

# High-Volume 플라이애쉬 콘크리트의 건조수축특성

## Drying Shrinkage of High-Volume Fly Ash Concrete

최 석 균 \*                      이 광 명 \*\*                      이 진 용 \*\*\*  
Choi, Seok-Kyun    Lee, Kwang-Myong    Lee, Chin-Yong

### ABSTRACT

Fly ash is the most common artificial pozzolan, which is a material precipitated electrostatically from the exhaust gases of coal-fired power stations. Fly ash can be used as the supplementary material as well as the material for high performance concrete and hence, the development of high-volume fly ash concrete is imperative. In this study, the characteristics of drying shrinkage of high volume fly ash concrete is investigated. It is found from test results that as the replaced amount of fly ash in concrete is increased, drying shrinkage of concrete is reduced.

### 1. 서론

플라이애쉬는 화력발전소의 연소가스로부터 얻을 수 있는 인공 포졸란 재료로서 콘크리트 구성성분인 시멘트를 대체하여 널리 사용되고 있다. 플라이애쉬는 산업부산물을 재활용하는 환경적, 경제적 이점은 물론 요구수량 감소를 통한 작업의 우수성, 장기재령에서의 강도 증진, 내구성 향상 등 콘크리트 성질을 전반적으로 향상시킬 수 있는 우수한 재료로 알려져 있다. 본 연구의 목적은 High-volume 플라이애쉬 콘크리트의 플라이애쉬 대체율에 따른 건조수축특성을 규명하는 것이다.

### 2. High-Volume 플라이애쉬 콘크리트의 건조수축특성

#### 2.1 High-Volume 플라이애쉬 콘크리트

플라이애쉬 함유량에 따라 굳은 상태의 콘크리트 특성이 변화하며 이는 일반적으로 플라이애쉬의 포졸란 반응에 의한 것으로 알려져 있다. 역학적 특성과 내구성이 우수하고 저발열 특성을 가진 고성능 콘크리트의 개발을 목적으로 많은 양의 플라이애쉬를 함유한 High-volume 플라이애쉬 콘크리트가 개발되어 저발열과 조기 강도발현의 요구정도가 상대적으로 낮은 매스콘크리트에 적용되고 있다.<sup>1~3)</sup>

\* 정회원, 성균관대학교 토목공학과 석사과정  
\*\* 정회원, 성균관대학교 토목공학과 부교수  
\*\*\* 정회원, 동아건설 기술연구소 책임연구원

## 2.2. 건조수축특성

플라이애쉬 콘크리트의 초기 재령에 있어서의 건조수축은 단위시멘트량의 영향을 받고 장기 재령에서의 건조수축은 단위수량의 영향을 주로 받는다. 일반적으로 플라이애쉬 콘크리트의 경우 상대적으로 단위시멘트량이 작아 플라이애쉬를 대체하지 않은 보통 콘크리트에 비해 건조수축변형이 작은 것으로 보고된 바 있다.<sup>3)</sup>

## 2.3 건조수축모델

시간에 따라 변화하는 콘크리트의 건조수축특성은 실험에 의하거나 모델을 이용하여 예측할 수 있다. ACI 209에서는 임의의 시간  $t$ 에서 발생하는 수축  $(\epsilon_{sh})_t$ 을 다음 식과 같이 제시하고 있다.

$$(\epsilon_{sh})_t = \frac{t}{f+t} (\epsilon_{sh})_u, \text{ with } (\epsilon_{sh})_u = 415 \text{ to } 1078 \times 10^{-6} \gamma_{cs} \quad (1)$$

여기서, 상수  $f$ 와 최종 건조수축량  $(\epsilon_{sh})_u$ 는 실험을 통해 결정될 수 있으며 보정계수  $\gamma_{cs}$ 는 상대습도, 부재의 두께, 슬럼프, 잔골재율, 시멘트량, 공기량 등의 인자를 포함하고 있다. 하지만  $\gamma_{cs}$ 는 플라이애쉬 대체율을 직접적으로 반영하지 않아 플라이애쉬의 영향을 고려하는 보정계수의 도입이 필요한 것으로 판단된다.

## 3. 실험 연구

### 3.1 실험재료

콘크리트 배합에는 국산 D사의 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였고 플라이애쉬는 비중 2.10, 비표면적  $4350 \text{ cm}^2/\text{g}$ 인 보령산을 사용하였다. 비중 2.62, 조립율 2.73인 잔 골재와 비중 2.74, 조립율 6.70, 최대치수 25 mm인 쇠석골재를 굵은 골재로 사용하였다.

### 3.2 배합비 및 실험방법

배합비는 28일 압축강도 27 MPa를 기준으로 하여 플라이애쉬를 시멘트 중량비로 0, 10, 30, 50%로 각각 대체하여 정하였으며 이와 함께 플라이애쉬 대체율을 30%로 일정하게 유지하면서 강도를 변화시킨 배합비를 표 1과 같이 정하여 압축강도(KS F2405)와 건조수축시험(KS F2424)을 실시하였다.

표 1 플라이애쉬 대체율에 따른 콘크리트 배합비 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

강도 (MPa)	대체율 (%)	Water	Cement	Fly ash	Aggregate		A.E. (%)	S.P. (%)
					Coarse	Fine		
27	0	185	400	-	1032	691	0.2	-
	10	185	360	40	1021	683	0.2	-
	30	160	280	120	1115	630	0.5	0.2
	50	145	200	200	1138	616	0.6	0.5
18	30	170	233	100	1030	757	0.4	0.4
24		165	245	105	1082	702	0.2	0.2
35		150	306	131	1090	678	1.2	0.2
50		140	325	139	1126	644	1.2	1.2

#### 4. 실험 결과 및 분석

##### 4.1 플라이애쉬 대체에 따른 건조수축 변화

플라이애쉬 대체율을 변화시킨 배합의 건조수축결과를 그림 1에 나타냈으며 28일 압축강도는 표 2와 같다. 플라이애쉬를 대체하지 않은 기준콘크리트의 건조수축 변형률에 대하여 플라이애쉬 대체율이 증가할수록 건조수축 변형률이 감소하는 경향을 보였다. 재령 28일에서 대체율 10, 30, 50%인 경우 기준콘크리트보다 건조수축 변형률이 각각 약 14, 22, 28% 정도 작았으며 재령이 증가하여도 플라이애쉬 대체 증가에 따른 건조수축 변형률 감소경향은 거의 일정하였으며 표 3에서 알 수 있는 바와 같이 재령 84일에서는 건조수축 변형률이 기준콘크리트보다 약 13, 22, 33% 정도 감소하는 경향을 나타냈다. 대체율이 30%로 같고 강도를 변화시킨 배합의 실험 결과는 그림 2와 같다. 초기 재령에서는 배합에 따라 건조수축 변형률의 편차가 다소 컸지만 그 차이가 감소하여 표 4와 같이 재령 84일에서 18, 24, 27, 35 MPa의 보통 강도 콘크리트는 근소한 차이를 나타냈으나 50 MPa의 경우에는 약 14% 정도의 비교적 큰 값을 나타냈다.

표 2 건조수축시험 배합의 28일 압축강도 (MPa)

실계기준강도(MPa)	27				18	24	35	50
플라이애쉬 대체율(%)	FA0	FA10	FA30	FA50	FA30			
28일 압축강도(MPa)	37.5	39.6	39.9	37.7	24.9	32.9	44.6	51.9

##### 4.2 건조수축모델과의 비교

플라이애쉬의 대체율을 변화시킨 배합에서는 최종 건조수축변형률 ( $\epsilon_{sh}$ )<sub>u</sub>가 대체율 0, 10, 30, 50%인 경우에 대하여 각각 844.9, 734.7, 653.8,  $582.7 \times 10^{-6}$ 로 추정되었으며 본 연구에서는 플라이애쉬의 영향을 고려하기 위하여 플라이애쉬 대체율에 따른 보정계수를 도입하였다. 슬럼프, 잔골재율, 공기량으로 보정한 계수  $\gamma_{cs}$ 는 대체율 0, 10, 30, 50%에 대하여 각각 0.93, 0.92, 0.86, 0.79이었으며 27-FA0의 건조수축변형률을 기준으로 각각 1.00, 0.89, 0.84, 0.81인 플라이애쉬 대체율에 따른 보정계수를 얻었다. 위와 같은 방법으로 추정한 건조수축 변형률 곡선과 실험결과의 비교가 그림 1과 그림 2에 주어져 있다.

표 3 27-FA0와 비교한 대체율별 건조수축 감소백분율(%)

재령(일)	27-FA10	27-FA30	27-FA50
7	9.5	27.6	32.3
14	10.1	22.3	27.1
21	13.8	22.0	29.1
28	13.9	22.4	27.8
35	15.7	22.0	29.0
42	13.8	21.5	29.4
49	14.1	22.1	30.1
56	13.1	23.6	31.5
63	12.2	24.3	32.7
70	13.8	24.3	33.2
77	14.1	23.5	33.1
84	13.2	21.5	32.9

표 4 18-FA30과 비교한 강도변화시 건조수축 증가백분율(%)

재령(일)	24-FA30	35-FA30	50-FA30
7	7.6	24.1	55.2
14	4.9	15.9	34.3
21	3.2	10.1	28.2
28	2.0	9.6	27.6
35	-0.8	7.5	23.7
42	-1.7	4.3	15.6
49	-2.1	5.5	18.4
56	-2.8	0.2	13.0
63	-2.7	2.5	15.0
70	-1.5	3.7	15.5
77	-1.2	3.8	14.8
84	-0.6	3.4	14.1

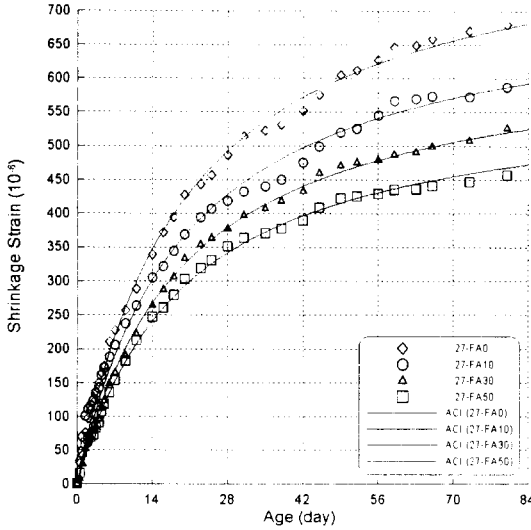


그림 1 실험결과(27 MPa)와 ACI모델 비교

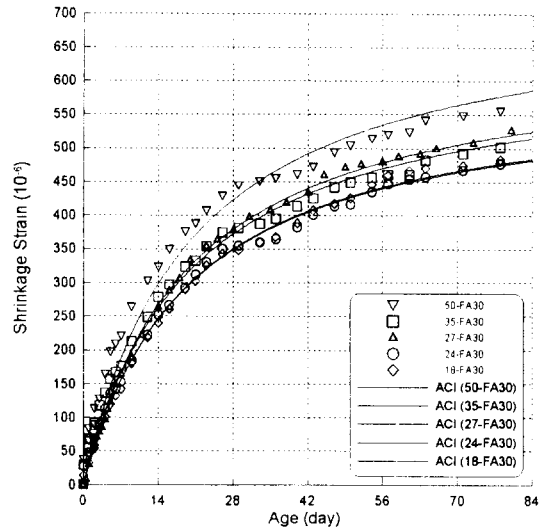


그림 2 실험결과(30%)와 ACI모델 비교

## 5. 결론

본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 플라이애쉬 대체율에 따른 물시멘트비 감소효과에 의해 대체율이 증가함에 따라 건조수축 변형률이 재령에 관계없이 일정하게 감소하며 대체율 10, 30, 50%인 경우에 대하여 최종값으로 비교할 때 각각 약 13, 22, 33%의 감소효과가 있는 것으로 나타났다.
- (2) 플라이애쉬 대체율이 일정한 경우 18~35 MPa의 보통 강도 콘크리트에서는 시멘트량이 다소 증가하더라도 물시멘트비 감소효과에 의해 건조수축 변형률의 차이가 거의 없었으나 50 MPa 고강도 콘크리트의 경우 18 MPa에 비해 약 14%가 증가하였다.
- (3) 플라이애쉬를 대체한 배합의 최종 건조수축 변형율을 추정함에 있어 ACI 모델에는 플라이애쉬 대체율을 반영할 직접적인 보정계수가 포함되어 있지 않아 플라이애쉬의 영향정도를 나타내기에는 부적합하였다. 본 연구에서는 28일 설계기준강도 27 MPa, 시멘트량 400 kg/m<sup>3</sup>인 대체율 0, 10, 30, 50%인 경우에 대하여 플라이애쉬 대체율에 따른 보정계수로 각각 1.00, 0.89, 0.84, 0.81의 값을 얻었으며 추후 이를 반영한 플라이애쉬 콘크리트를 위한 건조수축모델의 개발이 필요한 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. Carette, G. G., Bilodeau, A., Chevrier, R. L., Malhotra, V. M., "Mechanical Properties of Concrete Incorporating High Volumes of Fly Ash from Sources in the U.S.," *ACI Materials Journal*, Vol. 90, No. 6, 1993, pp. 535~544.
2. Berry, E. E., Hemmings, R. T., Zhang, M. H., Malhotra, V. M., Bilodeau, A., Carette, G. G., *Investigation of High-Volume Fly Ash Concrete System*, Electric Power Research Institute Report, EPRI TR-103151, 1993, pp. 3-8~3-29.
3. Sivasundaram, V., *High-Volume Fly Ash Concrete Using Canadian Fly Ashes*, Canadian Electrical Association Report, 1994, pp. 19~27.