

섬유의 종류 및 휨인성 평가방법에 따른 섬유보강 콘크리트의 휨인성 특성

Flexural Toughness Characteristics of Fiber Reinforced Concrete According to Fiber Types and Evaluation Method

오 병 환* 김 규 왕** 한 일 영*** 권 지 훈**** 유 흥 종****
Oh, Byung Hwan Kim, Kyu Wang Han, Il Yeong Kwon, Ji Hoon Yoo, Hong Jong

ABSTRACT

Nowadays, shotcrete plays an essential part in the construction of underground structures, and fiber reinforcement is so useful for increasing the toughness of the concrete that is spotlighted at tunnel or pavement construction. Therefore, many types of fibers have been introduced on the site and variety of tests have been developed to measure and quantify the improvements achievable in fiber reinforced concrete and shotcrete. Therefore, this study focuses on the flexural toughness according to the fiber types and appraisal methods. The major interests are fiber types, volume fractions and evaluation methods.

1. 서론

섬유보강 슛크리트(FRS)는 입체적인 보강으로 인한 인성의 증대와 시공성의 향상 등 많은 이점으로 그 시공사례가 증가하는 추세에 있다. 국내에서 슛크리트 보강재는 주로 강섬유가 많이 쓰인다. 강섬유보강 슛크리트는 입체적 보강으로 인한 고인성, 시공능률의 향상 등의 이점이 있으나, 내부식성이 불량하고 장비의 마모와 안전성 등의 문제점이 있다. 또한 폴리프로필렌 섬유 보강 슛크리트는 내구성과 안전성 향상의 효과는 있으나 상대적으로 인성이 낮아 국외에서는 폴리프로필렌 섬유의 다른 형태인 보강용 합성섬유 슛크리트를 사용한 시공사례가 증가하고 있는 실정이나 국내에는 아직 보강용 합성섬유에 대한 연구사례가 전무한 실정이다.

한편 현재 국내에서 섬유보강 슛크리트의 인성을 평가하는 방법은 휨강도(Flexural Strength) 및 동가휨강도비(Toughness Qoutient)이다. 그러나 이러한 평가방법들이 2축 휨인장력을 받는 1차 라이닝에 대한 인성평가 방법으로 부족함이 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 인성평가방법과 유럽 표준시방서 EFNRC에서 제시하고있는 패널 테스트에 의한 인성 평가방법으로 슛크리트의 보강재로 사용하는 기존의 섬유와 보강용 합성섬유에 의

* 정회원, 서울대 토목공학과, 교수

** 서울대 토목공학과, 석사과정

*** SK 건설연구소, 수석연구원

**** SK 건설연구소, 주임연구원

해 보강된 콘크리트의 인성특성을 고찰하고자 한다.

2. 실험 개요

본 연구의 목적이 보강재로써 사용하고자하는 섬유에 따른 강도특성의 변화와 실험 방법에 따른 인성을 고찰하기 위함이므로 강섬유 2개사 제품과 폴리프로필렌 섬유 1종, 보강용 합성섬유 4종에 대해 혼입률을 달리하였다. 콘크리트의 배합은 국내 습식 숏크리트 현장에서 사용한 배합을 사용하였으며 시험체는 빔의 경우에는 $10 \times 10 \times 35\text{cm}$, 패널의 경우에는 $60 \times 60 \times 10\text{cm}$ 로 제작하였다.

2.1 사용재료

본 연구에서는 시중에서 판매되는 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 굵은 골재는 석산에서 생산된 13mm의 쇄석이고, 잔골재는 강모래를 사용하였으며, 골재의 각종 특성은 Table 1과 같다.

Table 1 Physical properties of aggregates

Item Kinds	$G_{\max}(\text{mm})$	S.G	Water abs. (%)	FM	Unit Weight (kg/m^3)
Fine agg.	-	2.56	1.10	2.6	1563
Coarse agg.	13	2.67	0.71	6.21	1635

2.2 배합설계

본 연구에서는 Table 2의 배합비에 따라 배합설계를 실시하였다.

Table 2 Specification Mixture Proportion

W/C(%)	$G_{\max}(\text{mm})$	S/a	Weight of Unit Volume(kg/m^3)			
			Cement	Water	Fine Agg.	Coarse Agg.
45	13	65	450	203	154	568

2.3 휨시험방법

휨시험방법은 빔은 KS F 2408 콘크리트의 휨시험의 규정에 따라 지간 30cm의 4 point bending test로 7일, 28일 강도를 측정하였고, 이때 휨시험은 10t 용량의 유압식 재료시험기(MTS 810)로 변위 재하속도 0.1mm/min으로 중심에서의 처짐이 2.0mm까지의 하중-처짐 곡선을 측정하였다. 패널은 EFNRC의 규정에 따라 지간 $50 \times 50\text{cm}$ 의 사변을 지점으로 하고, 중심에 $10 \times 10\text{cm}$ 로 분포하중을 재하하여 28일 강도를 측정하였고, 이때 휨시험은 25t 용량의 유압식 재료시험기(MTS 810)를 이용하여 변위 재하속도 1.5mm/min로 하여 중심의 처짐이 25mm까지의 하중-처짐 곡선을 측정하였다.

2.4 실험변수

Table 3에서 설명하고 있는 실험변수는 크게 섬유의 종류와 섬유의 혼입률로 구분되는데, 먼저 섬

Table 3 The Name of variation

Fiber Type	Fiber Volume Fraction, %	Variation	Effective Length	Fiber Type	Fiber Volume Fraction, %	Variation	Effective Length
-	0%	Plain	-	HPPF 2	0.5%	HPPF-2-0.50	50 (mm)
SF 1	0.5%	SF-1-0.50	50 (mm)	HPPF 2	0.75%	HPPF-2-0.75	
SF 1	0.75%	SF-1-0.75		HPPF 2	1.0%	HPPF-2-1.00	
SF 1	1.0%	SF-1-1.00		HPPF 2	1.5%	HPPF-2-1.50	
SF 2	0.5%	SF-2-0.50		HPPF 2	2.0%	HPPF-2-2.00	
SF 2	0.75%	SF-2-0.75		HPPF 3	0.5%	HPPF-3-0.50	
SF 2	1.0%	SF-2-1.00		HPPF 3	0.75%	HPPF-3-0.75	
PF	0.5%	PF-1-0.50	HPPF 3	1.0%	HPPF-3-1.00		
PF	0.75%	PF-1-0.75	HPPF 3	1.5%	HPPF-3-1.50		
PF	1.0%	PF-1-1.00	HPPF 3	2.0%	HPPF-3-2.00		
HPPF 1	0.5%	HPPF-1-0.50	30 (mm)	HPPF 4	0.5%	HPPF-4-0.50	50 (mm)
HPPF 1	0.75%	HPPF-1-0.75		HPPF 4	0.75%	HPPF-4-0.75	
HPPF 1	1.0%	HPPF-1-1.00		HPPF 4	1.0%	HPPF-4-1.00	
HPPF 1	1.5%	HPPF-1-1.50		HPPF 4	1.5%	HPPF-4-1.50	
HPPF 1	2.0%	HPPF-1-2.00		HPPF 4	2.0%	HPPF-4-2.00	

유의 종류는 재료에 따라 구분하였고, 혼입률은 각 섬유에 따라 부피에 대해 0.5, 0.75, 1.0% 또는 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0%를 혼입하였다. 여기서 SF는 강섬유, PF는 폴리프로필렌 섬유, HPPF는 보강용 합성섬유로 SF는 제조 회사에 따라 2종을 사용하였고, HPPF의 1과 2는 유효길이만 다른 동일한 회사 제품이고, 3과 4는 국내에서 개발하고자 하는 2가지 형상의 제품이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 휨강도

Table 4는 각 변수에 대한 재령 7일 28일의 휨강도 측정결과이다. Table 4를 살펴보면 알 수 있듯이 재령7일에서 강섬유와 폴리프로필렌섬유는 혼입률이 증가하면서 휨강도가 증가하는 경향을 보이고, 구조용 합성섬유에서는 혼입률의 증가에 따라 휨강도가 감소하는 경향을 보인다. HPPF-1과 HPPF-2를 비교해보면 섬유의 길이가 증가함에 따라 휨강도가 감소하는 경향도 뚜렷하게 확인할 수 있다.

3.2 휨인성

Table 5는 빔 시험체에 대한 ASTM C 1018과 JCI SF 4의 휨인성평가 방법과 패널 시험체에 대한 EFNRC 방법으로 휨인성을 평가한 결과이다.

ASTM C 1018의 규정에 의한 휨인성을 살펴보면, Toughness Index I_5 , I_{10} , I_{20} 은 섬유의 혼입률에 따라 증가하는 경향이 뚜렷함을 알 수 있다. 또한 보강용 합성섬유를 혼입한 경우의 Toughness Index가 강섬유를 혼입한 경우에 비해 낮은 경향을 보인다.

JCI SF 4의 규정에 의한 휨인성을 살펴보면, 섬유의 혼입률에 따라 등가휨강도와 휨인성계수의 증가 성향이 매우 뚜렷함을 알 수 있다. 또한 보강용 합성섬유의 혼입률이 2.0%일 때의 휨인성계수는 강섬유를 혼입했을 때와 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 여기서 한가지 살펴봐야 할 점은

Table 4 Flexural Strength

변수	휨강도 (kg/cm ²)		변수	휨강도 (kg/cm ²)		변수	휨강도 (kg/cm ²)	
	7일	28일		7일	28일		7일	28일
Plain	22.7	35.4	HPPF-1-0.50	25.4	34.5	HPPF-3-0.50	26.2	31.1
SF-1-0.50	36.5	37.6	HPPF-1-0.75	28.2	34.6	HPPF-3-0.75	33.5	39.3
SF-1-0.75	37.4	41.0	HPPF-1-1.00	30.2	38.1	HPPF-3-1.00	28.9	33.6
SF-1-1.00	35.8	44.7	HPPF-1-1.50	34.7	44.4	HPPF-3-1.50	29.6	36.0
SF-2-0.50	30.9	42.8	HPPF-1-2.00	31.5	33.9	HPPF-3-2.00	32.8	37.4
SF-2-0.75	40.0	43.5	HPPF-2-0.50	29.3	35.8	HPPF-4-0.50	28.2	32.3
SF-2-1.00	43.7	47.9	HPPF-2-0.75	30.8	39.2	HPPF-4-0.75	27.3	33.0
PF-1-0.50	28.7	36.1	HPPF-2-1.00	30.0	35.3	HPPF-4-1.00	26.3	30.9
PF-1-0.75	26.0	36.6	HPPF-2-1.50	32.3	37.1	HPPF-4-1.50	29.3	33.9
PF-1-1.00	34.4	36.6	HPPF-2-2.00	29.7	36.9	HPPF-4-2.00	27.7	33.1

보강용 합성섬유 HPPF-1과 HPPF-3은 다른 두 종류의 구조용 합성섬유에 대해 등가휨강도와 휨인성 계수 모두에 있어서 그 성능이 상당히 떨어짐을 알 수 있다. 이를 통해 섬유의 유효길이와 형상이 인성에 미치는 영향을 알 수 있다.

마지막으로 패널 테스트에 대해 살펴보기로 한다. 최대 하중은 섬유의 종류와 혼입률에 따라 큰 차이를 보인다. 강섬유가 다른 섬유들에 비해 상대적으로 크고, 폴리프로필렌섬유는 다른 섬유들에 비해 그 값이 낮은 경향을 보인다. 또한 동일한 섬유를 혼입했을 경우에는 섬유의 혼입률이 증가함에 따라 그 값의 차이를 뚜렷하게 알 수 있다. 또한 에너지흡수율도 섬유의 혼입률에 따라 증가하는 성향을 보인다. 섬유의 종류에 따라서는 폴리프로필렌섬유의 경우에 에너지흡수율이 현저히 낮고, 강섬유 Type 2의 경우에도 그 값이 낮은 편임을 알 수 있다. EFNRC의 규정에 따른 휨인성을 평가한 결과를 보면 강섬유는 대부분의 혼입량과 섬유에 대해서 양호한 Toughness Class에 속하고, 구조용 합성섬유에도

Table 5 Flexural Toughness

Variation	Beam					Panel	
	ASTM C 1018			JCI SF 4		EFNRC	
	I ₅	I ₁₀	I ₂₀	Equivalent Flexural Strength (Kg/cm ²)	Toughness Quotient (%)	Max. Load (KN)	Energy Absorption (J)
SF-1-0.50	3.8	7.1	11.7	23.6	63.1	82.953	837.738
SF-1-1.00	4.6	9.1	16.7	35.2	78.5	103.643	1133.078
SF-2-0.50	3.9	7.3	13.1	22.4	52.3	75.017	500.111
SF-2-1.00	4.0	8.1	14.2	38.9	80.9	121.114	870.178
PF-1-0.50	2.5	5.0	6.9	10.2	28.3	47.490	287.121
PF-1-1.00	2.0	4.9	7.0	13.3	36.0	52.425	420.989
HPPF-1-0.50	2.0	2.2	7.3	9.1	26.6	41.065	367.306
HPPF-1-1.00	1.2	3.9	8.4	14.5	38.0	49.295	648.049
HPPF-1-2.00	2.9	5.2	8.4	17.1	50.5	62.843	1019.651
HPPF-2-0.50	2.5	5.1	7.0	10.0	27.4	51.865	503.498
HPPF-2-1.00	2.5	5.3	8.1	17.7	50.5	65.325	772.762
HPPF-2-2.00	3.6	6.3	10.7	26.2	70.7	65.747	1394.650
HPPF-3-0.50	2.8	5.2	7.2	7.2	23.3	44.802	566.688
HPPF-3-1.00	3.1	4.8	7.0	10.8	32.3	52.258	960.804
HPPF-3-2.00	3.5	5.7	9.4	16.9	45.3	73.153	1231.049

비교적 양호한 Toughness Class에 속함을 알 수 있다. 구조용 합성섬유의 경우에는 혼입률이 1.0% 이상인 경우에는 강섬유를 혼입한 것 보다 평균적으로 좋은 Toughness Class를 보임을 알 수 있다.

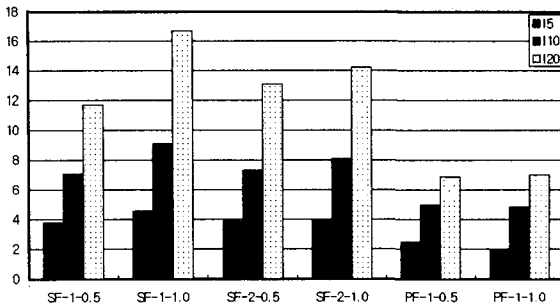


그림 1(a) Toughness Index(ASTM C1018)

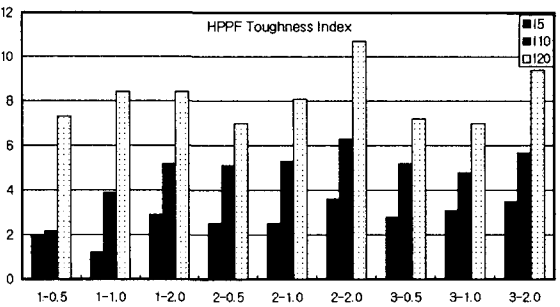


그림 1(b) Toughness Index(ASTM C1018)

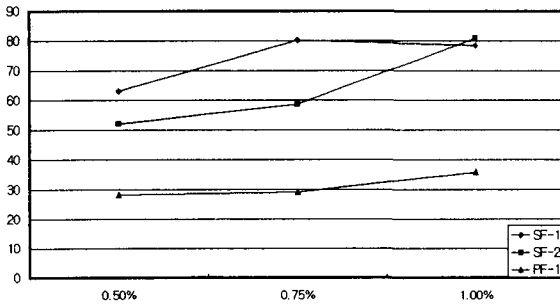


그림 2(a) Toughness Quotient(%)

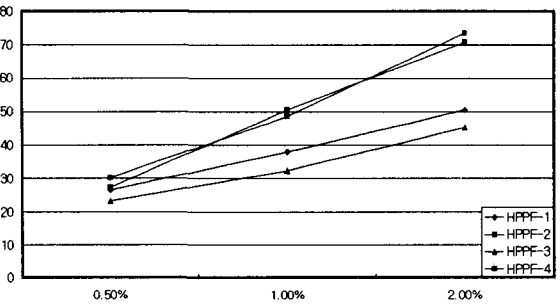


그림 2(b) Toughness Quotient(%)

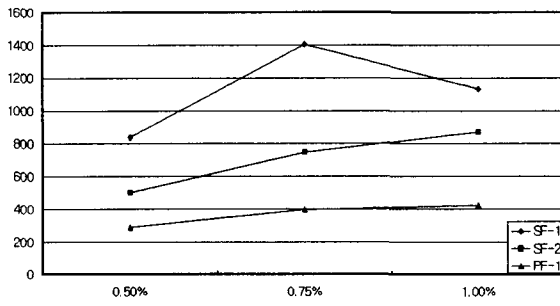


그림 3(a) Energy Absorption(EFNR)

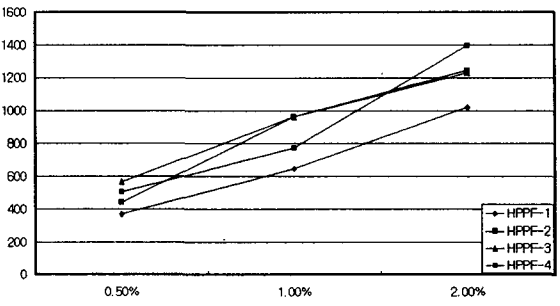


그림 3(b) Energy Absorption(EFNR)

4. 결론

섬유의 종류와 그 혼입률 및 휨인성 평가방법에 따른 섬유보강 콘크리트의 휨인성 특성에 대한 실험을 통하여 그 특성들을 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 그림 1에서 그림 3까지의 그래프를 보여지듯이 모든 휨인성 평가방법에 관계없이 강섬유의 인성이 가장 우수함을 알 수 있다.

(2) 그림 1에서 3가지 (a)와 (b)의 비교에서 알 수 있듯이 ASTM C 1018에 의한 휨인성 평가와는 달리 JCI SF4와 EFNRC의 휨인성 평가에서는 보강용 합성섬유의 휨인성계수와 에너지흡수율은 강섬

유의 휨인성계수와 에너지흡수율과 큰 차이점을 보이지 않음을 알 수 있다. 이를 통해 휨인성 평가방법에 따라 인성특성에 차이가 있음을 알 수 있다.

(3) JCI SF4와 EFNRC방법에 의한 휨인성 평가를 보면 보강용 합성섬유도 섬유의 유효길이와 형상에 따라 각기 다른 휨인성 특성을 보임을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. 건설부, 콘크리트 표준시방서, 1992.
2. 건설부, 터널공사 표준시방서, 1992.
3. 한국도로공사, 강섬유보강 shotcrete 시공 및 품질관리지침.
4. American Concrete Institute, Guide To Shotcrete, Reported by ACI Committee 506, ACI 506R-85, Detroit, 1986.
5. American Concrete Institute, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Shotcrete. Reported By ACI Committee 506, ACI 506.1R-84, Detroit, 1989.
6. Nemkumar Bnthia; Prabhakar Gupta; C. Yan; and Dudley R. Morgan, "How Tough is Fiber Reinforced Shotcrete? Part 1, Beam Tests," Concrete International, Vol. 20, June 1999, pp. 59-62.
7. Nemkumar Bnthia; Prabhakar Gupta; C. Yan; and Dudley R. Morgan, "How Tough is Fiber Reinforced Shotcrete? Part 2, Plate Tests," Concrete International, Vol. 21, August 1999, pp. 62-66.
8. European Specification for Sprayed Concrete, EFNRC, 1996.
9. Standard Test Method for Flexural Toughness and First Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete (Using Beam with Third-point Loading), ASTM C-1018-94, 4.02, American Society of Testing and Materials, Philadelphia, 1994
10. Japan Concrete Institute, JCI SF4 Method of Test for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete.