



고로슬래그 미분말의 치환율과 분말도가 시멘트 모르타르의 자기수축에 미치는 영향

송치원¹⁾ · 최성철^{2)*}

¹⁾한국건설기술연구원 박사후연구원 ²⁾중앙대학교 건설환경플랜트공학과 교수

Influence of Replacement Ratio and Fineness of GGBFS on Autogenous Shrinkage of Cement Mortars

Chiwon Song¹⁾ and Seongcheol Choi^{2)*}

¹⁾Postdoctoral Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10233, Rep. of Korea

²⁾Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Chung-Ang University, Seoul 06974, Rep. of Korea

ABSTRACT This study experimentally analyzed the effects of replacement ratio and fineness of ground granulated blast-furnace slag (GGBFS) on the autogenous shrinkage of cement mortar. The specimens were fabricated with GGBFS content (0, 50, 65 and 80 % by weight of binder) and fineness (4,330, 7,650 cm²/g) as variables, and the internal relative humidity and autogenous shrinkage were measured. The self-desiccation and autogenous shrinkage of the specimens with GGBFS replacement ratio up to 65 % increased as the content of the GGBFS increased whereas those decreased in the specimens with the GGBFS replacement ratio of 80 %. This is because GGBFS changed the pore structures and hydration of cementitious materials, resulting in the changes in the radius of meniscus formed inside the pores and eventually changes in the capillary stresses. In addition, the self-desiccation and autogenous shrinkage of cement mortar increased with increasing fineness of GGBFS.

Keywords : ground granulated blast-furnace slag (GGBFS), fineness, self-desiccation, autogenous shrinkage, replacement ratio

1. 서 론

지구 온난화가 사회적 문제로 대두됨에 따라 시멘트 산업에서도 온실가스 중 하나인 CO₂ 배출을 저감시키기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다(Choi et al. 2016; Aydin and Arel 2017). 그중에서도 시멘트 클링커를 대체할 수 있는 고로슬래그 미분말(Ground granulated blast-furnace slag, GGBFS)을 활용한 콘크리트에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(Liu and Hansen 2016; Zhao et al. 2017). 고로슬래그 미분말은 잠재수경성을 갖고 있기 때문에 고로슬래그 미분말의 첨가는 시멘트계 재료의 재령 초기 강도를 감소시키고 장기적으로 공극구조를 더욱 치밀하게 만듦으로써 자기수축을 많이 증가시키는 것으로 보고되고 있다(Lim and Wee 2000). Lee et al.(2006)은 고로슬래그 미분말을 결합재의 50 % 치환한 콘크리트 시편의 자기수축은 첨가하지 않은 기준 시편에 비해 최대 213 %까지 증가하는 것으로 보고하였다. Jang et al.(2017)은 고로슬래그 미분말을 65 %까지 치환한 고성능 콘크리트

의 자기수축을 측정하였으며, 기준 시편보다 자기수축이 약 6 % 가량 감소하는 것으로 보고하였다. Liu and Hansen(2016)은 고로슬래그 미분말을 결합재의 25 % 그리고 50 % 치환한 콘크리트의 자기수축이 기준 시편보다 약 33 % 그리고 11 % 증가하는 것으로 보고하였다. 고로슬래그 미분말을 결합재의 약 80 %까지 사용한 고로슬래그 미분말 다량 치환 시멘트계 재료에 관한 연구가 있으나(Lim and Wee 2000), 초기 강도의 감소로 인해 일반적으로 60 %까지 치환한 연구가 주를 이루고 있다. 고로슬래그 미분말에 의한 초기 강도 문제를 해결하기 위하여 고로슬래그 미분말의 분말도를 높이는 연구가 제안되고 있지만(Siddique and Bennacer 2012), 고로슬래그 미분말의 다량 치환과 분말도가 시멘트계 재료의 자기수축에 미치는 영향에 관한 연구는 아직 부족한 실정이다.

다공성 특징을 갖는 시멘트계 재료의 자기수축을 발생시키는 모세관 응력은 물의 표면장력에 의해 공극 내부에서 형성되는 메니스커스의 반경과 깊음의 관련이 있다(Lura et al. 2003). 라플라스의 법칙에 따르면, 메니스커스가 더 작은 직경을 갖는 공극에서 형성될수록 모세관 응력은 증가하게 되며, 메니스커스의 반경은 켈빈의 법칙에 따라서 시멘트계 재료의 내부상대습도와 비례 관계를 갖는다. 따라서, 시멘트계 재료의 내부상대습도를 측정함으로써 자기수축을 발생

*Corresponding author E-mail : schoi@cau.ac.kr

Received October 09, 2019, Revised November 13, 2019,

Accepted November 19, 2019

©2020 by Korea Concrete Institute

시키는 모세관 응력에 대한 추정이 가능하기 때문에 시멘트계 재료의 내부상대습도를 정확히 측정하는 것은 중요한 의미를 지니며, 이를 통해 자기수축에 대한 정확한 분석이 가능하다.

이 연구에서는 고로슬래그 미분말의 치환율 및 분말도가 시멘트 모르타르의 자기수축에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. 이를 위하여 결합재 중량 대비 고로슬래그 미분말의 치환율과 분말도를 변수로 하여 총 5종류의 시멘트 모르타르 시편을 제작하고 각 시편의 자기수축을 측정하고 자기건조를 분석하기 위하여 내부상대습도도 함께 측정하였다.

2. 이론적 배경

시멘트와 고로슬래그 미분말은 물과 수화반응을 하게 되며, 이로 인해 시멘트 페이스트 내부에서는 고체 뼈대가 형성되고 화학적 수축은 외면적인 부피 변화로 완전히 전환되지 않는다. 따라서, 시멘트 페이스트 내부에서는 다양한 크기를 갖는 모세관 공극이 형성되고 해당 공극에서는 물의 표면장력으로 인해 메니스커스가 형성된다(Lura et al. 2003). Table 1은 수화반응에 의한 공극의 상태와 메니스커스의 반경 변화에 대한 도식표현을 나타낸다(Henkensiefken et al. 2009). 시멘트 페이스트의 내부에는 다양한 크기를 갖는 공극들이 존재하며, 모든 수분은 공극에 위치한다. 수화반응에 의한 수분의 소모는 이 공극들 중에서 가장 큰 지름을 갖는 공극에서부터 시작되고 수분이 소모되어 한 번 비워지게 된 공극은 외부로부터 수분이 공급되지 않는 한 더 이상 포화되지 않고 비워진 상태로 존재하게 된다(Henkensiefken et al. 2009). 배합 직후 시멘트 페이스트 내부에 존재하는 모든 공극은 포화된 상태로 존재한다. 그러나, 재령이 증가함에

따라 재령 t_1 이 되면, 공극 내부에 존재하는 수분은 수화반응에 의해 소모되어 비워지게 되는 공극이 나타나고 r_{m,t_1} 의 반경을 갖는 메니스커스가 형성된다. 재령 t_1 에서는 이미 r_{m,t_1} 의 크기를 갖는 공극까지는 수분이 소모되어 비워졌기 때문에 재령 t_1 이후에서는 r_{m,t_1} 의 크기를 갖는 공극에서부터 수분이 소모되기 시작하며, 재령 t_2 에서는 r_{m,t_2} 의 크기를 갖는 메니스커스가 형성된다. 따라서, 수화반응에 의해서 수분이 소모되어 비워지게 되는 공극의 범위는 점차 늘어나게 되며, 포화된 공극의 범위는 점차 줄어들게 된다. 이러한 메니스커스 반경의 감소로 인해 시멘트계 재료는 자기건조 현상이 발생하며, 켈빈의 법칙에 따라 메니스커스의 반경과 내부상대습도는 식 (1)과 같은 관계를 갖는다.

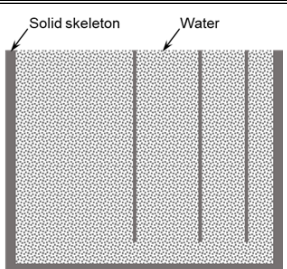
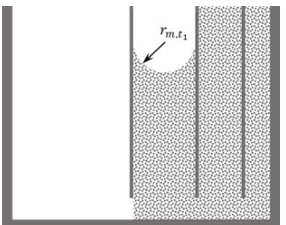
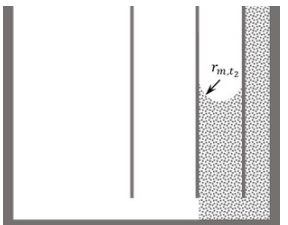
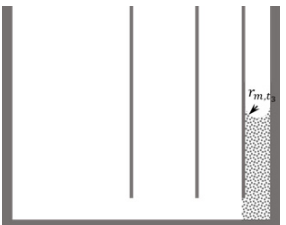
$$r_m = \frac{2\gamma M}{\ln(\text{IRH})\rho_w RT} \quad (1)$$

여기서, r_m 은 메니스커스의 반경, γ 은 물의 표면장력(0.0703 N/m), M 은 물의 몰중량(0.01802 kg/mol), ρ_w 는 물의 밀도(1,000 kg/m³), R 은 기체상수(8.314 J/mol K), T 는 절대온도(293.15 K)를 나타낸다.

공극 내부에서 형성된 메니스커스로 인해 액체상 내부의 압력(P)과 가스상의 압력(P_g) 사이에서 차이가 발생하게 되며, 이 두 압력 차이에 의해 공극 내부에서는 모세관 응력(σ_c)이 발생하며 시멘트계 재료의 수축이 발생한다. 메니스커스의 반경과 모세관 응력의 관계는 라플라스의 법칙에 따라 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_c = P_g - P_l = -\frac{2\gamma}{r_m} \quad (2)$$

Table 1 Schematic representation for variation in meniscus radius in the pore structures at different ages

Age	t_0 (immediately after mixing)	t_1	t_2	t_3
Conceptual illustration				
Meniscus radius	$r_{m,t_0} = \infty$	r_{m,t_1}	r_{m,t_2}	r_{m,t_3}
		Decrease with age		
Internal relative humidity	$\text{IRH}_{t_0} = 100\%$	IRH_{t_1}	IRH_{t_2}	IRH_{t_3}
		Decrease with age		
Capillary stress	$\sigma_{c,t_0} = 0$	σ_{c,t_1}	σ_{c,t_2}	σ_{c,t_3}
		Increase with age		

공극 내부에서 형성되는 메니스커스의 반경이 감소할수록 액체 내부의 압력과 가스상의 압력 차이는 증가하여 더 큰 모세관 응력을 발생시킨다. 이처럼 시멘트계 재료는 수화 반응에 의한 수분의 소모로 공극 내부에서 형성된 메니스커스의 반경은 점차 감소하게 되며, 이로 인해 모세관 응력은 점차 증가하게 되고 수축량 또한 점차 증가하게 된다.

3. 실험 개요

3.1 사용 재료 및 배합

시멘트는 1종 보통 포틀랜드 시멘트(ordinary Portland cement, OPC)를 사용하였으며, 밀도와 분말도는 각각 3.15 g/cm^3 그리고 $3,250 \text{ cm}^2/\text{g}$ 이다. 고로슬래그 미분말의 밀도는 2.89 g/cm^3 이며, 분말도는 4,330과 $7,650 \text{ cm}^2/\text{g}$ 을 갖는 두 종류를 사용하였다. Table 2과 Fig. 1은 각각 시멘트와 고로슬래그

미분말의 화학조성과 입자 크기 분포를 나타낸다. “S4”와 “S8”은 각각 4,330과 $7,650 \text{ cm}^2/\text{g}$ 의 분말도를 갖는 고로슬래그 미분말을 의미한다. 시멘트와 고로슬래그 미분말의 입자 크기 분포는 입자를 모두 구형으로 가정하여 레이저 회절 방식을 이용하여 측정하였다. 잔골재는 SiO_2 함량이 98 % 이상인 표준사를 사용하였다.

Table 3은 각 시편의 배합비를 나타낸다. 물-결합재비는 0.2이며, 잔골재-결합재비는 1.0으로 하였다. 굳지 않은 시멘트 모르타르의 유동성을 확보하기 위하여 폴리카르복산계 고성능 감수제를 결합재 중량 대비 0.53 % 첨가하였다. 고로슬래그 미분말의 다량 치환 및 분말도가 자기수축에 미치는 영향을 분석하기 위하여 고로슬래그 미분말은 결합재의 50 %, 65 % 그리고 80 %까지 치환하였으며, 앞서 언급된 바와 같이 4,330과 $7,650 \text{ cm}^2/\text{g}$ 의 분말도를 갖는 두 종류의 고로슬래그 미분말을 사용하였다. 시편 ID에서 “S4”와 “S8” 뒤에 나타낸 숫자는 결합재에 대한 고로슬래그 미분말의 치환율을 나타낸다.

3.2 실험 방법

시편의 내부상대습도는 SHT75 온습도 센서를 사용하여 측정하였다. SHT75는 정전용량형 온습도 센서로서 저항형 센서에 비해 높은 감도 및 신뢰성을 갖는 장점으로 인하여 콘크리트의 내부상대습도를 측정하는데 활용되고 있다(Choi and Won 2010; Song and Choi 2017). 아크릴 관을 미리 몰드에 설치한 후에 재료를 타설하고, 이후 재료의 종결이 지난 시점에서 센서를 아크릴관 안에 설치하였다. Fig. 2(a)는 내부상대습도를 측정 중인 시편을 나타낸다.

시멘트 모르타르 시편의 자기수축은 ASTM C1698-09에 따라 측정되었다. 이 방법은 시편의 구속 효과와 수분 증발이 자기수축에 미치는 영향을 최소화할 수 있다는 장점이 있다. 굳지 않은 시멘트 모르타르를 길이 420 mm, 지름 29 mm 갖는 주름관에 타설한 후 진동 다짐을 하였다. 타설이 완료된 시편의 길이 변화는 LVDT를 이용하여 실온($20 \pm 1^\circ \text{C}$)에서 측정하였다. Fig. 2(b)는 자기수축을 측정 중인 시편을 나타낸다. 각 시편의 자기수축에 의한 길이 변화는 종결 이후부터 나타났으며, 종결은 관입저항 시험을 통해 측정하였다. Table 4는 각 시편의 종결시간을 나타낸다. Plain 시편의 경화가 가장 빠르게 나타났으며, 고로슬래그 미분말의 함량이 증

Table 2 Chemical compositions of OPC and GGBFS (mass %)

	OPC	GGBFS	
		S4 ¹⁾	S8 ²⁾
SiO_2	20.8	34.0	32.2
Al_2O_3	4.9	16.4	15.5
Fe_2O_3	3.5	0.5	1.5
CaO	62.4	37.2	40.6
MgO	1.6	6.3	4.8
K_2O	0.9	0.5	0.6
Na_2O	0.3	1.3	1.1
SO_3	2.2	2.7	2.9
LOI ³⁾	2.7	0.2	0.3
SUM	99.3	99.1	99.5

¹⁾Fineness of GGBFS=4,330 cm^2/g

²⁾Fineness of GGBFS=7,650 cm^2/g

³⁾Loss of ignition

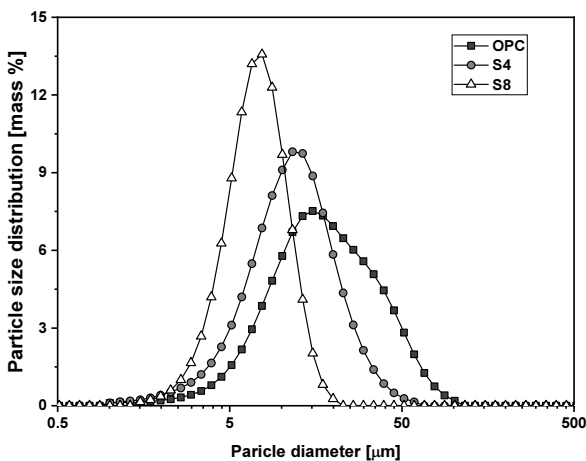


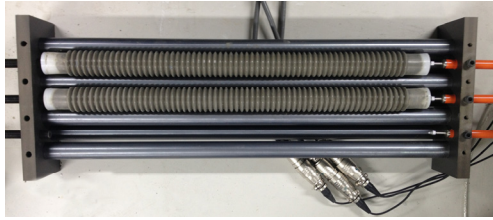
Fig. 1 Particle size distribution of binders

Table 3 Mixture proportion (g)

ID of specimen	Binder			Water	Sand	SP
	OPC	GGBFS				
		S4	S8			
Plain	6,750	-	-	1,350	6,750	35.78
S4-50	3,375	3,375	-			
S4-65	2,363	4,388	-			
S4-80	1,350	5,400	-			
S8-80	1,350	-	5,400			



(a) Internal relative humidity



(b) Autogenous shrinkage

Fig. 2 Test specimens

Table 4 Setting time of specimens

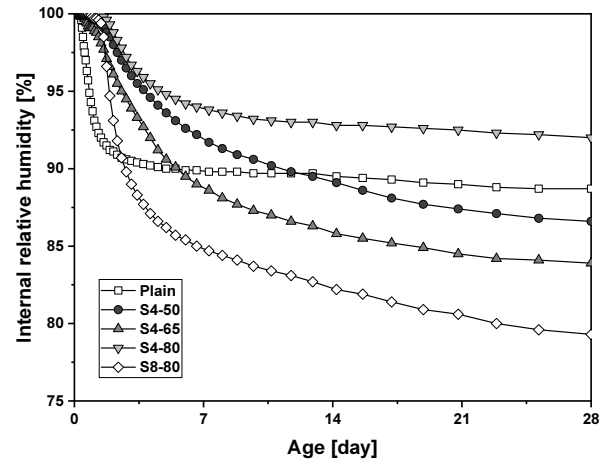
ID of specimen	Setting time (min)
Plain	298
S4-50	368
S4-65	406
S4-80	756
S8-80	704

가할수록 종결은 늦춰졌다. 모든 배합은 주름관에 타설하기에 적합한 정도의 작업성을 나타냈다.

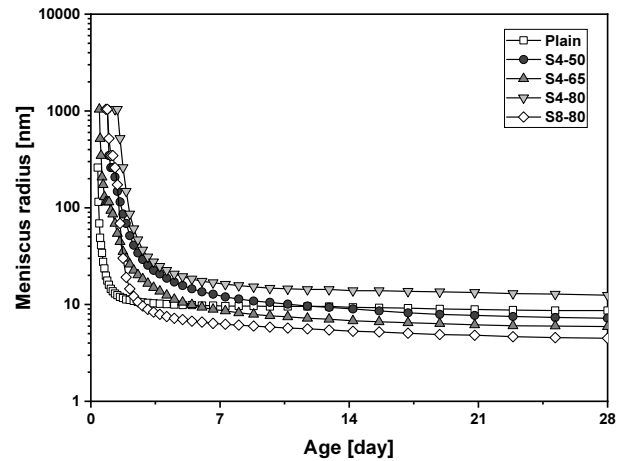
4. 실험결과 및 분석

4.1 내부상대습도와 메니스커스 반경 및 모세관 응력의 변화

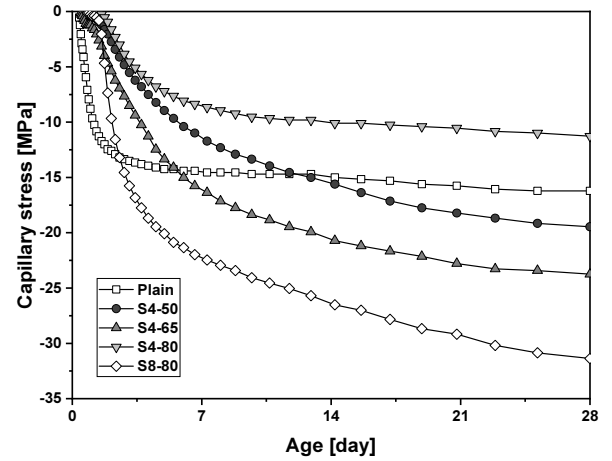
Fig. 3(a)는 각 시편의 재령에 따른 내부상대습도의 변화를 나타낸다. 모든 시편에서 수화반응이 진행됨에 따라서 내부상대습도가 감소하는 자기건조 현상이 나타났다. 모든 시편에서 재령 초기에 자기건조가 크게 발생하였으며, 특히 Plain 시편에서 이러한 현상이 두드러지게 나타났다. 이러한 결과는 시편의 공극 내부에서 형성되는 메니스커스의 반경과 깊이의 관련이 있다. Fig. 3(b)는 측정된 내부상대습도 데이터를 식 (1)에 대입하여 나타낸 재령에 따른 메니스커스 반경의 변화를 나타낸다. 재령 초기에는 수화반응에 의한 수분의 소모량이 많기 때문에 메니스커스의 반경은 매우 큰 폭으로 감소하는 것으로 나타났다. 재령 3일에서 Plain, S4-50, S4-65, S4-80 그리고 S8-80 시편의 메니스커스 반경은 초기



(a) Internal relative humidity



(b) Meniscus radius



(c) Capillary stress

Fig. 3 Variation of internal relative humidity, meniscus radius and capillary stress of specimens

에 형성된 메니스커스 반경의 1.0 %, 2.6 %, 1.7 %, 3.2 % 그리고 0.9 % 수준으로 나타났다. 결합재가 고로슬래그 미분말로 치환된 시편들의 재령 초기 메니스커스 반경은 Plain 시편에 비해 크게 나타났다. 고로슬래그 미분말은 잠재수경성 특성이 있어 재령 초기에는 수화반응을 거의 하지 않기 때문에 고로슬래그 미분말의 함량이 증가할수록 수화반응에 의한 수분의 소모량은 점차 감소하게 된다. 따라서, 고로슬래그

미분말의 함량이 증가함에 따라 시멘트계 재료의 공극구조가 더욱 치밀해졌음에도 불구하고 수화반응에 의한 수분의 소모량이 적기 때문에 더 작은 크기를 갖는 공극에서 메니스커스가 형성되기 어려워지며, 결국 자기건조량은 감소하게 된다(Choi et al. 2017; Snoeck et al. 2015).

Plain 시편은 재령 초기에서 대부분의 자기건조가 발생하였지만, 고로슬래그 미분말이 첨가된 시편들은 재령 초기 이후에도 지속해서 내부상대습도가 감소하는 자기건조가 발생하였다. Plain, S4-50, S4-65, S4-80 그리고 S8-80 시편의 재령 3일과 28일 내부상대습도의 차이는 각각 1.5 %, 8.6 %, 9.3 %, 4.2 % 그리고 8.1 %로 나타났다. 공극 내부에서 형성된 메니스커스의 반경 또한 유사한 경향을 나타냈다. 재령 3일 이후에는 메니스커스 반경의 감소 폭은 매우 작게 나타났으며, 특히 Plain 시편에서 이러한 현상이 뚜렷하게 나타났다. 재령 28일에서 Plain, S4-50, S4-65, S4-80 그리고 S8-80 시편의 메니스커스 반경은 재령 3일에 형성된 메니스커스 반경의 83.3 %, 26.9 %, 34.6 %, 37.8 % 그리고 49.3 %로 나타났다. 즉, Plain 시편은 재령 초기에 대부분의 메니스커스 반경이 감소하지만, 고로슬래그 미분말이 첨가된 시편들은 재령 초기 이후 메니스커스 반경이 Plain 시편에 비해 많이 감소하였다. 이러한 결과는 고로슬래그 미분말에 의해 시편의 공극구조가 더욱 치밀해지고 잠재수경성 특성으로 인해 재령 초기 이후에 추가로 수분을 소모함으로써 더 작은 크기를 갖는 공극에서 메니스커스가 형성되는 것에 기인한다(Li et al. 2010).

재령 28일에서 Plain, S4-50, S4-65, S4-80 및 S8-80 시편의 내부상대습도는 각각 88.7 %, 86.6 %, 83.9 %, 92.0 % 그리고 79.3 %로 나타났다. 앞서 언급된 바와 같이 고로슬래그 미분말의 첨가는 시멘트계 재료의 공극구조를 더욱 치밀하게 만든다(Choi et al. 2017). 따라서, 고로슬래그 미분말의 함량이 증가할수록 수화반응에 의한 수분의 소모로 더 작은 크기를 갖는 공극에서 메니스커스가 형성되기 쉬워지기 때문에 자기건조량은 점차 증가하게 된다(Li et al. 2010). 이러한 메커니즘에 의해서 재령 초기 이후 S4-50과 S4-65 시편들은 Plain 시편보다 메니스커스의 반경이 감소하는 속도가 빠르며, 결국 높은 자기건조를 나타낸다. 그러나 S4-80 시편은 고로슬래그 미분말의 첨가로 인해 Plain 시편보다 공극구조가 더욱 치밀해졌음에도 불구하고 발생하는 자기건조량이 많이 감소하였다. 잠재수경성 특성을 갖는 고로슬래그 미분말로 결합재가 다량 치환되어 수화반응에 의한 수분의 소모량이 많이 감소함에 따라 더 작은 크기를 갖는 공극에서 메니스커스가 형성되기 어려워지기 때문에 이러한 결과가 나타났다. S8-80 시편은 Plain과 S4-80 시편들에 비해 높은 자기건조량을 나타냈다. 이러한 결과는 작은 입자 크기를 갖는 고로슬래그 미분말에 의해 공극 구조가 치밀해졌을 뿐만 아니라 수화반응이 촉진되기 때문에 추가적인 수분의 소모로 더 작은 크기를 갖는 공극에서 메니스커스가 형성되는 것에 기인한다(Tazawa and Miyazawa 1995).

이러한 메니스커스 반경의 감소는 라플라스의 법칙에 따라 공극 내부에서 발생하는 모세관 응력을 증가시킨다. Fig.

3(c)는 식 (1)을 통해 계산된 메니스커스 반경을 식 (2)에 대입하여 나타낸 각 시편의 재령에 따라 변화되는 모세관 응력의 변화를 나타낸다. 모세관 응력의 변화는 내부상대습도의 변화와 매우 유사한 경향을 나타냈다. 재령 초기에는 Plain 시편의 모세관 응력이 가장 빠르게 증가하였으며, 고로슬래그 미분말이 첨가된 시편들은 Plain 시편보다 모세관 응력이 증가하는 속도가 느리게 나타났다. 재령 28일에서는 S8-80 시편의 모세관 응력이 -31.67 MPa로 가장 크게 나타났으며, Plain, S4-50, S4-65 그리고 S4-80 시편들의 모세관 응력은 S8-80 시편의 51.7 %, 62.0 %, 75.7 % 및 35.6 % 수준으로 나타났다.

4.2 자기수축

Fig. 4는 종결 이후 각 시편의 재령에 따른 자기수축의 변화를 나타낸다. 자기수축의 변화는 내부상대습도의 변화와 거의 일치하는 경향을 나타냈다. 재령 초기에는 수화반응에 의한 수분의 소모가 크기 때문에 모세관 응력이 빠르게 증가하고 이에 저항할 수 있는 시편의 탄성계수가 작아 자기수축이 크게 나타났다. 특히, Plain 시편에서 재령 초기에 자기수축이 크게 발생하였다. Plain, S4-50, S4-65, S4-80 그리고 S8-80 시편들의 재령 3일 자기수축은 재령 28일 자기수축의 93.8 %, 69.6 %, 73.4 %, 72.1 % 및 83.3 %로 나타났다. 앞서 언급된 바와 같이 Plain 시편은 재령 초기에 대부분의 자기건조가 발생하게 되며, 이로 인해 자기수축의 대부분도 재령 초기에 발생하게 된다. 그러나 고로슬래그 미분말이 첨가된 시편들은 고로슬래그 미분말에 의한 공극구조의 변화와 잠재수경성 특성으로 인해 재령 3일 이후에도 지속해서 자기수축이 증가하는 경향을 나타냈다. 재령 28일에서 Plain, S4-50, S4-65, S4-80 그리고 S8-80 시편들의 자기수축은 각각 -659 $\mu\epsilon$, -802 $\mu\epsilon$, -898 $\mu\epsilon$, -358 $\mu\epsilon$ 및 -1,066 $\mu\epsilon$ 로 나타났다. S4-50, S4-65 그리고 S8-80 시편들은 높은 자기건조로 인해 큰 모세관 응력이 발생하며, 결국에는 Plain 시편보다 자기수축이 증가하였다. 그러나 S4-80 시편은 낮은 자기건조로 인해 공극 내부에서 발생하는 모세관 응력이 적기 때문에 Plain 시편

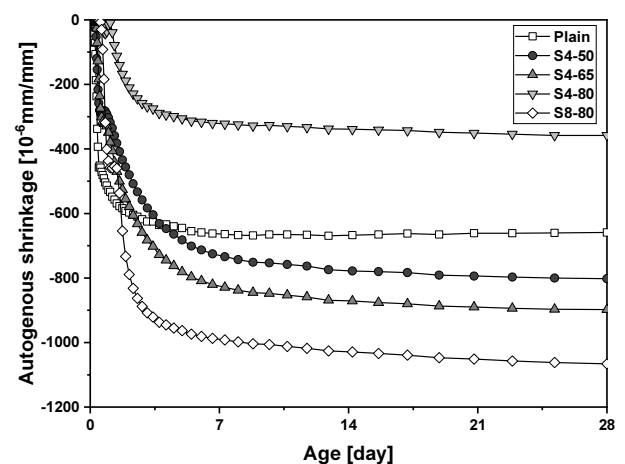


Fig. 4 Autogenous shrinkage

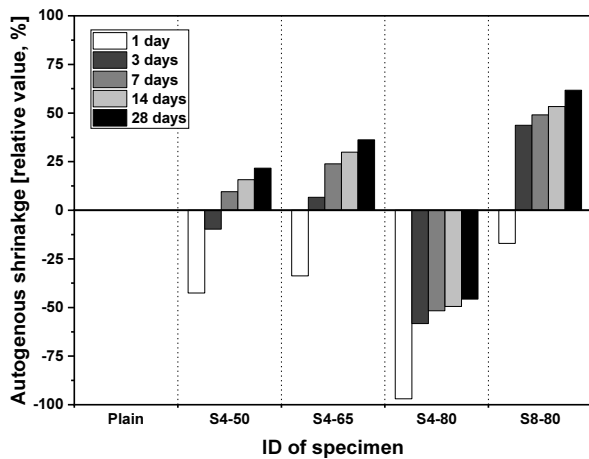


Fig. 5 Effect of GGBFS on autogenous shrinkage

보다 자기수축이 많이 감소하였다. 즉, 65 %까지의 고로슬래그 미분말의 치환은 시멘트 모르타르의 자기수축을 증가시키며, 그 이상의 치환은 자기수축을 감소시킨다. 앞서 언급된 바와 같이 65 %까지의 고로슬래그 미분말의 치환은 시편의 자기건조를 증가시키며, 그 이상의 치환은 자기건조를 감소시킨다. 따라서, 65 %의 고로슬래그 미분말의 치환량을 기준으로 자기수축이 변화되는 경향이 역전되며, 이러한 경향은 Lim and Wee(2000)의 연구 결과와 매우 유사하게 나타났다.

Fig. 5는 고로슬래그 미분말이 시멘트 모르타르의 자기수축에 미치는 영향을 나타낸다. 재령 1일에서는 고로슬래그 미분말의 첨가는 그 함량과 관계없이 시멘트 모르타르 시편의 자기수축을 감소시켰으며, S4-80 시편이 97.0 %로 가장 큰 자기수축 감소 효과를 나타냈다. 그러나 재령이 증가할수록 자기수축 감소효과는 점차 감소하였으며, 재령 7일부터는 S4-80 시편을 제외한 모든 시편의 자기수축이 Plain 시편보다 증가하는 것으로 나타났고 S8-80 시편의 자기수축 증가율이 61.8 %로 가장 크게 나타났다. S4-80 시편은 전 재령에서 Plain 시편보다 자기수축량이 적게 나타났으며, 자기수축이 감소하는 값은 점차 감소하여 재령 28일에서 45.7 %로 나타났다.

4.3 내부상대습도와 자기수축의 관계

시멘트계 재료의 수화반응은 자기건조 및 자기수축을 유발하며, 이론적으로 자기수축은 내부상대습도와 선형의 관계를 갖는 것으로 알려져 있다(Bazant and Yunping 1994). Fig. 6은 각 시편의 내부상대습도와 자기수축의 관계를 나타낸 그래프다. 재령 초기 시편이 경화되는 높은 내부상대습도 구간에서 그래프의 기울기는 매우 급격하게 나타났으며, 재령이 지남에 따라서 그래프의 기울기는 점차 감소하는 경향을 나타냈다. 시멘트계 재료의 자기수축은 수화반응에 의한 수분의 손실로 발생하는 시멘트 페이스트의 체적 감소로 알려져 있으며, 이러한 체적 감소는 시멘트계 재료의 경화된 재료에 의해 구속된다(Hobbs 1974). 시멘트계 재료는 수화

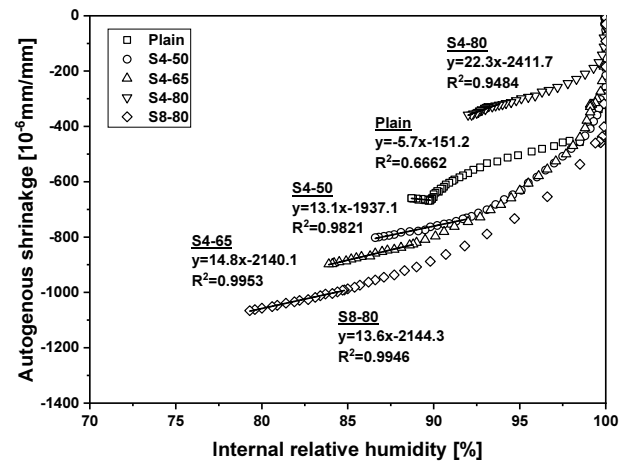


Fig. 6 Relationship between variation of internal relative humidity and autogenous shrinkage

반응에 의해 점차 경화되어감에 따라 수화반응의 수분 손실에 의한 체적 변화를 더 크게 구속하게 된다. 따라서, 지속적인 자기건조로 인해 모세관 응력이 점차 증가하지만, 해당 그래프의 기울기는 점차 감소하는 경향을 나타낸다.

Fig. 6에 나타낸 그래프의 식들은 각 시편의 내부상대습도와 자기수축이 선형에 가까운 기울기를 나타내는 재령 7일부터 28일까지의 데이터에 대한 회귀분석 결과를 나타낸다. 그래프의 선형 기울기는 내부상대습도의 감소에 의해 발생하는 자기수축의 변화를 나타낸다. 고로슬래그 미분말의 함량이 증가할수록 그래프의 선형 기울기는 점차 증가하였다. 이는 결합재에 대한 고로슬래그 미분말 치환율의 증가가 동일한 내부상대습도의 감소 때문에 발생하는 자기수축량을 증가시킨다는 것을 의미한다. 재령 7일 이후에서도 고로슬래그 미분말은 여전히 충분한 수화반응을 하지 않았기 때문에 고로슬래그 미분말의 함량이 증가할수록 자기건조에 의한 체적 감소를 구속하는 효과가 점차 감소하게 된다. 따라서, S4-50, S4-65 그리고 S4-80 시편들의 기울기를 살펴보면 고로슬래그 미분말의 함량이 증가함에 따라서 선형 기울기 값이 점차 증가하게 된다. 그러나, S8-80 시편은 S4-65 시편보다 더 많은 함량의 고로슬래그 미분말이 치환되었음에도 두 시편의 기울기는 거의 비슷하게 나타났다. 이러한 결과는 분말도가 더 높은 고로슬래그 미분말에 의해 물과 수화반응이 촉진됨에 따라서 경화된 재료에 의한 자기수축을 구속하는 효과가 빠르게 증가하는 것에 기인한다.

5. 결 론

고로슬래그 미분말을 치환한 시멘트계 재료의 자기수축에 대한 기존 문헌들은 시편의 공극구조 또는 수화도와 자기수축의 관계에 대한 분석을 수행하였다(Li et al. 2010; Neto et al. 2010). 그러나 공극구조와 수화도는 자기수축을 발생시키는 모세관 응력 및 메니스커스 반경과 간접적인 관계를 갖기 때문에 이를 통한 자기수축의 분석은 명확하지 않을 수 있다는 단점이 있다. 내부상대습도는 라플라스의 법칙과 켈

빈의 법칙에 따라 각각 모세관 응력과 메니스커스 반경과 직접적인 관련이 있기 때문에 이를 통해 시멘트계 재료의 정확한 자기수축 분석이 가능하다. 이 연구에서는 고로슬래그 미분말의 치환율 및 분말도가 시멘트 모르타르의 자기수축에 미치는 영향을 실험적으로 분석하기 위하여 내부상대습도를 측정하고 자기수축과의 관계를 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 결합재에 대한 고로슬래그 미분말의 치환율 증가는 재령 약 1.5일까지 시멘트 모르타르의 자기건조와 자기수축을 감소시킨다. 고로슬래그 미분말은 잠재수경성을 갖고 있어 고로슬래그 미분말의 첨가는 재령 초기 수화반응에 의한 수분의 소모량을 많이 감소시킨다. 이로 인해, 결합재에 대한 고로슬래그 미분말의 치환율은 더 작은 크기를 갖는 공극에서 메니스커스가 형성되는 것을 어렵게 만들기 때문에 시멘트계 재료의 자기건조는 감소한다.
- 2) 재령 28일에서 고로슬래그 미분말이 결합재의 50 % 그리고 65 % 치환된 시편들에서는 고로슬래그 미분말이 시편의 공극구조를 더욱 치밀하게 만듦으로써 Plain 시편보다 자기건조 및 자기수축이 증가하였다. 그러나, 고로슬래그 미분말이 결합재의 80 %까지 치환된 시편에서는 공극구조가 더욱 치밀해졌음에도 불구하고 수화반응에 의한 수분의 소모량이 많이 감소하게 됨으로써 Plain 시편보다 자기건조 및 자기수축이 많이 감소하였다.
- 3) 고로슬래그 미분말의 분말도 증가는 물과 수화반응을 더욱 촉진함으로써 시멘트 모르타르의 자기건조와 자기수축을 많이 증가시킨다.
- 4) 시멘트 모르타르의 자기수축과 내부상대습도는 결합재에 대한 고로슬래그 미분말의 치환율과 분말도에 따라 서로 다른 관계를 갖는다. 그러나 모든 시편에서 재령 초기에는 내부상대습도의 작은 감소에도 자기수축이 크게 발생하였으며, 재령 후기로 갈수록 모세관 응력이 증가함에도 내부상대습도의 감소로 발생하는 자기수축의 크기는 점차 감소하는 경향을 나타냈다. 수화반응에 의해 시멘트계 재료는 점차 경화되어가며, 이로 인해 모세관 응력에 의해 발생하는 자기수축을 더 크게 구속하게 된다. 따라서, 내부상대습도와 자기수축의 관계는 재령에 따라서 지속해서 변화하게 되며, 그 관계는 수화반응 특성과 공극구조 그리고 탄성계수와 깊은 관련이 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 환경정책기반공공기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (2016000700002).

References

- ASTM C1698-09 (2009) *Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar*. West Conshohocken, PA; ASTM International.
- Aydin, E., and Arel, H. Ş. (2017) Characterization of High-volume Fly-ash Cement Pastes for Sustainable Construction Applications. *Construction and Building Materials* 157, 96-107.
- Bazant, Z. P., and Yunping, X. I. (1994) Drying Creep of Concrete: Constitutive Model and New Experiments Separating Its Mechanisms. *Materials and Structures* 27(1), 3-14.
- Choi, S. J., Mun, J. S., Yang, K. H., and Kim, S. J. (2016) Compressive Fatigue Performance of Fiber-reinforced Lightweight Concrete with High-volume Supplementary Cementitious Materials. *Cement and Concrete Composites* 73, 89-97.
- Choi, S., and Won, M. C. (2010) Thermal Strain and Drying Shrinkage of Concrete Structures in the Field. *ACI Materials Journal* 107(5), 498-507.
- Choi, Y. C., Kim, J., and Choi, S. (2017) Mercury Intrusion Porosimetry Characterization of Micropore Structures of High-strength Cement Pastes Incorporating High Volume Ground Granulated Blast-furnace Slag. *Construction and Building Materials* 137, 96-103.
- Henkensiefken, R., Bentz, D., Nantung, T., and Weiss, J. (2009) Volume Change and Cracking in Internally Cured Mixtures Made with Saturated Lightweight Aggregate under Sealed and Unsealed Conditions. *Cement and Concrete Composites* 31(7), 427-437.
- Hobbs, D. W. (1974) Influence of Aggregate Restraint on the Shrinkage of Concrete. *ACI Journal Proceedings* 71(9), 445-450.
- Jang, S. Y., Ryu, H. S., Yoon, Y. S., and Kwon, S. J. (2017) Characteristics of Drying and Autogenous Shrinkage in HPC with 65 % Replacement of GGBFS. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection* 21(3), 54-59. (In Korean)
- Lee, K. M., Lee, H. K., Lee, S. H., and Kim, G. Y. (2006) Autogenous Shrinkage of Concrete Containing Granulated Blast-furnace Slag. *Cement and Concrete Research* 36(7), 1279-1285.
- Li, Y., Bao, J., and Guo, Y. (2010) The Relationship between Autogenous Shrinkage and Pore Structure of Cement Paste with Mineral Admixtures. *Construction and Building Materials* 24(10), 1855-1860.
- Lim, S. N., and Wee, T. H. (2000) Autogenous Shrinkage of Ground-granulated Blast Furnace Slag Concrete. *ACI Materials Journal* 97(5), 587-593.
- Liu, Z., and Hansen, W. (2016) Aggregate and Slag Cement Effects on Autogenous Shrinkage Incementitious Materials. *Construction and Building Materials* 121, 429-436.

- Lura, P., Jensen, O. M., and Van Breugel, K. (2003) Autogenous Shrinkage in High-performance Cement Paste: An Evaluation of Basic Mechanisms. *Cement and Concrete Research* 33(2), 223-232.
- Neto, A. A. M., Cincotto, M. A., and Repette, W. (2010) Mechanical Properties, Drying and Autogenous Shrinkage of Blast Furnace Slag Activated with Hydrated Lime and Gypsum. *Cement and Concrete Composites* 32(4), 312-318.
- Siddique, R., and Bennacer, R. (2012) Use of Iron and Steel Industry By-product (GGBS) in Cement Paste and Mortar. *Resources Conservation and Recycling* 69, 29-34.
- Snoeck, D., Jensen, O. M., and De Belie, N. (2015) The Influence of Superabsorbent Polymers on the Autogenous Shrinkage Properties of Cement Pastes with Supplementary Cementitious Materials. *Cement and Concrete Research* 74, 59-67.
- Song, C., and Choi, S. (2017) Moisture-dependent Piezoresistive Responses of CNT-embedded Cementitious Composites. *Composite Structures* 170, 103-110.
- Tazawa, E., and Miyazawa, S. (1995) Influence of Cement and Admixture on Autogenous Shrinkage of Cement Paste. *Cement and Concrete Research* 25(2), 281-287.
- Zhao, Y., Gong, J., and Zhao, S. (2017) Experimental Study on Shrinkage of HPC Containing Fly Ash and Ground Granulated Blast-furnace Slag. *Construction and Building Materials* 155, 145-153.

요 약 이 연구에서는 고로슬래그 미분말의 치환율과 분말도가 시멘트 모르타르의 자기수축에 미치는 영향을 실험적으로 분석하기 위하여 고로슬래그 미분말 함량(결합재 중량 대비 0, 50, 65, 80 %)과 분말도(4,330 cm²/g, 7,650 cm²/g)를 변수로 시편을 제작하고 내부상대습도와 자기수축을 측정하였다. 고로슬래그 미분말이 결합재의 65 %까지 치환된 시편들에서는 고로슬래그 미분말의 함량이 증가할수록 자기건조 및 자기수축이 증가하였다. 그러나, 고로슬래그 미분말이 결합재의 80 % 치환된 시편에서는 자기건조 및 자기수축이 감소하였다. 이러한 결과는 고로슬래그 미분말에 의한 시멘트계 재료의 공극구조 및 수화반응 변화가 공극 내부에서 형성되는 메니스커스의 반경을 변화시키고 결국에는 모세관 응력을 변화시키는 것에 기인한다. 또한, 높은 분말도를 갖는 고로슬래그 미분말은 수화반응을 촉진시킴으로써 시멘트 모르타르의 자기건조 및 자기수축을 증가시키는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 고로슬래그 미분말, 분말도, 자기건조, 자기수축, 치환율