

# 설계강도 120MPa 초고강도 콘크리트의 초기재령 자기수축 특성 연구

## Autogenous and Drying Shrinkage Behavior of Ultra-High-Strength Concrete at Early Ages

김 지 원\*    손 유 신\*\*    이 주 하\*\*\*    김 규 동\*\*\*\*    이 승 훈\*\*\*\*\*    윤 영 수\*\*\*\*\*  
Kim, Ji Won    Sohn, Yu Shin    Lee, Joo Ha    Kim, Gyu Dong    Lee, Seung Hoon    Yoon, Young Soo

### ABSTRACT

In this study, to investigate autogenous shrinkage behavior of 120MPa UHSC at early ages, free and restrained shrinkage tests are performed for various strength levels(50MPa, 80MPa, 120MPa). For 120MPa, the effect of fly ash on autogenous shrinkage was also investigated. In order to assess the potential for early-age cracking in concrete and a mixtures susceptibility to shrinkage cracking, restrained ring test was carried out. Test results show that autogenous shrinkage of UHSC was much higher than that of HSC, VHSC and fly ash delayed cracking age in UHSC by decreasing autogenous shrinkage.

### 1. 서론

콘크리트가 점점 고강도화됨에 따라 최근 일본, 프랑스 등을 중심으로 초고강도 콘크리트의 개발이 활발히 진행되고 있다. 국내에서도 설계강도 80MPa의 초고강도 콘크리트를 실제 시공에 사용한 예가 있으며 그 이상의 강도도 개발이 가능한 단계에 와 있다. 초고강도 콘크리트는 w/b비가 매우 낮고 다양한 혼화제가 첨가되므로 자기수축의 발생이 매우 크다고 알려져 있다. 이는 초기재령 균열 발생의 주요인이 되며 초기에 발생한 균열일수록 구조물의 내구성을 크게 저하시키므로 자기수축에 대한 심도 있는 분석과 대책 마련이 필요하다. 본 연구에서는 설계강도 120MPa 초고강도 콘크리트(Ultra High Strength Concrete, UHSC)의 초기재령 수축특성을 밝히고자 강도 및 혼화제 변수에 대해 자기수축시험, 건조수축시험 및 구속건조수축시험(링테스트)을 각각 수행하고 분석하였다.

### 2. 실험 개요

#### 2.1 실험 계획

실험 변수는 강도 및 혼화제이며 표 1과 같다. 자기수축과 강도는 직접적인 관련은 없으나 특정 요소에 의한 국부적인 영향 분석에 앞서 UHSC의 수축 거동에 대한 개괄적인 경향 파악을 위해, 실제 시공사례가 있었던 배합 중 두 종류를 선정하여 High Strength Concrete(HSC)와 Very High

\* 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정  
\*\* 삼성물산(주)건설부문 기술연구소 전임연구원  
\*\*\* 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정

\*\*\*\*\* 삼성물산(주)건설부문 기술연구소 선  
임연구원  
\*\*\*\*\* 삼성물산(주)건설부문 기술연구소  
수석연구원  
\*\*\*\*\* 고려대학교 사회환경시스템공학  
과 교수

Strength Concrete(VHSC)로 각각 표현하고 비교군으로 정하였다. 또한, 설계강도 120MPa의 UHSC에 대해서는 플라이애쉬 사용량을 달리하여 자기수축 및 균열 시기 변화를 검토하였다.

## 2.2 사용 재료 및 배합 사항

본 연구에 사용된 재료로서 시멘트는 국내 A사의 1종 보통포틀랜드 시멘트, 플라이애쉬는 보령산, 잔골재는 세척사(조립률 2.8), 굵은골재는 성윤골재(13mm)가 사용되었다.

표 1 실험 변수 및 배합사항

Mix	Type	설계강도 (MPa)	W/B	S/A (%)	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )						SP (%)
					W	C	SF	FA	S	G	
HSC	OPC	50	0.30	41.0	171	580	-	-	666	973	0.8
VHSC	SF 8	80	0.25	41.5	162	598	52	-	652	934	1.1
UHSC	SF15	120	0.16	32.0	155	824	145	-	414	913	1.9
UHSC-10	SF15+FA10		0.16	32.0	155	727	145	97	403	889	1.8
UHSC-20	SF15+FA20		0.16	32.0	155	630	145	194	341	752	1.8

\* SF-silica fume FA-fly ash W-water C-cement S-sand G-gravel SP-superplasticizer

## 2.3 실험 방법

자기수축시험은 JCI에서 제안하고 있는 방법을 따랐으며 시험체 치수는 100×100×400mm의 각형을 사용하였다. 건조수축 시험체는 자기수축 시험체와 동일하며 24시간 후 탈형하여 항온항습실(온도 23±1℃, 습도 60±3%)에서 건조시켰다. 링테스트는 AASHTO PP34-98의 방법을 이용하였으며 콘크리트 링의 외부지름이 457mm(두께th=76mm), 375mm(두께th=35mm)인 두 종류의 시험체를 제작하였다.

## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1 기본 물성 실험 결과

슬럼프 플로우, 공기량, 압축강도 시험 결과는 표 2에 나타낸 바와 같다. 28일 압축강도는 목표강도를 모두 만족하였으며 플라이애쉬 치환율이 증가함에 따라 강도는 감소하는 경향을 보였다.

표 2 기본 물성 실험 결과

Mix	Type	slump flow (cm)	air content (%)	f <sub>28</sub> (MPa)
HSC	OPC	47/48	3.1	78.3
VHSC	SF 8	40/41	3.6	98.3
UHSC	SF15	53/54	1.8	125.7
UHSC-10	SF15+FA10	52/51	1.7	123.5
UHSC-20	SF15+FA20	55/54	1.8	122.1

### 3.2 자기수축 및 건조수축 특성

그림 1은 강도별 자기수축 변형률을 나타낸 것이다. UHSC에서는 기존 고강도 콘크리트에 비해서도 초기에 자기수축이 상당히 크게 발생했음을 보여준다. HSC, VHSC의 경우에는 약 7일 이후부터 자기수축이 더 이상 증가하지 않는 데 반해 UHSC는 일정한 비율로 꾸준히 증가하는 것을 알 수 있다.

그림 2는 강도에 따른 건조수축을 나타내며 자기수축과 비슷한 경향을 보였다.

그림 3에 보이는 바와 같이 플라이애쉬 사용량이 증가함에 따라 자기수축과 건조수축 모두 감소하였고 20% 혼입 시 자기수축 저감효과가 컸다. 재령 14일에서 자기수축은 FA10, FA20 각각 8%, 31% 감소했고 건조수축은 19%, 34% 감소했다.

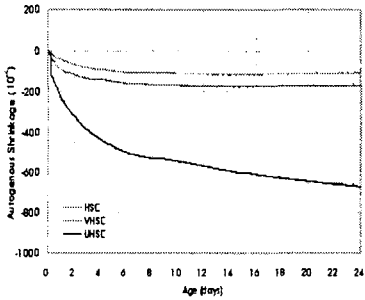


그림 1 강도별 자기수축

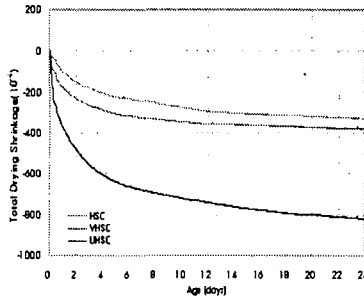


그림 2 강도별 건조수축

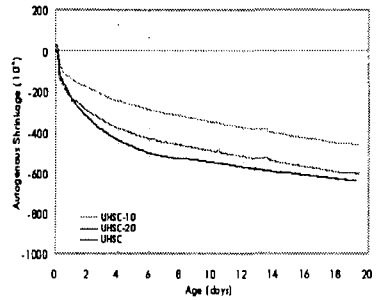


그림 3 플라이애쉬에 따른 자기수축

그림 4는 전체 수축량에서 자기수축이 차지하는 비율을 백분율로 나타낸 것으로, HSC, VHSC는 자기수축이 전체 수축량의 40~50%를 차지하며 시간이 지남에 따라 그 비율이 감소하는 데 반해 UHSC의 경우 자기수축이 전체 수축량의 70~80%에 이르며 점점 그 비율이 증가했다.

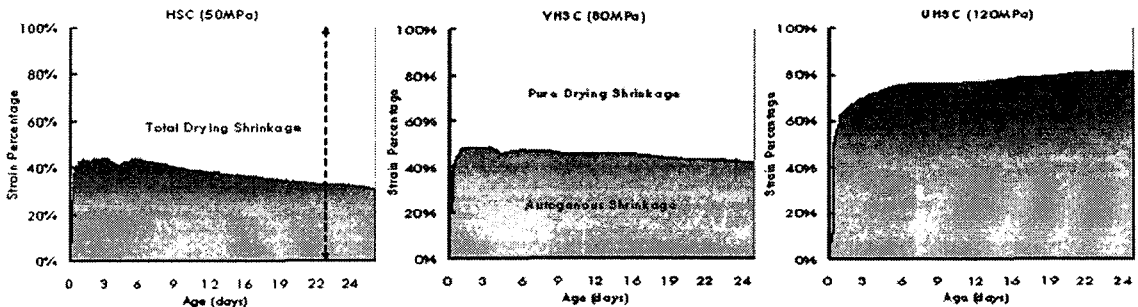


그림 4 강도별 자기수축 비율

### 3.3 기존 모델 및 실험 결과와의 비교

W/C비 0.4 이하의 HPC를 바탕으로 제안된 Jonasson 모델<sup>2)</sup> 및 기존 실험 결과 중 W/B비가 유사한 0.17, SF 10%에 대한 자기수축 측정 결과<sup>3)</sup>를 본 실험결과와 비교하였다.

그림 5와 같이 모델은 HSC와 VHSC에 대해서는 다소 크게, UHSC에 대해서는 매우 작게 예측함을 알 수 있다. 기존 실험 결과의 경우, UHSC와 비슷한 경향을 나타내는 것으로 보아 이와 같은 범위의 매우 낮은 W/B비에 대한 예측 모델이 새롭게 제안되어야 할 것으로 판단된다.

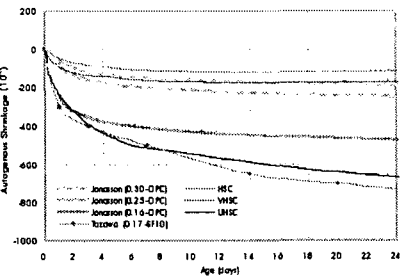


그림 5 모델 및 타 연구결과와의 비교

$$\sigma_{as}(t) = [-0.65 + 1.3(W/B)] 10^{-3} \cdot \exp\left[-\left(\frac{5}{t-1}\right)^{0.3}\right]^{11} \quad (\text{Jonasson \& Hedlund 모델})$$

### 3.4 구속 건조수축 시험 (링테스트)

그림 6에서와 같이 UHSC는 대부분 재령 1일에 균열이 발생했으며 이는 타설 후 24시간 이내에 급격하게 발생하는 자기수축에 의한 것으로 볼 수 있다.

그림 7은 플라이애쉬 사용량에 따른 링테스트 결과를 나타낸 것으로 10% 사용 시는 균열 지연 효과가 거의 없으나 20% 사용 시는 균열 시기가 늦춰지는 것을 알 수 있다. 이는 초기균열의 원인인 자기수축이 20% 혼입 시 저감효과가 컸던 결과와 일치한다. 초기균열은 발생 시기를 정확하게 예측하기가 어려우므로 균열 제어에 적합한 배합을 찾는 것은 매우 중요하다.

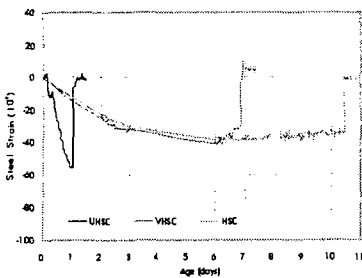


그림 6 강도별 균열 시기(th=35mm)

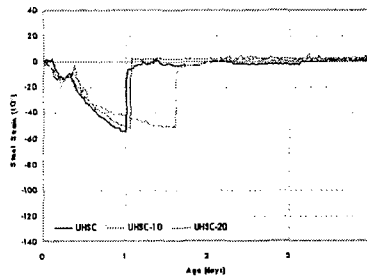
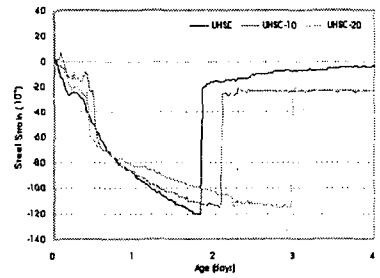


그림 7 플라이애쉬에 따른 균열 시기 (좌)th=35mm, (우)th=76mm



## 4. 결론 및 고찰

- 1) 설계강도 120MPa의 초고강도 콘크리트는 기존 고강도 콘크리트에 비해 매우 높은 자기수축 변형률을 보였으며 건조수축 변형률도 더불어 높게 나타났다. 초고강도 콘크리트에 플라이애쉬를 사용했을 때 자기수축이 감소하였으며 사용량이 증가하면 저감 효과도 큰 것으로 나타났다.
- 2) 초고강도 콘크리트의 경우 초기재령의 급격한 자기수축 발생으로 기존 고강도 콘크리트에 비해 더 빨리 균열이 발생하였으며 그 경향이 매우 취약적이었다. 플라이애쉬 20% 치환 시 0%나 10%에 비해 균열이 더 늦게 발생했으며 이는 자기수축 저감의 효과인 것으로 분석된다.

### 참고문헌

1. 이회근, 이광명, 김우, "고강도 플라이애쉬 콘크리트의 자기수축 예측모델", 콘크리트 학회 논문집 제13권 1호, 2003
2. Jonasson, J., Hedlund, H., "An Engineering Model for Creep and Shrinkage in High Performance Concrete", *Proceedings of International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete*, 2000
3. Tazawa, E., Miyazawa, S., "Autogenous shrinkage : present understanding and future research needs", *Control of Cracking in Early Age Concrete - Mihashi & Wittmann 2002*