

고로슬래그를 함유한 콘크리트의 자기수축 특성

이광명^{1)*} · 권기현¹⁾ · 이희근²⁾ · 이승훈³⁾ · 김규용³⁾

¹⁾ 성균관대학교 토목환경공학과 ²⁾ University of Sherbrooke ³⁾ 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소

(2004년 3월 5일 원고접수, 2004년 8월 7일 심사완료)

Characteristics of Autogenous Shrinkage for Concrete Containing Blast-Furnace Slag

Kwang-Myong Lee^{1)*}, Ki-Heon Kwon¹⁾, Hoi-Keun Lee²⁾, Seung-Hoon Lee³⁾, and Gyu-Yong Kim³⁾

¹⁾ Dept. of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746, Korea

²⁾ Dept. of Civil Engineering, University of Sherbrooke, Quebec, J1K 2R1, Canada

³⁾ Research Institute of Technology, Samsung Construction & Engineering, Sungnam, 463-771, Korea

(Received March 5, 2004, Accepted August 7, 2004)

ABSTRACT

The use of blast-furnace slag (BFS) in making not only normal concrete but also high-performance concrete has several advantages with respect to workability, long-term strength and durability. However, slag concrete tends to show more shrinkage than normal concrete, especially autogenous shrinkage. High autogenous shrinkage would result in severe cracking if they are not controlled properly. Therefore, in order to minimize the shrinkage stress and to ensure the service life of concrete structures, the autogenous shrinkage behavior of concrete containing BFS should be understood. In this study, small prisms made of concrete with water-binder (cement+BFS) ratio (W/B) ranging from 0.27 to 0.42 and BFS replacement level of 0%, 30%, and 50%, were prepared to measure the autogenous shrinkage. Based on the test results, thereafter, material constants in autogenous shrinkage prediction model were determined. In particular, an effective autogenous shrinkage defined as the shrinkage that contributes to the stress development was introduced. Moreover, an estimation formula of the 28-day effective autogenous shrinkage was proposed by considering various W/B's. Test results showed that autogenous shrinkage increased with replacement level of BFS at the same W/B. Interestingly, the increase of autogenous shrinkage is dependent on the W/B at the same content of BFS; the lower W/B, the smaller increasing rate. In concluding, it is necessary to use the combination of other mineral admixtures such as shrinkage reducing admixture or to perform sufficient moisture curing on the construction site in order to reduce the autogenous shrinkage of BFS concrete.

Keywords : *autogenous shrinkage, water-binder ratio, blast-furnace slag, prediction model*

1. 서 론

슬래그가 시멘트와 콘크리트에 사용되기 시작한 것은 지금으로부터 약 100년 전으로, 현재는 일반 콘크리트는 물론 다양한 형태의 고성능콘크리트 제조 시 널리 사용되고 있으며 특히, 해양콘크리트 구조물 건설에 유용한 혼화 재료이다. 슬래그는 산업부산물임에도 불구하고 비교적 일정한 화학적 조성을 가지고 있으며, 시멘트만을 사용한 콘크리트와 비교할 때 슬럼프를 비롯한 굳지 않은 콘크리트의 레올로지를 제어하기 쉽고 점성이 작아서 현장에서의 타설과 마무리 작업이 용이하다. 또한, 시멘트풀의 내부

미세 조직을 치밀하게 하여 외부로부터 유해한 이온들의 침투를 어렵게 함으로써 구조물의 내구성을 향상시킨다^{1,2)}.

콘크리트의 자기수축은 외부로부터의 수분 공급이 없을 경우 수화반응이 진행됨에 따라 공극 내의 상대습도가 감소하면서 발생하는 체적 감소로, 물-결합재 비(W/B)가 낮고 슬래그 사용량이 많은 콘크리트 일수록 자기수축이 크게 발생하여 재령 초기에서의 균열 발생 가능성이 높아진다³⁻⁵⁾. 따라서 슬래그 콘크리트의 초기균열 제어를 통한 현장 적용성 향상 및 품질관리 위해 초기균열 발생의 원인인 자기수축에 대한 폭넓은 이해와 정확한 예측이 요구된다.

본 연구에서는 다양한 W/B와 슬래그 사용량이 콘크리트의 자기수축에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였으며, 기 연구에서 제안한 자기수축예측모델^{6,7)}을 적용하여 W/B와 슬래그 사용량에 따른 재료 상수들의 변화 특성을 조사하였다.

* Corresponding author

Tel : 031-290-7516 Fax : 031-290-7549

E-mail : leekm79@skku.edu

2. 실험 연구

2.1 개요

본 연구에서는 네 가지 수준의 W/B와 세 가지 수준의 고로슬래그 대체율을 사용하여 콘크리트를 각각 제조한 후 이들의 자기수축을 측정하였다. 아울러, 초음파속도(UPV) 모니터링 결과로부터 유효자기수축을 정하였으며, 이를 예측모델의 재료 상수 값들을 결정하는 데 이용하였다.

2.2 재료 및 배합비

콘크리트를 제조하기 위해 1종 시멘트와 고로슬래그(BFS)를 결합체로 사용하였으며, 이들의 물리적 성질과 화학적 조성은 Table 1과 같다. 잔골재는 비중이 2.58, 흡수율이 1.03%인 강모래를, 굵은 골재로는 최대 치수가 25mm인 화강암 쇄석을 사용하였다.

본 연구에서 사용한 콘크리트 배합비는 Table 2와 같으며, 네 종류의 W/B(0.42, 0.37, 0.32, 0.27)에 대해 결합체로 시멘트만 사용한 배합(OPC)과 시멘트량의 30%와 50%를 고로슬래그로 대체한 배합(BFS30, BFS50)으로 총 12 종류의 콘크리트 배합비를 정하였다. Table 2에서 보듯이, W/B를 낮추고 배합 수량에 의한 자기수축의 영향을 배제하기 위해서 모든 배합의 단위수량은 168kg으로 일정하게 한 반면에, 이에 대응하는 단위시멘트량은 400kg에서 622kg까지 증가시켰다. 소요의 슬럼프와 공기

량을 조절하기 위해서 공기연행제(AE)와 나프탈렌 계열의 고성능감수제(HRWR)를 사용하였으며, 각 배합별로 사용량을 조절하였다.

2.3 시편 제작 및 실험 방법

일본콘크리트공학협회(JCI)의 자기수축위원회에서 제안한 방법⁸⁾과 매입 게이지를 함께 이용하여 콘크리트의 자기수축을 측정하였다. 100×100×400 mm의 각주형 시편을 이용하여 온도가 20℃이고 상대습도가 50%인 조건에서 몰드 제거 전인 처음 24시간 동안은 LVDT와 매입 게이지를, 몰드 제거 이후부터는 매입 게이지만을 이용하여 측정하였다. 최초 측정은 콘크리트 배합 후 3시간부터 이루어졌으며, 기타 사항은 기존 연구⁷⁾에서와 동일하다.

콘크리트의 강성 발현을 조사하기 위해 UPV 모니터링 시스템을 이용하여 배합 직후부터 24시간 동안 UPV를 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 슬럼프, 공기량, 압축강도 및 탄성계수

Table 3은 본 연구에서 사용한 콘크리트의 슬럼프, 공기량, 소요 재령별 평균 압축강도와 탄성계수를 나타낸다. 모든 배합의 슬럼프는 180±20mm이었으며, 공기량은 1.5~5.6%로 배합 종류에 따라 다소 차이를 나타내었다.

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

Materials	Physical properties		Chemical compositions (%)						
	Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Loss on ignition
Cement	3.14	3,199	21.70	4.99	3.32	62.36	2.12	2.37	0.82
Blast-furnace slag	2.94	4,266	31.59	14.61	0.43	42.38	2.12	2.98	0.02

Table 2 Mix proportions of concrete per m³

Mix no.	Mix type	W/B (%)	Unit mass (kg)					Admixture (B×mass %)	
			Water	Cement	BFS	Fine agg.	Coarse agg.	HRWR	AE
1	OPC	42	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		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		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		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

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

Mix no.	Slump (mm)	Air content (%)	Compressive Strength (MPa)						Young's Modulus (GPa)			
			1 day	3 days	7 days	28 days	90 days	180 days	1 day	3 days	7 days	28 days
1	180	4.7	17.0	29.8	37.2	46.1	50.8	55.3	18.7	25.5	27.1	31.0
2	180	4.8	5.1	19.5	30.2	44.9	51.7	53.1	6.8	18.1	26.2	30.4
3	185	5.6	2.4	14.8	27.3	44.6	52.3	54.3	6.1	17.3	24.0	30.2
4	180	3.8	19.6	36.1	42.3	50.5	53.8	60.7	20.1	26.1	29.9	31.4
5	180	4.2	10.3	27.2	39.2	56.3	57.8	60.8	10.9	23.6	28.2	32.3
6	160	3.7	5.2	22.2	35.7	57.1	58.6	61.9	7.3	20.8	26.6	31.4
7	180	2.1	30.4	39.3	55.0	60.0	70.6	73.8	26.3	26.9	30.8	32.7
8	185	1.8	11.8	40.5	57.4	64.3	74.5	75.2	14.1	27.9	30.1	33.9
9	200	2.8	10.0	35.4	54.9	66.7	74.9	75.3	11.3	22.4	29.9	34.1
10	180	2.2	31.1	54.4	63.3	71.4	80.7	85.3	26.3	31.4	33.8	35.7
11	190	1.5	-	52.7	70.3	72.6	83.9	86.5	-	30.9	34.8	36.1
12	195	1.7	-	46.2	69.2	76.2	86.2	89.6	-	28.7	34.1	36.2

W/B가 0.42에서 0.27로 감소함에 따라 OPC 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 각각 46.1, 50.5, 60.0, 71.4 MPa이었다. 고로슬래그를 함유한 콘크리트(BFS30, BFS50)의 경우, 재령 초기에서의 강도 발현은 느리지만 재령이 경과함에 따라 강도가 크게 증가하여 재령 28일에서는 OPC 콘크리트와 비슷하거나 오히려 역전되는 경향을 보였다. 특히, W/B가 0.42와 0.37인 고로슬래그 콘크리트의 경우에는 재령 28일에서 OPC 콘크리트의 강도와 비슷하거나 오히려 역전되었으나, W/B가 0.32와 0.27로 낮은 경우에는 재령 7일에서 강도가 역전되는 경향을 나타내었다. 또한, 재령 28일 BFS50 콘크리트의 압축강도는 44.6~76.2 MPa로 다른 배합에 비해 가장 크게 나타났으며, 이는 고로슬래그 사용량이 50%일 때 가장 큰 강도를 나타내는 것으로 보고한 바 있는 Lim과 Wee⁴⁾의 결과와 유사하였다. 또한, 압축강도가 증가함에 따라 탄성계수도 증가하였다.

3.2 초음파 속도와 유효자기수축

자기수축으로 인한 실제 응력 발생은 콘크리트의 탄성계수 발현과 밀접한 관계가 있으며, 균열 발생 여부를 예측하기 위해서는 강도 또는 탄성계수 등의 역학적 성질이 중요하다. 응력 발생의 관점에서 자기수축의 발현 시점을 JCI에서는 초결 시간으로 하였으나 매년 콘크리트의 초결 시간을 측정하는 것이 쉽지 않기 때문에 기존 연구⁶⁾에서는 UPV의 증가 시작 시점을 실제 응력 발현에 기여하는 유효 자기수축으로 고려한 바 있다.

그러나 콘크리트 배합마다 UPV의 증가 시점을 명확히 구분하기가 어렵고 보다 실용적이고 현장에서 편리하게 사용할 수 있도록 본 연구에서는 초음파속도가 1,500 m/s에 도달하는 시간 이후부터의 자기수축을 유효자기수축으로 간주하였다. 이는 UPV(중파속도)와 재료 성질과의 관계를 고려할 때, 속도는 탄성계수(강성)의 제공근에 비례하기 때문에, 만약 재령 28일에서의 콘크리트 UPV를

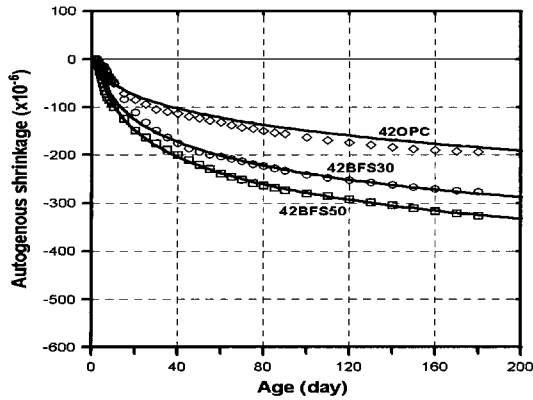
4,500 m/s로 가정한다면 UPV가 1,500 m/s일 때는 재령 28일 UPV의 1/3이며 이때의 탄성계수는 재령 28일 탄성계수의 1/9로 아주 작아 콘크리트의 수축으로 인해 발생한 응력의 크기는 매우 작다고 간주할 수 있다.

또한, UPV와 응결과의 상관관계 연구로부터 콘크리트의 초결 시간은 UPV의 증가 시작 시점과 정확히 일치하지 않으며 UPV가 증가하기 시작한 후 2~3 시간 후에 초결이 발생하며 이때의 UPV가 대략 1,500 m/s 정도가 된다는 실험결과가 보고 된 바 있다¹⁰⁾. 따라서 본 연구에서 나타낸 모든 자기수축결과는 각 콘크리트의 UPV가 1,500 m/s에 도달하는 시간을 0으로 하여 나타내었다.

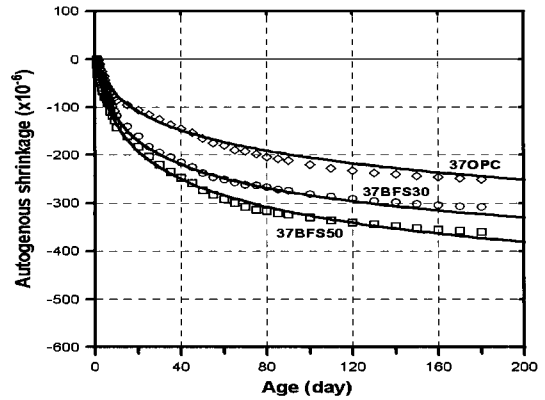
3.3 고로슬래그 사용량에 따른 자기수축 변화

Fig. 1은 네 종류의 W/B에 대해 고로슬래그의 사용량이 각각 0%, 30%, 50%일 때 재령 180일까지의 자기수축 변형률을 나타내며, 그림에서 실선은 자기수축 예측 모델 결과로 이에 대한 설명은 4장에서 언급하기로 한다.

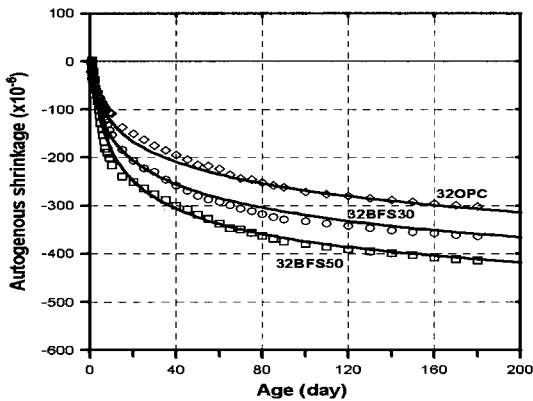
Fig. 1에서 보듯이, 고로슬래그의 사용은 자기수축을 증가시키며 고로슬래그의 사용량이 증가함에 따라 자기수축도 증가함을 알 수 있다. 고로슬래그를 함유한 콘크리트의 자기수축이 OPC 콘크리트에 비해 자기수축이 증가하는 이유를 살펴보면, 고로슬래그의 입자 모양은 각이 지고 표면이 거칠어 입자 표면에 흡착되는 물의 양이 증가하여 수화에 필요한 물의 양이 감소하게 된다. 이와 더불어 W/B가 낮은 경우에는 이미 자기 건조가 크기 때문에 자유수의 양이 줄어들어 모세관 공극내의 부압력이 증가하여 자기수축이 크게 발생한다. 그러나 고로슬래그의 사용량에 비례해서 자기수축이 증가하는 것은 아니다. 일정한계 이상의 고로슬래그를 다량으로 사용했을 경우에는 자기수축이 다시 감소하는 경향을 나타내지만 OPC 콘크리트 보다는 여전히 큰 경향을 보이는 연구 결과가 보고 된 바 있다⁴⁾.



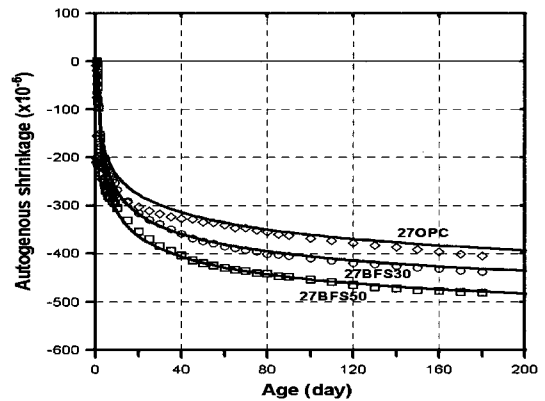
(a) W/B=0.42



(b) W/B=0.37



(c) W/B=0.32



(d) W/B=0.27

Fig. 1 Experimental results and predicted values for autogenous shrinkage of concrete containing blast-furnace slag at various W/B's

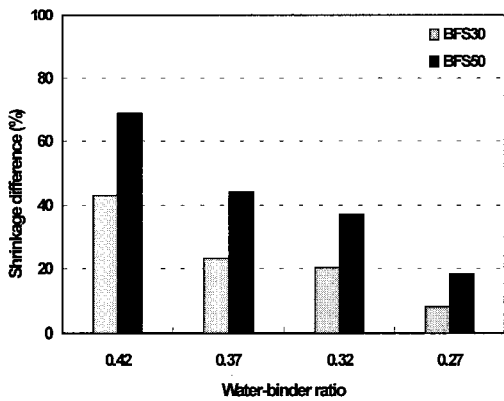


Fig. 2 Shrinkage difference between OPC and slag concretes at 180 days

이는 결합재 중에 시멘트보다 느리게 수화반응을 하는 고로슬래그의 양이 많아 배합 내에 물의 양이 상대적으로 많기 때문에 자기 건조 현상이 크게 발생하지 않기 때문이다. 흥미롭게도, 고로슬래그 사용에 따른 콘크리트의 자기수축 증가 정도가 W/B에 따라 다르게 나타났다.

Fig. 2는 재령 180일에서 OPC 콘크리트의 자기수축을 기준으로 하여 BFS30과 BFS50 콘크리트의 자기수축 차이를 W/B에 따라 나타낸 것으로, W/B가 감소함에 따라 자기수축의 차이가 점차 줄어들음을 볼 수 있다. 즉, 고로슬래그의 사용량이 동일하더라도 W/B에 따라서 자기수축의 증가 정도가 다르게 나타남을 알 수 있다.

이상과 같이 고로슬래그는 콘크리트의 자기수축을 증가시켜 이로 인한 균열 발생 가능성이 높기 때문에 이에 대한 적절한 대책이 요구된다.

4. 자기수축 예측 모델

4.1 개요

본 연구에서는 실험 결과를 바탕으로 기존 연구⁷⁾에서 제안한 모델에서 고로슬래그 사용에 따른 상수 값들을 정하여 다음과 같이 나타내었다.

$$\epsilon_{as}(t) = \gamma \cdot \epsilon_{28}(W/B) \cdot \beta(t) \quad (1)$$

$$\epsilon_{28}(W/B) = 2180 \exp[-7.6(W/B)] \quad (2)$$

$$\beta(t) = \exp \left\{ a \left[1 - \left(\frac{28 - t_{1500}}{t - t_{1500}} \right)^b \right] \right\} \quad (3)$$

여기서,

- $\epsilon_{as}(t)$ = 재령 t 에서의 자기수축 변형률($\times 10^{-6}$)
- $\epsilon_{28}(W/B)$ = 재령 28일에서 OPC 콘크리트의 자기수축 변형률($\times 10^{-6}$)
- $\beta(t)$ = 시간에 따른 자기수축 발현 속도
- γ = 시멘트 종류 또는 혼화제에 따른 계수
- a, b = W/B와 고로슬래그에 따른 상수
- t_{1500} = 초음파속도가 1,500 m/s에 도달했을 때의 시간(일)

기존 연구에서의 모델과 비교할 때, 식 (2)에서의 계수와 식 (3)에서 초음파속도의 증가 시작 시점(t_A) 대신에 3.2절에서 언급한 바와 같이 t_{1500} 을 사용하였다.

실험결과와 예측결과를 나타내는 Fig. 1을 보면, 본 모델이 실험결과를 비교적 잘 추정하고 있음을 알 수 있다. 또한, OPC 콘크리트의 경우에 재령 28일을 전후로 해서 실험결과와 예측결과가 다소 상이하게 나타나는 부분이 있는데 이는 식 (2)에 의해 추정된 재령 28일에서의 자기수축 변형률과 실제 실험 결과가 차이를 보였기 때문이다.

4.2 재령 28일에서의 유효자기수축

식 (2)에서 보듯이, 재령 28일에서의 자기수축 변형률은 W/B만의 함수로 표현되며, 재령 28일에서의 자기수축 변형률을 이용함으로써 재령 28일 이전과 이후의 자기수축 예측이 모두 가능하다. 식 (2)는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 W/B와 이에 대응하는 재령 28일에서의 자기수축 변형률 데이터(t_{1500} 기준)를 가지고 회귀분석을 통해 구할 수 있으며, 이때 사용된 데이터는 본 연구와 기존 연구⁷⁾에서의 OPC 콘크리트 결과만을 이용하였다.

4.3 고로슬래그 사용에 따른 재료 상수

본 예측 모델에서는 고로슬래그를 비롯한 혼화제에 대한 영향을 고려하기 위해 식 (1)에서 보듯이 계수 γ 를 사용하였다. 1종 시멘트만을 사용한 OPC 콘크리트의 경우에 γ 는 1.0이며, Fig. 1에서 보듯이 고로슬래그 콘크리트의 자기수축은 OPC 콘크리트에 비해 크기 때문에 이 경우에서의 γ 는 항상 1.0보다 큰 값을 갖고 이는 고로슬래그의 사용량에 따라 달라진다.

Fig. 4는 본 실험결과를 바탕으로 결정된 γ 를 나타낸 것으로 W/B가 감소함에 따라 γ 도 점차 감소함을 보였다. 이는 Fig. 2에서의 결과와 유사한 경향으로, 동일한 양의 고로슬래그를 사용하더라도 W/B에 따라서 γ 가 변하기 때문에 보다 정확한 예측을 위해서는 γ 도 W/B의 함수식

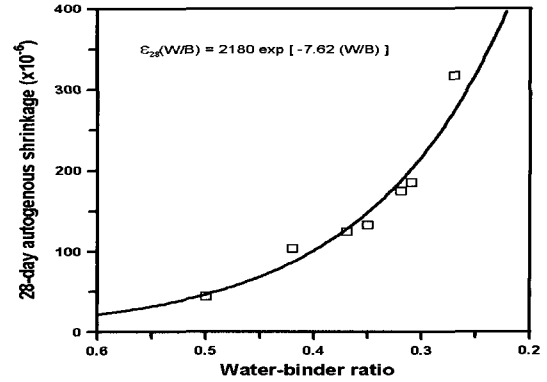


Fig. 3 The 28-day autogenous shrinkage of concrete as a function of W/B

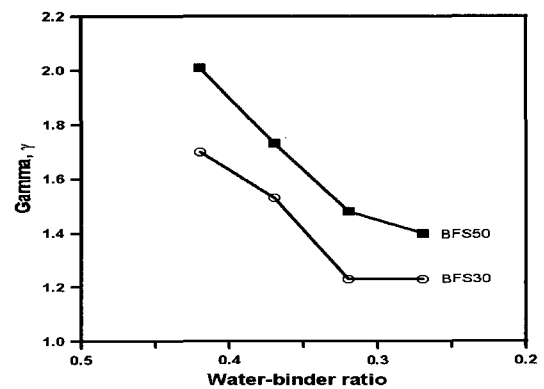


Fig. 4 Variation of γ with W/B

으로 표현해야 할 것으로 사료된다.

Table 4는 식 (3)에서의 계수 a 와 b 를 나타낸 것으로, W/B가 동일하고 고로슬래그 사용량이 증가할수록 a 는 점차 감소하는 경향을 나타낸 반면에 b 는 증가하는 경향을 보였다. 또한, 콘크리트의 종류(OPC, BFS30, BFS50)가 동일한 경우 W/B가 감소함에 따라 a 는 감소하는 경향을 나타내었으나 b 는 일정한 경향을 나타내지 않았다.

Table 4 Constant, a and b , in Eq. (3)

Mix no.	Mix type	W/B(%)	a	b
1	OPC	42	3.365	0.132
2	BFS30		1.565	0.272
3	BFS50		1.331	0.327
4	OPC	37	1.718	0.258
5	BFS30		1.218	0.283
6	BFS50		1.198	0.310
7	OPC	32	1.513	0.211
8	BFS30		1.115	0.271
9	BFS50		0.753	0.397
10	OPC	27	0.801	0.225
11	BFS30		0.516	0.338
12	BFS50		0.456	0.344

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 물-결합재 비가 동일한 경우 고로슬래그의 사용은 콘크리트의 자기수축을 증가시키며, 고로슬래그 사용량이 증가할수록 자기수축은 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 동일한 양의 고로슬래그를 사용한 경우 물-결합재 비가 낮아짐에 따라 자기수축의 증가율이 다소 감소하는 경향을 보였다.
- 2) 초음파속도 발현 특성으로부터 콘크리트의 초음파속도가 1,500m/s에 도달하는 시점 이후의 자기수축을 유효 자기수축으로 간주하였다. 또한, 재령 28일에서의 유효 자기수축량을 물-결합재 비의 함수로 나타냄으로써 다양한 물-결합재 비에 따른 유효자기수축의 추정이 가능할 것으로 판단된다.
- 3) 물-결합재 비가 낮은 고강도 또는 고성능콘크리트 제조 시 고로슬래그의 사용은 자기수축을 증가시켜 초기 균열 발생 가능성을 높일 수 있다. 따라서 자기수축에 의한 내부 인장응력 및 초기균열 발생을 줄이고 고품질의 콘크리트를 확보하기 위해서는 고로슬래그만을 사용하기 보다는 자기수축을 줄이는 효과가 있는 수축저감제와 같은 혼화재료를 병행 사용하는 것이 바람직하다. 아울러, 현장에서의 적절한 습윤양생을 실시함으로써 콘크리트의 수축으로 인한 초기균열 발생 가능성을 줄일 수 있으며, 추후 이에 대한 실험 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 교량설계핵심기술연구단의 지원 하에 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분에게 감사를 드립니다.

1. Mehta, P. K., "Durability of Concrete in Marine Environment A Review," Performance of Concrete in Marin Environment, SP-65, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1980, pp.1~15.
2. Nkinamubanzi, P. C. and Aïtcin, P. C., "The Use of Slag in Cement and Concrete in a Sustainable Development Perspective," WABE International Symposium on Cement and Concrete, Montreal, Quebec, 1999, pp.1~11.
3. Tazawa, E. and Miyazawa, S., "Influence of Constituents and Composition on Autogenous Shrinkage of Cementitious Materials," Magazine of Concrete Research, Vol.49, No.1, 1997, pp.15~22.
4. 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.
5. 한천구, 김성욱, 고경택, 배정렬, "팽창재 및 수축저감제를 이용한 고성능 콘크리트의 수축특성", 콘크리트학회 논문집, 제15권 6호, 2003, pp.785~793.
6. 이회근, 이광명, 김우, "고강도 플라이애쉬 콘크리트의 자기수축 예측 모델", 콘크리트학회 논문집, 15권 1호, 2003, pp.134~142.
7. Lee, H. K., Lee, K. M., and Kim, B. G., "Autogenous Shrinkage of High-performance Concrete Containing Fly Ash," Magazine of Concrete Research, Vol.55, No.6, 2003, pp.507~515.
8. Japan Concrete Institute, "Japan Concrete Institute Report on Autogenous Shrinkage," E&FN Spon, London and New York, 1998.
9. 이회근, 이광명, 김영환, 임현준, "초음파속도를 이용한 콘크리트의 응결 및 초기 강도 추정", 비파괴검사학회지, 22권 3호, 2002, pp.292~303.
10. Lee, H. K., Lee, K. M., Kim, Y. H., Yim, H., and Bae, D. B., "Ultrasonic In Situ Monitoring of Setting Process of High-Performance Concrete," Cement and Concrete Research, 2004, pp.631~640.

요 약

일반 콘크리트뿐만 아니라 고성능콘크리트 제조 시 고로슬래그(BFS)의 사용은 워커빌리티, 장기 강도 및 내구성 측면에서 장점을 갖는다. 그러나 슬래그 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 수축이 크며 특히 자기수축이 크게 발생하기 때문에 적절한 방법으로 제어하지 않으면 심각한 균열을 야기할 수 있다. 따라서 수축에 의한 균열 발생을 최소화하고 콘크리트 구조물의 사용 수명을 확보하기 위해서는 BFS를 함유한 콘크리트의 자기수축 거동에 대한 이해가 요구된다. 본 연구에서는 물-결합재(시멘트+BFS) 비(W/B)가 0.27~0.42이고 BFS 대체율이 각각 0%, 30%, 50%인 각주형 콘크리트 시편을 제작하여 자기수축을 측정 후, 실험결과를 바탕으로 자기수축 예측 모델의 재료 상수 값들을 결정하였다. 또한, 응력 발현에 기여하는 자기수축을 유효자기수축으로 정의하고, 다양한 W/B를 고려한 재령 28일에서의 유효자기수축 변형률 추정식을 제안하였다. 실험결과, W/B가 동일할 때 콘크리트의 자기수축은 BFS의 사용량에 따라 증가하였다. 또한 동일한 양의 BFS를 사용한 경우, W/B가 낮아짐에 따라 자기수축 증가율이 감소하는 경향을 보였다. 따라서 고로슬래그 콘크리트의 자기수축을 줄이기 위해서는 자기수축을 줄이는 수축저감제 등의 혼화 재료를 사용하거나 시공 현장에서의 충분한 습윤양생이 필요하다고 판단된다.

핵심용어 : 고강도콘크리트, 자기수축, 예측 모델, 플라이애쉬, 초음파속도