

강섬유의 분포 특성에 따른 섬유보강 콘크리트의 역학적 특성

Mechanical Properties of Fiber Reinforced Concrete According to Steel Fiber Dispersion

이 방 연* 강 수 태** 김 윤 용*** 김 진 근****
Lee, Bang Yeon Kang, Soo-Tae Kim, Yun Yong Kim, Jin-Keun

ABSTRACT

Several techniques, including transmission X-ray photography and AC-impedance spectroscopy, are available for evaluating the fiber dispersion in a fiber reinforced concrete. Evaluating the fiber dispersion in fiber reinforced concrete needs since the fibers bridge crack effectively. However, these equipment is very expensive. Therefore this paper presents the quantitative evaluation method based on the image analysis of sectional image taken using an ordinary digital camera. After detecting the fiber accurately, the fiber dispersion characteristics are represented by the coefficient such as the fiber dispersion coefficient, the number of fibers in unit area, and the distribution of the fiber orientation. Test were performed to evaluate the effectiveness of proposed method and the dispersion characteristics of fibers according placing method and flow direction. Additionally, the effect of fiber dispersion characteristics on mechanical properties was investigated. Test results shows that fiber aligned along the flow direction and more fibers placed and dispersion was better on the section parallel to the flow direction. And about 50% difference in the flexural tensile strength according to the placing method occurred.

요 약

강섬유의 분포 특성을 평가하는 방법으로는 X-ray 투과 방법, AC-impedance 분광기법 등이 효과적으로 적용되고 있는데, 이 방법들은 고가의 장비가 필요한 단점이 있다. 이 연구에서는 보편화 되어 있는 디지털 카메라로 섬유보강 콘크리트의 절단면을 촬영하여 정량적으로 평가할 수 있는 기법을 제시하였다. 평가 방법은 섬유의 검출 과정과 검출된 섬유의 위치 정보 및 단면에서의 형상을 바탕으로 분포 특성을 나타내는 계수를 구하는 과정으로 구성된다. 제한한 평가기법의 실효성과 섬유보강 콘크리트의 타설 방법에 따른 유동방향에 따라 섬유의 분포 특성을 파악하기 위하여 두가지 타설 방법으로 제조한 섬유보강 콘크리트의 분포특성을 섬유분산성 계수, 단위 면적당 섬유 개수, 그리고 절단면에서 섬유의 기울어진 각도의 분포를 통하여 파악하였다. 또한 섬유의 분포 특성이 섬유보강 콘크리트의 역학적 성능에 미치는 영향을 파악하였다. 실험 결과 섬유의 방향은 유동흐름이 큰 방향으로 배열하게 되어 단위 면적당 섬유의 개수가 제일 많아지게 되고, 분산성 또한 좋은 것으로 나타났다. 또한 타설방향에 따라 휨인장 강도가 50%정도 차이가 발생하는 것으로 나타났다.

* 정희원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 박사과정

** 정희원, 한국건설기술연구원 구조재료연구실 연구원

*** 정희원, 충남대학교 토목공학과 교수

**** 정희원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 박사후과정

1. 서론

섬유보강 콘크리트의 역학적 성능은 균열면에서 섬유가 콘크리트의 균열 면에서 가교작용에 가장 큰 영향을 받기 때문에 균열 면에서 섬유의 분포 특성을 평가할 필요가 있다. 섬유의 분포 특성을 평가하는 방법은 섬유의 종류와 섬유의 검출 방법에 따라 다양하며, 이미지 분석 방법, X-ray 투과 방법 등을 통하여 강섬유, 탄소섬유, 유리섬유 등과 같은 다양한 섬유의 분산성을 평가할 수 있는 기법들이 많이 연구되고 있다¹⁻⁵⁾. 이러한 방법 중에서 이미지 분석 방법은 섬유의 분산성을 평가하는데 가장 일반적으로 적용되고 있는 방법으로서 절단된 단면을 관찰하여 섬유의 분산정도를 평가하는 방법이다. 최근에 Ozyurt 등⁶⁾은 AC-impedance 분광기법(spectroscopy)을 사용하여 기존의 방법에 비하여 신속하게 섬유의 분산성을 평가하는 방법을 제안한 바 있다. 그러나 이 방법은 임피던스를 측정하기 위한 장비가 필요하기 때문에 일반적으로 적용하기에는 어려움이 있다. 따라서 이 연구에서는 절단된 단면을 디지털 카메라로 촬영하고 촬영된 섬유이미지에서 섬유의 분산 특성을 정량적으로 평가하기 위한 이미지 프로세싱 기법을 제시하고, 타설할 때 유동방향에 따른 섬유의 분포 특성을 파악하고자 한다. 또한 섬유의 분포 특성이 섬유보강 콘크리트의 역학적 성능에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

2. 강섬유의 분포 특성 평가 기법

섬유의 분포 특성은 섬유를 매트릭스로부터 정확히 검출하고, 각 섬유의 위치와 단면에서 섬유 이미지의 형상에 따라 분포 특성을 나타낼 수 있는 값을 계산함으로써 정량적으로 나타낼 수 있다. 섬유를 검출하기 위해서는 칼라 이미지(RGB image)를 회색 이미지(grayscale image)로 변환한 후 회색 이미지를 이진 이미지(binary image)로 변환⁷⁾함으로써 배경에 해당하는 콘크리트로부터 섬유를 검출할 수 있게 된다. 이때 콘크리트의 밝기 분포에 따라 섬유이외의 부분이 섬유로 검출되는 경우가 발생하게 되는데 이러한 노이즈를 제거하기 위하여 각 이미지에서 무작위로 섬유의 크기를 계산하여 최소 크기에 해당하는 섬유의 크기를 기준값으로 정하고 이 크기보다 작은 물체는 노이즈로 간주하여 검출결과에서 제외되도록 하였다.

검출된 섬유의 분산 정도는 식 (1)을 통하여 정량적으로 나타낼 수 있다⁸⁾.

$$\alpha_f = \exp \left[- \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - 1)^2}{n}} \right] \quad (1)$$

여기서 x_i 는 섬유가 균일하게 분포하였을 때 하나의 섬유가 차지하게 되는 i 번째 영역 안에 있는 섬유의 개수이며, n 은 섬유의 총 개수이다. 이 분산계수는 섬유가 이상적인 균일 분포를 하였을 때 1의 값을 갖게 되며 섬유가 비균일 분포를 할수록 0에 가까운 값을 갖게 된다. 이외에 섬유의 분포 특성은 단위 면적당 섬유의 개수(F_n)와 단면에서 섬유가 기울어진 각도의 분포를 통하여 파악할 수 있다. 단면에서 섬유의 기울어진 각도는 Packing density(F_c)로 표현할 수 있는데 F_c 는 물체의 면적을 물체의 외접원에 해당하는 면적으로 나눈 값이며, 단면에서 섬유의 기울어진 각도와와의 관계는 식 (2)와 같다.

$$F_c = \frac{\pi dl/4}{\pi l^2/4} = \frac{d}{l} = \frac{d}{d/\cos\theta} = \cos\theta \quad (2)$$

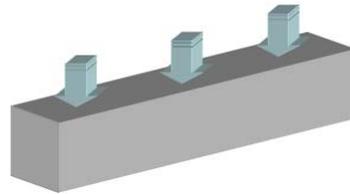
여기서 θ 는 섬유가 단면에서 기울어진 각도이며, d 는 섬유의 지름이다. l 은 단면에서 섬유가 나타내는 타원의 장변 길이이다. 따라서 F_c 는 섬유의 기울어진 각도, θ 에 대하여 $\cos\theta$ 값이 된다.

3. 검증 실험

섬유보강 콘크리트의 유동방향에 따른 강섬유의 분포특성을 파악하기 위하여 100mm×100mm×400mm 크기의 직사각형 시험체를 제작하였으며, 유동방향은 길이방향으로 흐름을 유도한 경우와 그에 수직인 방향으로 타설한 경우로 나누어 파악하였다(그림 1). 방향에 따른 시험체 내 섬유배열 특성은 시험체를 방향별로 각각 절단하여 조사하였으며, 전체길이 400mm를 4등분하여 가운데 부분에 대해 각각 길이방향, 높이방향, 폭방향으로 절단하였다. 그리고 각 절단면을 디지털 카메라로 촬영하여 강섬유의 분포특성을 파악하였다. 섬유의 분포특성과 섬유보강 콘크리트의 인장특성과의 관계를 파악하기 위하여 4점 재하 휨실험을 실시하였다. 250kN 용량의 만능재료시험기를 통해 변위제어 방식으로 실험을 실시하였으며, 휨시험체의 중앙부에 LVDT를 설치하여 중앙부 처짐을 측정하였다⁹⁾.



(a) 휨인장 방향과 평행



(b) 휨인장 방향과 수직

그림 1 콘크리트의 타설 방향

4. 결과 및 분석

표 1은 강상태 등⁹⁾의 실험 결과를 이용하여 타설 방향과 절단방향에 따른 섬유의 분포 특성을 2절에서 제시한 평가 기법을 적용한 결과를 나타낸다. 표 1에서 확인할 수 있듯이 가장 먼저 타설방향에 따른 유동흐름에 따라 절단방향별 섬유의 분포, 섬유수, 섬유의 방향성에 차이가 크게 발생함을 알 수 있다. 휨인장 방향에 평행하게 타설한 경우, 길이 방향으로 섬유의 분산성이 가장 좋았으며, 단위 면적 내에 섬유의 개수 또한 제일 많았으며 섬유의 방향 또한 상대적으로 절단면에 수직인 방향으로 분포를 하였다. 휨인장 방향에 수직하게 타설한 경우, 휨인장 방향에 평행하게 타설한 경우에 비해서는 크기는 작지만 유동흐름이 가장 큰 폭방향의 분산성과 단위 면적내의 섬유 개수, 절단면에 수직인 방향의 섬유의 수가 제일 많은 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 섬유의 방향은 유동흐름이 큰 방향으로 배열하게 되어 단위 면적당 섬유의 개수가 제일 많아지게 되고 분산성 또한 좋게 됨을 알 수 있다. 그림 3은 섬유보강 콘크리트의 유동방향에 따른 휨실험 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같

표 1 타설 방향에 따른 섬유의 분포 특성

섬유 분포 특성	α_f			F_n (개수/Cm ²)			F_c 의 분포		
	l^*	h^{**}	w^{***}	l^*	h^{**}	w^{***}	l^*	h^{**}	w^{***}
휨인장 방향에 평행하게 타설한 경우 (case 1)	0.40	0.36	0.38	50	8.7	16			
휨인장 방향에 수직하게 타설한 경우 (case 2)	0.36	0.37	0.41	30	28	44			

*길이방향 절단면, **높이방향 절단면, ***폭방향 절단면

이 case 1이 case 2에 비해 인장강도가 약 50% 정도 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 섬유보강 콘크리트의 인장강도는 단위면적당 작용하는 섬유의 인장강도에 크게 영향을 받는데, 전술한 바와 같이 case 1이 case 2에 비하여 휨인장 방향으로 단위면적당 섬유의 개수가 67% 정도 더 많고 섬유의 방향 또한 휨인장 방향에 더 가깝게 배열되기 때문이다. 이러한 결과로부터 섬유보강 콘크리트를 타설할 때는 부재가 받게 되는 응력의 크기와 방향 및 섬유의 타설 방법 및 방향에 따른 섬유의 유동특성을 고려하여야 할 것으로 판단된다.

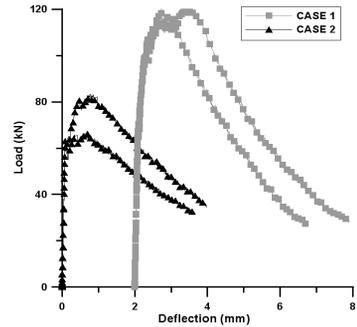


그림 2 휨인장실험 결과

5. 결론

이 연구에서는 섬유보강 콘크리트의 섬유 분포특성에 대하여 특별한 장비없이 보편화 되어 있는 디지털 카메라로 섬유보강 콘크리트의 절단면을 촬영하여 정량적으로 평가할 수 있는 기법을 제시하였고, 타설 및 유동방향에 따른 섬유의 분포특성을 정량적으로 평가하였다. 또한 섬유의 분포 특성이 섬유보강 콘크리트의 역학적 성능에 미치는 영향을 파악하였다. 실험 결과 섬유의 방향은 유동흐름이 큰 방향으로 배열하게 되어 단위 면적당 섬유의 개수가 제일 많아지게 되고, 분산성 또한 좋은 것으로 나타났다. 또한 타설방향에 따라 휨인장 강도가 50%정도 차이가 발생하는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 04핵심기술C02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Guild, F.J., Summerscales, J., "Microstructural image analysis applied to fibre composites materials: A review", *Composites*, Vol.24, NO. 5, 1993, pp.383~393.
2. Yang, Y., "Methods study on dispersion of fibers in CFRC", *Cement and Concrete Research*, Vol.32, 2002, pp.747~750.
3. Chermant, J.L., Chermant, L., Coster, M., Dequiedt, A.S., and Redon, C., "Some Fields of Applications of Automatic Image Analysis in Civil Engineering", *Cement and Concrete Composites*, Vol.23, 2001, pp.157~169.
4. Benson, S.D.P., and Karihaloo, B.L., "CARDIFRC—Manufacture and Constitutive Behavior", *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC4)*, Ann Arbor, Mich. 2003, pp.65~79.
5. Y. Akkaya, S.P. Shah, and B. Ankenman, "Effect of Fiber Dispersion on Multiple Cracking of Cement Composites", *Journal of Engineering Materials in Civil Engineering*, Vol.127, No.4, 2001, pp.311~316.
6. Ozyurt, N., Woo, L.Y, Mason, T.O., and Shah, S.P., "Monitoring Fiber Dispersion in Fiber-Reinforced Cementitious Materials: Comparison of AC-Impedance Spectroscopy and Image Analysis", *ACI Materials Journal*, Vol.103, No.5, 2006, pp.340~347.
7. Otsu, N.A., "Threshold Selection Method from Gray Level Histogram", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol.SMC-9, No.1, 1979, pp.62~66.
8. Kobayashi, K., "Fiber reinforced concrete", Tokyo: Ohm-sha.
9. 강수태, 박정준, 류금성, 고경택, 김성욱, 이장화, "초고성능 콘크리트에서 강섬유의 방향성과 분산성에 관한 연구", 한국콘크리트학회 2007 가을 학술발표회, pp. 749-752, (2007)