초고성능 섬유보강 콘크리트(UHPFRC)의 재료 특성 및 예측모델: (II) 구속 수축 특성 평가 및 구속도 예측

Properties and Prediction Model for Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC):(II) Evaluation of Restrained Shrinkage Characteristics and Prediction of Degree of Restraint

류두열* · 박정준** · 김성욱*** · 윤영수****

Yoo, Doo-Yeol · Park, Jung-Jun · Kim, Sung-Wook · Yoon, Young-Soo

Abstract

In this study, to evaluate the shrinkage behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) under restrained condition, restrained shrinkage test was performed according to ring-test mostly used at home and abroad. Ring-test was performed with the various thicknesses and radii of inner steel ring to give different degree of restraint. Free shrinkage and tensile tests were carried out simultaneously to estimate the degree of restraint, stress relaxation, and shrinkage cracking potential. Test results indicated that the average steel strain and residual tensile stress were reduced as the thicker inner steel ring was used, whereas degree of restraint was increased. The steel strain, residual tensile stress and degree of restraint were hardly affected by the size of radius of inner ring. In the case of all ring specimens, shrinkage crack did not occur because the residual tensile stress was lower than the tensile strength. About 39~65% of the elastic shrinkage stress was relaxed by the sustained interface pressure, and the maximum relaxed stress was increased as the thicker inner ring was applied. Finally, the degree of restraint with age was predicted by performing non-linear regression analysis, and it was in good agreement with the test results.

Keywords : *ultra high performance fiber reinforced concrete, shrinkage, ring-test, stress relaxation, degree of restraint*

요 지

본 연구에서는 초고성능 섬유보강 콘크리트(Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete, UHPFRC)의 구속 상태에서의 수축 거동을 평가하고자 국내·외에서 가장 보편적으로 사용되는 링-테스트(ring-test)를 이용하여 구속 수축 실험을 수행하였다. 특히, 다양한 구속도에서의 수축 거동을 평가하기 위하여 내부 강재 링의 두께와 내부 반경을 달리하여 실험을 수행하였으며, 자유 수축과 인장강도 실험을 수반하여 구속도 및 응력 이완, 수축 균열 가능성 등을 복합적으로 평가하였다. 실험 결과 내부 링의 두께가 증가할수록 내부 링의 평균 변형률과 잔류 인장응력은 감소하였으며, 반면에 구속도는 증가하는 경향을 보였다. 내부 링의 반경에 따라서는 변형률 및 잔류 인장응력, 구속도의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 모든 시험체에서 잔류 인장응력이 인장강도에 비해 작은 것으로 나타났으며, 수축 균열은 발생하지 않았다. 지속적으로 작용하는 계면 구속 하중에 의해 탄성 수축 응력의 약 39~65%가 이완되는 것으로 나타났으며, 최대 이완 응력은 내부 링의 두께가 두꺼울수록 증가하는 것으로 나타났다. 마지막으로 본 연구에서는 비선형 회귀분석을 수행하여 재령에 따라 변하는 구속도를 예측하였으며, 실험 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 초고성능 섬유보강 콘크리트, 수축, 링-테스트, 응력 이완, 구속도

1. 서 론

최근 건설 구조물의 장대화 및 대형화, 고층화됨에 따라 콘크리트의 성능도 크게 향상되고 있다. 콘크리트는 역학적 성능과 내구성이 우수하고, 타 건설재료에 비해서 경제성이

뛰어나기 때문에 건설 재료로써 가장 보편적으로 사용되어 왔다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 중량 대비 강도가 낮기 때문에 최근 토목분야에서 시공실적이 급증하고 있는 장경간 교량의 바닥판에는 적용이 어려운 문제점이 있다. 타 건설재료에 비해 콘크리트가 갖는 우수한 경제성과 내구성

*고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정 (E-mail : dooyoul@korea.ac.kr)

**정회원 · 한국건설기술연구원 인프라구조연구실 수석연구원 (E-mail : jjpark@kict.re.kr)

***정회원 · 한국건설기술연구원 인프라구조연구실 연구위원 (E-mail : swkim@kict.re.kr)

****정회원 · 교신저자 · 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (E-mail : ysyoon@korea.ac.kr)

은 분명 장경간 교량의 건설 시 큰 장점으로 작용할 수 있다. 특히, 최근 일부 대학 및 연구기관에서 개발된 초고성능 섬유보강 콘크리트(Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete, UHPFRC)는 내구성 및 연성이 우수할 뿐만 아니라 강도발현이 뛰어나 구조부재 적용 시 단면을 감소시켜 자중을 크게 줄일 수 있다. 따라서 기존 콘크리트의 낮은 비강도 특성으로 인해 적용이 어려웠던 장경간 교량의 바닥 판에도 콘크리트를 적용할 수 있게 되었으며, 이의 실용화를 위한 관련 연구가 활발히 진행되고 있다(김성욱 등, 2006; FHWA, 2006; Perry and Seibert, 2008).

UHPFRC는 물-결합재비(Water-Binder ratio, W/B)를 20%까지 낮추고, 고분말의 혼화재료와 고강도 강섬유를 혼입하여 강도와 인성을 모두 향상시킨 재료이다. 그러나 기존 콘크리트에 비해 낮은 W/B를 갖고, 다량의 혼화재료를 혼입하며 굵은 골재를 사용하지 않기 때문에 큰 자기수축을 나타내고, 강도의 증가로 구조부재 적용 시 단면을 상당히 줄이기 때문에 초기 재령에서 수축 균열 발생의 위험성이 크다. 김성욱 등(2011)의 연구결과에 의하면 UHPFRC의 경우 28일 재령에서 최대 자기수축 변형률이 약 $829 \mu\epsilon$ 으로 상당히 크게 나타나며, 또한 Yoo *et al.*(2011)은 W/B가 20% 이하인 초고강도 콘크리트(Ultra High Strength Concrete, UHSC)의 경우에 60일 재령에서의 최대 자기수축 변형률이 약 $800 \mu\epsilon$ 으로 나타난다고 보고하였다.

콘크리트의 수축 균열 거동은 재령에 따른 수축 발현 속도 및 크기뿐만 아니라 강도 발현, 응력 이완(stress relaxation), 구속도(degree of restraint) 등에 영향을 받기 때문에 그 거동이 매우 복잡하다. Altoubat and Lange(2001)의 실험결과에 의하면 경화된 콘크리트에 발생하는 수축응력의 약 50%가 인장 크리프에 의해 이완되는 것으로 나타났다. See *et al.*(2003)은 총 자유 수축량의 약 50%가 인장 크리프와 같다고 실험을 통해 규명하였다. 이렇듯 상기의 특성들을 고려할 수 없는 자유 수축 실험만을 통해서 수축 균열 위험성을 평가할 수 없으며, 반드시 구속 수축 실험과 역학적 특성 평가가 수반되어야 한다(See *et al.*, 2003; 류두열 등, 2011).

그러므로 본 연구에서는 UHPFRC의 구속 수축 거동을 평가하기 위하여 내부 링의 두께와 반경을 변수로 하여 링-테스트(ring-test)를 수행하였으며, 동시에 동일한 크기의 단면과 노출 조건을 갖는 시편의 자유 수축 실험을 수행하였다. 또한, 인장강도와 콘크리트 링에 발생하는 잔류 인장응력을 비교하여 균열 가능성(cracking potential)을 평가하였으며 이완되는 응력을 정량적으로 산정하였고, 비선형 회귀분석을 토대로 재령에 따라 변하는 구속도 및 내부 강제 링의 변형률을 예측하였다.

2. 연구 동향

콘크리트의 강도를 증가시키는 방법은 W/B를 낮추거나, 또는 비표면적이 큰 충전재, 혼화재료를 혼입할 수도 있고, 고강도 인공 및 자연 골재의 사용 등 매우 다양하다. 그 중에서도 W/B를 낮추거나, 고분말의 충전재를 혼입하는 방법은 비교적 쉽게 콘크리트의 강도를 증가시킬 수 있으며 다

수의 연구자들에 의해서 사용되고 있다. 그러나 낮은 W/B와 고분말 충전재의 사용은 콘크리트가 충분히 경화하기 이전, 즉 초기 재령에서 큰 자기수축을 발생시키며, 수축 균열의 위험성을 증가시킨다.

국외의 경우에는 콘크리트의 고강도화가 진행되면서 발생하는 이러한 수축 균열 문제의 위험성을 인식하고, 1980년대부터 콘크리트의 구속 수축 거동 평가를 위한 다양한 연구를 수행해 오고 있다. Hossain and Weiss(2004)는 콘크리트 링에 균등 건조수축이 발생하고, 탄성 거동을 한다고 가정하여 “shrinkage-fit” 이론에 근거하여 탄성 수축 응력 예측식을 제안하였으며, 또한 내부 강제 링의 변형을 측정을 통해서 콘크리트에 발생하는 잔류 인장응력 예측식을 제안하였다. Moon and Weiss(2006)는 자유 수축 변형률에 단면의 위치에 따라 변하는 상대습도 변화량을 반영하여, 콘크리트 링의 단면에 발생하는 부등 건조수축에 의한 응력 변화를 고려할 수 있도록 앞선 예측식을 수정 제안하였다. See *et al.*(2003)은 물-시멘트비(Water-Cement ratio, W/C)와 수축저감제(Shrinkage Reducing Admixture, SRA)의 혼입여부를 변수로 하여 링-테스트를 수행하였으며, 수축 균열 거동뿐만 아니라 인장 크리프 변형률 및 비크리프, 크리프 계수 등을 정량적으로 산정하여, W/C가 낮아수록 초기 수축 균열이 발생한다는 것과 SRA의 수축 균열 저감효과에 대해서 평가하였다. 이 외에도 섬유 및 골재의 종류, 콘크리트 강도, 노출 조건 등에 따른 다양한 구속 수축 실험이 수행되었으며(Filho *et al.*, 2005; Gesoglu *et al.*, 2004; Hossain and Weiss, 2006), 최근에는 일부 대학 및 연구기관에서 UHPFRC의 구속 수축 거동을 평가하기 위한 관련 실험 연구를 진행하고 있다(Cauberg *et al.*, 2011).

국내의 경우에는 일부 연구자들에 의해 2000년도 초반부터 관련 연구가 수행되고 있다. 김규용 등(2009)은 판상-링형 실험을 토대로 PVA 섬유를 혼입한 섬유보강 콘크리트의 구속 수축 균열 거동을 평가하였다. Min *et al.*(2010)과 류두열 등(2010)은 KS F 2595의 건조수축 균열실험(한국표준협회, 2009) 및 링-테스트를 수행하여 W/B가 감소할수록 수축 균열에 더 취약하다는 결론을 도출하였으며, 이는 포졸란반응을 하는 플라이애쉬(Fly Ash, FA)의 사용으로 수축 균열 저항성을 향상시킬 수 있다고 하였다. Kwon *et al.*(2011)은 일반 콘크리트의 수축 균열 거동을 비선형 유한요소 해석 프로그램을 활용하여 예측하는 기술에 대한 연구를 수행하였으며, 김성배 등(2009)은 건조수축 균열실험을 통하여 황토와 재생 PET 섬유가 콘크리트의 건조 수축 균열에 미치는 영향을 평가하였다. Park *et al.*(2012)은 기존의 건조수축 균열실험을 UHPFRC에 적합하도록 단면을 수정하여 구속 수축 실험을 수행하였으며, 팽창제(Expansive Admixture, EA)와 SRA의 혼입에 따른 수축 균열 저감 효과를 평가하였다. 또한, 류두열 등(2011)은 링-테스트를 이용하여 EA와 SRA의 혼입여부를 변수로 한 UHPFRC의 구속 수축 실험을 수행하였으며, 내부 링의 수축 구속에 의해서 총 자유 수축량의 약 50%가 인장 크리프 변형률로 나타난다고 보고하였다. 상기의 UHPFRC의 구속 수축 실험 연구들의 주요 목적은 혼화재료의 혼입에 따른 잔류응력과 수축 균열의 저감효과를 평가하기 위한 것으로써 극 초기 재령의

거동은 고려하지 않고 있다. 그러나 UHPFRC의 경우 수축 균열의 주요원인 중 하나가 거꾸집인 것을 고려할 때 거꾸집 탈형 이전인 극 초기 재령에서의 구속 수축 거동의 평가가 필요하다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 극 초기 재령에서부터 UHPFRC의 인장강도와 탄성 수축응력 및 잔류응력을 측정하고 서로 비교하여, 응력 이완 및 균열 가능성 등의 구속 수축 거동을 평가하였다.

3. 실험 연구

3.1 재료 및 배합비

본 실험에는 1종 포틀랜드 시멘트와 0.5 mm 이하의 입경을 갖는 잔골재, 입경이 2 μm 이고 SiO_2 를 96% 함유하고 있는 충전재, 비표면적이 200,000 cm^2/g 인 실리카흙(Silica Fume, SF)을 사용하였다. UHPFRC의 배합에 사용된 W/B는 20%이며, 워커빌리티의 확보를 위하여 폴리카르본산계 고성능 감수제 1.2%와 인장강도 및 연성을 향상시키기 위하여 일자형 고강도 강섬유(밀도 7.8 g/cm^3 , 인장강도 2,500 MPa, 길이 13 mm, 직경 0.2 mm)를 전체 부피의 2% 혼입하였다. 배합에 사용된 구성 재료들의 화학적 구성 성분과 배합 비율은 선행된 연구와 동일하다(류두열 등, 2012).

3.2 시편 제작 및 실험 방법

3.2.1 기초 물성 실험

UHPFRC가 충분한 워커빌리티를 갖는지 평가하기 위하여 KS L 5111의 규정대로 플로우를 측정하였다(한국표준협회, 2007). 또한, 응결 특성을 평가하기 위해 배합에서 섬유를 제외하여 모르타르를 제조하였으며, $\phi 150 \times 160$ mm의 크기의 플라스틱 용기에 담아 KS F 2436의 규정에 준하여 응결실험을 수행하였다(한국표준협회, 2007). 여기서, UHPFRC의 표면이 급격히 건조되는 현상을 방지하기 위해 액상형 파라핀 오일을 표면에 약 5~10 mm 도포하고 실험을 수행하였다. 인장강도 및 인장 탄성계수는 극 초기 재령 인장강도 측정 장비와 dog-bone 실험법을 이용하여 측정하였으며, 장비 및 시편의 상세는 선행된 연구와 동일하다(류두열 등, 2012).

3.2.2 링-테스트(ring-test)

류두열 등(2011)에 의하면 UHPFRC의 우수한 인장강도 발현 특성과 초기 재령에서의 인장 크리프 효과로 인하여 AASHTO PP34-98 규정에서 제안하고 있는 링-테스트와 동일하게 실험을 수행 할 경우, 수축 균열을 유도할 수 없는 것으로 나타났다(AASHTO, 1998). 그러므로 본 연구에서는 구속도를 향상시키기 위한 방법으로 콘크리트 링의 두께(t_c)를 기존의 35 mm에서 20 mm로 감소시키고, 내부 강재 링의 두께 및 반경을 다양하게 적용하여 실험을 수행하였다. 내부 링의 반경에 따른 명칭부여 체계는 그림 1(b)의 하단에 나타내었다. 또한, 콘크리트 링의 단면에 균등 건조 수축을 유도하기 위하여 링-테스트의 높이를 기존의 152 mm에서 75 mm로 감소시켰으며, 알루미늄 부착 테이프를 사용하여 콘크리트 링의 원주면을 밀봉하고 상·하부 면을 노출시

(a) 몰드

R-NS: $r_{is}=127\text{mm}$, $r_{os}=145.5\text{mm}$ ($t_s=18.5\text{mm}$), R-NL: $r_{is}=152.5\text{mm}$, $r_{os}=171\text{mm}$ ($t_s=18.5\text{mm}$),
R-MS: $r_{is}=127\text{mm}$, $r_{os}=152.5\text{mm}$ ($t_s=25.5\text{mm}$), R-ML: $r_{is}=152.5\text{mm}$, $r_{os}=178\text{mm}$ ($t_s=25.5\text{mm}$),
R-TS: $r_{is}=115.5\text{mm}$, $r_{os}=145.5\text{mm}$ ($t_s=30\text{mm}$)

(b) 링-테스트 크기 및 노출 조건

그림 1. 링-테스트 실험체 상세

켜 실험을 진행하였다(Hossain and Weiss, 2004). 본 연구에서 사용한 링-테스트의 몰드 및 시편의 상세는 그림 1과 같다. 우선, 내·외부 링을 설치하기 전에 하부 목재판에 테프론 시트(teflon sheet)를 깔아주어 콘크리트와 하부 목재판의 마찰에 의한 구속력 발생을 제거하였다. 그 후에 내·외부 링을 설치하고 내부 링의 중앙에 총 네 개의 강재 표면을 게이지와 한 개의 thermocouple을 부착하였으며, 콘크리트 타설 직후부터 내부 강재의 온도와 변형률을 모두 측정하였다. 타설 직후에는 콘크리트 표면에 비닐(vinyl)을 밀착시켜 수분증발을 차단하였으며, 타설 후 24시간 이후에 몰드와 함께 제거하였다. 본 실험은 온도 $23 \pm 1^\circ\text{C}$, 습도 $60 \pm 5\%$ 인 항온항습실에서 수행하였다.

3.2.3 부분 노출 자유 수축 실험

링-테스트의 결과와 비교하기 위하여, $20 \times 75 \times 285$ mm 크기의 각주형 몰드에 아령형 매립게이지와 thermocouple을 매설하여 UHPFRC의 자유 수축 변형률 및 온도 변화를 측정하였다. 몰드와 콘크리트의 마찰에 의한 구속을 최소화하기 위하여 테프론 시트를 몰드의 내부에 깔아주었으며, 콘크리트 타설 직후에는 표면이 급격히 건조되는 현상을 방지하기 위하여 비닐을 표면에 밀착시켜 수분증발이 발생하지 않도록 하였다. 콘크리트 타설 후 24시간 이후에 몰드를 탈형하였으며, 콘크리트 링과 동일한 부피 대 노출면적의 비(Volume-to-exposed Surface area ratio, V/S)를 만족시켜주기 위해서 그림 2와 같이 시편의 상·하면과 옆면을 알루미늄 부착 테이프를 사용하여 밀봉하고, 링-테스트와 동일한 항온항습조건에서 실험을 수행하였다.

그림 2. 부분 노출 자유 수축 실험체 상세

그림 3. 내부 강재 링의 평균 변형률

4. 실험 결과 및 분석

4.1 링-테스트

그림 3은 재령에 따른 내부 강재 링의 변형률을 나타낸다. 내부 링의 두께가 가장 얇은 R-NS의 경우 재령 7일에서 약 $-41 \mu\epsilon$ 으로 가장 큰 변형률을 나타내었으며, R-MS와 R-TS는 약 $-27 \mu\epsilon$, $-16 \mu\epsilon$ 으로 나타나 내부 링의 두께가 증가할수록 변형률은 감소하는 경향을 보였다. 반면에 내부 링의 두께는 R-NS 및 R-MS 시편과 동일하고, 반경을 증가시킨 경우인 R-NL과 R-ML은 7일 재령에서 약 $-38 \mu\epsilon$, $-28 \mu\epsilon$ 의 변형률을 나타내었으며, 따라서 내부 링의 반경에 따른 변형률의 차이는 미미한 것으로 나타났다. 동일한 두께의 콘크리트 링과 노출 조건을 적용하였음에도 불구하고 내부 링의 두께가 증가할수록 변형률이 감소한 이유는 콘크리트의 수축에 의해 발생하는 계면 구속 하중은 동일하되 반경에 내부 링의 두께가 증가하여 내부 링에 발생하는 응력이 감소

(a) 초기 재령에서의 수축 및 온도, 응결 특성 비교

(b) 자유 수축 및 온도 변화 (7일 재령)

그림 4. 부분 노출된 콘크리트 시편의 내부 온도 및 총 자유 수축 변형률

하였기 때문이다. 반대로 내부 링의 반경에 따라서는 변형률의 차이가 발생하지 않은 이유는 내부 강재 및 콘크리트 링의 반경이 증가하더라도 내부 링의 단위 면적당 작용하는 계면 구속 하중은 동일하기 때문인 것으로 판단된다.

4.2 부분 노출 자유 수축

링-테스트 결과와 비교하기 위하여 동일한 크기의 단면과 V/S를 갖는 자유 수축 시편을 제작하여 실험을 수행하였다 (그림 2). 그림 4(a)에서 볼 수 있듯이 타설 직후부터 변형률 및 온도 변화를 측정하였으며, 수축 응력 발현 시점 (time-zero)을 기점으로 온도와 변형률의 거동이 달라지고 수축 변형률은 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 초기 재령의 수축 거동을 살펴보면, 그림에서와 같이 크게 3단계로 구분된다. (A)구간은 콘크리트가 응결하기 이전에 외기 온도와 콘크리트의 수화열에 의해서 시편 내부의 온도와 변형률이 서로 유사한 경향을 보이며, 약간의 팽창변형률이 발생하는 것으로 나타났다. (B)구간에서는 시편 내부의 온도가 증가하는데 반해 콘크리트는 급격히 수축하였으며, 온도와 변형률의 거동이 상이해지는 시점이 time-zero와 유사한 것으로 나타났다. (C)구간에서 수축변형률이 급격히 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 콘크리트가 경화하여 수축을 자기구속(self-restraint)하기 때문인 것으로 판단되었다. 여기서, time-zero는 응결침에 걸리는 관입 저항력이 1.5 MPa일 때의 시간이다. 그림 4(b)와 같이 최대 온도는 약 1일 재령에서 23.9°C 로 나타났으며, 최대 변형률은 7일 재령에서 $-761 \mu\epsilon$ 으로 나타났다.

4.3 링-테스트에 의한 잔류 인장응력과 인장강도의 비교

그림 5는 링-테스트의 응력 개념도이다. 콘크리트의 수축이 내부 강재 링에 의해 구속되어 발생하는 계면 하중(P_i)은 내부 강재에는 압축력으로 작용하며, 반대로 콘크리트 링에는 동일한 크기의 인장력을 유발시킨다. 따라서 콘크리트가 균질하고 선형 거동을 보이며 균등 건조수축이 발생한다고 가정할 경우, 계면 구속 하중은 측정된 내부 강재 링의 변형률을 통해서 다음의 식 (1)과 같이 계산되어질 수 있다 (Hossain and Weiss, 2004).

$$P_i = \frac{(r_{os}^2 - r_{is}^2)}{2r_{os}^2} E_{st} \epsilon_{st} \quad (1)$$

여기서 r_{is} , r_{os} 는 내부 강재 링의 내부, 외부 반경이고, ϵ_{st} 와 E_{st} 는 내부 강재 링의 변형률과 탄성계수이다.

원주 방향 잔류 인장응력(σ_{res})의 최대값은 내부 강재 링과 콘크리트 링의 표면에서 발생하게 되며 원주 방향

(a) 외부 콘크리트 링 (b) 내부 강재 링

그림 5. 링-테스트의 계면 하중 및 구속 응력 개념도

그림 6. 내부 강재 링의 수축 구속에 의한 잔류 인장응력과 인장 강도의 비교

응력(σ_θ)에 식 (1)의 계면 구속 하중과 반경방향 임의의 값 r 에 r_{os} 를 대입할 경우, 다음의 식 (2)와 같이 내부 강재 링의 탄성계수 및 측정된 변형률의 곱으로써 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{res.} = \frac{(r_{os}^2 - r_{is}^2)(r_{ic}^2 + r_{oc}^2)}{2r_{os}^2 (r_{oc}^2 - r_{ic}^2)} E_{st} \varepsilon_{st} \quad (2)$$

여기서 r_{ic} , r_{oc} 는 외부 콘크리트 링의 내부, 외부 반경이다.

그림 6은 식 (2)를 통해 계산한 잔류 인장응력과 실험을 통해 측정된 인장강도, 선행 연구에서 제안한 인장강도 예측 모델 식 (3)의 비교이다.

$$f_t(t) = f_{t28} \exp\{-a[\ln(1+(t-t_i))]^{-b}\} \quad (3)$$

여기서 f_{t28} 은 28일 재령에서의 인장강도(MPa), t_i 는 수축 응력 발현 시점($PR=1.5$ MPa)이며, 회귀상수 a , b 는 0.204, 1.292를 적용하였다.

보는바와 같이 UHPFRC의 인장강도에 비해 내부 강재 링의 수축 구속에 의해 발생하는 잔류 인장응력은 상당히 작은 것으로 나타났으며, 따라서 모든 시편에서 수축 균열은 발생하지 않았다. 내부 강재 링의 두께가 18.5 mm와 25.5 mm인 R-NS 및 R-NL, R-MS, R-ML의 경우에는 기존의 연구에서처럼 잔류 인장응력이 서로 유사한 것으로 나타났다(Hossain and Weiss, 2004). 그러나 R-TS의 경우에는 잔류 인장응력이 감소하는 것으로 나타났으며, 그 이유는 동일한 계면 구속 하중이 작용하였음에도 불구하고 내부 강재 링의 두께가 두꺼워 초기 재령에서의 인장 크리프가 증가했기 때문으로 판단된다. 즉, 내부 강재 링의 두께가 두꺼울수록 콘크리트가 충분히 경화하지 않은 초기 재령에서 내부 강재 링을 변형시키지 못하고 이완되는 수축량이 증가하게 되며, 이는 인장 크리프와 응력 이완량을 증가시킨다.

그림 7은 식 (4)를 토대로 계산한 균열 가능성(cracking potential, Θ_{cr})을 나타낸다.

$$\Theta_{cr} = \frac{\sigma_{res.}}{f_t(t)} \quad (4)$$

여기서 $f_t(t)$ 는 재령에 따른 콘크리트의 인장강도(MPa)를 의미한다.

재령 7일에서의 균열 가능성은 R-TS가 43%로 가장 낮게 나타났으며, 그 외의 시편(R-NS, R-NL, R-MS, R-ML)의 경우에는 약 62~70%로 나타났다.

그림 7. 내부 강재 링의 수축 구속에 의한 균열 가능성

4.4 응력 이완 효과

기존의 Weiss *et al.*(2000)은 내부 강재 링의 강성이 충분히 크고 콘크리트의 수축에 의해 변형하지 않는다고 가정하여 탄성 수축 응력을 계산하였다. 그러나 상기의 식은 그림 3에서 볼 수 있듯이 실제로 내부 강재 링이 콘크리트의 수축에 의해 변형하는 것을 모사하지 못하며, 따라서 Hossain and Weiss(2004)는 콘크리트 링의 수축에 의해 발생하는 내부 강재 링의 변형을 고려한 ‘shrinkage-fit’ 이론에 근거하여 탄성 수축 응력 계산식을 제안하였다.

만약, 내부 강재 링이 콘크리트의 수축을 구속하지 않는다고 가정하면 반경방향으로의 콘크리트 링의 수축량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta U_{sh} = r_{ic} \Delta \varepsilon_{sh} \quad (5)$$

여기서, $\Delta \varepsilon_{sh}$ 는 콘크리트의 자유수축 증가량이다.

그러나 본래 내부 강재 링의 외부 반경(r_{os})과 외부 콘크리트 링의 내부 반경(r_{ic})은 적합조건에 의해 서로 같아야 한다. 그러므로 가상의 계면 하중(P_{el})이 내부 강재 링에게는 압축을 외부 콘크리트 링에게는 팽창을 발생시킨다고 한다면 내부 강재 링과 콘크리트 링의 변형($U_{s|_{r_{os}}}$, $U_{c|_{r_{ic}}}$)은 계면 압력의 함수로써 나타낼 수 있고, $U_{s|_{r_{os}}} - U_{c|_{r_{ic}}} = \Delta U_{sh}$ 의 조건에 의해 계면 하중은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta P_{el.} = - \frac{\Delta \varepsilon_{sh} E_t}{\frac{E_t [(1+\nu_s)r_{is}^2 + (1-\nu_s)r_{os}^2]}{E_{st} (r_{os}^2 - r_{is}^2)} + \frac{[(1-\nu_c)r_{os}^2 + (1+\nu_c)r_{oc}^2]}{(r_{oc}^2 - r_{os}^2)}} \quad (6)$$

여기서 E_t 는 콘크리트의 탄성계수이며, ν_s 와 ν_c 는 강재 링과 콘크리트의 푸아송비이다.

콘크리트 링에 발생하는 원주방향 인장응력은 식 (7)과 같다(Timoshenko and Goodier, 1987). 여기서, 원주방향 최대 인장응력은 강재 링과 콘크리트가 접하는 면에서 발생하며($r=r_{os}$), 따라서 식 (6)을 식 (7)에 대입하고, 임의의 r 에 r_{os} 를 적용하면 콘크리트 링의 최대 탄성 수축 응력은 식 (8)과 같이 표현된다.

$$\Delta \sigma_{el.}(r) = \Delta P_{el.} \frac{r_{os}^2}{r_{oc}^2 - r_{os}^2} \left(1 + \frac{r_{oc}^2}{r^2} \right) \quad (7)$$

$$\Delta \sigma_{el.} = - \frac{\Delta \varepsilon_{sh} E_t \frac{r_{os}^2 + r_{oc}^2}{r_{oc}^2 - r_{os}^2}}{\frac{E_t [(1+\nu_s)r_{is}^2 + (1-\nu_s)r_{os}^2]}{E_{st} (r_{os}^2 - r_{is}^2)} + \frac{[(1-\nu_c)r_{os}^2 + (1+\nu_c)r_{oc}^2]}{(r_{oc}^2 - r_{os}^2)}} \quad (8)$$

그림 8. 탄성 수축 응력(σ_{el})과 잔류 인장응력(σ_{res}), 이완 응력(σ_{rel})의 비교

그림 8은 식 (8)를 통해 계산한 탄성 수축 응력 증분량 ($\Delta\sigma_{el}$)을 합한 결과(σ_{el})와 식 (2)를 통해 계산된 잔류 인장 응력(σ_{res})의 비교이다. 시간 단계별 UHPFRC의 탄성계수는 선행 연구에서 제안된 다음의 식 (9)를 적용하여 계산하였으며, 회귀상수 a 와 b 는 0.096, 1.598을 적용하였다.

$$E_t(t) = E_{t28} \exp\{-a[\ln(1+(t-t_i))]^{-b}\} \quad (9)$$

여기서 E_{t28} 은 28일 재령에서의 탄성계수(GPa)이다.

탄성 수축 응력은 내부 강제 링의 두께가 증가할수록 구속도가 증가하기 때문에 크게 나타났다(Hossain and Weiss, 2004). 또한, 탄성 수축 응력은 응력 이완 효과에 의해서 감소하는 것으로 나타났으며, 이완되는 응력은 콘크리트 타설 후 약 16시간까지 급격히 증가하다가 그 이후에는 약간 증가하거나 일정한 값에 수렴하는 경향을 보였다. 이는 콘크리트가 경화하여 수축을 자기 구속하는 시점, 즉 자유 수축량의 증가가 급격히 감소하는 시점과 유사하며, 응력 이완량의 증가가 급격히 감소하는 이유는 상기의 시점에서부터 콘크리트의 자유 수축량이 감소하고, 또한 콘크리트가 충분한 강성을 확보했기 때문으로 판단된다. 재령 7일에서의 탄성 수

표 1. t_s/t_c 에 따른 응력 이완량 및 이론적 균열 시기

Specimen	Ratio of steel and concrete ring thickness (t_s/t_c)	Max. σ_{rel} (MPa)	$\sigma_{rel}/\sigma_{el} \times 100(\%)$	Theoretical cracking time (day)
R-NS	0.925	4.848	38.8	4.6
R-NL	0.925	5.534	44.5	4.6
R-MS	1.275	6.220	48.2	4.1
R-ML	1.275	5.969	46.2	4.1
R-TS	1.500	8.488	64.8	3.9

축 응력은 평균적으로 약 12.8 MPa이었으며, 링-테스트에 의해 측정된 잔류 인장응력보다 약 1.5배에서 2.6배 큰 것으로 나타났다. 최대 이완 응력은 표 1에서와 같이 내부 강제 링과 외부 콘크리트 링의 두께 비(t_s/t_c)가 클수록 증가하는 경향을 보였다. 그 이유는 동일한 탄성계수를 갖는 내부 강제 링의 두께가 증가 할 경우, 내부 링의 변형을 유발시키는데 필요한 계면 하중이 증가하게 되어 초기 재령에서 이완되는 응력이 증가하기 때문으로 판단된다. 또한, t_s/t_c 가

클수록 이완되는 응력 대 탄성 수축 응력의 비(σ_{rel}/σ_{el})는 증가하였으며, 인장강도와 탄성 수축 응력이 같아지는 이론적인 균열 시점은 초기에 발생하는 것으로 나타났다.

4.5 구속도

링-테스트에서 콘크리트의 총 자유 수축량은 내부 강제 링의 변형률($\varepsilon_{st}(t)$)과 탄성 변형률($\varepsilon_e(t)$), 그리고 크리프 변형률($\varepsilon_{cr}(t)$)의 합으로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_{sh}(t) = \varepsilon_{st}(t) + \varepsilon_e(t) + \varepsilon_{cr}(t) \quad (10)$$

여기서, 만약 내부 강제 링에 의해 콘크리트의 수축이 완전히 구속될 경우 내부 링의 변형률은 영(零)이며, 콘크리트의 구속 변형률($\varepsilon_r(t)$)은 총 자유 수축량과 동일하게 된다. 그러나 그림 3에서와 같이 내부 링은 콘크리트의 수축에 의해 변형하며, 이는 구속되지 않은 수축이기 때문에 최종적으로 구속 변형률은 총 자유 수축에서 내부 강제 링의 변형률을 뺀 값으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_r(t) = \varepsilon_{sh}(t) - \varepsilon_{st}(t) = \varepsilon_e(t) + \varepsilon_{cr}(t) \quad (11)$$

그러므로 구속도(ψ)는 구속 변형률을 총 자유 수축 변형률로 나눈 값이며 다음의 식 (12)와 같다.

$$\psi = \frac{\varepsilon_r(t)}{\varepsilon_{sh}(t)} = 1 - \frac{\varepsilon_{st}(t)}{\varepsilon_{sh}(t)} \quad (12)$$

그림 9는 t_s/t_c 에 따른 구속도를 나타낸다. 여기서, 일부 데이터($t_s/t_c=0.463, 0.617$)는 기존의 실험결과를 인용하였다(한국건설기술연구원, 2011). 그림에서 볼 수 있듯이 재령별 구속도는 t_s/t_c 와 선형 관계인 것으로 나타났다.

UHPRC의 경우 낮은 W/B를 갖고 시멘트보다 비표면적이 큰 고분말 혼화재료(SF, 충전재)를 혼입하기 때문에 내부 구조가 상당히 밀실하고 초기 재령에서 수축 및 강도가 급

그림 9. t_s/t_c 와 재령별 구속도의 관계

격하게 발현된다. 그러므로 본 연구에서는 콘크리트의 수축 뿐만 아니라 강도발현에도 큰 영향을 받는 구속도를 예측하기 위하여 수축 증가율과 강도 발현 모두 일정하게 수렴한다고 판단되는 7일 재령에서 측정된 구속도를 토대로 회귀 분석을 수행하였으며, 식 (13)과 같이 7일 재령에서의 구속도(ψ_7)와 시간함수($\beta(t)$)의 곱으로써 정의하였다.

$$\psi(t) = \psi_7 \times \beta(t) \quad (13-1)$$

$$\psi_7 = 0.045(t_s/t_c) + 0.91 \quad (13-2)$$

$$\beta(t) = \left\{ a \left[1 - \left(\frac{7-t_i}{t-t_i} \right)^b \right] \right\} \quad (13-3)$$

표 2. 식 (13)의 비선형 회귀상수

Specimen	t_s/t_c	a	b	R^2
R-NS	0.925	0.1858	-0.0907	0.96393
R-NL	0.925	0.0731	-0.3107	0.97903
R-MS	1.275	0.0455	-0.3778	0.99311
R-ML	1.275	0.0454	-0.3809	0.99034
R-TS	1.500	0.0256	-0.8516	0.88935

그림 10. 구속도 실측값과 예측결과의 비교

그림 11. 내부 강재 링의 평균 변형률 실측값과 예측결과의 비교

여기서 a 와 b 는 회귀상수이다.

각 시편별 회귀상수 및 결정계수(R^2)는 표 2에 정리하였다. 회귀상수 a 는 t_s/t_c 가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났으며, b 의 절대값은 반대로 증가하는 경향을 보였다. 또한, 모든 시편에서 R^2 값이 약 0.89 이상으로 비교적 정확하게 예측이 가능한 것으로 나타났다.

모든 시편에서의 재령에 따른 최대 구속도는 0.94 이상(즉, 내부 강재 링의 변형률이 자유 수축의 6% 이하)인 것으로 나타났으며, 식 (13)을 적용하여 재령에 따라 변하는 구속도를 합리적으로 예측할 수 있었다(그림 10).

그림 11은 수축 응력 발현 시점부터 측정한 내부 강재 링의 실제 변형률과 식 (13)을 토대로 예측한 예측결과의 비교이다. 보는바와 같이 모든 시편에서 실험값과 예측결과가 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 식 (2)와 (10)을 이용할 경우 잔류 인장응력과 인장 크리프 또한 예측이 가능할 것으로 판단되었다. 예측결과의 정확도를 수치적으로 평가하기 위하여 본 연구에서는 식 (14)의 에러 상수(error coefficient, M)를 적용하였다(Mazloom, 2007). 여기서, 재령별 실험값 및 예측결과의 데이터 수는 모두 동일하게 적용하였다.

$$M = \frac{1}{S_{ave}(t, t_0)} \sqrt{\frac{\sum [S_0(t, t_0) - S_p(t, t_0)]^2}{n-1}} \quad (14)$$

여기서 $S_0(t, t_0)$ 와 $S_p(t, t_0)$ 는 내부 강재 링의 변형률 실측값 및 예측값이며, $S_{ave}(t, t_0)$ 는 실측값의 평균 변형률, n 은 데이터 수이다.

Mazloom(2007)에 의하면 에러 상수가 0.15보다 작을 경우 합리적인 예측결과를 나타내는 것으로 판단할 수 있다. 그림 11에서 볼 수 있듯이 에러 상수는 최소 0.032에서 최대 0.14의 값을 나타내었으며, 따라서 식 (13)과 자유수축 실험 결과를 통하여 합리적으로 내부 링의 변형률 예측이

가능할 것으로 판단되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 내부 링의 두께 및 반경을 변수로 하여 링-테스트를 수행하고 UHPFRC의 구속 상태에서의 잔류 인장 응력과 응력 이완, 구속도를 비교, 평가하였으며, 실험 결과를 토대로 구속도 예측 모델을 제안하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 동일한 두께의 콘크리트 링과 노출 조건을 적용하였음에도 불구하고 내부 강재 링의 두께가 증가할수록 측정되는 내부 강재 링의 평균 변형률은 감소하였으며, 반대로 내부 강재 링 반경에는 영향이 없는 것으로 나타났다.
2. 콘크리트 링과 동일한 크기의 단면 및 V/S를 갖는 시편을 제작하여 자유 수축 실험을 수행한 결과, 수축 변형률은 수축 응력 발현 시점을 기점으로 급격히 증가하는 경향을 보였으며, 최대 온도는 약 1일 재령에서 23.9°C로 나타났고, 최대 변형률은 7일 재령에서 -761 $\mu\epsilon$ 로 나타났다.
3. 내부 강재 링의 구속에 의한 UHPFRC의 잔류 인장응력은 인장강도에 비해 상당히 작은 것으로 나타났으며, 모든 시편에서 수축 균열은 발생하지 않았다. 내부 강재 링의 두께가 가장 두꺼운 R-TS 시편에서는 초기 재령에서의 인장 크리프가 증가하여 잔류 인장응력은 오히려 감소하는 경향을 보였다.
4. 계면 구속 하중은 콘크리트에 지속적인 인장응력을 유발시키며, 따라서 재령이 증가함에 따라 콘크리트 링에 발생하는 인장응력은 이완된다. UHPFRC의 탄성 수축 응력은 재령 7일에서 평균적으로 약 12.8 MPa인 것으로 나타났으며, 잔류 인장응력보다 약 1.5배에서 2.6배 큰 것으로 나타났다. 또한, 최대 이완 응력은 내부 링의 두께가 두꺼

울수록 증가하는 경향을 보였다.

5. 구속도는 내부 링의 두께가 두꺼울수록 증가하는 경향을 보였으며, 내부 반경에는 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 재령별 구속도는 내부 강재 링과 외부 콘크리트 링의 두께 비(t_s/t_c)와 선형관계인 것으로 나타났으며, 본 연구에서는 재령에 따라서 변하는 구속도를 시간함수와 7일 재령에서의 구속도의 곱으로써 제안하였다. 회귀상수들은 t_s/t_c 에 따라 일정하게 증가 또는 감소하는 경향을 보였으며, 모든 시편에서 R^2 값이 0.89 이상으로 비교적 정확하게 예측이 가능한 것으로 나타났다. 또한, 식 (13)을 토대로 내부 링의 변형률을 예측하였으며, 실험값과 잘 일치하는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2012R1A2A1A05026406)과 한국건설기술연구원 주요 연구사업인 성능 기반형 UHPC 제조 및 부재 제작 시방 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

김규용, 남정수, 최형길, 김영선, 이의배, 이대희(2009) 콘크리트의 구속수축균열 특성평가를 위한 판상-링형 시험방법의 적정성 평가, **대한건축학회지**, 대한건축학회, 제25권 제12호, pp. 89-96.

김성배, 김장호, 한병구, 홍건호, 송진규(2009) 재생 PET 섬유가 혼입된 황토 콘크리트의 크리프 거동과 균열저항성에 관한 실험적 연구, **한국콘크리트학회 논문집**, 한국콘크리트학회, 제21권 제3호, pp. 265-273.

김성욱, 강수태, 한상목(2006) 초고성능 시멘트 복합재의 특성 및 활용 현황, **한국콘크리트학회지**, 한국콘크리트학회, 제18권 제1호, pp. 16-21.

김성욱, 최성, 이광평, 박정준(2011) 초고성능 콘크리트의 자기수축 특성, **한국콘크리트학회 논문집**, 한국콘크리트학회, 제23권 제3호, pp. 295-301.

류두열, 민경환, 양준모, 윤영수(2010) 초고강도 콘크리트의 수축균열 특성 및 구속도 평가, **한국콘크리트학회 논문집**, 한국콘크리트학회, 제22권 제5호, pp. 641-650.

류두열, 박정준, 김성욱, 윤영수(2011) 초고성능 시멘트 복합체의 초기 재령 구속 수축 및 인장 크리프 특성, **한국콘크리트학회 논문집**, 한국콘크리트학회, 제23권 제5호, pp. 581-590.

류두열, 박정준, 김성욱, 윤영수(2012) 초고성능 섬유보강 콘크리트의 재료 특성 및 예측모델: (1) 응결 및 수축 특성과 인장 거동 평가, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제32권 제5A호, pp. 307-315.

한국건설기술연구원(2011) **하이브리드 사장교용 초고성능 콘크리트 개발**, 연구보고서, 건기연, 2011-081.

한국표준협회, KS L 5111(2007) 시멘트 시험용 플로 테이블, 기술표준원, pp. 1-5.

한국표준협회, KS F 2436(2007) 관입 저항침에 의한 콘크리트의 응결 시간 시험방법, 기술표준원, pp. 1-13.

한국표준협회, KS F 2595(2009) 콘크리트의 건조수축 균열 시험방법, 기술표준원, pp. 1-13.

Altoubat, S.A. and Lange, D.A. (2001) Creep, shrinkage, and cracking of restrained concrete at early age, *ACI Materials Journal*, Vol. 98, No. 4, pp. 323-331.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (1998) Standard practice for estimating the crack tendency of concrete, AASHTO PP34-98, Washington, D.C.

Cauberg, N., Remy, O., Permentier, B., Pierard, J., and Itterbeeck, P.V. (2011) Shrinkage behavior and cracking tendency of UHPC, *The 9th Symposium on High Performance Concrete*, Rotorua, New Zealand, p. 144.

Federal Highway Administration (FHWA) (2006) Material property characterization of ultra high performance concrete, Federation Highway Administration Report, US Department of Transportation, VA.

Filho, R.D.T., Ghavami, K., Sanjuán, M.A., and England, G.L. (2005) Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, No. 5, pp. 537-546.

Gesoglu, M., Özturan, T., and Güneyisi, E. (2004) Shrinkage cracking of lightweight concrete made with cold-bonded fly ash aggregates, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 7, pp. 1121-1130.

Hossain, A.B. and Weiss, W.J. (2004) Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, No. 5, pp. 531-540.

Hossain, A.B. and Weiss, W.J. (2006) 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, pp. 189-199.

Kwon, S.H., Ferron, R.P., Akkaya, Y., and Shah, S.P. (2007) Cracking of fiber-reinforced self-compacting concrete due to restrained shrinkage, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 1 No. 1, pp. 3-9.

Mazloom, M. (2007) Estimating long-term creep and shrinkage of high-strength concrete, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 30, No. 4, pp. 316-326.

Min, K.H., Jung, H.C., Yang, J.M., and Yoon, Y.S. (2010) Shrinkage characteristics of high strength concrete for large underground space structures, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 25, No. 2, pp. 108-113.

Moon, J.H. and Weiss, J. (2006) Estimating residual stress in the restrained ring test under circumferential drying, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 28, No. 5, pp. 486-496.

Park, J.J., Yoo, D.Y., Kim, S.W., and Yoon, Y.S. (2012) Drying shrinkage cracking characteristics of ultra-high performance fiber reinforced concrete with expansive and shrinkage reducing agents, *Magazine of Concrete Research*, in press.

Perry, V.H. and Seibert, P.J. (2008) The use of UHPFRC (Ductal) for bridges in north america: the technology, applications and challenges facing commercialization, *Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, Mar., pp. 815-822.

See, H.T., Attiogbe, E.K., and Miltenberger, M.A. (2003) Shrinkage cracking characteristics of concrete using ring specimens, *ACI Materials Journal*, Vol. 100, No. 3, pp. 239-245.

Timoshenko, S P. and Goodier, J.N. (1987) *Theory of Elasticity*, Mc-Graw-Hill, New York.

Weiss, W.J., Yang, W., and Shah, S.P. (2000) Influence of specimen size/geometry on shrinkage cracking of rings, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 126, No.13, pp. 93-101.

Yoo, D.Y., Min, K.H., Lee, J.H., and Yoon, Y.S. (2011) Autogenous shrinkage of concrete with design strength from 60-120N/mm². *Magazine of Concrete Research*, Vol. 63, No. 10, pp. 751-761.

(접수일: 2012.6.19/심사일: 2012.7.30/심사완료일: 2012.8.17)