



CSA계 팽창재 및 수축 저감제의 혼입에 따른 UHPCC의 초기 수축 거동 평가

류두열¹⁾ · 박정준²⁾ · 김성욱²⁾ · 윤영수^{1)*}

¹⁾고려대학교 건축사회환경공학부 ²⁾한국건설기술연구원 구조교량연구실

Evaluating Early Age Shrinkage Behavior of Ultra High Performance Cementitious Composites (UHPCC) with CSA Expansive Admixture and Shrinkage Reducing Agent

Doo-Yeol Yoo,¹⁾ Jung-Jun Park,²⁾ Sung-Wook Kim,²⁾ and Young-Soo Yoon^{1)*}

¹⁾School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

²⁾Structural Engineering & Bridges Research Division Infrastructure Research Dept., Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-807, Korea

ABSTRACT In this study, experimental tests of chemical and autogenous shrinkage were performed to evaluate the early age shrinkage behaviors of ultra high performance cementitious composites (UHPCC) with various replacement ratios of silica fume (SF), shrinkage reducing agent (SRA), expansive admixture (EA), and superplasticizer (SP). Starting time of self-desiccation, was analyzed by comparing the setting times and the deviated point of chemical and autogenous shrinkage strains. The test results indicated that both SF and SRA augment the early age chemical shrinkage, whereas SP delays the hydration reaction between cement particles and water, and reduces chemical shrinkage. About 49% of autogenous shrinkage was depleted by synergistic effect of SRA and EA. The hardening of UHPCC was catalyzed by containing EA. Self-desiccation of UHPCC occurred prior to the initial setting due to the high volume fraction of fibers and low water-binder ratio (W/B).

Keywords : ultra high performance cementitious composites, chemical shrinkage, self-desiccation, autogenous shrinkage, time-zero

1. 서 론

초고강도와 고인성 개념을 복합적으로 나타내는 초고성능 시멘트 복합체(ultra high performance cementitious composites, UHPCC)가 최근 국내에서도 개발되었으며, 이의 활용을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.¹⁾ 특히 UHPCC의 뛰어난 강도 발현 성능은 기존의 콘크리트 구조물이 가지고 있었던 중량 대비 낮은 강도, 내구성 문제 등을 해결할 수 있으며 사장교 및 현수교 등의 장경간 교량에 그 활용이 기대된다.

그러나 UHPCC의 경우 낮은 물-결합재비(W/B)와 실리카흄(SF)의 사용으로 인해 타설 초기에 상당히 큰 자기수축이 발생한다. 수화 반응과 공극수의 건조 현상에 의한 초기 부피 감소는 보강 철근 및 거푸집 등에 구속되어 구조물에 균열을 유발하고 염화물 및 황산염, 이산화

탄소 등의 침투로 내구성을 저하시킨다. 따라서 UHPCC를 실제 구조물에 적용하기 위해서는 수축거동에 대한 정확한 이해와 평가, 저감 대책에 관한 연구가 수행되어야 한다.

일본콘크리트협회(JCI)²⁾에 의하면 자기수축은 초결 이후의 수축량으로 정의하고 있다. 하지만 낮은 W/B와 다수의 섬유를 혼입한 UHPCC의 경우 자기수축 시작 시기와 초결 시점이 상이할 수 있으므로 측정 시기에 대한 보다 명확한 기준이 필요하다.

콘크리트의 수축을 저감시키는 방법은 다양하게 검토되고 있으며, 그 중에서도 수축 저감제(SRA)와 CSA계 팽창재(EA)를 조합하여 사용하는 연구가 활발히 진행되고 있다.^{3,4)} 비이온 계면활성제인 SRA는 시멘트 페이스트의 내부 공극수의 표면장력을 감소시켜 수축을 저감시키며 공극수의 점도를 증가시켜 유해물이 콘크리트 내부로 침투하는 것을 억제하고, 외부로 증발되는 수분의 양을 감소시켜 초기 건조수축 및 소성수축을 저감시킨다.⁵⁾ 또한 CSA계 EA는 C₄A₃S₃ 클링커를 포함하고 있어 초기에 다량의 에트링자이트(ettringite)를 생성하여 수화

*Corresponding author E-mail: ysyoon@korea.ac.kr
 Received January 10, 2011, Revised April 18, 2011,
 Accepted April 19, 2011

©2011 by Korea Concrete Institute

반응을 촉진시키고 부피를 팽창시키는 경향을 나타낸다.⁶⁾

그러므로 UHPCC의 초기 수축 거동 및 SRA와 EA의 재료적 특성을 이해하고, 내·외부 구속 조건을 고려하여 적절하게 사용한다면 수축 균열 억제에 효과적일 것으로 판단된다. 이에 이 연구에서는 UHPCC의 초기 수축 거동을 평가하기 위하여 혼화제와 혼화제의 치환율에 따른 화학수축 실험과 수화도를 평가하였으며, SRA 및 EA의 혼입 여부에 따른 UHPCC의 자기수축 실험을 수행하였다. 또한 UHPCC의 응결시간을 측정하여 시멘트 페이스트 내부에 공극이 형성되고, 자기건조(self-desiccation) 현상이 나타나는 시점과 비교, 분석하였다.

2. 초기 수화 반응의 이론적 고찰

콘크리트의 주요 구성 성분 중 알루미네이트(aluminate, C_3A)는 급격한 수화 반응을 나타내며 에트린자이트를 생성하여 배합 후 초기 콘크리트의 강도 및 수축 거동에 주로 영향을 미친다. 벨라이트(belite, C_2S)와 알라이트(alite, C_3S)는 점진적인 수화 반응을 나타내며 C-S-H gel을 생성하여 콘크리트의 강도를 증가시키고, 페라이트(ferrite, C_4AF)는 하이드로가넷(hydrogarnet)을 생성한다.⁷⁾

일반적으로 시멘트와 물이 반응하여 생성된 수화물이 반응물의 용적보다 작아지는 현상을 화학수축이라고 한다. 또한 자기수축은 초결 이후 시멘트의 수화 반응에 의해 나타나는 부피 감소이며 물질의 손실 또는 침투, 온도 변화, 외부 하중 및 구속 등에 의해 발생하는 수축들과 구별되는 수축을 의미한다.⁸⁾ 여기서, 자기수축 시작 시기를 초결로 정의한 이유는 균열 발생에 영향을 미치는 수축량을 평가하기 위하여 수축 응력이 발휘되는 시기를 초결로 가정하였기 때문이다. 따라서, Fig. 1에서와 같이 시멘트가 응결하여 골격(skeleton)이 형성되고 화학수축이 구속되어 시멘트 페이스트에 공극이 형성되며 자기건조 현상이 나타나는 시점을 자기수축 시작 시기로 볼 수 있다.^{9,10)}

즉, 배합 후 초기 콘크리트는 액체 상태(liquid-like state)

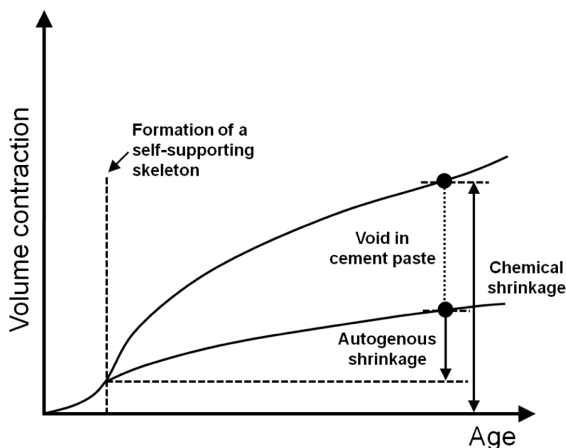


Fig. 1 Schematic diagram of the relationship between chemical and autogenous shrinkage²⁴⁾

이며 시멘트가 수화하여 발생하는 결합재의 체적 감소는 부재의 전체 부피 감소량과 같다. 하지만 시멘트가 응결하여 골격을 형성하기 시작하면 수화 반응으로 인한 화학수축은 자기구속 되고 시멘트 페이스트에 공극이 형성된다(Fig. 1). 자기수축의 주요 메커니즘인 자기건조 현상은 시멘트가 경화하여 내부 공극이 형성된 이후에 나타나며, 시멘트의 수화 반응에 의한 결합재의 부피 감소가 자기 구속 되는 시점 이후의 거동임을 인지해야 한다.

기존 연구^{10,12)}에 의하면 시멘트 페이스트의 화학수축과 자기수축의 차이가 나타나는 시점은 시멘트와 물이 접한 후 대략 5시간에서 8시간 이후이며 초결 또는 종결 시점과 유사한 것으로 알려져 있다. 하지만 Holt 및 Hammer 등^{9,13)}은 W/B가 크거나 작을 경우 자기수축이 나타나는 시점이 응결보다 빠르거나 늦어질 수 있으며 응결 시간을 기준으로 자기수축을 정의하는 것이 오류를 줄 수 있다고 지적하였다. 또한 Sant¹⁴⁾는 자기수축 시작점(time-zero)을 예측하는 방법이 아직 명확히 정의되지 않았음을 지적하고, 'time-zero'를 예측하기 위한 다양한 수축 실험과 응결 실험을 수행하였다.

따라서 이 연구에서는 UHPCC의 화학수축 및 자기수축 실험을 수행하고 응결 시간을 측정하여 자기건조 현상이 나타나는 시점과 초결을 비교하였으며, 적합성 여부를 평가하였다.

3. 실험 연구

3.1 개요

UHPCC의 초기 수축 거동을 평가하기 위하여 혼화제, 혼화제를 변수로 한 화학수축 및 자기수축 실험을 수행하였으며, 압축강도와 응결을 측정하여 초기 재령에서의 콘크리트 경화 거동을 평가하였다.

3.2 재료 및 배합비

이 실험에서는 1종 보통 포틀랜드 시멘트와 입경 0.5 mm 이하의 잔골재, 비표면적이 200,000 cm^2/g 인 중국산 SF, 96%의 SiO_2 를 포함하고 입경 2 μm 의 충전재, 고탄성 강섬유(밀도 7.8 g/cm^3 , 인장강도 2,500 MPa, 길이 13 mm, 직경 0.2 mm)를 사용하였다. EA는 일본산 CSA계를 사용하였으며, 독일산 글루콜계의 SRA를 사용하였다. 배합에 사용된 재료들의 화학적 구성 성분은 Table 1과 같다. 시멘트의 주요 구성 성분(C_2S , C_3S , C_3A , C_4AF)의 비율은 ASTM C 150 규정에서 제안하고 있는 보그의 계산법(Bogue's calculation)을 통해 예측하였다.

Table 2는 이 연구에서 수행한 수축 실험의 변수별 배합표이다. 자기수축의 경우 시멘트의 중량을 기준으로 1%의 SRA와 7.5%의 EA의 혼입 여부를 실험 변수로 하였으며, 화학수축은 SF 및 고성능 감수제(SP), EA, SRA의 치환율에 따른 수축 변화량을 측정하여 비교하였다. 물-

Table 1 Chemical compositions of materials

Composition % (mass)	Cement (CEM 1*)	Silica fume (SF)	Expansive admixture (EA)
CaO	61.33	0.38	13.55
Al ₂ O ₃	6.40	0.25	18.66
SiO ₂	21.01	96.00	3.80
Fe ₂ O ₃	3.12	0.12	-
MgO	3.02	0.10	-
SO ₃	2.30	-	51.35
K ₂ O	-	-	0.56
F-CaO	-	-	16.02
Specific surface (cm ² /g)	3,413	200,000	3,117
Density (g/cm ³)	3.15	2.10	2.98
Bogue's cement composition			
Cement phases		% (mass)	
C ₂ S		33.09	
C ₃ S		35.98	
C ₃ A		11.68	
C ₄ AF		9.49	

*CEM 1 : type 1 portland cement

시멘트비(W/C)는 25%로 동일하고, SF의 혼입 여부에 따라서 W/B(또는 W/(C+SF))는 20~25%로 다양하게 적용되었다.

3.3 시편 제작 및 실험 방법

3.3.1 플로우 및 압축강도, 응결 시간

굳지 않은 UHPCC의 성질을 알아보기 위해 KS L 5111 규정에 따라 플로우 실험을 실시하였으며, $\phi 100 \times 200$ mm인 원주형 공시체를 제작하여 온도 $23 \pm 1^\circ\text{C}$, 습도 $60 \pm 5\%$ 인 항온 항습 조건에 노출시켜 기건 양생을 수행한 이후에 압축강도(KS F 2405)를 측정하였다. 또한

Table 2 Mix proportions (ratio in weight)

Nomenclature	W/B	Cement	SF	Filler	Sand	Superplasticizer (SP)	Steel fiber	SRA*	EA
Mix. A	0.2	1	0.25	0.30	1.10	0.012	$V_f = 2\%$	-	-
Mix. B								0.01	0.075

Mass proportions of the cement-based systems

Nomenclature	Mix parameters						
	Cement type	W/C**	SF/C	SRA/C	EA/C	SP/C	W/(C+SF)
CEM 1	CEM 1	0.25	-	-	-	-	0.25
CEM 1; SF			0.25	-	-	-	0.20
CEM 1; SF+SP			0.25	-	-	0.012	0.20
CEM 1; EA			-	-	0.075	-	0.25
CEM 1; SRA			-	0.01	-	-	0.25
CEM 1; SRA+EA			-	0.01	0.075	-	0.25
CEM 1; SRA+EA+SP			-	0.01	0.075	0.012	0.25
CEM 1; SF+SRA+EA+SP			0.25	0.01	0.075	0.012	0.20

*SRA-shrinkage reducing admixture, **W/C-water to cement ratio

UHPCC 배합에서 섬유를 제외하여 모르타르를 제조한 후 KS F 2436의 규정에 따라 초결 및 종결을 측정하였다.

3.3.2 화학수축

화학수축 실험은 ASTM C 1608,¹⁵⁾ Procedure A와 동일하게 수행하였다(Fig. 2). 실험에는 10 mL 용량의 삼각플라스크를 사용하였으며 시멘트 페이스트를 약 10 mm 두께로 동일하게 넣어주었다. 극초 순수 증류수(demineralized and distilled water)를 사용하여 수화 반응에 영향을 미치는 불순물을 제거하였으며, 최소 눈금이 0.01 mL인 피펫을 사용하여 부피 감소량을 측정하였다. 외부로의 수분 증발을 차단하기 위하여 파라핀 오일을 사용하였고, 압축강도 시험체와 동일한 항온 항습실에서 23°C의 물을 채운 용기에 삼각 플라스크를 넣고 실험을 진행하였다. 시멘트 페이스트가 물과 접하는 시점에서 1시간 이후부터 측정을 하였으며, 초기 8시간 동안은 1시간 간격으로 측정하였고 그 후에는 8시간 이내의 간격으로 측정하였다.

3.3.3 자기수축

Fig. 3은 자기수축 실험 방법을 나타낸다. 100 × 100 × 400 mm의 각주형 몰드를 사용하였으며 JCI에서 제안하는 방법¹⁷⁾과 유사하게 실험하였다. 콘크리트와 몰드의 마

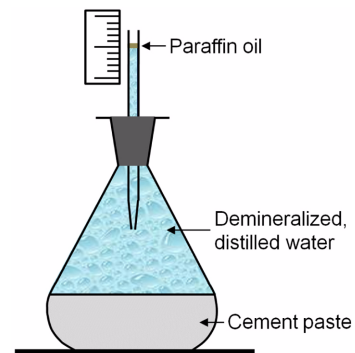


Fig. 2 Chemical shrinkage measurement method, Dilatometry¹⁶⁾

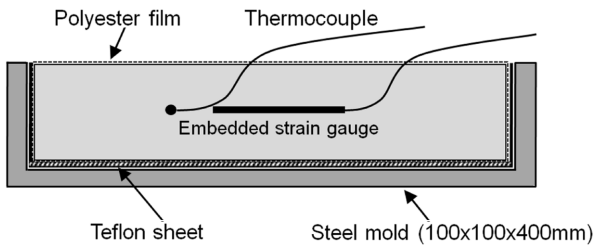


Fig. 3 Schematic description of the autogenous shrinkage test

찰에 의한 수축 구속력을 최소화하기 위하여 테프론 시트를 적용하였고 콘크리트 타설 후 24시간 이후에 몰드를 탈형하였다. 몰드를 탈형한 후에는 수분 증발에 의한 부피 감소를 방지하기 위하여 알루미늄 테이프를 사용하여 노출면을 모두 밀봉하였고, 상기의 실험들과 동일한 항온 항습 조건에서 실험을 진행하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 굳지 않은 콘크리트의 특성 및 압축강도

UHPCC의 플로우 및 압축강도 실험 결과는 Table 4와 같다. SRA와 EA를 혼입한 Mix. B의 경우 Mix. A와 유사한 플로우 값을 나타내었다. Mix. B의 초기 압축강도

Table 4 Properties of fresh and hardened concrete

Nomenclature	Flow (mm)	f_c (MPa)			
		1 day	3 days	7 days	28 days
Mix. A	235	78.8	105.6	126.2	152.4
Mix. B	240	70.7	98.7	127.3	152.2

는 Mix. A에 비해 약간 감소하였으며, 7일 이후에는 거의 동일한 압축강도를 나타내었다. 따라서 7.5%의 EA와 1%의 SRA를 조합하여 혼입한 경우 UHPCC의 압축강도 및 플로우에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다.

4.2 시멘트 페이스트와 혼화 재료의 화학수축 및 수화도

Fig. 4(a)는 SF 및 SP의 혼입에 따른 화학수축 그래프이다. 보는 바와 같이 SF를 포함한 시멘트는 초기 화학수축을 증가시키는 경향을 보였다. 그 이유는 SF의 경우 수화 반응물인 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 포졸란 반응하여 시멘트 페이스트의 최대 화학수축량($64 \text{ mm}^3/\text{g}$) 보다 큰 $220 \text{ mm}^3/\text{g}$ 의 화학수축을 나타내기 때문으로 판단된다.^{18,19)} SP는 화학수축을 지연시키는 동시에 수축량을 감소시키는 것으로 나타났다.²⁰⁾ 이는 SP가 시멘트 겔의 입자 표면에 흡착되어 배합수와 시멘트의 수화 반응을 지연시켰기 때문이다.

Fig. 4(b)는 EA와 SRA의 혼입에 따른 화학수축 결과

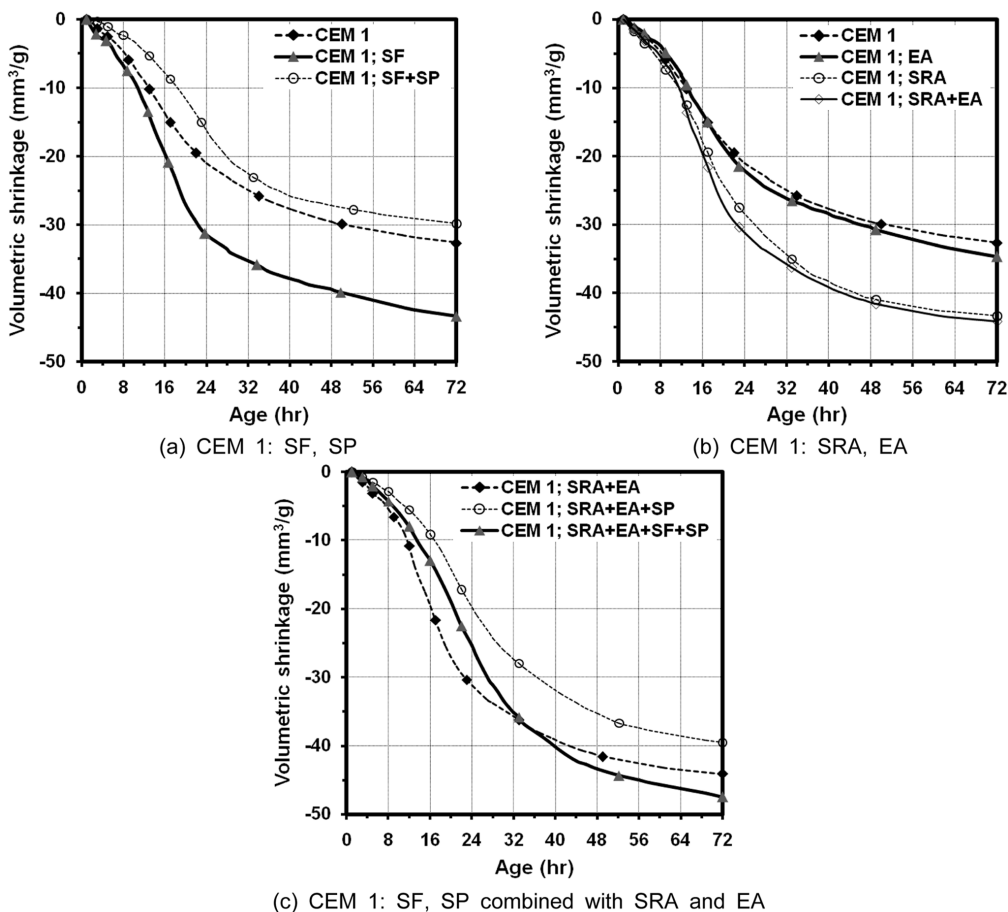


Fig. 4 Chemical shrinkage versus hydration age

이다. 기존의 연구 결과¹³⁾와 유사하게 SRA의 경우 초기 화학수축을 증가시키는 것으로 나타났으며, 그 이유는 SRA의 혼입에 따라 시멘트 페이스트의 분산도가 증가하여 수화 반응이 촉진되었고, 경화한 시멘트의 투과성이 증가하여 내부 공극이 보다 밀실하게 물로 채워졌기 때문으로 판단된다.^{12,13)} 반면에 EA는 화학수축에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 4(c)는 SRA 및 EA를 포함한 경우, SF와 SP가 화학수축에 미치는 영향을 나타내며 앞선 결과와 동일하게 SF는 화학수축을 증가시키고 SP는 화학수축을 지연, 감소시키는 것으로 나타났다.

시멘트의 수화도는 수화된 시멘트 대 반응전의 총 시멘트량의 비율이며 화학수축과 선형 관계를 나타낸다.^{16,21)} 따라서 이 연구에서는 실험에 사용한 시멘트의 수화도를 예측하여 화학수축과 비교하고 선형 거동을 보이는지 평가하였다.

Avrami의 제안식에 의하면 시멘트를 구성하고 있는 주요 성분의 수화도는 다음과 같이 예측할 수 있다.^{21,22)}

$$\alpha_i(t) = 1 - e^{-\left(a_i(t-b_i)^{c_i}\right)} \quad (1)$$

$$\alpha(t) = \alpha_{C_3S}(t) \times [\%ofC_3S] + \alpha_{C_2S}(t) \times [\%ofC_2S] + \alpha_{C_3A}(t) \times [\%ofC_3A] + \alpha_{C_4AF}(t) \times [\%ofC_4AF] \quad (2)$$

여기서, $a(t)$ 는 재령 t 일에서의 시멘트의 수화도이며, a_i , b_i , c_i 는 시멘트 구성 성분(C_2S , C_3S , C_3A , C_4AF)의 수화도 상수, [% of C_2S], [% of C_3S], [% of C_3A], [% of C_4AF]는 시멘트 구성 성분의 비율이다.

Taylor²²⁾와 Gutteridge²³⁾의 연구자들은 Avrami 식을 바탕으로 수화도 상수를 제안하였으며, Table 5와 같다.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이 Avrami 식을 사용하여 예측한 시멘트의 수화도와 실험을 통해 얻은 화학수축은 준 선형(quasi-linear) 거동을 나타내었으며, 선형 회귀 분석을 수행한 결과 Gutteridge 등이 제안한 수화도 상수를 적용할 경우 선형 관계에 조금 더 근접한 것으로 나타났다.

Table 5 Constants used in Avrami equation and analysis results

Researcher	Compound, i	a_i	b_i	c_i
Taylor ²²⁾	C_2S	0.46	0	0.12
	C_3S	0.25	0.90	0.70
	C_3A	0.28	0.90	0.77
	C_4AF	0.26	0.90	0.55
Gutteridge et al. ²³⁾	-	0.56	0.375	0.267

Relationship between chemical shrinkage and degree of hydration

Nomenclature	Linear regression equation	R^2
(A)	$y = -0.615 \cdot x - 12.73$, for $0.9 < t \leq 3$	0.984
(B)	$y = -0.877 \cdot x + 12.18$, for $0.375 < t \leq 3$	0.985

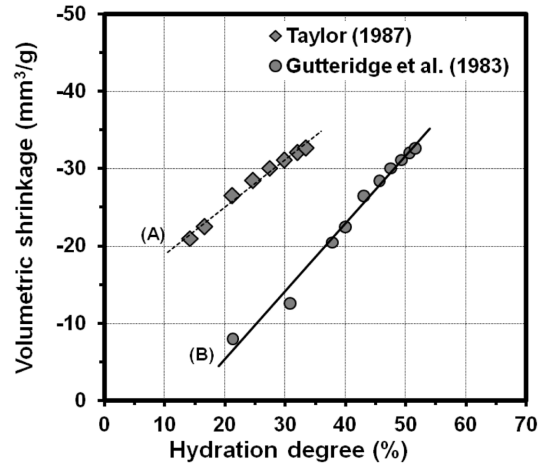


Fig. 5 Comparison between experimental chemical shrinkage and predicted degree of hydration by Avrami equation

4.3 UHPCC의 자기수축

CSA계 EA는 에트린자이트 생성에 적합한 $C_4A_3\bar{S}$ 클링커를 포함하고 있어 초기 수화 반응을 촉진시키고 부피를 팽창시키는 경향을 보인다. 또한 SRA는 시멘트 페이스트 내부 공극수의 표면장력을 감소시켜 모세관 압력을 줄이고 수축을 저감시키는 것으로 알려져 있다.^{3,5)} 다음의 Kelvin-Laplace 식을 통하여 내부 공극수의 표면장력과 모세관압력은 비례 관계임을 알 수 있다.

$$\sigma = \frac{2\gamma \cos \alpha}{r} = \frac{-\ln(RH)RT}{V_m} \quad (3)$$

여기서, σ 는 모세관압력(MPa), γ 는 공극수의 표면장력(N/m), α 는 내부공극의 표면과 공극수가 이루는 각도($^\circ$), r 은 내부 공극의 지름(mm)이며, RH 는 상대습도, R 은 기체상수[8.314J/(mol K)], T 는 절대온도(K), V_m 은 공극수의 몰 부피(m^3/mol)이다.

Fig. 6은 UHPCC의 자기수축 그래프이다. 28일 재령에서의 Mix. A와 B의 자기수축 변형률은 각각 $-761 \mu m/m$,

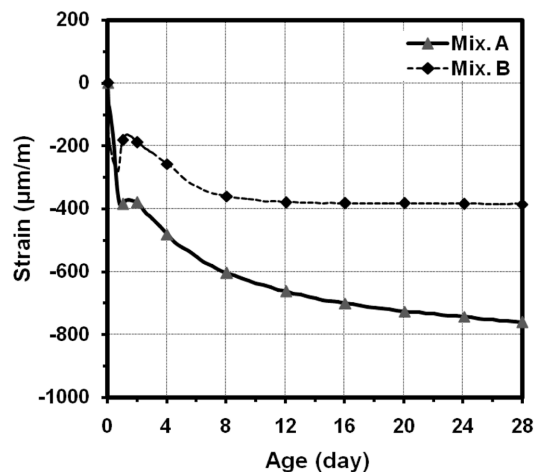


Fig. 6 Autogenous shrinkage of UHPCC with various admixtures

-387 $\mu\text{m}/\text{m}$ 로 나타났으며, SRA와 EA의 혼입으로 약 49%의 자기수축이 감소하였다. Mix. A의 경우 콘크리트 타설 이후 약 1일까지는 수축량이 급격히 증가하였으며, 그 후에는 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. Mix. B는 초기에 115 $\mu\text{m}/\text{m}$ 팽창하였으며 콘크리트 타설 후 약 8일 이후부터는 수축 증가량이 미미한 것으로 나타났다.

4.4 화학수축과 자기수축의 비교 및 분석

화학수축은 단위 시멘트에 발생하는 부피 변화이며, mm^3/g 의 단위로 나타낸다. 따라서 다음의 식을 통하여 부피 변화량으로 변환할 수 있다.¹³⁾

$$\varepsilon_{Vol.CS} = CS(t) \times V_{cem} \quad (4)$$

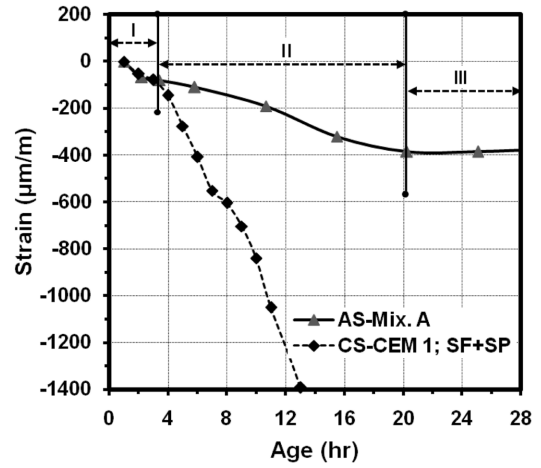
여기서, $\varepsilon_{Vol.CS}$ 는 화학수축의 부피 변화량(mm^3/mm^3), $CS(t)$ 는 재령별 화학수축(mm^3/g), V_{cem} 는 배합중 시멘트계 물질의 양(g/mm^3)이다.

이 연구에서 수행한 자기수축 측정 방법은 JCI에서 제안한 방법과 유사하며 길이 방향 변형률을 측정하였다. 따라서 $\mu\text{m}/\text{m}$ 의 단위를 얻게 되며 화학수축 결과와 비교하기 위하여 식 (5)를 적용하여 화학수축 부피 변화량을 길이 방향 변형률로 치환하였다.¹²⁾ 단, 모든 방향의 변형률은 등방성이라고 가정하였다.

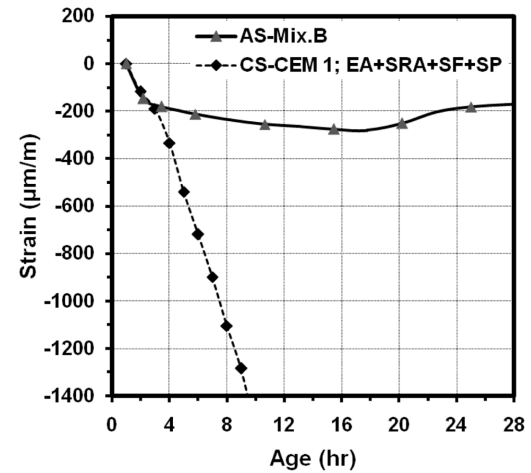
$$\varepsilon_{Lin.} = \frac{\varepsilon_{Vol.CS}}{3} \quad (5)$$

Fig. 7(a)는 SF와 SP를 혼입한 Mix. A의 화학수축 및 자기수축 그래프이다. 초기 재령의 수축 거동을 살펴보면, 화학수축이 부재 전체의 부피 변화량과 같은 구간 I과, 화학수축이 구속되어 시멘트 페이스트 내부에 공극이 형성되고 자기건조가 나타나는 구간 II, 콘크리트가 경화(hardening)하여 화학수축 및 자기건조에 의한 모세관압력이 구속되는 구간 III으로 나눌 수 있다.

실험 결과, 콘크리트 타설 후 약 3.5시간 이후부터 화학수축과 자기수축이 달라지는 경향을 보였다. 이는 기존의 연구 결과^{11,12,14)}에 비해 조금 이른 시간이며, 그 이유는 UHPC의 낮은 W/B와 다수의 섬유 혼입에 의한 것으로 판단된다. Nawa 등²⁴⁾에 의하면 화학수축과 자기수축이 차이나는 시점을 콘크리트의 골격이 형성되는 시점으로 정의하고 있으며, 이는 수화 반응에 의한 부피 감소가 콘크리트의 응결과 다수의 섬유 혼입으로 인해 구속되어 내부에 공극이 형성되고 자기건조에 의한 자기



(a) Mix. A (CEM 1: SF 25%, SP 1.2%)



(b) Mix. B (CEM 1: SF 25%, SRA 1%, EA 7.5%, SP 1.2%)

Fig. 7 Comparison of chemical shrinkage being converted into linear strain by assuming isotropic deformation and autogenous shrinkage at early age

수축이 발생하는 시점으로 판단할 수 있다. 약 19시간 이후부터는 수축 증가율이 급격히 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 콘크리트가 경화하여 화학수축뿐만 아니라 내부공극의 부압력에 의한 부피 감소를 저항하기 때문인 것으로 판단된다(구간 III).

EA와 SRA를 혼입한 Mix. B의 경우 콘크리트 타설 후 약 3시간 이후부터 화학수축과 자기수축이 차이나는 것으로 나타났으며, 콘크리트의 팽창은 약 17시간 이후부터 발생하였다(Fig. 7(b)). Mix. A에 비해 자기건조 시작 시점이 빨리진 이유는 EA의 혼입으로 경화가 촉진되었기 때문으로 판단된다.

Mix. A와 B의 모르타르에 대한 응결 측정을 수행한 결과, Mix. A의 경우 초결 및 종결은 콘크리트 타설 이

Table 6 Autogenous shrinkage strains at 28 days with various starting points of measurement

Nomen-clature	ε_t ($\mu\text{m}/\text{m}$)	ε_{SD} ($\mu\text{m}/\text{m}$)	ε_{IS} ($\mu\text{m}/\text{m}$)	ε_{FS} ($\mu\text{m}/\text{m}$)	$\frac{\varepsilon_{SD} - \varepsilon_{IS}}{\varepsilon_{SD}} \times 100(\%)$
Mix. A	-761	-680	-561	-494	17.50
Mix. B	-387	-219	-156	-145	28.77

*t: total, SD: self-desiccation, IS: initial setting, FS: final setting

후 11.0, 13.5시간으로 나타났으며 Mix. B는 7.5, 11.5시간으로 나타났다. Fig. 7의 실험 결과와 비교하여 볼 때, 시멘트 페이스트 내부에 공극이 생기고 자기건조가 나타나는 시점은 초결 보다 약 7.5, 4.5시간 빠른 것을 알 수 있다. Table 6은 다양한 자기수축 시작 시기를 적용하여 예측한 28일 재령의 자기수축 변형률이다. 보는 바와 같이 초결을 기준으로 예측한 경우 자기건조 시작 시기를 기준으로 예측한 값에 비해 17.50%, 28.77% 감소하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

SF 및 SRA, EA, SP의 혼입 여부를 변수로 한 UHPCC의 화학수축 및 자기수축, 응결 실험 결과를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) SF는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 포졸란 반응하여 화학수축을 증가시키고, SRA는 시멘트 페이스트의 투과성을 증가시켜 수화 반응을 촉진시키는 것으로 나타났다. 반면에 SP는 시멘트 입자 표면에 흡착되어 배합수와 시멘트의 수화 반응을 지연, 감소시키는 경향을 보였으며 EA는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.
- 2) UHPCC는 초기에 급격한 수축 발생을 나타내며, SRA와 EA의 혼입을 통하여 28일 재령에서 약 49%의 자기수축 저감 효과를 얻을 수 있었다. 하지만 EA의 경우 수화 반응을 촉진시키는 경향을 보였으며 UHPCC의 타설 초기에 발생하는 수축이 거푸집에 의해 구속될 경우 수축 균열 발생 가능성이 높을 것으로 판단된다. 따라서, EA를 혼입한 UHPCC의 구조 부재 적용을 위해서는 구속 수축 실험을 통한 균열 거동의 평가가 우선 수행되어야 한다.
- 3) UHPCC의 경우 화학수축이 구속되어 내부에 공극이 형성되고 자기건조 현상이 발생하는 시점은 모르타르 타설 후 약 3시간에서 3.5시간으로 나타났으며, 초결 보다 이른 시점에서 자기건조가 시작된 이유는 낮은 W/B와 다수의 섬유 보강에 따른 구속 효과에 의한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국건설기술연구원 주요 연구 사업인 하이브리드 사장교용 초고성능 콘크리트 개발 및 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다(No. 2007-0056796).

참고문헌

1. 김성욱, 강수태, 한상묵, “초고성능 시멘트 복합재의 특성 및 활용 현황,” 콘크리트학회지, 18권, 1호, 2006, pp. 16-21.

2. Japan Concrete Institute, “Committee Report, Autogenous Shrinkage of Concrete,” E. Tazawa Eds., E&FN Spon, 1999, pp. 3-62.
3. Maltese, C., Pistolesi, C., Lolli, A., Bravo, A., Cerulli, T., and Salvioni, D., “Combined Effect of Expansive and Shrinkage Reducing Admixtures to Obtain Stable and Durable Mortars,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 12, 2005, pp. 2244-2251.
4. 한천구, 김성욱, 고경택, 한민철, “팽창재와 수축 저감제를 조합 사용한 고성능 콘크리트의 기초 물성 및 수축 특성,” 콘크리트학회 논문집, 16권, 5호, 2004, pp. 605-612.
5. Bentz, D. P., “Influence of Shrinkage-Reducing Admixtures on Early-Age Properties of Cement Pastes,” *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 4, No. 3, 2006, pp. 423-429.
6. 윤성원, 노재성, “산업폐기물을 이용한 CSA계 팽창재 제조 및 응용,” 콘크리트학회 논문집, 16권, 3호, 2004, pp. 369-374.
7. Tennis, P. D. and Jennings, H. M., “A Model for Two Types of Calcium Silicate Hydrate in the Microstructure of Portland Cement Pastes,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 6, 2000, pp. 855-863.
8. Tazawa, E., Sato, R., Sakai, E., and Miyazawa, S., “Work of JCI Committee on Autogenous Shrinkage,” *Shrinkage of Concrete, Shrinkage 2000, Proceedings of the International RILEM Workshop*, V. Baroghel-Bouny and P.-C. Atcin, eds., Paris, France, 2000, pp. 21-33.
9. Hammer, T. A., Justnes, H., Bjøntegaard, Ø., and Sellevold, E.J., “8.2 Suggestions on the Terminology and the Test Methods Proposed by JCI,” *Autogenous Shrinkage of Concrete, Proceedings of the International Workshop*, E. Tazawa Eds., E&FN Spon, 1998, pp. 397-399.
10. Tazawa, E. I., “Autogenous Shrinkage of Concrete,” *Proceedings of the International Workshop*, E. Tazawa Eds., E&FN Spon., 1998, pp. 3-8.
11. Mounanga, P., Bouasker, M., Pertue, A., Perronnet, A., and Khelidj, A., “Early-Age Autogenous Cracking of Cementitious Matrices: Physico-Chemical Analysis and Micro/Macro Investigations,” *Materials and Structures*, Vol. 44, No. 4, 2010, pp. 749-772.
12. Sant, G., Lura, P., and Weiss, W. J., “Measurement of Volume Change in Cementitious Materials at Early Ages: Review of Testing Protocols and Interpretation of Results,” *Transportation Research Record*, Vol. 1979, Transportation Research Board, Washington, DC, 2006, pp. 21-29.
13. Holt, E., “Early Age Autogenous Shrinkage of Concrete,” VTT Publication 446, Technical Research Centre of Finland, 2001, pp. 1-184.
14. Sant, G. N., “Examining Volume Changes, Stress Development and Cracking in Cement Based Materials,” Master's Thesis, Purdue University, West Lafayette, 2007, pp. 1-195.
15. ASTM International, “Standard Test Method for Chemical Shrinkage of Hydraulic Cement Paste,” ASTM C1608-07, West Conshohocken, PA, 2007, 4 pp.
16. Bouasker, M., Mounanga, P., Turcry, P., Loukili, A., and Khelidj, A., “Chemical Shrinkage of Cement Pastes and Mortars at Very Early Age: Effect of Limestone Filler and Granular Inclusions,” *Cement and Concrete Composites*, Vol.

- 30, No. 1, 2008, pp. 13~22.
17. Japan Concrete Institute, *Japan Concrete Institute Report on Autogenous Shrinkage*, E&FN Spon., London and New York, 1998.
 18. Bentz, D. P., "A Review of Early-Age Properties of Cement-Based Materials," *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, No. 2, 2008, pp. 196~204.
 19. Jensen, O. M. and Hansen, P. F., "Water-Entrained Cement-Based Materials; I. Principles and Theoretical Background," *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 4, 2001, pp. 647~654.
 20. 허우영, 김화중, "고강도 콘크리트의 수화수축과 자기수축의 실험연구," 한국건축시공학회 논문집, 4권, 2호, 2004, pp. 81~88.
 21. Mounanga, P., Khelidj, A., Loukili, A., and Bouny-Baroghel, V., "Predicting $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Content and Chemical Shrinkage of Hydrating Cement Pastes Using Analytical Approach," *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 2, 2003, pp. 255~265.
 22. Taylor, H. F. W., "A Method for Predicting Alkali Ion Concentration in Cement Pore Solutions," *Advances in Cement Research*, Vol. 1, No. 1, 1987, pp. 5~17.
 23. Gutteridge, W. A. and Dalziel, J. A., "Filler Cement: The Effect of the Secondary Component on the Hydration of Portland Cement-Part 1. A Fine Non-hydraulic Filler," *Cement and Concrete Research*, Vol. 20, No. 6, 1990, pp. 778~782.
 24. Nawa, T. and Horita, T., "Autogenous Shrinkage of High-Performance Concrete," *Proceedings of the International Workshop on Microstructure and Durability to Predict Service Life of Concrete Structures Sapporo*, Japan, 2004.

요 약 이 연구에서는 실리카폼 및 수축 저감제, 팽창재, 고성능 감수제의 혼입을 변수로 한 초고성능 시멘트 복합체(UHPCC)의 초기 수축 거동을 평가하기 위하여 화학수축 및 자기수축 실험을 수행하고, 응결 측정 결과와 비교하여 UHPCC의 자기건조 시작 시점에 대하여 분석하였다. 실험 결과, 실리카폼 및 수축 저감제는 초기 화학수축을 증가시키는 경향을 보였으며, 고성능 감수제는 시멘트와 배합수의 수화 반응을 지연시키고 화학수축을 저감시키는 것으로 나타났다. 수축 저감제와 팽창재를 조합하여 적용한 경우 약 49%의 자기수축 저감 효과를 보였으며, 팽창재는 경화를 촉진시키는 것으로 나타났다. 또한 UHPCC는 다수의 섬유 혼입과 낮은 물-결합재비에 의해 초결 이전부터 자기건조 현상이 발생하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 초고성능 시멘트 복합체, 화학수축, 자기건조, 자기수축, time-zero