	22.04

2.3.2 응결

응결 시간의 측정은 KS L 5108에 준하여 실시하였다.

2.3.3 압축강도

압축강도 시험은 KS F 2405의 규정에 준하여 실시하였으며, 재령 1, 3, 7, 28 및 90일의 압축강도를 측정하였으며, 50×50×50mm의 모르타르용 각주형 공시체에 성형한 후 실시하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 NaOH 몰농도에 따른 지오폐리머 특성

NaOH의 몰농도에 따른 화산재 기반 지오폐리머 모르타르의 유동성, 응결 및 압축강도의 영향을 분석하였다. 유동성과 응결시간에 대한 결과는 Table 12에 나타내었고, 재령 90일까지의 압축강도 결과는 Table 13, Fig 1에 나타내었다.

Table 12. Workability and setting time for molarity of NaOH

Mix No.	Flow(mm)	Setting time(min)	
		Initial	Final
1	205	198	350
2	204	116	189
3	197	67	114
4	191	66	82

Table 13. Compressive strength for molarity of NaOH

Mix No.	Compressive strength(MPa)				
	1days	3days	7days	28days	90days
1	12.56	27	30.75	34.56	36.2
2	20.72	33.56	45.4	51.24	52.55
3	25.12	38.7	50.5	54.8	56.2
4	26.87	41.5	52.72	56.1	56.87

실험 결과, NaOH의 몰농도가 증가할수록 유동성은 떨어지는 것으로 나타났고, 응결시간 또한 짧아지는 경향을 보였다. 이러한 결과는 NaOH의 몰농도가 증가함에 따라 점성이 높아지고, 알칼리 활성화제의 알칼리도가 높아 화산재와 고로슬래그 내부의 Si와 Al 성분의 반응이 활성화되었기 때문으로 판단되며, 이러한 중합반응이 응결을 촉진시켜 응결시간이 짧아진 것으로 판단되며, NaOH의 농도를 6M 이상 사용하는 것은 유동성 및 응결에 불리한 것으로 판단된다.

압축강도의 발현특성을 분석해보면 재령 28일을 기준으로 2M을 제외한 4, 6, 8M에서의 압축강도는 약 50MPa 이상의 고강도를 나타내고 있다. NaOH의 몰농도가 증가할수록 결합재 내부의 Si와 Al의 용출을 촉진시키고 중합반응이 활발하게 일어날 수 있는 환경을 만들어 주었기 때문으로 판단된다.

Fig 2는 Na₂O/SiO₂ 비와 Na₂O/Al₂O₃ 비가 압축강도에 미치는 영향을 분석한 것이다. Na₂O/SiO₂ 비와 Na₂O/Al₂O₃ 비가 증가할수록 압축강도는 증가하는 경향

을 보였고, 재령 3일까지는 강도발현 증가폭이 완만하지만 재령 7일부터는 압축강도의 증가폭이 가파른 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 NaOH의 몰농도가 2M일 때 보다는 4M 이상의 농도를 사용했을 때 반응성이 활발하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 압축강도와 유동성 및 응결특성을 고려한 NaOH의 몰농도는 4M이 최적이라고 분석되었다.

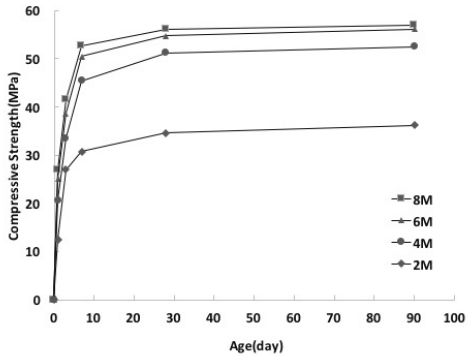


Fig 1. Compressive strength for molarity of NaOH

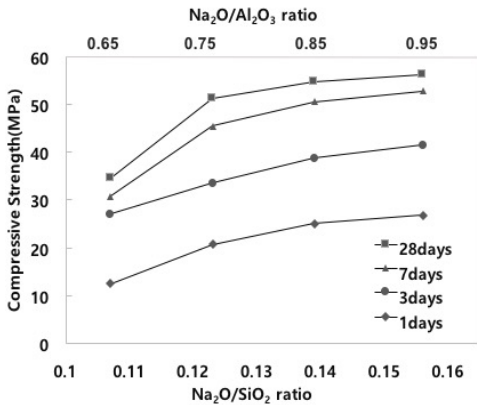


Fig 2. Compressive strength in terms of Na₂O/SiO₂ and Na₂O/Al₂O₃ molar ratio

3.2 A/B 비에 따른 지오폐리머 특성

Table 14, 15, Fig 3, 4는 알칼리 활성화제와 결합제의 비율 변화가 미치는 영향에 대한 결과이다.

A/B 비가 증가할수록 유동성은 떨어지고 응결은 빨라지는 것으로 나타내었는데 A/B 비가 증가함에 따라 알칼리 활성화제 중 Na₂SiO₃의 사용량이 증가하였고 Na₂SiO₃의 급결 특성과 높은 점성(200 cps 이상)의 영향을 받았기 때문인 것으로 판단된다.

압축강도는 A/B 비가 높을수록 강도발현이 높은 것으로 나타났고, 초기 재령에서는 A/B 비가 0.3 이하인 경우 강도 발현이 낮은 것을 확인할 수 있는데 이는 고로슬래그의 경우 주요 성분인 Ca와 Si 성분이 반응하여 C-S-H 생성과, 알칼리 활성화제의 첨가로 반응이 더욱 촉진되는데 A/B 비가 낮을수록 반응성이 떨어져 강도를 발현이 부족했던 것으로 분석된다.

Na₂O/SiO₂ 비와 Na₂O/Al₂O₃ 비가 압축강도에 미치는 영향을 분석해보면 Na₂O/SiO₂ 비와 Na₂O/Al₂O₃ 비가 증가할수록 압축강도는 증가하는 것으로 나타났다. Na₂O/SiO₂의 비가 0.107, 0.115인 경우, 모든 재령에서 강도의 증가폭이 완만하지만 Na₂O/SiO₂의 비가 0.115와 0.123 사이에서는 모든 재령에서 강도의 증가폭이 큰 것을 확인할 수 있다. 그리고 Na₂O/SiO₂의 비가 0.123, Na₂O/Al₂O₃ 비가 0.75 이상부터는 강도차이가 거의 없음을 알 수 있다. 이러한 결과는 Na₂O/SiO₂ 비와 Na₂O/Al₂O₃ 비가 0.115, 0.46 이하일 경우 반응성이 낮아 높은 압축강도를 발현하기 어려운 것으로 판단되며, Na₂O/SiO₂ 비와 Na₂O/Al₂O₃ 비가 0.123, 0.75 이상을 사용하는 것이 높은 강도발현에 유리하다고 판단된다.

따라서, 압축강도 발현을 위한 A/B 비의 최적비는 0.35 이상인 것으로 판단되고, 유동성과 응결특성을 고려하면 빠른 응결을 보인 A/B 비 0.4, 0.45를 제외한 A/B 비 0.35, Na₂O/SiO₂ 비 0.123, Na₂O/Al₂O₃ 비 0.75가 최적의 비율이라고 분석되었다.

Table 14. Workability and setting time for A/B ratio

Mix No.	Flow(mm)	Setting time(min)	
		Initial	Final
5	210	258	583
6	205	202	315
7	204	116	189
8	191	57	109
9	184	52	78

Table 15. Compressive strength for A/B ratio

Mix No.	Compressive strength(MPa)				
	1days	3days	7days	28days	90days
5	6.42	13.7	18.87	22.38	23.55
6	11.5	18.22	25.15	30.5	32.55
7	20.72	33.56	45.4	51.24	52.3
8	22.87	36.5	48.72	53.1	54.87
9	23.12	38.15	50.33	52.95	51.23

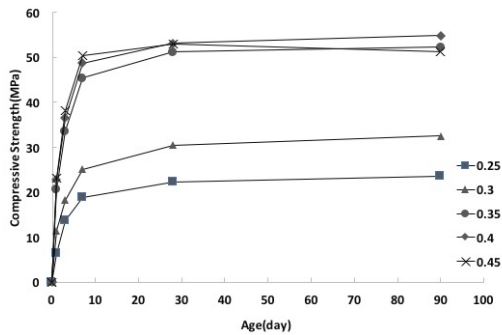


Fig 3. Compressive strength for molarity of NaOH

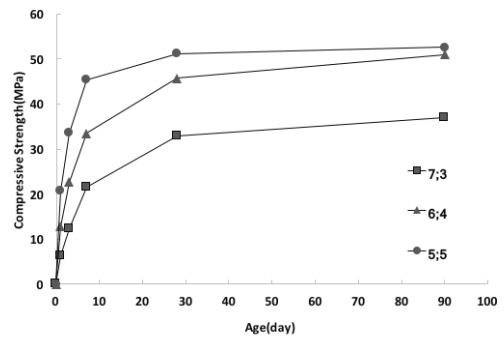


Fig 5. Compressive strength for binder ratio

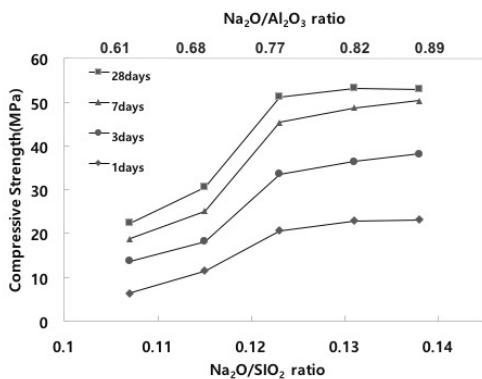


Fig 4. Compressive strength in terms of $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ and $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar ratio

3.3 결합재 비에 따른 지오폐리머 특성

본 연구에서는 화산재와 고로슬래그의 비를 7:3, 6:4, 5:5로 하였고, 앞서 실험한 결과를 바탕으로 NaOH의 몰 농도는 4M, A/B 비는 0.35로 하여 결합재의 비율에 따른 물리적 특성을 분석하고자 하였으며, 실험 결과는 Table 16, 17, Fig 5를 통하여 확인할 수 있다.

Table 16. Workability and setting time for binder ratio

Mix No.	Flow(mm)	Setting time(min)	
		Initial	Final
10	200	268	395
11	198	135	218
12	204	116	189

Table 17. Compressive strength for binder ratio

Mix No.	Compressive strength(MPa)				
	1days	3days	7days	28days	90days
10	6.28	12.35	21.64	32.94	37.95
11	12.8	22.72	33.5	45.76	50.94
12	20.72	33.56	45.4	51.24	52.55

유동성에 대한 결과를 분석해보면, 플로우 값에 큰 차이가 없어 결합재 비의 영향은 거의 없는 것으로 판단되지만 화산재의 비율이 증가할수록 응결시간은 길어지는 경향을 보였다. 화산재는 상온에서 Si, Al의 직접적인 반응이 불가하여 상온에서의 반응성을 높이기 위해 고로슬래그를 사용한다. 하지만 고로슬래그의 비율이 증가할수록 알칼리 활성화제와의 반응이 촉진되면서 응결시간이 단축되는 것으로 나타났다.

압축강도는 화산재 대비 고로슬래그의 비율이 증가할수록 높은 압축강도를 보였다. 초기 재령에서는 결합재의 비가 5:5인 경우가 가장 높은 압축강도를 나타내었는데 이는 고알칼리성의 환경에서 반응성이 높은 고로슬래그의 주요 성분인 Ca와 Si의 수화반응이 촉진되어 초기 강도발현에 지배적인 영향을 미친 것으로 판단된다. 장기 재령에서는 화산재의 비율이 증가할수록 압축강도 발현율이 높아지는 경향을 보였고, 재령 90일 까지 꾸준하게 압축강도가 발현되는 결과를 나타내었다. 또한 재령 90일에서의 압축강도를 보면 결합재 비가 7:3인 경우는 강도발현이 낮게 나타났지만 결합재 비 6:4, 5:5인 경우는 약 50MPa 이상의 고강도를 나타내었다. 이러한 결과는 재령이 증가함에 따라 화산재와 고로슬래그의 중합반응이 일어나고 화산재의 비율이 높아질수록 반응은 더욱 활성화되어 장기 재령에서 압축강도 발현에 기여하지만 결합재비가 7:3인 경우에는 고로슬래그의 수화반응으로 화산재의 중합반응을 촉진시켜기에는 고로슬래그의 비율이 낮았던 것으로 분석된다.

따라서, 유동성과 응결 시간의 확보를 위해서는 결합재 비 5:5 보다는 6:4, 7:3인 경우가 적합하다고 판단되고, 높은 강도발현을 위해서는 가장 높은 압축강도를 보이는 결합재 비 5:5인 경우가 강도 측면에서는 가장 유리

하지만 유동성, 응결, 압축강도를 모두 고려할 경우 유동성 및 응결 시간도 만족하고 강도발현 또한 높은 결과를 보인 결합재 비 6:4일 때가 가장 적합하다고 분석되었다.

4. 결론

본 연구에서는 시멘트의 대체재로서 화산재와 고로슬래그를 결합재로 사용한 지오폐리머의 최적 배합을 도출하기 위하여 NaOH 몰농도, A/B 비, 결합재 비에 따른 유동성, 응결 및 강도특성에 대한 연구를 진행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) NaOH의 몰농도가 증가할수록 유동성은 떨어지고, 응결시간은 짧아지는 경향을 보였으며, 6M 이상 사용하는 것은 유동성 및 응결시간 확보에 불리한 것으로 확인되었으나, 강도발현에는 유리한 것으로 확인되었다. 따라서, 유동성, 응결, 압축강도를 고려할 경우 NaOH의 최적 몰농도는 4M인 것으로 분석되었다.
- 2) A/B 비가 증가할수록 유동성은 떨어지고 응결은 빨라지는 것으로 나타내었는데 A/B 비가 증가함에 따라 알칼리 활성화제 중 Na_2SiO_3 의 사용량이 증가하였고 Na_2SiO_3 의 급결 특성과 높은 점성의 영향을 받은 것으로 판단되며, 압축 강도는 A/B 비가 높을수록 강도발현이 높은 것으로 나타났다. 압축강도 발현을 위한 A/B 비의 최적비는 0.35 이상인 것으로 판단되고, 유동성과 응결특성을 고려하면 A/B 비 0.35, $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 비 0.123, $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 비 0.75일 때가 최적의 비율이라고 분석되었다.
- 3) 결합재 중 화산재의 비율이 증가할수록 응결시간이 길어지는 경향을 보였지만 압축강도 발현은 떨어지는 것으로 나타났다. 고로슬래그의 비율이 응결과 압축강도 발현에 영향을 미친 것으로 판단되고, 유동성과 응결시간 확보를 위해서는 6:4, 7:3 비율이 적합하지만 강도발현을 고려하면 결합재 비 6:4 비율이 가장 적합하다고 분석되었다.
- 4) 화산재 기반 지오폐리머의 유동성, 응결 및 압축강도 발현을 위한 최적의 배합은 Na_2SiO_3 와 NaOH를 1:1 비율로 사용하고 NaOH 4M 농도를 사용하

는 것이 적합하고, A/B 비는 0.35, 화산재와 고로슬래그의 비율은 6:4로 사용하는 것이 적정하다고 판단된다.

이상의 결과로 화산재와 고로슬래그를 결합재로 사용한 지오폐리머 제조시 유동성, 응결시간 확보 및 압축강도 발현에 효과가 있는 것을 확인하였고, 화산재 기반 지오폐리머를 콘크리트로 확대하여 연구한다면 환경적 문제를 해소하는데 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

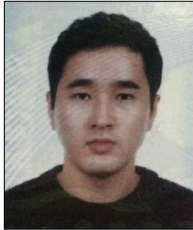
References

- [1] Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, "A Study on the Performance Improvement of Concrete using Admixture", Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology A Research Report, 2008.
- [2] F. Q. Zhao, W. Ni, H. J. Wang, H. J. Liu, "Activated fly ash/slag blended cement", *Conservation and Recycling*, vol. 52, no. 2, pp. 303-313, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.04.002>
- [3] T. Bakharev, "Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing", *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 1224-1232, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.031>
- [4] S. T. Kang, G. S. Ryu, K. T. Koh, J. H. Lee, "Optimum Mix Design of Alkali-Activated Cement Mortar using Bottom Ash as Binder", *Journal of the Korea Concrete Institute*, vol. 23, no. 4, pp. 487-494, 2011. DOI: <https://doi.org/10.4334/JKCI.2011.23.4.487>
- [5] M. Palacios, F. Puertas, "Effect of shrinkage reducing admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars and pastes", *Cement and Concrete Research*, vol. 37, no. 5, pp. 691-702, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.021>
- [6] J. Davidovits, "Geopolymers and geopolymeric materials", *Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 35, no 2, pp. 429-441, 1989. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01904446>
- [7] M. Sofi, Van. Deventer, P. A. Mendis, G. G. Lukey, "Engineering Properties of Inorganic Polymer Concretes (IPCs)", *Cement and Concrete Research*, vol. 37, no. 2, pp. 251-257, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.008>
- [8] D. Bondar, C. J. Lynsdale, N. B. Milestone, N. Hassani, A. A. Ramezani-pour, "Effect of type, form, and dosage of activators on strength of alkali-activated natural pozzolans", *Cement and Concrete Composites*, vol. 33, no. 2, pp. 251-260, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.10.021>
- [9] E. Garcia, K. Campos-Venegas, A. Gorokhovskiy, A. Fernandez, "Cementitious composites of pulverized fuel ash and blast furnace slag activated by sodium silicate:

effect of Na₂O concentration and modulus", *Advances in Applied Ceramics*, vol. 105, no. 4, pp. 201-208, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1179/174367606X120151>

남 창 식(Chang-Sik Nam)

[정회원]



- 2011년 2월 : 서울시립대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 서울시립대학교 토목공학과 박사과정

<관심분야>
콘크리트 재료