

초고강도 강섬유 보강 시멘트 복합체의 건조수축에 관한 연구

Drying Shrinkage of Ultra High Strength Steel-Fiber Reinforced Cementitious Composites

강 수 태* 조 창 빈** 박 종 섭** 류 금 성* 김 성 욱*** 김 병 석****

Kang, Su Tae Joh, Changbin Park, Jong Sup Ryu, Gum Sung Kim, Sung Wook Kim, Byung Suk

ABSTRACT

When UHSFRC is applied to structures, it can be expected that it shows excellent performance in a point of constructability and load capacity. However, its rich mix can cause some problems concerning the long-term behavior such as shrinkage and creep. Therefore it is inevitably needed to investigate its long-term behavior in order to apply it to structures safely. This study is dealing with the drying shrinkage of UHSFRC. UHSFRC shows relatively fast drying shrinkage in the early exposed ages and slow moisture diffusion caused by compact microstructure of the material. It was found that The KCI model to predict the drying shrinkage did not properly represent these properties of UHSFRC. therefore a modified drying shrinkage model applicable to UHSFRC, which has different shrinkage properties from that of normal concrete, was proposed

요 약

UHSFRC(Ultra High Strength Steel-Fiber Reinforced Cementitious Composites)를 구조부재에 적용할 경우, 시공성능 및 내하성능에 있어서 탁월한 효과가 있을 것으로 예상된다. 하지만 부배합의 특성 상 수축 및 크리프와 같은 장기거동 특성에 대해서는 구조부재 적용에 있어 장애요인으로 인식되고 있다. 따라서 UHSFRC를 구조부재에 적용할 경우 건조수축 및 크리프 변형 등 장기거동에 대한 검토가 반드시 필요할 것이다. 본 연구에서는 UHSFRC의 건조수축 특성에 대한 분석결과를 나타내었다. 초기 노출재령에서 상대적으로 빠르게 발생하는 UHSFRC의 건조수축 특성과 재료의 치밀한 조직 구성으로 인해 수분의 이동이 훨씬 느리게 발생하는 점 등으로 인해 국내 설계기준에서 제시하고 있는 건조수축모델을 UHSFRC에 적용할 경우, 수축거동 특성을 정확하게 반영하지 못하는 것으로 나타났으며, 따라서 일반 콘크리트와는 다른 UHSFRC의 수축특성을 반영한 건조수축 모델을 제안하였다.

* 정회원, 한국건설기술연구원 구조재료연구실 연구원

** 정회원, 한국건설기술연구원 구조시스템연구실 선임연구원

*** 정회원, 한국건설기술연구원 구조재료연구실 책임연구원

**** 정회원, 한국건설기술연구원 구조시스템연구실 책임연구원

1. 서론

UHSFRC는 높은 유동성을 나타내고 압축강도 및 인장강도 등 강도특성이 매우 우수한 재료이다. 따라서 UHSFRC를 구조부재에 적용할 경우, 시공성능 및 내하성능에 있어서 탁월한 효과가 있을 것으로 예상된다. 하지만 부배합의 특성 상 수축 및 크리프와 같은 장기거동 특성에 대해서는 구조부재 적용에 있어 장애요인으로 인식되고 한다. 따라서 UHSFRC를 구조부재에 적용할 경우 건조수축 및 크리프 변형 등 장기거동에 대한 검토가 반드시 필요할 것이다. 그러나 아직까지 UHSFRC의 자기수축, 건조수축, 크리프 등 장기거동에 대한 명확한 규명이 이루어지지 않고 있다. 일반 콘크리트의 경우 크리프 계수가 약 3에서 4의 값을 보이는 반면, UHSFRC에서는 크리프 계수가 크게 줄어든다. 그리고 UHSFRC는 아주 낮은 값의 물결합재비를 가지므로 건조수축량이 아주 작게 나타난다. 반면 자기수축량은 크게 나타나는데 그 값은 수 백 $\mu\epsilon$ 정도를 나타낸다. 그러나 표준고온양생을 실시한 이후에는 거의 발생하지 않는다. KICT에서는 2000년대 초반부터 수행된 기관고유사업인 'Bridge200-교량의 내구성 향상 기술 개발'[2006]과제를 수행하면서 압축강도가 200MPa에 이르는 UHSFRC를 개발하였으며, 이에 대한 기본적인 특성 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 기 수행한 기관고유사업 '교량의 내구성 향상 기술 개발' 연구보고서[2006]의 장기거동에 대한 실험결과를 바탕으로 결과 분석을 실시하고, JSCE의 설계·시공지침(안)과의 비교 분석을 실시하였으며, 이를 근거로 KICT에서 개발한 UHSFRC의 수축 및 크리프에 대한 설계 가이드라인을 제시하고자 하였다. 그 연구의 일환으로 본 연구에서는 건조수축에 대한 분석을 수행하였다.

2. 실험방법 및 결과

기 수행한 실험[KICT, 2006]의 실험방법과 실험결과는 다음과 같다. UHSFRC의 건조수축 실험은 KS F 2424: 모르타 및 콘크리트의 길이변화 시험방법에 따라 다이얼게이지 방법으로 측정하였다. 건조수축에 의한 길이변화 측정용 시험체는 100×100×400mm의 몰드를 이용하여 시험체의 양단에 길이변화 측정용 게이지를 설치하여 제작하였다. 양생은 20±1℃에서 습윤양생을 1일간 실시하여 90±2℃에서 3일간 증기양생 후, 기건상태(온도 20±1℃, 습도 65±5%)에 노출시켜 정해진 재령에서 측정하였다. 90일까지 측정된 실험결과[KICT, 2006]에 따르면 UHSFRC의 건조수축은 섬유를 혼입하지 않은 경우에 약 150 $\mu\epsilon$ 까지 나타내었고, 섬유를 혼입한 경우에는 약 100 $\mu\epsilon$ 까지 나타내었다. 이와 같은 결과는 프랑스나 일본 등의 설계기준 및 가이드라인에서 언급하고 있는 실험값보다 훨씬 큰 것으로 나타났으며, 미국의 FHWA의 결과에 비해서도 약간 큰 것으로 나타났다. 그림 1은 섬유를 혼입하였을 경우와 혼입하지 않았을 경우의 UHSFRC의 건조수축변형률을 비교하여 나타낸 것이다.

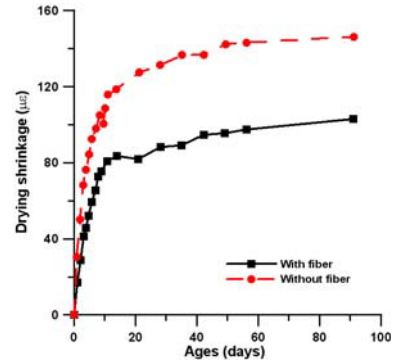


그림 1 섬유혼입에 따른 UHSFRC 건조수축

혼입하지 않았을 경우의 UHSFRC

3. 결과분석

KICT[2006]의 연구결과에 따르면 UHSFRC의 건조수축의 경우, 표준고온양생을 실시한 후의 개념 건조수축계수(최대건조수축변형률을 의미)은 약 $\epsilon_{sho}=130\mu\epsilon$ 을 보인다. 반면 JSCE에서 제시하고 있는 건조수축 실험결과에서는 약 50 $\mu\epsilon$ 을 나타내고 있다. 일반적인 고강도 콘크리트 또는 섬유보강 콘크리트

트의 건조수축에 비해 훨씬 작은 값을 보이지만, KICT의 실험 결과는 JSCE의 실험결과와는 다소 상이한 결과를 보임을 알 수 있다. 그림 2는 KICT의 실험결과와 JSCE에서 인용하고 있는 실험결과를 비교하여 나타낸 것이다.

현재 국내 콘크리트 구조설계기준[2003]에서는 건조수축에 대해 CEB-FIP 설계기준[1990]을 따르고 있으며, 건조수축에 관한 식은 다음의 식 1과 같다.

$$\epsilon_{sh}(t, t_s) = \epsilon_{sh0} \beta_s(t - t_s) \quad (1)$$

여기서, ϵ_{sh0} 는 개념건조수축계수를 나타내고, β_s 는 시간에 따른 건조수축의 발현을 나타내는 계수, t 는 콘크리트의 재령(일), 그리고 t_s 는 건조수축 및 팽창이 시작되는 콘크리트의 재령(일)을 의미한다. 시간에 따른 건조수축의 발현을 나타내는 계수, β_s 는 식 2로 표현된다.

$$\beta_s(t - t_s) = \left[\frac{(t - t_s)/t_1}{350(h/h_0)^2 + (t - t_s)/t_1} \right]^{0.5} \quad (2)$$

위 식에서 h 는 개념 부재치수(mm)로서 $2A_c/u$ 로 표현되며, A_c 는 단면적을 의미하고, u 는 단면의 둘레길이를 나타낸다. 그리고 h_0 는 100mm이다. t_1 은 시간에 대한 함수를 무차원으로 표현하기 위해 도입된 항으로, 재령 1일을 나타낸다.

식 1에서 개념건조수축계수는 일반적으로 콘크리트의 압축강도의 함수로 주어진다. 그리고 개념건조수축계수는 상대습도, 시멘트 종류, 노출 외기온도 등의 영향을 고려하고 있으며, 양생온도의 영향은 따로 고려하지 않고 있다. 그리고 노출 외기온도의 영향은 일반적으로 80°C까지만 고려하는 것으로 명시하고 있으며, 그 이상에서는 실험에 근거하는 것으로 명시하고 있다.

한편, ACI[1982]의 건조수축 모델식에서는 양생온도의 영향을 고려하고 있으며, 다음의 식 3의 형태로 표현된다.

$$\epsilon_{sh}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{\alpha + (t - t_s)} \epsilon_{sh0} \quad (3)$$

여기에서 α 의 값을 7일 수중양생의 경우에는 35를, 1~3일간의 증기양생인 경우에는 55를 사용할 것을 제시하고 있다.

그림 3은 국내 콘크리트 구조설계 기준에서 제시하고 있는 건조수축 모델을 적용한 결과와 UHSFRC의 건조수축 실험결과를 비교하여 나타낸 것이다. 그림 3을 살펴보면 현재 구조설계 기준에서 제시하고 있는 건조수축 모델은 초기재령에서 급속하게 일어나는 수축변형률을 제대로 표현하지 못하는 것으로 나타났다. 그림 3에서 보면 개념건조수축계수를 $130\mu\epsilon$ 으로 했을 때, 수축변형률의 발현속도가 실험결과에 비해 훨씬 느리게 나타났다. 그리고 초기 건조수축 발현거동을 적절히 표현하기 위해 식 2를 다음의 식 4 또는 5의 형태로 수정하였을 경우에는 실험결과와 잘 일치하는 것

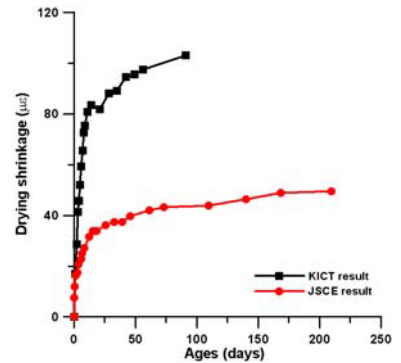


그림 2 KICT와 JSCE의 건조수축 비교

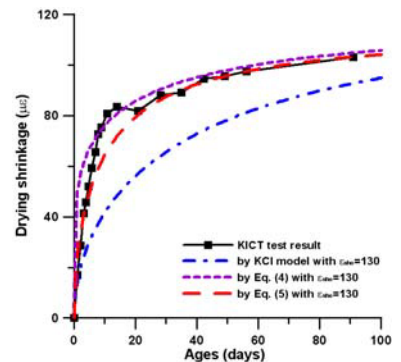


그림 3 KCI 모델과 실험결과의 비교

으로 나타났다. 식 4는 건조수축의 발현속도를 t 의 함수의 지수를 변화시켜 수정한 형태이며, 식 5는 UHSFRC의 치밀한 조직 구성으로 인해 수분의 이동이 훨씬 느리게 발생하는 현상을 개념 부재 치수의 계수값에 반영하여 나타난 형태이다.

$$\beta_s(t-t_s) = \left[\frac{(t-t_s)/t_1}{350(h/h_0)^2 + (t-t_s)/t_1} \right]^{0.2} \quad (4)$$

$$\beta_s(t-t_s) = \left[\frac{(t-t_s)/t_1}{87.5(h/h_0)^2 + (t-t_s)/t_1} \right]^{0.5} \quad (5)$$

그림 4는 ACI 모델을 적용하였을 경우와 실험결과를 비교하여 나타난 것으로, 양생온도의 영향을 고려하여 α 값을 35와 55를 적용한 경우 모두 실험결과와 상당한 차이를 나타내었다. 초기의 급격하게 발생하는 수축현상을 잘 표현하지 못하고 있다. 따라서 ACI 모델보다는 CEB-FIP 모델 또는 국내 구조설계 기준의 건조수축 모델이 UHSFRC에 대해 더 잘 맞으며, 식 4 또는 식 5와 같은 수정된 모델 식은 UHSFRC의 수축변형률을 매우 잘 표현하고 있다. 그림 5는 식 4 또는 식 5를 JSCE의 실험결과와 비교하여 나타난 것으로 재령에 따른 건조수축변형률을 잘 표현하고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 UHSFRC의 건조수축 특성에 대한 분석결과를 나타내었다. 초기 노출재령에서 상대적으로 빠르게 발생하는 UHSFRC의 건조수축 특성과 재료의 치밀한 조직 구성으로 인해 수분의 이동이 훨씬 느리게 발생하는 점 등으로 인해 국내 설계기준에서 제시하고 있는 건조수축모델을 UHSFRC에 적용할 경우, 수축거동 특성을 정확하게 반영하지 못하는 것으로 나타났으며, 따라서 일반 콘크리트와는 다르게 나타나는 UHSFRC의 수축특성을 반영한 건조수축 모델을 제안하였다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 한국건설기술연구원의 기관고유사업인 ‘하이브리드 사장교용 초고성능 콘크리트 개발’에 관한 일련의 연구로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ultra High Performance Fiber-reinforced Concretes, BFUP Groups, AFGC/SETRA, 2002.
2. Recommendations for Design and Construction of Ultra High-Strength Fiber-Reinforced Concrete Structures, -Draft, JSCE, 2004.
3. B. A. Graybeal, Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete, FHWA-HRT-06-103, August, 2006, USA.
4. 한국콘크리트학회, 콘크리트 구조설계기준 해설, 한국콘크리트학회, 2003.
5. Comite Euro Internatioal Du Beton, CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford, London, 1991.
6. American Concrete Institute, "Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures", ACI-209R-82, ACI Committee 209, Detroit, 1982.

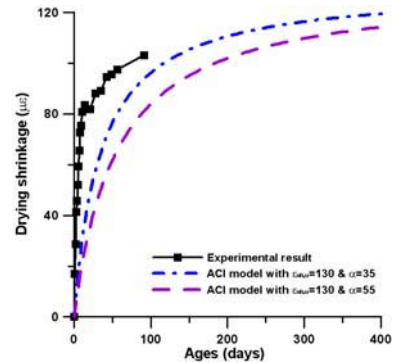


그림 4 ACI 모델과 실험결과와의 비교

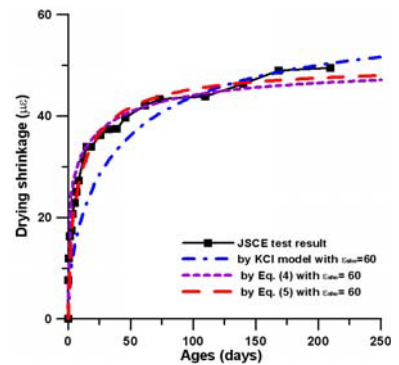


그림 5 수정된 건조수축 모델식과 JSCE 실험결과와의 비교