

# 이종 섬유 혼입비에 따른 섬유보강 콘크리트의 휨 인성 및 휨 인장강도에 관한 연구

박홍용<sup>1\*</sup>, 류종현<sup>2</sup>, 조용범<sup>3</sup>

## Study on flexural toughness and flexural tensile strength of fiber reinforced concrete by mixture ratio of different fibers

Hong-Yong Park, Jong-Hyun Ryu, Yong-Bum Jo

**Abstract** Recently, a new type of polyolefin fiber having a good mechanical properties is being developed, and it is necessary to examine a possibility for the new fiber together to be used as a reinforcing fiber with other types of fiber or by itself. The objective of this study is to find flexural toughness and tensile strength of concrete reinforced with steel and polyolefin fibers. Four point beam tests were performed with 324 specimens following two standard tests methods: KS F 2566 and ASTM C 1399-02. From the test results, the effects of volume fraction of fibers, and aspect ratio of steel fiber on the toughness and tensile strength were investigated, and the optimal ratio of steel fiber to polyolefin fiber was suggested.

**Keywords:** Fiber reinforced, flexural toughness, residual strength, flexural tensile strength

**요 지** 최근 새로운 형태의 폴리에틸렌 섬유에 대하여 성능향상 개발이 이루어지고 있으며, 기존 섬유와 혼입하여 사용하거나 폴리에틸렌 섬유만을 사용한 콘크리트 특성에 대하여 연구와 검증이 필요하다. 본 연구의 목적은 강섬유와 폴리에틸렌 섬유를 사용한 콘크리트의 휨 인성 및 휨 인장강도에 대한 성능을 확인하기 위하여 324개의 보 시편을 제작하고, KS F 2566과 ASTM C 1399-02규격에서 제시한 4점 휨 실험을 수행하여 휨 인성지수, 등가 휨 인장강도, 평균잔류강도를 분석하였다. 실험결과, 섬유 혼입률, 섬유 형상비에 대한 휨 인성 및 인장강도에 대한 효과가 확인되었으며, 강섬유와 폴리에틸렌의 최적의 혼입비율을 제시하였다.

**주요어:** 섬유보강, 휨 인성, 휨 인장강도, 잔류강도

### 1. 서 론

국내에서는 과거 십 수 년간 국토의 효율적 이용 및 관리의 일환으로 지하공간 이용에 대한 활발한 논의가 있었으며, 최근에서는 산악도로 터널, 수로터널, 지하철, 고속전철, 지하 비축시설 등에서 다양한 지하공간 이용이 시도되고 있다.

국내에서는 1980년대 NATM(New Austrian Tunneling Method)이 도입된 이후 터널 굴착공사에 대부분 NATM을 적용하고 있어 상당한 시공 실적과 경험이 축적되었으며, 특히 시공 실적에서는 세계적인 수준이다. NATM의 설계기본개념에 의하면 터널 주변 원지반이 터널을

지지하는 가장 중요한 지보재로 활용하며, 필요한 경우 원지반을 지보하기 위하여 강지보, Rock-bolt, Shotcrete 등을 지보 공법으로 활용하여 원지반의 변형을 억제하며, 모든 변형이 수렴된 후, 2차 라이닝을 시공함을 원칙으로 하고 있다. 이러한 지보공법을 이용하여 원지반의 변형을 억제하며, 모든 변형이 수렴된 후, 2차 라이닝을 시공함으로써 최종적인 터널의 안정성을 확보하고 있다.

이러한 NATM의 설계 개념에 의하면 라이닝 콘크리트는 원칙적으로 외력을 분담치 않는 무응력 부재이며, 단지 원지반의 풍화방지와 단면형상 유지용 외장재의 역할만 한다고 가정하고 있다. 그러나, 최근 라이닝 콘크리트에 발생하고 있는 균열에 대한 문제점이 큰 현안으로 대두되고 있다. 터널 콘크리트 라이닝의 균열은 그림 1과 같이 어느 한 가지 원인으로 발생되는 것보다는 여러 가지 원인이 복합적으로 작용하여 발생한다. 라이닝에 발생하는 균열은 작용하중으로 인한 인장응력의 증

<sup>1</sup>명지대학교 토목환경공학과 교수

<sup>2</sup>GS건설 기술연구소 선임연구원

<sup>3</sup>명지대학교 토목환경공학과 석사

\*교신저자: 박홍용 (E-mail: hypark@mju.ac.kr)

가로 발생하는 균열과 콘크리트의 건조수축 등 재료특성에 의해 균열이 발생하는 경우가 많다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 1990년대 이후에 초기 균열을 제어하고, 지반 이완하중에 의한 콘크리트 구조물의 취성적 파괴를 방지하기 위하여 섬유를 혼입하는 연구가 진행되어 왔다. 콘크리트 구조물에 섬유를 보강시키면 균열 발생을 억제함은 물론 균열발전 후에도 균열 폭을 억제함으로써 하중전달능력을 향상시키는 데 효과가 있어 일반적인 콘크리트보다 사용성 및 극한 상태에서 우수한 성능을 갖고 있다(Bernhard, 1995). 최근 섬유보강 콘크리트(Fiber Reinforced Concrete: FRC)에 관한 연구논문들을 살펴보면 동하중하에서도 우수한 효과가 나타나는 것으로 발표되었다.

섬유보강 콘크리트의 능력은 일정한 조건하에 재하된 콘크리트 구조물에서 균열 및 처짐의 감소가 파괴하중의 증대보다 더 큰 의미가 있다. 특히 균열 발생 후 기술적으로 이용할 수 있는 내하력의 입증은 섬유보강 콘크리트의 고유특성으로 의미를 가질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트 보강용 섬유 중 강섬유와 합성플라스틱 섬유를 혼입함에 따른 섬유 보강 콘크리트 평가 실험방법에 따른 품질평가를 실시하고, 이를 이용하여 섬유보강 콘크리트를 이용한 구조물의 설계에 반영할 수 있는 방안을 알아보았다.

## 2. 섬유보강 콘크리트 평가방법

일반적으로 균열이 발생하지 않은 것으로 가정한 모멘트와 균열 후 등가 휨 인장강도를 고려한 모멘트를 같게 놓음으로써 균열 후 등가 휨 인장강도를 그림 2와 같이 표현할 수 있다(박홍용, 2000a).

그림 2에서 (a)는 균열이 발생하지 않은 것으로 가정

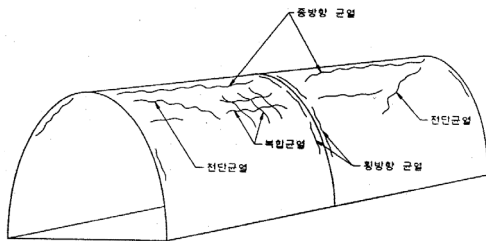


그림 1. 라이닝 콘크리트 균열패턴

한 등가 휨 인장강도를 나타낸 것이고, (b)는 균열 후 등가 휨 인장강도를 나타낸 것이다.

$$M^I = f_{te} \cdot \frac{b h^2}{6} \quad (1)$$

$$M^{II} = T \cdot z = f_{cte} \cdot 0.9h \cdot b \cdot 0.5h \quad (2)$$

여기서,  $M^I$  = 균열이 발생하지 않은 것으로 가정한 경우의 모멘트

$M^{II}$  = 균열 후 소성 모멘트

$M^I = M^{II}$  이므로 균열 후 등가 휨 인장강도는 다음의 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$f_{cte} = 0.37 \cdot f_{te} \quad (3)$$

여기서,  $f_{te}$  = 등가 휨 인장강도

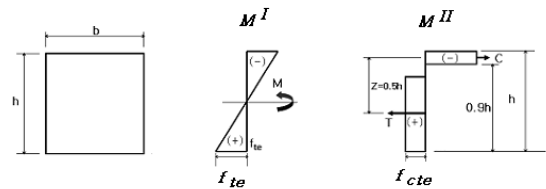
$f_{cte}$  = 균열 후 등가 휨 인장강도

이와 같은 개념의 균열 후 등가 휨 인장강도를 산출하는 방법 중에서 본 장에서는 독일 콘크리트 위원회에서 제시한 DBV식과 일본 토목학회에서 제시한 JSCE식에 대하여 설명하고자 한다.

### 2.1 독일 콘크리트 위원회(DBV) 식

독일 콘크리트 위원회(이하 DBV)에서 제안한 균열 후 등가 휨 인장강도 결정 방법에 대해 소개하고자 한다. DBV에서 제시하고 있는 방법을 그림 3에 나타내었다(박홍용, 2000b).

DBV에서는 등가 휨 인장강도를 구하기 위하여 하중-처짐 관계 곡선을 실험을 통해서 구하고, 이 그래프를 가지고 등가 휨 인장강도를 정의한다. 식 (4)와 식 (5)는



(a) 균열 전 (b) 균열 후

그림 2. 균열 전후의 등가 휨 인장강도

등가하중과 등가 휨 인장강도를 산정하는 식을 나타낸 것이다.

$$F_{3equ} = \frac{D_{BZ3}^f}{L/200 + L/4000} \quad (4)$$

$$\beta_{BZ3equ} = \frac{F_{3equ} \cdot L}{b h^2} \quad (5)$$

여기서,  $\beta_{BZ3equ}$  = 등가 휨 인장강도

$F_{3equ}$  = 등가 하중

$D_{BZ3}^f$  = 강섬유가 부담하는 에너지

L = 지간 거리

그림 3에서 변위가 L/4000에서의 하중 값과 (L/200+L/2000)에서의 하중 값을 이용하여 하중-처짐 곡선이 이루는 면적을 산출하고, 식 (4)를 이용하여 등가하중  $F_{3equ}$ 을 계산한다. 구해진 등가하중을 식 (5)에 대입하여 등가 휨 인장강도를 구할 수 있다. 균열 후 등가 휨 인장강도는 식 (3)에 등가 휨 인장강도를 대입하여 구한다. DBV 식은 재료실험을 실시하여 그림 3에서와 같이 처짐이 ( $\delta_1 + L/200 + L/2000$ )가 될 때까지 측정해야 한다.

## 2.2 일본 토목학회(JSCE) 식

일본 토목학회(이하 JSCE)에서 제안한 균열 후 등가 인장강도 결정 방법은 한계상태 II는 한계균열 폭  $W_{II}$ 를 근거로 산출된 설계단면내력으로 조사한다. 한계상태 II는 강섬유 보강 콘크리트의 부재성능으로서 휨 인장응력에 대한 저항성능을 휨 실험으로부터 평가하고, 휨 및 압축력을 취한 부재의 내력을 정하고, 조사하는 것이다.

한계상태 II는 휨 인성실험을 시행하고, 이에 해당하는 균열 폭의 하중상태 및 변형상태부터 정의를 낸 것으

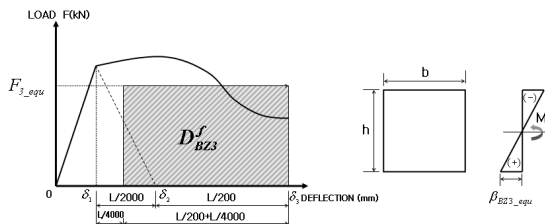


그림 3. 독일 콘크리트 위원회(DBV) 식

로 이때의 하중상태로부터 휨 인장강도를 구하고, 단면 내력의 조사를 행하는 것이다.

한계균열 폭  $W_{II}$ 는 그림 4에서 강섬유 보강 콘크리트 부재의 휨 인장강도 실험 결과인 하중-처짐 그래프에서 B점으로 정의하였다. 이를 이용해서 한계상태 균열 폭을 정의하고, 하중과 한계상태 균열 폭의 관계로부터 균열 후 등가 휨 인장강도를 결정하고 있다. 한계상태 균열 폭은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_{II} = 0.0035 \cdot \frac{0.7}{0.3} l_s \quad (6)$$

여기서 0.0035는 콘크리트의 극한변형률이고 0.7 및 0.3은 부재에 대한 인장단면 및 압축단면 크기의 비율이다. 또,  $l_s$ 의 값은 0.7h~1.0h 정도의 값이다.

본 논문에서는  $l_s$ 의 값은 1.0h로 하였다. 따라서 한계 균열 폭  $W_{II}$ 는 부재의 높이 h가 150 mm 이므로 1.23 mm 가 된다.

JSCE에서는 식 (7)에 나타난 바와 같이 균열 후 등가 휨 인장강도를 정의하고 있다.

$$f_{tf} = 0.43 \frac{Pl}{bh^2} \quad (7)$$

여기서,  $f_{tf}$  = 균열 후 등가 휨 인장강도

P = 한계상태 균열 폭을 발생시키는 상태의 하중

l = 지간, b = 단면 폭, h = 단면 높이

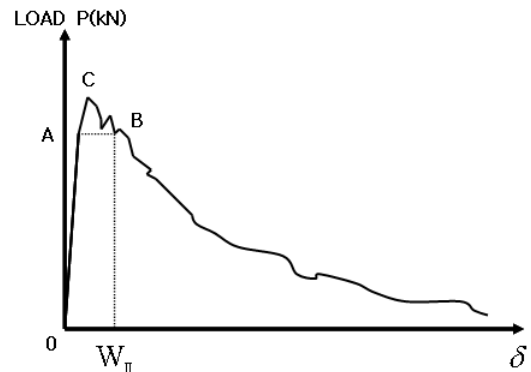


그림 4. 한계균열 폭  $W_{II}$ 의 산정

### 2.3 휨 인성 평가 방법

본 연구에서는 KS F 2566 방법을 이용하였으며, 이 실험법은 ASTM C 1018을 인용하였는데, ASTM에서는 그림 5와 같이 ACI 544 위원회 방법과 Johnston(II) 방법을 조합하여 채택하였다. 초기 하중-처짐 곡선을 직선화한 뒤 초기 균열하중(A점)의 접선이 X축과 만나는 O'점을 처짐 원점으로 잡아 O'AB에 의한 삼각형 면적을 초기 균열 처짐  $\delta_{LOP}$ 의 면적으로 간주하였다. 이 때 O'B를  $\delta$ 로 하여  $3\delta$ ,  $5.5\delta$ ,  $10.5\delta$  인 D, F, H점을 잡아 각각의 인성지수를 구하여 인성평가의 기준으로 사용하고 있다.

한편 그림 6은 완전탄소성거동 재료의 하중-처짐 곡선으로써, 인성지수  $I_5$ ,  $I_{10}$ ,  $I_{20}$ 에서의 첨자는 이론적인 인성지수가 각각 5, 10, 20임을 의미한다. 따라서 실험편이 완전탄소성체일 때 Johnston(II)의 인성평가 지수인  $I_{3.0}$ ,  $I_{5.5}$ ,  $I_{15.5}$ 는 ASTM C 1018에서는  $I_5$ ,  $I_{10}$ ,  $I_{20}$ 으로 표시하고 있다. 이러한 휨 인성지수(Toughness Index)의 계산방법은 아래의 식 (8)에 제시되어 있다(그림 6 참조)

$$I_5 = \frac{OACD \text{ 면적}}{OAB \text{ 면적}}, I_{10} = \frac{OAEF \text{ 면적}}{OAB \text{ 면적}},$$

$$I_{20} = \frac{OAGH \text{ 면적}}{OAB \text{ 면적}} \quad (8)$$

### 2.4 평균 잔류강도

잔류강도는 균열이 생긴 실험체의 단면이 견딜 수 있는 휨 강도이며, 이는 실험체의 특정 처짐 부분의 2차 재하 곡선을 구함으로써 계산할 수 있다. 또한 섬유 보강 실험체가 얼마나 휨에 대하여 저항할 수 있는지를 말한다.

평균 잔류강도는 균열이 생긴 실험체의 2차 재하 곡선을 구하여 얻은 잔류강도 4점에서 얻은 값의 평균이다.

평균 잔류강도를 구하는 실험방법은 하중-처짐 곡선을 그려서 구하는 휨-인성실험의 값이나 균열 후 등가인장강도를 구하는 실험방법과 비교할 때 좀 더 정확한 계산 값을 구할 수 있다. 그 이유는 1차 재하할 때 실험체 밑 부분에 댄 강판이 균열이 발생할 때까지 일정한 속도로 처짐이 생기도록 해주기 때문이다. 예전부터 사용되었던 KS F 2566 강섬유 보강 콘크리트의 휨 인성 실험 방법은 재하실험 도중 강섬유의 끊어짐이나 강섬유의 뿔힘으로 인한 갑작스런 처짐 현상으로 인하여, 그래프상의 처짐값이 불규칙하거나 튀는 값이 발생하여 정확한 그래프 해석에 어려움이 있었다.

균열이 발생한 후에 강판을 제거하고 2차 재하함으로써, 섬유의 휨-인성만을 측정할 수 있기 때문에 좀 더 정확한 값을 얻을 수 있다.

ASTM 1399-02 식에서는 그림 7과 같이 하중-처짐 그래프를 이용해서 특정 처짐 부위에서의 하중의 값을

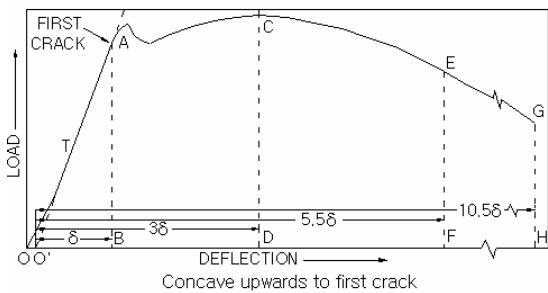


그림 5. 휨 인성지수 산출 개념도(ASTM)

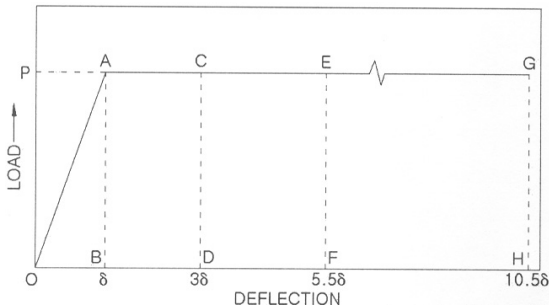


그림 6. 완전탄소성거동 재료의 하중-처짐 곡선

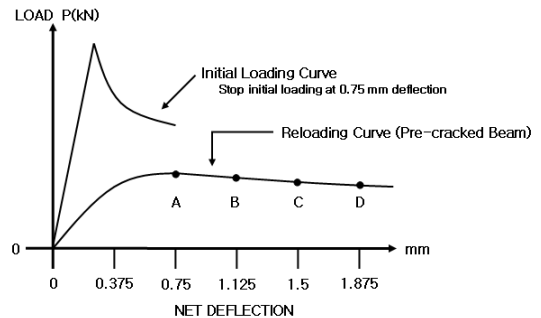


그림 7. ASTM 1399-02에 의한 하중-처짐 곡선

결정하고, 식 (9)를 사용하여 평균 잔류강도를 계산하고 있다.

평균잔류강도(Average Residual Strength, ARS) 값은 2차 재하 곡선에서 0.75, 1.125, 1.5, 1.875 mm 인 처짐에서 하중을 식 (9)로 계산한다.

$$ARS = ((P_A + P_B + P_C + P_D) / 4) \cdot L / b d^2 \quad (9)$$

여기서, ARS = 평균잔류강도(MPa)  
 $P_A + P_B + P_C + P_D = 0.75, 1.125, 1.5, 1.875$  mm 인  
 각각 처짐에서 하중의 합  
 L = 지간 길이(mm), b = 빔 공시체의 평균 폭(mm)  
 d = 빔 공시체의 평균 높이 (mm)

### 3. 실험 내용

#### 3.1 사용 재료

##### (1) 콘크리트 및 강섬유

본 연구에서 사용된 콘크리트 배합설계는 표 1과 같이 라이닝 콘크리트 설계기준강도인 24 MPa이 되도록 하였다.

본 실험에서 사용한 강섬유는 기존의 hooked type 보다 콘크리트 내부에 정착력이 증진되는 형태의 양단 후크형(Double Hook Type)을 사용하였으며, 강섬유의 기본 물성인 인장강도( $f_u$ )는 920 MPa이고, 탄성계수( $E_s$ )는 200 GPa이다. 그림 8은 실험에 사용한 Twin-Hook Fiber의 형상을 나타낸 것이다.

강섬유 형상비( $\lambda$ )는  $\lambda = \ell / D$  ( $\ell$ : 강섬유 길이, D: 강섬유 직경)로 나타내며, 본 연구에서는 형상비 70 ( $\ell / D =$

표 1. 시험에 사용한 배합

G <sub>max</sub> (mm)	Slump (cm)	Air (%)	w/c (%)	s/a (%)	중량(kg)			
					W	C	S	G
25	12	1.5	48	40	181	378	722	1105

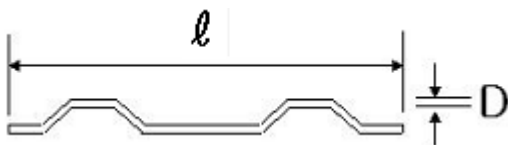


그림 8. 양단 후크 형태 강섬유

54/0.77)과 80( $\ell / D = 60 / 0.75$ )에 대하여 고려하였다.

##### (2) 플라스틱 섬유

실험에 사용된 플라스틱 섬유는 폴리 올레핀계 고분자 플라스틱 섬유로서, 콘크리트 휨 인성 보강용으로 제조된 것이다. 실험에 사용한 플라스틱 섬유의 형상비는 65 이고, 플라스틱 섬유의 인장 강도는 최소 300 MPa이다. 그림 9는 실험에 사용한 플라스틱 섬유 사진이다.

### 3.2 실험변수 선정

본 연구의 실험은 크게 강섬유 형상비와 전체 섬유 혼입량, 강섬유와 플라스틱 섬유의 혼입비율을 변수로 활용하였다. 변수에 대한 실험체 분류는 표 2와 같다.

### 3.3 실험방법

#### (1) 압축강도 실험

콘크리트의 기본 물성을 파악하기 위하여 압축강도 실험을 수행하였다. 압축강도는 원주형 실험체( $\phi 100$  mm  $\times$  200 mm)를 제작하여 습윤 양생 후 측정되었다. 압축강도 실험은 KS F 2405 콘크리트의 압축강도 실험방법을 따라 실시하였다.

#### (2) 휨 인장강도 및 휨 인성 실험

KS F 2566 강섬유 보강 콘크리트의 휨 인성 실험 방법에 따라 4 점 휨 실험을 수행하였으며, 휨 인성 실험체의 중앙점 처짐량 및 파괴하중을 측정하였다. 재하속도는

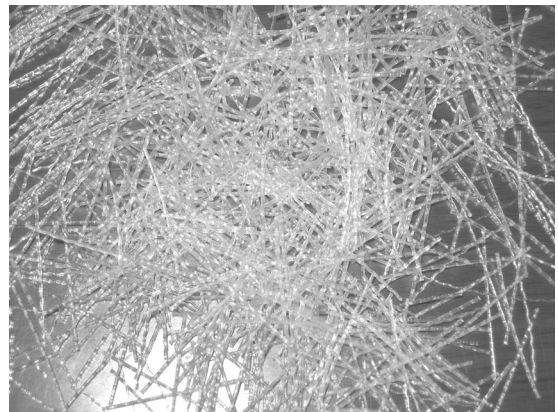


그림 9. 실험에 사용한 플라스틱 섬유

표 2. 실험변수에 따른 실험체 분류

Specimen No.	Fiber content ratio (%)			Specimen No.	Fiber content ratio (%)		
	Con'c volume	Steel fiber	Plastic fiber		Con'c volume	Steel fiber	Plastic fiber
S70-050-10	0.50	100	0	S80-050-10	0.50	100	0
S70-050-21	0.50	67	33	S80-050-21	0.50	67	33
S70-050-11	0.50	50	50	S80-050-11	0.50	50	50
S70-050-12	0.50	33	67	S80-050-12	0.50	33	67
S70-050-01	0.50	0	100	S80-050-01	0.50	0	100
S70-075-10	0.75	100	0	S80-075-10	0.75	100	0
S70-075-21	0.75	67	33	S80-075-21	0.75	67	33
S70-075-11	0.75	50	50	S80-075-11	0.75	50	50
S70-075-12	0.75	33	67	S80-075-12	0.75	33	67
S70-075-01	0.75	0	100	S80-075-01	0.75	0	100
S70-100-10	1.00	100	0	S80-100-10	1.00	100	0
S70-100-21	1.00	67	33	S80-100-21	1.00	67	33
S70-100-11	1.00	50	50	S80-100-11	1.00	50	50
S70-100-12	1.00	33	67	S80-100-12	1.00	33	67
S70-100-01	1.00	0	100	S80-100-01	1.00	0	100

\* S□○-●■▲-SP: S□○ : 강섬유 형상비□○, ●■▲- 혼입물(●■▲%), SP- 혼합비(S:P) S = 강섬유, P = 플라스틱 섬유

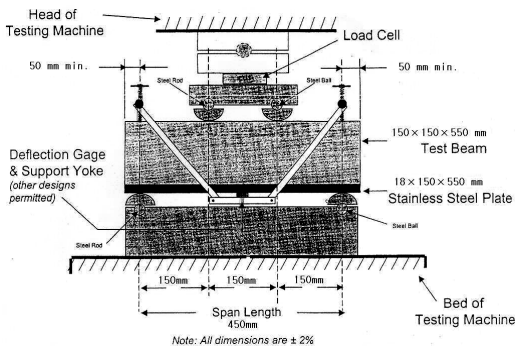


그림 10. 평균 잔류강도 실험(ASTM C 1399-02)

실험체가 파괴될 때까지 0.005 mm/sec로 일정하게 하였다.

처짐은 중앙지점에 설치된 2개의 LVDT를 사용하여 처짐량이 6 mm가 될 때까지 측정하였다. 이 실험은 ASTM C 1018 실험방법과 KS F 2566 실험방법이 유사하지만, 측정된 하중-변위 데이터의 분석방법이 다르기 때문에 동일한 실험에서 다른 방법을 이용하여 분석하였다.

### (3) 평균 잔류강도 실험

ASTM 1399-02 섬유 보강 콘크리트의 평균 잔류강도 실험 방법에 따라 4점 휨 실험을 수행하였으며, 실험체의 중앙점 처짐량 및 파괴하중을 측정하였다. 재하속도는 0.005 mm/sec로 일정하게 하였다. 첫 번째 재하 시 중앙부 처짐 0.75 mm까지 재하한 후 강판을 제거, 두 번째 재하를 시작한다. 중앙 처짐 측정 장치에 설치된 2개의 LVDT를 사용하여 처짐량이 3 mm가 될 때까지 실험체의 처짐을 측정하였다. 그림 10은 ASTM 1399-02에 명시된 평균 잔류강도 재하도를 나타낸 것이다.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 압축강도 실험

표 3에 나타낸 압축강도 실험결과, 설계 기준강도인 24 MPa을 약 15% 정도 상회하는 약 27.76 MPa을 나타내었다. 일반적으로 콘크리트 배합 시, 타설 시의 오류 등을 감안하여 설계 강도에 약 10~20% 정도 향상된 압축강도 수치를 나타내도록 배합을 설계한다. 본 연구에서도 이와 같은 경향을 나타냈다.

표 3. 압축강도 실험결과에 대한 분석

강섬유 형상비	섬유 혼입률(%)	평균(MPa)	표준 편차	분산 계수
S70	0.5	26.85	0.77	3%
	0.75	29.21	2.19	8%
	1	28.56	2.62	9%
S80	0.5	26.33	1.27	5%
	0.75	28.51	2.13	7%
	1	27.11	2.14	8%

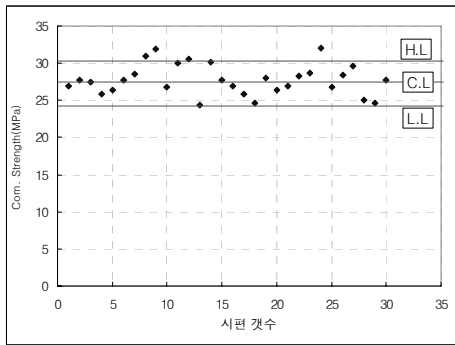


그림 11. 압축강도 실험 결과

그림 11을 살펴보면, 평균값(C.L.)이 27.76 MPa이고, 이에 대한 -10%(L.L.)~+10%(H.L.) 사이에 대부분의 압축강도 결과가 포함되어 있다. 이 결과는 실험 시 강도 편차가 작은 것을 의미하며, 섬유혼입이 콘크리트 압축강도에 미치는 영향이 거의 없다는 것을 알 수 있다.

#### 4.2 균열 전후 등가 휨 인장강도

균열 전 등가 휨 인장강도는 식 (1)을 토대로 계산하였다. 그림 12를 보면, 섬유 혼입률이 증가할수록 등가 휨 인장강도가 높고, 플라스틱 섬유보다는 강섬유 혼입률이 높을수록 등가 휨 인장강도가 높은 것을 알 수 있다. 이는 콘크리트 파괴 시, 플라스틱 섬유보다는 강섬유가 균열 억제효과가 높다는 것을 알 수 있다.

특히, 강섬유와 플라스틱 섬유 혼입 비율이 2:1인 경우 가장 높은 등가 휨 인장강도를 나타내었는데 이는 초기 균열 발생 시, 플라스틱 섬유가 강섬유와 같이 응력을 부담하게 되어 강섬유가 부담하는 집중응력을 완화하여 더 높은 인장강도를 나타낸 것으로 판단할 수 있다.

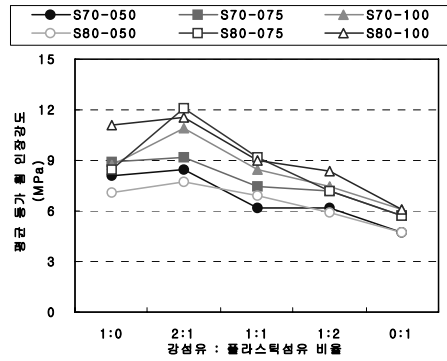


그림 12. 균열 전 등가 휨 인장강도

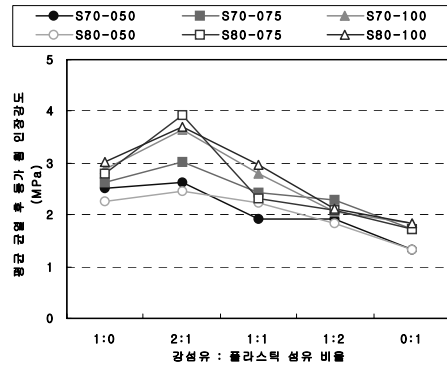


그림 13. 균열 후 등가 휨 인장강도(DBV)

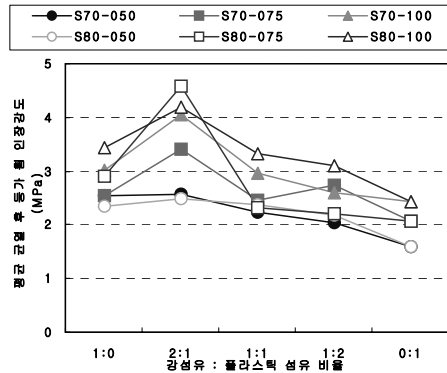


그림 14. 균열 후 등가 휨 인장강도(JSCE)

그림 13, 14는 균열 후 등가 휨 인장강도를 나타낸 것이다. 균열 후 등가 휨 인장강도를 DBV와 JSCE 평가 방법을 이용하여 분석한 결과, 강섬유와 플라스틱 섬유

혼입률이 동일한 경우 강섬유와 플라스틱 섬유의 혼합 비가 2:1일 경우에 가장 높은 균열 후 휨 인장강도가 측정되었으며, DBV식과 JSCE식 모두 동일한 결과를 나타내었다. 따라서 플라스틱 섬유 혼입으로 인하여 강 섬유만 사용한 경우보다는 인장저항능력이 증대됨을 알 수 있다.

표 4. FRC 공용성(performance level) 분류(ASTM)

공용성 수준	I <sub>5</sub>	I <sub>10</sub>
I (보통)	2.7	5.4
II (양호)	3.6	7.2
III (우수)	4.5	9.0
IV (극히 우수)	5.4	10.8

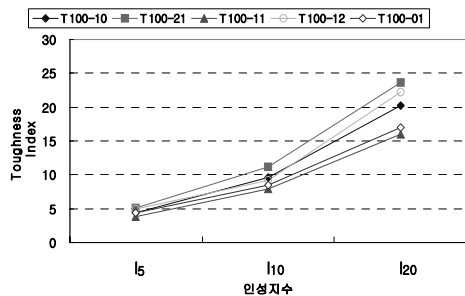
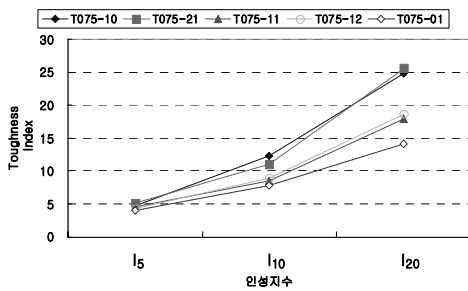
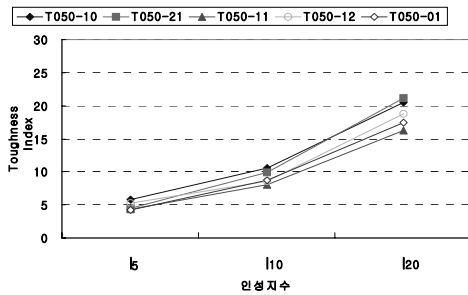


그림 15.  $\lambda=70$ 에 대한 휨 인성지수

### 4.3 휨 인성 지수 결과 분석

표 4는 ASTM C 1018에서 제시하고 있는 섬유보강 콘크리트의 사용성에 대한 분류에 대한 것이다. 이 표를 근거로 본 실험의 결과를 분석해 보면, 대부분의 실험체가 우수수준이거나, 극히 우수 수준으로 나타나고 있어 실험체의 제작은 우수한 것으로 판단할 수 있다.

그림 15, 16에 나타난 휨 인성지수 평가결과를 분석해 보면, 강섬유만을 혼입한 경우에 대한 결과는 일정하게

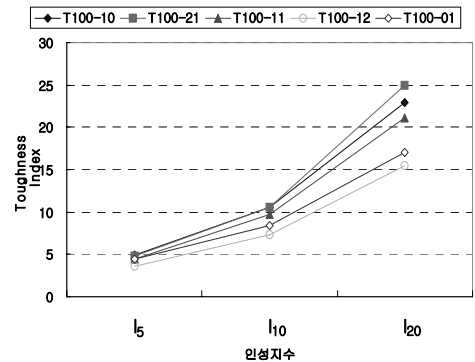
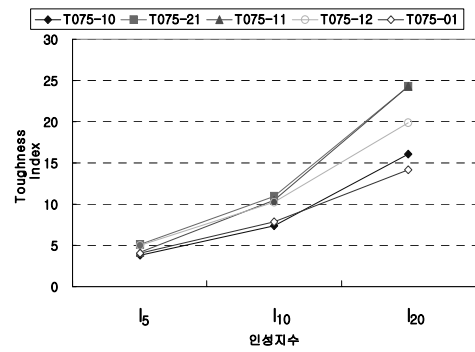
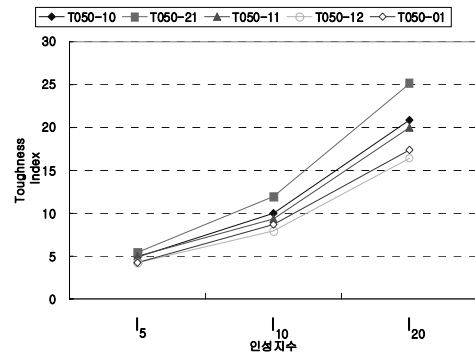


그림 16.  $\lambda=80$ 에 대한 휨 인성지수



나타나고 있지만, 플라스틱 섬유가 혼입된 결과는 일정하지 않은 것으로 나타난다. 이것은 플라스틱 섬유의 경우 체적비에 따라 혼입되므로 강섬유 보다는 많은 양의 섬유가 혼입되어 섬유 분산성이 떨어져 인성지수가 일정하지 않은 것으로 판단할 수 있다.

또한 섬유혼입량에 대한 평가도 뚜렷이 나타나지 않은 것으로 나타났다. 이는 평가방법이 휨 인성시험 시 하중-처짐 그래프를 이용하여 평가하도록 되어 있는데, 최초 균열 후 그래프의 형상이 일정하게 나타나지 않아 평가가 일률적이지 못한 것으로 판단할 수 있다.

#### 4.4 평균 잔류강도 결과 및 분석

강섬유와 플라스틱 섬유의 혼합비와 섬유 혼입률을 기준으로 그림 17의 그래프를 분석해 보면, 강섬유와 플라스틱 섬유의 섬유 혼입률이 0.5%, 0.75%, 1.00% 순으로 증가함에 따라 평균 잔류강도가 증가하며, 형상비가 커질수록 잔류강도가 높은 것으로 나타났다. 일반적인 섬유보강 콘크리트는 섬유 혼입률과 형상비에 따라 그 인성 및 역학적 성능이 개선되는 것으로 나와 있으며, 본 실험에서도 뚜렷한 결과를 나타내고 있다.

평균잔류강도 실험결과에서도 JSCE 평가법, ASTM 평가법, KS 규격에 따른 평가결과와 마찬가지로 강섬유와 플라스틱 섬유의 2:1 일 때의 평균 잔류강도가 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 초기 인성은 플라스틱 섬유가 성능을 나타내고, 이후 응력이 커질수록 강섬유가 인성을 나타내게 되는데, 이때 강섬유가 부담해야 하는 응

력을 플라스틱 섬유가 일부 부담함으로써, 더 큰 인성을 나타내는 것으로 판단할 수 있다.

### 5. 결 론

강섬유와 플라스틱 섬유의 혼입률과 형상비에 따른 휨 인성 및 인장강도에 대한 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

1. 강섬유와 플라스틱 섬유 혼입 콘크리트의 휨 인장강도 실험결과, 강섬유 혼입 콘크리트가 플라스틱 혼입 콘크리트에 비하여 균열 전 휨 인장강도는 약 50% 정도 높은 것으로 나타났으며, 균열 후 인장강도는 독일 DBV 식으로 계산 할 때는 약 40%, JSCE 식에서는 약 25% 정도 높게 나타났다. 이것은 강섬유가 플라스틱 섬유보다는 균열 억제 능력이 우수한 것을 나타내는 것이며, 균열 후에도 균열 저항성이 더 높은 것을 알 수 있다.
2. KS F 2566 실험법 및 ASTM C 1018 실험법에 따른 휨 인성 실험결과, 뚜렷한 섬유보강 변수에 따른 결과를 나타내지 않았다. KS 규격과 ASTM 규격은 4 점 재하실험을 통하여 하중-처짐 곡선을 구하여 면적과 최초 처짐을 기준으로 비율을 산정하여 평가하도록 되어 있다. 그러나 대부분 실험결과 그래프의 형태의 섬유의 분산성, 혼입률, 형상비, 섬유 특성에 따라 일정하게 나타나지 않으며, 초기 콘크리트의 물성이 인성결과에 미치는 영향이 크게 나타났다.
3. ASTM C 1399 실험법에 따른 균열 후 잔류강도에 실험결과, 강섬유와 플라스틱 섬유의 섬유 혼입률이 0.5%, 0.75%, 1.00% 순으로 증가함에 따라 평균 잔류강도가 증가하며, 형상비가 커질수록 잔류강도가 높은 것으로 나타났다. 일반적인 섬유보강 콘크리트는 섬유 혼입률과 형상비에 따라 그 인성 및 역학적 성능이 개선되는 것으로 나와 있으며, 본 실험에서도 뚜렷한 결과를 나타내고 있다.
4. 섬유보강 콘크리트에 대하여 강섬유와 플라스틱 섬유의 혼입비율별 결과를 살펴보면, 강섬유만 혼입한 경우보다 강섬유와 플라스틱 섬유가 2:1 비율로 혼입된 콘크리트가 균열 전 휨 인장강도는 약 13~33% 증진되었으며, 균열 후 인장강도는 25~40% 증진되

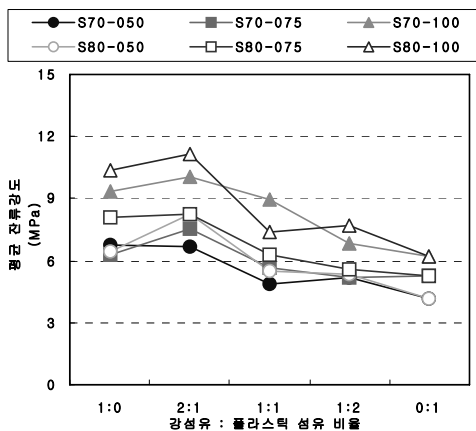


그림 17. 평균 잔류강도 비교

었다. 잔류강도 평가결과에서도 약 20~30% 정도 증진되는 것으로 나타났다. 이는 강섬유가 부담해야 하는 응력을 플라스틱 섬유가 일부 부담함으로써, 더 큰 인성을 나타내는 것으로 할 수 있다.

5. 향후 섬유보강 콘크리트 라이닝을 설계 시, KS F 2566 시험법이나 ASTM C 1018 실험법에 따른 평가 결과보다는 ASTM C 1399-02 시험법에서 제시하고 있는 잔류강도를 이용하여 설계할 경우 좀 더 안정한 평가에 대한 설계가 가능할 것으로 보여진다.
6. 향후 강섬유와 플라스틱 섬유에 대하여 경제성 및 시공성을 고려하여 0~50% 내로 최적비율을 결정할 수 있는 연구가 필요할 것이다.

### 참고문헌

1. 박홍용, 안영진 (2000), “강섬유 보강 콘크리트의 균열 후 인장강도”, 대한 토목학회 2000년도 학술발표회 논문집, pp. 447-450.
2. 박홍용, 안영진 (2000), “편심 축하증을 받는 강섬유 보

강 콘크리트 기둥의 실험적 연구”, 한국 콘크리트 학회 가을 학술발표회 논문집, 제12권, 제2호, pp. 857-860.

3. 한국표준협회 KS F 2405 (2005), “콘크리트 압축강도 시험방법”.
4. 한국표준협회 KS F 2566 (2005), “강섬유 보강 콘크리트의 휨 인성 시험방법”.
5. ASTM C 1018 (1997), “Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)”.
6. ASTM C 1399(2007), “Standard test method for obtaining average residual-strength of fiber-reinforced concrete”.
7. Bernhard R. Maidl(1995), “Steel fibre reinforced concrete”, Ernst & Sohn.
8. Deutscher Beton Verein e.V (1992), Merkblatt, Bemessungsgrundlagen für Stahlfaserverton im Tunnelbau, Fassung.
9. JSCE-SF4 (1984), “method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete,” Concrete library of JSCE, V3, Japan Society of Civil Engineers, pp. 58-61.

접수일(2009.9.30), 수정일(2009.10.26), 게재확정일(2009.11.26)