

초고강도 콘크리트의 수축 및 균열 특성에 관한 연구

Shrinkage and Cracking Behavior of Ultra High Strength Concrete

김 지원* 손 유 신** 이 주 하*** 윤 영 수****
Kim, Ji Won Sohn, Yu Shin Lee, Joo Ha Yoon, Young Soo

ABSTRACT

In this study, to investigate shrinkage and cracking behavior of 120MPa UHSC, free and restrained drying shrinkage test were performed. Three strength levels(50MPa, 80MPa, 120MPa) were used and the effect of mineral admixtures(fly ash, slag) on free and restrained shrinkage was investigated. From comparing the result of pin-penetration test with the result of ring test, Time-Zero was determined as initial set. Shrinkage 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. Additional free concrete rings(with restraint removed) were also tested to check the influence of the geometry of the specimens on free shrinkage. And then the relationship between free shrinkage and restrained shrinkage was investigated.

1. 서론

최근 초고층 구조물에 대한 관심이 증가함에 따라 건축재료로서의 콘크리트도 더불어 초고강도화가 이루어지고 있다. 일본에서는 설계강도 150MPa의 초고강도 콘크리트가 개발되었고, 국내에서도 설계강도 80MPa의 초고강도 콘크리트를 실제 시공에 사용한 예가 있으며, 최근에는 활발한 연구를 통해 그 이상의 강도를 갖는 콘크리트 개발이 진행되고 있다. 과거에는 콘크리트 강도 증가를 위해 w/b비를 감소시킬 수 있는 한계가 0.2라고 여겨져 왔지만 고유동화제, 감수제 등 혼화제의 발달로 그 이하의 w/b를 갖는 콘크리트의 제작도 가능하게 되었다. 비록 시공성, 경제성 등 상용화 단계에 이르기까지 해결해야 할 문제가 많지만 기존 고강도 콘크리트와 확연히 다른 이들 콘크리트의 성질을 정확히 파악하는 것은 매우 중요하다.

초고강도 콘크리트는 0.2 이하의 낮은 w/b비와 실리카흙의 첨가로 인해 초기 자기수축이 매우 크며 이는 균열 발생의 주원인이 된다. 초기에 발생한 균열일수록 구조물의 내구성을 크게 저하시키므로 이 초기재령 균열 문제는 초고강도 콘크리트 구조물의 가장 큰 문제점이 되고 있으며 자기수축에 대한 심도 있는 분석과 초기 재령 균열 방지에 대한 대책 마련이 시급하다.

이에 따라 본 연구에서는 w/b비 0.16, 설계강도 120MPa의 초고강도 콘크리트를 제작하여 자기수축, 건조수축, 링테스트를 각각 수행하고 기존 고강도 콘크리트와의 비교, 혼화제가 자기 및 건조수축에 미치는 영향 등을 분석하였다.

* 삼성물산(주)건설부문 사원

** 삼성물산(주)건설부문 기술연구소 전임연구원

*** 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정

**** 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수

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 HSC(High Strength Concrete)와 VHSC(Very High Strength Concrete)로 각각 표현하고 비교군으로 정하였다. 또한, 설계강도 120MPa의 UHSC에 대해서는 플라이애쉬 10, 20%와 고로 슬래그 15, 30%를 치환하여 수축 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	design comp. strength (MPa)	w/b	S/a (%)	unit weight (kg/m ³)						SP (%)	
				W	C	SF	FA	SG	S		G
HSC	50	0.30	41.0	171	580	-	-	-	666	973	0.8
VHSC	80	0.25	41.5	162	598	52	-	-	652	934	1.1
UHSC			32.0	155	824	145	-	-	414	913	1.9
UHSC-FA10			32.0	155	727	145	97	-	403	889	1.8
UHSC-FA20	120	0.16	32.0	155	630	145	194	-	392	865	1.8
UHSC-SG15			32.0	155	679	145	-	145	409	903	1.8
UHSC-SG30			32.0	155	533	145	-	291	404	892	1.8

SF-silica fume FA-fly ash SG-slag 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 내부지름은 305mm로 일정하고, 외부지름이 457mm(두께=76mm), 375mm(두께=35mm)인 두 종류의 시험체를 제작하였다. 건조수축 시험 결과와 링테스트와의 비교를 위해 geometry의 영향을 고려하기 위한 추가적인 free ring test가 수행되었다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 초결 시간과 Time-Zero

수축의 시작 시점(Tme-Zero)을 결정하는 데 있어 관입저항침 시험으로 측정된 초결 시점은 해석이 다소 주관적이고 모호하므로 링테스트에서 실제 콘크리트가 강성을 나타내며 steel ring을 수축시키기 시작하는 시점과 비교함으로써 정확도를 확인하였다. 그림 1은 타설 직후부터 채령 1.4일까지의 자유건조수축과 링테스트의 구속건조수축 결과를 나타낸 것이며, 그림에서 보는 바와 같이 UHSC의

경우 초기에 매우 급격한 수축을 겪지만 초기 14시간 이전의 약 $600\mu\text{m}$ 에 이르는 수축량은 steel ring을 수축시키지 못하며 응력 유발에 크게 영향을 미치지 않는다고 볼 수 있다. 표 2에서와 같이 steel ring strain이 증가하기 시작하는 시점은 초결 시점보다 1~2시간 정도 늦지만 거의 유사한 경향을 보이며, 이에 따라 본 연구에서는 초결 시점을 Tme-Zero로 보고 분석을 진행하였다.

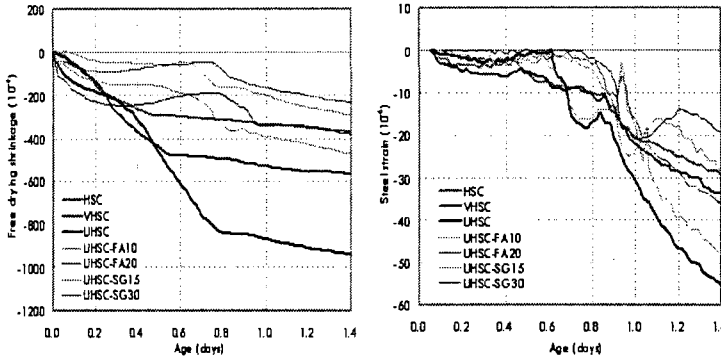


그림 1 건조수축시험과 링테스트 결과 비교

표 2 응결시험과 링테스트 결과 비교

Mix	Initial Set (hrs)	increased steel strain (hrs)
HSC	8.2	10.6
VHSC	10.1	11.0
UHSC	12.0	14.0
UHSC-FA10	13.7	14.4
UHSC-FA20	15.1	16.1
UHSC-SG15	13.9	15.8
UHSC-SG30	15.4	17.8

3.2 자기수축 및 건조수축 특성

그림 2는 강도별 자기수축 변형률을 나타낸 것으로 UHSC에서는 기존 고강도 콘크리트에 비해 초기에 자기수축이 월등히 크게 발생함을 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 UHSC는 건조수축의 70~80%가 자기수축에 의한 것이다. 그림 3은 플라이애쉬 치환에 따른 UHSC의 자기수축 저감효과를 나타낸 것으로 재령 14일에서 자기수축은 FA10, FA20 각각 8%, 31% 감소했다. 기존 연구 결과 슬래그는 자기수축을 증가시키는 것으로 나와 있으나 본 연구에서는 오히려 약간 감소시키는 경향을 보였으며 이에 대한 추가적인 검토가 요구된다.

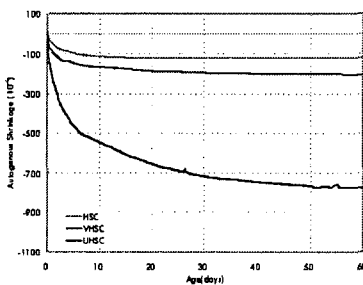


그림 2 강도별 자기수축

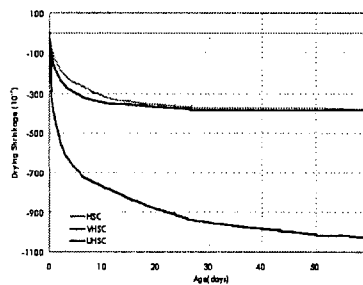


그림 3 강도별 건조수축

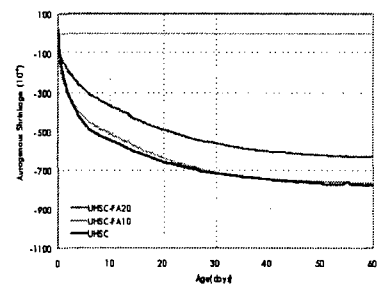


그림 4 플라이애쉬 치환에 따른 자기수축

3.3 구속 건조 수축 시험 (링테스트)

표 3은 링테스트 결과를 정리한 것으로 균열 발생 시기와 그 시점에서의 구속 응력, 인장강도 및 자유수축량을 나타낸다. 링에서의 자유수축량은 free ring test를 통해 얻은 관계식을 이용하여 계산하였다. UHSC의 경우, 얇은 링은 1.5일, 두꺼운 링은 3일에 균열이 발생하였고 그 때의 자유수축량은 각각 $582, 470\mu\text{m}$ 이었다. 그림 5에서 보는 바와 같이 플라이애쉬 20% 치환 시 균열 지연 효과가

켰고, 그림 6에서는 UHSC가 HSC, VHSC에 비해 균열응력이 인장강도에 근접하며 구속도가 낮을 때 그 경향이 뚜렷해짐을 나타낸다.

표 3 링테스트 결과 정리

concrete ring thickness	Mix	cracking age (days)	free shrinkage (10^{-6})	steel strain (10^{-6})	cracking stress (MPa)	tensile strength (MPa)
35 mm	HSC	3.5	305	48.0	3.6	4.3
	VHSC	2.8	303	46.3	3.5	4.6
	UHSC	1.5	582	58.3	4.3	4.4
	UHSC-FA10	1.6	331	53.1	4.0	4.7
	UHSC-FA20	2.3	323	51.3	3.8	5.0
76 mm	UHSC	3.0	470	117.7	5.4	5.2
	UHSC-FA10	3.2	307	115.0	5.3	5.3
	UHSC-FA20	4.6	290	114.5	5.2	5.7

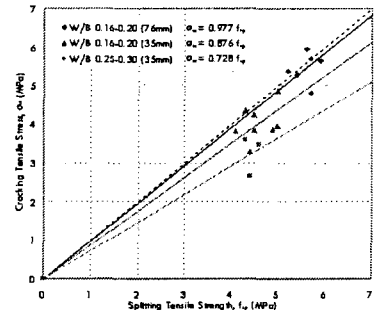
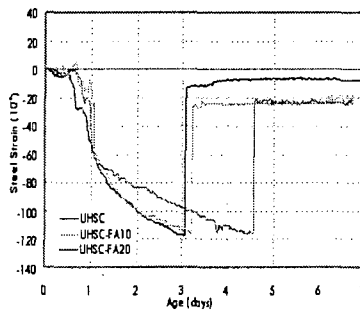
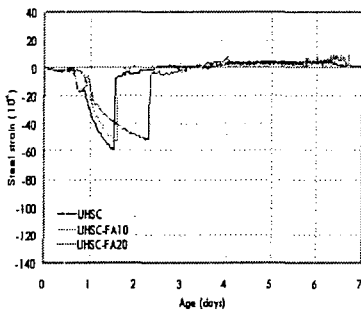


그림 5 플라이애쉬 치환율에 따른 균열 시기 (좌 35mm, 우 76mm) 그림 6 균열응력과 인장강도와의 관계

4. 결론 및 고찰

- 1) 초고강도 콘크리트의 건조수축은 초결 이전에 약 $600\mu m$ 이 발생하나 구속 시 응력 유발에는 큰 영향을 미치지 않으며 자기수축이 전체건조수축의 대부분을 차지한다.
- 2) 초고강도 콘크리트의 경우 초기재령의 급격한 자기수축 발생으로 기존 고강도 콘크리트에 비해 더 빨리 균열이 발생하였으며 그 경향이 매우 취약적이다.
- 3) 플라이애쉬 20% 치환 시 균열 지연 효과가 뚜렷했으며 초고강도일수록 구속도가 낮을수록 균열 응력과 인장강도의 비가 1에 가까웠다.

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업(M10204000031-04J0000-01910) 및 삼성물산 건설 부문의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Heather T. See, Emmanuel K. Attigbe Matthew A. Miltenberger, 'Shrinkage Cracking Characteristics of Concrete Using Ring Specimens' ACI Material Journal May/June 2003, pp.239-245
2. Tazawa, E. and Miyazawa, S.(1992), 'Autogenous Shrinkage Caused by Self Desiccation in Cementitious Material', 9th International Congress on the Chemistry of Cement, pp.712-718