

초고강도 강섬유 보강 시멘트 복합체의 자기수축 모델식에 관한 연구

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

강 수 태* 박 종 섭** 조 창 빈** 박 정 준* 고 경 택*** 김 병 석****

Kang, Su Tae Park, Jong Sup Joh, Changbin Park, Jung Jun Koh, Gyung Taek Kim, Byung Suk

ABSTRACT

Most of shrinkage is mainly caused by autogenous shrinkage in Ultra high strength steel-fiber reinforced cementitious composites(UHSFRC). water to binder ratio is very low, about 0.2. It occurs faster hydration and cause a large amount of autogenous shrinkage in early ages. the large autogenous shrinkage can cause harmful cracks in a structure and deteriorate the designed structural performance. therefore it is very important to predict the autogenous shrinkage accurately. The study about the autogenous shrinkage of UHSFRC was carried out in this paper. through comparing with JSCE recommendations for UHSFRC, it was found out that UHSFRC in this study showed higher autogenous shrinkage than that of JSCE. And Applicability of early proposed models by some researchers was also investigated. the analytical results let us know that Miyazawa's model showed the best agreement with the experimentally obtained autogenous shrinkage of UHSFRC.

요 약

UHSFRC의 수축은 대부분 자기수축에 의해 발생한다. UHSFRC는 물결합재비가 0.2정도로 매우 작고, 단위 결합재량이 상당히 많고 초기 수화진행 속도가 매우 빨리 진행되어 자기수축(autogenous shrinkage)이 매우 크게 발생한다. 초기재령에 자기수축이 크게 발생할 경우, 구조물의 변형 또는 균열이 발생하여 본래의 성능을 발휘하지 못할 수도 있다. 따라서 자기수축을 고려한 설계가 이루어져야 하며 따라서 자기수축에 대한 정확한 예측이 매우 중요하다. 본 논문에서는 UHSFRC의 자기수축에 대한 연구를 수행하고 JSCE 설계·시공지침(안)에서 제시하고 있는 UHSFRC의 연구결과와 비교 분석하였으며, 그 결과 JSCE의 UHSFRC에 비해 상대적으로 큰 자기수축을 보임을 알 수 있었다. 그리고 기존의 자기수축 모델을 이용하여 UHSFRC에 대한 적합성 여부를 분석하였으며, 그 결과 Miyazawa의 모델식이 가장 잘 재령에 따른 자기수축을 잘 예측하는 것으로 나타났다.

* 정회원, 한국건설기술연구원 구조재료연구실 연구원

** 정회원, 한국건설기술연구원 구조시스템연구실 선임연구원

*** 정회원, 한국건설기술연구원 구조재료연구실 책임연구원

**** 정회원, 한국건설기술연구원 구조시스템연구실 책임연구원

1. 서론

UHSFRC의 수축은 대부분 자기수축에 의해 발생한다. UHSFRC는 물결합재비가 0.2정도로 매우 작고, 단위 결합재량이 상당히 많고 초기 수화진행 속도가 매우 빨리 진행되어 자기수축(autogenous shrinkage)이 매우 크게 발생한다. 물론 초기에 대부분의 수축이 발생하기 때문에 제조과정에 구속이 없다면 크게 문제가 발생하지 않지만, 구속조건에서는 초기재령에 자기수축이 크게 발생할 경우, 구조물의 변형 또는 균열이 발생하여 본래의 성능을 발휘하지 못할 수도 있다. 따라서 자기수축을 고려한 설계가 이루어져야 하며 이를 위해서는 우선적으로 자기수축에 대한 정확한 예측이 매우 중요하다. 일본 JSCE에서는 이형철근을 사용할 경우에는 자기수축으로 인해 균열이 발생할 수 있으므로 주의해야 한다고 언급하고 있다. 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, 또한 KICT에서 개발한 UHSFRC에 대해 기존의 여러 자기수축 모델의 적합성을 평가하였다.

2. 실험방법 및 결과

자기수축은 매립형 콘크리트 게이지를 이용하여 측정하였다. KICT[2006]에서는 자기수축과 건조수축을 개별적으로 측정하였으며, 자기수축에 대한 실험결과는 고온양생을 실시한 경우와 그렇지 않은 경우에 대해 그림 1과 같다. 한편 JSCE에서는 매립게이지를 이용하여 고온 양생 중 및 고온 양생 후에 대해 전체수축량을 측정하였고, 고온양생을 실시하지 않은 경우에 대해서도 전체수축량을 측정하였으며, 자기수축만을 분리하여 측정하지는 않았다. 그림 2는 JSCE에서 인용하고 있는 전체수축에 대한 실험결과를 나타낸 것이다. JSCE의 실험결과 중 고온양생 중의 수축변형률이 대부분 자기수축이라고 가정할 때, KICT의 자기수축과 JSCE의 자기수축량 사이에 상당한 차이를 보인다. JSCE의 경우, 약 $450\mu\epsilon$ 을 나타내는 반면, KICT의 UHSFRC는 약 $800\mu\epsilon$ 의 자기수축량을 나타내어 상대적으로 상당히 큰 값의 자기수축을 발생하는 것으로 보인다.

3. 기존 자기수축 모델의 적합성 평가

콘크리트의 자기수축을 예측하기 위한 기존 모델은 시멘트 및 결합재의 종류, 물-결합재비 및 온도의 영향 등을 변수로 하는 Miyazawa et al[2001] 모델, 물-시멘트비에 기초한 Jonasson 모델[2000] 등이 있으며, 콘크리트의 28일 압축강도에 따른 수축 모델인 CEB-FIP 모델[1999]을 적용할 수도 있다. UHSFRC에 대한 자기수축 모델로는 A. Loukili의 모델[1996]이 있다.

Miyazawa et al[2001]의 모델은 아래의 식 1에서 식 4와

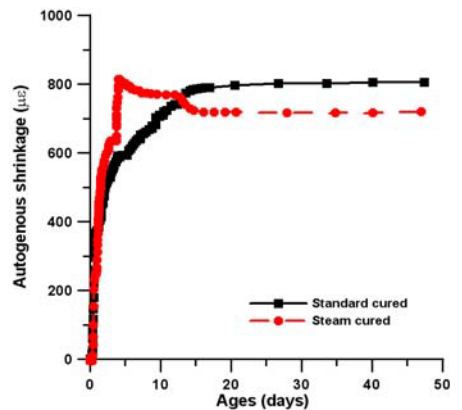


그림 1 UHSFRC의 자기수축 실험결과

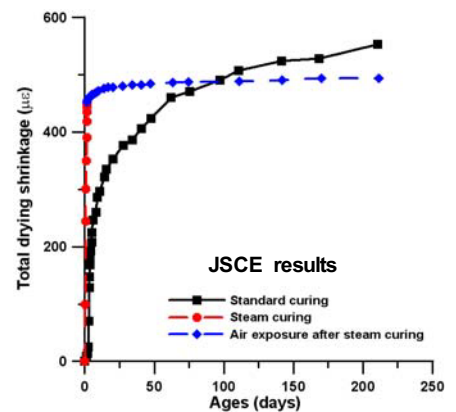


그림 2 JSCE UHSFRC의 전체수축 실험결과

같이 표현된다.

$$\epsilon_{as}(t) = \gamma \epsilon_{c0}(w/b) \beta(t) \quad (1)$$

$$\epsilon_{c0}(w/b) = 3070 \exp\{-7.2(w/b)\} \quad \text{for } 0.2 < w/b < 0.5 \quad (2)$$

$$\epsilon_{c0}(w/b) = 80 \quad \text{for } w/b > 0.5 \quad (3)$$

$$\beta(t) = 1 - \exp\{-1(t-t_0)^b\} \quad (4)$$

위의 식에서 a , b 는 w/b 에 따른 계수로서 Miyazawa et al.[2001]의 실험연구에서는 각각 0.6과 0.5를 제안하였다. 그리고 γ 는 시멘트 및 혼화재 종류의 영향 계수를 나타내고, ϵ_{c0} 는 자기수축 극한변형률, w/b 는 물결합재비, t_0 는 초결시점(day), t 는 재령(day)를 나타낸다.

CEB-FIP[1999]의 자기수축 모델은 다음의 식 5와 같다.

$$\epsilon_{as} = \epsilon_{as0}(f_{cm})\beta_{as}(t) \quad (5)$$

식 18에서 ϵ_{as0} 과 $\beta_{as}(t)$ 는 각각 식 6과 식 7에 의해 정의되어진다.

$$\epsilon_{as0} = \alpha_{as} \left(\frac{f_{cm}/f_{cm0}}{6 + f_{cm}/f_{cm0}} \right)^{2.5} \cdot 10^{-6} \quad (6)$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp\left\{-0.2\left(\frac{t}{t_1}\right)^{0.5}\right\} \quad (7)$$

위의 식에서 f_{cm} 은 평균압축강도(MPa)를 나타내고, f_{cm0} 는 10MPa에 해당한다. 그리고 α_{as} 는 시멘트 종류에 의해 결정되는 계수값으로 경화가 느리게 일어나는 시멘트에 대해서는 800, 보통 또는 급결성의 시멘트에 대해서는 700, 그리고 급결 고강도 시멘트에 대해서는 600을 사용한다. t 는 콘크리트 재령을 의미하고, t_1 은 재령 1일을 나타낸다.

그리고 Loukili의 모델[1996]은 다음의 식 8과 같다.

$$\epsilon_{as}(t) = \alpha \exp\left[\frac{\beta}{t + \gamma}\right] \quad (8)$$

Loukili는 본 연구에서의 UHSFRC와 아주 유사한 특성을 가진 BPR에 대해, 고온양생을 하지 않은 경우, $\alpha=525$, $\beta=-2.5$, $\gamma=-0.5$ 을 적용할 수 있다고 밝히고 있다.

그림 3은 각각의 모델식과 UHSFRC 실험결과를 비교하여 나타낸 것이다. 그림 3에서 Miyazawa의 모델식을 적용한 경우, 자기수축 발현속도를 잘 표현하고 있는 것으로 나타났다으며, γ 의 값을 1.0 대신 1.25를 대입할 경우에 UHSFRC의 자기수축 실험결과와 매우 잘 일치하고 있다. 그리고 Loukili의 모델식을 적용한 경우에는 α 값을 550 대신 850을 적용한 경우에 UHSFRC 실험결과를 대체로 잘 나타내고 있었지만, 초기재령에서의 자기수축이 약간 지연되어 발현되는 경향을 나타내며, Miyazawa의 모델이 상대

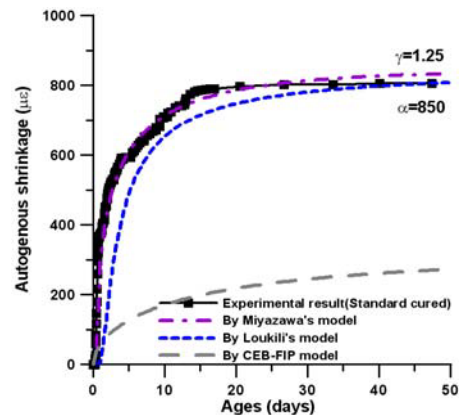


그림 3 자기수축 모델식의 비교

적으로 더 정확한 거동을 나타내고 있음을 알 수 있다. 반면 CEB-FIP [1999]의 모델을 적용한 경우에는 실험결과와 상당한 차이를 보였다. 그림 4는 CEB-FIP 모델의 수정모델에 대해 실험결과와 비교하여 나타낸 것이다. 결과적으로 보면 식 5의 ϵ_{as0} 의 값을 800으로 적용하고, 식 6의 $\beta_{as}(t)$ 에서 지수함수 내의 0.2 대신 0.7을 적용하였을 때 실험결과와 가장 잘 일치함을 보였다. 따라서, Miyazawa 모델의 경우에는 식 1 대신 식 9를 사용할 경우에 UHSFRC의 자기수축을 가장 잘 표현하는 것으로 나타났으며, Loukili 모델은 식 8 대신 식 10을 사용할 경우 가장 잘 일치하며, CEB-FIP 모델은 식 11로 수정할 경우, 실험결과를 가장 잘 나타내고 있다.

Miyazawa 모델의 경우: $\epsilon_{as}(t) = 1.25 \epsilon_{c0}(w/b)\beta(t)$ (9)

Loukili 모델의 경우: $\epsilon_{as}(t) = 850 \exp\left[\frac{-25}{t-0.5}\right]$ (10)

CEB-FIP 모델의 경우: $\epsilon_{as} = 800 \left[1 - \exp\left(-0.7\left(\frac{t}{t_1}\right)^{0.5}\right)\right]$ (11)

4. 결론

본 연구에서는 UHSFRC의 자기수축을 JSCE 결과와 비교 분석하였으며, 그 결과 JSCE의 UHSFRC에 비해 상대적으로 큰 자기수축을 보임을 알 수 있었다. 그리고 기존의 자기수축 모델을 이용하여 UHSFRC에 대한 적합성 여부를 분석하였으며, 그 결과 Miyazawa의 모델식이 가장 잘 재령에 따른 자기수축을 잘 예측하는 것으로 나타났다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 한국건설기술연구원, 콘크리트 교량의 내구성 향상 기술 개발, 2006.
2. Recommendations for Design and Construction of Ultra High-Strength Fiber-Reinforced Concrete Structures, -Draft, JSCE, 2004.
3. S. Miyazawa and E. Tazawa, "Prediction Model for Shrinkage of Concrete Including Autogenous Shrinkage, Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Other Quasi-Brittle Materials", Proceedings of Sixth International Conference, Elsevier Science Ltd., 2001, pp. 735-746.
4. J. Jonasson and H. Hedlund, "An Engineering Model for Creep and Shrinkage in High Performance Concrete", Proceedings of International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete, Shrinkage 2000, Paris, France, 2000, pp. 173-178.
5. CEB-FIP 2000, Structural Concrete : Textbook on Behavior, Design and Performance, Vol. 1, Sprint-Druck Stuttgart, 1999, pp. 43-46.
6. A. Loukili, "Etude du retrait et du fluage de bétons à ultra-hautes performances", Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes, November, 1996.

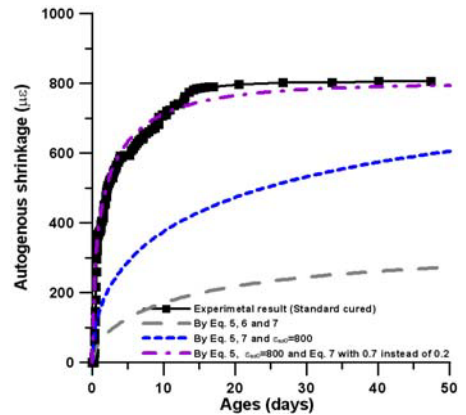


그림 4 CEB-FIP 모델과 수정모델의 비교