

# 고성능 콘크리트의 자기 및 건조수축에 미치는 혼화재의 영향

## Influence on the Autogenous and Drying Shrinkage of High Performance Concrete by Mineral Admixture

배정렬<sup>\*</sup>      홍상희<sup>\*\*</sup>      고경택<sup>\*\*\*</sup>      김성욱<sup>\*\*\*\*</sup>      한천구<sup>\*\*\*\*\*</sup>  
Zheng-Lie Pei      Sang-Hee Hong      Kyoung-Taek Koh      Sung-Wook Kim      Cheon-Goo Han

### Abstract

This study is intended to investigate the influence of mineral admixtures on the autogenous and drying shrinkage of high performance concrete. According to results, drying shrinkage increases with increase of fly ash content, and it does not show difference with replacement of blast furnace slag powder. It increases when incorporating silica fume or fly ash and silica fume together. The autogenous shrinkage shows increasing tendency with increase of silica fume and blast furnace slag powder content, and incorporating of silica fume or fly ash and silica fume together has effects on reducing autogenous shrinkage. Therefore, it is considered that application of both silica fume and fly ash can reduce the cracks caused by autogenous shrinkage, including enhancement in strength and placeability of high performance concrete.

### 1. 서론

현재 개발되고 있는 고성능 콘크리트는 양호한 품질의 이면에 단위시멘트량 및 고성능 감수제의 다량 사용에 따른 결합재의 수화활성이 향상되기 때문에 발생하는 자기수축균열이 문제시 되고있다. 이와같은 자기수축은 일반 콘크리트의 경우 건조수축량의 1할 정도로 매우 작아 균열제어 및 설계에서 고려의 대상이 되지 않았으나, 고강도 콘크리트, 고유동 콘크리트 등 물결합재비가 작고, 단위결합재량이 많은 고성능 콘크리트에서는 자기수축만으로도 균열이 발생하는 것이 지적되고 있다.

또한, 고성능 콘크리트는 배합설계상 유동성 증진, 수화열의 감소, 경제성 성취 및 품질향상 등을 목적으로 플라이애시, 고로슬래그 미분말 및 실리카 흙을 시멘트량에 일부 치환하여 사용하는 것은 필수적이라 할 만큼 널리 보급되고 있다.

그러므로 본 연구에서는 플라이애시, 고로슬래그 미분말 및 실리카 흙을 사용한 고성능 콘크리트에 있어, 각각의 혼화재료가 고성능 콘크리트의 자기 및 건조수축 특성에 미치는 영향을 분석하므로써 고성능 콘크리트의 균열방지 등 품질향상에 기여하고자 한다.

\* 정회원, 청주대 대학원, 석사과정

\*\* 정회원, 청주대 산업과학연구소, 연구원, 공학박사

\*\*\* 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, 공학박사

\*\*\*\* 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원, 공학박사

\*\*\*\*\* 정회원, 청주대 건축공학부 교수, 공학박사

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 1과 같고, 배합사항은 표 2와 같다. 즉, 실험요인으로 W/B는 30%, 목표 슬럼프플로우는 고유동 콘크리트 범위인 60±10cm, 목표 공기량은 4.5±1.5%로 하였다. 혼화제로서 플라이애시, 고로슬래그 미분말, 실리카흙 및 플라이애시와 실리카 흙을 병용하여 표 1과 같이 실용성을 고려한 치환율로 실험계획하였다. 굳지않은 콘크리트와 경화 콘크리트의 실험사항에 대한 계획은 역시 표 1과 같다.

### 2.2 사용재료

본 연구의 사용재료로서, 시멘트는 국내 산 보통 포틀랜드 시멘트(비중: 3.15, 분말도: 3,413cm<sup>2</sup>/g)를 사용하였고, 골재로서 잔골재는 충남 연기군 강모래(비중: 2.67, 조립률: 2.55), 굵은골재는 충북 옥산산 부순 굵은골재(최대치수: 25mm, 비중: 2.63, 조립률: 6.87)를 사용하였다. 혼화제로써, 플라이애시(비중: 2.22, 분말도: 3,850cm<sup>2</sup>/g) 및 고로슬래그 미분말(비중: 2.91, 분말도: 4,463cm<sup>2</sup>/g)은 국내산, 실리카 흙(비중: 2.2, 분말도: 240,000 cm<sup>2</sup>/gm)은 노르웨이산을 사용하였다.

표 1. 실험계획

실험요인		실험수준	
배합사항	W/B (%)	1	30
	목표 슬럼프플로우 (cm)	1	60±10
	목표 공기량 (%)	1	4.5±1.5
	혼화제 치환 (%)	4	플라이애시 ⇨ (15, 30) 고로슬래그 ⇨ (30, 50) 실리카 흙 ⇨ (7.5, 15) 플라이애시 : 실리카 흙 ⇨ (10 : 5, 20 : 10)
실험사항	굳지않은 콘크리트	6	슬럼프, 슬럼프플로우 공기량, 단위용적중량 충전성, 재료분리저항성
	경화 콘크리트	4	압축강도(7, 28, 91일) 건조수축(1, 3, 7...91, 180일) 자기수축(0.5, 1, 2, 3, 7...28일)

표 2. 배합사항

W/B (%)	단위수량 (kg/m <sup>3</sup> )	S/a (%)	SP/B (%)	AE/B (%)	혼화제 혼입률 (%)			용적배합 (ℓ/m <sup>3</sup> )					
					FA	BS	SF	C	S	G	FA	BS	SF
30	175	45	1.90	0.042	0	0	0	185	268	327	0	0	0
			1.80	0.055	15	0	0	157	262	321	39	0	0
			1.70	0.065	30	0	0	130	257	314	79	0	0
			1.75	0.040	0	30	0	130	266	325	0	60	0
			1.30	0.045	0	50	0	93	264	323	0	100	0
			2.20	0.028	0	0	7.5	171	265	324	0	0	20
			2.50	0.045	0	0	15	157	262	321	0	0	40
			1.9	0.038	10	0	5	157	262	321	26	0	13
			2.1	0.042	20	0	10	130	257	314	53	0	27

\* FA : 플라이애시, BS : 고로슬래그 미분말, SF : 실리카 흙

### 2.3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 먼저, 콘크리트의 혼합은 강제식 팬믹서를 사용하였다. 굳지않은 콘크리트의 실험으로, 슬럼프 시험은 KS F 2402, 슬럼프플로우 시험은 슬럼프 측정이 끝난 후 최대직경과 이에 직교하는 직경의 평균치로 하였고, 공기량은 KS F 2421, 단위용적중량은 KS F 2409에 의거 실시하였다. 쿨온골재 씻기실험 및 U형 충전실험은 기존연구에서 알려진 실험방법에 의거 실시하였다. 또한, 경화 콘크리트의 압축강도 시험은 소정의 재령에서 KS F 2405의 규정에 따라 실시하였다. 콘크리트의 건조수축 시험은 KS F 2424의 규정에 의거 실시하였고, 자기수축 실험은 일본 콘크리트공학 협회의 시험방법으로 그림 1과 같이 행하였다.

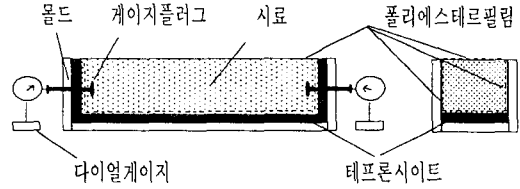


그림 1. 콘크리트의 자기수축 시험체

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 굳지않은 콘크리트의 특성

표 3은 혼화재 종류 및 혼입률 변화에 따른 굳지않은 콘크리트의 특성을 나타낸 것이다.

먼저, 각 혼화재 종류별 유동성은 목표 슬럼프플로우 60±10cm의 범위를 모두 만족하였다. 단, 플라이애시 및 고로슬래그 미분말은 혼입률 증가에 따라 증가하여 SP제 사용량이 감소하였고, 실리카흙의 경우는 감소하는 경향으로 SP제량이 증가하였다.

공기량의 경우, 모든 배합에서 목표 공기량 4.5±1.5%를 만족하는 것으로 나타났는데, 특히 플라이애시 혼입률이 증가할수록 공기량은 미연소탄분의 AE제 흡착작용에 기인하여 감소하므로써 고성능 콘크리트 배합자료에서 AE제 사용량이 증가하였다. 또한, 단위용적중량은 공기량과 반대의 경향으로 나타났다.

U형 충전높이는 혼화재 종류와 관계없이 양호한 충전성을 나타내었는데, 특히, 플라이애시 치환의 경우 콘크리트의 점성증가에 의해 플레인과 비교하여 크게 증가하는 경향이었으나, 고로슬래그 미분말의 경우는 다소 저하하였다. 재료분리 저항율은 80~100%이내로 비교적 양호하게 나타났다.

### 3.2 압축강도 특성

표 3. 혼화재 종류 및 혼입률 변화에 따른 굳지않은 콘크리트의 특성

배치 \ 항목	슬럼프 (cm)	슬럼프 플로우 (cm)	공기량 (%)	단위용적중량 (kg/m <sup>3</sup> )	충전높이 (cm)	재료분리 저항율 (%)
P	26.0	62.5	4.5	2272	28.5	85.4
FA15	26.3	64.5	4.0	2251	30.0	88.5
FA30	27.0	70.0	4.3	2242	35.0	87.3
BS30	26.3	67.0	3.7	2285	26.7	89.5
BS50	27.0	69.5	4.4	2256	25.0	85.7
SF7.5	26.3	60.0	3.7	2284	31.5	82.3
SF15	25.3	51.5	3.2	2290	26.5	86.7
FA-SF1*	25.7	60.5	5.4	2213	31.2	92.3
FA-SF2*	25.6	58.5	3.5	2271	31.0	83.0

\*FA-SF1 : 10-5%, FA-SF2 : 20-10%

그림 2는 혼화재 종류 및 혼입률 변화에 따른 압축강도를 나타낸 것이다. 먼저, 혼화재 종류 및 혼입률 변화에 따른 압축강도는 재령 28일에서 580~660kg/cm<sup>2</sup> 수준의 고강도를 발휘하였다. 그런데, 이중 플라이애시인 경우는 치환율 증가에 따라 포졸란 반응에 기인하여 초기 강도는 다소 저하하였으나, 재령 28일에서는 플레인과 거의 같은 수준에 도달하였다. 고로슬래그 미분말의 경우는, 플레인과 같거나 다소 높게 나타났는데 이는 재령 경과에 따른 고로슬래그 미분말의 잠재수경성 반응에 기인한 것으로 분석된다. 특히, 실리카 흙 치환의 경우는 혼입률 및 재령의 증가에 따라 강도증진경향이 크게 나타났는데, 이는 초기분의 실리카 흙 입자가 시멘트 입자사이에 분포되어 조직을 보다 치밀화 시킨 것 및 포졸란 반응에 기인한 것으로 분석된다. 특히, FA-SF2의 경우 28일 압축강도는 가장 우수한 것으로 나타났다.

### 3.3 건조수축 특성

그림 3은 혼화재 종류 및 혼입률 변화에 따른 건조수축에 의한 길이변화를 나타낸 것이다. 전반적으로, 탈형직후 수중양생 기간 동안 콘크리트의 수분흡수에 의하여 시험체는 약간 팽창하는 경향을 나타내었고, 건조수축 측정시점인 재령 7일 후 기중양생에서 건조에 의한 수축이 발생하였는데 특히, 초기재령에서 급격한 건조수축이 일어났으며, 재령이 경과함에 따라 보다 완만한 경향이였다. 이때, 재령 28일에서, 플레인의 건조수축은  $625 \times 10^{-6}$ 으로 나타났다. 플라이애시 치환의 경우 건조수축은 플레인에 비하여 약간 증가하는 경향이였고, 고로슬래그 미분말 치환의 경우는 거의 차이가 없는 경향이였다. 실리카 흙 및 플라이애시와 실리카 흙을 병용한 경우는 혼입률 증가

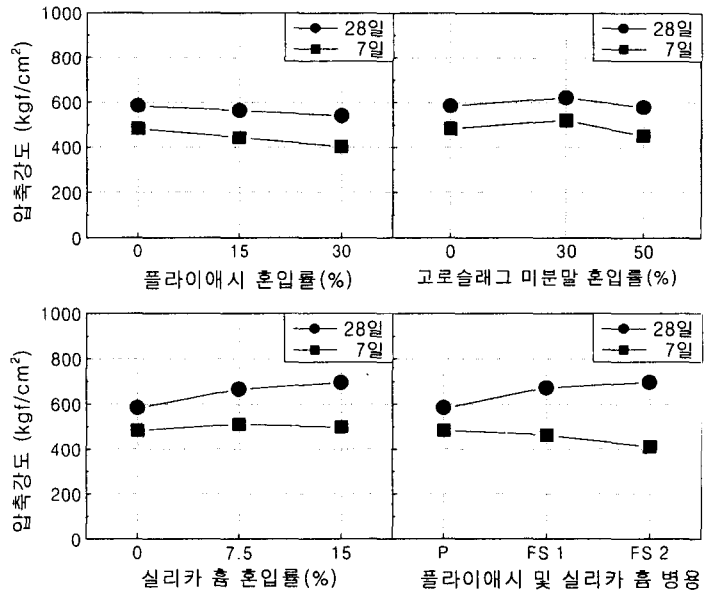


그림 2. 혼화재 종류 및 혼입률 변화에 따른 압축강도

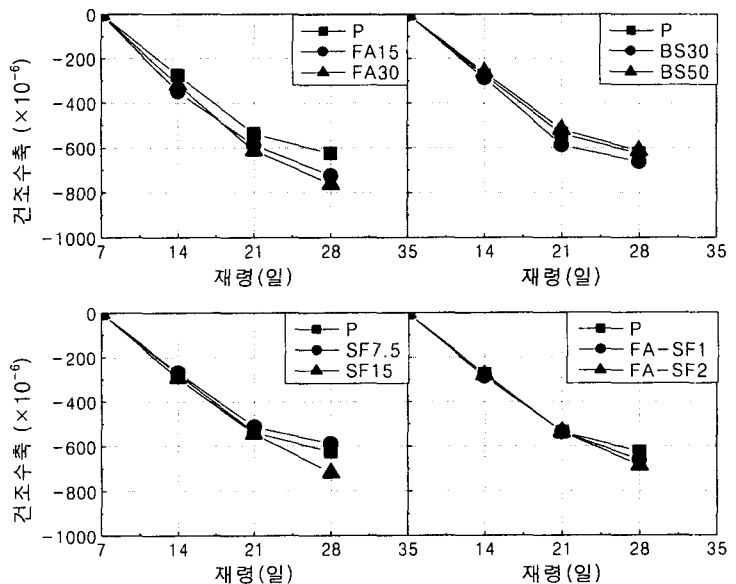


그림 3. 혼화재 종류 및 혼입률 변화에 따른 건조수축

에 따라 조금 증가하는 것으로 나타났다. 이때, 건조수축은 고성능 콘크리트의 자기수축을 포함하는 값으로 나타낸 것이다.

### 3.4 자기수축 특성

그림 4는 혼화재 종류 및 혼입률 변화에 따른 자기수축 길이변화를 나타낸 것이다. 재령 28일에서 플레인의 자기수축은  $310 \times 10^{-6}$ 으로서 건조수축량의 약 50%를 차지하였다. 그러나, 플레인 콘크리트에 플라야시를 치환하여 치환율이 증가함에 따른 자기수축은 감소하는 경향으로 나타났는데 이는 플라야시의 초기 수화반응의 지연에 기인된 것으로 사료된다.

고로슬래그 미분말 치환의 경우는 혼입률 증가에 따라 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 고로슬래그 미분말의 잠재수경성 반응으로 형성된 경화체 조직의 미세관 장력 증대에 기인된 것으로 분석된다.

실리카 흙 치환의 경우, 혼입률 증가에 따라 증가의 경향으로 나타났는데 이는 실리카 흙의 포졸란 반응에 따른 높은 수화활성으로 대량 생성된 겔 공극량으로 인해 고로슬래그인 경우와 마찬가지로 큰 수축응력이 유발된 것에 기인한 것으로 분석된다.

또한, 플라야시 및 실리카 흙을 병용한 경우, 모두 플레인과 비교하여 약간 감소하는 경향으로 나타났는데, 이는 플라야시와 실리카 흙의 복합된 영향으로 사료된다. 따라서, 고유동성 및 고강도성을 발휘하는 고성능 콘크리트의 제조시 플라야시와 실리카 흙을 일정 비율로 혼합하게 되면 충전성 향상, 압축강도 증진과 함께 자기수축에 의한 영향을 어느 정도 저감할 수 있을 것으로 사료된다.

그림 5는 혼화재 종류 및 혼입률별 재령 경과에 따른 질량감소율을 나타낸 것이다. 질량감소율은 모두 초기에 큰 것으로 나타났는데, 0.018~0.027%의 범위로서 일본 콘크리트 공학협회의 자기수축 측정방법에서 제안한 범위인 0.05%이하의 규정치를 모두 만족하는 값을 나타내었다.

그림 6은 재령 28일에서의 혼화재 종류 및 혼입률 변화에 따른 자기수축 및 건조수축량을 상호 비교하여 나타낸 것이다. 플라야시 혼입률 증가에 따라 자기수축이 건조수축에서

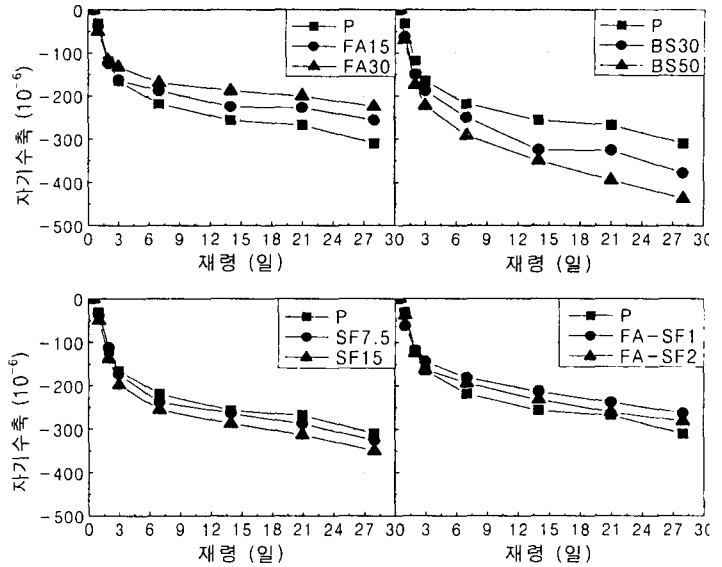


그림 4. 혼화재 종류 및 혼입률 변화에 따른 자기수축

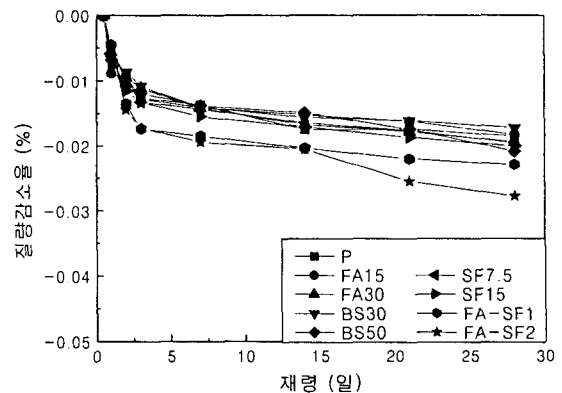


그림 5. 혼화재 종류 및 혼입률별 질량감소율(%)

차지하는 비율은 크게 감소하는 경향이었고, 고로슬래그 미분말의 혼입률 증가에 따라서는 자기수축의 비율이 증가하는 경향이였다. 실리카 흙 치환율 증가에 따라 자기수축 및 건조수축은 모두 증가하였으나, 자기수축의 비율은 오히려 작아지는 것으로 분석된다. 또한, 플라이애시와 실리카 흙을 병용한 경우에 있어 자기수축의 비율은 플라이애시와 실리카 흙의 복합작용으로 작게 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 광물질 혼화제인 플라이애시, 고로슬래그 미분말 및 실리카 흙을 사용한 고성능 콘크리트의 자기 및 건조수축 특성에 대하여 분석하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 혼화제 종류 및 혼입률에 따른 유동성은 모두 목표 유동성인 슬럼프플로우  $60 \pm 10 \text{cm}$ 를 만족하는 것으로 나타났으며, 공기량도 목표 공기량  $4.5 \pm 1.5\%$ 의 범위를 만족하였다. 압축강도 특성으로, 플라이애시의 경우 혼입률 증가에 따라 초기강도는 저하하였으나 28일 재령에서는 회복되는 경향으로 나타났고, 고로슬래그 경우, 플레인과 크거나 비슷한 경향을 나타내었으며, 실리카 흙 혼입률 증가에 따라서는 크게 증가하였다. 특히, 플라이애시 및 실리카 흙을 병용한 경우인 FA-SF2의 경우가 모든 배합에서 가장 우수한 압축강도로 나타났다.
- 2) 28일 재령의 건조수축 특성으로, 플레인의 경우  $625 \times 10^{-6}$ 의 길이변화율을 나타내었는데, 플라이애시 치환에 따라 건조수축은 증가하였고, 고로슬래그 미분말은 거의 차이가 없는 경향이였으며, 실리카 흙 및 플라이애시와 실리카 흙을 병용한 경우는 다소 증가하는 경향이였다.
- 3) 28일 재령의 자기수축 특성으로, 플레인의 경우는  $310 \times 10^{-6}$ 으로 건조수축의 50%를 나타내었다. 혼화제 치환율 증가에 따른 자기수축은 플라이애시 치환의 경우 감소하는 경향이였고, 고로슬래그 미분말은 크게 증가하는 경향이였으며, 실리카 흙은 다소 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, 플라이애시 및 실리카 흙을 병용한 경우의 자기수축은 플레인과 비교하여 다소 감소의 경향으로, 고성능 콘크리트 제조시 충전성 향상, 강도증진과 함께 자기수축을 줄일 수 있는 양호한 방안으로 판단되었다.

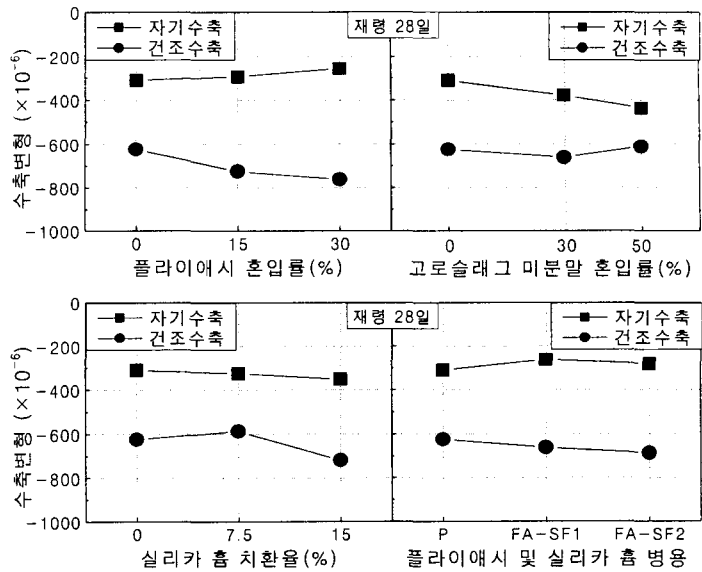


그림 6. 혼화제 종류 및 혼입률 변화에 따른 자기수축

#### 참고문헌

1. 日本コンクリート工學協會：自己收縮研究委員會報告書, 1996.
2. 홍상희, 전병채, 송명신, 한천구, 반호용 ; 무기질 혼화제의 혼입률 변화에 따른 고성능 콘크리트의 특성 분석, 대한 건축학회 학술발표논문집, 제 18권 제 1호, pp.19~22, 1998.
3. 田澤榮一, 宮澤伸吳：セメント系材料の自己收縮, セメント・コンクリート, No. 565, pp.35~44, Mar., 1994.
4. 今本啓一, 大谷 博：高強度・超高強度コンクリートの收縮性状に關する研究, 콘크리트工學年次論文報告集 Vol. 17, No. 1, pp.1061~1066, 1995.