

플라이애시를 함유한 고성능 콘크리트의 자기수축

이회근^{1)*} · 임준영¹⁾ · 이광명¹⁾ · 김병기²⁾

¹⁾성균관대학교 토목환경공학과 ²⁾경기화학공업(주) 연구개발센터 혼화재료팀
(2001년 10월 26일 원고접수, 2002년 2월 20일 심사완료)

Autogenous Shrinkage of High Performance Concrete Containing Fly Ash

Hoi-Keun Lee^{1)*}, Joon-Young Im¹⁾, Kwang-Myong Lee¹⁾, and Byung-Gi Kim²⁾

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

²⁾ Admixtures Team, R&D Center, Kyunggi Chemicals Ltd., Bucheon, 422-080, Korea

(Received October 26, 2001, Accepted February 20, 2002)

ABSTRACT

High performance concrete is prone to large autogenous shrinkage due to its low water to binder ratio (W/B). The autogenous shrinkage of concrete is caused by self-desiccation as a result of water consumption by the hydration of cement. In this study, the autogenous shrinkage of high performance concrete with and without fly ash was investigated. The properties of fresh concrete, slump loss, air content, and flowability as well as the mechanical properties, compressive strength and modulus of elasticity, were also measured. Test results was shown that the autogenous shrinkage of concrete increased as the W/B decreased. For the same W/B, the autogenous shrinkage of high strength concrete with fly ash was considerably reduced although the development of its compressive strength was delayed at early ages. Furthermore, the autogenous shrinkage and compressive strength of high strength concrete were more rapidly developed than those of normal strength concrete. It was concluded that fly ash could improve the quality of high strength concrete with respect to the workability and autogenous shrinkage.

Keywords : high performance concrete, high strength concrete, autogenous shrinkage, self-desiccation, fly ash

1. 서 론

역사적으로 볼 때, 콘크리트 기술이 현저하게 발전하여 현재까지 이르게 된 계기로는 1919년 Duff Abrams가 물-시멘트 비(w/c) 법칙을 발견한 것과 1938년 동결융해에 대한 저항성을 향상시키기 위해 적당한 연행 공기를 사용한 것이라 할 수 있다. 오늘날에는 단위 수량을 크게 감소시키면서 슬럼프를 증가시킬 수 있는 고성능 감수제(HRWR)를 비롯한 새로운 혼화제의 등장과 여러 종류의 혼화제들이 역학적 성질과 내구적 성능이 우수한 워커블한 콘크리트를 제조하는 데에 사용되면서 콘크리트 기술이 한 단계 발전하게 되었다^{1,2)}. 이러한 배경으로 등장한 콘크리트가 고성능 콘크리트(high performance concrete, HPC)로, 초기에는 단지 일반 콘크리트보다 강도가 높은 고강도 콘크리트(high strength concrete, HSC)를 의미하는 것으로 사용되었다.

하지만 최근 들어, 콘크리트가 강도 중심에서 강도 이외의 성질들, 예를 들면 유동성, 탄성계수와 밀도, 투수성,

그리고 내구적 저항성 등이 개선되는 방향으로 점차 바뀌고 있기 때문에 이러한 성질들을 폭넓게 뒷받침 할 수 있는 '고성능 콘크리트'의 사용이 바람직하다고 할 수 있다³⁾.

콘크리트의 자기수축은 약 60년 전 Davis⁴⁾에 의해 이미 보고되었으나, 물-결합재 비(W/B)가 0.5 이상인 보통 강도 콘크리트에서 재령 5년에서의 최대 자기수축 변형률이 100×10^{-6} 정도로 매우 작게 나타났기 때문에 무시되었다. 하지만, 고강도에 대한 관심이 높아지면서 50~60 MPa 이상의 설계기준 강도를 갖는 콘크리트가 사용되고 있으며, 심지어 120 MPa 강도의 콘크리트가 초고층 빌딩에 사용된 바 있다. 그러나 W/B가 낮고 결합재의 양이 많은 고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트에 비해 매우 큰 자기수축을 나타내며 이는 결국 균열 발생의 가능성을 높이는 이유가 된다.

국외에서는 일본과 유럽을 중심으로 자기수축에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으나, 국내에서는 김진근 등⁵⁾, 홍상희 등⁶⁾에 의해 제한적으로 이루어졌을 뿐 아직은 자기수축에 대한 자료와 실험 결과가 미흡한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 플라이애시가 고성능 콘크리트의 자기수축에 미치는 영향을 알아보기 위해, 다양한 W/B를 갖는 일반 콘크리트와 플라이애시 콘크리트의 자기수축량

* Corresponding author

Tel : 031-290-7541 Fax : 031-290-7549

E-mail : impact@nature.skku.ac.kr

을 실험을 통해 측정하여 비교, 분석하였다. 또한 슬럼프, 플로우, 공기량 등의 굳지 않은 콘크리트 성질과 압축강도, 탄성계수 등을 측정하였다.

2. 콘크리트의 자기수축

2.1 자기수축 메카니즘

자기수축은 외부로부터의 수분 공급이 없고 일정한 온도 하에서 시멘트의 수화반응에 의해 배합시 사용된 배합수가 소비되면서 콘크리트 내부가 건조화하는 즉, 자기건조(self-desiccation) 현상에 의해 발생하는 콘크리트 수축의 한 종류이다. 일반적으로 자기수축은 W/B가 낮고 결합재량이 많은 고강도 콘크리트에서 발생하기 쉬운데, 이는 보통강도 콘크리트에 비해 물의 양이 상대적으로 적어 재령 초기에서부터 콘크리트 내부가 건조한 상태로 되기 쉽기 때문이다.

건조수축의 메카니즘을 설명하는 데에 사용되는 모세관인장 이론(capillary tension theory)을 자기수축 메카니즘을 설명하는 데 적용할 수 있다. 보통강도 콘크리트 내에 존재하는 모세관의 직경은 W/B가 증가함에 따라 점점 더 커지게 된다. 이 경우, 만약 초기에 수중 양생이 이루어지지 않는다면 시멘트 입자는 배합시 사용된 배합수 만에 의해 수화해야 하며 직경이 큰 모세관에 있던 물은 화학적 수축에 의해 생긴 아주 미세한 공극으로 빠져나간다. 이러한 물은 직경이 큰 모세관 내에 생성된 메니스커스(meniscus)의 형성에 따른 인장력이 그다지 크지 않아 쉽게 빠져나가며, 결국 W/B가 높은 보통강도 콘크리트의 자기수축은 매우 작거나 무시할 정도가 된다.

반면에 W/B가 낮은 고성능 콘크리트의 경우, 낮은 W/B로 인해 이미 직경이 작은 모세관에 있던 물은 체적수축의 결과로 생긴 아주 미세한 공극으로 빠져나가며, 이러한 현상은 수화반응이 시작될 때 빠르게 발생하여 작은 직경의 모세관 내에 높은 인장 응력이 생기게 되고 이는 결국 자기수축의 발생을 촉진시킨다.

고성능 콘크리트의 공극은 매우 미세하고 이미 자기건조로 인해 물이 빠져나갔기 때문에 고성능 콘크리트 표면에서의 건조화가 느리게 진행되어 건조수축 변형량은 일반 콘크리트에서 보다 적어진다. 따라서, 보통강도 콘크리트의 수축은 건조수축이 지배적인 반면에, 고성능 콘크리트의 경우에는 자기수축이 큰 부분을 차지한다⁷⁾.

2.2 자기수축에 영향을 미치는 인자

2.2.1 시멘트 종류

자기수축은 건조수축과 달리 시멘트 조성 광물과 이들의 수화도에 의해 영향을 받으며, 다음과 같은 자기수축

추정식이 제안되었다⁸⁾.

$$\begin{aligned} \epsilon_c(t) = & - 0.12 \alpha_{C_3S} C_3S(t) \quad (\%C_3S) \\ & - 0.07 \alpha_{C_2S} C_2S(t) \quad (\%C_2S) \\ & + 2.256 \alpha_{C_3A} C_3A(t) \quad (\%C_3A) \\ & + 0.859 \alpha_{C_4AF} C_4AF(t) \quad (\%C_4AF) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $\epsilon_c(t)$ 는 재령 t에서의 자기수축 변형률, α 는 재령 t에서의 각 광물의 수화도를 나타낸다. 식 (1)에서 보듯이, 시멘트 조성광물 중에서 자기수축에 큰 영향을 미치는 것은 실리케이트인 C_2S 와 C_3S 보다는 C_3A 와 C_4AF 이며, 이는 곧 자기수축이 C_3A 와 C_4AF 의 수화에 의존함을 의미한다. 이밖에, 시멘트 입자의 크기가 작을수록 자기수축이 크게 발생한다.

2.2.2 골재 체적

자기수축은 시멘트 풀에서 주로 발생하기 때문에 콘크리트의 수축은 골재의 체적이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타낸다. 골재 체적이 자기수축에 미치는 영향은 아래의 Hobb의 합성 모델에 의해 추정할 수 있다^{9,10)}.

$$\frac{\epsilon_c}{\epsilon_p} = \frac{(1 - V_a)(K_a/K_p + 1)}{1 + K_a/K_p + V_a(K_a/K_p - 1)} \quad (2)$$

여기서, ϵ 은 자기수축, V는 체적, K는 체적 탄성계수로 $K = E/3(1-2\nu)$ 로 정의되며, E는 탄성계수, ν 는 포아송 비, 첨자 a, p, c는 각각 골재, 시멘트 풀, 콘크리트를 나타낸다.

2.2.3 혼화 재료

실리카 폼을 함유하고 W/B가 낮은 콘크리트의 자기수축은 실리카 폼을 사용하지 않은 경우에 비해 크게 증가하며, 사용량이 증가할수록 자기수축도 증가하는 경향이 있다. 그 이유는 고강도 콘크리트 제조시 실리카 폼을 사용하면 시멘트 풀 내에 보다 미세한 공극들이 생겨 자기수축이 증가하며, 실리카폼의 포졸란 반응도 자기수축 증가에 기여하기 때문이다^{11,12)}. 슬래그의 경우에는 분말도가 클수록 비표면적이 증가하여 포졸란 반응이 빨리 일어나며, 더 미세한 공극을 형성하여 모세관 압력이 커져서 자기수축이 많이 발생한다¹³⁻¹⁵⁾. 반면에 플라이애시를 사용하면 자기수축을 줄일 수 있으며, 팽창재를 함유한 콘크리트에서도 자기수축이 발생하지만 최종 수축량은 팽창재를 사용하지 않은 콘크리트에 비해 현저하게 감소하는 경향이 있다^{16,17)}.

2.2.4 물-결합재 비

자기수축은 무엇보다도 W/B에 따라 크게 좌우된다. 즉, W/B가 낮을수록 자기수축은 증가하며 W/B가 높은 콘크리트에서 자기수축이 보다 빠르게 발생하여 이른 재령에서 최대 값에 도달하게 된다. 이러한 관점에서, 일본 콘크리트학회(JCI)에서 제안한 자기수축 예측 모델에서는 자기수축을 W/B에 따른 최대 자기수축 변형률($\times 10^{-6}$), $\epsilon_{c0}(W/B)$ 와 시간에 따른 자기수축의 발현을 나타내는 계수 (t) 의 곱으로 표현하였다¹⁸⁾.

$$\epsilon_c(t) = \gamma \cdot \epsilon_{c0}(W/B) \cdot \beta(t) \quad (3)$$

$$\beta(t) = 1 - \exp[-a(t-t_0)^b] \quad (4)$$

여기서, γ 는 시멘트와 혼화제의 영향을 나타내는 계수(보통 포틀랜드 시멘트의 경우 $\gamma = 1.0$), a , b 는 상수, t_0 는 초결 시간(day), t 는 재령(day)이다. 이 모델은 W/B가 0.20~0.56이고 보통의 골재 체적을 갖으며 콘크리트 주위 온도가 20~60 °C인 경우에 유효하게 적용할 수 있다.

3. 실험 연구

3.1 개요

본 연구의 목적인 고성능 콘크리트의 자기수축 특성을 알아보기 위해 우선, 현장 적용성을 고려하여 보통강도와 고강도 콘크리트 배합비를 정하였다. 플라이애시의 사용유무에 따라 정해진 배합비대로 보통강도 콘크리트와 고강도 콘크리트를 각각 제조한 후 시간 경과에 따른 슬럼프와 플로우의 변화 및 공기량 등의 균지 않은 콘크리트의

성질들을 조사하였으며, 재령에 따라 압축강도와 탄성계수를 측정하였다. 그리고 W/B에 따른 콘크리트의 자기수축량을 실험을 통해 측정하여 이를 플라이애시가 함유된 콘크리트와 비교하였다.

3.2 재료 및 배합비

콘크리트를 제조하기 위한 결합재로는 비중이 3.15인 국내 D사의 보통 포틀랜드 시멘트와 비표면적이 3,375 cm²/g 이고 강열감량이 3.44 %인 국내 H사의 플라이애시가 사용되었다. 이 밖의 화학적 성분과 물리적 성질을 Table 1에 나타내었다. 잔 골재는 비중이 2.51이고 흡수율이 1.52%인 강모래를 사용하였다. 일반적으로 고강도 콘크리트 제조시 굵은 골재는 유동성을 고려하여 보통강도 콘크리트에서 보다 최대치수가 작은 골재를 사용하므로, 고강도 콘크리트에는 최대 치수가 20mm인 화강암 쇄석을, 보통강도 콘크리트에는 최대 치수가 25mm인 화강암 쇄석을 세척하여 각각 사용하였다.

본 실험에서 사용한 배합비는 Table 2에 나타난 바와 같이, 일반 콘크리트 배합(OPC, Mixes 1 through 4)과 시멘트 중량의 20%가 플라이애시로 치환된 배합(FA, Mixes 5 through 8)이다. 보통강도 콘크리트 배합(Mixes 1 and 5)의 목표 슬럼프는 18±1 cm 이었으며 배합 후 1시간 이후에서도 15 cm 이상의 슬럼프를 갖도록 배합비와 혼화제의 첨가량을 정하였다. 또한, 공기량을 조절하기 위해 시멘트 중량의 0.5 %인 AE감수제가 사용되었다. 고강도 콘크리트 배합(Mixes 2 through 4 and 6 through 8)에는 소요의 워커빌리티를 얻기 위해 시멘트 중량의 각각 1.5,

Table 1 Chemical compositions and physical properties of cement and fly ash

Material	Chemical composition (%)							Physical properties	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Loss on ignition	Specific gravity	Blaine (cm ² /g)
Cement	20.7	5.2	3.0	62.4	4.7	2.4	1.36	3.15	3,450
Fly ash	56.7	21.2	6.0	6.7	1.4	0.1	3.44	2.27	3,375

Table 2 Mix proportions of concrete per m³

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

2.0, 2.4 %인 나프탈렌 계열의 고성능 감수제(HRWR)가 사용되었다.

3.3 시편 제작 및 실험 방법

3.3.1 슬럼프, 플로우, 공기량

굳지 않은 콘크리트의 성질들을 알아보기 위해, 공기량(KS F 2421) 시험과 콘크리트 배합 직후부터 1시간까지 30분 간격으로 슬럼프 및 플로우(KS F 2402) 시험을 실시하여 시간에 따른 변화를 조사하였다.

3.3.2 압축강도, 탄성계수

고성능 콘크리트의 압축강도와 탄성계수를 측정하기 위해 $\phi 100 \times 200$ mm의 원주형 공시체를 제작하였다. W/B가 낮을수록 배합시 배합재료와 믹서의 수분 함유 상태가 실제 W/B에 큰 영향을 미치기 때문에 배합하기 전에 믹서의 표면에 약간의 수분을 공급하여 배합수가 믹서의 표면에 흡수되는 것을 방지하였다. 강제식 믹서에 의해 배합된 콘크리트를 플라스틱 몰드에 넣고 적당히 다짐한 후 온도가 23 ± 1 °C이고, 습도가 60 ± 3 %인 항온항습실에서 24시간 양생한 후 몰드를 제거하였다. 이후부터는 23 °C의 수조에서 실험 전까지 수중양생을 실시하였다. 콘크리트의 탄성계수는 원주형 공시체($\phi 100 \times 200$ mm)에 3개의 콘크리트 변형률 게이지를 붙인 후 일축 압축을 가해 얻은 응력-변형률 곡선으로부터 탄성계수(할선 탄성계수)를 결정하였다.

3.3.3 자기수축

자기수축 측정을 위한 장치로는 Fig. 1에서 보듯이, 양단 중심에 구멍이 뚫린 $100 \times 100 \times 400$ mm의 철재 빔 몰드를 사용하였다. 게이지 플러그(plug)를 몰드 축에 일치하도록 설치하고 몰드 중앙에 매입 게이지를 위치시켰다. 이 때 게이지 플러그의 콘크리트 시편 내부로의 매입 길이는 30 ± 5 mm 정도가 되게 하였다. 또한, 몰드의 바닥과 양단에 1 mm 두께의 테프론(teflon) 시트를 깔아서 시편의 이동이 몰드에 의해 구속을 받지 않게 하였다. 그 다음에 콘크리트를 채운 후 적당한 방법으로 다짐을 하고 표면에서의 수분 증발 및 흡수를 막기 위해 표면을 비닐로 덮었다. 콘크리트 배합 후 3 시간 후에 LVDT를 게이지 플러

그의 축에 일치하도록 설치하고, 시편을 온도가 20°C이고 상대습도가 60 %인 항온항습기에 넣어 LVDT를 데이터 수신 장치에 연결하였다.

자기수축은 이른 재령부터 발생하기 시작하기 때문에 자기수축을 보다 정확하게 측정하기 위해서는 초결전부터 측정이 이루어져야 한다¹⁹⁾. 따라서, 본 연구에서 최초의 측정은 배합 후 6 시간부터 수행하였으며, 재령 24 시간까지는 LVDT로 길이변화를 측정하여 이로부터 자기수축 변형률을 계산하였다. 재령 24 시간에서 몰드를 제거한 후 시편을 알루미늄 접착 테이프로 봉하여 시편으로부터 수분의 증발과 흡수를 방지하였다. 시험 중에 시편의 질량을 측정된 결과, 질량 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 몰드를 제거한 이후부터는 매입 게이지만으로 수축량을 측정하였다.

자기수축은 수화반응이 진행되면서 발생하는 수화열에 의한 영향을 받을 수 있다. 하지만, 본 연구에서 사용한 시편 크기와 몰드 재질, 그리고 측정 조건에서는 수화반응이 준등온(quasi-isothermal) 상태에서 진행하기 때문에 수화열에 의해 수화반응이 촉진되지는 않는다고 볼 수 있으므로²⁰⁾, 본 연구에서는 온도 영향을 배제하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 굳지 않은 콘크리트의 성질 및 압축강도

슬럼프, 플로우 및 공기량 등 굳지 않은 콘크리트의 성질을 나타낸 Table 3에서 보듯이, OPC의 경우 보통강도 콘크리트(Mix 1)의 초기 슬럼프는 19 cm, 공기량은 5.0 %이었으며, 배합 후 1시간이 경과한 후의 슬럼프는 15 cm로, 약 4 cm 정도의 슬럼프 손실이 발생하였다. 고강도 콘크리트 배합(Mixes 2 through 4)의 결과를 보면, 초기 슬럼프는 22 ± 1 cm, 플로우는 50 ± 5 cm이었으며, 공기량은 콘크리트 강도 수준대로 각각 4.8, 2.4, 2.0 %로 고강도 일수록 작은 경향을 나타내었다.

한편, 시멘트 중량의 20 %를 플라이애시로 대체한 FA의 경우 OPC보다 슬럼프와 플로우는 증가하였으나 공기량은 다소 감소하는 것으로 나타났다. 또한 슬럼프와 플로우는 손실이 OPC보다 적게 나타났으며, 특히 Mix 7과 Mix 8의 경우에는 손실이 거의 발생하지 않았다. 이는 플

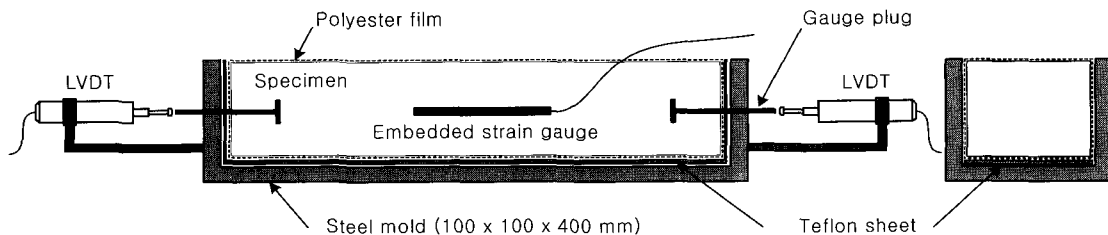


Fig. 1 Experimental setup for measuring length change of concrete

Table 3 Properties of fresh and hardened concrete

Mix no.	Slump (Flow) (cm)			Air content (%)	Compressive strength (MPa)			Modulus of elasticity (GPa)		
	Initial	30 min	60 min	Initial	1 day	7 days	28 days	1 day	7 days	28 days
1	19.0	18.0	15.0	5.0	9.6	25.3	31.1	14.0	24.9	26.9
2	21.0 (45×45)	18.5 (37×36)	16.0 (30×32)	4.8	21.8	43.0	47.1	22.1	31.2	32.9
3	22.5 (55×53)	22.0 (47×46)	21.0 (41×43)	2.4	25.0	49.4	55.5	24.9	33.2	34.3
4	23.0 (54×55)	22.5 (53×54)	22.0 (50×49)	2.0	30.3	58.3	66.2	25.2	35.7	36.2
5	19.0	17.0	15.5	4.7	6.1	20.7	29.3	12.3	19.5	26.7
6	23.5 (56×58)	22.0 (50×50)	20.5 (39×40)	3.3	14.0	37.4	45.9	16.6	28.4	32.4
7	24.5 (58×63)	24.0 (55×55)	23.5 (57×56)	2.1	14.2	40.7	52.6	18.1	29.0	33.6
8	24.0 (63×62)	24.0 (60×61)	23.5 (59×58)	1.6	13.4	45.6	62.4	16.4	32.4	34.5

라이에시의 사용에 따른 워커빌리티 향상과 고성능 감수제의 지연 효과 때문인 것으로 판단된다. 이러한 결과를 볼 때, 플라이에시를 사용하면 OPC 만을 사용한 일반 콘크리트에 비해 슬럼프 및 플로우가 증가하고 시간에 따른 손실도 감소하여 작업성이 우수한 고성능 콘크리트의 제조가 가능할 것으로 판단된다.

Table 3에 나타난 압축강도 결과를 보면, 재령 28일 강도가 OPC series의 경우에는 W/B가 낮아질수록 각각 31.1, 47.1, 55.5, 66.2 MPa로 증가하였으며, FA series의 경우에는 각각 29.3, 45.9, 52.6, 62.4 MPa로 같은 W/B를 갖는 OPC보다 약 2.6~6.1 % 정도 작게 나타났다. 또한, 재령 초기에는 보통강도 콘크리트에 비해 고강도 콘크리트의 압축강도가 더 빨리 발현됨을 알 수 있었다. 이러한 실험 결과로부터, 비록 재령 초기에서 플라이에시를 함유한 콘크리트의 강도 발현률은 낮으나, 재령 28일에서는 일반 콘크리트의 강도에 근사한 강도를 나타냄으로써 플라이에시를 사용하여 고강도 콘크리트의 제조가 가능한 것으로 사료된다.

4.2 자기수축

Table 2에 나타난 각 배합별로 두 개의 시편에 대한 재령 28일까지의 자기수축 실험 결과를 Fig. 2에 나타내었다. W/B가 0.50인 보통강도 콘크리트의 자기수축 실험 결과를 나타내는 Fig. 2(a)를 보면, OPC(Mix 1)의 자기수축은 재령이 지나면서 완만한 기울기로 증가하여 재령 28일에서 약 55×10^{-6} 의 자기수축량을 나타내었다. 시멘트량의 20 %를 플라이에시로 대체한 FA(Mix 5)의 자기수축은 약 30×10^{-6} 로 OPC보다 다소 작게 나타났다. 이러한 결과를 볼 때, W/B가 높은 콘크리트의 자기수축은 Davis⁴⁾

가 보고한 바와 같이 매우 작아 무시할 만한 정도인 것으로 사료된다.

반면에 W/B가 0.35 이하인 콘크리트의 결과를 나타내는 Fig. 2(b), 2(c), 2(d)를 보면, W/B가 낮아질수록 자기수축량이 크게 증가함을 알 수 있다. W/B가 0.35인 OPC의 경우(Mix 2)에는 재령 28일에서 약 186×10^{-6} 의 자기수축량을 나타내었으며, FA의 경우(Mix 6)에는 약 20 % 정도가 줄어든 148×10^{-6} 의 자기수축량을 나타내었다. W/B가 0.27로 매우 낮은 콘크리트의 경우(Mixes 4 and 8)에는, 재령 28일에서 OPC는 약 418×10^{-6} , FA는 약 337×10^{-6} 의 비교적 큰 자기수축량을 나타내었다. 또한 고강도 콘크리트의 경우, 재령 28일 자기수축량의 약 80 % 이상이 재령 3일 이내에 발생하였으며, W/B가 낮을수록 보다 이른 재령에서 자기수축량이 많이 발생하는 경향을 나타내었다. 이러한 결과를 볼 때, 고강도 콘크리트의 자기수축은 콘크리트 타설 후 수일 이내에 발생하며 이로 인해 균열 발생의 가능성이 높기 때문에 재령 초기의 콘크리트 품질 관리에 세심한 주의가 요구됨을 알 수 있다. 또한 고강도 콘크리트 제조시 플라이에시를 사용하면 비록 초기 강도 발현이 느리지만, OPC에 비해 자기수축이 감소함을 알 수 있다. 본 실험의 경우에는 재령 28일을 기준으로 약 19~27 % 정도의 자기수축 감소를 보였다.

이와 같이, 고강도 콘크리트 제조시 시멘트량의 일부를 플라이에시로 대체 사용하는 경우 자기수축이 감소하는 이유를 살펴 보면, 우선 초기 재령에서 플라이에시의 첨가로 수화 반응이 느려지고 수화물인 수산화칼슘(Ca(OH)_2)의 생성이 지연되어 포졸란 반응이 잘 일어나지 않기 때문이다. 또한 시멘트 입자의 모양은 불규칙한 반면에 플라이에시는 구형이기 때문에 동일한 W/B를 갖는 콘크리트내에 자유수(free water)의 양이 많아지게 된다. 자기수

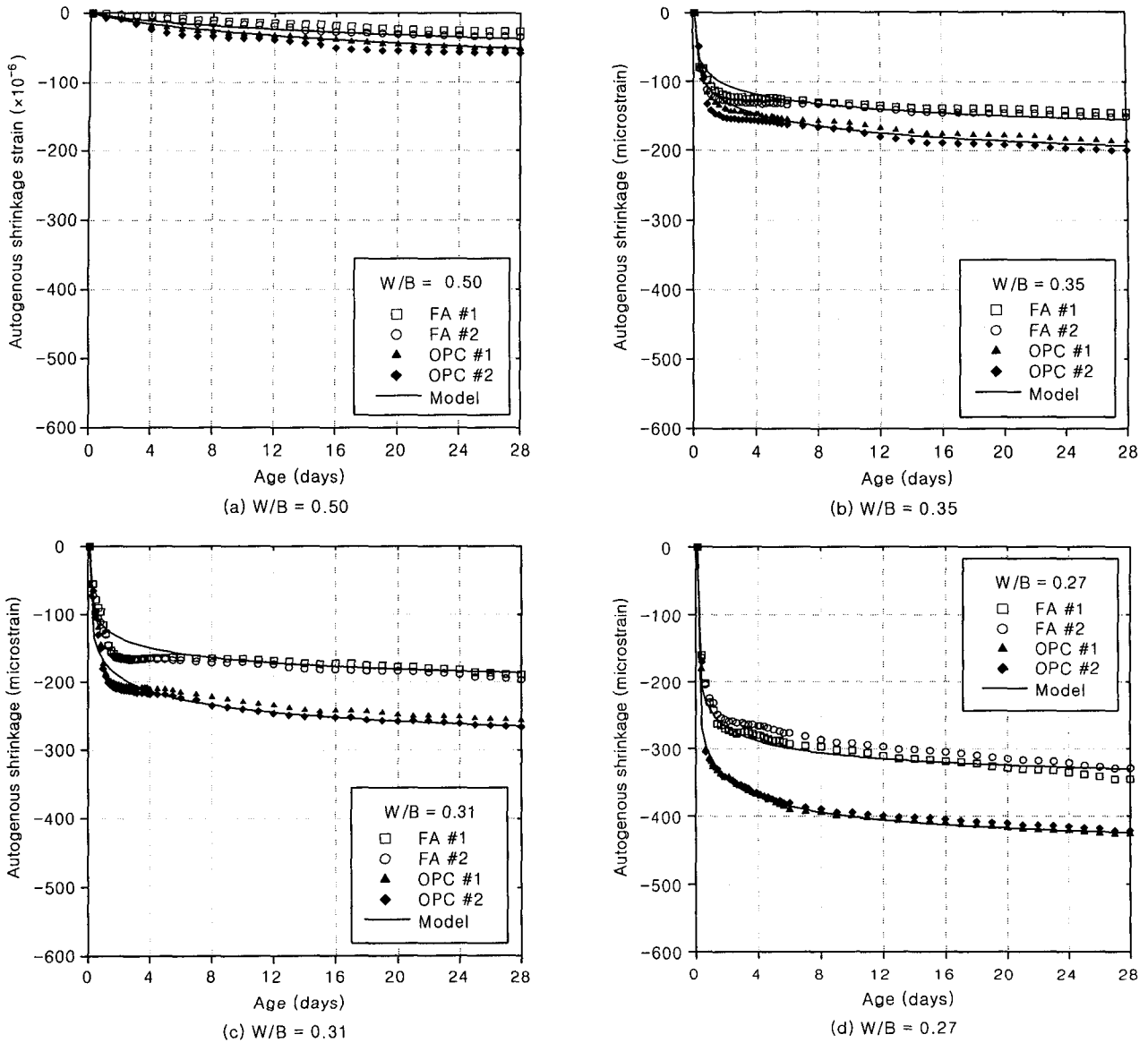


Fig. 2 Autogenous shrinkage of concrete with and without fly ash

축은 수화 과정에서 일어나는 수분 소모의 결과이기 때문에 자유수가 많을수록 수축을 줄일 수 있다. 따라서, 시멘트의 플라이애시 대체율이 증가할수록 자기수축은 감소하는 경향을 나타낸다²¹⁾. 하지만, 자기수축을 줄이기 위해 플라이애시를 다량으로 사용하면 강도의 측면에서 문제가 발생하기 때문에 강도와 수축 감소의 두 가지 측면을 고려하여 플라이애시의 치환률을 결정하여야 한다.

플라이애시를 사용하면 자기수축이 감소하는 또 다른 이유는 플라이애시의 여러 성분중에 SO_3 가 화학적 팽창을 일으켜 결국 자기수축이 보상되는 결과를 나타낸다. 즉 플라이애시의 대체율이 동일할 때 SO_3 의 양이 많을수록 자기수축은 감소하는 경향을 나타내는 것이다²²⁾. 하지만, 본 실험에서 사용된 플라이애시는 Table 1에서 보듯이 SO_3 성분이 적은 것으로 미루어 볼 때, SO_3 에 의한 팽창

효과보다는 플라이애시가 가지고 있는 재료 자체의 성질, 즉 구형의 입자 모양과 포졸란 반응의 특성 때문에 자기수축이 감소한 것으로 판단된다.

4.3 자기수축 모델의 적용

일본 콘크리트학회(JCI)에서 제안한 W/B에 따른 자기수축 예측 모델을 본 실험 결과에 적용해 보기 위해, 식 (3)에서의 최대 자기수축 변형률, ϵ_{∞} 와 시멘트와 혼화재의 영향을 나타내는 계수, γ 그리고 식 (4)의 상수 a와 b를 본 실험 결과로부터 결정하여 Table 4에 JCI에서 제안한 값과 비교하여 나타내었다. ϵ_{∞} 와 상수 a, b가 JCI에서 제안한 값과 다소 차이를 보였으며, 시멘트량의 20%를 플라이애시로 대체한 경우에서의 γ 는 0.70~0.80으로 나타났다

Table 4 Ultimate autogenous shrinkage, coefficient and constants in the Eq. (3) and Eq. (4)

Mix no.	Present study				Japan concrete institute (JCI) ¹⁰⁾			
	γ	a	b	ϵ_{c0}	γ	a	b	ϵ_{c0}
1	1.0	0.07	0.75	90	1.0	0.03	0.80	84
2	1.0	0.68	0.30	230	1.0	0.35	0.60	247
3	1.0	0.85	0.28	300	1.0	0.55	0.52	329
4	1.0	1.25	0.25	450	1.0	0.97	0.45	439
5	0.72	0.07	0.75	90	1.0	0.03	0.80	84
6	0.80	0.68	0.30	230	1.0	0.35	0.60	247
7	0.70	0.85	0.28	300	1.0	0.55	0.52	329
8	0.78	1.25	0.25	450	1.0	0.97	0.45	439

다. 앞으로 플라이애시의 대체율에 따른 γ 값을 비롯한 다양한 혼화재료에 대한 많은 실험 결과로부터 상수들이 정해진다면 보다 정확한 자기수축 예측이 가능할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 시멘트 중량의 20%를 플라이애시로 대체하여 고성능 콘크리트를 제조한 결과, 배합 직후부터 1시간까지 워커블한 콘크리트를 얻을 수 있었으며, 재령 28일에서 일반 콘크리트와 비슷한 정도의 압축강도를 얻었다.

2) 물-결합재 비(W/B)가 0.50인 보통강도 콘크리트의 자기수축은 적게 발생한 반면에, W/B가 0.35 이하인 고강도 콘크리트의 자기수축은 W/B가 낮을수록 크게 증가하였으며, 대부분의 자기수축이 콘크리트 타설 후 수일 이내에 발생하여 초기균열을 일으키는 요인이 될 수 있는 것으로 사료된다.

3) 일본 콘크리트학회에서 제안한 자기수축 추정 모델식에서 시멘트와 혼화재의 영향을 나타내는 계수인 ν 는 플라이애시가 20% 사용된 경우에는 W/B에 따라 0.70~0.80으로 플라이애시를 사용하지 않은 경우와 비교하여 20~30% 정도 작은 값을 나타냈다. 이는 플라이애시를 사용함으로써 자기수축이 그만큼 줄어들음을 의미한다.

4) 고성능 콘크리트 제조시 플라이애시를 사용하면 플라이애시의 입자 특성과 초기 수화반응의 지연 등으로 자기수축을 상당히 감소시킬 수 있다. 그러나, W/B가 매우 낮은 고강도 플라이애시 콘크리트의 자기수축은 여전히 크기 때문에 자기수축을 보다 효과적으로 줄이기 위해서는 플라이애시와 다른 혼화재료 즉, 팽창재나 수축 저감제 등을 병행하여 사용하는 방안을 고려할 필요가 있다. 추후 플라이애시의 대체율이 자기수축에 미치는 영향에 대한 정량적인 연구를 통하여 초기 강도 저하를 고려한 최적의 대체율이 정해진다면 고성능 콘크리트 제조시 플라이애시의 사용량이 보다 증가할 것으로 기대된다.

감사의 글

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

참고 문헌

- Carino, N. J. and Clifton, J. R., "High Performance Concrete: Research Needs to Enhance its Use," *Concrete International*, Vol.13, No.9, 1991, pp.70~76.
- Phelan, W. S., "Admixtures and HPC: A Happy Marriage," *Concrete International*, Vol.20, No.4, 1998, pp.27~30.
- Aitcin, P. C. and Neville, A., "High Performance Concrete Demystified," *Concrete International*, Vol. 15, No. 1, 1993, pp.21~26.
- Davis, H. E., "Autogenous Volume Change in Concrete," *Proceedings of ASTM*, No.40, 1940, pp.1103~1110.
- 김진근, 이철성, "자체건조를 고려한 초기재령 콘크리트의 부등건조수축," 콘크리트학회지, 제10권, 5호, 1998, pp.197~204.
- 홍상희, 전병채, 송명신, 한천구, 반호용, "CSA계 팽창제 및 무기질 혼화재를 이용한 고성능 콘크리트의 건조수축 및 자기수축 저감에 관한 실험 연구," 콘크리트학회 가을학술발표회, Vol.10. No.2, 1998, pp.386~391.
- Aitcin, P. C., "High Performance Concrete," E&FN Spon, London and New York. 1998.
- Tazawa, E., Miyazawa, S., and Sato, T., "Influence of Cement Composition on Autogenous Shrinkage," *JCA Proceedings of CEMENT & CONCRETE*, No. 47, 1993, pp.528~533.
- Hobbs, D. W., "Influence of Aggregate Restraint on the Shrinkage of Concrete," *Journal of ACI*, Vol. 71, No. 9, 1974, pp.445~450.
- Tazawa, E. and Miyazawa, S., "Experimental

- Study on Mechanism of Autogenous Shrinkage of Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 8, 1995, pp.1633~1638.
11. Jensen, O. M. and Hansen, P. F., "Autogenous Deformation and Change of the Relative Humidity in Silica Fume Modified Cement Paste," *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 6, 1996, pp.539~543.
 12. Brooks, J. J., Cabrera, J. G. and Megat Johari, M. A., "Factors Affecting the Autogenous Shrinkage of Silica Fume High Strength Concrete," *Autogenous Shrinkage of Concrete*, Ed. E. Tazawa, E&FN Spon, 1999, pp.195~202.
 13. 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.
 14. Tazawa, E. and Miyazawa, S., "Influence of Cement and Admixture on Autogenous Shrinkage of Cement Paste," *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 2, 1995, pp.281~287.
 15. Tazawa, E. and Miyazawa, S., "Influence of Constituents and Composition on Autogenous Shrinkage of Cementitious Materials," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 49, No. 178, 1997, pp.15~22.
 16. Tazawa, E. and Miyazawa, S., "Effect of Cementitious Materials and Mix Proportion on the Autogenous Shrinkage of Cement Based Materials," *Journal of Materials, Concrete Structures and Pavement*, Vol. 25, No. 502, 1994, pp.43~52.
 17. Tazawa, E., "Autogenous Shrinkage of Cement Paste Caused by Hydration," *CEMENT & CONCRETE*, No. 565, 1994, pp.35~44.
 18. Tazawa, E. and Miyazawa, S., "Effect of Constituents and Curing Condition on Autogenous Shrinkage of Concrete," *Autogenous Shrinkage of Concrete*, Ed. E. Tazawa, E&FN Spon, 1999, pp.269~280.
 19. Aitcin, P. C., "Demystifying Autogenous Shrinkage," *Concrete International*, Vol. 21, No. 11, 1999.
 20. Aitcin, P. C., "Autogenous shrinkage Measurement," *Autogenous Shrinkage of Concrete*, Ed. E. Tazawa, E&FN Spon, 1999, pp.257~268.
 21. Chan, Y. W., Liu, C. Y. and Lu, Y. S., "Effects of Slag and Fly ash on the Autogenous Shrinkage of High Performance Concrete," *Autogenous Shrinkage of Concrete*, Ed. E. Tazawa, E&FN Spon, 1999, pp.221~228.
 22. Tangtermsirikul S., "Effect of Chemical Composition and Particle Size of Fly Ash on Autogenous Shrinkage of Paste," *Autogenous Shrinkage of Concrete*, Ed. E. Tazawa, E&FN Spon, 1999, pp.175~185.

요 약

물-결합재 비(W/B)가 낮고 결합재량이 많은 고성능 콘크리트에는 자기수축이 많이 발생한다. 자기수축은 외부로부터 콘크리트로의 수분 이동이 없는 상태에서 시멘트의 수화반응에 의한 물의 소비 결과로 나타나는 자기건조에 의해 발생한다. 본 연구에서는 플라이애시의 사용 유무에 따른 고성능 콘크리트의 자기수축 특성을 실험을 통해 조사하였다. 또한 시간에 따른 슬럼프 및 플로우 변화, 공기량 등의 굳지 않은 콘크리트의 성질과 압축강도, 탄성계수 등의 역학적 성질에 대한 실험을 수행하였다. 실험 결과, W/B가 낮을수록 자기수축이 증가하였으며, W/B가 동일한 경우 플라이애시를 사용하면 재령 초기에 콘크리트의 압축강도가 다소 느리게 발현되지만, 자기수축은 상당히 감소하였다. 또한, W/B가 낮은 고강도 콘크리트일수록 이른 재령에서 보통강도 콘크리트에 비하여 자기수축과 압축강도의 발현률이 크게 나타났다. 이상의 실험 결과로부터, 플라이애시를 사용하여 고성능 콘크리트의 제조가 가능하며 자기수축을 줄일 수 있다는 결론을 얻었다.

핵심용어 : 고성능 콘크리트, 고강도 콘크리트, 자기수축, 자기건조, 플라이애시