

# 고로슬래그 미분말을 다량 사용한 고강도 콘크리트의 초기 수화발열 및 자기수축 특성에 관한 통계적 분석

## A Statistical Analysis on Hydration Heat and Autogenous Shrinkage of High Strength Concrete in Early Age Using Blast Furnace Slag

구 경 모\* 남 정 수\*\* 이 의 배\*\* 김 영 덕\*\* 김 규 용\*\*\* 김 무 한\*\*\*\*  
Koo, Kyung Mo Nam, Jeong Soo Lee, Eui Bae Kim, Young Duck Kim, Gyu Yong Kim, Moo Han

### ABSTRACT

In this study, quantitative analysis on effect of hydration heat and autogenous shrinkage of concrete using BFS was studied. Especially, it analyze section data statistically which hydration heat and autogenous shrinkage rise, and it appeared the correlation of hydration heat and autogenous shrinkage as well as quantitative coefficients of the main properties.

As a result, the section which hydration heat and autogenous shrinkage of BFS-50 rise rapidly is delayed than OPC, but the slope of hydration heat and autogenous shrinkage in that section appeared similar shape in each mixing. Finally it will be possible to control the amount of autogenous shrinkage because hydration heating velocity and autogenous shrinking velocity are decreased by using BFS.

### 요 약

본 연구에서는 고로슬래그 미분말이 콘크리트의 초기 수화발열 및 자기수축 특성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 하였다. 특히 수화열 및 자기수축이 급격하게 증가하는 구간의 데이터에 대한 통계적인 분석을 실시하여 각각의 발현성상을 정량적인 계수로 표현할 뿐만 아니라 그 계수를 활용하여 수화열과 자기수축의 상관관계를 분석하고자 하였다.

그 결과 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 수화온도 및 자기수축이 급속히 증가하는 구간은 OPC에 비해 지연되는 것으로 나타났으며, 각각의 배합별 수화온도 및 자기수축 급속 증가구간에서의 기울기는 매우 유사한 것으로 나타났다. 또한, 고로슬래그 미분말을 사용함으로써 OPC에 비해 수화발열상승속도 및 자기수축증가속도가 저감되었으며 최종적으로 자기수축량도 조절이 가능할 것으로 사료된다.

\* 정회원, 충남대학교 대학원 건축공학과, 석사과정  
\*\* 정회원, 충남대학교 대학원 건축공학과, 박사과정  
\*\*\* 정회원, 충남대학교 건축학부, 조교수, 공학박사  
\*\*\*\* 정회원, 충남대학교 건축학부, 명예교수, 공학박사

표 1 실험계획 및 콘크리트 배합

기 호	W/B (%)	슬립프 플로우 (cm)	S/a (%)	BFS 대체율 (%)	단 위 중 량 (kg/m <sup>3</sup> )					SP (B×%)	평가항목
					W	OPC	BFS	S	G		
OPC	20	65±5	47	50	160	800	-	781	664	1.8	· 수화온도(°C) · 자기수축(×10 <sup>-6</sup> )
BFS-50					160	400	400	766	651	1.0	

### 1. 서 론

고강도 콘크리트는 배합상 다량의 시멘트가 사용되기 때문에 초기에 높은 수화열 및 자기수축이 발생하는 문제점을 갖고 있으며, 이러한 문제점을 보완하기 위해 시멘트 대신 플라이애시, 고로슬래그 미분말 등과 같은 혼화재를 일정 치환하여 사용하고 있다. 이러한 혼화재의 사용으로 인해 고강도 콘크리트의 수화열 및 자기수축은 영향을 받게 되며, 특히 초기 재령에 있어 그 특성의 변화는 뚜렷하게 나타난다. 이에 본 연구에서는 고로슬래그 미분말을 대량 사용한 고강도 콘크리트의 초기 수화열 및 자기수축 특성을 보다 정량적으로 분석하기 위해 선행연구<sup>1)</sup>에서 제안한 통계적 분석방법을 적용하여 검토해 보고자 한다.

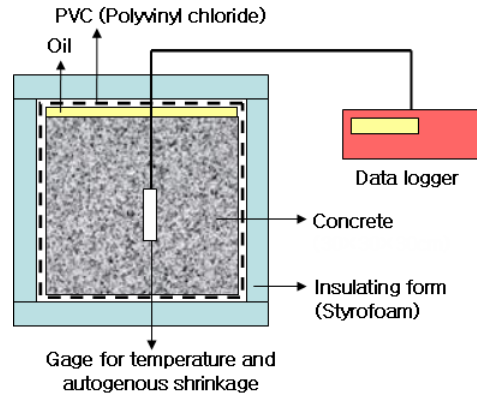


그림 1 시험방법의 모식도

### 2. 실험계획 및 방법

표 1은 고로슬래그 미분말이 콘크리트의 수화발열 및 자기수축에 미치는 영향을 분석하기 위한 실험계획을 나타낸 것으로, 물결합재비 20%, 단위결합재량 800kg/m<sup>3</sup> 및 고로슬래그 미분말 치환율 50%로 조건을 설정하였다.

콘크리트의 수화열과 자기수축을 측정하기 위한 시험방법은 기존의 간이단열온도상승시험방법을 보완하여 콘크리트 부재의 크기 30×30×30cm, 단열거푸집의 두께 10cm 및 외기온도 20°C의 조건을 설정하였으며, 모식도는 그림 1과 같다. 콘크리트의 수화온도와 자기수축은 매립형 게이지(KM-100BT)를 사용하여 측정하였으며, 측정간격은 10분으로 설정하였다.

또한 본 연구에서는 수화발열 특성과 자기수축 특성을 대표적으로 표현하기 위한 계수로서 수화온도 및 자기수축이 급속히 상승하는 구간의 직선 기울기를 의미하는 수화발열상승속도와 자기수축증가속도를 설정하였으며, 두 계수를 통해 수화온도와 자기수축과의 상관관계를 비교·분석하고자 하였고, 이에 대한 산정방법을 요약하면 다음과 같다<sup>1)</sup>.

- ① 수화발열상승속도 산정구간의 종점 설정 ( 최고온도의 79% 시점 )
- ② 종점을 기준으로 회귀분석 및 결정계수 검토
- ③ 수화발열상승속도 산정구간의 시점 설정 및 수화발열상승속도(회기계수) 도출

또한, 자기수축증가속도의 산정은 수화발열상승속도 종점을 기준으로 산정하였으며, 통계분석을 위해 범용 통계프로그램인 MINITAB을 활용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 그래프 분석에 의한 수화온도 및 자기수축의 특성분석

그림 2 및 그림 3은 측정된 각 배합별 수화온도와 자기수축을 함께 나타낸 것이다.

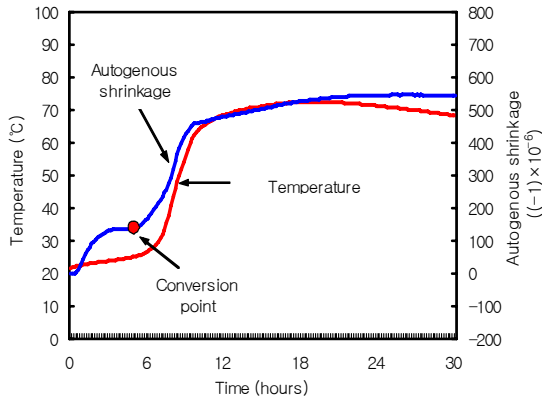


그림 2 OPC의 수화온도와 자기수축

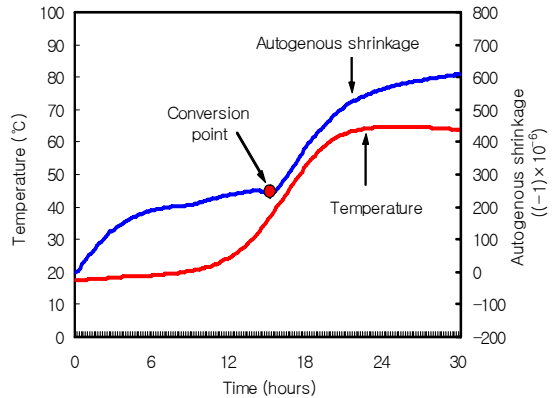


그림 3 BFS-50의 수화온도와 자기수축

우선 수화온도의 경우 OPC의 최고온도는 72.6°C, 최고온도 도달시간은 시험개시 후 19시간으로 나타난 반면, BFS-50의 최고온도 및 최고온도 도달시간은 64.8°C, 24.8시간으로 나타나, 고로슬래그 미분말을 일정 치환함으로써 최고온도의 저하와 최고온도도달시간의 지연효과가 나타났다.

자기수축의 경우 OPC는 콘크리트 타설 후 약 5시간까지 수축이 증가하다가 다시 감소하여 일정하게 수렴하는 형태를 보이고 있으며 이때의 자기수축 값은 약  $-140 \times 10^{-6}$  정도였다. 그 후 다시 자기수축이 급속히 증가하며 약 10시간 후에는 다시 감소하여 수렴하는 형태를 보이고 있다. 이와 같이 자기수축 발현곡선 중 변환점이 나타나는 현상, 즉 타설 후 자기수축이 일차적으로 종료되는 것은 시멘트 수화반응에 의해 견고한 골격이 형성되고 에트링가이트에 의한 팽창에 기인한 것으로 사료되며, 다시 자기수축이 증가하는 것은 시멘트 내 석고가 변환점 시기에 모두 소비되어 시멘트 수화물의 구조형성에 중요한 역할을 담당하는 에트링가이트가 형태변화를 일으키기 때문이라고 사료된다<sup>2)</sup>. 또한 전환점 이후 자기수축이 급속히 증가하는 구간의 형태 및 시간은 수화온도가 급속히 증가하는 구간과 매우 유사한 형태를 보이고 있다.

BFA-50의 경우도 자기수축이 증가하다가 감소하는 형태를 보인 후, 변환점인 약 15.7시간부터 다시 급속히 증가하는 형태를 나타내었으며, 이처럼 변환점이 지연되는 현상은 고로슬래그미분말을 대량 치환하여 시멘트량이 크게 감소하였기 때문으로 사료된다. 한편 BFS-50의 변환점 이후 자기수축의 급속히 증가하는 구간의 시점은 OPC와는 달리 수화온도가 급속히 증가하는 구간의 시점보다 약 2~3시간 지연되어 나타났으며, 그 구간의 자기수축 및 수화온도의 기울기는 유사한 것으로 나타났다.

### 3.2. 통계적 분석에 의한 수화온도 및 자기수축의 특성분석

표 2는 OPC 및 BFS-50의 수화발열상승속도 및 자기수축증가속도를 산정한 결과를 나타낸 것이다. OPC의 수화발열상승속도 및 자기수축증가속도 산정구간의 중점은 타설 후 9.2시간이며, 그때의 수화온도 및 자기수축은 각각 58.2°C,  $-438 \times 10^{-6}$ 로 산정되었다. 중점을 기준으로 구간의 시점을 각 결정계수 범위로 산정하게 되면, 수화발열상승 구간의 시점시간은 5.8~6.8시간이 되며, 수화온도는 26.3~29.7°C 범위가 된다.

또한 자기수축증가 구간의 시점은 5.0~7.2시간이 되고 자기수축은  $-135 \times 10^{-6}$ ~ $-235 \times 10^{-6}$ 의 범위가 되며, 수화발열상승 구간의 시점과 최대 0.8시간의 차를 보였다. 회귀분석을 통해 유추된 수화발열상승속도는 10.3°C/hr.~12.9°C/hr., 자기수축증가속도는  $-76 \times 10^{-6}$ ~ $-108 \times 10^{-6}$ 로 나타났다.

BFS-50의 수화발열상승속도 및 자기수축증가속도 산정구간의 중점은 타설 후 17.8시간으로 OPC에 비해 약 8시간 지연된 시간이며, 그때의 수화온도 및 자기수축은 각각 51.9°C,  $-377 \times 10^{-6}$ 로 산정되었다. 중점을 기준으로 구간의 시점을 각 결정계수 범위로 산정하게 되면, 수화발열상승 구간의 시점시간

표 2 수화발열상승속도 및 자기수축증가속도 분석결과

배합	결정계수 (R <sup>2</sup> )	종점			수화온도					자기수축				
		시간 (hr.)	온도 (°C)	자기수축 (×10 <sup>-6</sup> )	시점			회귀직선식	수화발열상승속도 (°C/hr.)	시점			회귀직선식	자기수축증가속도 (×10 <sup>-6</sup> /hr.)
					시간 (hr.)	시간차 (hr.)	온도 (°C)			시간 (hr.)	시간차 (hr.)	자기수축 (×10 <sup>-6</sup> )		
O P C	0.95	9.2	58.2	-438	5.8	3.4	26.3	y=-38.4+ 10.3x	10.3	5.0	4.2	-135	y=287-76.6x	-76.6
	0.96				6.0	3.2	26.7	y=-42.4+ 10.8x	10.8	5.3	3.9	-143	y=322-81.1x	-81.1
	0.97				6.2	3.0	27.2	y=-46.2+ 11.2x	11.2	5.8	3.4	-162	y=380-88.4x	-88.4
	0.98				6.5	2.7	28.2	y=-53.9+ 12.2x	12.2	6.5	2.7	-194	y=472-99.5x	-99.5
	0.99				6.8	2.4	29.7	y=-60.2+ 12.9x	12.90	7.2	2.0	-235	y=547-108x	-108.0
B F S 50	0.95	17.8	51.9	-377	9.5	8.3	20.7	y=-20.4+ 3.85x	3.85	14.8	3	-244.9	y=482-47.5x	-47.5
	0.96				10.0	7.8	21.2	y=-23.4+ 4.05x	4.05	-	-	-	-	-
	0.97				10.7	7.1	22.0	y=-27.6+ 4.33x	4.33	15.0	2.8	-243.9	y=530-50.4x	-50.4
	0.98				11.3	6.5	23.1	y=-31.9+ 4.60x	4.60	15.2	2.6	-242.9	y=572-52.8x	-52.8
	0.99				12.2	5.6	24.9	y=-37.5+ 4.95x	4.95	15.3	2.5	-243.5	y=601-54.5x	-54.5

및 수화온도는 9.5~12.2시간 및 20.7~24.9°C로 나타났다.

자기수축증가 구간의 시점은 14.8~15.3시간이 되고 자기수축은  $-242.89 \times 10^{-6} \sim -244.93 \times 10^{-6}$ 의 범위가 되며, 수화발열상승 구간의 시점과 최대 5.3시간의 차를 보이고 있어 수화발열상승 시점에 비해 자기수축증가 시점이 배합 중 가장 지연되는 것으로 나타났다. 회귀분석을 통해 유추된 수화발열상승속도는 3.85°C/hr.~4.95°C/hr., 자기수축증가속도는  $-47.5 \times 10^{-6} \sim -54.5 \times 10^{-6}$ 로 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 고로슬래그 미분말을 대량 사용한 고강도 콘크리트의 초기 수화열 및 자기수축 특성을 통계적 분석방법을 통해 검토하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) BFS-50의 수화온도 및 자기수축이 급속히 증가하는 구간은 OPC에 비해 지연되는 것으로 나타났다으며, 각각의 배합별 수화온도 및 자기수축 급속 증가구간에서의 발현형태(기울기)는 매우 유사한 것으로 나타났다.

(2) 수화온도 및 자기수축이 급속히 증가하는 구간을 통계적으로 분석한 결과, BFS-50의 수화발열상승속도와 자기수축증가속도는 결정계수 범위에 따라 다소 차이는 있으나 OPC에 비해 약 1/2 수준으로 감소하는 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구(R01-2007-000-11142-0)이며, 연구자의 일부는 2단계 BK21 사업의 지원비를 받은 바, 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

1. 이의배, 이형준, 구경모, 나철성, “콘크리트 수화발열 및 자기수축 특성의 정량적 분석을 위한 통계적 방법”, 한국콘크리트학회 본 학술발표대회 논문집, 2008
2. 高橋 俊之, 中田 英喜, 吉田 孝三郎, 後藤 誠史, “セメントーの自己収縮測定装置の試作”, 콘크리트工学年次論文集, Vol, 18, No. 1, 1996, pp.621~626