

고로 슬래그를 함유한 콘크리트의 자기 수축

Autogenous Shrinkage of Concrete Containing Blast-Furnace Slag

이 회 근* 권 기 현** 이 광 명*** 김 규 용**** 손 유 신*****
Lee, Hoi-Keun Kwon, Ki-Heon Lee, Kwang-Myong Kim, Gyu-Yong Sohn, Yu-Shin

ABSTRACT

Concrete with low water to binder ratio (W/B) is prone to large autogenous shrinkage. Early age cracking of concrete would be caused by tensile stress induced by large autogenous shrinkage under restrained condition. Therefore, it is necessary to measure autogenous shrinkage to control the early age cracking of concrete. An objective of this study is to investigate the effects of W/B and blast furnace slag (BFS) on autogenous shrinkage of concrete. Autogenous shrinkage of concrete with various W/B ranging from 0.42 to 0.27 and BFS contents of 0, 30 and 50% were measured. Test results show that the autogenous shrinkage of concrete increases as the W/B decreases, and all BFS concretes showed larger autogenous shrinkage than OPC concretes with the same W/B. Moreover, the higher BFS content, the larger autogenous shrinkage.

1. 서론

콘크리트 구조물은 사용 하중에 의한 변형 이외에도 콘크리트가 지닌 재료적 특성으로 인해 콘크리트 내외의 상대 습도, 온도 등의 차이로 인해 수축이 발생한다. 더욱이 낮은 물-결합재 비(water to binder ratio, W/B)를 갖는 콘크리트의 경우에는 자기 건조(self desiccation)로 인한 자기 수축 (autogenous shrinkage) 발생량이 증가하게 된다. 자기 수축의 대부분은 콘크리트의 인장 강도가 낮은 초기 재령에 발생하므로 균열 발생 가능성이 높아질 수 있으며^{1),2)}, 이러한 초기 재령에서의 균열은 구조물의 결함을 증대시키며 내구 수명을 현저히 감소시키므로 반드시 제어해야 할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 고강도 콘크리트의 자기 수축 실험을 통해 W/B와 고로 슬래그가 자기 수축에 미치는 영향을 알아보았다.

2. 실험 연구

2.1 재료 및 배합비

콘크리트를 제조하기 위해 국내 A사의 1종 시멘트와 고로 슬래그를 결합재로 사용하였으며, 이들의 물리적 성질과 화학적 조성은 Table 1과 같다. 잔 골재는 비중이 2.58, 흡수율이 1.03%인 강모래를, 굵은 골재로는 최대 치수가 25 mm인 쇄석을 사용하였다. 시편 제작에 사용한 콘크리트 배합비는 Table 2와 같으며, 네 종류의 W/B에 대해 결합재로 시멘트만 사용한 배합(OPC)과 총 결합재량의 30, 50%

* 정희원, 성균관대학교 토목환경공학과 박사후 연구원

** 정희원, 성균관대학교 토목환경공학과 석사과정

*** 정희원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수

**** 정희원, 삼성건설 기술연구소 선임연구원

***** 정희원, 삼성건설 기술연구소 전임연구원

를 고로 슬래그로 대체한 배합(BFS30, BFS50)으로 총 12 종류의 배합비를 예비 실험을 통해 결정하였다. 또한 단위 수량이 자기 수축에 미치는 영향을 배제하기 위해 모든 배합의 단위 수량을 168 kg으로 고정하였으며, 소요의 슬럼프와 공기량을 얻기 위해 고성능 감수제(HRWR)와 공기 연행제(AE)의 혼입량을 배합별로 적절하게 조절하였다.

Table 1 Physical properties and chemical compositions of cement and blast-furnace slag

Materials	Physical properties		Chemical compositions (%)						
	Specific gravity	Blaine (cm ² /g)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	LOI [*]
Cement	3.14	3,199	21.70	4.99	3.32	62.36	2.12	2.37	0.82
BFS	2.94	4,266	31.59	14.61	0.43	42.38	2.12	2.98	0.02

*Loss on ignition

Table 2 Mix proportions of concrete

Mix no.	Mix type	W/B (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					Admixture (B×wt %)	
				W	C	BFS	S	G	HRWR	AE
1	OPC	42	45	168	400	-	783	972	0.70	0.015
2	BFS30				280	120	780	968	0.45	0.013
3	BFS50				200	200	778	966	0.40	0.013
4	OPC	37	43		454	-	729	981	0.80	0.017
5	BFS30				318	136	726	977	0.50	0.015
6	BFS50				227	227	724	974	0.45	0.015
7	OPC	32	41		525	-	672	981	1.00	0.018
8	BFS30				368	157	668	976	0.85	0.018
9	BFS50				263	262	665	972	0.75	0.017
10	OPC	27	39		622	-	608	965	1.50	0.020
11	BFS30				435	187	604	959	1.35	0.020
12	BFS50				311	311	601	954	1.25	0.020

2.2 실험 방법

배합 직후 KS F2402, KS F2421에 준하여 슬럼프 및 공기량을 측정하였다. 또한 KS F2405에 따라 재령 1, 3, 7, 28, 90일에서 콘크리트의 압축 강도 및 탄성 계수를 각각 측정하였다. 자기 수축은 일본 콘크리트학회(JCI)에서 제안한 방법³⁾을 기준으로 재령 1일까지는 LVDT와 매립 게이지를, 탈형 이후 재령에서는 매립 게이지만을 이용하여 자기 수축을 측정하였으며, 세부적인 실험 기구와 방법은 기존 연구에서와 동일하다⁴⁾. 자기 수축 측정은 콘크리트 배합 후 3시간이 지난 시점에서 시작하였다. 시편의 온도 변화를 모니터링하기 위해 시편 중앙에 온도 게이지(thremocouple)를 매립하였으며, 자기 수축을 측정한 후에 온도 변화에 의한 변형을 보정을 실시하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 슬럼프, 공기량 및 역학적 성질

Table 3은 슬럼프, 공기량, 압축 강도, 탄성 계수 실험 결과이다. 먼저 슬럼프와 공기량 실험 결과, 배합별로 약간의 차이는 있으나 슬럼프는 18±2 cm로 나타났다. 공기량은 1.5~5.6%로 W/B가 낮을수록 감소하는 경향을 보였다. 콘크리트의 압축 강도는 W/B가 0.42에서 0.27로 감소함에 따라 OPC 콘크리트의 재령 90일 압축 강도는 각각 50.8, 53.8, 70.6, 83.7 MPa로 증가하였다. 고로 슬래그를 함유한

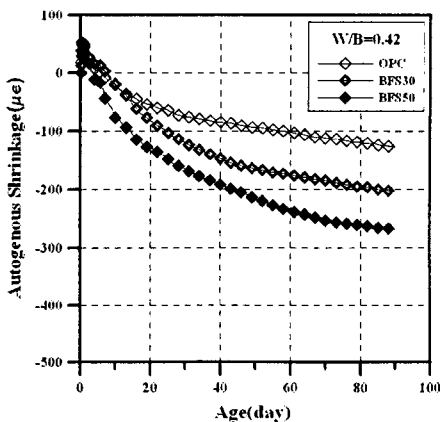
콘크리트(BFS30, BFS50)의 경우, 재령 초기의 강도 발현은 느리지만 재령이 경과함에 따라 강도가 크게 증가하여 재령 90일에는 OPC 콘크리트보다 3.3~11.2% 크게 나타났다. 또한 압축 강도가 증가함에 따라 탄성 계수도 증가하였다.

Table 3 Slump, air content, compressive strength, and Young's modulus of concrete

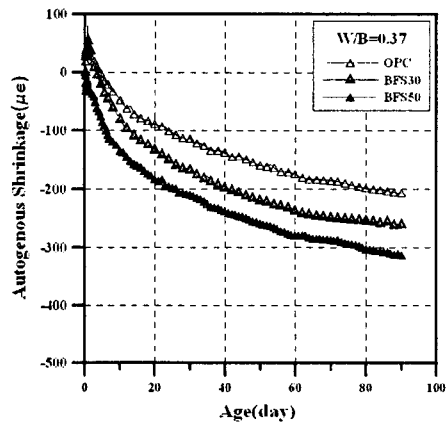
Mix no.	Slump (cm)	Air content (%)	Compressive Strength (MPa)					Elastic Modulus (GPa)				
			1 day	3 days	7 days	28 days	90 days	1 day	3 days	7 days	28 days	90 days
1	18.0	4.7	19.6	36.1	42.3	46.1	50.8	18.7	25.5	27.1	31.0	32.4
2	18.0	4.8	10.3	27.2	39.2	44.9	51.7	6.8	18.1	26.2	30.4	32.6
3	18.5	5.6	5.2	22.2	35.7	44.6	52.3	6.1	17.3	24.0	30.2	32.7
4	18.0	3.8	17.0	29.8	37.2	50.5	53.8	20.1	26.1	29.9	31.4	33.0
5	18.0	4.2	5.1	19.5	30.2	51.8	55.8	10.9	23.6	28.2	32.3	33.5
6	16.0	3.7	2.4	14.8	27.3	54.1	55.6	7.3	20.8	26.6	31.4	33.3
7	18.0	2.1	30.4	39.3	55.0	60.0	70.6	26.3	26.9	30.8	32.7	36.1
8	18.5	1.8	11.8	40.5	57.4	64.3	74.5	14.1	27.9	30.1	33.9	36.7
9	20.0	2.8	10.0	35.4	54.9	66.7	74.9	11.3	22.4	29.9	34.1	36.8
10	18.0	2.2	31.1	54.4	63.3	71.4	83.7	26.3	31.4	33.8	35.7	38.1
11	19.0	1.5	-	52.7	70.3	72.6	86.9	-	30.9	34.8	36.1	38.6
12	19.5	1.7	-	46.2	69.2	76.2	89.2	-	28.7	34.1	36.2	38.9

3.2 고로 슬래그가 자기 수축에 미치는 영향

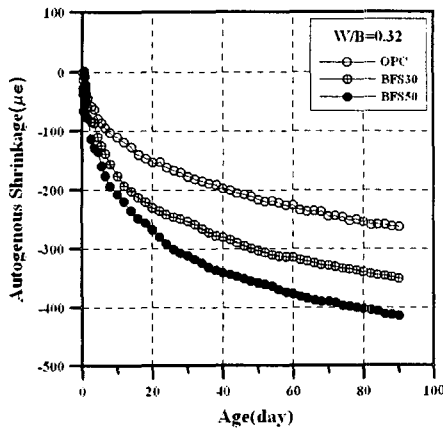
Fig. 1은 W/B가 동일한 경우 고로 슬래그의 사용량이 각각 0, 30, 50%일 때 재령 90일까지의 자기 수축 변형률을 나타낸다. 실험 결과를 보면 재령이 증가할수록 또한 고로 슬래그의 사용량이 증가할수록 자기 수축도 증가함을 알 수 있다. 재령 90일에서 OPC 콘크리트에 대한 BFS 콘크리트의 자기 수축은 W/B가 0.42인 경우에는 약 60~114% 정도, W/B가 0.27인 경우에는 약 14~25% 정도 증가하였다. BFS 콘크리트의 자기 수축이 증가하는 이유는, 고로 슬래그의 입자 특성 때문으로 각진 모양에 거친 표면을 가진 BFS 입자가 많은 물을 흡착하여 수화에 필요한 물의 양을 감소시키므로써 수화에 기여하는 자유수의 양을 감소시킨다고 알려져 있다⁵⁾. 이러한 수분 부족은 모세관 공극내의 부압력을 증가시키며 큰 자기 건조를 유발시켜 결국 자기 수축을 증가시킨다. 또한, 재령 초기에 약간의 팽창이 발생하였는데, 이는 시멘트의 수화 반응에 의해 생성된 에트링자이트 때문인 것으로 사료된다⁶⁾.



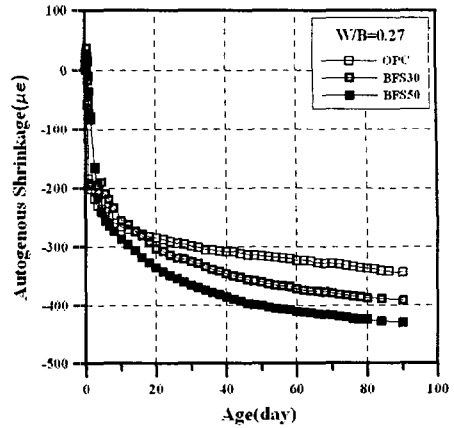
(a) W/B = 0.42



(b) W/B = 0.37



(c) W/B = 0.32



(d) W/B = 0.27

Fig 1. Autogenous shrinkage of concrete with ages

4. 결론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 소요의 슬럼프와 공기량을 만족하는 물-결합재비가 0.42, 0.37, 0.32, 0.27이고 고로 슬래그(BFS) 사용량이 0, 30, 50 %인 콘크리트를 각각 제조하였다. 재령 초기에서 BFS 콘크리트의 압축 강도 발현률은 OPC 콘크리트에 비해 크게 낮았으나, 이후 발현률이 크게 증가하여 재령 28일 이후의 압축 강도는 크게 나타났다.
- (2) 콘크리트의 자기 수축은 W/B가 낮을수록 증가하였으며, 고로 슬래그는 자기 수축을 증가시키는 것으로 나타났다. 따라서, 고강도 콘크리트 제조시 고로 슬래그를 사용할 경우에는 자기 수축에 의한 균열 발생에 대한 세심한 주의와 관리가 요구되며, 자기 수축을 감소시킬 수 있는 방안을 강구해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 삼성 건설 기술 연구소의 지원하에 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분들에게 감사드립니다.

참고 문헌

1. Wiegink, K., Marikutr, S. and Shah, P. S., "Shrinkage Cracking of High-Strength Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 5, 1996, pp. 409-415.
2. Altoubat, S. A. and Lange, D. A., "Creep, Shrinkage, and Cracking of Restrained Concrete at Early Age," *ACI Materials Journal*, Vol. 98, No. 4, 2001, pp. 323-331.
3. Japan Concrete Institute Technical Report on Autogenous Shrinkage, Autogenous Shrinkage of Concrete, *Proceedings of International Workshop*, Ed., Tazawa, E&FN Spon, London and New York, 1998, pp. 56-59.
4. 이회근, 임준영, 이광명, 김병기, "플라이 애쉬를 함유한 고성능 콘크리트의 자기 수축," *콘크리트학회 논문집* 제14권 2호, 2001, pp.249-256.
5. Lim, S. N. and Wee, T. H., "Autogenous Shrinkage of Ground-Granulated Blast Furnace Slag Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 5, 2000, pp. 587-592.
6. Lura, P., *Autogenous deformation and internal curing of concrete*, PhD Thesis, Delft University, 2003.