

고강도 알칼리 활성화 슬래그 모르타르의 자기수축 특성

Autogenous Shrinkage Properties of High Strength Alkali Activated Slag Mortar

오상혁^{1*} · 홍성현¹ · 이광명¹

Sang-Hyuk Oh^{1*} · Sung-Hyun Hong¹ · Kwang-Myong Lee¹

(Received March 4, 2014 / Revised March 22, 2014 / Accepted March 25, 2014)

Recently, lots of researches on alkali-activated slag (AAS) concrete have been carried out to resolve the environmental issues such as recycling by-products and global warming. AAS concrete would have high strength and high level of durability. On the other hand, it is known that large amount of shrinkage occurred in AAS concrete due to rapid alkaline reaction in the early age, and however, the related studies about autogenous shrinkage of high strength AAS mortar are relatively rare. In this study, fresh mortar properties such as flow and setting time, compressive strength and autogenous shrinkage of AAS mortar with W/B=0.40 to 0.50, were measured. AAS mortar was activated with sodium silicate ($M_s=1.0$) with 5, 6 and 7 % of Na_2O . Test results revealed that AAS mortar shows larger autogenous shrinkage than OPC mortar and the lower W/B of AAS mortar, the greater autogenous shrinkage. Therefore, the application of appropriate curing and the use of shrinkage reduction admixture would be needed to reduce autogenous shrinkage of AAS mortar.

키워드 : 알칼리 활성화 슬래그 모르타르, 압축강도, 자기수축

Keywords : Alkali Activated Slag Mortar, Compressive Strength, Autogenous Shrinkage

1. 서론

급속한 경제개발과 산업화로 인하여 전 세계적으로 온실가스로 인한 환경오염이 심각한 상황이다. 특히, 건설 산업에서는 콘크리트 제조과정 시, 전체 CO_2 배출량의 7%에 해당되는 양이 배출되는 것으로 알려져 있다. 통계에 따르면 시멘트 1 ton을 생산할 때, 약 0.8ton의 이산화탄소가 발생하는 것(Damtoft *et al.*, 2008)으로 나타나 건설 산업에서는 시멘트 사용량 및 생산량을 줄이는데 노력하고 있다.

이런 사회적 분위기 속에서 CO_2 발생 저감 대책으로 시멘트를 사용하지 않는 알칼리 활성화 슬래그(AAS) 콘크리트 제조 기술이 주목받고 있다. 고로 슬래그의 경우에는 시멘트의 대체 재료로 널리 사용되고 있으며 시멘트 질량 대비 30~50%를 치환한

슬래그 시멘트의 시장 점유율 역시 해마다 증가하고 있다(KCA 2011). 이러한 고로 슬래그를 100% 치환한 AAS 콘크리트는 보통 포틀랜드 시멘트(OPC) 콘크리트에 비해 탄소배출량을 현저하게 줄일 수 있으며 상온에서도 높은 초기 강도와 더불어 50MPa 이상의 고강도 발현이 가능하고 황산염 등에 대한 화학 저항성이 높은 것으로 보고되고 있다(Aydin and Baradan 2014; Shi *et al.*, 2006; Brough and Atkinson 2000). 그러나 알칼리 활성화제의 종류와 첨가량에 따라 콘크리트의 특성 변화가 심해져서 강도 제어가 어렵고 빠른 응결로 인한 급격한 유동성 손실이 단점으로 지적되고 있다(Collins, Sanjayan 1999). 또한, AAS 콘크리트는 OPC 콘크리트에 비해 초기에 매우 큰 자기수축이 발생하고 재령 30일 이후에도 지속적으로 수축이 발생하는 것으로 알려져 있다. Melo Neto *et al.*(2008)는 AAS 콘크리트의 자

* Corresponding author E-mail: osh4499@vandal.or.kr

¹성균관대학교 건설환경시스템공학과 (Department of Civil, Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746, Korea)

기수축은 OPC 콘크리트의 수축 특성과 달리 알칼리 활성화제의 종류와 첨가량, 슬래그 분말도 그리고 양생조건 등의 다양한 인자의 영향을 받는 것으로 보고한 바 있다. 특히, 알칼리 활성화제에 포함된 실리카 성분은 콘크리트의 수화과정 중 증발하는 자유수를 생성하여 Si/Ca 비가 높은 칼슘-실리케이트 겔의 형성을 유발하게 되므로 물유리를 활성화제로 제작된 AAS 의 경우에는 초기에서부터 수축이 매우 크게 발생하는 것으로 알려져 있다(Yang *et al.* 2013).

따라서 본 연구에서는 AAS 모르타르의 기초물성과 W/B (0.40-0.50)와 알칼리 활성화제의 첨가량(Na_2O =5-7%)이 알칼리 활성 슬래그(AAS) 모르타르의 자기수축에 미치는 영향을 알아보았다.

2. 실험 연구

2.1 사용재료

본 연구에서는 결합재로 밀도가 $2.90\text{g}/\text{cm}^3$, 분말도 $4.253\text{cm}^2/\text{g}$, 염기도 1.79로 KS 기준에 적합한 3종 고로슬래그 미분말을 사용하였다. 고로슬래그 미분말의 화학적 조성은 Table 1과 같다. 잔골재로는 밀도가 $2.62\text{g}/\text{cm}^3$ 인 해사를 사용하였다.

고로슬래그 미분말의 잠재수경성의 활성을 위하여, 수산화나트륨과 물유리, 두 종류의 알칼리 활성화제를 선정하였다. 수산화나트륨은 순도 98%, 물유리는 $\text{SiO}_2 = 28.8\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 9.3\%$ 의 공업용 물유리 3종을 사용하였다(Table 3). 알칼리 활성화제는

Table 1. GGBFS chemical composition

	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	TiO_2	MnO
SLAG	33.7	0.11	13.8	44.04	5.20	1.23	0.48	0.74	0.24

Table 2. Sodium silicate chemical composition

Component	Weight percent (%)
Na_2O	9.3
SiO_2	28.8
H_2O	61.9

Table 3. Mix proportion of AAS mortar

W/B	Fine Agg./B	$\text{Na}_2\text{O}/\text{B}$	Ms ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$)
0.40	2.0	6%	1.0
0.45		5, 6, 7%	
0.50		6%	

수산화나트륨을 배합수에 용해시킬 경우 90°C 에 가까운 고온이 발생하기 때문에 배합 1일 전 배합수에 용해시켜 모르타르 배합 시 배합수의 온도가 25°C 로 안정화되도록 하였다(Oh *et al.* 2012).

2.2 실험 계획

AAS 모르타르의 모르타르 배합비는 Table 3와 같이 W/B = 0.40, 0.45, 0.50 세 종류로, 결합재 : 잔골재 = 1 : 2 로 고정하였다. 알칼리 활성화제는 기존 연구(Atis *et al.* 2009)를 통해 고강도 AAS 배합이 가능하였던, 슬래그 질량대비 $\text{Na}_2\text{O} = 6\%$ 와 $\text{Ms}(\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}) = 1.0$ 의 조건으로 첨가하였다. W/B=0.45에 대해서는 Na_2O 첨가량을 5, 6, 7% 세 수준으로 구분하여 알칼리 활성화제 첨가량이 압축강도 및 자기수축에 미치는 영향을 분석하였다.

2.3 실험 방법

2.3.1 플로우

KS L 5105 규정에 준하는 플로우 시험 기구를 사용하여 배합 직후부터 90분 동안 AAS 모르타르의 플로우 변화를 측정하였다.

2.3.2 응결 시간

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

2.3.3 압축 강도

$50 \times 50 \times 50\text{mm}$ 인 큐빅 시편을 제작하여 온도 $20 \pm 1^\circ\text{C}$, 습도 $70 \pm 5\%$ 의 항온항습기에서 24시간 양생 후 탈형하여 해당 재령까지 수중양생을 실시한 후 KS F 2426 규정에 따라 재령 1, 3, 7, 28일에 AAS 모르타르의 압축강도를 측정하였다.

2.3.4 자기 수축

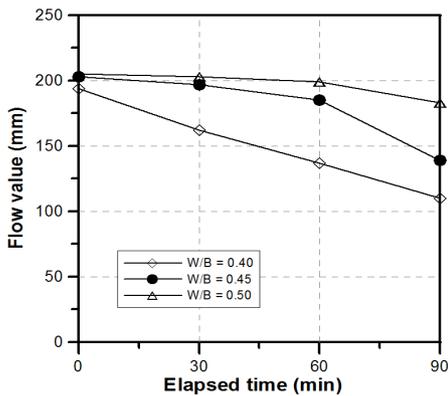
$40 \times 40 \times 160\text{mm}$ 의 빔 몰드를 사용하여 AAS 모르타르의 자기수축 측정용 시편을 제작하였으며 모르타르의 체적 변화량 측정을 위한 매립게이지를 시편의 중앙에 고정시켰다. 또한 몰드의 바닥과 벽면에 테프론(Tefron) 시트와 우드락을 깔아서 몰드와 시편사이에 발생할 수 있는 마찰을 최소화하였다. 모르타르 타설 후에는 모르타르의 수분 증발을 방지하기 위하여 표면을 비닐로 덮어 밀봉하였고, 온도 $20 \pm 1^\circ\text{C}$, 습도 $70 \pm 5\%$ 의 항온항

습기에서 24시간 양생하였다. 이후 물드를 제거하고 각각의 시편은 알루미늄 테이프로 밀봉하여 시편으로부터 수분의 증발과 흡수를 방지하였다. 한편, AAS 모르타르 자기수축의 최초 측정 은 모르타르의 초결 이후부터 이루어졌다.

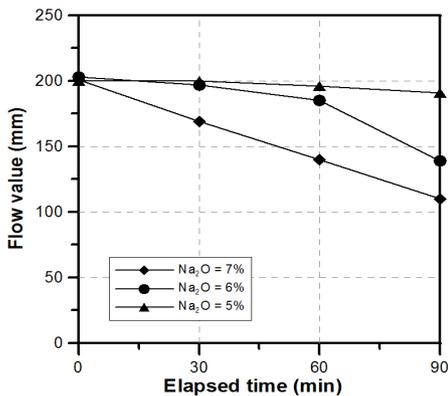
3. 실험 결과 및 분석

3.1 플로우

W/B= 0.40, 0.45, 0.50에 대한 시간 경과별 플로우 변화를 나타내는 Fig. 1(a)을 보면, 모든 배합에서 190mm 이상의 초기 플로우가 측정되었으나, 30분 이후부터 플로우가 빠르게 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 W/B=0.40인 경우에는 초기 플로우인 193mm에 비해 30분 만에 플로우가 163mm로 15% 감소하여, 낮은 W/B일수록 급격한 유동성 손실을 확인할 수 있었다. 반면, W/B=0.45와 0.50의 경우에는 각각 60분과 90분 동안 180mm 이상의 플로우를 유지하였다.



(a) W/B (Na₂O=6%)



(b) Na₂O (W/B=0.45)

Fig. 1. Flow values of AAS mortars

Fig. 1(b)는 알칼리 활성화제의 Na₂O 첨가량에 따른 플로우 변화를 나타낸 것으로 Na₂O 첨가량이 적을수록 시간 경과에 따른 플로우 손실이 감소하는 것을 알 수 있다. 고강도 AAS 모르타르 제조를 위해 Na₂O를 7%를 첨가한 경우에는 60분이 경과했을 때 초기 플로우 200mm에서 30%가 손실된 140mm가 측정되었다.

AAS 모르타르의 빠른 유동성 손실은 낮은 배합수량(W/B)과 활성화제 첨가량의 증가로 인하여 알칼리 반응이 촉진되어 수분이 빠르게 증발하기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 응결 시간

AAS 모르타르의 초결 및 종결 시간을 측정한 Table 4를 보면, 응결 시간은 W/B가 낮을수록 빨라지는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 특히, W/B=0.40의 경우에 W/B=0.50과 0.45에 비해 70~80분 정도 빠른 초결과 종결 시간을 보였다. 한편, W/B=0.45와 0.50의 초결과 종결시간의 차이가 거의 없는 것을 볼 때, W/B=0.40 이하에서는 낮은 배합수량으로 인하여 매우 높은 pH 환경이 조성되어 급결이 발생한 것으로 판단된다. Na₂O 첨가량에 따른 응결시간을 보면 5%에서 7%로 Na₂O 첨가량이 많아질수록 초결 시간은 50분, 종결 시간은 30분 빠르게 나타났다. 응결시간 측정결과, W/B와 알칼리 활성화제의 첨가량은 종결 보다는 초결에 더 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 고강도 AAS 콘크리트 제조의 작업시간 확보를 위해서는 빠른 초결 시간의 조절 방안에 대한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

3.3 압축강도

알칼리 활성 슬래그(AAS) 모르타르의 압축강도 측정 결과인 Fig. 2를 보면 AAS 모르타르는 재령 초기에 매우 높은 압축강도가 발현되었다. 일반적으로 고로슬래그는 물과 접촉하게 되면 슬래그 입자 표면에 치밀한 불투성의 산성피막이 생기기 때문에 느린 반응성으로 인해 낮은 초기 강도를 갖는다. 그러나 본 실험

Table 4. Setting time of AAS mortars

W/B	Na ₂ O Concentration (%)	Initial (min)	Final (min)
0.40	6%	100	210
0.45	5%	190	310
0.45	6%	170	290
0.45	7%	140	280
0.50	6%	180	290

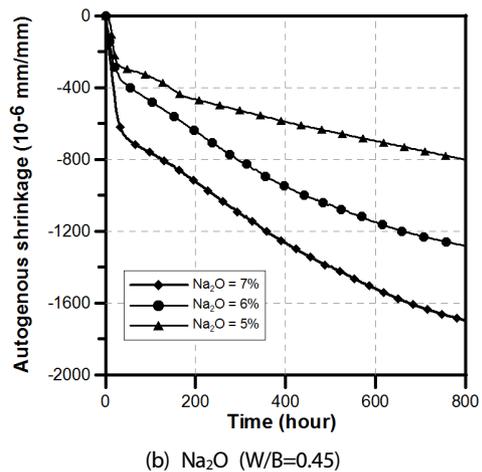
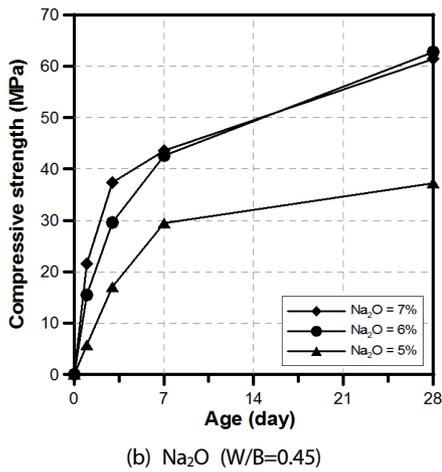
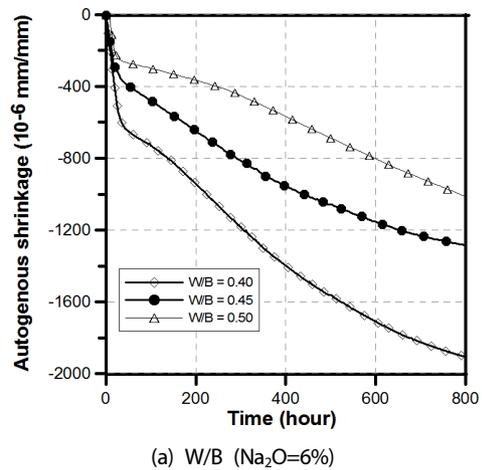
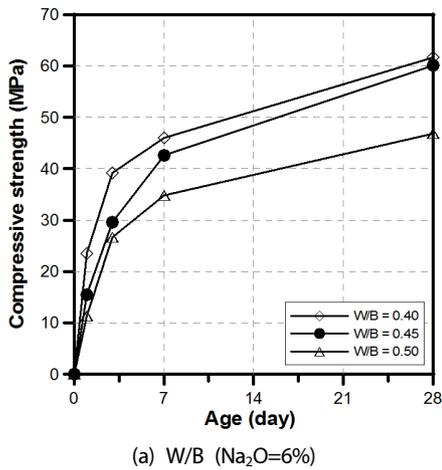


Fig. 2. Compressive strength of AAS mortars

Fig. 3. Autogenous shrinkage of AAS mortars

에서는 NaOH와 물 유리 같은 강알칼리 성분의 활성화제를 사용하여 13 이상의 높은 pH 환경을 유지함으로써 슬래그 입자의 피막의 붕괴를 촉진하여 활발한 반응과 함께 높은 초기 강도가 발현된 것으로 판단된다.

AAS 모르타르의 1일 압축강도 변화를 살펴보면 W/B=0.40의 경우 23.5MPa, W/B=0.50의 경우에는 11.4MPa이 측정되어 낮은 W/B에서 높은 초기 강도가 발현되었으며, W/B=0.45의 경우에는 Na₂O의 첨가량이 5%에서 7%로 많아질수록 압축강도는 5.7MPa, 15.5MPa, 21.5MPa로 증가하는 경향을 보였다.

재령에 따른 압축강도 변화를 살펴보면, W/B=0.40의 경우 재령 7일 이후부터 강도증가율이 감소하여 재령 28일에서는 W/B=0.45와 유사한 강도가 나타났다. 이는 동일한 양의 알칼리 활성화제 Na₂O=6%를 첨가하였더라도 W/B=0.40의 경우에는 낮은 배합수량으로 인하여 적정 범위 이상의 고농도 알칼리 환경이 조성되었기 때문으로 사료된다. 또한, 이러한 현상은 Na₂O

첨가량에 따른 압축강도 결과에서도 관찰할 수 있다. Na₂O=7%의 경우 Na₂O=6% 보다 다소 낮은 28일 압축강도가 발현되었고, 이는 알칼리 활성화제의 첨가량이 적정량 이상이었기 때문이라고 판단된다.

Wang *et al.*(1994)는 적정 범위 이상 농도의 알칼리 활성화제를 첨가할 경우 시편내의 자유 알칼리의 영향으로 백화와 같은 해로운 속성이 증가하여 강도 저하가 발생할 수 있다고 주장한 바 있다. 또한 NaOH를 과다하게 첨가하면 수화반응에 필요한 성분들이 반응성이 좋은 나트륨 이온 Na⁺에 의해 반응이 촉진되어 장기 재령에서 강도 증진이 저조하게 된다고 알려져 있다 (Park *et al.*, 2013).

3.4 자기수축

Fig. 3는 AAS 모르타르의 재령 30일까지의 자기수축 측정 결과를 나타낸 것으로 W/B가 낮을수록 활발한 알칼리 반응으로

인해 모르타르 내부 건조 속도가 빨라져 재령 초기부터 큰 자기 수축이 발생한 것을 알 수 있다. 또한 OPC 콘크리트(Lee *et al.*, 2004)에 비해 자기 수축량도 매우 크게 측정되어 재령 30일 기준으로 W/B=0.40에서 $1,800 \times 10^{-6}$, W/B=0.45에서 $1,225 \times 10^{-6}$, W/B=0.50에서 900×10^{-6} 의 자기수축이 발생하였다. 또한 Na₂O의 첨가량이 5%, 6%, 7%로 많아질수록 750×10^{-6} , $1,225 \times 10^{-6}$, $1,625 \times 10^{-6}$ 로 자기수축이 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 일반적으로 14일내에 자기수축량이 정체기에 접어드는 OPC와는 달리 W/B나 알칼리 활성화제의 첨가량과 관계없이 30일 동안 지속적인 수축이 발생하는 것을 확인할 수 있다. Atis *et al.*(2014)는 이러한 장기간 동안 발생하는 수축은 미세균열을 발생시켜 강도 저하의 원인이 될 수 있다고 주장하였다.

기존 연구(Cincotto *et al.*, 2003; Melo Neto *et al.*, 2008)에 따르면 AAS 모르타르의 자기수축은 알칼리 활성화제의 영향을 많이 받는다고 보고되고 있다. 물유리의 첨가량이 많아질수록 모르타르 내의 전체 공극은 감소하게 되고 중간 세공(mesopore)의 체적이 증가하게 되며, 이때 모르타르의

중간 세공은 자체건조로 인하여 수축에 직접적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 즉, 알칼리 활성화제의 첨가량이 많을수록 자기 수축이 크게 발생하는 것으로 알려져 있으며 이러한 경향은 본 실험연구에서도 동일하게 나타났다.

4. 결론

1. 알칼리 활성화제의 첨가량과 모르타르의 W/B는 알칼리 활성화제 모르타르의 응결과 유동성, 압축강도를 결정하는 중요한 인자로 실험 변수에 따라 그 특성이 크게 달라지는 결과를 얻었다.
2. 굳지 않은 모르타르의 특성으로는 W/B=0.45, Na₂O= 6%의 경우에 60분까지 180mm의 플로우를 유지하였고, 모르타르의 초결 시간은 180분을 보여 충분한 작업시간이 확보되었다.
3. AAS 모르타르의 초기 강도는 알칼리 활성화제 첨가량이 많을수록 높은 강도가 발현되었다. 그러나 과도한 알칼리 활성화제의 첨가는 초기의 급격한 알칼리 반응을 유발하여 장기 강도 저하를 일으킬 수 있어 AAS 모르타르의 역학적 특성과 경제성을 고려할 때 첨가량은 Na₂O=6%가 적절할 것으로 판단된다.
4. AAS 모르타르는 OPC 모르타르에 비해 매우 큰 자기수축을 나타냈다. 이는 Na₂O의 첨가량이 많고 낮은 W/B로 인해 배합수의 pH가 높아질수록 알칼리 반응이 촉진되고 내부수분

이 빠르게 증발하여 자기수축이 크게 발생하는 것으로 판단된다.

5. AAS 모르타르의 강도 및 자기수축 특성을 검토한 결과 현장 적용 및 구조 부재 사용을 위해서는 수화생성물과 같은 미세 구조 분석을 통해 다양한 인자가 수축에 미치는 영향과 원인을 분석하고 수축저감제와 같은 혼화제의 사용과 적절한 양생을 통해 수축을 제어하는 방안을 고려해야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 “탄소저감형 건설재료 기술개발”(과제번호11기술혁신 F04)의 일환으로 국토해양부 건설기술혁신사업의 재정적 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

Aydin, S. and Baradan, B. (2014). Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars, *Composites Part B: Engineering*, **57**, 166–172.

Atis, C.D., Bilim, C., Celik, O., and Karahan O. (2009). Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar, *Construction and Building Materials*, **23**, 548–555.

Brough, A.R. and Atkinson, A. (2000). Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars. Part I. Strength, hydration and microstructure, *Cement and Concrete Research*, **32**, 865–879.

Chi, M.-C., Chang J.-J., and Huang, R. (2012). Strength and drying shrinkage of alkali-activated slag paste and mortar, *Advance in Civil Engineering*.

Collins, F.G. and Sanjayan, J.G. (1999). Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete, *Cement and Concrete Research*, **29**, 455–458.

Damtoft, J.S., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D., and Gartner, E.M. (2008). Sustainable development and climate change initiatives, *Cement and Concrete Research*, **38(2)**, 115–127.

KCA (Korea Cement Association) (2011). 2010 Cement of Statistical Annual Report in Korea, **13**. [in Korean]

- Lee, K.M., Kwon, K.H., Lee, H.K., Lee, S.H., and Kim, G.Y. (2004). Characteristics of autogenous shrinkage for concrete containing blast-furnace slag, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **16(5)**, 621–626.
- Lim, S.N. and Wee, T.H. (2000). Autogenous Shrinkage of ground-granulated blast furnace slag concrete, *ACI Materials Journal*, **97(5)**, 587–592.
- Melo Neto, A. A., Cincotto, M.A., and Repette, W. (2008). Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement, *Cement and Concrete Research*, **38**, 565–574.
- Oh, S.H., Kim, D.W., and Lee, K.M. (2012). Early age properties of alkali activated slag mortar according to water/binder ratio, *Journal of the Korean Recycled Construction Resource Institute*, **7(2)**, 63–69 [in Korean].
- Palacios, M. and Puertas, F. (2007). Effect of shrinkage-reducing admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars and pastes, *Cement and Concrete Research*, **37**, 691–702.
- Palacios, M. and Puertas, F. (2003). Effect of superplasticizer and shrinkage-reducing admixtures on alkali-activated slag pastes and mortars, *Cement and Concrete Research*, **35**, 1358–1367.
- Park, S.G., Kwon, S.J., Kim, Y.M., and Lee, S.S. (2013). Reaction properties of non-cement mortar using ground granulated blast furnace slag, *Journal of the Korea Contents Association*, **13(9)**, 392–399 [in Korean].
- Shi, C., Krivenko, P.V., and Roy, D. (2006). Alkali-activated cement and concrete, Taylor and Francis, 376.
- Wang S., Scrivener K.I., and Pratt P.L. (1994). Factors affecting the strength of alkali-activated slag, *Cement and Concrete Research*, **24(6)**, 1033–1043.
- Yang, K.H., Cho, A.R., and Song, J.K. (2013). Underrestrained Short-Term Shrinkage of Calcium Hydroxide-Based Alkali-Activated Slag Concrete, *ACI Materials Journal*, **110(2)**, 127–136.

고강도 알칼리 활성 슬래그 모르타르의 자기수축 특성

최근 산업부산물의 재활용과 지구온난화와 같은 환경오염 문제 해결방안으로 알칼리 활성 슬래그(AAS) 콘크리트에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다. AAS 콘크리트는 고강도 발현이 가능하며 내구성 또한 우수한 것으로 알려져 있다. 그러나 빠른 알칼리 반응으로 인하여 매우 큰 수축이 발생함에도 불구하고 고강도 AAS 콘크리트의 자기수축 거동에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 물-결합재비가 0.40, 0.45, 0.50이고 알칼리 활성화제 첨가량이 $\text{Na}_2\text{O}=5, 6, 7\%$ 인 AAS 모르타르 배합을 실시하여 굳지 않은 모르타르 특성(플로우, 응결시간)과 압축강도, 자기수축을 측정하였다. 실험 결과, 일반 콘크리트에 비해 매우 큰 자기수축이 발생하였고 W/B가 낮고 알칼리 활성화제 첨가량이 많을수록 자기 수축량이 증가하는 것을 알 수 있었다. 따라서 고강도 알칼리 활성 슬래그 콘크리트의 자기 수축을 줄이기 위해서는 수축 저감제의 사용 및 적절한 양생이 필요하다고 판단된다.