



콘크리트 원형단면에서의 섬유분포계수

이성철¹⁾ · 오정환²⁾ · 조재열^{3)*}

¹⁾국제원자력대학원대학교 원자력산업학과 ²⁾에너지기술평가원 해상풍력추진단 ³⁾서울대학교 건설환경공학부

Fiber Orientation Factor on a Circular Cross-Section in Concrete Members

Seong-Cheol Lee,¹⁾ Jeong-Hwan Oh,²⁾ and Jae-Yeol Cho^{3)*}

¹⁾Dept. of NPP Engineering, KINGS, Ulsan 689-882, Korea

²⁾Office of Offshore Windpower Promotion, KETEP, Seoul 135-502, Korea

³⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

ABSTRACT In order to predict the post-cracking tensile behavior of fiber reinforced concrete, it is necessary to evaluate the fiber orientation factor which indicates the number of fibers bridging a crack. For investigation of fiber orientation factor on a circular cross-section, in this paper, cylindrical steel fiber reinforced concrete specimens were casted with the variables of concrete compressive strength, circular cross-section size, fiber type, and fiber volumetric ratio. The specimens were cut perpendicularly to the casting direction so that the fiber orientation factor could be evaluated through counting the number of fibers on the circular cross-section. From the test results, it was investigated that the fiber orientation factor on a circular cross-section was lower than 0.5 generally adopted, as fibers tended to be perpendicular to the casting direction. In addition, it was observed that the fiber orientation factor decreased with an increase of the number of fibers per unit cross-section area. For rational prediction of the fiber orientation factor on a circular section, a rigorous model and a simplified equation were derived through taking account of a possible fiber inclination angle considering the circular boundary surface. From the comparison of the measured data and the predicted values, it was found that the fiber orientation factor was well predicted by the proposed model. The test results and the proposed model can be useful for researches on structural behavior of steel fiber reinforced columns with a circular cross-section.

Keywords : steel fiber, fiber orientation factor, fiber reinforced concrete, circular cross-section

1. 서 론

균열 후 취성적인 인장 거동을 보이는 일반 콘크리트와 달리, 섬유보강 콘크리트는 균열면에서의 섬유들의 인발 거동으로 인해 균열 이후에도 연성적인 거동을 보이는 특징이 있다. 이러한 장점을 토대로 여러 연구자들¹⁻⁹⁾이 섬유보강 콘크리트를 구조부재로서 활용하기 위한 이론 및 실험적인 연구를 수행해 왔다. 이와 더불어, 섬유보강 콘크리트의 인장 거동을 묘사하기 위해 여러 해석 모델들¹⁰⁻¹³⁾이 개발되었으며, 최근에 기존의 해석 모델들의 한계를 극복하여 직선형 강섬유 뿐만이 아닌 후크 타입 강섬유를 함유한 콘크리트의 인장 거동을 묘사할 수 있는 Diverse Embedment Model(DEM)^{14,16)}이 개발되어, 섬유보강 콘크리트의 인장 거동을 정량적으로 평가하는 기반이

갖추어졌다.

현재까지 개발된 다수의 모델들에서 섬유에 의한 인장 응력(f_f)은 식 (1)과 같이 섬유분포계수(fiber orientation factor, α_f), 섬유함유량 체적비(V_f), 그리고 균열면에서의 섬유의 평균 인장 응력($\sigma_{f,avg}$)의 곱으로 계산되어진다.

$$f_f = \alpha_f V_f \sigma_{f,avg} \quad (1)$$

여기서, 섬유분포계수는 이론적으로 대상 구조물의 크기가 무한한 경우 0.5로 계산되어지며, 섬유 길이에 따른 대상 구조물의 크기에 따라 최대 1.0까지 증가하게 된다.^{14,15,17)} 따라서, 대부분의 실제 구조물에서는 섬유 길이에 비해 상대적으로 구조물이 굉장히 크기 때문에 섬유분포계수로 0.5를 사용하여도 무방하다. 하지만, 개발된 해석 모델 검증 및 구조 거동 파악을 위해 사용되어지는 실험실 내의 시험체에서는 섬유 길이에 비해 시험체의 크기가 상대적으로 작기 때문에, 시험체 내에서의 섬유의 분포가 영향을 받게 되며, 그 결과 강섬유 길이 대비

*Corresponding author E-mail : jycho@snu.ac.kr

Received February 10, 2014, Revised March 22, 2014,

Accepted March 26, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute

시험체 크기 효과를 고려하여 산정된 섬유분포계수를 사용할 필요가 있다.

시험체의 크기 효과를 고려한 섬유분포계수에 대한 모델은 일부 연구자들에 의해 이론적으로 개발되었으나 주로 사각단면에 대해 모델들^{14-15,18)}이 개발되었으며, 원형 단면을 대상으로 하는 모델 개발은 미흡한 실정이다. 또한, 기동 부재와 같이 타설 방향이 균열면과 수직인 경우 섬유분포계수가 일반적인 경우와 다르기 때문에¹⁹⁾ 이에 대한 추가적인 연구가 필요한 실정이다.

따라서, 이 연구에서는 흐름이 발생하지 않는 일반 강섬유보강 콘크리트를 대상으로, 압축강도 공시체 제작과 동일한 과정을 거쳐 타설 방향이 원형단면과 수직인 시험체를 제작하여 섬유분포계수에 대해 실험적으로 분석하고자 한다. 또한, 이에 대한 이론 모델을 개발하고 실험 결과와의 비교를 통해 검증하고자 한다.

2. 실험 개요

2.1 실험 변수 및 사용 재료

강섬유는 콘크리트 내에서 불규칙하게 분포하지만 시험체 표면 경계부의 영향을 받게 되므로, 강섬유의 길이와 시험체 단면 크기에 따라 섬유분포계수가 다르게 된다. 따라서, 이 연구에서는 강섬유보강 콘크리트 압축강도, 강섬유 종류, 강섬유 혼입률, 그리고 시험체 원형단면 크기를 변수로 하여, 원형단면을 갖는 강섬유보강 콘크리트 시편을 제작하였다. 실험 변수에 따른 시험체에 대한 상세 설명은 Fig. 1에, 강섬유를 제외한 두 가지 강도에 대한 배합 설계는 Table 1에 나타내었다. 강섬유보강 콘크리트 압축강도는 재령 28일에 N 시험체의 경우 평균 45.0 MPa, H 시험체의 경우 평균 83.4 MPa로 측정되었다. 또한, 이 연구에서는 B사의 Dramix 제품 중 후크형태의 강섬유를 체적비 0.5-2.0%로 사용하였으며, 이에 대한 제

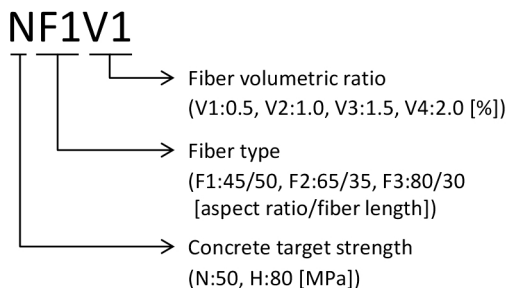


Fig. 1 Notations for the test variables

Table 1 Mix proportion

	W/B	Unit weight (kgf/m ³)					
		W	C	SF	S	G	AD
N	0.35	200	572	-	798	627	1.43
H	0.25	200	737	64	667	569	6.008

원은 Table 2에 정리하였다.

2.2 시험체 제작 및 실험 방법

섬유분포계수는 콘크리트 내에 불규칙하게 분포하는 강섬유가 임의의 면을 관통하는 확률로 정의할 수 있으므로, 임의의 단면을 관통하고 있는 강섬유의 개수를 셴으로써 얻을 수 있다. 이 연구에서는 원형단면 내에서의 섬유분포계수를 확인하기 위해 원형공시체를 제작하였으며, 섬유분포계수에 대한 시험체 크기의 영향을 확인하기 위해 $\phi 150 \times 300$ mm 및 $\phi 100 \times 200$ mm 등 두 가지 크기에 대해 시험체를 제작하였다. 이 때, 타설 경계면과 아닌 곳에서의 섬유분포계수 차이를 확인하기 위해 강섬유보강 콘크리트를 2회 분할 타설함으로써 시험체를 제작하였다. 섬유분포가 시험체에 따라 다를 수 있으므로, 섬유분포계수에 대한 합리적인 평균값을 산정하기 위해 Fig. 1에 명기된 각 실험변수별로 작은 시험체와 큰 시험체에 대해 각각 평균 6개 및 8개의 시험체가 제작되었다. 제작된 시험체들은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 수평방향으로 3번 절단하였으며, 절단된 단면을 관통하는 강섬유의 개수를 셴으로써 섬유분포계수를 산정하였다. 섬유분포계수는 절단면 내 강섬유의 개수(N_f), 절단면 단면적(A_c), 섬유 단면적(A_f) 및 섬유함유량 체적비(V_f)로부터 아래와 같이 산정할 수 있다.^{17,18)}

$$\alpha_f = \frac{N_f A_f}{V_f A_c} \quad (2)$$

Table 2 Properties for end-hooked steel fibers

Fiber type	Length (mm)	Diameter (mm)	Tensile strength (MPa)	Aspect ratio
F1	50	1.05	1000	47.6
F2	35	0.55	1100	63.6
F3	30	0.38	2300	78.9

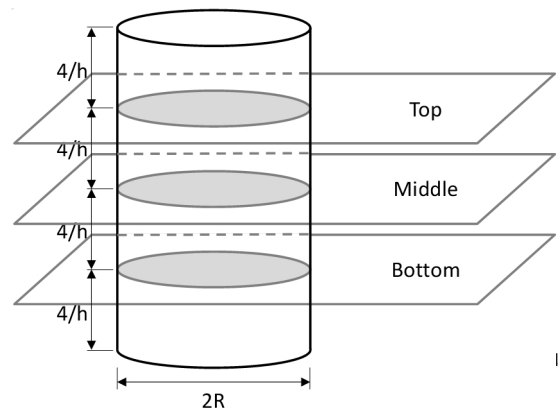


Fig. 2 Cutting sections on cylindrical specimens

3. 실험 결과 및 분석

Fig. 3과 4는 실험으로부터 산정된 섬유분포계수를 강섬유 혼입률에 따라 정리한 것이다. 단, NF2V1와 NF3V1 실험체의 경우 $\phi 100 \times 200$ mm 시험체를 제작하지 않아 해당 단면에 대해 섬유분포계수를 측정하지 못하였다. 또한, $\phi 150 \times 300$ mm 시험체의 경우에는 압축강도시험이 끝난 공시체를 절단하여 측정을 하였으나, 최대압축강도 이후 발생한 균열이 매우 심각하여 단면 및 강섬유 손실이 상대적으로 크게 발생한 시험체의 경우 실험 결과 정리에서 제외하였다.

측정 결과 지름 100 mm 단면에 섬유길이가 가장 긴 F1 강섬유가 사용된 경우 다른 변수들에 비해 경계면의 영향을 크게 받아 가장 큰 섬유분포계수가 측정되었다. 또한 대부분의 시험체에서 섬유분포계수가 0.5보다 작은

값으로 나타났다. 이는 다짐 과정에서 타설면의 방향으로 강섬유가 높게 되는 경향 때문인 것으로 설명된다. 이러한 실험 결과는, 타설방향이 절단면과 수직인 경우에 대한 섬유분포계수가 타설방향이 절단면과 평행한 경우에 대한 섬유분포계수보다 상당히 작게 나타난 선행 연구 결과¹⁹⁾와 일치한다.

한편, 각각의 시험체 내에서 위, 중간, 아래의 절단면에 대해 측정된 섬유분포계수를 비교한 결과, 대부분의 시험체에서 중간 부분 절단면에 대한 섬유분포계수가 위 및 아래 절단면에 대한 섬유분포계수보다 작게 나타났다. 이는 시험체 제작 시 강섬유보강 콘크리트를 두 차례에 걸쳐 반씩 채움을 실시한 것에 따른 영향인 것으로 설명될 수 있다. 즉, 반 채움 후 다짐을 실시함에 따라 타설면이 경계면으로 작용하여 강섬유가 표면을 따라 재배열되는 효과가 발생하기 때문에 위, 아래 절단면에 비해 중간

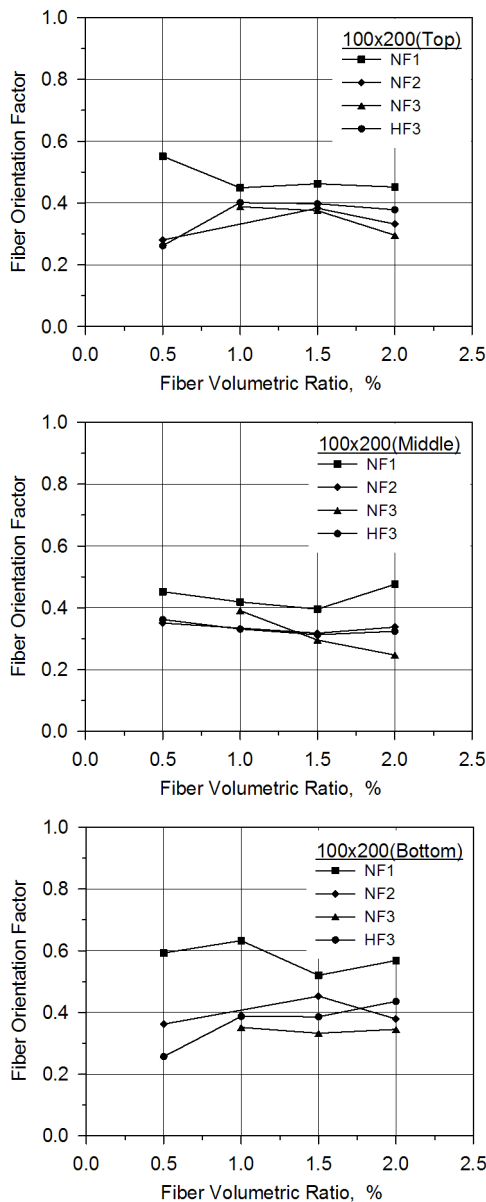


Fig. 3 Fiber orientation factor measured through $\phi 100 \times 200$ mm specimens

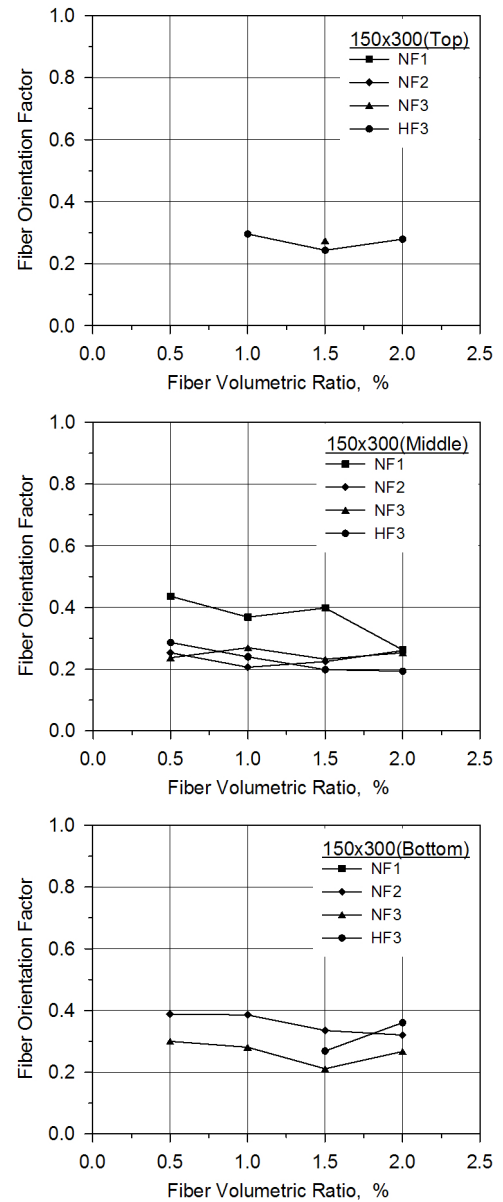


Fig. 4 Fiber orientation factor measured through $\phi 150 \times 300$ mm specimens

부분 절단면에서 섬유분포계수가 다소 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

4. 섬유분포계수 모델 개발

4.1 원형단면에서의 섬유분포계수 모델 유도

섬유분포계수를 유도하기 위해서는 단면 내에서 섬유가 분포 가능한 범위를 산정하는 것이 필요하다. Fig. 5는 반지름 R 인 2차원 원형 단면 내에서 단면 중심으로부터 r 만큼 떨어진 곳에 위치한 섬유의 짧은 쪽 문힘 길이가 l_a 인 경우에 대해 섬유가 형성할 수 있는 각의 범위를 나타내고 있다. 이 때 섬유가 형성할 수 있는 각의 상한값과 하한값을 각각 θ_u 및 θ_l 이라 하면, 원형 단면 내부에

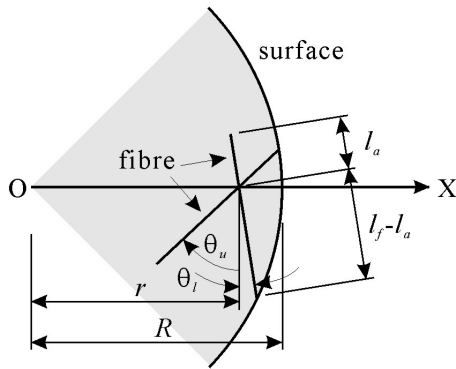


Fig. 5 Effect of round surface on fiber orientation - 2D

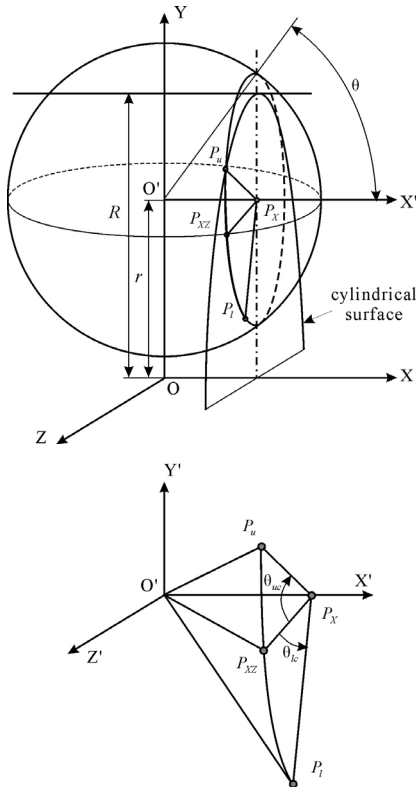


Fig. 6 Fiber orientation in a cylindrical member - 3D

서의 삼각함수의 성질로부터 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\{r + (l_f - l_a)\sin\theta_l\}^2 + \{(l_f - l_a)\cos\theta_l\}^2 = R^2 \quad (3a)$$

$$\{r + l_a\sin\theta_u\}^2 + \{l_a\cos\theta_u\}^2 = R^2 \quad (3b)$$

실제 상황에서의 섬유는 3차원 공간에서 분포하게 되므로, 위의 식들을 3차원에 대해 확장하여야 한다. Fig. 6과 같이 3차원 공간에서 원기둥 형태의 경계를 고려한 섬유가 형성할 수 있는 각의 범위를 θ_{uc} 및 θ_{lc} 로 정의하면, 원형 단면으로부터 θ 만큼 기울어진 섬유에 대해 다음의 식을 유도할 수 있다.

$$\{r + l_a\sin\theta\sin\theta_{uc}\}^2 + \{l_a\sin\theta\cos\theta_{uc}\}^2 = R^2 \quad (4a)$$

$$\{r + (l_f - l_a)\sin\theta\sin\theta_{lc}\}^2 + \{(l_f - l_a)\cos\theta\sin\theta_{lc}\}^2 = R^2 \quad (4b)$$

위 식을 θ_{uc} 및 θ_{lc} 에 대해 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\sin\theta_{uc} = \frac{R^2 - r^2 - l_a^2\sin^2\theta}{2r l_a \sin\theta} \quad (5a)$$

$$\sin\theta_{lc} = \frac{R^2 - r^2 - (l_f - l_a)^2\sin^2\theta}{2r(l_f - l_a)\sin\theta} \quad (5b)$$

앞의 식으로부터 유도된 섬유가 형성할 수 있는 각의 범위 내에서 섬유가 형성하는 각에 대해 균일한 분포를 가지고, 섬유의 짧은 쪽 문힘 길이에 대해 균일한 분포를 가지는 것으로 가정하면, 원형 단면 중심으로부터 r 만큼 떨어진 곳에 위치한 곳에서의 섬유분포계수는 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$\alpha_{f,r} = \frac{2}{l_f} \int_0^{l_f/2} \frac{\int_0^{\pi/2} \cos\theta(\theta_{uc} + \theta_{lc})\sin\theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} (\theta_{uc} + \theta_{lc})\sin\theta d\theta} dl_a \quad (6)$$

위 식은 원형 단면 내 특정 위치에서의 섬유분포계수를 산정한 것으로서, 원형 단면 전체에 대한 섬유분포계수는 다음의 식과 같이 평균값으로 구할 수 있다.

$$\alpha_{f,avg} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R 2\pi r \alpha_{f,r} dr \quad (7)$$

4.2 원형단면에서의 섬유분포계수 단순 모델 개발

앞에서 유도된 섬유분포계수 모델은 수치적분으로 인해 섬유분포계수를 손쉽게 계산할 수 없는 단점이 있다. 이에 이 연구에서는 $R/l_f \leq 0.55$ 인 구간에 대해 이차다항식으로, $R/l_f > 0.55$ 인 구간에 대해 쌍곡선으로 회귀분석

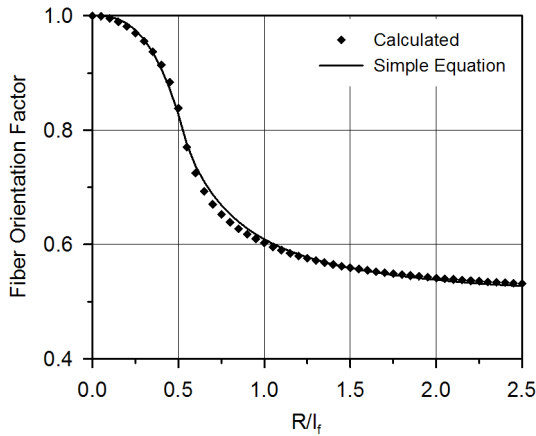


Fig. 7 Comparison of the detailed model and the simplified model for fiber orientation factor

을 통해 다음과 같이 원형단면에서의 섬유분포계수에 대한 단순 모델을 개발하였다.

$$\alpha_f = -1.2(R/l_f)^{2.8} + 1 \text{ for } R/l_f \leq 0.55 \quad (8a)$$

$$\alpha_f = 0.11(R/l_f)^{1.52} + 0.5 \text{ for } R/l_f > 0.55 \quad (8b)$$

Fig. 7은 4.1절에서 유도된 식 (7)과 회귀분석을 통해 개발된 단순 모델인 식 (8)을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 섬유분포계수에서 섬유 길이 및 원형단면 크기의 영향에 대해 두 모델들 사이에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 주어진 원형단면에 대해 섬유분포계수를 예측하는데 단순모델을 사용할 수 있는 것으로 확인되었다.

4.3 타설 방향 및 섬유혼입률의 영향

한편, 단면 내 섬유의 분포는 타설 방향과 균열 단면이 이루는 각에 따라 영향을 받을 수 있다. Gettu 외¹⁹⁾의 실험 결과에 의하면, 타설 후 진동 다짐에 의해 섬유의 분포가 영향을 받게 되며, 이에 따라 타설 방향이 균열면과 수직인 경우에서 평행한 경우에 비해 섬유분포계수가 작게 나타나게 된다. 또한, Stroeven¹³⁾의 연구에서는 단위 면적 내 섬유의 개수가 증가할수록 섬유가 타설면과 평행하게 분포할 확률이 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 섬유혼입률이 높을수록 타설 방향에 수직인 단면에서의 섬유분포계수가 감소하는 경향이 있다.

Fig. 8은 이 연구에서의 실험으로부터 측정된 섬유분포계수를 식 (7)로부터 예측된 결과로 나눈 비율을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 단위 면적당 섬유의 개수가 증가할수록 실험 결과/예측값의 비율이 감소하는 것을 알 수 있다.

따라서, 이 연구에서는 섬유분포계수 산정 시 타설 방향 및 섬유혼입률에 대한 영향을 고려하기 위해, 타설 방향이 균열면과 수직인 경우에 대해 이론으로부터 유도된

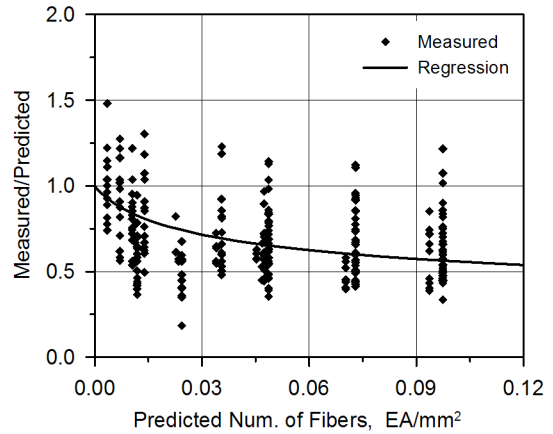


Fig. 8 Effect of the number of fibers on fiber orientation factor

섬유분포계수 예측값을 줄일 수 있는 감소계수, K_d 를 도입하였다. K_d 는 Fig. 8에 나타난 결과로부터 회귀분석을 통해 유도한 다음의 식으로부터 산정할 수 있다.

$$K_d = 0.33(N+0.01)^{-0.24} \quad (9)$$

여기서, N 은 단위 면적당 섬유 개수로서, 식 (2)로부터 유도된 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$N = \alpha_{f,avg} V_f \frac{4}{\pi d_f^2} \quad (10)$$

따라서, 타설 방향에 수직인 원형 단면 내에서의 섬유분포계수는 식 (8)로부터 계산된 값에 K_d 를 곱함으로써 구할 수 있다.

4.4 제안 모델의 비교 및 검증

지름 100 mm 및 150 mm를 지닌 원형 단면 내에서의 섬유분포계수에 대해 식 (8) 및 (10)으로부터 섬유분포계수를 예측한 후, 실험에서 측정된 섬유분포계수와 비교한 결과를 Table 3에 정리하였다. 여기에서, Table 3은 섬유혼입률에 따른 영향을 분석하기 위해 시편으로부터 측정된 각각의 값들을 시험변수별로 평균하여 예측값과 비교한 것이며, 타설 경계면을 의미하는 가운데 단면에서 측정된 섬유분포계수는 비교에서 제외하였다. 표에서 비교한 바와 같이, 제안된 모델은 실제의 섬유분포계수를 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났으며, 이로부터 제안된 모델이 섬유분포계수에서의 타설 방향 및 섬유혼입률에 따른 영향을 잘 고려하는 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 9는 측정된 섬유분포계수를 섬유 종류별로 분류하여 평균한 값을 예측값과 비교 및 검토한 것이다. 또한, 타설 방향 및 섬유혼입률의 영향을 고려하는 감소계수, K_d 의 고려 유무에 따른 영향도 함께 도시한 것으로서 흰색 표식은 감소계수를 고려하지 않은 것을, 회색 표식은 감소계수를 고려한 것을 각각 나타낸다. 그림에서 보는

Table 3 Comparison of the prediction and the measured data on fiber orientation factor

Specimen size	Fiber variables	Fiber orientation factor		
		Measured	Prediction	Measured /Prediction
100×200	F1V1	0.577	0.565	1.02
	F1V2	0.544	0.535	1.02
	F1V3	0.493	0.511	0.96
	F1V4	0.512	0.492	1.04
	Subtotal (F1)			1.04
	F2V1	0.323	0.466	0.69
	F2V3	0.418	0.390	1.07
	F2V4	0.356	0.369	0.96
	Subtotal (F2)			0.90
	F3V1	0.260	0.408	0.64
	F3V2	0.383	0.359	1.07
	F3V3	0.373	0.330	1.13
	F3V4	0.364	0.311	1.17
	Subtotal (F3)			1.00
	Total for 100×200			0.98
150×300	F2V1	0.388	0.445	0.87
	F2V2	0.386	0.401	0.96
	F2V3	0.335	0.374	0.90
	F2V4	0.320	0.354	0.91
	Subtotal (F2)			0.88
	F3V1	0.300	0.394	0.76
	F3V2	0.288	0.347	0.83
	F3V3	0.255	0.319	0.80
	F3V4	0.300	0.300	1.00
	Subtotal (F3)			0.83
Total for 150×300			0.86	

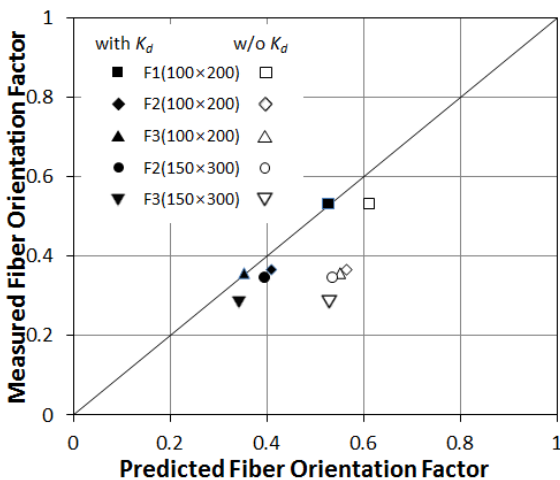


Fig. 9 Comparison of the prediction and the measured data on fiber orientation factor

바와 같이, 감소계수를 고려하지 않을 경우 섬유가 타설면과 평행하게 분포할 확률이 증가하는 것을 고려하지 못함에 따라 섬유분포계수가 실제보다 과도하게 예측될 수 있는 것으로 나타났다. 하지만, 감소계수를 고려할 경우 타설 방향에 수직인 원형단면에서의 섬유분포계수를 잘 예측하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

이 연구에서는 타설 방향에 수직인 원형 단면에서의 섬유분포계수에 대해 조사하기 위해 지름 100 mm 및 150 mm를 지닌 원형 공시체를 제작 후 절단하여 원형 단면 내에서의 섬유분포계수를 측정하였다. 섬유분포계수 측정 결과, 섬유가 타설면에 평행하게 분포할 확률이 증가함에 따라 섬유분포계수가 기존의 이론값인 0.5보다 작게 나오는 것으로 나타났으며, 단위 면적 당 분포하는 섬유의 개수가 증가할수록 섬유분포계수가 감소하는 것으로 나타났다.

또한, 이 연구에서는 원형단면에서의 섬유분포계수를 예측하기 위해 수치적분을 이용한 상세 모델 및 이를 단순화한 식을 유도하였으며, 감소계수를 도입함으로써 타설 방향 및 섬유혼입률에 대한 영향을 고려한 섬유분포계수 모델을 제시하였다. 제안된 모델과 실험으로부터 측정된 섬유분포계수를 비교한 결과, 예측값에 대한 측정값의 비가 지름 100 mm 및 150 mm인 시험체들에 대해 각각 평균 0.98 및 0.86으로서, 제안된 모델로부터 타설 방향과 수직인 원형단면에서의 섬유분포계수를 합리적으로 예측할 수 있는 것으로 나타났다.

이 연구로부터 확보된 측정 결과 및 제안된 섬유분포계수 모델은 향후 원형 단면을 지닌 섬유보강 콘크리트 교각 등의 구조적 거동 연구에 매우 유용할 것으로 사료된다.

References

1. Parra-Montesinos, G. J., "High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites: An Alternative for Seismic Design of Structures," *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 5, 2005, pp. 668-675. (doi: <http://dx.doi.org/10.14359/14662>)
2. Minelli, F. and Vecchio, F. J., "Compression Field Modeling of Fiber-Reinforced Concrete Members Under Shear Loading," *ACI Structural Journal*, Vol. 103, No. 2, 2006, pp. 244-252. (doi: <http://dx.doi.org/10.14359/15182>)
3. Kim, W. S., Kwak, Y. K., and Kim J. B., "Prediction of Flexural Capacities of Steel-Fiber Reinforced Concrete Beams," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 18, No. 3, 2006, pp. 361-370.
4. Oh, Y. H. and Kim, J. H., "Estimation of Flexural and Shear Strength for Steel Fiber Reinforced Flexural

- Members without Shear Reinforcements,” *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 2, 2008, pp. 257-267.
5. Yang, I. H., Joh, C. B., Kang, S. T., and Kim, B. S., “An Experimental Study on Flexural Behavior of Steel Fiber Reinforced Ultra High Performance Concrete,” *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 6, 2009, pp. 737-744. (doi: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2009.21.6.737>)
 6. Lee, S. C., Kim, J. H., Cho, J. Y., and Shin, K. J., “Tension Stiffening of Reinforced High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC),” *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 6, 2010, pp. 859-866. (doi: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2010.22.6.859>)
 7. Shin, K. J., Kim, J. H., Cho, J. Y., and Lee, S. C., “Flexural Behavior of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC) Beam with a Reinforcing Bar,” *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 2, 2011, pp. 169-176.
 8. Dinh, H. H., Parra-Montesinos, G. J., and Wight, J. K., “Shear Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrup Reinforcement,” *ACI Structural Journal*, Vol. 107, No. 5, 2010, pp. 597-606. (doi: <http://dx.doi.org/10.14359/51663913>)
 9. Susetyo, J., Gauvreau, P., and Vecchio, F. J., “Effectiveness of Steel Fiber as Minimum Shear Reinforcement,” *ACI Structural Journal*, Vol. 108, No. 4, 2011, pp. 488-496. (doi: <http://dx.doi.org/10.14359/51682990>)
 10. Marti, P., Pfyf, T., Sigrist, V., and Ulaga, T., “Harmonized Test Procedures for Steel Fiber-Reinforced Concrete,” *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 6, 1999, pp. 676-686. (doi: <http://dx.doi.org/10.14359/794>)
 11. Voo, J. Y. L. and Foster, S. J., “Variable Engagement Model for Fibre Reinforced Concrete in Tension,” Uniciv Report No. R-420, School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales, 2003, 86 pp.
 12. Leutbecher, T. and Fehling E., “Crack Width Control for Combined Reinforcement of Rebars and Fibers Exemplified by Ultra-High-Performance Concrete,” fib Task Group 8.6, Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete-UHPFRC, 2008, pp. 1-28.
 13. Stroeven, P., “Stereological Principles of Spatial Modeling Applied to Steel Fiber-Reinforced Concrete in Tension,” *ACI Materials Journal*, Vol. 106, No. 3, 2009, pp. 213-222. (doi: <http://dx.doi.org/10.14359/56545>)
 14. Lee, S.-C., Cho, J.-Y., and Vecchio, F. J., “Diverse Embedment Model for Fiber Reinforced Concrete in Tension: Model Development,” *ACI Materials Journal*, Vol. 108, No. 5, 2011, pp. 516-525. (doi: <http://dx.doi.org/10.14359/51683261>)
 15. Lee, S.-C., Cho, J.-Y., and Vecchio, F. J., “Diverse Embedment Model for Fiber Reinforced Concrete in Tension: Model Verification,” *ACI Materials Journal*, Vol. 108, No. 5, 2011, pp. 526-535. (doi: <http://dx.doi.org/10.14359/51683262>)
 16. Lee, S.-C., Cho, J.-Y., and Vecchio, F. J., “Simplified Diverse Embedment Model for Steel Fiber-Reinforced Concrete Elements in Tension,” *ACI Materials Journal*, Vol. 110, No. 4, 2013, pp. 403-412. (doi: <http://dx.doi.org/10.14359/51685787>)
 17. Aveston, J. and Kelly, A., “Theory of Multiple Fracture of Fibrous Composites,” *Journal of Materials Science*, Vol. 8, No. 3, 1973, pp. 352-362. (doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00550155>)
 18. Soroushian, P. and Lee, C.-D., “Distribution and Orientation of Fibers in Steel Fiber Reinforced Concrete,” *ACI Materials Journal*, Vol. 87, No. 5, 1990, pp. 433-439. (doi: <http://dx.doi.org/10.14359/1803>)
 19. Gettu, R., Gardner, D. R., Saldivar, H., and Barrangan, B. E., “Study of the Distribution and Orientation of Fibers in SFRC Specimens,” *Materials and Structures*, Vol. 38, No. 1, 2005, pp. 31-37. (doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02480572>)

요 약 섬유보강 콘크리트의 균열 후 인장 거동을 예측하기 위해서는 균열면에 걸쳐 있는 섬유의 개수를 산정하는 섬유분포계수를 합리적으로 예측하는 것이 필요하다. 이 논문에서는 원형단면에서의 섬유분포계수를 분석하기 위해, 콘크리트 압축강도, 단면 크기, 섬유 종류 및 섬유혼입률 등을 변수로 강섬유보강 콘크리트 공시체를 제작하였으며, 제작한 공시체들을 타설 방향에 수직인 방향으로 절단한 후, 절단된 원형 단면에서의 섬유 개수로부터 섬유분포계수를 측정하였다. 측정 결과, 섬유가 타설면에 평행하게 분포할 확률이 증가함에 따라 실제 원형단면에서의 섬유분포계수가 일반적으로 알려진 0.5보다 작은 것으로 나타났다. 또한, 단위 면적 당 섬유 개수가 증가할수록 섬유분포계수가 감소하는 것으로 나타났다. 이 논문에서는 원형단면에서의 섬유분포계수를 합리적으로 예측하기 위해 섬유가 분포할 수 있는 각을 기하학적으로 분석하고, 이로부터 상세 모델과 단순화한 식을 유도하였다. 제안된 모델과 실험에서 측정된 섬유분포계수를 비교한 결과, 제안된 모델이 실제 원형단면에서의 섬유분포계수를 잘 예측하는 것으로 나타났다. 이 연구로부터 확보된 실험 결과 및 제안 모델은 향후 원형단면을 지닌 섬유보강 콘크리트 기둥 부재 등의 구조적 거동 연구에 매우 유용할 것으로 사료된다.

핵심용어 : 강섬유, 섬유분포계수, 섬유보강 콘크리트, 원형 단면