



## 가성알칼리와 탄산나트륨을 혼합한 활성화제를 사용한 알칼리 활성화 고로슬래그 모르타르의 강도 특성

김태완<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>부산대학교 생산기술연구소

## The Strength Properties of Alkali-Activated Slag Mortars by Combined Caustic Alkali with Sodium Carbonate as Activator

Tae-Wan Kim<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Research Institute of Industrial Technology, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

**ABSTRACT** This paper studies the effect of the compressive strength for combined alkali-activated slag mortars. The effect of activators such as alkali type and dosage factor on the strength was investigated. The alkalis combinations made using five caustic alkalis (sodium hydroxide (NaOH, A series), calcium hydroxide (Ca(OH)<sub>2</sub>, B series), magnesium hydroxide (Mg(OH)<sub>2</sub>, C series), aluminum hydroxide (Al(OH)<sub>3</sub>, D series), and potassium hydroxide (KOH, E series)) with sodium carbonate (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) were evaluated. The mixtures were combined in different dosage at 1M, 2M, and 3M. The study results showed that the compressive strength of combined alkali-activated slag mortars tended to increase with increasing sodium carbonate. The strength of combined alkali-activated slag mortars was better than that of control cases (without sodium carbonate). The result from scanning electron microscopy (SEM) analysis confirmed that there were reaction products of calcium silicate hydrate (C-S-H) and alumina-silicate gels from combined alkali-activated slag specimens.

**Keywords** : caustic alkalis, sodium carbonate, combined alkalis, alkali-activated slag mortar, compressive strength

### 1. 서 론

최근 환경문제에 따른 친환경, 낮은 이산화탄소 배출 기업 및 산업에 대한 관심이 증가하고 있다. 많은 기업들이 제품과 생산공정 등의 혁신을 통해 이산화탄소 배출량을 줄이고자 노력하고 있다. 그러나 건설산업의 중요 재료인 시멘트 산업은 원료의 채취 및 제품의 생산에 많은 에너지를 필요로 하고 이산화탄소의 배출량도 높다. 따라서 근래 해외연구자들은 산업부산물을 이용한 시멘트 대체 재료에 대해 다양한 연구를 시도하고 있다. 특히 플라이 애쉬, 고로슬래그, 메타카올린 등의 포졸란 반응성 물질을 함유한 재료를 사용하여 알칼리 활성화 방법을 통해 시멘트를 대체할 수 있는 재료를 연구하고 있다.<sup>1-4)</sup>

알칼리 활성화 시멘트(alkali-activated cement; AAC)는 많은 연구가 진행되고 있지만, 아직까지 명확히 규명된 메커니즘이나 배합방법, 규준 등이 없어 다양하고 많은 방

법과 결과들이 발표되고 있다. 이러한 다양성은 재료의 성분, 활성화제의 종류와 농도, 배합방법, 양생조건 등 여러 가지에 변수가 존재하기 때문으로 생각하고 있다. 해외뿐만 아니라 국내에서도 알칼리 활성화 시멘트에 대한 연구가 몇몇 연구자들에 의해 진행되고 있다.<sup>1-4,16-18)</sup> 특히 알칼리 활성화 고로슬래그 시멘트(alkali-activated blast furnace slag cement; AASC)는 제철소의 부산물인 고로슬래그 미분말을 활성화하는 것으로 이 연구에서도 고로슬래그 미분말을 이용한 활성화 시멘트의 특성에 대해 연구하고자 한다.

국내외 연구자들은 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 특성연구를 통해 다양한 성질들을 밝혀내고 있다.<sup>5-12,19,20)</sup> 특히 적절한 활성화제의 종류와 농도를 찾기 위한 연구도 진행되고 있는데, 기존의 단일 종류 활성화제 사용에서 최근에는 두 종류 이상의 활성화제 혼합사용에 대한 연구도 이루어지고 있다.<sup>8,10,11)</sup> 기존의 단일 활성화제에 의한 연구는 많이 진행되었지만, 두 종류 이상의 혼합 활성화제에 의한 연구는 아직 부족한 부분이다. 국내에서도 혼합 활성화제에 의한 연구는 수산화나트륨(NaOH)와 규산나트륨(Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)에 대한 연구가 많았으나,<sup>9)</sup> 최근에

\*Corresponding author E-mail : ring2014@naver.com

Received August 31, 2012, Revised October 25, 2012,

Accepted November 1, 2012

©2012 by Korea Concrete Institute

는 수산화나트륨(NaOH)과 탄산나트륨(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) 혼합에 의한 활성화 슬래그의 특성에 대한 연구도 진행되고 있다.<sup>5,6,13-15)</sup> 이 연구는 활성화제의 사용에 초점을 맞추어, 기존의 단독 활성화제를 사용한 활성화 방법에서 벗어나 혼합 활성화제를 사용하여 AAC의 특성을 파악하고, 콘크리트 대체 재료로서 활용 및 응용 가능성을 검토하는 기초 연구로써 두 종류의 혼합 알칼리 활성화제에 의한 AAC 모르타르의 강도 특성에 대해 살펴보려고 한다.

## 2. 실험계획

이 연구는 혼합 알칼리 활성화제에 따른 알칼리 활성화 고로슬래그 모르타르의 강도 특성에 관한 기초연구로 혼합 활성화제를 구성하는 두 종류의 활성화제는 5가지 수산화계열과 비규산계 약산염인 탄산나트륨(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)를 사용하여 각각 3가지 농도로 혼합하였다.

### 2.1 실험재료

이 연구에 사용된 고로슬래그 미분말은 포항의 K사 제품을 사용하였으며, 성분은 XRF 분석을 통해 Table 1에 나타내었다. 잔골재는 강모래를 사용하였으며, 조립률(FM) 2.7, 밀도 0.0026 g/mm<sup>3</sup>, 흡수율 1.05이다.

이 연구에서는 두 종류의 활성화제를 혼합한 알칼리 활성화 슬래그의 강도특성을 알아보기 위해 기존의 국내외 연구에서 사용된 활성화제와 추가적으로 사용하고자하는 활성화제를 포함하여 5종류의 가성알칼리(caustic alkalis; MOH)로 분류되는 수산화계열과 비규산계 약산염(non-silicate weak acid salts; M<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)인 탄산나트륨(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)을 혼합한 알칼리 활성화 슬래그 모르타르의 강도 특성에 대한 기초연구를 수행하였다.

이 연구에 사용된 알칼리 활성화제는 수산화계열의 수산화나트륨(NaOH), 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>), 수산화마그네슘(Mg(OH)<sub>2</sub>), 수산화알루미늄(Al(OH)<sub>3</sub>) 그리고 수산화칼륨(KOH)의 5가지와 비규산계 약산염인 탄산나트륨(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)를 사용하였다. 모든 시약은 국내 S사의 제품으로 고순도(extra pure) 시약이며 분말형이다.

**Table 1** Chemical and physical properties of blast furnace slag

		Blast furnace slag	
Chemical components (%)	SiO <sub>2</sub>		29.67
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		9.90
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.68
	CaO		56.03
	MgO		1.99
	TiO <sub>2</sub>		0.78
	MnO		0.37
Physical properties	Ig-loss		0.34
	Blain (m <sup>2</sup> /kg)		420
	Density		2.90

### 2.2 배합

5가지의 수산화계열 활성화제와 비규산계 약산염인 탄산나트륨은 다음과 같이 배합을 실시하였다. 우선 5가지 수산화계열 활성화제의 농도는 여러 국내외 선행연구를 참고하여 1M, 2M, 3M로 하고, 탄산나트륨의 농도를 1M, 2M, 3M의 3가지로 혼합하여 두 가지 활성화제를 혼합한 알칼리 활성화제에 따른 고로슬래그 모르타르의 강도특성을 살펴보려고 한다. 세부적인 실험 Case는 Table 2에 나타내었다.

수산화나트륨(NaOH, A series)은 기존의 선행 알칼리 활성화 시멘트에 관한 연구에 다수 사용되어왔던 재료이고, 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>, B series), 수산화마그네슘(Mg(OH)<sub>2</sub>, C series), 수산화알루미늄(Al(OH)<sub>3</sub>, D series) 그리고 수산화칼륨(KOH, E series)은 기존 선행연구가 충분하지 않아 이 연구를 통해 특성을 살펴보려고 선정하였다. 또한 탄산나트륨의 혼합에 의한 특성을 비교 분석하기 위해 탄산나트륨을 혼합하지 않은 컨트롤 케이스(control case)를 수산화나트륨(A30), 수산화칼슘(B30), 수산화마그네슘(C30), 수산화알루미늄(D30) 그리고 수산화칼륨(E30)으로 각각에 대해 준비하였다.

모르타르 시험체의 제작은 중량비로 물 : 고로슬래그 미분말 : 잔골재를 0.5 : 1 : 2.0로 하였고, 물-결합제 비(W/B)

**Table 2** Factors and levels considered

Factors	Dosage (mole)	
	NaOH	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
A Series		
A30	3	0
A11	1	1
A12	1	2
A13	1	3
A21	2	1
A22	2	2
A23	2	3
A31	3	1
A32	3	2
A33	3	3
B series		
B30	3	0
B11	1	1
B12	1	2
B13	1	3
B21	2	1
B22	2	2
B23	2	3
B31	3	1
B32	3	2
B33	3	3

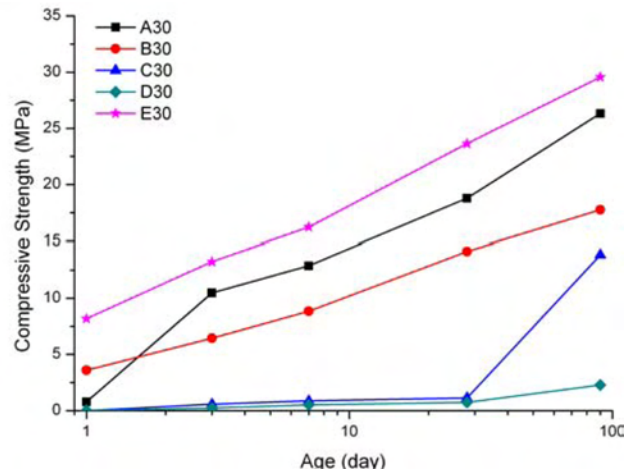
**Table 2** Factors and levels considered (continued)

Factors	Dosage (mole)	
	Mg(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
C series		
C30	3	0
C11	1	1
C12	1	2
C13	1	3
C21	2	1
C22	2	2
C23	2	3
C31	3	1
C32	3	2
C33	3	3
D Series	Al(OH) <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
A30	3	0
A11	1	1
A12	1	2
A13	1	3
A21	2	1
A22	2	2
A23	2	3
A31	3	1
A32	3	2
A33	3	3
E series	KOH	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
B30	3	0
B11	1	1
B12	1	2
B13	1	3
B21	2	1
B22	2	2
B23	2	3
B31	3	1
B32	3	2
B33	3	3

를 0.5로 하여 일정시간 비빔한 다음 50×50×50 mm 몰드에 타설하고 상대습도 60±5%, 23±2 항온항습기에 넣고 1일(24h) 후 몰드를 탈형한 뒤 측정일까지 수중양생하였다. 또한 전자주사현미경(scanning electron microscopy; 이하 SEM; HITACHI S3500N) 관찰을 위해 압축강도 측정 후 파쇄된 시편의 일부를 아세톤에 24시간 침지 후 24시간 건조시킨 다음 관찰하였다.

### 3. 결과 및 고찰

5가지 수산화계열 활성화제와 탄산나트륨을 혼합한 활성화제를 사용한 알칼리 활성화 고로슬래그 모르타르의 강도 특성을 알아보기 위해 압축강도를 측정하였다.



**Fig. 1** Compressive strength of control case (x-axis: log scale)

#### 3.1 압축강도

강도는 1, 3, 7, 28, 90일 강도를 측정하였으며 1, 3, 7 일 강도를 초기 강도로, 28, 90일을 장기 강도로 구분하여 압축강도의 특성을 살펴보았다. 우선 각각의 수산화계열 활성화제를 단독으로 사용한(탄산나트륨(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)을 혼합하지 않은) 컨트롤 케이스(control case)의 강도 특성을 Fig. 1에 나타내었다.

수산화마그네슘(C30)과 수산화알루미늄(D30)의 경우 28일까지의 강도는 다른 시험체에 비해 상대적으로 낮은 것을 볼 수 있었다. 수산화알루미늄(D30)은 90일 장기강도도 초기 강도와 마찬가지로 다른 활성화제 시험체와 비교하여 상대적으로 가장 작은 강도를 나타내었지만, 수산화마그네슘(C30)의 경우는 28일까지 낮은 강도 발현을 보이다가 90일 강도는 급격히 증가한 것을 볼 수 있었다. 따라서 두 활성화제는 단독으로 알칼리 활성화 시멘트에 사용하기 위해서는 초기강도 증진을 위한 방안이 필요할 것으로 판단된다. 수산화칼륨(E30)의 경우 초기 및 장기 강도 모두 다른 시험체와 비교하여 높은 강도를 나타내었다. 그 다음으로 초기 및 장기강도의 특성이 좋은 것은 수산화나트륨(A30)이었다.

이러한 단일 수산화계열 활성화제 사용에 의한 알칼리 활성화 슬래그 모르타르의 강도 특성은 고로슬래그의 성분, 활성화제의 농도, 양생온도 등의 여러 요인이 있겠지만, 이 실험의 활성화제 조건만을 고려하면 금속이온의 수산화이온(OH<sup>-</sup>) 해리도와도 관계가 있을 것으로 판단된다.

이 연구에 사용된 수산화계열 활성화제의 해리도는 K > Ca > Na > Mg > Al 순서로 수산화이온(OH<sup>-</sup>)의 분리가 상대적으로 빠르고 쉬운 수산화칼륨(E30), 수산화칼슘(B30), 수산화나트륨(A30) 등이 초기 강도가 빠르게 발현되고, 수산화이온(OH<sup>-</sup>) 분리 정도가 상대적으로 낮은 수산화마그네슘(C30)과 수산화알루미늄(D30)은 초기 강도가 늦게 발현되는 것으로 판단된다. 이러한 수산화이온 해리도 차이에 의한 압축강도 특성은 탄산나트륨을

혼합한 경우의 강도 특성에도 일정 부분 영향을 주는 것으로 생각된다.

### 3.1.1 수산화계열 활성화제(MOH)의 영향

수산화계열 활성화제에 탄산나트륨을 혼합한 혼합 활성화제를 사용한 알칼리 활성화 슬래그 모르타르 시험체의 압축강도는 Fig. 2에 나타내었다.

탄산나트륨의 혼합에 따른 강도 특성에 영향을 미치는 수산화계열 활성화제의 종류와 농도에 따른 강도 특성을 살펴보았다. 이를 위해 탄산나트륨의 농도를 일정하게 하고, 그때 수산화계열 활성화제의 농도를 1M, 2M, 3M로 변화시켜 혼합 활성화제에 따른 알칼리 활성화 슬래그 모르타르의 강도 특성을 살펴보았다.

각각의 수산화계열 활성화제에 탄산나트륨을 혼합한

혼합 활성화제를 사용한 알칼리 활성화 슬래그 모르타르 시험체의 압축강도는 탄산나트륨을 혼합하지 않은 경우와 비교하여 모두 강도가 증가한 것을 볼 수 있었다.

수산화나트륨과 탄산나트륨을 혼합한 경우(A series)는 탄산나트륨의 농도가 일정할 때, 수산화나트륨의 농도가 증가하면 압축강도는 감소하는 경향을 보이고 있다. 수산화칼륨과 탄산나트륨을 혼합한 경우(E series)와 수산화칼슘(B series)도 유사한 경향을 보이고 있었다. 그러나 수산화칼륨(E series)의 경우 탄산나트륨의 농도가 3M일 때 강도가 다른 농도의 탄산나트륨의 경우보다 낮은 강도발현을 보이는 것이 관찰되었다. 이는 탄산나트륨이 일정 이상의 농도로 혼합되면 수산화이온의 활성화 반응을 초기에 방해하는 것으로 판단된다.

수산화마그네슘과 탄산나트륨을 혼합한 경우(C series)

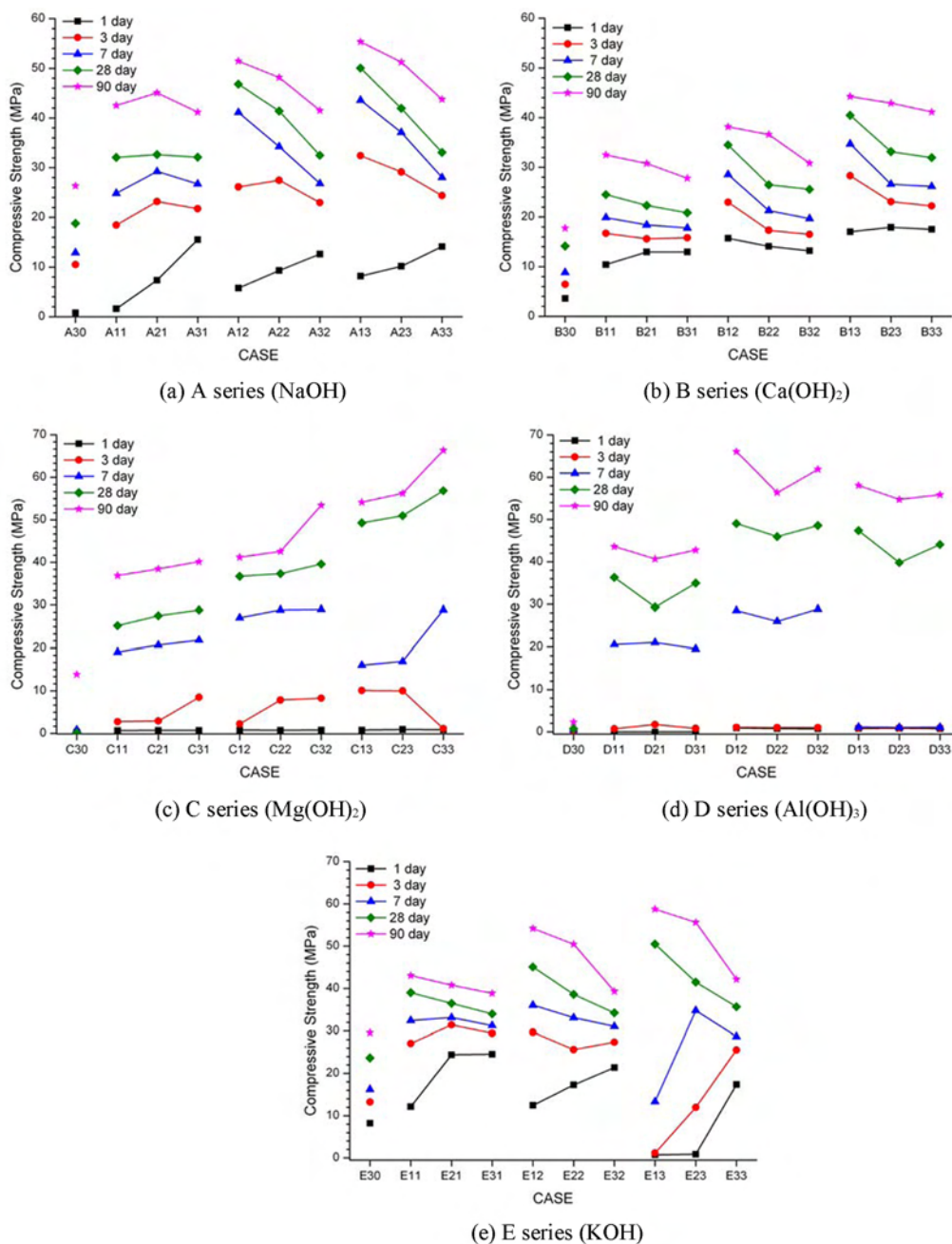


Fig. 2 Compressive strength of combined-alkali activated slag mortar

는 1일 강도가 거의 발현되지 못하였고, 3일 강도도 크지 않았다. 또한 수산화알루미늄의 경우(D series)는 1, 3일 강도 모두 1MPa 이하의 낮은 값을 나타내었다. 수산화마그네슘과 수산화알루미늄은 단독 활성화제로 사용하였을 경우에도 알칼리 활성화 슬래그 모르타르의 초기 강도가 다른 활성화제 시험체에 비해 상당히 낮은 값을 나타내었다. 그러나 수산화마그네슘(C series)와 수산화알루미늄(D series)의 혼합 활성화제의 28일과 90일 장기강도는 다른 활성화제 혼합 시험체의 강도보다 크게 향상된 것을 볼 수 있었다.

수산화마그네슘(C series)의 경우는 동일 탄산나트륨 농도에 대해 수산화마그네슘의 농도가 증가하면 압축강도도 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 수산화알루미늄(D series)의 경우는 수산화알루미늄의 농도가 1M일 때가 가장 큰 강도를 나타내었고, 수산화알루미늄의 농도가 2M일 때 가장 작은 강도를 나타내었다.

는 1일 강도가 거의 발현되지 못하였고, 3일 강도도 크지 않았다. 또한 수산화알루미늄의 경우(D series)는 1, 3일 강도 모두 1MPa 이하의 낮은 값을 나타내었다. 수산화마그네슘과 수산화알루미늄은 단독 활성화제로 사용하였을 경우에도 알칼리 활성화 슬래그 모르타르의 초기 강도가 다른 활성화제 시험체에 비해 상당히 낮은 값을 나타내었다. 그러나 수산화마그네슘(C series)와 수산화알루미늄(D series)의 혼합 활성화제의 28일과 90일 장기강도는 다른 활성화제 혼합 시험체의 강도보다 크게 향상된 것을 볼 수 있었다.

### 3.1.2 탄산나트륨( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )의 영향

Fig. 3은 동일 수산화제열 활성화제 농도에 대한 탄산나트륨의 농도를 1M, 2M, 3M로 변화시켜 혼합한 활성화제를 사용한 알칼리 활성화 슬래그 모르타르의 압축강도 특성을 나타내었다. 이를 통해 탄산나트륨의 혼합 및 혼합 농도가 압축강도에 미치는 영향을 알아보려고 하였다.

수산화제열 활성화제와 탄산나트륨을 혼합한 시험체의 압축강도는 탄산나트륨의 혼합 농도가 증가할수록 압축강도도 증가하는 경향을 나타내었다.

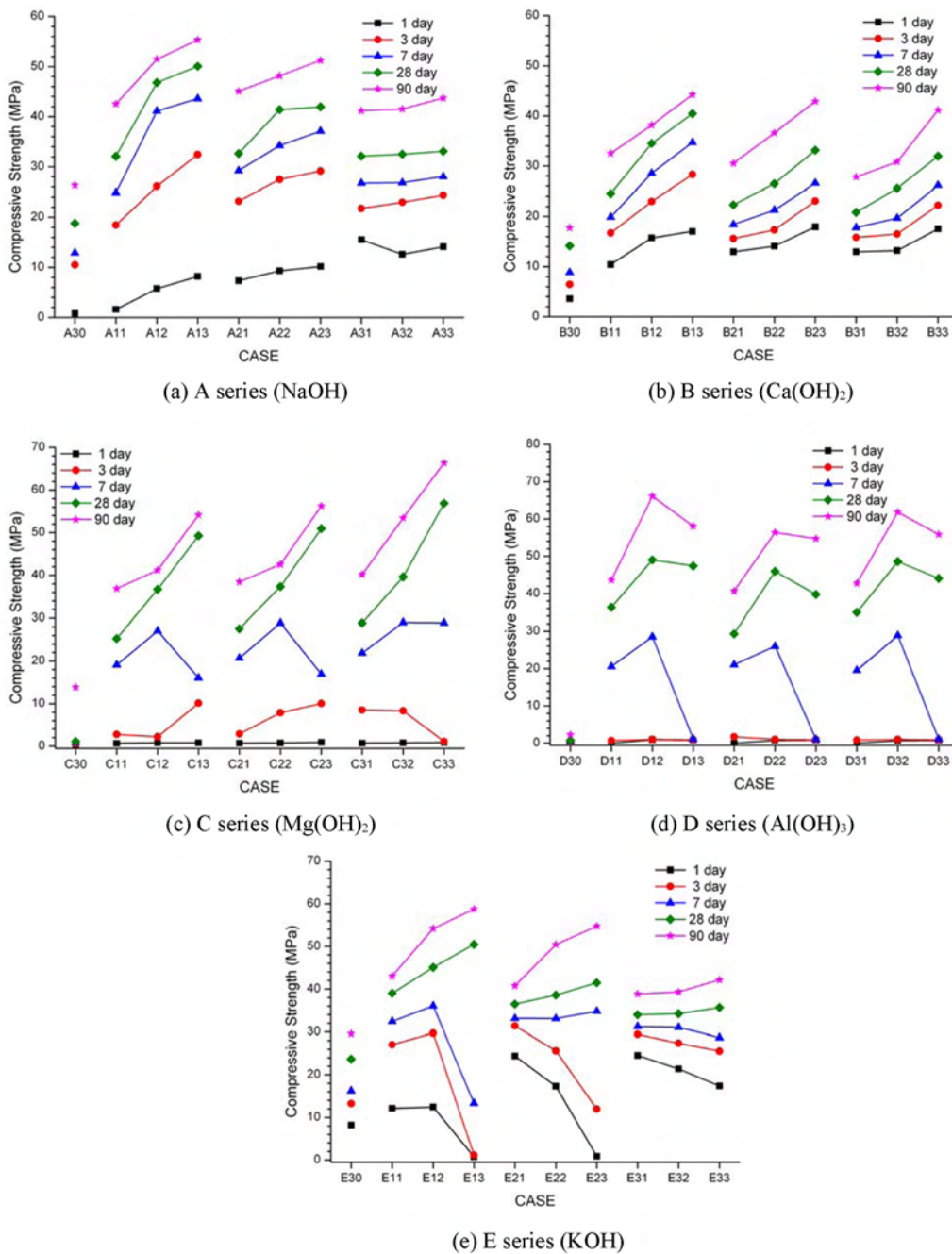


Fig. 3 Compressive strength of combined-alkali activated slag mortar



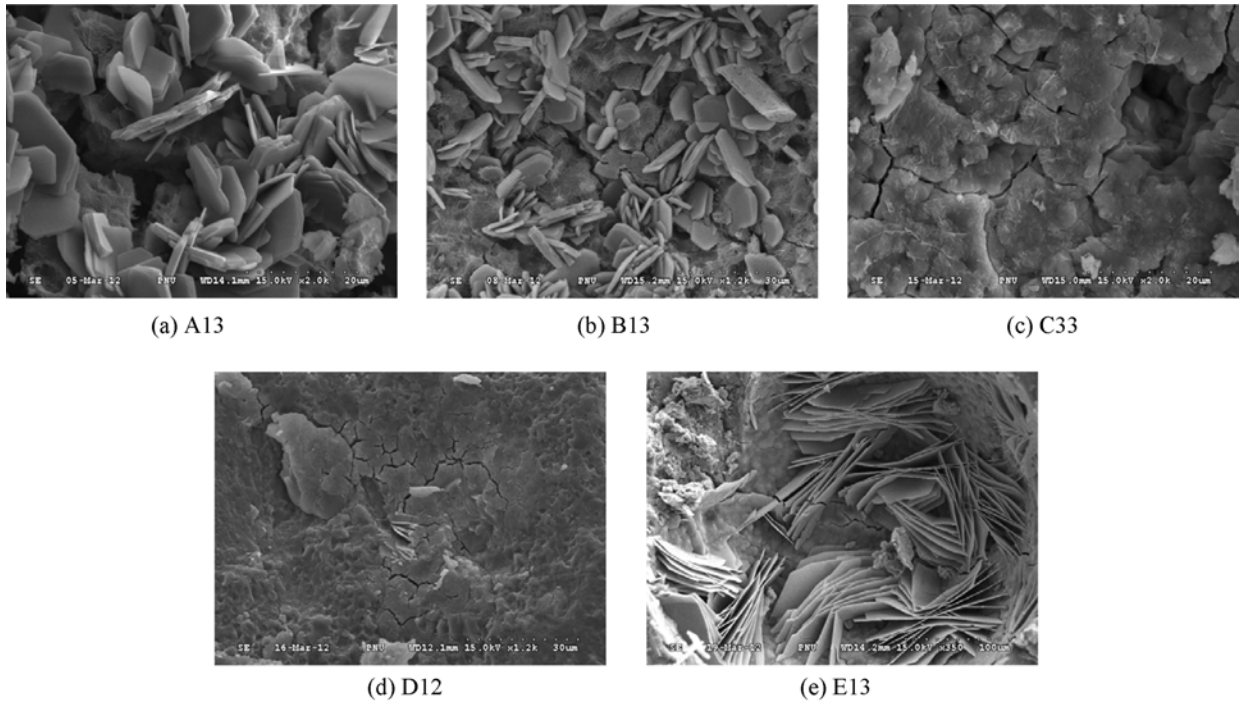


Fig. 4 SEM images at 28 days

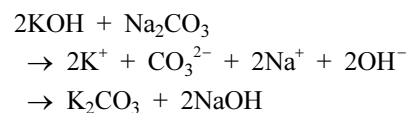
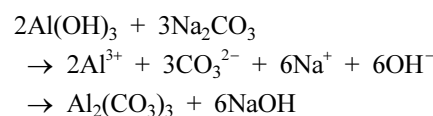
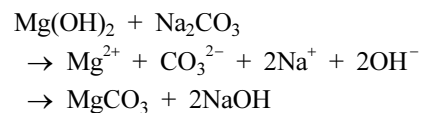
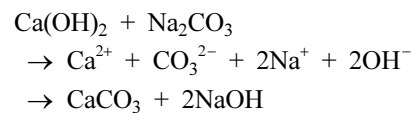
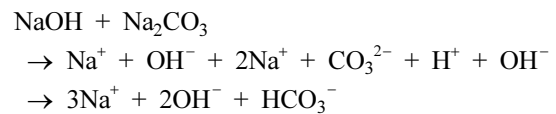
그러나 수산화알루미늄(D series)의 경우는 탄산나트륨의 농도가 2M일때 강도가 가장 크게 나타났으며 그 다음으로 3M과 1M의 순서였다. 수산화마그네슘(C series)과 수산화알루미늄(D series)은 초기 강도의 발현이 다른 시험체와 비교하여 상대적으로 작은 것을 볼 수 있었다. 그러나 28일 이후의 장기강도는 다른 시험체와 비교하여 급격히 증가된 것을 볼 수 있었다. 따라서 탄산나트륨은 수산화마그네슘과 수산화알루미늄의 활성화 반응을 증대시키는 것으로 판단되지만, 초기 강도를 증가시키기 위한 추가적인 방법이나 혼합체의 선택 등이 고려되어야 할 것으로 판단된다. 강도 시험 결과 1, 3 7일의 초기 강도의 발현이 양호하다고 판단되는 것은 수산화나트륨(A series), 수산화칼슘(B series) 그리고 수산화칼륨(E series) 이었고, 28, 90일 장기강도가 우수한 것은 수산화마그네슘(C series)과 수산화알루미늄(D series)로 나타났다.

혼합한 활성화제에 의한 알칼리 활성화 슬래그 모르타르의 최고 강도는 수산화나트륨(A series), 수산화칼슘(B series), 수산화마그네슘(C series) 그리고 수산화칼륨(E series)는 탄산나트륨의 농도가 3M인 A13, B13, C33, E13일 때였다. 그러나 수산화알루미늄(D series)은 탄산나트륨의 농도가 2M인 D12에서 최고 강도가 측정되었다.

탄산나트륨과 비교하여 상대적으로 낮은 농도의 수산화계열 활성화제의 혼합으로 탄산나트륨과의 혼합 활성화제에 의한 고로슬래그의 활성화 효과를 높일 수 있는 것으로 생각된다.

탄산나트륨과 5가지의 수산화계열 활성화제의 혼합에 의한 강도 특성을 통해 다음과 같은 활성화제의 반응으로 반응생성물질들과 수산화기(OH<sup>-</sup>)로 인해 고로슬래그의 반응성이 증대되고, 강도 증진에 영향을 주는 것으로

판단된다. 특히 수산화나트륨과 탄산칼슘의 반응은 기존의 연구<sup>6)</sup>에서 그 반응을 분석하여 제시되어 있었다.



이러한 반응을 통해 생성된 수산화기(OH<sup>-</sup>) 이외에 반응생성물질들이 강도에 미치는 영향을 파악하기 위한 추가적인 미세분석이 필요할 것으로 생각한다.

### 3.2 SEM 관찰

각 시험체의 혼합체의 강도 특성을 살펴보기 위해 SEM 관찰을 통해 반응 생성물질을 살펴보았다. 일부 시험체

는 초기 강도가 거의 발현되지 않아 관측의 어려움이 있어 28일 시험체의 시편을 관찰하였다. 이미지 관찰 시험체는 각각의 수산화계열과 탄산나트륨을 혼합한 혼합 활성화제를 사용한 알칼리 활성화 슬래그 모르타의 압축강도 중 최고 강도를 나타낸 시험체를 선택하였다. Fig. 4는 SEM 관측을 통해 관측된 시험체의 일부부분이다.

SEM 관찰 결과 수산화나트륨(A13), 수산화칼슘(B13) 그리고 수산화칼륨(E13)에서는 반응생성물인 C-S-H (calcium silicate hydrate) gel 사이에 아직도 많은 관상의  $\text{Ca(OH)}_2$ 가 발견되었고 미반응 슬래그입자들도 보이고 있다. 수산화계열 알칼리 활성화제의 수산화이온( $\text{OH}^-$ )이 고로슬래그의 유리구조나 알루미늄 규산염 중의 Si-O나 Al-O 결합을 파괴하여 Si나 Al을 함유하고 있는 이온의 용해를 촉진시키는데, 이렇게 용출된 이온은 수경성 물질로서 C-S-H gel과 aluminosilicate gel을 생성하고 경화하게 된다.<sup>12,21)</sup> 이 연구에 사용된 혼합 활성화제들은 단독 활성화제를 사용한 경우보다 고로슬래그의 활성화 반응을 더욱 촉진시켜, 반응생성물을 다량으로 생성시켜 강도 향상에 기여하는 것으로 판단된다.

그러나 수산화마그네슘(C33)과 수산화알루미늄(D12)에서는 관상의  $\text{Ca(OH)}_2$  형상은 거의 찾아볼 수 없었고 C-S-H gel의 반응생성물질을 형성하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 다른 혼합 활성화제와 달리 초기 반응성이 상당히 작아 강도 발현이 거의 이루어지지 않다가 재령이 7일 이상 지난 후에 서서히 활성화 반응이 일어나 SEM 관측시점이 28일에는 상당한 활성화 반응이 진행되어  $\text{Ca(OH)}_2$ 가 다량 소모되어 관측되지 않았던 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

혼합한 알칼리 활성화제에 의한 알칼리 활성화 슬래그 모르타르의 강도 특성을 알기 위한 기초연구에서 다음과 같은 결과를 알 수 있었다.

- 1) 5가지의 수산화계열 활성화제를 단독으로 사용한 경우보다 탄산나트륨을 혼합한 경우의 알칼리 활성화 슬래그 모르타르의 압축강도는 증가되었음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 탄산나트륨의 혼합이 수산화계열 활성화제와 함께 고로슬래그의 활성화를 증대시키는 것으로 판단된다.
- 2) 이 연구에서는 기존의 국내외 연구에서 거의 사용되지 않았던 수산화계열 활성화제 중 수산화마그네슘(C case)과 수산화알루미늄(D case)을 사용하여 혼합 활성화제로서의 사용 가능성을 알아보았다. 연구결과 탄산나트륨과의 혼합 활성화제를 사용한 경우에 28일 이후의 장기 강도발현이 우수한 것을 발견할 수 있었다. 그러나 수산화마그네슘과 수산화알루미늄을 탄산나트륨과의 혼합 활성화제로 사용한 경우, 초기강도가 작고 장기강도 발현까지의 시간을 고려하여 초기강도 증진을 위한 방법이 고려되어야 할 것

으로 판단된다.

- 3) 5종류의 수산화계열과 탄산나트륨의 혼합 활성화제의 강도 특성에서 수산화나트륨계열 활성화제의 금속 양이온과 수산화기( $\text{OH}^-$ )의 해리도에 따른 활성화 특성의 차이가 강도에 일정 부분 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이는 수산화계열 활성화제를 단독으로 사용한 경우의 강도 특성에도 잘 나타나고 있다. 따라서 본 연구에서 고려한 해리도의 영향도 혼합 활성화제를 배합할 경우 고려되어야 할 것으로 판단된다.
- 4) 수산화계열과 탄산나트륨의 혼합은 활성화 반응을 통해 C-S-H gel과 aluminosilicate gel 생성을 촉진하여 강도 증진에 효과적인 것으로 판단된다. 이는 단독 활성화제 사용의 경우보다 혼합 활성화제를 사용한 고로슬래그는 활성화 반응이 증대되어 반응생성물의 양이 증가하고, 생성물질간의 구조 형성을 더욱 치밀하게 하여 시험체의 강도를 향상시키는 것으로 생각된다.

혼합 활성화제에 의한 알칼리 활성화 슬래그 모르타르의 강도 특성을 살펴본 본 연구에서, 두 종류의 알칼리 활성화제의 혼합은 강도 향상 측면에서 긍정적인 효과가 있음을 알 수 있었다. 그러나 활성화제의 종류 및 농도의 선정에는 추가적인 연구와 미세분석을 통한 명확한 메커니즘 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. Caijun Shi, A. Fernandez Jimenez, and Angel Palomo, "New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement," *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, 2011, pp. 750-763. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.016>)
2. Roy, D. M., "Alkali-Activated Cements: Opportunities and Challenges," *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, 1999, pp. 249-254.
3. Palomo, A., Grutzeck, M. W., and Blanco, M. T., "Alkali Activated Fly Ashes: A Cement for the Future," *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, 1999, pp. 1323-1329.
4. Wang, S., Pu, X. C., Scrivener, K. L., and Pratt, P. L., "Alkali-Activated Slag Cement and Concrete; a Review of Properties and Problems," *Advances in Cement Research*, Vol. 7, 1995, pp. 93-102.
5. Lee, C. T., "A Study on Properties of Non-Cement Mortar with Alkali Activators," Graduate School Chonnam National University, 2010, pp. 53-54.
6. Kim, G. W., Kim, B. J., Yang, K. H., and Song, J. K., "Strength Development of Blended Sodium Alkali-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag (GGBS) Mortar," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 2, 2012, pp. 137-145. (doi: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2012.24.2.137>)
7. Ahn, J. W., Cho, J. S., Kim, H. S., Han, G. C., Han, K. S., and Kim, H., "Activation Property of Blast Furnace Slag by Alkaline Activator," *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol. 40, No. 10, 2003, pp. 1005-1014.

8. Lee, H. S. and Jee, N. Y., "An Experimental Study on Strength Properties of Alkali Activated Slag Mortars with Different Activator Type and Curing Temperature," *The 60th Anniversary & Annual Conference of AIK*, Vol. 25, No. 1, 2005, pp. 349-352.
9. An, Y. J., Mun, K. J., Soh, S. Y., and Soh, Y. S., "The Properties of Alkali Activated Slag Mortars Using Sodium Silicate with Activator," *Proceeding of Annual Conference of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 26, No. 1, 2006, pp. 341-344.
10. Lee, Y. J., Jee, N. Y., and Kim, J. H., "The Experimental Study for Application of Alkali Activated Slag Concrete," *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 23, No.2, 2007, pp. 99-106.
11. We, J. W., Kim, S. H., Kim, S. H., Ji, S. W., Choi, S. K., and Seo, C. H., "An Experimental Study on Lightweight Aggregate Blast Furnace Slag Concrete by Alkali-Activated Reaction," *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 26, No. 9, 2010, pp. 87-94.
12. Kang, H. Y., Kang, H. B., and Park, S. S., "Strength Behavior and Microstructure of Alkali-Activated Slag Cement Concrete," *Journal of Korea Society of Waste Management*, Vol. 27, No. 5, 2010, pp. 405-414.
13. Collins, F. and Sanjayan, J. G., "Early Age Strength and Workability of Slag Pastes Activated by NaOH and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>," *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, 1998, pp. 655-664.
14. Li, Y. and Sun, Y., "Preliminary Study on Combined-Alkali-Slag Paste Materials," *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, 2000, pp. 963-966.
15. Collins, F. and Sanjayan, J. G., "Early Age Strength and Workability of Slag Pastes Activated by NaOH and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>," *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, 1998, pp. 655-664.
16. Jo, B. W., Park, S. K., and Kwon, B. Y., "Alkali-Activated Coal Ash (Fly Ash, Bottom Ash) Artificial Lightweight Aggregate and Its Application of Concrete," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 16, No. 6, 2004, pp. 751-757.
17. Yang, K. H. and Song, J. K., "The Properties and Applications of Alkali-Activated Concrete with No Cement," *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 19, No. 2, 2007, pp. 42-48.
18. Park, S. S., Kang, H. Y., Han, S. H., and Kang, H. B., "Effects of NaOH and Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O Addition on Strength Development of Class F Fly Ash-Mortar," *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 9, No. 4, 2005, pp. 261-269.
19. Atis, C. D., Bilim, C., Celik, Ö., and Karahan, O., "Influence of Activator on the Strength and Drying Shrinkage of Alkali-Activated Slag Mortar," *Construction and Building Materials*, Vol. 23, 2009, pp. 548-555.
20. Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., and Jalali, S., "Alkali-Activated Binders: A Review: Part 1. Historical Background, Terminology, Reaction Mechanisms and Hydration Products," *Construction and Building Materials*, Vol. 22, 2008, pp. 1315-1322.
21. Puertas, F., Fernandez-Jimenez, A., and Blanco-Varela, M. T., "Pore Solution in Alkali-Activated Slag Cement Pastes. Relation to the Composition and Struction of Calcium Silicate Hydrate," *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2004, pp. 139-148.

**요약** 이 연구는 혼합 알칼리 활성화 슬래그 모르타르의 압축강도에 미치는 영향에 관한 것이다. 활성화제의 효과는 활성화제의 종류, 농도 등이 강도에 영향을 미치는 것으로 알려져있다. 혼합 활성화제는 5가지 가소성 알칼리(수산화나트륨, 수산화칼슘, 수산화마그네슘, 수산화알루미늄, 수산화칼륨)와 탄산나트륨(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)를 혼합하였다. 배합은 각 활성화제를 1M, 2M, 그리고 3M의 서로 다른 농도로 하였다. 압축강도 결과는 혼합 알칼리 활성화 슬래그 모르타르는 탄산나트륨의 농도가 증가하면 증가하는 것으로 나타났다. 혼합 활성화제를 사용한 알칼리 활성화 슬래그 모르타르는 모든 재령과 시험체가 탄산나트륨을 혼합하지 않은 컨트롤 케이스보다 향상된 강도를 나타내었다. 전자주사현미경(SEM) 관찰 결과 활성화 반응으로 C-S-H와 aluminosilicate gel이 생성된 것을 볼 수 있었다.

**핵심용어** : 가소성 알칼리, 탄산나트륨, 혼합 알칼리, 알칼리 활성화 슬래그 모르타르, 압축강도