



## 혼합된 나트륨계열 활성화제에 의한 고로슬래그 기반 모르타르의 강도발현 특성

김건우<sup>1)</sup> · 김병조<sup>1)</sup> · 양근혁<sup>2)</sup> · 송진규<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>전남대학교 건축공학과 <sup>2)</sup>경기대학교 건축공학과

## Strength Development of Blended Sodium Alkali-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag (GGBS) Mortar

Geon-Woo Kim,<sup>1)</sup> Byeong-Jo Kim,<sup>1)</sup> Keun-Hyeok Yang,<sup>2)</sup> and Jin-Kyu Song<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea

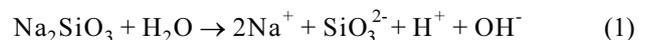
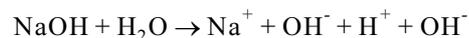
**ABSTRACT** Strength model for blasted furnace slag mortar blended with sodium was investigated in this study. The main parameters of AAS (alkali activated slag) mortar were dosage of alkali activator, water to binder ratio (W/B), and aggregate to binder ratio (A/B). For evaluating the property related to the dosage of alkali activator, sodium carbonate (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) of 4~8% was added to 4% dosage of sodium hydroxide (NaOH). W/B and A/B was varied 0.45~0.60 and 2.05~2.85, respectively. An alkali quality coefficient combining the amounts of main compositions of source materials and sodium oxide (Na<sub>2</sub>O) in sodium hydroxide and sodium carbonate is proposed to assess the compressive strength of alkali activated mortars. Test results clearly showed that the compressive strength development of alkali-activated mortars were significantly dependent on the proposed alkali quality coefficient. Compressive strength development of AAS mortars were also estimated using the formula specified in the previous study, which was calibrated using the collected database. Predictions from the simplified equations showed good agreements with the test results.

**Keywords** : ground granulated blast-furnace slag, sodium hydroxide, sodium carbonate, alkali-activator

### 1. 서 론

온실가스로 인한 기후변화 및 지구온난화는 이미 전 세계의 모든 국가에 심각한 위협이 되고 있으며 온실가스 감축은 더 이상 환경적 문제뿐만 아니라 경제적 문제와도 직결되고 있다. 시멘트산업에서도 보통 포틀랜드 시멘트(ordinary portland cement, OPC) 제조시 방출되는 이산화탄소 감축을 위해 플라이 애쉬(fly ash, FA)나 고로슬래그(ground granulated blast furnace slag, GGBS) 그리고 실리카 폼과 같은 산업부산물을 OPC에 대해 부분적으로 치환한 콘크리트의 사용이 점차 보편화 되고 있다. 이러한 노력의 일환으로 원재료로 플라이 애쉬나 고로슬래그를 사용한 알칼리 활성화 바인더에 대한 연구가 전세계적으로 증가하고 있다.<sup>1-5)</sup> 수산화 알칼리(MOH, M은 나트륨, 칼륨, 리튬 등)와 약산의 비규산염(M<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, M<sub>2</sub>S, MF), 또는 규산염(M<sub>2</sub>O(n)SiO<sub>2</sub>)은 일반적으로 가장

효과적인 활성화제로 알려져 있다.<sup>1,6,7)</sup> 또한 수산화나트륨(NaOH) 수용액과 규산나트륨(Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) 수용액은 일반적으로 우수한 성능을 가진 활성화제로 평가되고 있다.<sup>2,5,7)</sup> Table 1은 규산나트륨과 수산화나트륨을 활성화제로 사용한 알칼리 활성화 모르타르의 압축강도 결과이다. 규산나트륨(Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)의 경우는 첨가량이 증가할수록 강도증진의 효과가 나타난다. 하지만 수산화나트륨의 경우는 일정량을 초과해서 첨가할 경우는 오히려 강도가 감소하게 된다. 이는 규산나트륨의 경우는 물과 반응할 경우 식(1)과 같이 규산나트륨에서 발생한 규산 음이온이 물에서 발생한 수소 양이온과 결합하여 새로운 음이온을 생성하지만 수산화나트륨은 물에서 생성된 수소 양이온이 수산화 음이온의 활동을 방해하기 때문인 것으로 판단된다.



\*Corresponding author E-mail : jgsong@jnu.ac.kr

Received November 3, 2011, Revised February 7, 2012,

Accepted February 27, 2012

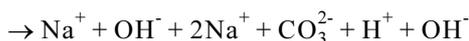
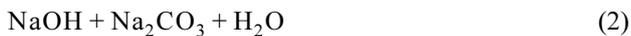
©2012 by Korea Concrete Institute

**Table 1** Compressive strength of activated mortar

Materials		Compressive strength (MPa)			
Source material	Activator content (%)	3 days	7 days	28 days	
GGBS	NaOH	2	3.57	10.34	13.34
		3	10.62	14.72	17.70
		4	10.70	14.98	18.03
		5	9.88	14.40	17.20
		6	9.13	12.22	15.43
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	2	7.99	9.19	13.20
		3	9.17	10.63	14.59
		4	10.83	12.39	16.45
		5	12.15	14.84	18.23
		6	13.03	15.42	19.51

수산화나트륨을 활성화제로 사용한 알칼리 활성 모르타르의 최적 첨가량에 대한 Purdon<sup>8)</sup>의 연구를 살펴보면, 알칼리 활성 모르타르에 첨가된 수산화나트륨의 농도에 따라 강도가 증가하지만, 수산화나트륨의 증가에도 불구하고 강도의 증가 경향이 나타나지 않는 안정기(plateau)가 존재하고 안정기 이후에는 강도가 감소하는 것으로 나타났다. 또한 Jolicoeur 등<sup>9)</sup>은 수산화나트륨 5% 이상을 바인더에 첨가하게 되면 강도가 감소하게 된다는 연구 결과를 발표하였는데, 이러한 경향은 Table 1의 실험 결과와도 일치한다.

따라서, 수산화나트륨을 단독으로 첨가한 경우에 발생하는 단점을 해결하고자 다양한 활성화제를 선택/분류하여 이들의 응결 여부를 판단하고, 더 나아가 활성화제의 혼합을 시도하였다.<sup>10)</sup> 그 결과 강도의 측면에서 가장 우수한 성능을 나타낸 조합인 수산화나트륨과 탄산나트륨의 조합을 선택하여 이 실험을 진행하였다. 이 조합은 식 (2)에서 나타난 바와 같이 수산화나트륨을 탄산나트륨(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)과 혼합해서 첨가할 경우 수산화나트륨 단독으로 첨가한 경우와는 달리 탄산 음이온이 생성된다. 이때 발생한 탄산 음이온이 수소 양이온과 결합하여 새로운 음이온을 생성하여 수산화 음이온의 활동을 방해하는 요소를 제거함으로써 성능의 향상을 도모할 수 있을 것으로 판단되었다.



고로슬래그 기반 알칼리 활성 모르타르 강도의 특성에 영향을 주는 요인은 매우 다양하다.<sup>12-14)</sup> 기존 연구<sup>11)</sup>에서는 분말형의 규산나트륨이 알칼리 활성화제로 사용된 모르타르를 물-바인더 비, 원재료의 분말도, 잔골재율 등에 따라 그 특성을 분석하였다. 또한 바인더의 주요 구성성

**Table 2** Chemical composition of blast furnace slag

Source material	Chemical composition (wt%)								
	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
GGBS	4.38	13.8	34.7	0.95	0.48	44.6	0.74	0.24	0.11

분에 따른 알칼리 품질계수(alkali quality coefficient, Q<sub>A</sub>)를 정의하고 초기 플로우와 28일 압축강도 예측식을 제시하였다. 따라서 이 연구에서는 pH, 수화발열 온도, 활성화제의 첨가량, 물-바인더비 그리고 골재-바인더비의 변화에 따른 강도와 상관관계를 살펴보고 알칼리 품질계수(Q<sub>A</sub>)의 개념을 적용하여 수산화나트륨과 탄산나트륨이 조합된 활성화제에 의한 모르타르의 28일 압축강도 예측식을 제시하였다.

## 2. 실험 개요

### 2.1 사용 재료

#### 2.1.1 골재(aggregate)

모래는 전라남도 해남에서 채취한 골재를 사용하였으며, KS 품질기준에 따라 물리적 성질 및 유해물질을 측정하고 결과 모두 기준에 적합하였고, 표건 밀도는 2.58 kg/m<sup>3</sup>로 측정되었다.

#### 2.1.2 고로슬래그

이 실험에서 사용한 고로슬래그는 KS F 2563 콘크리트용 고로슬래그 미분말 규정을 만족하는 국내 G사의 고로슬래그 미분말 3종 분말도(4,204 cm<sup>2</sup>/g)를 사용하였으며 비중은 2.93, 염기도는 1.81로 기준에 적합하였다. 그리고 화학조성은 Table 2와 같다.

#### 2.1.3 알칼리 활성화제(alkaline activators)

알칼리 활성화제는 가성알칼리(caustic alkalis, MOH) 계열 즉, 수산화계열에 속하는 수산화나트륨과 비규산계약산염(non-silicate weak acid salts, M<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, M<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, M<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, MF등)계열인 탄산나트륨을 사용하였다. 활성화제는 모두 분말형의 95%이상의 순도를 갖는 제품을 사용하였다.

### 2.2 실험 방법 및 측정 항목

재료는 중량 비로 계량한 후 고로슬래그, 모래 그리고 활성화제를 30초 동안 건비빔을 실시하고 배합수를 혼입 후 30초 동안 5/ 전동혼합기로 배합 후 모르타르 압축강도 측정용 금속몰드(50 × 50 × 50 mm)에 채워넣었다. 재령별 시험체는 각각 3개씩 제작하여 온도 23 ± 5°C, 습도 70 ± 5%의 항온항습실에서 24시간 양생 후 몰드에서 탈형하고 동일 조건에서 기건양생을 실시하였다. 이 실험에서는 KS F 2426에 의하여 압축강도 실험은 실시하였다.

### 2.3 실험 변수

Table 3은 각 변수의 변화에 따른 배합표를 나타낸 것이다. 고로슬래그 기반 알칼리 활성 모르타르는 원재료인 고로슬래그(GGBS)에 대한 산화나트륨( $\text{Na}_2\text{O}$ )의 첨가량과 함께 활성화제가 포함된 바인더의 분말도가 강도발현에 큰 영향을 미친다.<sup>4)</sup> 따라서 바인더의 구성요소인 활성화제의 첨가량과 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)에서와 마찬가지로 강도에 크게 영향을 미치는 골재율과 물-바인더비를 변수로 사용하였으며, 이 연구에서는 바인더의 분말도는 변수에서 제외하였다.

서론에서 언급한 바와 같이 활성화제는 수산화나트륨과 탄산나트륨 조합을 사용하였다. 따라서 초기 변수는

Table 3 Mix proportion

No	Binder (wt%)			S/B	W/B	
	GGBS	SH	SC			
55-245-34	93	3	4	2.45	0.55	
55-245-35	92		5			
55-245-36	91		6			
55-245-37	90		7			
55-245-38	89		8			
55-245-44	92		4			4
55-245-45	91					5
55-245-46	90					6
55-245-47	89	7				
55-245-48	88	8				
50-205-46	90	4		6	2.05	0.5
50-225-46					2.25	
50-245-46					2.45	
50-265-46			2.65			
50-285-46			2.85			
45-245-46			2.45		0.45	
50-245-46						0.50
55-245-46						0.55
60-245-46						0.60

00-000-00 GGBS: ground granulated blast furnace slag, SH: sodium hydroxide, SC: sodium carbonate, S: sand, B: binder, W: water

각 알칼리제의 첨가량으로 설정하여 Table 1의 예비 실험 결과를 토대로 강도가 높게 발현된 수산화나트륨의 첨가량을 3%와 4%로 고정하고 탄산나트륨을 4~8%까지 1%씩 조정하였다. 골재량은 KS L 5105에 따라 모르타르 제조 시 기준이 되는 2.45를 중심으로 2.05부터 2.85까지 0.2씩 변화를 주며 측정하였고, 물-바인더비(W/B)는 0.45~ 0.6까지 0.05단위로 조정하여 변수를 설정하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 유동성 및 응결 특성

##### 3.1.1 플로우 실험 결과

아래의 Fig. 1은 각 변수의 변화에 따른 플로우의 결과를 나타낸 그래프이다. (a)는 활성화제의 첨가량 변화에 따른 초기 플로우 실험 결과로 그림에서 보는 바와 같이 수산화나트륨이 3% 첨가되었을 때가 수산화나트륨 4% 첨가되었을 때보다 유동성이 더 좋은 것으로 나타났다. (b)는 물-바인더비의 변화에 따른 결과로 물의 첨가 비율이 증가할수록 유동성은 점차 선형으로 증가함을 알 수 있었다. 그리고 (c)는 골재-바인더비의 변화 따른 결과로 그림에서 보는 바와 같이 골재의 첨가 비율이 증가할수록 유동성은 점차 감소하였다.

##### 3.1.2 응결시간 측정 결과

이 연구에서는 모르타르의 기본적인 물리적 특성 중의 하나인 응결시간을 KS F 2436에 따라서 측정하였다. 규정에 따라 초결은 3.5 MPa 그리고 종결은 28 MPa로 정의한 후 활성화제의 종류에 따라서 응결시간을 측정할 결과는 Fig. 2와 같다. 활성화제를 조합하지 않고 수산화나트륨을 단독으로 첨가한 배합의 응결시간 측정 결과, 활성화제 농도에 따라 초결, 종결시간은 비례하여 변화하지 않고 5% 경우에는 4%에 비해 응결시간이 다소 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 특성은 농도에 따라 압축강도가 증가하다가 어느 수준 이상에서 감소하는 Table 1의 결과와도 일치한다고 할 수 있다. Fig. 2의 (b), (c)를 살펴보면 수산화나트륨 3%가 첨가된 경우의 응결시간은 수산화나트륨이 단독으로 첨가된 경우에 비해서 탄산나트륨과 혼합된 경우에 응결시간이 더욱 단축됨을

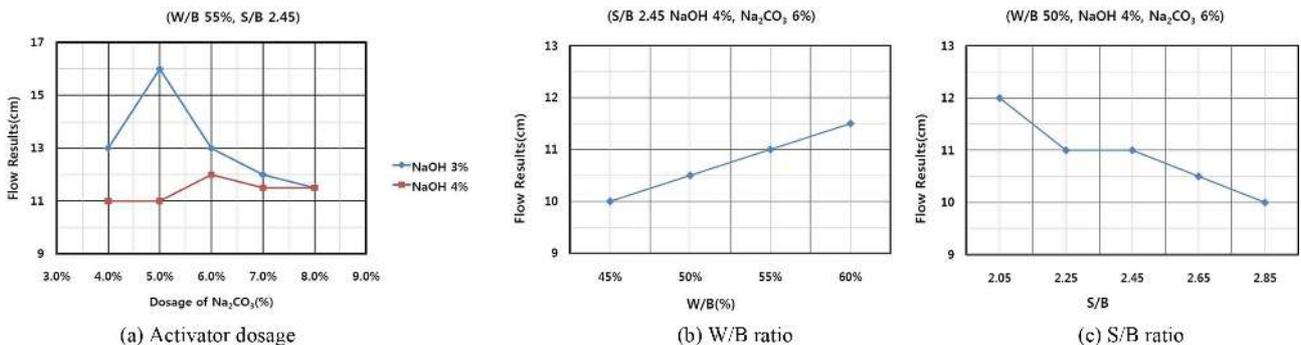
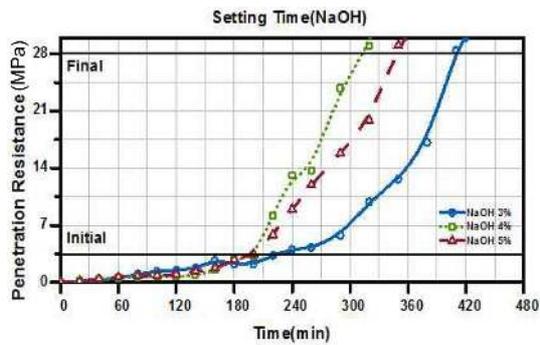
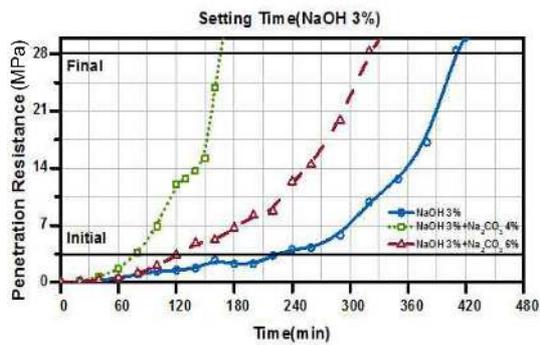


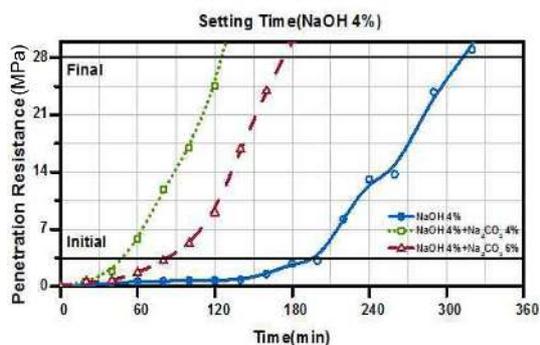
Fig. 1 Flow characteristics of mortars with variables



(a) Sodium hydroxide



(b) Sodium hydroxide 3%



(c) Sodium hydroxide 4%

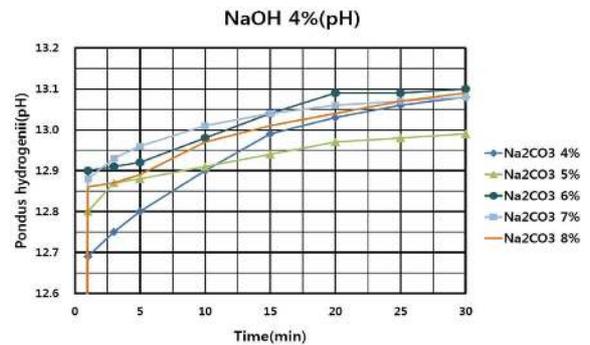
Fig. 2 Setting time of alkali activated mortars

알 수 있다. 하지만 탄산나트륨의 첨가량이 증가할수록 응결시간이 단축되지는 않고, 탄산나트륨이 4% 혼입된 경우보다 탄산나트륨이 6% 혼입된 경우에는 오히려 응결시간이 지연되는 현상이 나타났다. 수산화나트륨이 4% 첨가된 경우에서도 수산화나트륨 3% 첨가된 경우와 비슷한 경향을 나타내었다. 수산화나트륨 4% 첨가되었을 경우가 수산화나트륨 3%에 비해 초결과 종결이 20~25% 짧게 나타났다. 이러한 현상은 수산화나트륨 단독으로 첨가되거나 탄산나트륨과 혼합되어 첨가된 경우 모두 같이 나타났다.

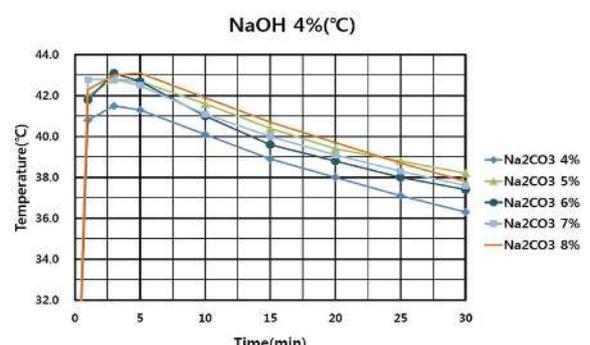
### 3.2 강도 발현 특성

#### 3.2.1 pH 및 온도의 변화

이 연구에서는 pH와 초기 수화반응에 의한 발열온도가 강도발현에 미치는 영향을 파악하고자 활성화제의 각



(a) pH



(b) Temperature

Fig. 3 pH and hydration properties of mortars with time

첨가량에 따라 페이스트의 pH와 온도를 측정하였다. 배합수의 초기 pH와 온도는 각각 7.95°C와 22.5°C였다. 측정 시간은 물을 혼입한 후 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30분에 측정하였다. 그 후는 페이스트가 점차 경화가 진행되어 측정을 중단하였다. Fig. 3은 수산화나트륨 4%가 첨가된 페이스트에서 시간 경과에 따른 pH와 온도의 변화를 나타낸 그래프이다. pH는 측정시간동안 서서히 증가하는 반면 온도의 경우는 초기 측정시간 5분 이내에 최고의 온도에 도달한 이후 시간이 경과함에 따라 차츰 감소하는 경향을 나타내었다.

수화발열 온도에 있어서는 수산화나트륨 3%와 4%에서 모두 활성화제 첨가량이 낮은 페이스트에서 가장 낮은 온도가 측정되었다. 그리고 수산화나트륨이 4% 첨가된 경우가 수산화나트륨 3% 첨가된 경우에 비해서 전반적으로 높은 pH와 수화발열이 측정되었다. 하지만 그 외의 활성화제 첨가량과 pH 및 온도와는 일관성 있는 상관관계를 밝혀낼 수 없었다.

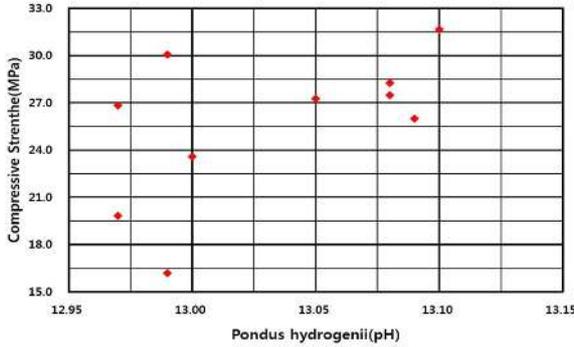
Table 4와 Fig. 4는 활성화제 첨가량에 따른 28일 압축강도와 측정시간 내에서 발현된 최고의 pH 및 온도와의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 4에서 밝힌 바와 같이 이 연구의 조건에 따른 초기 pH나 온도의 변화가 강도에 미치는 영향을 밝혀낼 수 없었다.

#### 3.2.2 활성화제 첨가량에 따른 강도발현

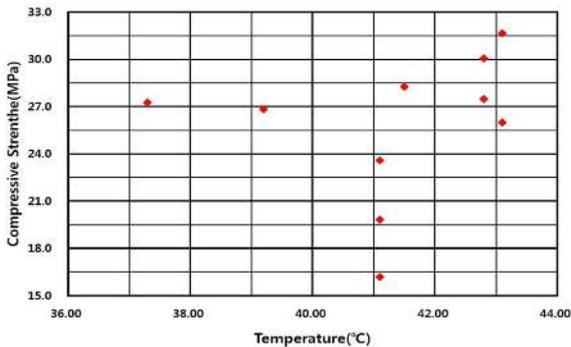
Fig. 5는 시간경과에 따른 알칼리 활성화제의 조합별 강도발현을 나타낸 그래프이고 Fig. 6은 재령에 따른 강도 증분을 그래프로 나타내었다.

**Table 4** Compressive strength of mortars with pH and temperature

		NaOH (%)					
		3			4		
		pH	Temperature (°C)	f <sub>28</sub>	pH	Temperature (°C)	f <sub>28</sub>
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (%)	4	13.05	37.3	27.26	13.08	41.5	28.26
	5	12.97	39.2	26.83	12.99	42.8	30.06
	6	13.00	41.1	23.58	13.10	43.1	31.65
	7	12.97	41.1	19.82	13.08	42.8	27.48
	8	12.99	41.1	16.18	13.09	43.1	25.99



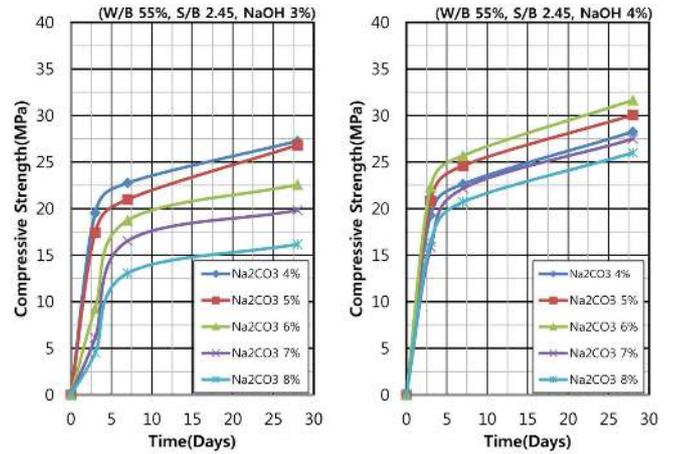
(a) Strength-pH



(b) Strength-temperature

**Fig. 4** Relationship between compressive strength at 28 days and pH, temperature

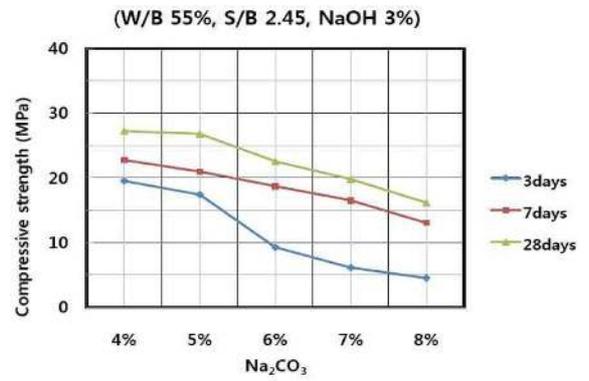
Fig. 5에서 보는 바와 같이 수산화나트륨을 3% 첨가한 배합에 비해 수산화나트륨 4% 배합은 전반적으로 28일 압축강도가 높게 발현됨을 알 수 있다. 수산화나트륨 3% 경우 탄산나트륨을 혼합하지 않고 단독으로 사용된 Table 1의 배합과 비교하였을 때 28일 압축강도는 탄산나트륨 8% 조합을 제외하고는 약 15~50% 높게 나타났다. 조합을 살펴보면 탄산나트륨 4%, 5%와의 조합에서는 28일 강도 대비 초기 3일 강도발현 비율이 72%와 65%이었으나, 탄산나트륨이 6%, 7%, 8% 첨가된 경우에는 각각 41%, 30% 그리고 28%로 급격히 감소하고 상대적으로 재령 3일부터 7일사이 강도가 증가하였다. 또한 28일 압축강도는 탄산나트륨의 첨가량의 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 나타냈다. 수산화나트륨을 4% 첨가한 배합에서는 탄산나트륨을 첨가하지 않고 단독으로 활성화



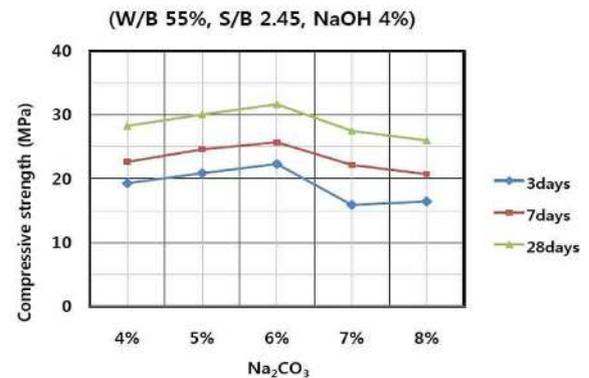
(a) Sodium hydroxide 3%

(b) Sodium hydroxide 4%

**Fig. 5** Compressive strength development of mortars with activator dosage



(a) Sodium hydroxide 3%



(b) Sodium hydroxide 4%

**Fig. 6** Strength increment of mortars with activator dosage

된 시험체의 28일 강도에 비해 조합된 활성화제를 적용한 시험체가 전반적으로 40~70% 높게 나타났다. 조합된 활성화제를 적용한 배합의 경우, 탄산나트륨의 첨가량이 4~6%로 증가함에 따라 강도 역시 증가하는 경향을 나타냈으나 그 이후에는 탄산나트륨의 양이 증가함에 따라 강도가 점차 감소하였다. 이 때, 28일 강도 대비 초기 3일 강도 증분은 탄산나트륨의 첨가량이 4~6%까지 약 70% 정도의 발현율을 나타내다가 탄산나트륨의 첨가량이 7% 이상 증가하면서 3일 강도의 발현율도 60%정도로 약 10%정도 감소함을 알 수 있다.

### 3.2.3 물 및 골재량에 따른 강도발현

물-바인더비의 변화에 따른 강도발현 특성의 실험에서는 골재량의 변화에서와 마찬가지로 활성화제의 첨가량은 수산화나트륨 4%, 탄산나트륨 6% 그리고 골재량은 2.45로 고정하여 실험을 실시하였다.

골재/바인더비의 변화에 따른 강도의 특성은 골재율이 증가함에 따라 높은 물-바인더비(W/B)를 적용할 경우 고른 배합이 어려울 것으로 사료되어 활성화제를 변수로

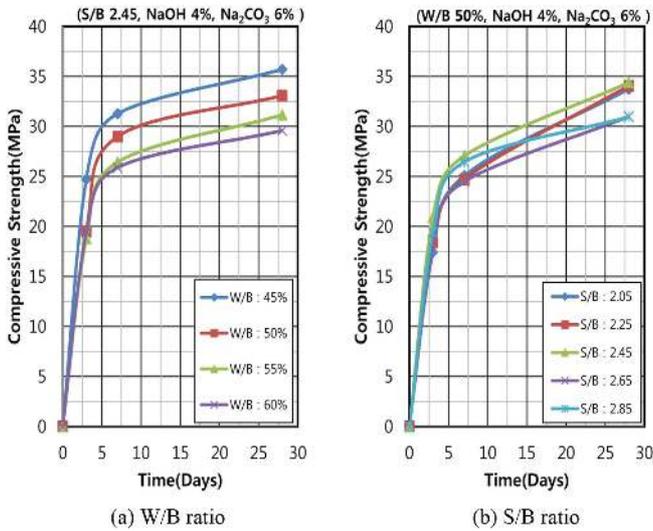


Fig. 7 Compressive strength development of mortars with W/B ratio and S/B ratio

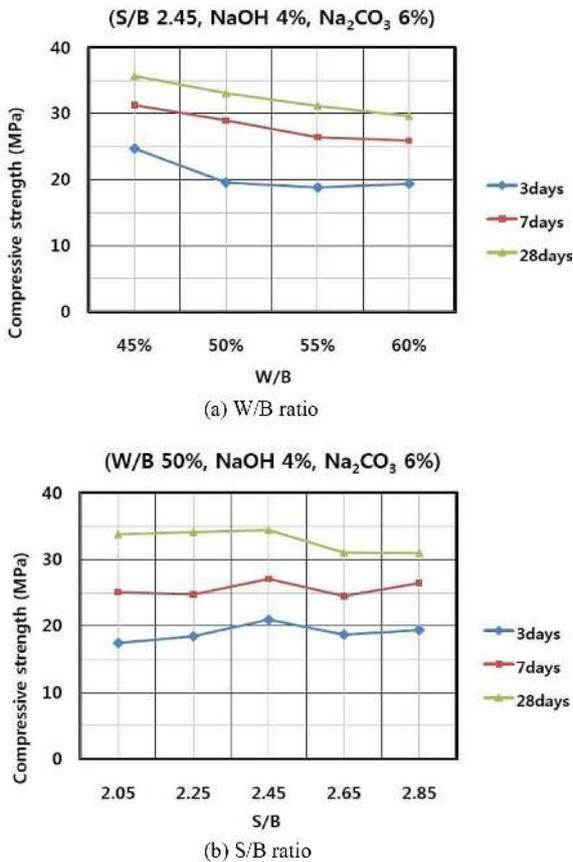


Fig. 8 Strength increment of mortars with W/B ratio and S/B ratio

하는 배합보다 낮은 50%로 고정하였다. 활성화제의 첨가량은 물-바인더비의 변화에서와 마찬가지로 수산화나트륨 4% 그리고 탄산나트륨 6%로 고정하고 측정하였다.

Figs. 7과 8은 각각 시간경과에 따른 압축강도와 재령 사이의 강도 증가량을 각각 물-바인더비의 변화와 골재-바인더비의 변화에 따라 나타낸 그래프이다.

Fig. 7에 나타난 바와 같이 물-바인더비가 증가함에 따라 일정한 비율로 강도가 점차 감소함을 알 수 있다. 물-바인더비의 변화에 따른 측정 시기별 강도변화율을 보면, 28일 강도 대비 초기 3일의 강도 발현비율은 60~70% 정도이며, 재령 3일에서 7일 사이의 강도 발현율은 18~28%, 728일까지의 강도 증가율은 12~15% 정도로 모든 물-바인더비의 변화에 따라 큰 차이를 나타내지 않았다.

골재-바인더비의 변화에 따른 강도발현 특성을 살펴보면, 활성화제 첨가에 따른 강도 실험에 비해 물-바인더비가 감소하여 활성화제 첨가량에 따른 조합에 비해 전반적으로 높게 나타남을 알 수 있다. 골재-바인더비 2.05부터 첨가량이 증가함에 따라 2.45까지 증가하다가 2.65로 증가하면서 강도가 급격히 감소한다.

동일한 활성화제 조합에서 물-바인더비 50%, 골재율 2.45 배합에서 28일 강도 대비 3일 강도 발현율과 37일 그리고 728일의 강도 증가율은 각각 70%, 10% 그리고 20%였다. 하지만 이 실험에서 7일에서 28일의 강도는 약 20%로 크게 변화가 없으나 28일 대비 3일 강도는 50~60%로 감소하며 7일에서 28일의 강도가 20% 정도로 증가하였다.

### 3.3 강도 예측

#### 3.3.1 알칼리 품질계수(alkali quality coefficient, $Q_A$ )

양근혁, 송진규 등<sup>11)</sup>은 규산나트륨을 활성화제로 적용한 알칼리 활성 모르타르의 압축강도 모델을 제시하였다. 이때 강도모델을 유도하기 위하여 원재료인 고로슬래그 및 플라이 애쉬, 활성화제로 사용된 규산나트륨을 구성하는 주요 성분의 상관관계를 적용하여 알칼리 품질계수( $Q_A$ )의 개념을 제안하였으며 원재료의 분말도, 잔골재율, 활성화제 첨가량, 물/바인더비 등을 변수로 하는 28일 압축강도 모델을 제시하였고 식 (3) 및 (4)와 같다.

$$Q_A = \left( Na_2O \cdot \frac{Al_2O_3 \cdot CaO}{SiO_2} \right) / B \quad (\text{by weight}) \quad (3)$$

$$f'_{28} = 1480 \left[ \frac{Q_A \times (S_A/S_0 + k_1)^{0.3}}{W/B} \right]^{1.23} \times k_2 \quad (4)$$

여기서,  $k_1 = (A/B)^{0.5}$  for  $A/B \leq 2.5$ ,  
 $(A/B)^{-0.5}$  for  $A/B > 2.5$ ,  $k_2 = (S/A)^{0.6}$

이 연구에서는 활성화제로 사용된 수산화나트륨과 탄산나트륨 그리고 원재료인 고로슬래그를 구성하는 주요 성분들 중 강도에 영향을 미치는 요소를 파악하여 기존 연구에서 제안된 물-바인더비와 골재-바인더비에 따른 계

수 및 알칼리 품질계수( $Q_A$ )를 새롭게 정의하고 모르타르의 28일 압축강도 예측식을 제안하였다.

Fig. 9는 산화나트륨( $Na_2O$ )의 함유량에 따른 강도 변화를 나타낸 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 활성화제가 혼합된 경우는 기존의 연구 결과와 같이 산화나트륨의 첨가량만으로 강도가 영향을 받는 것이 아님을 알 수 있다. 수산화나트륨 3%, 4%에서 최고 강도를 나타내었을 때의 산화나트륨의 첨가량을 살펴보면, 각각 4.4%와 6.2%이다. 이 연구의 실험조건에 따른 결과를 살펴보면, 수산화나트륨과 탄산나트륨에 포함된 산화나트륨의 양이 아닌 두 화합물이 각각 포함하고 있는 산화나트륨의 양의 상호관계에 따라 강도가 영향을 받음을 알 수 있다. 따라서 이를 분석하면, 탄산나트륨에 포함된 산화나트륨의 양이 수산화나트륨에 포함된 산화나트륨의 양의 1.1배를 초과하기 전에는 강도가 증가한다. 하지만 탄산나트륨에 포함된 산화나트륨의 양이 수산화나트륨에 포함된 산화나트륨의 양의 1.1배를 초과한 이후에는 탄산나트륨의 산화나트륨 양이 증가함에 따라 강도가 급속히 감소하기 시작한다. 동일 조건 하에서 이 논문에서 제안된 예측 식에 따라 산화나트륨의 첨가량 변화에 따른 강도를 예측해보면 Fig. 9와 같은 곡선으로 나타내게 된다.

앞에서 언급한 바와 같이 강도에 영향을 미치는 요소가 산화알루미늄( $Al_2O_3$ ), 산화칼슘( $CaO$ ), 산화나트륨( $Na_2O$ ) 그리고 이산화규소( $SiO_2$ )인데 그 중에서 이산화규소는 강도를 감소시키므로 그 식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_A = \left( Na_2O \cdot \frac{Al_2O_3 \cdot CaO}{SiO_2^2} \right) / B \quad (\text{by weight}) \quad (5)$$

$$Na_2O = Na_2O(H) + Na_2O(C) \text{ for } 1.1Na_2O(H) \geq Na_2O(C)$$

$$Na_2O = 4.3Na_2O(H) - 2Na_2O(C) \text{ for } 1.1Na_2O(H) < Na_2O(C)$$

여기서,  $Na_2O(H)$ 는 전체 바인더 중 수산화나트륨에 포

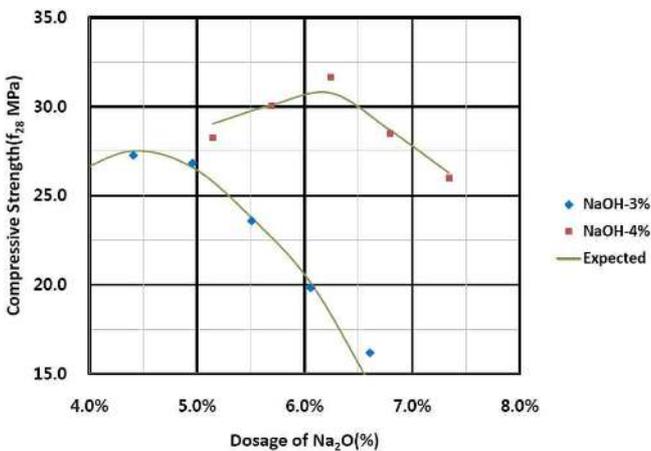


Fig. 9 Relationship between  $Na_2O$  dosage and compressive strength

함된 산화나트륨의 비율이며,  $Na_2O(C)$ 는 전체 바인더 중 탄산나트륨에 포함된 산화나트륨이 차지하는 비율을 의미한다.

Table 5는 바인더를 구성하는 원재료 및 알칼리 활성화제양에 따른 각 구성성분의 비율과  $Q_A$ 를 나타낸 표이다. 따라서 실험 결과와 이 논문에서 제시한  $Q_A$ 의 결과를 비교해보면 아래의 Fig. 10에서 보는 바와 같이 제시된  $Q_A$ 에 선형으로 비례하여 28일 압축강도가 증가함을 알 수 있다.

### 3.3.2 28일 압축강도 예측

Figs. 11과 12는 각각 물-바인더비와 골재-바인더비의 변화에 따른 28일 압축강도의 변화를 나타낸 그래프이다.

물-바인더비의 변화에 따른 강도의 변화는 Fig. 11에서 보는 바와 같이 물-바인더비가 증가함에 따라 강도가 선형으로 감소하는 결과를 관찰할 수 있다. 골재-바인더비의 변화에 따른 강도는 2.45를 기준으로 서로 다른 특성을 나타낸다. 따라서 골재의 변화에 따른 강도를 예측하기 위해서 골재량에 관련된 변수는 기존의 연구에서 제

Table 5 Alkali coefficient ( $Q_A$ ) and compressive strength at 28 days with activator dosage

No.	GGBS			NaOH	$Na_2CO_3$	$Q_A$	$f'_{28}$ (MPa)
	$Al_2O_3$	$SiO_2$	CaO	$Na_2O$	$Na_2O$		
55-245-434	0.1263	0.2936	0.4024	0.0221	0.0220	0.0260	27.26
55-245-435	0.1249	0.2905	0.3980	0.0221	0.0275	0.0249	26.83
55-245-436	0.1236	0.2873	0.3937	0.0221	0.0330	0.0184	23.58
55-245-437	0.1222	0.2842	0.3894	0.0221	0.0385	0.0119	19.82
55-245-438	0.1208	0.2810	0.3851	0.0221	0.0440	0.0054	16.18
55-245-444	0.1249	0.2905	0.3980	0.0295	0.0220	0.0303	28.26
55-245-445	0.1236	0.2873	0.3937	0.0295	0.0275	0.0336	30.06
55-245-446	0.1222	0.2842	0.3894	0.0295	0.0330	0.0368	31.65
55-245-447	0.1208	0.2810	0.3851	0.0295	0.0385	0.0310	27.48
55-245-448	0.1195	0.2778	0.3807	0.0295	0.0440	0.0245	25.99

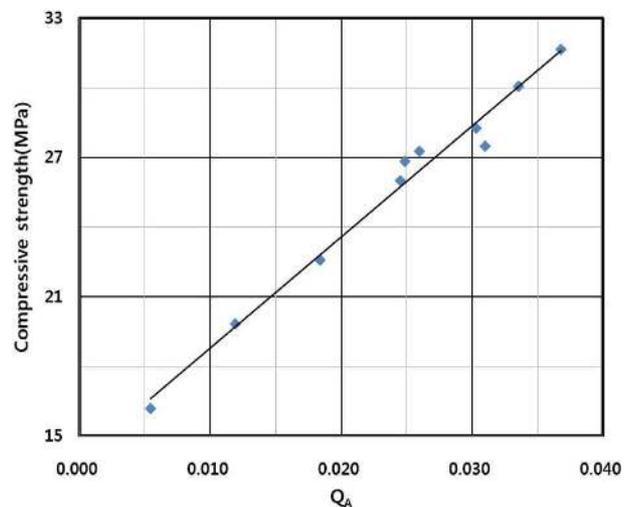


Fig. 10 Relationship between alkali coefficient ( $Q_A$ ) and compressive strength

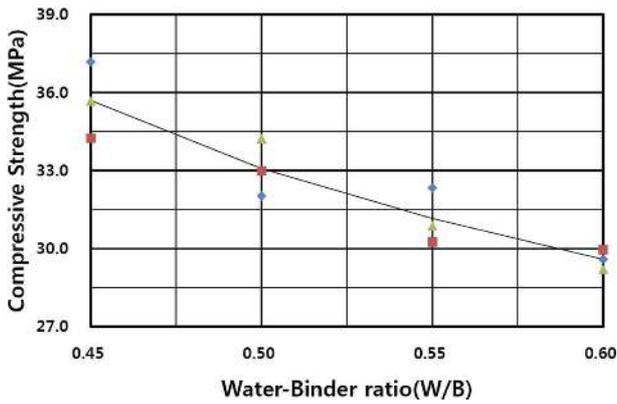


Fig. 11 Strength characteristics of mortars with W/B ratio

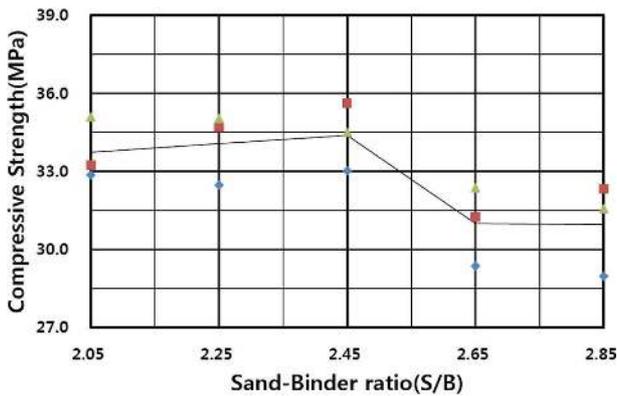


Fig. 12 Strength characteristics of mortars with S/B ratio

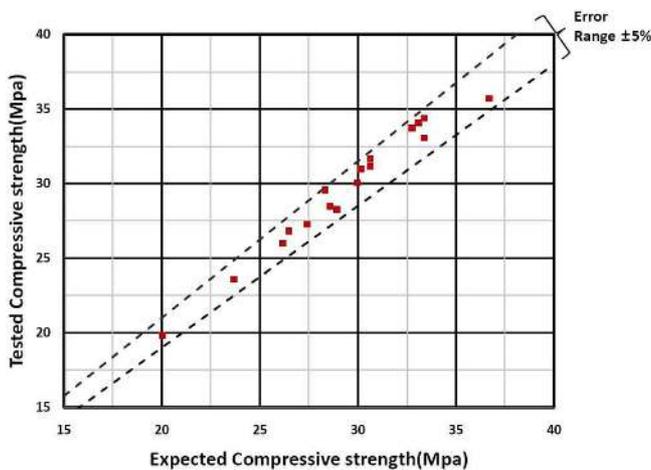


Fig. 13 Comparison of expected value and tested value

시한 강도 예측식의 결과와 같이 2.5를 기준으로 분리하여 28일 압축강도 예측식에 적용하였다. 따라서 수산화나트륨과 탄산나트륨을 활성화제로 사용한 고로슬래그 기반 알칼리 활성 모르타르의 28일 압축강도는 고려된 모든 변수를 고려하여 예측해보면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$f'_{28} = 41 \frac{(Q_A \times (S_A/S_{A0} + k_1))^{0.35}}{W/B^{0.9}} \quad (6)$$

여기서,  $S/B \leq 2.5$ 이면  $k_1 = (S/B)^{0.5}$ 이고,  $S/B > 2.5$ 이면

$k_1 = (S/B)^{0.2}$ 이다.  $S/B$ 는 골재율(sand-binder ratio)을 의미하며,  $W/B$ 는 물-바인더비를 나타낸다. 그리고  $S_{A0}$ 와  $S_A$ 는 바인더의 분말도와 관련된 계수로  $S_{A0}$ 는 4,000 (cm<sup>2</sup>/g)이며,  $S_A$ 는 사용된 바인더의 분말도로 이 논문에서는 4,204 (cm<sup>2</sup>/g)을 사용하여  $S_{A0}/S_A$ 는 1.05이다.

아래의 Fig. 13은 이 연구에 의해 제시된 예측 강도와 실험 결과를 비교한 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 모든 데이터가 오차범위 ±5% 이내에 있음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 수산화나트륨과 탄산나트륨에 의해 활성화된 고로슬래그 기반 알칼리 활성 모르타르의 강도발현 특성에 대해 살펴보았다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 페이스트의 초기 pH 및 발열특성은 활성화제 첨가량의 변화뿐만 아니라 28일 압축강도와 특정한 관계를 밝혀낼 수 없었다.
- 2) 활성화제의 첨가량에 따른 강도의 변화를 살펴보면, 수산화나트륨 첨가량이 일정할 경우 초기에는 탄산나트륨의 첨가량이 증가함에 따라 강도도 함께 증가를 하다가 탄산나트륨의 양이 일정 양을 초과하면 그 이후부터는 강도가 급격히 감소하기 시작한다. 이는 28일 압축강도뿐만 아니라 초기강도에서도 같은 현상이 발생한다.
- 3) 골재량 변화에 따른 강도변화를 살펴보면 골재량 2.45까지 압축강도가 증가한 이후 급격히 감소한다. 하지만 재령 3일까지의 초기강도의 감소보다는 7일에서 28일사이의 강도 감소율이 더욱 크게 나타났다.
- 4) 물-바인더비의 증가에 따라 28일 압축강도는 점차 감소한다. 하지만 다른 변수의 결과와는 달리 초기 강도에서부터 28일 강도까지의 비율은 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 확인되었다.
- 5) 활성화제의 첨가량 변화에 따른 강도의 영향을 나타내기 위하여 알칼리 품질계수의 개념을 도입하였다. 탄산나트륨에 포함된 산화나트륨의 양이 수산화나트륨에 포함된 산화나트륨보다 1.1배를 초과하면서부터 강도가 급격히 떨어진다. 따라서 이를 식에 반영한 결과 품질계수에 따른 28일 압축강도를 선형으로 나타낼 수 있었다.
- 6) 이 연구에서 제시한 알칼리 품질계수 및 변수들을 반영하여 28일 압축강도를 예측할 수 있는 식을 제안하였다. 각 변수를 반영하여 28일 압축강도를 예측한 결과와 실험 결과를 비교해보면, 약 ±5% 오차범위 내에서 모두 만족하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 2010년 국토해양부 기술연구개발의 지원기

술혁신사업(과제번호:10지역기술혁신B01)의 일환으로 수행된 연구임을 밝히며 이에 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., and Jalali, S., "Alkali-Activated Binders : A Review. Part 2. about Materials and Binder Manufacture," *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 7, 2008, pp. 1315~1322.
2. Palomo, A., Grutzeck, M. W., and Blanco, M. T., "Alkali Activated Fly Ashes: A Cement for the Future," *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 8, 1999, pp. 1323~1329.
3. Roy, D. M., "Alkali-Activated Cements : Opportunities and Challenges," *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 2, 1999, pp. 249~254.
4. Wang, S., Scrivener, K. L., and Pratt, P. L., "Factors affecting the Strength of Alkali-Activated Slag," *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 6, 1994, pp. 1033~1043.
5. 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, No. 27, 1995, pp. 93~102.
6. Hardijito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J., and Rangan, B. V., "On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete," *ACI Material Journal*, Vol. 101, No. 6, 2004, pp. 467~472.
7. Kovalchuk, G., Fernandez-Jimenez, A., and Palomo, A., "Alkali-Activated Fly Ash: Effect of Thermal Curing Conditions on Mechanical and Microstructural Development - Part II," *Fuel*, Vol. 86, No. 3, 2007, pp. 315~322.
8. Purdon, A. O., "The Action of Alkalis on Blast-Furnace Slag," *Journal of the Society of Chemical Industry*, No. 59, 1940, pp. 191~202.
9. Jolicoeur, C., Simard, M. A., Sharman, J., Zamojska, R., Dupuis, M., Spiratos, N., Douglas, E., and Malhotra, V. M., "Chemical Activation of Blast-Furnace Slag, An Overview and Systematic Experimental Investigation," *Advances in Concrete Technology, Ministry of Supply and Services, Canada*, 1992, pp. 471~502.
10. 송진규, 양근혁, 김건우, 김병조, "고로슬래그와 나트륨계열의 활성화제를 이용한 무시멘트 모르타르의 특성," *대한건축학회*, 26권, 6호, 2010, pp. 61~68.
11. Yang, K. H., Song, J. K., Ashour, A. F., and Lee, E. T., "Property of Cementless Mortars Activated by Sodium Silicate," *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 9, 2008, pp. 1981~1989.
12. Yuan, R., Gao, Q., and Ouyang, S., "Study on Structure and Latent Hydraulic Activity of Slag and Its Activation Mechanism," *Journal of Wehan University of Technology* (in China), China, 1987, pp. 297~303.
13. Song, S., Sohn, D., Jennings, H. M., and Mason, T. O., "Hydration of Alkali-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag," *Journal of Materials Science*, No. 35, No. 1, 2000, pp. 249~257.
14. Shi, C., Krivenko, P. V., and Roy, D. M., *Alkali-Activated Cements and Concretes*, Taylor and Francis, New York, 2006, 370 pp.

**요 약** 이 연구는 수산화나트륨과 탄산나트륨이 혼합된 알칼리 활성화제에 의한 고로슬래그 모르타르의 강도발현 특성을 파악하기 위한 연구이다. 주요 변수는 활성화제의 첨가량, 물-바인더비(W/B) 그리고 골재-바인더비(S/A)이다. 활성화제의 첨가량에 따른 강도 특성을 수산화나트륨 3%, 4% 및 탄산나트륨 4%~8%까지 조절하여 측정하였다. 물-바인더비는 0.45~0.60까지 그리고 골재-바인더비는 2.05~2.85의 범위 내에서 변화하며 측정하였다. 원재료의 주요 성분 및 수산화나트륨, 탄산나트륨에 포함된 산화나트륨( $\text{Na}_2\text{O}$ ) 양에 따라 조합된 알칼리 품질계수( $Q_A$ )를 산정하고, 이를 적용하여 알칼리 활성화 모르타르의 28일 압축강도 예측식을 제안하였다. 각 변수에 따른 시험값과 제안된 예측식을 통한 결과값은 오차범위 5% 이내의 범위에서 만족하는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 고로슬래그, 수산화나트륨, 탄산나트륨, 알칼리 품질계수