초고강도 콘크리트의 수축 균열 특성 및 구속도 평가

류두열¹⁾ · 민경환¹⁾ · 양준모¹⁾ · 윤영수^{1)*}

¹⁾고려대학교 건축사회환경공학부

Evaluation of Shrinkage Cracking Characteristics and Degree of Restraint for Ultra-High-Strength Concrete

Doo-Yeol Yoo,¹⁾ Kyung-Hwan Min,¹⁾ Jun-Mo Yang,¹⁾ and Young-Soo Yoon^{1)*}

¹⁾School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

ABSTRACT The concrete cracking from the restrained stress caused by the shrinkage may play significant cause of deterioration of concrete structures by allowing the permeation of sulphate and chloride ions which in turn triggers corrosion of steel reinforcement. In particular, the cracking becomes more critical as water binder ratio (W/B) is reduced and concrete strength increases. Therefore, it needs to evaluate correctly the comprehensive shrinkage behavior of concrete with high strength: high-strength concrete (HSC), ultra-high-strength concrete (UHSC). The unrestrained shrinkage tests, however, cannot estimate the net shrinkage effectively which affects cracking after full development of strength and stiffness because it does not consider the degree of restraint, strength development, stress relaxation, and so on. Therefore, in this study, both free and restrained shrinkage tests with variables of W/B (W/B of 30, 25 and 16%) and admixtures (fly ash (FA) and granulated blast-furnace slag (BFS)) for HSC, very-high-strength concrete (VHSC) and UHSC were performed. The test results indicated that the autogenous shrinkage and total shrinkage at drying condition were reduced as W/B increased and FA, BFS were added, and the cracking behavior was suppressed as W/B increased and FA was added.

Keywords : ultra-high-strength concrete, shrinkage, restrained stress, fly ash, granulated blast-furnace slag

1. 서 론

수축에 의한 콘크리트의 부피감소는 보강철근, 굵은골재, 거꾸집 등에 의해 구속되며 이로부터 발생하는 구속응력은 초기균열을 유발하여 구조물의 내구성을 저하시키고¹⁾ 예상치 못한 하중에서 구조물의 급격한 파괴를 유발한다.

수축은 일반적으로 자기수축과 건조수축으로 구분된다. 자기수축은 외부 영향(하중, 수분 증발, 온도변화 등)을 제외한 수축으로 수화반응에 의한 자기건조(self-desiccation) 현상에 의해 발생하는 것이며 건조수축은 콘크리트 내부의 자유수가 상대습도의 차이에 의해 외부로 증발하면서 발생하는 수축이다. 이러한 수축 발생의 주요 메커니즘은 (a) 수분변화에 의한 모세관 장력(capillary tension), 고체표면 장력(solid surface tension), 분리 압력(disjoining pressure)과 (b) 화학적 수축(chemical shrinkage), (c) 온도 수축(thermal shrinkage), 그리고 (d) 탄산화 수축(carbonation shrinkage) 등이 있다.²⁾

일반강도 콘크리트(NSC)를 적용한 교량 바닥판, 도로

포장, 주차장, 공장 바닥 등과 같은 평면 콘크리트 구조는 외부 노출면 및 자유수의 증가로 인해 건조수축이 크게 발생하며 균열발생 가능성이 크다.³⁾ 또한, 최근 초고층 및 초장대 교량에 대한 관심이 급증함에 따라 활발히 연구, 개발되고 있는 고강도 콘크리트(HSC), 초고강도 콘크리트(UHSC)는 일반강도 콘크리트에 비해 자기수축이 상당히 크며^{4,5)} 초기 균열 발생가능성이 크다.

기존의 연구에 의하면, 플라이애쉬(FA)는 콘크리트의 장기 강도, 내구성 및 워커빌리티를 증가시키며 포졸란 반응에 의해 초결 시간의 지연 및 수축 발생을 감소시키는 것으로 알려져 있다.⁶⁾ 또한, 초기 수화반응의 지연으로 수화열 및 초기 구속응력에 의한 균열발생의 위험을 감소시킨다.

고로슬래그미분말(BFS)은 잠재수경성 물질로써 입자의 크기가 작고 모난 형상에 따른 효과적인 공극 채움 현상은 콘크리트 구조물의 수밀성을 증가시키며 염화물 및 황산염의 저항성능이 뛰어나 고강도 콘크리트, 해양 구조물에 주로 적용된다.⁷⁾ 하지만, 공극 채움 효과는 초기 및 장기 수축을 증가시키며 구속 요인에 의해 발생하는 구속력은 구조물에 잔류응력을 유발하여 예상치 못한 하중에서의 균열발생 가능성을 크게 한다.⁸⁾

초기 균열 거동은 콘크리트 수축의 발현속도 및 크기

*Corresponding author E-mail: ysyoon@korea.ac.kr

Received April 1, 2010, Revised May 28, 2010,

Accepted June 15, 2010

©2010 by Korea Concrete Institute

뿐만 아니라 구속도, 응력의 이완, 재령, 구조물 형상 등에 의해 영향을 받는다.⁹⁾ 따라서, 기존의 비구속 수축(자유수축, 건조수축)실험을 통해서는 강도 발현, 콘크리트 응력의 변화 및 구속도를 평가를 할 수 없으며 균열 발생 가능성 및 균열 거동의 평가에 한계가 있었다. 또한, 기존의 연구들^{4,6)}은 주로 일반강도 및 고강도 콘크리트의 수축거동을 평가하였으며 초고강도 콘크리트에 관한 연구는 미비한 실정이다.

따라서, 이 연구에서는 물-결합재비(W/B)가 30% 및 25%, 16%인 고강도, 초고강도 콘크리트의 비구속 수축, 구속 수축(ring-test) 실험을 통하여 수축 및 균열 거동을 평가하였다. 특히, W/B 16%의 초고강도 콘크리트의 경우에는 FA, BFS의 치환율에 따른 수축 거동을 비교, 평가 하였으며 구속응력과 건조수축의 비교를 통하여 실제 균열 발생에 영향을 미치는 수축량(net shrinkage)을 평가하였다.

2. 실험 연구

2.1 개요

이 연구의 목적인 고강도, 초고강도 콘크리트의 수축 거동에 대한 개괄적인 평가 및 경향 파악을 위해 W/B, 혼화재를 실험 변수로 하여 실제 시공사례가 있었던 배합 중 두 종류, W/B 30%, 25%와 W/B 16%의 초고강도 콘크리트에 대한 구속, 비구속 수축 실험을 수행하였다. 또한, FA, BFS를 치환하여 강도 및 수축, 균열 거동을 검토하였으며 혼화재를 사용하지 않은 콘크리트와 비교, 분석하였다.

2.2 재료 및 배합비

이 실험에서는 국내 A사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고 FA는 보령산, 잔골재는 세척사를 사용하였으며 물리적 성질은 Table 1에 나타내었다.

배합비는 Table 2에 나타낸 바와 같으며 설계강도에 따라서 60 MPa(W/B = 30%)은 HSC, 80 MPa(W/B = 25%)은 VHSC, 120 MPa(W/B = 16%)은 UHSC로 분류하였다. VHSC, UHSC의 경우 강도 증진을 위하여 시멘트량의 8,

Table 1 Material properties

Materials	Properties
Cement (C)	Type 1 cement, Specific gravity: 3.15, Fineness: 341.3 m ² /kg
Silica fume (SF)	Specific gravity: 2.20, Fineness: 24,000 m ² /kg
Granulated blast-furnace slag (BFS)	Specific gravity: 2.80, Fineness: 426.6 m ² /kg
Fly ash (FA)	Specific gravity: 2.20, Fineness: 345.0 m ² /kg
Fine aggregate (S)	Sea sand, Specific gravity: 2.59, Fineness modulus: 2.80
Coarse aggregate (G)	Specific gravity: 2.80, Maximum size: 20, 10 mm
Superplasticizer (SP)	Polycarboxylate high range AE water reducer (liquid type)

15%를 실리카퐁(SF)으로 대체하였으며 UHSC에서 FA, BFS가 수축거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 치환율을 각각 0, 10, 20% 및 0, 15, 30%로 달리하여 적용하였다. 또한, 500 mm의 목표 슬럼프 플로우를 만족하기 위하여 배합비에 따른 고성능 감수제(SP)의 첨가량을 결정하였으며 W/B가 감소함에 따라 0.8%에서 1.9%로 증가시켰다.

2.3 시편 제작 및 실험 방법

이 연구에서 W/B 및 혼화재에 따라 수행한 실험 상세는 Table 3에 나타내었다.

2.3.1 슬럼프 플로우, 공기량 및 압축강도

굳지 않은 콘크리트의 성질을 알아보기 위해 공기량(KS F 2421) 실험과 슬럼프 플로우(KS F 2594) 실험을 실시하였다. 또한, 압축강도 측정을 위해 $\phi 100 \times 200$ mm 원주형 공시체를 제작하였으며 온도 $23 \pm 1^{\circ}\text{C}$, 상대습도 $60 \pm 3\%$ 인 항온항습실에서 24시간 양생 후 몰드를 제거하였다. 이후에는 수조에서 실험 전까지 수중양생을 실시하였으며 소요 재령에서 압축강도(KS F 2405)를 측정하였다.

Table 2 Mix proportions

Mix	Design compressive strength (MPa)	W/B	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)							SP (%)
				W	C	SF	FA	BFS	S	G	
HSC	60	0.30	41.0	171	580	-	-	-	666	973	0.8
VHSC	80	0.25	41.5	162	598	52	-	-	652	934	1.1
UHSC	120	0.16	32.0	155	824	145	-	-	414	913	1.9
UHSC-FA10			32.0	155	727	145	97	-	403	889	1.8
UHSC-FA20			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

Note) SF = silica fume, FA = fly ash, BFS = granulated blast-furnace slag, W = water, C = cement, S = sand, G = gravel, SP = superplasticizer

Table 3 Experimental program

Mix	Autogenous shrinkage test	Drying shrinkage test		Ring-test	
		Non-water curing	7-day water curing	Test 1-35 mm	Test 2-76 mm
HSC	○	○	○	○	
VHSC	○	○	○	○	
UHSC	○	○	○	○	○
UHSC-FA10	○	○		○	○
UHSC-FA20	○	○		○	○
UHSC-SG15	○	○			
UHSC-SG30	○	○			

2.3.2 비구속 수축실험

자기수축 실험은 Figs. 1, 2에서 보는 바와 같이 일본 콘크리트공학협회(JCI)에서 제안하는 방법과 유사하게 실시하였다. 초결 측정은 KS F 2436 규정에 따라 실시하였으며 거푸집과 콘크리트의 마찰에 의한 구속응력 발생을 제거하기 위하여 테프론 시트를 사용하였다. 콘크리트 타설 후 24시간 후에 거푸집 탈형을 하였으며 외부와의 수분이동을 방지하기 위하여 알루미늄 테이프를 사용하여 봉하였다. 또한, 압축강도 실험과 동일한 항온항습실에서 수축량을 측정하였다.

Fig. 2에서 볼 수 있듯이 건조수축 실험에 사용된 시편의 크기는 $100 \times 100 \times 400$ mm이며 콘크리트 매립 게이지를 적용하여 측정하였다. 자기수축 실험과 동일하게 콘크리트 타설 후 24시간 후에 거푸집 탈형을 하였으며 항온항습실에서 건조하였다. 또한, 7일 수중양생 시편을 비교군으로 선택하여 수중양생을 하지 않은 시편과 비교하였으며 양생 기간에 따른 건조수축 거동을 평가하였다(Table 3).

Fig. 1 Schematic description of the autogenous shrinkage test

Fig. 2 Test set-up for autogenous shrinkage and drying shrinkage tests

2.3.3 구속 수축실험

구속 수축실험은 AASHTO PP34-98에서 제안한 방법과 동일하게 실시하였다. Fig. 3(a)에서 보는 것과 같이 내부와 외부 강제 링 사이에 콘크리트를 타설하고 타설 이후 24시간 동안 젖은 양생포를 덮어 양생하였다. 양생 후에는 외부 강제 링을 제거하고 콘크리트 윗면에 실리콘을 적용하여 외부와의 수분이동을 차단하였다. 따라서, Fig. 3(b), (c)에서와 같이 건조수축은 오직 콘크리트 외부 원주 표면에서만 발생하도록 하였으며 구속 변형률 측정을 위하여 총 4개의 표면 게이지를 내부 강재의 중앙($h = 76$ mm)에 설치하였고 데이터 로거를 사용하여 변형률을 측정하였다. 또한, Table 3에 나타난 바와 같이 구속도를 평가하기 위하여 콘크리트 링의 두께를 35 mm(Test 1), 76 mm(Test 2)로 달리하였으며 동일한 항온항습실에서 측정하였다.

Fig. 3 Restrained ring-test specimens

3. 해석 모델

3.1 구속응력

Fig. 4는 링-테스트의 응력 분포 개념도이다. 여기서 내부 압력 P_i 는 콘크리트의 수축과 내부 강재의 구속에 의해서 발생하며, 콘크리트가 균질하고 선형 거동을 보이며 수축이 모든 단면에서 균등하게 발생한다고 가정하면 콘크리트 링의 반경 방향 응력(σ_r), 원주 방향의 응력(σ_θ)은 다음과 같이 구할 수 있다.^{10,11)}

$$\sigma_r = \frac{r_{ic}^2 P_i}{r_{oc}^2 - r_{ic}^2} \left(1 - \frac{r_{oc}^2}{r^2} \right) \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{r_{ic}^2 P_i}{r_{oc}^2 - r_{ic}^2} \left(1 + \frac{r_{oc}^2}{r^2} \right) \quad (2)$$

여기서 r_{ic} , r_{oc} 는 콘크리트의 내부, 외부 반경이며, r 은 축 방향 임의의 값이다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 σ_r 은 압축, σ_θ 는 인장응력을 나타낸다.

또한, 원주방향 응력의 최대값은 콘크리트의 내측 표면에서 발생하며 다음과 같다.

$$\sigma_{\theta_{\max}} = \frac{P_i (r_{ic}^2 + r_{oc}^2)}{r_{oc}^2 - r_{ic}^2}, r = r_{ic} \quad (3)$$

여기서 압력 P_i 는 내부 강재에 크기는 같고 방향이 반대인 외부 압력으로 작용하며 실제 콘크리트와 내부 강재의 계면에서 발생 압력은 측정된 강재의 변형률을 통해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_i = \frac{(r_{os}^2 - r_{is}^2)}{2r_{os}^2} \sigma_{\theta, st} = \frac{(r_{os}^2 - r_{is}^2)}{2r_{os}^2} E_{st} \epsilon_{st}, r = r_{is} \quad (4)$$

여기서 $\sigma_{\theta, st}$ 는 내부 강재 링에 발생하는 원주방향 응력이고, ϵ_{st} , E_{st} 는 내부 강재의 구속 변형률, 탄성계수이며, r_{is} , r_{os} 는 강재의 내부, 외부 반경이다.

따라서 식 (4)를 식 (3)에 대입하면 콘크리트에 발생하

Fig. 4 Idealization of the restrained ring specimens

는 최대 응력은 다음과 같이 내부 강재의 구속 변형률과 탄성계수, 콘크리트 및 강재의 기하학적 특성으로써 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{t_{\max}} = \frac{(r_{os}^2 - r_{is}^2)(r_{ic}^2 + r_{oc}^2)}{2r_{os}^2 (r_{oc}^2 - r_{ic}^2)} E_{st} \epsilon_{st} \quad (5)$$

$$\sigma_{t_{\max}} = G_1 E_{st} \epsilon_{st}, \quad G_1 = \text{기하 계수} \quad (6)$$

만약, 콘크리트 링의 두께 t_c 가 매우 작다면 벽이 얇은 실린더(thin-walled cylinder)로 가정할 수 있고 콘크리트에 작용하는 평균 인장응력은 다음과 같이 간단하게 표현될 수 있다.¹²⁾

$$\sigma_t = \frac{r_{ic} t_{st}}{r_{is} t_c} E_{st} \epsilon_{st} \quad (7)$$

$$\sigma_t = G_2 E_{st} \epsilon_{st} \quad (8)$$

여기서 t_c , t_{st} 는 콘크리트, 강재 링의 두께이고, G_2 는 기하 계수이다.

Fig. 5는 콘크리트 링 두께의 비율에 따른 식 (5), (7)을 통해 얻은 인장응력의 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 r_{oc}/r_{ic} 의 값이 1.4에서 동일한 응력값을 나타내며 이 연구에서 수행한 Test 1은 $r_{oc}/r_{ic} = 1.23$ 으로 See et al.¹²⁾이 수행했던 부재와 동일하며 식 (7)을 적용하여 응력을 계산하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 굵지 않은 콘크리트의 특성 및 압축강도

슬럼프 플로우, 공기량, 압축강도 시험 결과는 Table 4에 나타난 것과 같다. 28일 압축강도는 모두 설계강도

Fig. 5 Comparison of the calculated radial stresses in concrete specimens by Eqs. (5) and (7)

Table 4 Properties of fresh and hardened concrete

Mix	Slump flow (mm)	Air content (%)	f_{28} (MPa)	Initial setting (hr)
HSC	470/480	3.1	78.3	8.2
VHSC	400/410	3.6	98.3	10.1
UHSC	530/540	1.8	125.7	12.0
UHSC-FA10	520/510	1.7	123.5	13.4
UHSC-FA20	550/540	1.8	122.1	15.1
UHSC-BFS15	500/520	1.8	123.2	13.9
UHSC-BFS30	520/530	1.9	125.1	14.9

보다 크게 나타났으며 UHSC에서 FA, BFS가 28일 압축 강도에 미치는 영향은 미비한 것으로 나타났다. 또한 초결 시간은 W/B가 감소할수록 FA 및 BFS를 치환할 경우 지연되는 경향을 나타내었다.

4.2 자기수축

Fig. 6은 W/B에 따른 자기수축을 나타낸다. 기존의 연구 결과^{4,5,12)}와 동일하게 W/B가 감소할수록 자기수축은 증가하였다. 특히, W/B 25%에서 16%로 감소한 경우 재령 60일에서의 자기수축은 $-214 \mu\epsilon$ 에서 $-770 \mu\epsilon$ 로 급격히 증가하였다. 그 이유는 내부 공극의 크기가 감소하여 자기건조에 의한 부압력(suction pressure)이 증가하였기 때문이며 분말도가 큰 실리카폼(SF)의 사용으로 공극 채움 효과가 더 커졌기 때문이다.¹³⁾

Fig. 7은 UHSC의 혼화재에 따른 자기수축 결과이다. FA 및 BFS 콘크리트는 모두 OPC에 비해 자기수축이 감소하는 것으로 나타났다. FA20의 경우 17.5%로 가장 큰 자기수축 감소율을 보였으며 초기 자기수축을 지연시키는 것으로 나타났다. 하지만, FA10은 그 영향이 미비한 것으로 나타났다.

BFS는 모난 입자형태와 높은 분말도를 갖는 비수경성 물질로써 수화반응물인 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 포졸란반응에 의하여

Fig. 6 Autogenous shrinkage with various W/B

(a) Fly ash

(b) Granulated blast-furnace slag

Fig. 7 Autogenous shrinkage of concrete containing different mineral admixtures

생성되는 C-S-H겔의 공극 채움 효과에 의해 자기수축을 증가시킨다.⁴⁾ 하지만 실험 결과, BFS15와 30의 경우 재령 60일에서 11.7%, 9.7%의 자기수축 감소를 나타내었다. 이와 같이 UHSC의 경우 BFS가 자기수축을 감소시킨 이유는 W/B의 감소로 수화 반응물이 부족하였고, 분리압력에 의한 초기팽창 정도의 감소로 내부 공극의 지름이 감소하여 공극 채움 효과에 비해 모세관장력에 의한 영향이 상대적으로 증가하였기 때문으로 판단된다.¹⁴⁾

4.3 건조수축

Fig. 8은 W/B에 따른 건조한 환경에 노출된 콘크리트의 수축(이하, 건조수축)을 나타낸다. HSC와 VHSC의 경우, 초기 건조수축은 VHSC가 크게 나타났으며 30일 이후에는 비슷해지는 것으로 나타났다. 이것은 HSC의 경우 자기수축의 감소로 인해 초기수축이 작게 나타났지만 시간이 경과하면서 자유수의 증발에 의한 건조수축이 증가하였기 때문인 것으로 판단된다. UHSC의 경우는 VHSC에 비해 재령 60일에서 약 250%의 건조수축 증가를 나타내었다.

FA, BFS는 건조수축을 감소시키는 것으로 나타났다

Fig. 8 Drying shrinkage with various W/B

(Fig. 9). FA10과 BFS15, 30은 재령 60일에서 15%의 건조수축 감소를 나타냈으며 FA20은 23%의 감소를 나타내었다. 자기수축에 비해 FA 및 BFS에 의한 건조수축의 감소량이 증가한 이유는 FA, BFS의 콘크리트 내부 공극을 채우는 효과에 의해 내부에 존재하는 자유수의 증발이 방해를 받았기 때문으로 판단된다.

Fig. 10에서 볼 수 있듯이 UHSC의 경우 총 건조수축에서 자기수축이 78%를 차지하는 것으로 나타났으며 VHSC는 51%, HSC는 31.5%로 나타났다. 또한, FA, BFS 콘크리트의 경우에는 약 80~90%를 나타내었다. 따라서 Test 1의 경우 부등건조수축에 의한 자기구축(self-restraint) 효과는 상대적으로 미비할 것으로 판단되며 식 (7)을 사용하여 구속응력을 계산하였다.

Fig. 11은 초기 양생이 건조수축에 미치는 영향을 평가하기 위하여 양생 조건을 다르게 하여 수행한 건조수축 그래프이다. 실선은 거푸집 탈형 이후 즉시 건조시킨 경우이며, 점선은 7일 수중양생을 한 후에 건조시킨 경우이다. 그림에서 볼 수 있듯이 7일 양생을 한 경우 UHSC는 70%, HSC와 VHSC의 경우에는 44.8%, 65.8%의 수축 감소를 나타내었다. 그러므로, 초고강도 콘크리트의 경우 초기 양생이 매우 중요하며 초기 양생을 통하여 건조수축을 효과적으로 감소시킬 수 있는 것으로 판단된다.

4.4 구속수축

Fig. 12는 W/B에 따른 내부 강재 링의 변형률을 나타낸다. W/B가 감소할수록 구속 변형률은 증가하였으며 균열발생 시간은 감소하였다. UHSC의 경우 최대 변형률은 $-60 \mu\epsilon$ 이었으며 콘크리트 타설 이후 36시간에 첫 균열과 함께 변형률이 급격히 감소하는 경향을 보였다. 이것은 UHSC가 HSC, VHSC 보다 큰 구속 변형률을 나타냈지만 수축에 의한 균열 발생에는 매우 취약함을 의미하며, 상기의 급격한 구속 변형률의 감소는 비구속 수축량의 증가와 낮은 비크리프, 높은 탄성계수 및 균열면의 골재 맞물림 효과의 감소로 판단된다.¹⁵⁾

(a) Fly ash

(b) Granulated blast-furnace slag

Fig. 9 Drying shrinkage of concrete containing different admixtures

Fig. 10 Comparison between autogenous shrinkage and drying shrinkage of concrete with various W/B and different admixtures

Fig. 13은 FA의 구속수축 영향을 나타낸다. 기존의 연구¹⁶⁾에 의하면 고강도 콘크리트에서 구속 수축은 FA를 치환하였을 경우 감소하는 것으로 나타났으며, 실험 결과 동일한 경향을 나타내었다. Test 1($t_c = 35 \text{ mm}$)에서

Fig. 11 Drying shrinkage with different curing period

Fig. 12 Restrained strain of the inner steel ring with various W/B

FA10, 20인 경우에는 OPC에 비해 균열 발생이 2.4, 19.2 시간 지연되었으며 최대 구속 변형률은 4.0, 6.7 $\mu\epsilon$ 감소하는 것으로 나타났다. Test 2($t_c = 76$ mm)의 경우, Fig. 13(b)에서 볼 수 있듯이 Test 1과 동일한 경향을 나타내었다. 균열 발생 시간은 FA10, 20인 경우에 3.6, 25.2 시간 지연되었으며 최대 구속 변형률은 9.3, 7.3 $\mu\epsilon$ 감소하는 것으로 나타났다. 또한, Test 1, 2 모두 FA의 포졸란 반응에 의한 수화반응의 지연으로 건조수축에 의해 내부 강재의 구속 변형률이 급격히 증가하는 시점이 지연되는 경향을 보였으며, OPC에 비해 구속 변형률이 점진적으로 증가하는 것으로 나타났다.

4.5 구속응력과 비구속 건조수축의 비교

콘크리트가 점탄성 고체(visco-elastic solid)의 거동을 보이기 전에 발생한 수축은 구속응력을 유발하지 않으며 균열 발생에 영향을 미치지 않는다.^{4,17)} 하지만, 기존의 비구속 수축실험, 즉 자기수축과 건조수축 실험을 통해서 콘크리트의 강도발현, 균열강도 및 크리프 등의 영

(a) Test 1

(b) Test 2

Fig. 13 Restrained strain of the inner steel ring with fly ash

향을 고려할 수 없으며 균열에 영향을 미치는 수축량의 평가에 한계가 있다.

링-테스트는 콘크리트의 수축을 구속하는 내부 링을 강재로 사용하여 실제 철근콘크리트 구조물의 주요 구속요인인 강재 보강철근에 의한 구속거동을 잘 모사할 수 있다. 따라서, 이 연구에서는 식 (7)을 사용하여 계산한 구속응력과 건조수축을 비교하여 구속응력이 발생한 이후부터 균열 발생까지의 수축량을 상대적으로 비교, 분석하였다.

Fig. 14(a)는 W/B에 따른 구속응력과 건조수축의 비교 그래프이다. Fig. 12에서 보듯이, 구속응력이 급증하는 시간은 콘크리트 타설 이후 19.2시간으로 모두 동일하였지만 W/B가 감소할수록 초기 자기수축이 증가함에 따라 구속응력이 급증하는 시점과 균열이 발생하는 시점에서의 수축량은 증가하였다. 특히, UHSC의 경우 균열 발생 시 수축량의 대부분이 구속응력이 급증하기 전, 즉 초기에 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 14(b)는 FA에 따른 구속응력과 건조수축의 관계이다. FA는 초기 및 균열 발생 시의 수축, 인장강도를 감소시키는 것으로 나타났으며 그 영향은 FA의 치환율이 증가할수록 크게 나타났다. 그림에서 볼 수 있듯이 Test

(a)

(b)

Fig. 14 Relationship between restrained stress and free drying shrinkage with various W/B and fly ash of Test 1

1에서 FA10, 20은 초기 수축의 54%, 70.5%가 감소하였으며 인장강도는 7%, 11.6% 감소하는 것으로 나타났다.

W/B 및 혼화재의 치환여부에 따라서 콘크리트의 인장강도는 변하며 구속 변형률이 급속히 증가하는 구간에서, 인장강도의 영향을 제외한 구속 수축량(modified net shrinkage)의 상대적 비교를 위하여 다음의 식 (9)를 적용하였다.

$$\varepsilon_{mns} = \frac{\sigma_t^*}{\sigma_t} \varepsilon_{ns} \quad (9)$$

$$\sigma_t = \sigma_{cr} - \sigma' \quad (10)$$

여기서 ε_{mns} 는 인장강도의 영향을 제외한 수축량이며, ε_{ns} 는 구속 변형률이 급증하기 시작한 후부터 균열발생 시까지의 수축량, σ_{cr} 는 인장강도, σ' 는 구속 변형률이 급증하는 시점에서의 인장응력이다. σ_t^* 는 식 (10)을 통해 계산한 기준 시편(control specimen)의 인장응력을 의미한다.

Table 5에서 보듯이, Test 1의 경우 ε_{ns} , ε_{mns} 는 W/B 및 FA의 치환량이 클수록 증가하는 경향을 나타내었다. 그 이유는 수축 발생 속도가 감소하여 구속응력이 작용하는

Table 5 Calculated modified net shrinkage with different W/B and admixtures

Test	Mix	Net shrinkage, ε_{ns} ($\mu\epsilon$)	$\frac{\sigma_t^*}{\sigma_t}$	Modified net shrinkage, ε_{mns} ($\mu\epsilon$)
Test 1 (35 mm)	HSC*	140.50	1.00	140.50
	VHSC	134.00	1.03	138.02
	UHSC	116.50	0.84	97.86
	UHSC-FA10	137.50	0.80	110.0
	UHSC-FA20	151.50	0.82	124.23

*Control specimen of Test 1

시간이 증가하였고 인장강도가 감소하여 콘크리트의 인장 크리프가 증가하였기 때문에 판단된다. 실제로 W/B의 감소 및 FA의 치환에 따른 인장 크리프의 증가는 기존의 연구 결과^{12,18)}에 의해 보고된 바 있다.

Fig. 15는 콘크리트 링의 두께에 따른 내부 압력(P_i)을 나타낸다. 콘크리트 링의 두께가 증가함에 따라 최대 내부 압력은 증가하였으며 콘크리트의 균열 발생 시간은 지연되는 것으로 나타났다. FA에 따른 내부압력은 Test 1, 2 모두 치환량이 증가할수록 감소하였으며 균열 발생 시간도 지연되는 것으로 나타났다.

4.6 구속도

콘크리트 링의 두께가 상대적으로 작고 수축이 균등하게 발생한다고 가정하면 콘크리트의 수축, $\varepsilon_{sh}(t)$ 는 내부강재 링의 구속 변형률, $\varepsilon_{st}(t)$ 와 콘크리트의 탄성 변형률 $\varepsilon_e(t)$, 구속응력에 의한 콘크리트의 크리프 $\varepsilon_{cp}(t)$ 의 합과 같다.

$$\varepsilon_{sh}(t) = \varepsilon_{st}(t) + \varepsilon_e(t) + \varepsilon_{cp}(t) \quad (11)$$

만약 내부 강재 링에 의해 콘크리트가 완전히 구속된다고 가정하면, 이때 발생하는 구속 변형률 $\varepsilon_r(t)$ 는 다음

Fig. 15 Comparison of the interface pressure with different thickness of concrete ring

Fig. 16 Degree of restraint with various W/B, admixtures and thickness of concrete ring

과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_r(t) = \varepsilon_e(t) + \varepsilon_{cp}(t) \quad (12)$$

따라서 구속도(ψ)는 구속 변형률을 총 건조수축으로 나눈 것으로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\psi = \frac{\varepsilon_r(t)}{\varepsilon_{sh}(t)} = \frac{\varepsilon_{sh}(t) - \varepsilon_{st}(t)}{\varepsilon_{sh}(t)} = 1 - \frac{\varepsilon_{st}(t)}{\varepsilon_{sh}(t)} \quad (13)$$

Fig. 16은 W/B 및 혼화재, 콘크리트 링의 두께에 따른 구속도를 나타낸다. 보는 바와 같이 동일한 두께의 내부 강재 링을 사용하였음에도 불구하고 W/B가 감소할수록 구속도는 커지는 경향을 나타내었다. 이는 W/B가 감소할수록 콘크리트의 탄성계수가 증가하였기 때문이며¹¹⁾ 대략 3~8%의 차이를 보였다. 또한, 콘크리트 링의 두께가 감소함에 따라 구속도는 8% 증가하였다. FA는 구속도를 감소시키는 경향이 있으며 콘크리트의 두께가 증가할수록 크게 나타났다. 따라서 수축에 의해 구속되는 콘크리트의 두께(피복두께 등) 증가와 FA의 사용은 수축에 의해 발생하는 균열을 방지하는데 효과적일 것으로 판단된다.

5. 결 론

W/B 및 FA, BFS의 치환량을 변수로 한 초고강도 콘크리트의 구속, 비구속 수축 실험 결과를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) W/B가 감소함에 따라 콘크리트의 자기수축 및 건조수축, 압축강도는 증가하였다. 특히, 수축량은 W/B가 25%에서 16%로 감소할 때 급증하는 것으로 나타났다. W/B가 감소할수록 내부 강재의 구속에 의한 균열은 초기에 취성적으로 발생하였다.
- 2) W/B가 16%인 초고강도 콘크리트의 경우, BFS 및 FA는 자기수축, 건조수축을 감소시키며 초기 수축

발생을 지연시키는 것으로 나타났다. 특히, BFS의 경우 건조수축의 감소량은 공극 채움 효과에 의한 수분증발의 방해로 인해 자기수축에 비해 크게 나타났다. FA는 구속 수축 실험 결과 균열 발생 시기를 지연시키는 것으로 나타났다. 하지만, 인장균열 발생 시 응력은 약간 감소하는 것으로 나타났다.

- 3) 링-테스트에 의한 구속도는 W/B 및 콘크리트의 두께가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 또한, FA는 구속도를 감소시키는 경향을 보였으며 콘크리트의 두께가 증가할수록 그 영향은 크게 나타났다. 따라서 동일한 구속 조건하에서 콘크리트 두께의 증가와 FA의 사용은 콘크리트 구조물의 균열 발생 가능성을 효과적으로 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이다(No. 2007-0056796).

참고문헌

1. Hossain, A. B. and Weiss, W. J., "The Role of Specimen Geometry and Boundary Conditions on Stress Development and Cracking in the Restrained Ring Test," *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 1, 2006, pp. 189~199.
2. Kovler, K. and Zhutovsky, S., "Overview and Future Trends of Shrinkage Research," *Materials and Structures*, Vol. 39, No. 9, 2006, pp. 827~847.
3. Wiegink, K., Marilunte, S., and Shah, S. P., "Shrinkage Cracking of High-Strength Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 5, 1996, pp. 409~415.
4. Lee, K. M., Lee, H. K., Lee, S. H., and Kim, G. Y., "Autogenous Shrinkage of Concrete Containing Granulated Blast-Furnace Slag," *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 7, 2006, pp. 1279~1285.
5. Igarashi, S., Bentur, A., and Kovler, K., "Autogenous Shrinkage and Induced Restraining Stresses in High-Strength Concretes," *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 11, 2000, pp. 1701~1707.
6. Chindaprasirta, P., Homwuttiwong, S., and Sirivivatnanon, V., "Influence of Fly Ash Fineness on Strength, Drying Shrinkage and Sulfate Resistance of Blended Cement Mortar," *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 7, 2004, pp. 1087~1092.
7. Mehta, P. K., *Durability of Concrete in Marine Environment-A Review, Performance of Concrete in Marine Environment*, SP-65, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1980, pp. 1~15.
8. 정형철, 민경환, 양준모, 윤영수, "결합재 구성에 따른 50MPa급 고강도 콘크리트의 수축 변형 특성," *구조물진단학회지*, 13권, 3호, 2009, pp. 93~100.
9. Weiss, W. J., Yang, W., and Shah, S. P., "Influence of Spec-

- imens Size/Geometry on Shrinkage Cracking of Rings,” *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 126, No. 1, 2000, pp. 93~101.
10. Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., *Theory of Elasticity*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1970, pp. 65~71.
 11. Hossain, A. B. and Weiss, W. J., “Assessing Residual Stress Development and Stress Relaxation in Restrained Concrete Ring Specimens,” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, No. 5, 2004, pp. 531~540.
 12. See, H. T., Attiogbe, E. K., and Miltenberger, M. A., “Shrinkage Cracking Characteristics of Concrete Using Ring Specimens,” *ACI Materials Journal*, Vol. 100, No. 3, 2003, pp. 239~245.
 13. Zhang, M. H., Tam, C. T., and Leow, M. P., “Effect of Water-to-Cementitious Materials Ratio and Silica Fume on the Autogenous Shrinkage of Concrete,” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 33, No. 10, 2003, pp. 1687~1694.
 14. 류두열, 민경환, 이재성, 김대훈, 윤영수, “고강도 및 초고강도 콘크리트의 자기수축 특성 평가,” 대한토목학회 학술대회 논문집, 2009, pp. 1338~1341.
 15. Wiegink, K. and Shah, S. P., “Shrinkage Cracking of High-Strength Concrete,” *ACI Material Journal*, Vol. 93, No. 5, 1996, pp. 409~415.
 16. Tao, Z. and Weizu, Q., “Tensile Creep due to Restraining Stresses in High-Strength Concrete at Early Ages,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 3, 2006, pp. 584~591.
 17. Bentur, A., “Comprehensive Approach to Prediction and Control of Early-Age Cracking in Cementitious Materials,” in: F.-J. Ulm, Z. P. Bazant, F. H. Wittmann (Eds.), *Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Other Quasi-Brittle Materials, Proc. of Sixth Int. Conf., Elsevier Science Ltd.*, 2001, pp. 589~598.
 18. 박병관, 배장춘, 김수영, 김복규, 한민철, 한천구, “고로슬래그 미분말 및 플라이애쉬를 복합사용한 고성능 콘크리트의 기초 및 크리프 특성,” 한국콘크리트학회 봄 학술대회 논문집, 20권, 2호, 2008, pp. 717~720.

요 약 콘크리트의 수축으로부터 발생하는 구속응력은 균열을 유발하고, 그에 따라 황산염 및 염화이온의 침투로 인한 철근의 부식으로 인해 콘크리트 구조물의 내구성을 저하시킨다. 특히, W/B가 감소할수록 균열 발생 가능성이 크며, 따라서 고강도 콘크리트(HSC), 초고강도 콘크리트(UHSC)의 수축 및 균열 거동의 정확한 이해와 평가가 필요하다. 하지만, 기존의 비구속 수축 실험은 콘크리트의 강도발현, 응력의 이완, 균열강도 및 구속도 등을 고려할 수 없으며, 균열 발생에 영향을 미치는 수축량의 평가에 한계가 있었다. 따라서 이 연구에서는 비구속 수축실험과 구속 수축실험(ring-test)을 통하여 W/B(30, 25, 16%) 및 혼화재에 따른 HSC, UHSC의 수축, 균열 거동을 평가하였다. 실험 결과, 자기수축 및 총 건조수축은 W/B가 클수록, 플라이애쉬(FA) 및 고로슬래그미분말(BFS)의 치환율이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났으며, W/B의 증가 및 콘크리트 두께의 증가, FA의 혼입은 균열 발생을 효과적으로 억제하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 초고강도 콘크리트, 수축, 구속응력, 플라이애쉬, 고로슬래그미분말