

고강도 콘크리트의 건조수축

Drying Shrinkage of High-Strength Concrete

임 준 영* 정 승 호** 이 회 근*** 이 광 명****

Joon-Young Im Seong-Ho Jeong Hoi-Keun Lee Kwang-Myong Lee

ABSTRACT

Drying shrinkage is the decrease in the volume of a concrete element when it loses moisture by evaporating. Because of low water/binder ratio(W/B) and the use of chemical and mineral admixtures for high-strength concrete, the evolutions of moisture and the rate of cement hydration in high-strength concrete are significantly different from those in normal strength concrete. In this study, the drying shrinkage of high-strength concrete with and without fly ash was measured up to the age of 200 days. From the experimental test results, it was observed that the drying shrinkage decreased as the W/B decreased. As the W/B is lowered from 0.50 to 0.27, the difference of drying shrinkage between the fly ash concrete and the ordinary concrete is gradually increased.

1. 서 론

콘크리트 구조물이 점차 고층화, 대형화되어감에 따라 고강도 콘크리트(high-strength concrete, HSC)의 사용이 점점 증가하고 있다. 배합특성상 HSC는 보통강도 콘크리트(normal-strength concrete, NSC)와 특성이 매우 다르기 때문에 이에 대한 폭넓은 연구가 요구된다. 특히 고강도의 콘크리트를 얻기 위해서는 단위 시멘트량은 증가하는 반면에 단위수량은 감소하는데, 이로 인해 발생하는 수화열, 수축 그리고 경제적인 문제들을 해결하기 위해 여러 가지 혼화재료가 사용되고 있다.

기존의 건조수축에 관한 연구는 주로 NSC에 대한 것으로 HSC에 대한 결과가 부족하고, 또한 지금까지 제안된 예측 모델들은 대부분이 NSC의 실험결과를 근거로 한 것이므로, HSC의 건조수축에 대한 실험적 연구와 건조수축 모델의 개발이 필요하다¹⁾.

본 연구에서는 HSC의 제조에 사용되는 재료와 배합비가 콘크리트의 건조수축에 미치는 영향을 알아보기 위해서 다양한 물/결합재비(water/binder ratio, W/B)를 갖는 일반 콘크리트와 플라이 애시 콘

* 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 석사과정

** 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 석사과정

*** 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정 수료

**** 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 부교수

크리트를 제조하여 플라이 애시와 W/B가 건조수축에 끼치는 영향을 실험을 통해 비교, 분석하였다.

2. 실험 연구

2.1. 재료

콘크리트의 배합에는 비중이 3.15이고 비표면적이 3,450 cm²/g인 1종 시멘트를 사용하였고, 플라이 애시는 비중이 2.27, 비표면적이 3,375 cm²/g, 강열감량이 3.44%인 국내 H사 제품을 사용하였다. 이 밖의 화학적 성분을 Table 1에 나타내었다.

잔 골재로는 비중이 2.51, 조립률이 2.75이며 흡수율이 1.52%인 강모래를 사용하였고, 굵은 골재로는 고강도 배합에서는 최대 치수가 20 mm, 보통강도에서는 25 mm인 화강암 쇄석 골재를 세척하여 불순물을 제거한 후 사용하였다.

2.2 콘크리트 배합비

실험에 사용한 콘크리트 배합비는 Table 2와 같이, 결합재로 시멘트만 사용한 콘크리트 배합(OPC, Mixes 1~4)과 시멘트의 20%를 플라이 애시(FA, Mixes 5~8)로 대체한 8가지이다. W/B가 0.27~0.35인 HSC의 건조수축특성을 NSC와 비교하기 위해 W/B가 0.50인 배합을 추가하였다. HSC의 유동성을 확보하기 위해 결합재 중량의 1.5~2.4%인 나프탈렌 계열의 고성능 감수제(HRWR)를 사용하였으며, NSC의 소요 공기량을 확보하기 위해 결합재 중량의 0.5%인 AE감수제를 사용하였다.

Table 1 Chemical compositions of cement and fly ash

Material	Chemical composition (%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Loss on ignition
Cement	20.7	5.2	3.0	62.4	4.7	2.4	1.36
Fly ash	56.7	21.2	6.0	6.7	1.4	0.1	3.44

Table 2 Mix proportions of concrete (kg/m³)

Mix type	Mix no.	W/B	Water	Cement	Fly ash	Fine aggregate	Coarse aggregate	AE water reducer (B×%)	HRWR (B×%)
OPC	1	0.50	185	370	-	754	969	0.5	-
	2	0.35	158	450	-	672	1061	-	1.5
	3	0.31	155	500	-	626	1074	-	2.0
	4	0.27	148	550	-	617	1060	-	2.4
FA	5	0.50	185	296	74	744	956	0.5	-
	6	0.35	158	360	90	661	1043	-	1.5
	7	0.31	155	400	100	614	1054	-	2.0
	8	0.27	148	440	110	605	1038	-	2.4

2.3 시편제작 및 실험방법

굳지 않은 콘크리트의 성질을 알아보기 위해 슬럼프 시험(KS F 2421)과 공기량 시험(KS F 2402)을 실시하였다. 콘크리트의 압축강도(KS F 2405)와 탄성계수(KS F 2438)를 측정하기 위해 ϕ 100×200 mm의 원주형 공시체를 제작하였다. 시편은 타설 후 1일간은 온도가 20±1℃이고 습도가 60±3%인 항온항습실에서 양생하였고, 탈형 후 20℃인 항온수조에서 시험 직전까지 양생하였다. 압축강도와 탄성계수는 재령 1, 7, 28일에서 각각 측정하였다.

콘크리트의 건조수축 실험을 위해 KS F 2424에 따라 각 배합별로 100×100×400 mm인 각주형 시편을 두개씩 제작하였고, 시편 중앙에 매립게이지를 설치하여 데이터 로거(data logger)를 통하여 건조수축 변형률을 측정하였다. 시편은 타설 후 1일간은 온도가 20±1℃이고 습도가 60±3%인 항온항습실에서 양생한 후 탈형하여, 온도가 20℃인 항온수조에서 재령 7일까지 양생하였다. 그리고 재령 7일부터 온도 20℃, 습도 60%의 조건인 항온 항습기에서 양생하면서 건조수축 변형률을 측정하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 굳지 않은 콘크리트의 성질 및 역학적 성질

Table 3에 슬럼프, 공기량, 압축강도 그리고 탄성계수 결과를 나타내었다. 슬럼프는 W/B가 0.50인 NSC의 경우만 19 cm이었으며, 고성능 감수제를 사용한 HSC는 모두 20 cm이상의 슬럼프값을 보였다. 전반적으로 FA의 슬럼프가 OPC보다 다소 크게 나타났다. 이는 플라이 애시의 입자 형태가 구형이므로 OPC보다 FA에서 동일한 워커빌리티를 얻기 위한 요구수량이 줄어들어, 단위 수량이 같은 동일한 W/B의 경우 OPC보다 FA가 더 많은 자유수를 포함하기 때문인 것으로 사료된다²⁾. 공기량은 1.6~5.0%로 고강도일수록 공기량이 감소하는 경향을 나타내었다.

압축강도는 초기재령에서 FA의 강도 발현률이 OPC보다 낮으나, 재령이 증가할수록 FA의 강도 발현률이 커짐을 알 수 있다. 재령 28일에서 OPC가 FA에 비해 2.5~6.1% 정도 큰 강도를 나타내고 있으며, 압축강도가 증가할수록 탄성계수도 증가하는 경향을 나타내었다.

Table 3 Properties of fresh and hardened concrete

Mix type	Mix no.	Slump (cm)	Air content (%)	Compressive strength (MPa)			Modulus of elasticity (GPa)		
				1 day	7 days	28 days	1 day	7 days	28 days
OPC	1	19.0	5.0	9.6	25.3	31.1	14.0	24.9	26.9
	2	21.0	4.8	21.8	43.0	47.1	22.1	31.2	32.9
	3	22.5	2.4	25.0	49.4	55.5	24.9	33.2	34.3
	4	23.0	2.0	30.3	58.3	66.2	25.2	35.7	36.2
FA	5	19.0	4.7	6.1	20.7	29.2	12.3	19.5	26.7
	6	23.5	3.3	14.0	37.4	45.9	16.6	28.4	32.4
	7	24.5	2.1	14.2	40.7	52.6	18.1	29.0	33.6
	8	24.0	1.6	13.4	45.6	62.4	16.4	32.4	34.5

3.2 고강도 콘크리트의 건조수축

Fig. 1은 재령 200일까지의 W/B에 따른 OPC와 FA의 건조수축 변형률을 나타낸다. OPC는 재령 200일에서 W/B가 0.50에서 0.27로 낮아짐에 따라 건조수축 변형률이 각각 619×10^{-6} , 535×10^{-6} , 469×10^{-6} , 432×10^{-6} 로 감소하였으며, FA도 OPC와 마찬가지로 W/B가 낮아짐에 따라 건조수축 변형률이 감소하였다.

이처럼 W/B가 낮아짐에 따라 건조수축 변형률이 감소하는 이유는, W/B가 낮아짐에 따라 시멘트의 수화 후 모세관에 남아 있는 증발가능한 물의 양이 적어지기 때문이다. 또한 W/B가 낮아지면 수화도도 낮아지므로, 수축에 영향을 끼치지 못하는 미수화 시멘트 입자의 부피가 많아지는 것도 수축이 줄어드는 원인 중 하나이다^{3,4)}.

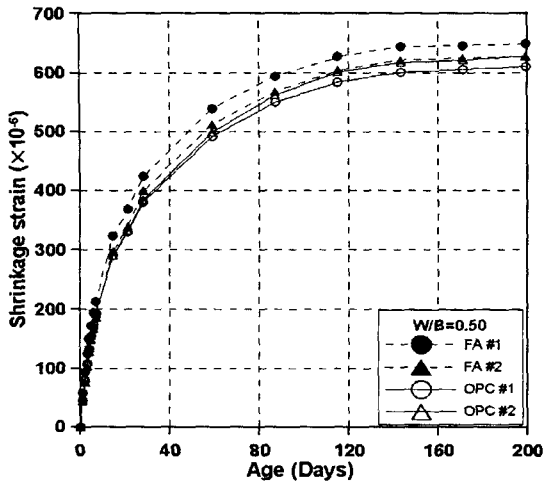
일반적으로 플라이 애시는 콘크리트의 건조수축에 큰 영향을 끼치지 않는다고 알려져 있지만, 일부 실험 결과를 보면 플라이 애시의 사용에 따라 건조수축이 증가하는 경향을 보이고 있다^{5,6)}. 이는 플라이 애시의 물리적 특성과 화학적 조성이 매우 다양하기 때문으로, 플라이 애시의 조성에 따라 건조수축에 미치는 영향은 어느 정도 차이를 보일 것으로 판단된다.

플라이 애시와 같은 포졸란은 시멘트 수화물에 미세한 공극의 부피를 증가시키는 역할을 한다. 콘크리트의 건조수축은 3~20 nm크기의 미세한 공극을 채우고 있는 물과 직접적 연관이 있으므로, 미세한 공극을 많이 만드는 플라이 애시를 사용한 콘크리트는 일반적으로 큰 건조수축 변형률을 나타낸다고 한다⁷⁾.

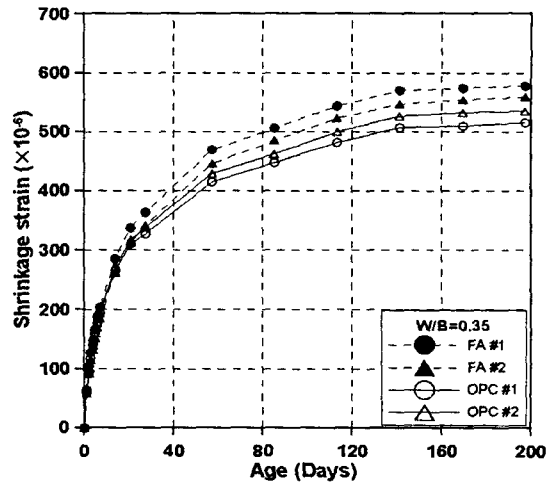
동일한 W/B에 대하여 OPC와 FA에 대한 변형률을 비교하여 보면, 모든 배합에서 FA가 OPC에 비해서 큰 건조수축 변형률을 나타내고 있다. W/B가 동일할 때, 시멘트의 일부를 플라이 애시로 치환을 하면, 플라이 애시는 물과 직접 반응하지 않으므로 OPC에 비해 FA가 더 높은 물/시멘트비를 갖게 되어 더 큰 건조수축 변형률을 보이는 것으로 보고 된바 있다⁸⁾.

재령 200일에서 W/B가 0.27인 Mix 4와 Mix 8의 평균 건조수축 변형률은 각각 442×10^{-6} , 525×10^{-6} 으로 FA가 OPC보다 약 16% 큰 값을 나타내었으나, W/B가 0.50인 Mix 1과 Mix 5의 평균 건조수축 변형률은 620×10^{-6} , 639×10^{-6} 으로 변형률의 차이는 2.9%로 나타났다. Fig. 1에서 보는 것처럼 W/B가 낮아질수록 OPC와 FA의 건조수축 변형률의 차이는 점점 커지는 것을 알 수 있다. Table 2에서 보는 것처럼 W/B가 0.50인 Mix 1은 W/B가 0.27인 Mix 4에 비해 단위 시멘트량이 상당히 적은 것을 알 수 있다. 여기에서, 시멘트 중량의 20%를 시멘트보다 비중이 작은 플라이 애시로 치환을 하면 W/B가 0.50으로 높은 Mix 1과 Mix 5의 시멘트 풀의 부피는 큰 차이가 없으나, W/B가 낮아짐에 따라 FA의 시멘트 풀의 부피가 OPC보다 점점 더 커지게 된다. 일반적으로 콘크리트의 수축은 시멘트 풀에서 발생하기 때문에 OPC에 비해 상대적으로 시멘트 풀의 부피가 큰 FA가 더 큰 건조수축 변형률을 나타내는 것으로 판단된다.

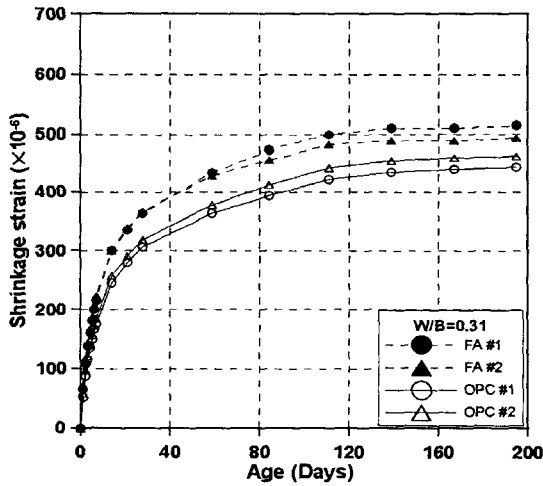
시멘트가 완전히 수화하는데 필요한 물의 양은 이론적으로 시멘트중량의 약 25%로 알려져 있다. 그러나 콘크리트의 워커빌리티를 위해 얼마간의 물이 더 사용되고 있다. 이때 수화에 이용되고 남은 물이 대기중으로 증발하면서 건조수축이 발생하므로, 시멘트의 수화 이외에 남게 되는 잉여수량이 건조수축과 관계가 있다. Table 2의 배합비에 따라 시멘트 중량의 25% 이외의 수량을 잉여수량으로 본다면, W/B가 낮아질수록 OPC에 비해 FA에 더 많은 잉여수량이 존재하게 된다. 그러므로 W/B가 낮아질수록 OPC보다 FA가 더 큰 건조수축 변형률을 보이는 것으로 사료된다.



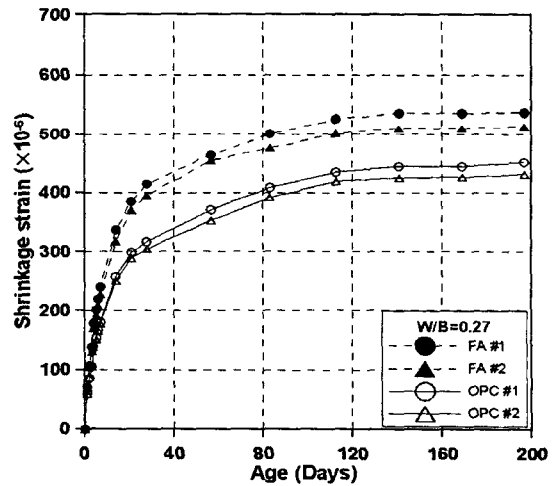
(a) W/B=0.50



(b) W/B=0.35



(c) W/B=0.31



(d) W/B=0.27

Fig. 1 Drying shrinkage of high-strength concrete with and without fly ash

4. 결론

본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 일반 콘크리트(OPC)와 플라이 애시 콘크리트(FA) 모두 고강도일수록 건조수축 변형률은 작게 나타났다. 물/결합재비(W/B)가 낮아질수록 콘크리트 내부에 증발가능한 자유수는 감소하고, 수축을 방해하는 미수화 시멘트 입자는 많아지기 때문에 건조수축 변형률이 감소하는 것으로 사료된다.

2. W/B가 동일할 때, OPC보다 FA 콘크리트의 건조수축 변형률은 다소 크게 나타났으며, 이러한 경향은 W/B가 낮을수록 더 뚜렷이 나타났다. 이는 플라이 애시를 시멘트의 중량비로 치환함에 따라 단위 결합재량이 많을수록 시멘트 풀의 부피는 OPC보다 FA가 더 커지게 되고, W/B가 감소함에 따라 OPC보다 FA에 더 많은 잉여수량이 남기 때문인 것으로 사료된다.
3. 고강도 콘크리트(HSC)에서는 동일한 W/B와 비슷한 압축강도를 가지는 콘크리트도 플라이 애시의 사용 여부에 따라 상당히 다른 건조수축 변형률을 나타내고 있으므로, 이를 고려한 건조수축 예측모델이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구비(1999-1-311-004-3)지원에 의하여 이루어 졌으며, 이에 관계자 여러분에게 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Hindy, E. E., Miao, B., Chaallal, O., and Aitcin, P. C., "Drying Shrinkage of Ready-Mixed High-Performance Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 91, No. 3, 1994, pp. 300~305.
2. Neville, A. M., *Properties of Concrete*, 4th edition, 1995.
3. Dilger, W. H. and Wang, C., "Creep and Shrinkage of High-Performance Concrete," *American Concrete Institute SP-194*, 2000, pp. 361~379.
4. Aitcin, P. C., Neville, A. M., and Acker, P., "Integrated View of Shrinkage Deformation," *Concrete International*, Vol. 19, No. 9, 1997, pp. 35~41.
5. 김진근, 한상훈, 박연동, 노재호, "초유동 콘크리트의 재료특성에 관한 실험적 연구," *콘크리트학회 논문집*, Vol. 8, No. 3, 1996, pp. 135~146.
6. 홍상희, 전병채, 송명신, 한천구, 반호용, "CSA계 팽창재 및 무기질 혼화재를 이용한 고성능 콘크리트의 건조수축 및 자기수축 저감에 관한 실험 연구," *콘크리트학회 가을학술발표회*, Vol. 10, No. 2, 1998, pp. 386~391.
7. Mehta, P. K. and Monterio, P. J. M., *Concrete*, 2nd edition, Prentice hall, 1993.
8. Ravindrarajah, R. S. and Tam, C. T., "Properties of Concrete Containing Low-Calcium Fly Ash Under Hot and Humid Climate," *Proceedings of Third International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete SP-114*, 1989, pp. 139~155.