

# 물-결합재비에 따른 알칼리 활성화 슬래그 모르타르의 초기 재령 특성에 관한 연구

## A Study on Early Age Properties of Alkali Activated Slag Mortar According to Water/Binder Ratio

(Received July 4, 2012 / Revised August 14, 2012 / Accepted August 14, 2012)

오상혁<sup>1)\*</sup>, 김대왕<sup>1)</sup>, 이광명<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>성균관대학교, 건설환경시스템공학과

Sang-Hyuk Oh<sup>1)\*</sup>, Dae-Wang Kim<sup>1)</sup>, Kwang-Myong Lee<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of civil, Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, South Korea

### Abstract

Recently, the cement industries brought very severe environment problems such as resource depletion and global warming with massive carbon dioxide during its production. The number of cases using industrial by-products such as the ground granulated blast furnace slag (GGBFS) in concrete mixtures is increasing to resolve the environmental issue. GGBFS is mainly used in the range between 20 to 50% to replace cement, but nowadays lots of researches are carried out to develop the alkali-activated slag (AAS) concrete with no cement. In this study, the early age properties of alkali activated slag (AAS) mortar are investigated to obtain the fundamental data for AAS concrete application to structural members. The experimental variables were the water-binder ratios of 0.3, 0.4, and 0.5 and NaOH as the alkali activator of 4%, 8%, and 12% by the mass of GGBFS, and compressive strength, flow, setting time, and ultrasonic pulse velocity of AAS mortars were measured and analyzed. It is found from the test results that as the normal concrete the lower W/B, the higher compressive strength. However, superplasticizer has to be used for producing high strength AAS concrete because the workability of AAS mortar are significantly lowered.

**키워드** : 고로슬래그 미분말, 알칼리 활성화, 수산화나트륨, 압축강도, 유동성

**Keywords** : Ground granulated blast furnace slag, Alkali-activated, Sodium hydroxide, Compressive strength, Fluidity

### 1. 서론

최근 건설 산업에서 문제가 되고 있는 CO<sub>2</sub> 발생 저감 대책으로 시멘트를 사용하지 않는 알칼리 활성화 콘크리트 제조 기술이 주목받고 있다. OPC 콘크리트와 비교하여 50 MPa 이상의 고강도 알칼리 활성화 슬래그 콘크리트를 제조할 경우 약 10% 수준의 원가를 절감할 수 있다고 보고된

바 있어 환경 문제 뿐 아니라 비용 절감 차원에서도 알칼리 활성화 콘크리트의 시장 점유 가능성은 매우 높다고 판단된다.<sup>1)</sup>

지금까지 알칼리 활성화 콘크리트 배합 기술은 독일, 미국, 호주, 러시아에 의해 주도되어 왔다. 1978년 프랑스의 Davidovits<sup>2)</sup>가 최초로 알칼리 활성화제를 사용하여 중합반응을 유도하는 이론을 정립한 이후, 유럽에서는 20층 이상의 고층빌딩에 알칼리 활성화 콘크리트를 적용한 사례가 있다.<sup>3)</sup> 알칼리 활성화 슬래그 콘크리트는 상온에서 높은 강도 발현이 가능하고 황산염 등에 대한 화학 저항성이 강한 것으로

\* Corresponding author

E-mail: osh4499@vandal.or.kr

로 보고되었으나<sup>4)-6)</sup> 작업성과 수축에 대해 취약한 것으로 알려져 있다.<sup>7)-9)</sup>

국내에서도 알칼리 활성 콘크리트에 관련된 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다.<sup>1)</sup> 그러나 현재 알칼리 활성 콘크리트의 적용은 2차 제품에 그치고 있으며 구조 부재에 적용을 위한 연구는 미흡한 실정이다.

본 논문은 고강도 알칼리 활성화 슬래그(AAS) 콘크리트를 사용한 PC 부재 제작을 목표로 수행 중인 연구과제의 기초 연구결과로 물-결합재비와 NaOH 첨가량에 따른 AAS 모르타르의 유동성 및 강도 특성을 실험을 통해 알아보았다.

## 2. 실험 연구

### 2.1 사용 재료와 배합비

본 연구에서는 결합재로 밀도가 2.90 g/cm<sup>3</sup>, 분말도 4.253 cm<sup>2</sup>/g, 염기도 1.79로 KS 기준에 적합한 3종 고로슬래그 미분말(GGBFS)을 사용하였다. 고로슬래그 미분말의 화학적 조성은 Table 1과 같다. 잔골재로는 밀도가 2.62 g/cm<sup>3</sup>인 해사를 사용하였다.

알칼리 활성화 슬래그(AAS) 콘크리트에 사용되는 알칼리 활성화제는 일반적으로 용해성 Alkali 또는 Alkali염이 사용되고 있다.<sup>10)</sup> 본 연구에서는 알칼리 활성화제로 AAS 모르타르의 압축강도 발현에 유리하다고 알려진 분말상태의 NaOH(밀도 2.13 g/cm<sup>3</sup>, 순도 93%)를 사용하였다.<sup>7)</sup>

모르타르 배합비는 Table 2와 같으며 모르타르 배합의 W/B 비는 0.3, 0.4, 0.5 세 종류로 정하였고 결합재 : 잔골재를 1 : 1.5로 고정하였으며 NaOH 첨가량과 이에 따른 Na<sub>2</sub>O의 양을 계산하여 표에 나타내었다. Table 3은 고로슬래그와 NaOH 첨가량에 따른 물비의 변화를 나타낸 것이다.

Table 3 Experimental parameters of AAS mortar

Parameter (W/B-NaOH dosage)	0.3-4	0.3-8	0.3-12	0.4-4	0.4-8	0.4-12	0.5-4	0.5-8	0.5-12
water/binder (wt./wt.%)	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5
NaOH/binder (wt./wt.%)	0.04	0.08	0.12	0.04	0.08	0.12	0.04	0.08	0.12
Molarity of NaOH solution (mole)	3.33	6.67	10.00	2.50	5.00	7.50	2.00	4.00	6.00
Si/Al (molar ratio)	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08
Na <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (molar ratio)	0.37	0.74	1.11	0.37	0.74	1.11	0.37	0.74	1.11
Na <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub> (molar ratio)	0.089	0.178	0.270	0.089	0.178	0.270	0.089	0.178	0.270
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (molar ratio)	4.16	4.16	4.16	4.16	4.16	4.16	4.16	4.16	4.16
Compressive strength at 7 days (MPa)	40.1	40.0	41.4	28.5	29.3	26.2	22.3	22.3	19.2

Table 1 Chemical composition of GGBFS

	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO
GGBFS	33.7	0.11	13.8	44.04	5.20	1.23	0.48	0.74	0.24

Table 2 Mix proportion of mortar

W/B	S/B(GGBFS)	Alkali-activator (NaOH)	
		Dosage(%)	Na <sub>2</sub> O/GGBFS
0.3	1.5	4	0.031
0.4		8	0.062
0.5		12	0.093

### 2.2 배합 방법

Fig. 1은 NaOH 수용액을 제조할 경우 발생하는 온도를 NaOH 몰농도에 따라 측정한 결과이다. 측정 결과 NaOH 용해 직후부터 높은 고온이 발생하였으며, 7.5M의 경우에는 90°C에 가까운 고온이 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 NaOH를 배합 1일전에 배합수에 용해시켜 모르타르 배합 시 배합수의 온도가 25°C로 안정화되도록 하였다.

재료는 질량비로 계량한 후 고로슬래그와 잔골재를 1분간 건비빔하고 배합수를 혼입한 후 4분 30초 동안 모르타르 혼합기(10L)를 사용하여 배합하였다.

### 2.3 실험 방법

#### 2.3.1 압축강도 시험

큐빅 몰드(50×50×50mm)를 사용하여 모르타르 압축강도 시험용 공시체를 제작하였으며 온도 20±1°C, 습도 70±5%의 항온·항습기에서 24시간 양생 후 탈형하여 수중 양생을 실시하였다. KS F 2426 기준에 따라 채령 1일, 3일, 7일, 28일에 공시체의 압축강도를 측정하였다.

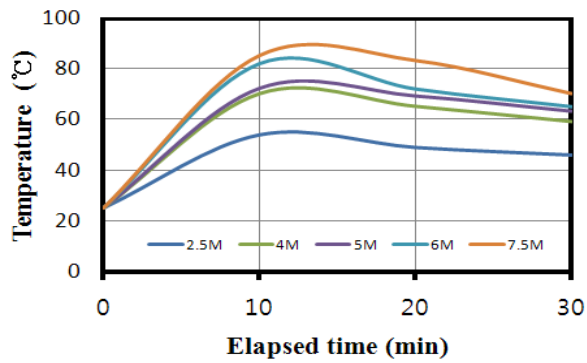


Fig. 1 Temperature change of sodium hydroxide solution with time

### 2.3.2 플로우 시험

KS L 5105 규정에 준하는 플로우 시험 기구를 이용하여 0, 30, 60, 90분에 모르타르의 플로우를 측정 후 시간에 따른 플로우 손실량을 구하였다.

### 2.3.3 응결 시험

KS F 2436 규정에 따라 관입저항시험기를 사용하여 관입저항이 3.5 MPa, 28.0 MPa에 도달할 때의 시간을 각각 초결 시간과 종결 시간으로 정하였다.

### 2.3.4 초음파속도 시험(UPV)

초음파 속도 시험 장치는 모르타르의 응결 거동 및 수화 속도에 따른 미세구조 변화를 파악할 수 있는 장치로 이회근 등<sup>11)</sup>은 이 장치를 이용하여 UPV 발현 곡선과 관입 저항 시험에 의한 응결 시간의 상관관계를 조사한 바 있다.

본 연구에서는 모르타르 배합 직후 12시간 동안 15분 간격으로 초음파 속도를 측정하여 NaOH와 고로슬래그의 초기에서 알칼리 활성화 반응 속도를 확인하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 플로우

W/B에 따른 초기 플로우를 나타낸 Fig. 2를 보면 NaOH 첨가량이 8%인 경우 W/B가 0.5, 0.4, 0.3으로 감소함에 따라 초기 플로우가 213 mm, 176 mm, 120 mm로 감소하여 W/B가 낮아질수록 초기 플로우가 크게 저하되는 것을 알 수 있다. 반면에 동일한 W/B에서는 NaOH 첨가량이 증가할수록 초기 플로우가 다소 감소하는 경향을 보였으나 그

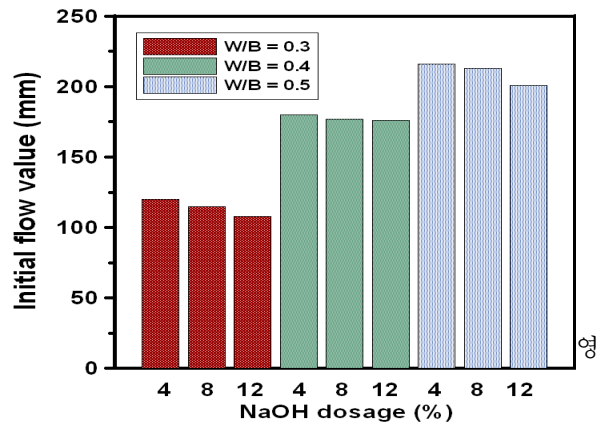
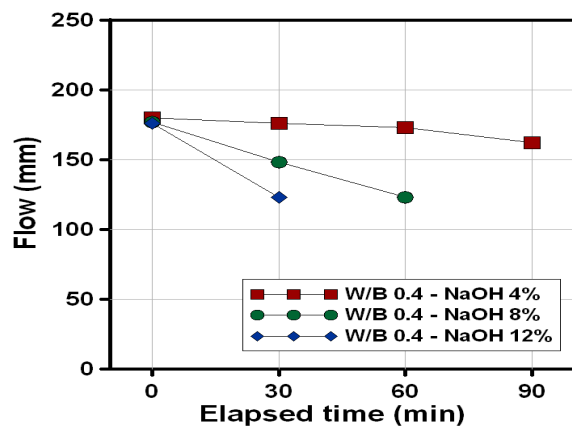
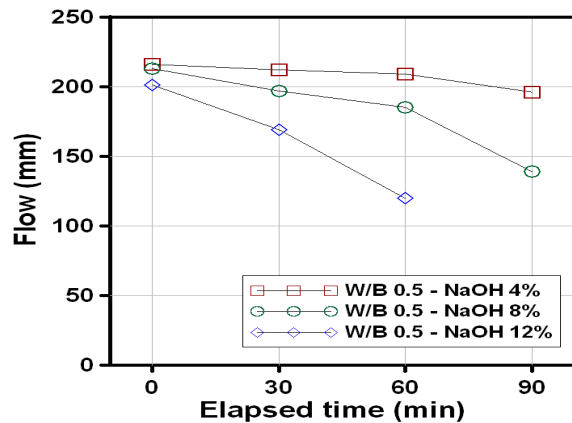


Fig. 2 Initial flow value of AAS mortars according to W/B



(a) W/B = 0.4



(b) W/B = 0.5

Fig. 3 Flow change of AAS mortars with the elapsed time

향은 미미한 것으로 나타났다.

시간 경과에 따른 플로우 손실을 나타낸 Fig. 3을 보면 NaOH 첨가량이 8%가 넘는 경우 경과시간 60분 이후부터 급격한 플로우 손실이 발생하였으며, W/B = 0.3에서는 모든 배합에서 초기부터 급격하게 유동성이 손실되어 30분 이후

부터 플로우의 측정이 어려워 그래프로 나타내지 않았다. 이는 NaOH 첨가량이 증가함에 따라 고로슬래그의 CaO 성분과 NaOH가 급격히 반응하기 때문으로 판단된다.<sup>12)</sup> 반면 NaOH 첨가량이 4%이고 W/B가 0.5인 경우에는 90분이 경과 하더라도 플로우가 190 mm 이상을 유지하였다.

AAS 모르타르의 유동성 실험결과 W/B와 NaOH 첨가량에 따라 플로우 손실량의 차이가 큰 것으로 나타났다. 한편, AAS 모르타르에서는 알칼리 활성화제로 인해 높은 알칼리 환경이 조성되기 때문에 OPC에서 사용되고 있는 고성능 감수제의 감수효과가 미미한 것으로 알려져 있다.<sup>12)</sup> 따라서, 향후 고강도 AAS 콘크리트를 실용화하기 위해서는 화학혼화제의 개발이 필요할 것으로 사료된다.

### 3.2 초결 및 종결

Fig. 4에 주어져 있는 AAS 모르타르의 응결 특성에 대한 실험결과를 보면, NaOH의 첨가량이 증가할수록 응결이 빠르게 일어나는 현상이 나타났다. W/B = 0.3 이고 NaOH 첨가량이 8, 12% 인 AAS 모르타르의 응결시간은 초결 약 30분, 종결 120분 이내로 빠르게 발생했고, NaOH 첨가량이 감소함에 따라 응결시간이 늦어졌다. 이러한 응결특성은 Na<sub>2</sub>O 첨가량이 증가할 때 응결 시간이 급격하게 감소한다는 기존의 실험 결과와 일치함을 알 수 있다.<sup>13)</sup>

W/B가 AAS 모르타르의 응결시간에 미치는 영향을 보면 NaOH 첨가량 8%를 기준으로 하였을 때, W/B = 0.3인 경우에는 초결 30분, 종결 90분으로 급결 현상이 발생하였고, W/B = 0.5에서는 초결 145분, 종결 260분으로 충분한 작업시간이 확보되었다. 이는 Na<sub>2</sub>O/GGBFS 비는 고정되어 있지만 낮은 W/B일수록 배합수의 물농도가 증가하여 높은 알칼리 환경이 조성되어 응결시간이 빨라지는 것으로 판단된다.

### 3.3 초음파 속도

NaOH를 8% 첨가한 AAS 모르타르의 초음파 속도를 나타낸 Fig. 5을 보면 배합 직후에는 유체상태로 초음파속도가 일정하게 유지되다가 W/B가 낮을수록 초기에서부터 급격한 알칼리 활성화 반응으로 인해 모르타르가 응결되면서 초음파 속도가 빠르게 증가하는 것을 알 수 있다. 즉 W/B = 0.5의 경우에는 1시간 이내에 초기 반응이 시작된 반면 W/B = 0.3에서는 20분 이내에 초음파속도가 증가하기 시작하여 가장 빠른 반응성을 보였다.

모르타르 초음파속도의 수렴 값인 3,000 m/s 내외에 도

달하는 시간을 보면 W/B = 0.3의 경우에는 약 2시간, W/B = 0.4와 0.5의 경우에는 7시간으로 나타났다. 이는 W/B가 낮아질수록 NaOH 첨가량에 비해 높은 알칼리 환경이 조성되어 초기에서부터 빠른 알칼리 활성화 반응이 발생한다는 근거가 된다.

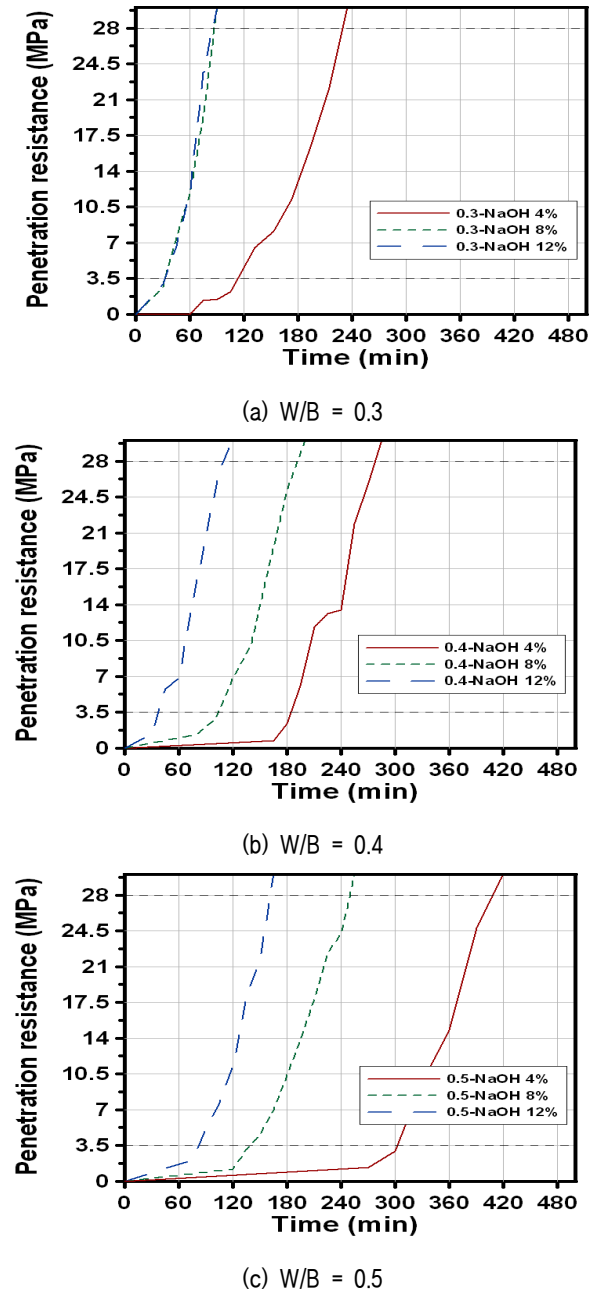


Fig. 4 Setting time of AAS mortars according to W/B

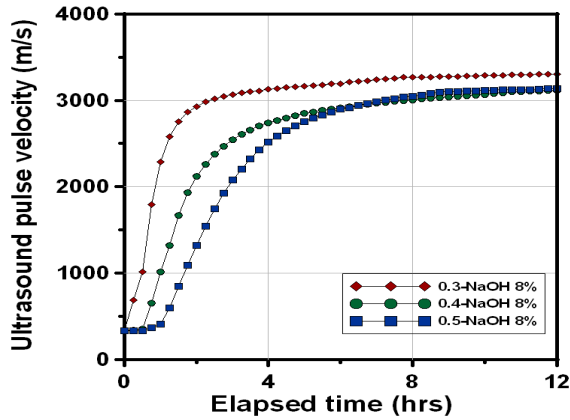
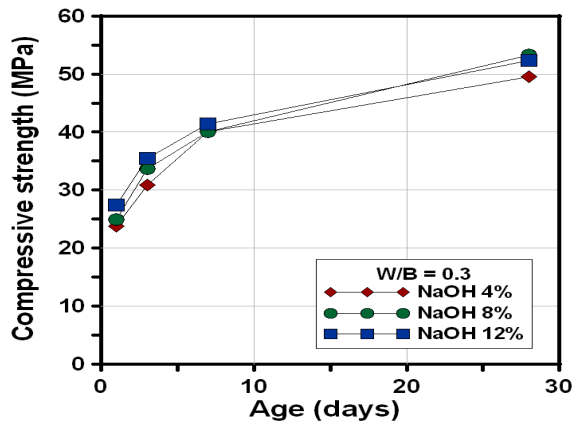


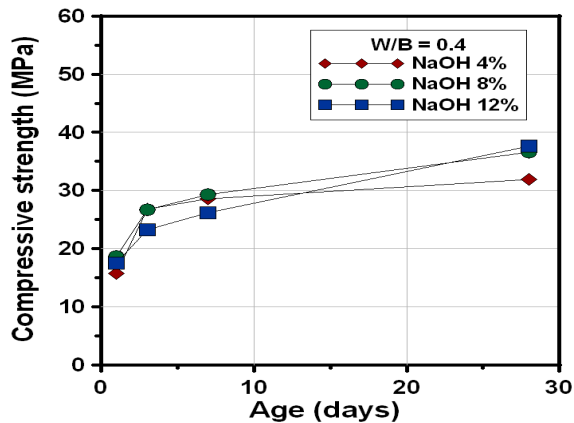
Fig. 5 Development of UPV for AAS mortars

### 3.4 압축강도

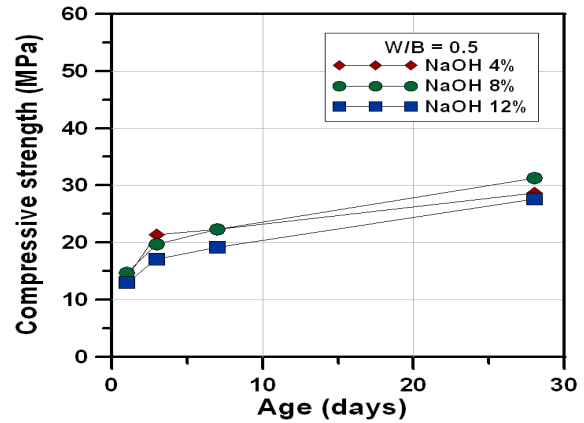
AAS 모르타르의 압축강도 실험 결과를 나타내는 Fig. 6을 보면 NaOH 첨가량이 8%인 경우 W/B가 0.5, 0.4, 0.3으로 감소함에 따라 28일 압축강도는 31 MPa, 37 MPa, 53 MPa로 증가하여 일반 콘크리트와 같이 W/B가 낮아질수록 높은 압축강도가 발현되는 것으로 나타났다.



(a) W/B = 0.3



(b) W/B = 0.4



(c) W/B = 0.5

Fig. 6 Compressive strength of AAS mortars with age

NaOH 첨가량에 따른 압축강도 실험 결과를 보면 W/B = 0.3과 W/B = 0.5에서는 NaOH 첨가량 8%에서 가장 높은 28일 압축강도가 발현되었으나, W/B = 0.4의 경우에는 NaOH 12%를 첨가하였을 때, 재령 7일까지는 낮은 압축강도를 보이나 재령 28일에서 가장 높은 압축강도가 발현되었다.

Tang<sup>14)</sup>의 연구에서는 알칼리 활성화제의 첨가량이 일정 수준 이상 초과할 경우 강도가 오히려 감소하는 결과를 얻었으며, Wang<sup>15)</sup>에 의해 알칼리 활성화제의 최적 첨가량은 슬래그량 대비  $\text{Na}_2\text{O} = 3\sim 5.5\%$ 인 것으로 보고된 바 있다. 하지만 본 연구에서는 W/B = 0.3의 경우 NaOH 12% ( $\text{Na}_2\text{O} = 9\%$ )에서도 높은 압축강도가 발현되어, 강도에 대한 NaOH의 최적 첨가량은 W/B의 영향을 받는 것으로 나타났다.

즉, AAS 모르타르의 W/B가 낮을수록 배합수량이 줄어 NaOH와 반응 할 수 있는 결합재의 양이 충분히 확보되기 때문에 기존 연구<sup>15)</sup>에서 최적첨가량으로 제시된  $\text{Na}_2\text{O} = 5.5\%$  이상의 NaOH 첨가량에서도 높은 압축강도가 발현되는 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 실험을 통해 물-결합재비에 따른 알칼리 활성화 슬래그(AAS) 모르타르의 초기특성에 대하여 알아보았다.

1) 압축강도 측정결과, 알칼리 활성화 슬래그 모르타르는 낮은 W/B에서 고강도 발현이 가능하였으나 NaOH 첨가량이 일정 수준을 초과할 경우 28일 압축강도가 일부 저하되는 것으로 나타났다.

2) W/B가 낮고 NaOH의 첨가량이 증가할수록 유동성이 저하되어, 유동성 측면에서는 NaOH는 8% 이하, W/B는 40% 이상이 유리한 것으로 판단되나, 이러한 경우에 W/B가 0.3이고 NaOH 첨가량이 12%인 AAS 모르타르에 비해 약 45% 압축강도가 낮은 것으로 나타났다.

3) 응결과 초음파속도 실험결과 AAS 모르타르의 알칼리 활성화 반응 속도는 W/B와 NaOH 첨가량의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 특히, W/B가 0.3인 경우 초기 급결 현상으로 인해 시간 경과에 따른 플로우 손실이 급격하게 증가하였다.

4) 낮은 물-결합재비를 갖는 AAS 모르타르는 50 MPa 이상의 고강도 발현이 가능하였으나 향후 고강도 AAS 콘크리트 부재 제작 및 실용화를 위해서는 유동성 확보 및 응결 지연이 가능한 AAS 콘크리트용 화학 혼화제의 개발 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 “탄소저감형 건설재료 기술개발” (과제번호: 11기술혁신F04)의 일환으로 국토해양부 건설기술혁신사업의 재정적 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- 1) 양근혁, 송진규, 알칼리 활성화를 이용한 무시멘트 콘크리트의 구조 성능 및 적용, 한국콘크리트학회지, 19권 2호, pp.42~48, 2007
- 2) Davidovits J., Geopolymers and Geopolymeric Materials, Thermal Analysis and Calorimetry, Vol.35, No.2, pp.429~441, 1989
- 3) Shi C., Krivenko P.V., and Roy D., Alkali-Activated Cements and Concretes, Taylor & Francis, 2006
- 4) 박상숙, 강화영, 한관수, 알칼리 활성화반응을 이용한 플라이에쉬/슬래그 시멘트 개발(1) -압축강도 및 산 저항성-, 대한환경공학회지, Vol.29, No.7, pp.801~809, 2007
- 5) Bakharev T., Sanjayan J.G., and Cheng Y.B., Effect of elevated temperature curing on properties of alkali-activated slag concrete, Cement and Concrete Research, Vol.29, No.10, pp.1619~1625, 1997

- 6) Bakharev T., Sanjayan J.G., and Cheng Y.B., Sulfate attack on alkali-activated slag concrete, Cement and Concrete Research, Vol.32, No. 2, pp.211~216, 2002
- 7) 송진규, 양근혁, 김건우, 김병조, 고로슬래그와 나트륨계열 활성화제를 이용한 무시멘트 모르타르의 특성, 대한건축학회 논문집, 26권, 6호, pp.61~68, 2010
- 8) Antonio A., Neto M., and Repette W., Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement, Cement and Concrete Research, Vol.38, No.4, pp.565~574, 2008
- 9) Collins F., and Sanjayan J.G., Early ages strength and workability of slag pastes activated by NaOH and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Cement and Concrete Research, Vol.28, No.5, pp.655~664, 1998
- 10) Glukhovskiy V.D., Rostovsky G.S., and Rumyna G.V., High strength slag-alkali cement, 7th International Congress on the Chemistry of Cements III, Paris, France, pp.164~168, 1980
- 11) 이회근, 이광명, 초음파 속도 모니터링에 의한 고강도 콘크리트의 응결 평가, 콘크리트학회 논문집, 14권, 6호, pp.973~981, 2002
- 12) 고경택, 류금성, 이장화, 강현진, 전용수, 고로슬래그를 사용한 무시멘트 알칼리 활성화 모르타르의 유동성과 압축강도, 한국건설순환자원학회지, Vol.6, No.1, pp.63~71, 2011
- 13) Wu X., Zhu H., Hou X., and Li, H., Study on steel slag and fly ash composite portland cement, Cement and Concrete Research, Vol.29, No.7, pp.1103~1106, 1999
- 14) Tang X., and Shi C., Alkali-phosphorus slag binders, Silicate Construction Products. 1., pp.28~32, 1988.
- 15) Wang S., Scrivener K.I., and Pratt P.L., Factors affecting the strength of alkali-activated slag, Cement and Concrete Research, Vol.24, No.6, pp.1033~1043, 1994

### 물-결합재비에 따른 알칼리 활성 슬래그 모르타르의 초기 재령 특성에 관한 연구

최근 시멘트 제조시 발생되는 다량의 이산화탄소로 인한 온난화 현상이 심각한 실정이며, 이러한 환경문제와 자원 고갈 문제를 동시에 해결하기 위해 고로슬래그와 같은 산업부산물을 콘크리트 배합에 사용하는 사례가 증가하고 있다. 일반적으로 고로슬래그는 대체율 20~50%의 범위에서 가장 많이 사용되고 있으나, 최근에는 고로슬래그를 100% 사용한 알칼리 활성 슬래그 콘크리트의 개발 및 실용화 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 고강도 알칼리 활성 콘크리트의 구조 부재 적용을 위한 기초 자료를 확보하기 위해 알칼리 활성화 슬래그 모르타르의 초기 재령특성을 조사하였다. 물-결합재비(W/B)는 0.3, 0.4, 0.5의 3수준으로 하고 알칼리 활성화제인 NaOH를 슬래그 질량대비 4%, 8%, 12% 첨가한 AAS 모르타르의 압축강도, 플로우, 초결과 종결, 초음파속도를 측정하였다. 그 결과, 물-결합재비가 낮을수록 높은 압축강도가 발현되었으나 시간 경과에 따라 플로우가 저하하고 응결시간이 빨라지는 것으로 나타나 고강도 알칼리 활성 콘크리트를 제조하기 위해서는 적절한 유동화제의 사용이 필수적이라고 판단된다.