

강섬유의 형태에 따른 SFRC보의 휨거동에 관한 연구

Fiber Type Effects on the Flexural Behavior of
Steel Fiber Reinforced Concrete Beams

전 찬 기*

Jeon, Chan Ki

Abstract

This paper presents a comparative evaluation of five different types of steel fibers used as reinforcing material in concrete beams. Two types of plain and RC beams were prepared to compare the relative flexural behavior. The fibers used were dog bone (padded), both ends hooked, π -type straight, crimped and wavy type with aspect ratio of 43 to 75. Fiber volume fraction of 1 to 2% were used while shear span to depth ratio (a/d) and steel ratio p were fixed.

Fiber reinforcement effect index E_f and effective toughness index T_e were adopted to evaluate fiber reinforcing effects. The effect of fiber reinforcement on flexural strength is higher in plain beams than in RC beams. Hooked and dog bone type fibers were found to be more effective than the other type ones in enhancing the flexural strength and post-peak energy absorption capacity of concrete beams.

요 지

강섬유의 형태가 콘크리트의 휨거동에 미치는 영향을 알아 보기 위하여 5종의 강섬유를 사용한 실험을 실시하였다. 강섬유 혼입율은 1~2%로 변화를 주었고 전단 스패니비와 철근비는 고정하였다. 형태가 다른 강섬유의 보강 효과를 비교 분석하기 위한 방법으로 섬유 보강 효과 지수를 채택하였고, 인성 효과를 분석하기 위하여 유효 인성 지수를 제안하였으며, 이들 지수들은 강섬유 보강 효과를 비교 분석하는데 유용한 방법으로 평가되었다.

실험 결과에 의하면 강섬유 혼입율은 양단이 hook 형태인 강섬유의 경우에는 1% 이내가 효과적이며, dog bone 형태인 강섬유는 1~2%, 기타 강섬유는 2% 정도가 적절하였다. 강섬유의 혼입으로 인한 휨강도 및 파괴인성의 증진 효과는 무근 콘크리트보의 경우가 철근 콘크리트보의 경우보다 크게 나타났다. 또한 강섬유의 형태에 의한 휨강도와 인성의 증진 효과는 양단이 hook나 dog bone(padded) 형태의 강섬유가 섬유 혼입율이 상대적으로 낮음에도 straight나 crimped 및 wavy 형태보다 우수한 것으로 판명되었다.

* 정희원 · 부천전문대학 토목과 부교수

1. 서론

콘크리트는 압축에 강한 특성을 지닌 재료로서 각종 건설 공사에 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 콘크리트는 인장 및 휨강도가 낮고 균열에 대한 저항성이 약한 취성 재료라는 단점을 가지고 있으며, 이의 보완을 위해 철근이 사용되어 왔다. 또한 콘크리트의 인장 강도와 인성을 개선하기 위한 노력의 일환으로 각종 섬유질 재료를 혼입하여 섬유 보강 콘크리트(FRC, Fiber Reinforced Concrete)를 만들어 사용하고 있으며, 특히 강섬유 보강 콘크리트(SFRC, Steel Fiber Reinforced Concrete)는 각종 하중하에서의 저항 능력이 보통 콘크리트에 비하여 우수하기 때문에 새로운 구조 재료로 이용되고 있다.

섬유 보강 콘크리트에 대한 연구는 1960년대 초 미국의 Romualdi와 Baston^(1,2)이 균열 구속체로 연속 섬유를 치밀한 간격으로 배치한 공시체의 휨시험에서 Griffith의 파단이론(fracture theory)을 적용하여 강섬유의 균열억제개념(crack arrest mechanism)을 설명하였고, Shah와 Rangan⁽³⁾은 강섬유 보강으로 콘크리트의 인성이 현저히 증대되고 에너지 흡수성 및 피로 특성이 크게 개선된다고 하였다. 그외 많은 연구자들이 섬유 첨가율이나 섬유 형상비(aspect ratio) 및 시험방법 등에 변화를 주어 강섬유의 콘크리트 보강재로서의 특성과 응용에 대하여 발표하였다.⁽⁴⁻¹⁴⁾ 그러나 최근까지 개발된 다양한 강섬유의 형태에 따른 종합적인 비교 연구가 부족하며, 특히 휨보강 여부에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 강섬유의 형태가 SFRC의 거동에 미치는 영향에 대해 알아보기 위하여 형태가 다른 5종의 강섬유를 혼입한 콘크리트의 압축, 인장 및 휨시험을 실시하였다. 특히 이들 실험에서는

SFRC보의 휨철근 보강 여부에 따른 역학적인 휨 거동 특성을 분석하기 위하여, 강섬유 혼입 무근 콘크리트보와 강섬유 혼입 철근 콘크리트보에 대한 것을 동시에 실시하였고, 이들 실험 결과로부터 강섬유의 혼입 효과를 객관적으로 비교 검토하는 방안을 연구하였다. 또한 일부 강섬유는 혼입을 변화에 따른 현상을 알아보기 위하여 혼입율을 조정하여 실험하였다. 이들 연구 결과는 강섬유의 종류와 혼입율의 선택에 대한 방향을 제시하는데 유용한 자료가 될 것으로 생각된다.

2. 사용재료 및 시험방법

2.1 사용 재료

2.1.1 시멘트 및 골재

시멘트는 국내 H사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트로 비중은 3.15이다. 또한 각 골재의 물리적 실험 결과는 표 1과 같으며 굵은 골재의 최대 치수는 10 mm이다.

2.1.2 철근과 강섬유

휨부재에 사용된 철근은 SD 30으로 항복 강도 $\sigma_y = 3000 \text{ kg/cm}^2$ 이며, D16을 사용하였다. 강섬유는 모두 5종을 사용하였으며, 그 형태와 특성은 그림 1 및 표 2와 같다. 이 중 B섬유는 수용성 아교를 사용하여 다발로 붙어있는(glued together into a bundle) 상태이며 배합시 날개로 흩어지는 강섬유

표 1. Physical properties of aggregates

Classification	Specific gravity	Fineness modulus	Absorption (%)
Fine aggr.	2.55	2.87	1.50
Coarse aggr.	2.60	4.67	1.18

표 2. Physical properties of steel fiber

Fiber No.	Name of commodity	Type	Specific gravity (g/cm ³)	Size (mm)	Trans. dia. (mm)	Aspect ratio	Maker
A	NAS RC	Dog bone	7.5	0.25×0.8×22	0.50	44	日本 冶金工業
B	Dramix ZC	Both ends hooked	8.0	0.8×60L	0.80	75	벨기에 BEKAERT
C	Steel Fiber	コ-type straight	7.0	0.5×0.5×30	0.56	54	日本 川崎 製鐵
D	Steel Fiber	Crimped	7.0	0.5×0.5×30	0.56	54	日本 川崎 製鐵
E	Tesusa 5530	Wavy	7.0	0.3×1.3×30	0.70	43	日本 鋼管

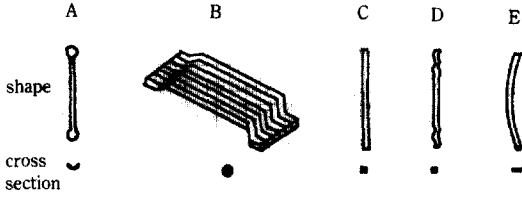


그림 1. Different steel fiber types.

이다.

2.2 실험 기기

휨시험용 기기는 동경 기계 제작소 제품의 U.T.M. (압축 : 최대 200 ton, 인장 및 휨 : 최대 50 ton급)을 사용하였고, 철근과 콘크리트의 변형률 측정은 data logger 기구인 Tokyo Sokki의 TDS-301을 사용하였다. load cell은 Bongshin Load cell Co.의 20 ton과 100 ton용을 사용하였으며, 변위계(displacement transducer)는 Tokyo Sokki의 CDP-50을 사용하였다.

2.3 시험체의 설계 및 제작

2.3.1 시험체의 설계

콘크리트는 압축 강도가 증가할수록 취성 거동이 크게 나타나며,⁽¹²⁾ 강섬유 혼입은 취성을 개선하는 목적이 중요하므로 일반적으로 고강도 콘크리트에 이용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트의 설계 기준 강도를 28일 기준으로 340 kg/cm^2 로 하였다.

섬유 혼입율은 섬유 혼입율에 따른 변화를 알아보기 위하여 강섬유의 종류에 따라 각각 0, 1, 1.5, 2%로 하였다.

기초실험을 위한 압축 및 인장 강도는 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ 의 원주형 공시체를 사용하여 실시하였다.

휨강도 시험체는 그림 2와 같이 단면적이 $15 \times 20 \text{ cm}$ 이고 부재 총길이가 120 cm(지간길이는 110 cm)인 보로 하였다. 이때 보의 평형 철근비 p_b 는 0.0522이고, 최대 철근비는 0.0392이며, 섬유 보강 효과의 분석이 쉽도록 저보강보로 설계하였다. 따라서 사용 철근비는 $0.3 p_b$ 로 하여 0.0165를 택하였으며 2개의 D16 철근을 사용하였다. 보 시험체는 강섬유의 형태와 혼입율 등에 따라 표 3과 같이 구분하였다.

2.3.2 시험체의 배합 및 제작

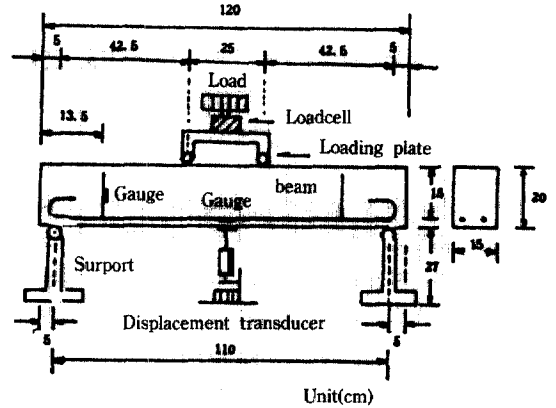


그림 2. 4 point bending test.

표 3. Specimen and fiber properties at each test

Fiber properties	Type	Aspect ratio (l/d)	Fiber in volume(%)
Test No.			
N-P	--	--	0
N-B			
A ₁ -P	Dog bone	44	1
A ₁ -B			1
A ₂ -P	Dog bone	44	2
A ₂ -B			2
B ₁ -P	Both ends	75	1
B ₁ -B	hooked		1
B ₂ -P	Both ends	75	1.5
B ₂ -B	hooked		1.5
C-P	-type	54	2
C-B	straight		2
D-P	Crimped	54	2
D-B			2
E-P	Wavy	43	2
E-B			2

N : No fiber, P : Plain (unreinforced), B : Bending bar (reinforced).

시험체의 배합에 사용된 mixer는 0.15 m^3 용의 가정식이다. 재료의 투입 순서는 골재를 공기 중 건조 상태에서 배합한 뒤 시멘트와 강섬유를 넣어 2차 배합하고 마지막으로 물과 혼화제를 넣고 2분 정도

표 4. Mix proportion

W/C (%)	S/a (%)	Unit water (kg)	Mix Proportion (kg/m ³)				
			Water	Cement	Fine agg.	Coarse agg.	Admix.
35	49	190	190	542	741.5	787	8.13

배합하였다. 이때 혼화제는 Mighty 150을 시멘트 중량의 1.5%로 투입하였다. 대부분의 경우 섬유몽침 (fiber ball) 현상은 나타나지 않았으나 A, B섬유의 경우는 섬유몽침이 다소 나타났으며, 이때 삽비빔으로 몽친 부분을 고르게 분쇄하였다.

휨 시험체 및 원주형 시험체는 2층으로 나누어 타설하고 각 층마다 붐 vibrator로 다짐을 실시하였다.

제작이 끝난 시험체는 습윤포로 덮어 양생하였고 압축시험용 원주형 시험체는 실험 전에 capping을 실시하였다. 타설시와 양생시의 온도는 23±2°C로 유지하였고, 시험체의 배합은 배합 설계에 의해서 표 4와 같이 정하였다.

2.4 하중 재하 및 측정

하중 재하 방법은 그림 2와 같이 전단 스패니(a/d)를 2.4로 하여 4점 재하를 실시하였으며, 하중 초기에는 하중(응력)제어 방식으로 하였고, 예상 극한 하중의 1/2을 넘을 때부터는 처짐량을 고려한 변위 제어로 재하하였다. 보의 처짐은 CDP-50 변위계와 data logger(TDS-301)를 사용하여 보의 중앙점을 측정하였다. 변형을 측정을 위하여 그림 2와 같이 strain gauge를 부착하였고 역시 data logger를 이용하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기초 실험 결과

각 재령에 따른 압축 강도와 할렬 강도의 실험 결과는 표 5와 같다. 이 표로부터 강섬유의 혼입이 압축 강도의 증진을 어느 정도 가져 오지만 일부 강섬유에서는 오히려 저하되는 수도 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 섬유의 몽침 현상 및 진동 다짐으로 섬유의 분산성이 나빠지는 현상과 밀접한 관계가 있으리라고 생각되며, 특히 B섬유는 길이가 길고 다발로 되어있기 때문인 것으로 생각된다. 이는 섬유의 몽침 현상이 잘 일어나지 않는 C, D, E 섬유의 압축강도가 어느 정도 증진된 사실로부터도 알 수 있다. 한편 7일 강도는 강섬유의 종류나 혼입량에 관계없이 28일 강도와 비례 관계를 나타내고 있다.

슬럼프 값의 경우는 혼화제를 사용하기 때문에 강섬유 혼입에 의하여 큰 영향을 받지 않는 경우도 있으나 대체적으로 큰 폭으로 저하되고 있다. 이들

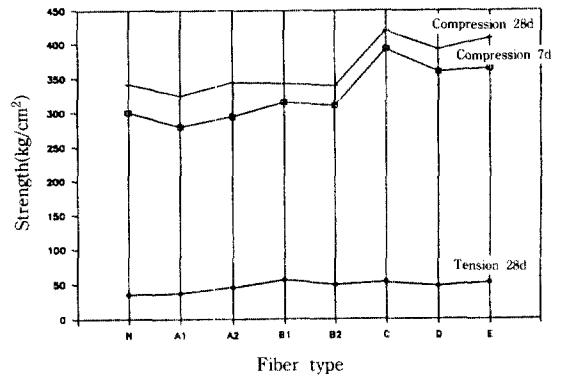


그림 3. Compression and split strength.

표 5. Strength test results and slump values

Test No.	N	A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	C	D	E
Strength								
Compression σ_7 (kg/cm ²)	301	—	295	316	311	393	360	—
Compression σ_{28} (kg/cm ²)	342	325	345	343	340	420	392	409
Split f_{28} (kg/cm ²)	35	37	46	56	49	53	47	52
Slump (cm)	22	17.8	16.1	16.5	13	20.5	20.6	18.6

결과들은 강섬유 길이와 섬유형상비(aspect ratio)에 영향을 받는 것 같으며, 강섬유 형상에 대해서도 영향을 받는 것으로 생각된다.

한편 인장강도는 활렬시험에 의해 실시하였으며, 강섬유 혼입에 의해 최고 60%까지의 강도 증진이 있음을 알 수 있다. 이 경우도 섬유의 형태와 혼입율에 의해 활렬강도가 크게 좌우되며, 길이가 짧은 A섬유의 경우는 혼입율의 증가와 더불어 활렬 강도도 증가하였으나, 길이가 길고 hook 형태인 B섬유는 혼입율의 증가로 오히려 활렬 강도가 감소하였다.

3.2 섬유 보강 무근 콘크리트보(Plain beam)의 휨거동

3.2.1 휨강도 보강 효과

강섬유 보강으로 인한 보의 휨거동을 알아보기 위하여 섬유 보강 무근 콘크리트 보(plain concrete beam with fiber, 이하 무근보)와 섬유 보강 철근 콘크리트보(reinforced concrete beam with fiber, 이하 휨보강보)로 구분하여 실험을 하였으며 그 결과가 표 6과 같다.

표 6에서 무근보(plain beam)에 대한 결과를 보면 강섬유의 보강으로 인한 휨강도의 증진은 최저 18%에서 최고 71%까지로 나타나며 평균 42%임을 알 수 있다. 이들을 그림으로 나타낸 그림 4에 의하면 무근보에서는 B섬유가 가장 유리하며, 이는 Parviz 등⁽¹⁵⁾이 섬유 형상비에 변화를 주어 실험한 결과와도 유사함을 알 수 있다. 이때 혼입율 1%인 경우가 1.5%인 경우보다 더 큰 휨강도를 나타내는데, 이는 B섬유의 길이가 긴 특성 때문이라고 판단되며, B섬유의 제조회사에서도 최대 혼입량을 1% 정도로 제안하고 있는 것과 일치한다. B섬유를 제외한 A~E섬유의 휨강도는 거의 비슷하며, A₁은 약간 저조함을 알 수 있는데 이는 섬유 혼입율이 1%로 작기 때문이라고 생각된다.

강섬유 보강보에서의 휨강도 증진은 혼입된 강섬유의 혼입율(V_f)과 섬유 형상비(l/d)에 어느 정도 비례하며,^(10,11) 이들의 곱을 식 (1)과 같이 섬유 보강 지수(fiber reinforcement index)⁽¹⁵⁾라 하여 강섬유의 보강 정도를 표시하고 있다.

$$R_f = V_f \left(\frac{l}{d} \right) \quad (1)$$

표 6. Flexural strength and deflection of concrete beams

Test No.	Flexural strength (ton)			Ultimate str.	Deflection in ultimate (mm), (mid point)
	1st crack	LOP	Ultimate	LOP str.	
N-P	1.90(100)	1.90	1.90(100)	100	0.90
N-B	3.80(100)	6.00	8.00(100)	133	11.80
A ₁ -P	2.00(105)	2.00	2.25(118)*	113	1.44
A ₁ -B	4.40(116)	10.00	11.95(149)	120	11.38
A ₂ -P	2.90(153)	2.90	2.90(153)	100	1.45
A ₂ -B	4.40(116)	11.00	12.30(154)	112	11.23
B ₁ -P	2.50(132)	2.50	3.25(171)	130	4.09
B ₁ -B	5.00(132)	7.00	10.10(126)	144	14.75
B ₂ -P	2.50(132)	2.60	2.75(145)	106	2.11
B ₂ -B	3.82(100)	8.00	9.80(123)	123	12.43
C-P	2.60(137)	2.60	2.60(137)	100	1.82
C-B	5.80(153)	9.00	10.90(136)	121	11.09
D-P	2.80(147)	2.80	2.80(147)	100	1.31
D-B	5.60(147)	8.60	9.40(118)	109	8.11
E-P	2.00(105)	2.00	2.40(126)	120	1.64
E-B	5.50(145)	10.00	11.40(143)	114	12.37

* ()의 값은 N-series를 100으로 했을 때의 상대 강도(%).

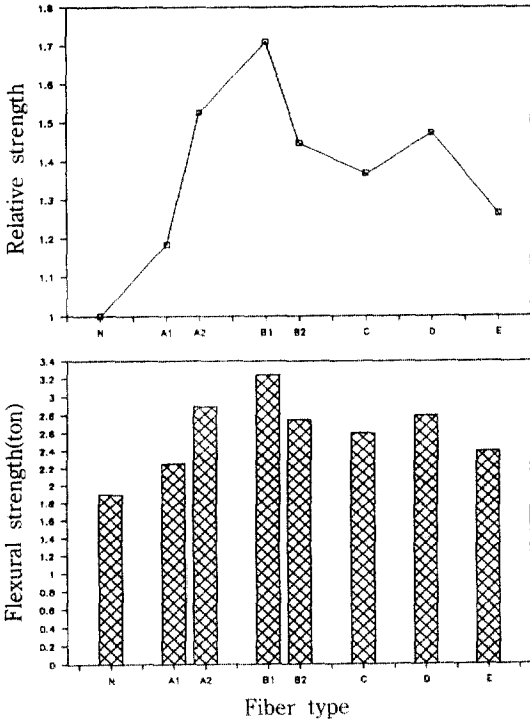


그림 4. Flexural strength of plain concrete beams (P-series).

그러나 섬유 보강 지수는 단순히 강섬유의 보강 정도를 나타내는 지수이므로 강섬유의 혼입에 따른 보강 효과를 알 수가 없고, 특히 V_f 와 섬유 형상비가 다양한 시험체의 상대적인 보강 효과를 직접 비교할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 강섬유 보강으로 인한 휨강도의 증진 효과를 상대적으로 비교 평가 하기 위하여 식 (2)와 같은 섬유 보강 효과 지수 E_r

(fiber reinforcement effect index)를 사용하였다. 이때 ΔS 는 섬유 혼입으로 인해 증진된 강도(increased strength, %)이며, 각 시험체별 섬유 보강 효과 지수는 표 7 및 그림 5와 같다.

$$E_r = \frac{\Delta S}{R_f} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

표 7에 의하면 섬유 보강 효과 지수는 지수상으로 30~95%이고 평균으로 49%를 나타내어 표 6의 평균값 42%와 큰 차이를 보여주지 않는다. 그러나 그림 5에 의하면 역시 B_1 의 경우가 가장 효과적이라는 것을 확연히 알 수 있다. 이는 B섬유의 섬유 형상비가 다른 섬유에 비하여 상대적으로 크고, 섬유 혼입율 1%인 경우가 1.5%인 경우보다 더 큰 휨강도를 나타내기 때문이다. 또한 그림 4에서 그 효과가 분명히 나타나지 않은 A섬유의 경우도 섬유 보강 효과 지수를 이용함으로써 상당히 효과적이라는 것을 발견할 수 있다. 이로써 본 연구에서 제안하는 섬유 보강 효과 지수는 섬유 혼입율과 섬유 형상비가 다른 섬유 보강보의 휨강도 증진 효과를 합리적으로 비교 평가하는데 유용한 지표가 될 것이라고 생각 된다.

3.2.2 휨인성 효과

본 연구에서 실시한 무근보의 하중-처짐 곡선은 그림 6과 같다. 이 결과에 의하면 강섬유 보강으로 인하여 균열 후(post cracking)부터 파괴시까지의 휨 저항이 상당히 크게 나타남을 알 수 있다. 특히 B 섬유에의 경우에 가장 크게 나타나며, 그 외의 강섬유도 대체로 큰 인성(toughness)을 나타내고 있다.

표 7. Fiber reinforcement effect index E_r of plain concrete beams (P-series)

Test No.	Ultimate flex. str. (ton)	Increased str. ΔS (%)	R_f (Fiber reinforcement index = $V_f \cdot l/d$)	$E_r = \left[\frac{\Delta S}{R_f} \right] (\%)$
N	1.90	—	—	—
A ₁	2.25	18	44	41
A ₂	2.90	53	88	60
B ₁	3.25	71	75	95
B ₂	2.75	45	112.5	40
C	2.60	37	108	34
D	2.80	47	108	44
E	2.40	26	86	30

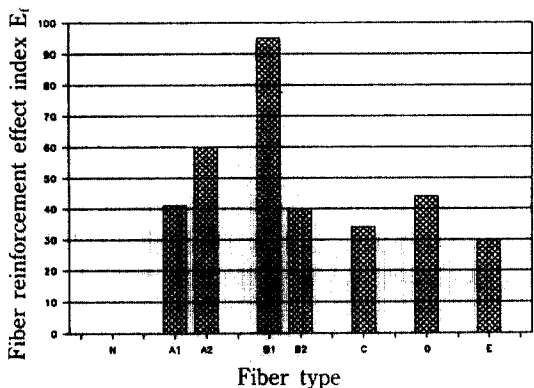


그림 5. Fiber reinforcement effect index E_f of plain concrete beams.

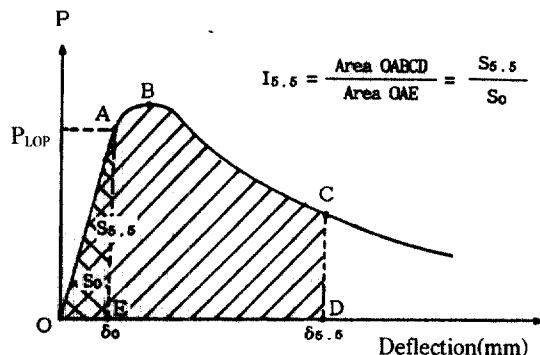


그림 7. Toughness index from flexural load-deflection diagram.

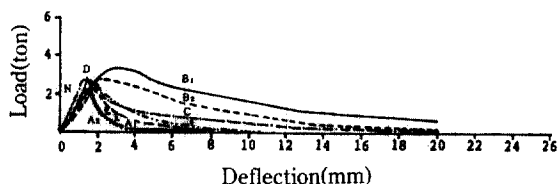


그림 6. Load-deflection curve of plain concrete beams with steel fibers (P-series).

와 Henager⁽²⁰⁾는 무차원의 인성 지수(toughness index)를 제안하였고, 이 이외에도 여러 가지의 휨인성 평가방법⁽¹⁶⁻¹⁸⁾이 제안되고 있으나, 본 연구에서는 ASTM에서 제안하는 방법⁽¹⁹⁾을 기본으로 하여 나타내었으며 그 결과가 표 8이다.

이때 인성 지수를 결정하기 위한 균열 하중은 육안으로 관찰할 수 있는 초기의 미세 균열의 경우 관측의 정확성이 보장되지 않고 탄성범위 이내에서 발생되므로, 본 연구에서는 비례한계점(LOP, limit of proportional point)의 휨강도를 균열 하중으로 간주하였다.

표 8의 I_{5.5}는 그림 7과 같이 비례 한계점에서의 처짐값 δ₀의 5.5배에 해당되는 처짐 δ_{5.5}까지의 하중-처짐 곡선 아래의 면적을, 비례 한계점까지의 하중-처짐 곡선 아래의 면적으로 나눈 값을 의미하며 식 (3)과 같다.

강섬유 보강보의 휨거동 특성 중에서 균열 후의 에너지흡수능력(energy absorption capacity)을 휨인성(flexural toughness)이라 하며, 1974년 Johnston⁽¹⁷⁾이 최대 하중까지의 하중-처짐 곡선 아래의 면적을 사용하는 것을 제안하였다. 그러나 이 방법은 시험체의 크기와 형상에 따라 차이가 많이 나기 때문에 합리적인 인성 평가방법이 못되어 ACI 544위원회⁽¹⁶⁾

표 8. Toughness of plain concrete beams (P-series)

Test No.	LOP (ton)	Deflection of LOP, δ ₀ (mm)	Area under load-def. curve up to δ ₀ , S ₀	Deflection of δ _{5.5} (mm)	Area under load-def. curve up to δ _{5.5} , S _{5.5}	Toughness index, I _{5.5}	Effective toughness index, T _e
N	1.90	0.9	0.9	4.95	0.9	1.00	1.0
A ₁	2.00	1.2	1.68	6.6	3.8	2.26	5.1
A ₂	2.90	1.5	1.7	8.25	4.8	2.80	3.2
B ₁	2.50	1.4	1.3	7.7	17.8	13.70	18.3
B ₂	2.60	1.5	2.0	8.25	16.6	8.30	7.4
C	2.60	1.8	1.4	9.9	10.0	7.14	6.6
D	2.80	1.2	1.7	6.6	8.9	5.23	4.8
E	2.00	1.1	1.2	6.1	6.4	5.33	6.2

$$I_{5.5} = \frac{\text{Area OABCD}}{\text{Area OAE}} = \frac{S_{5.5}}{S_0} \quad (3)$$

이때 $\delta_{5.5}$ 는 일종의 한계 처짐이며, 이 한계 처짐을 너무 작게 취하면 섬유 혼입의 영향이 분명히 나타나지 않고, 또한 너무 크게 취하면 변형이 크게 되어 처짐량의 측정 정밀도가 떨어지게 된다. 따라서 인성을 합리적으로 나타내는 지수로 $I_{5.5}$ 가 제안되고 있으며,^(15,16,19) 본 연구에서도 $I_{5.5}$ 를 기본 인성 지수로 하였다. 한편 ASTM 규준에서는 $I_{5.5}$ 를 I_{10} 으로 표시하고 있으며 I_{10} 의 첨자 10은 시험편을 완전 탄소성체라고 가정했을 때의 인성 지수를 말한다.

그러나 식 (3)의 $I_{5.5}$ 의 값은 섬유 혼입률 V_f 와 섬유형상비(l/d)가 같은 경우에 비교될 수 있는 값이며 V_f 와 (l/d)이 다른 경우는 $I_{5.5}$ 값으로 각 시험체의 인성 효과를 일률적으로 비교할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 $I_{5.5}$ 를 섬유 보강 지수로 나눈 값을 유효 인성 지수(effective toughness index) T_e 라고 하여 식 (4)로 나타내었으며, T_e 로 평가한 결과는 그림 8과 같다.

$$T_e = \frac{I_{5.5}}{R_f} \quad (4)$$

그림 8에 의하면 T_e 값의 분포는 3.2~18.3으로 $I_{5.5}$ 값의 분포인 2.26~13.70보다 분포 폭이 크다. 또한 두 값 사이에는 변화가 생기며 특히 A, B 섬유에서 두드러진다. 즉 단순한 인성 지수 I 로 비교하면 B 섬유가 가장 크고 A 섬유가 가장 작게 나타나지만, 유효 인성 지수 T_e 로 비교하면 B₁의 경우가 가장

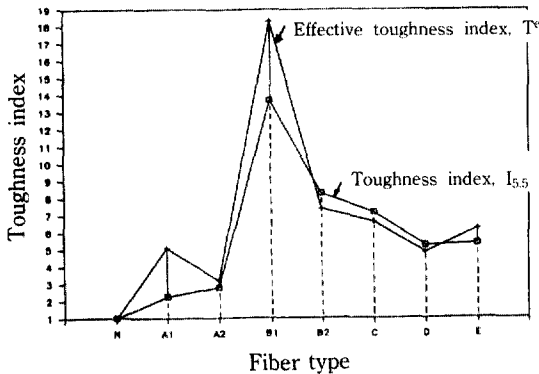


그림 8. Toughness index and effective toughness index of plain concrete beams.

크고 그 외는 거의 비슷한 값을 나타낸다. 또한 A 섬유는 섬유 혼입율의 증가에 따라 휨강도의 증진이 이루어지지만 유효 인성은 비례적으로 증가하지 않으므로 섬유 혼입율이 1%인 경우의 효과가 상대적으로 더 크다는 것을 의미하게 된다. 이와 같은 결과로 볼 때, 식 (4)의 T_e 값은 섬유 혼입율과 섬유형상비가 다른 보의 인성 효과를 보다 객관적으로 비교 분석하는데 유용한 방법이라고 생각된다.

3.3 섬유 보강 철근 콘크리트보(RC beam)의 휨 거동

3.3.1 휨강도 보강 효과

표 6에 의하면 섬유 보강 철근 콘크리트보(이하 휨보강보)에서 강섬유로 인한 휨강도의 증진 효과는 최저 18%에서 최고 54%임을 알 수 있다. 이는 무근보의 최고 71%와 비교하면 증진 효과가 크지 않은 것이며, 강섬유의 보강으로 인한 휨보강 효과가 휨보강보에서보다 무근보에서 더 크다는 것을 나타내는 것이다.

그림 9는 휨보강보의 휨강도 결과를 나타낸 것

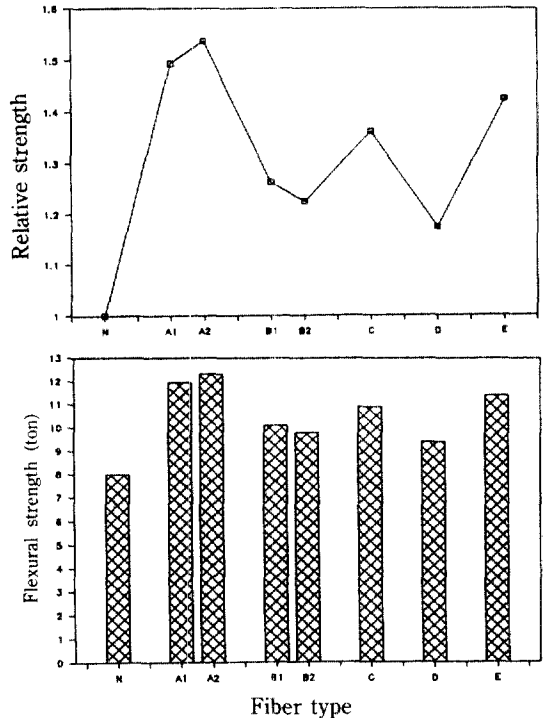


그림 9. Flexural strength of reinforced concrete beams (B-series).

표 9. Fiber reinforcement effect index E_f of reinforced concrete beams (B-series)

Test No.	Ultimate flex. str. (ton)	Increased str. ΔS (%)	R_f (Fiber reinforcement index = $V_f \cdot l/d$)	$E_f = \left[\frac{\Delta S}{R_f} \right]$ (%)
N	8.00	-	-	-
A ₁	11.95	49	44	111
A ₂	12.30	54	88	61
B ₁	10.10	26	75	35
B ₂	9.80	23	112.5	20
C	10.90	36	108	33
D	9.40	18	108	17
E	11.40	43	86	50

표 10. Toughness of reinforced concrete beams (B-series)

Test No.	LOP (ton)	Deflection of LOP, δ_0 (mm)	Area under load-def. curve up to δ_0, S_0	Deflection of $\delta_{5.5}$ (mm)	Area under load-def. curve up to $\delta_{5.5}, S_{5.5}$	Toughness index, $I_{5.5}$	Effective toughness index, T_e
N	6.0	3.0	7.8	16.50	30.8	3.94	3.9
A ₁	10.0	4.5	23.8	24.75	226.8	9.52	22.0
A ₂	11.0	4.5	27.5	24.75	276.5	10.05	11.4
B ₁	7.0	3.2	11.0	17.60	148.5	13.50	18.0
B ₂	8.0	4.0	16.0	22.00	182.0	11.00	10.0
C	9.0	4.4	19.8	24.20	219.2	10.07	10.3
D	8.6	4.0	17.2	22.20	191.2	11.12	10.3
E	10.0	4.5	22.3	24.75	229.3	10.28	12.0

으로 A섬유가 약간 크고 D섬유가 가장 작은 값이지만 무근보에서의 값은 큰 차이를 보여주지는 않는다. 한편 섬유 보강 지수 R_f 를 고려한 섬유 보강 효과 지수 E_f 는 표 9 및 그림 10과 같다.

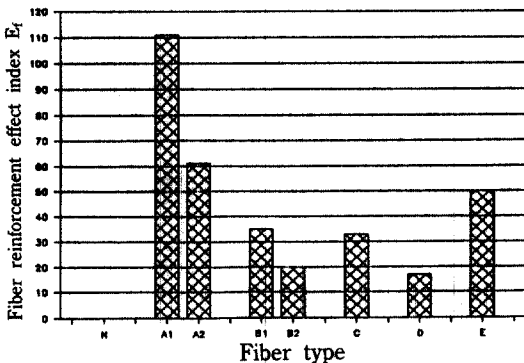


그림 10. Fiber reinforcement effect index E_f of reinforced concrete beams.

표 9에 의하면 휨보강보의 섬유 보강 효과 지수의 분포는 17~111%로 섬유 보강 지수에서보다 분포 폭이 크게 나타나는데, 이는 보강 효과의 상대적 비교가 분명해지는 것을 의미한다. 또한 그림 10에서도 그림 9에 의한 것보다 강섬유 보강 효과가 분명히 나타는데, A₁의 경우가 가장 효과적이고 A₂와 E의 경우가 비교적 효과적인 반면 B₂나 D의 경우는 매우 저조함을 알 수 있다. 이러한 결과는 무근보의 경우와 다른 현상으로 휨보강보에는 길이가 짧고 양단이 paddle(dog bone)형태를 한 강섬유가 매우 효과적임을 시사하는 것이다.

3.3.2 휨인성 효과

휨철근 보강보의 하중-처짐 곡선은 그림 11과 같으며, 강섬유 보강으로 인하여 인성 증진이 현저히 이루어진 것을 알 수 있다. 특히 A, B섬유에서 큰 효과를 나타내지만 그 외의 섬유에서도 대체로 큰

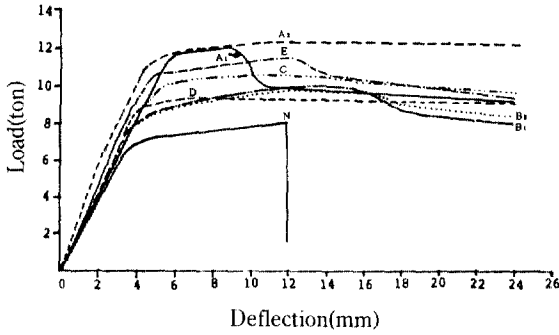


그림 11. Load-deflection curve of reinforced concrete beams with steel fibers (B-series).

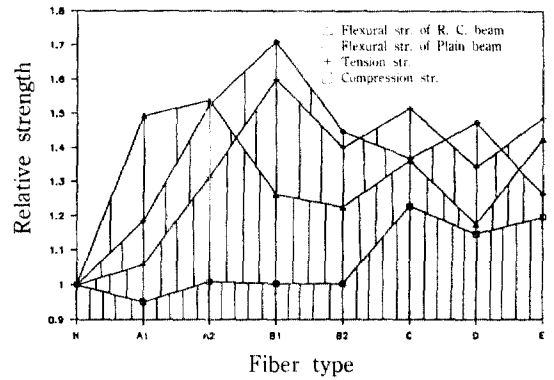


그림 13. Relative strength of different fiber types.

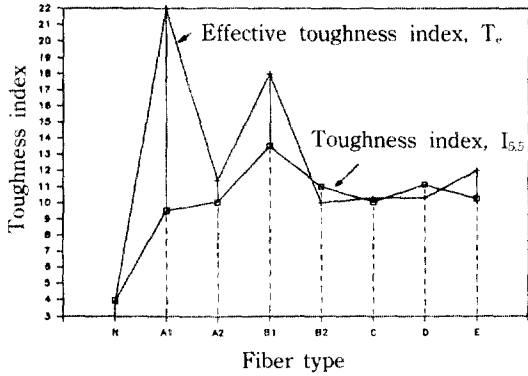


그림 12. Toughness index and effective toughness index of reinforced concrete beams (B-series).

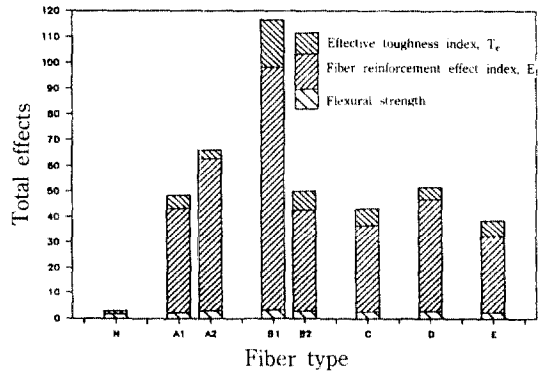


그림 14. Total effects of plain concrete beams.

파괴 저항성이 나타나고 있다. 인성 효과의 분석을 위해 앞서와 같이 인성 지수 $I_{5.5}$ 와 유효 인성 지수 T_e 로 나타낸 것이 표 10 및 그림 12이다. 인성 지수 $I_{5.5}$ 에 의한 경우는 B_1 의 경우가 가장 크지만, 유효 인성 지수에 의해 비교해 보면 B_1 보다도 A_1 에서 더 큰 인성이 나타나고 그 외의 섬유는 섬유 종류에 관계없이 거의 비슷한 인성을 나타냄을 알 수 있다.

한편 유효 인성 지수 T_e 의 범위는 3.9~22.0으로 무근보와 비슷하지만 전체적인 평균값은 12.2로 무근보의 6.6보다 월등히 크다. 그러나 휨보강보의 인성은 휨철근에 의한 인성(N에서 $I_{5.5}=3.9$)이 포함된 것으로서 무근보의 경우와 단순 비교하는 것은 타당하지 않다. 따라서 No-fiber에서의 기본 인성을 배제한다면 강섬유의 휨보강 효과는 무근보의 경우가 더 크다고 볼 수 있다.

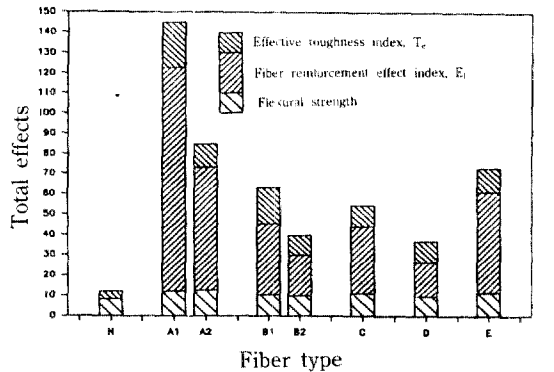


그림 15. Total effects of reinforced concrete beams.

3.3.3 상대 강도 평가

강섬유로 보강된 콘크리트의 압축 및 인장과 휨 강도를 무섬유 콘크리트와 비교한 상대 강도(relative strength)를 나타낸 것이 그림 13이다. 대부분의

상대 강도가 크게 나타나지만 특히 휨강도와 인장 강도의 증진이 두드러진 것을 알 수 있다. 특히 섬유 형태에 따라서는 A, B섬유가 다른 섬유에 비해 높은 상대 강도가 나타나고 있으며, 이는 앞에서의 고찰 결과와 같다.

3.3.4 휨거동 종합 평가

휨부재의 저항 능력을 나타내는 지표는 휨강도와 본 연구에서 제안한 섬유 보강 효과 지수 및 유효 인성 지수 등이라고 할 수 있으며, 이들을 섬유 형태에 따라 종합 평가한 결과가 그림 14 및 15이다.

이들 결과에 의하면 휨부재의 보강 효과는 그림 14의 무근보의 경우는 B섬유를 1% 혼입한 시험체가 가장 효과적이며, A₂가 약간 효과적이고 그 외의 경우는 거의 비슷한 효과를 나타낸다.

그러나 그림 15의 휨보강보의 경우는 A섬유를 1% 혼입한 경우가 가장 효과적이며, B₂가 D와 더불어 가장 저조하고 그 외는 거의 비슷하다. 이로써 무근보에는 B섬유가 유리하고 휨보강보에는 A섬유가 유리함을 알 수 있다.

4. 결 론

강섬유의 형태에 따른 기초 실험과 휨강도의 거동에 관한 본 연구의 실험 범위내에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 강섬유 보강으로 인하여 압축 강도의 증진이 어느 정도 일어나지만, 섬유 뭉침 및 집중 현상의 영향으로 증진이 나타나지 않는 경우도 있다. 그러나 할랄 강도의 증진은 최고 60%까지로 상당한 효과를 나타내었다.

2) 강섬유의 혼입율은 양단이 hook 형태인 B섬유는 1% 이내가 좋고, dog bone 형태인 A섬유는 무근보의 경우 2%가 효과적이지만 휨철근 보강보의 경우는 1%가 더 효과적인 것으로 나타났다.

3) 본 연구에서 제안된 섬유 보강 효과 지수는 종류가 다른 강섬유의 휨강도에 대한 상대적인 보강 특성을 나타내는데 합리적인 지표로 생각된다. 이 지수에 의하면 무근보의 휨강도 증진에는 B섬유가 가장 좋고, A섬유도 좋은 효과를 나타냄을 알 수 있다. 전체적으로 보면 휨보강 효과는 무근보의 경우가 휨보강보의 경우보다 크며, 강섬유는 무근보에 사용할 경우 더욱 효과적이다.

4) 무근보의 인성 효과를 알아보기 위하여 제안된 유효 인성 지수는 종류가 다른 강섬유의 인성을 평가하는데 효과적인 방법으로 생각되며, B섬유가 가장 큰 인성을 발휘하고 그 외 섬유는 거의 비슷한 인성을 나타내었다.

5) 휨철근 보강보의 휨강도 증진에는 A섬유가 가장 효과적이며, wavy 형태의 E섬유도 어느 정도의 효과를 나타내었다.

6) 전반적으로 강섬유 양단이 dog bone(paddled) 형태인 A섬유와 hook 형태인 B섬유가 섬유 혼입율이 작음에도 큰 효과를 나타내었으며, C의 straight나 D의 crimped 및 E의 wavy형태는 거의 비슷한 결과를 보여주었다.

참 고 문 헌

1. Romualdi, James P. and Baston, Gorden B., "Behavior of Reinforced Concrete Beams with Closely Spaced Reinforcement", *ACI Jour.*, Vol.60, June, 1963, pp.775~790.
2. Romualdi, James P. and Baston, Gorden B., "Mechanics of Crack Arrest in Concrete", *Proc., ASCE*, Vol.89, EMS, June, 1963, pp.147~168.
3. Shah, Surendra P. and Rangan, B.Vijaya, "Fiber Reinforced Concrete Properties", *ACI Jour.*, Vol. 68, No.2, Feb., 1971, pp.126~135.
4. Kormeling, H.A., Reinhardt, H.W. and Shah, S.P., "Static and Fatigue Properties of Concrete Beams Reinforced with Continuous Bars and with Fibers", *ACI Jour.*, Jan.-Feb., 1980, pp.36~43.
5. Ramakrishnan, V., Brandshaug, Terje and Coyle, W.V., "Comparative Evaluation of Concrete Reinforced with Straight Steel Fibers and Fibers with Deformed Ends Glued Together into Bundles", *ACI Jour., Proc.*, Vol.77, No.3, May-June, 1980, pp. 135~143.
6. *Fiber Reinforced Concrete-International Symposium*, SP-81, ACI, 1984.
7. Swamy, R.N. and Al-Ta'an, Sa'ad A., "Deformation and Fiber Ultimate Strength in Flexural of Reinforced Concrete Beams Made with Steel Fiber Concrete", *ACI Jour.*, Vol.78, No.5, Sep.-Oct., 1981, pp.395~405.
8. ACI Committee 544, "State-of-the-Art Report on the Fiber Reinforced Concrete", ACI Manual of Concrete Practice, ACI Pub., 1988.

9. 박승범, “섬유보강이 콘크리트의 역학적 특성과 철근 콘크리트의 균열 성장에 미치는 영향에 관한 연구”, 충남대학교 박사학위 논문, 충남대학교, 1978.
10. 박승범, 임창덕, “강섬유 보강 콘크리트의 역학적 특성 및 제조에 관한 연구”, **대한토목학회 학술발표개요집**, 대한토목학회, 1986. pp.49~59.
11. 박승범, 임창덕, “레미콘 제조를 위한 강섬유 보강 콘크리트의 물리적 특성에 관한 연구”, **충남대학교 산업기술연구소 논문집**, 제2권, 제2호, 1987.12, pp. 74~86.
12. 오병환, 이형준, 강영진, “섬유 콘크리트의 강도 및 역학적 특성에 관한 연구”, **대한토목학회 논문집**, 제9권, 제3호, 1989.9, pp.49~56.
13. 오병환, “강섬유를 혼입한 철근 콘크리트 부재의 휨거동에 관한 이론 및 실험 연구”, **콘크리트학회 논문집**, 제3권 3호, 1991.9, pp.129~139.
14. 전찬기, “섬유보강 콘크리트 보의 휨거동에 관한 연구”, **부천전문대학 논문집**, 제11집, 1990, pp. 171~200.
15. Parviz Soroushian and Ziad Bayasi, “Fiber Type Effects on the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete”, *ACI Materials Jour.*, Mar.-Apr., 1991, pp.129~134.
16. ACI Committee 544, “Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete”, *ACI Materials Jour.*, Nov.-Dec., 1988, pp.583~590.
17. Johnston, C.D., “Steel Fiber Reinforced Mortar and Concrete - a Review of Mechanical Properties” in FRC, ACI, SP-44, 1974, pp.127~142.
18. 구봉근, 정경섭, 김태봉, “강섬유 보강 콘크리트의 유효 인성 평가”, **콘크리트학회 논문집**, 제4권 2호, 1992, pp.103~110.
19. ASTM, Standard C 1018, “Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)”, ASTM, Phil., 1986, pp.650~657.
20. Henager, C.H., “A Toughness Index of Fiber Concrete”. In Testing and Test Methods of Fiber Cement Composites RILEM Symposium 1978, Lancaster, The Construction Press, 1978, pp.79~86.
(接受: 1992. 9. 21)