



## 비정질 강섬유로 보강된 철근콘크리트 인장부재의 인장강화효과

박경우<sup>1)</sup> · 이준석<sup>2)</sup> · 김 우<sup>2)</sup> · 김대중<sup>3)</sup> · 이기열<sup>4)\*</sup>

<sup>1)</sup>산이건설(주) 기업부설연구소 <sup>2)</sup>전남대학교 토목공학과 <sup>3)</sup>전남도립대학교 토목환경과 <sup>4)</sup>순천제일대학교 토목과

### Tension Stiffening Effect of RC Tension Members Reinforced with Amorphous Steel Fibers

Kyoung-Woo Park,<sup>1)</sup> Jun-Seok Lee,<sup>2)</sup> Woo Kim,<sup>2)</sup> Dae-Joong Kim,<sup>3)</sup> and Gi-Yeol Lee<sup>4)\*</sup>

<sup>1)</sup>Research and Development Center, Sani Construction Co., Gwangju, 502-270, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Civil Engineering, Chonnam National University, Gwangju, 500-757, Korea

<sup>3)</sup>Dept. of Civil and Environmental Engineering, Jeonnam Provincial College, Damyang, 517-802, Korea

<sup>4)</sup>Dept. of Civil Engineering, Suncheon Jeil College, Suncheon, 540-744, Korea

**ABSTRACT** This paper presents the tension stiffening behavior from experimental results of each 6 amorphous steel fibers and normal steel fibers reinforced direct tensile specimens with the main variables such as cover thickness to bar diameter ratio. A tension stiffening effect for steel fiber reinforced RC tension members improve on the increase in cover thickness, and also amorphous steel fiber is usually superior to normal steel fiber. The reinforcement of steel fibers controlled the splitting cracks and led to significant increase in the tension stiffening effect. In particular, if cover thickness is more than twice the bar diameter, the amorphous steel fiber reinforced specimen is controlled the splitting crack and increased the tension stiffening effect. And, the tension stiffening effect of amorphous steel fiber reinforced concrete tension members is different to current structural design code provision.

**Keywords** : amorphous steel fiber, cover thickness, tension stiffening effect, splitting crack, steel fiber

### 1. 서 론

콘크리트에 강섬유(steel fiber)를 첨가하게 되면 콘크리트의 등방성이 향상되어 콘크리트의 인장강도가 개선되고 연성이 증가하는 장점을 갖는다.<sup>1)</sup> 또한 콘크리트에 균열이 발생할 때 불규칙하게 분포하는 강섬유의 저항에 의해 미세균열의 발생 및 진행이 억제되는 효과로 인하여 콘크리트의 인성이 증가한다.<sup>2-4)</sup> 그리고, 단조하중 또는 반복하중의 작용에 의해 발생하는 철근의 변형 증가 및 균열의 진행을 강섬유가 저항하면서 철근과 콘크리트의 미끄럼(slip)이 감소되므로 부착특성이 개선된다.<sup>5)</sup> 이와 같이 강섬유로 보강된 콘크리트의 균열 저항성 및 부착 성능의 개선 효과에 의해 철근콘크리트 부재의 균열 면에서 콘크리트의 인장력 분담도 개선된다.<sup>6)</sup>

철근으로 보강된 콘크리트 구조물에서 균열이 발생하면 두 재료의 강성 차이에 의해 균열면에서 응력의 재분

배가 이뤄진다. 균열이 발생한 단면에서는 모든 인장력을 철근이 부담하지만, 균열단면 사이의 콘크리트는 부착에 의해 철근으로부터 전달되는 인장력의 일부를 부담하게 된다. 이와 같이 균열 단면 사이의 콘크리트에 의해 철근의 강성이 증가하거나 변형률 또는 응력이 감소하는 현상을 인장강화효과(tension stiffening effect)라고 한다.<sup>7)</sup> 즉, 인장강화효과는 철근콘크리트 부재에서 인장철근이 항복하기전까지 부재의 강성 증가 및 균열 단면 사이에서 인장력을 부담하는 콘크리트의 성능을 평가하는 중요한 요소라고 할 수 있다.

앞에서 설명한 인장강화효과를 정량화하여 평가할 수 있도록 CEB-FIP Model Code 1990<sup>7)</sup> (MC 90) 및 EURO CODE 2<sup>8)</sup> (EC 2) 설계기준에서 철근의 평균변형률  $\epsilon_{sm}$  으로 각각 다음과 같이 규정하고 있는데, 이들 식은 강섬유가 보강되지 않는 보통 콘크리트를 기준으로 하고 있다.

$$MC\ 90 : \epsilon_{sm} = \epsilon_{so} - \beta_t \frac{f_{ct}}{E_s \rho} \quad (1)$$

$$EC\ 2 : \epsilon_{sm} = \epsilon_{so} \left[ 1 - \beta_t \left( \frac{f_{sr}}{f_{so}} \right) \right] \quad (2)$$

\*Corresponding author E-mail : gylee@suncheon.ac.kr

Received March 5, 2014, Revised April 15, 2014,

Accepted April 15, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute

여기서,  $\epsilon_{so}$ 는 순수철근의 변형률,  $f_{ct}$ 는 콘크리트의 인장강도(MPa),  $E_s$ 는 철근의 탄성계수(MPa),  $\rho$ 는 철근비,  $f_{sr}$ 은 첫 번째 균열이 발생할때의 철근 응력(MPa),  $f_{so}$ 는 작용하중에 따른 균열면에서의 철근 응력(MPa)이다. 그리고  $\beta_t$ 는 인장강성 계수(tension stiffening factor)로서 단기하중의 경우에 대해서 MC 90에서는 작용하중의 증가에 상관없이 일정한  $\beta_t = 0.4$ 라는 상수로써 정의하고 있으며, EC 2에서는  $\beta_t = f_{sr}/f_{so}$ 와 같이 작용하중이 증가함에 따라 감소하는 비선형 함수로서 정의하고 있다.

그런데 강섬유로 보강되지 않은 보통 콘크리트(plain concrete)는 균열단면 사이에서만 부착에 의해 인장력을 부담하지만, 강섬유로 보강된 콘크리트는 균열단면 사이뿐만 아니라 균열면에서도 강섬유가 인장력을 추가로 부담하기 때문에 Fig. 1에 보인 것과 같이 인장강화효과의 개선 효과가 우수하다고 할 수 있다.<sup>9)</sup> 또한, 강섬유 종류 및 사용량에 따라서는 균열 제어 및 고강도 철근을 사용하는데 따른 균열폭 억제 효과도 개선된다.

특히 최근 개발된 비정질 강섬유(amorphous steel fiber)는 이러한 개선효과를 크게 얻을 수 있는 콘크리트 보강재라 할 수 있다. 이 비정질 강섬유는 액체 급냉의 원리를 이용한 Melt spinning 기법에 의한 비정질 금속 제조기술에 의해 생산되는데, 기존 강섬유보다 제조과정이 단순하며, 생산과정에서 발생하는 이산화탄소 및 에너지 사용량을 절감할 수 있는 장점이 있다. 그리고 일반 강섬유보다 인장강도 및 내식성이 우수하고, 얇은막 형태로 제작되어 형상비가 크게 증가하므로 콘크리트와의 부착 면적이 커져서 콘크리트의 인장 성능에 대한 개선을 기대할 수 있다.<sup>10,11)</sup>

이 연구는 이상과 같이 콘크리트의 인장강화효과 개선이 기대되는 비정질 강섬유의 적용 가능성을 확인하기 위한 기초 연구의 일환으로, 비정질 강섬유로 보강된 철근콘크리트의 인장강성 거동 특성 파악 및 일반 강섬유와의 비교를 목적으로 한다. 이를 위하여 피복두께를 변수로 하는 변장비가 서로 다른 직사각형 단면의 인장실험체를 제작하여 직접인장실험을 수행하고,<sup>12)</sup> 이 실험결

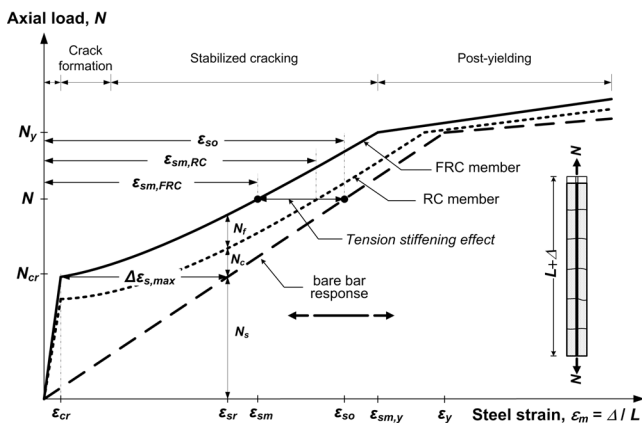


Fig. 1 Tension stiffening behavior of plain concrete and steel fiber reinforced concrete tension members

과로부터 인장강성 거동 및 인장강화효과를 비교·분석하였다.

## 2. 직접인장실험

이 연구의 직접인장실험체 제작에 사용된 콘크리트는 설계기준압축강도  $f_{ck}$ 가 25 MPa이며, 배합설계는 Table 1과 같다. 타설 후 28일이 경과한 압축강도는 26 MPa, 조깅인장강도  $f_{sp}$ 는 비정질 강섬유 보강 콘크리트의 경우 2.48 MPa, 일반 강섬유 보강 콘크리트의 경우 2.63 MPa로 측정되었다. 콘크리트에 혼입된 비정질 강섬유와 일반 강섬유는 Fig. 2에 보인 것과 같으며, 강섬유별 제원 및 재료 특성을 Table 2에 정리하였다. 강섬유 보강량은 현장 적용성을 고려하여 감수제 또는 유동화제의 사용없이 소요 워커빌리티를 확보할 수 있도록 두 강섬유 모두 체적비( $V_f$ )를 기준으로 1.0%로 동일하게 하였다.

직접인장실험체는 Fig. 3에 보인 바와 같이 길이가 1,500 mm이고 단면의 치수가 변화하는 각주형 실험체로서, 항복강도  $f_y$ 가 420 MPa인 D19 철근을 단면의 중심에 배치하였다. 모든 실험체는 단면적 23,250 mm<sup>2</sup>과 철근비 1.24%로 일정하게 유지하면서 단면 방향의 피복두께만을 변화시키기 위해 변장비가 다른 직사각형 형태로 하였다. 즉, 측면 피복두께가 철근 직경의 1.0배에서 3.5배까지 0.5배씩 증가되는 단면을 갖는 실험체를 비정질 강섬유와 일

Table 1 Concrete mixture design

W/C	S/a (%)	Slump (mm)	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )				
			C	W	S	G	Fiber*
0.60	45	150	385	229	810	991	72/78

\* Amorphous steel fiber : 72 kg/m<sup>3</sup>, Steel fiber : 78 kg/m<sup>3</sup>

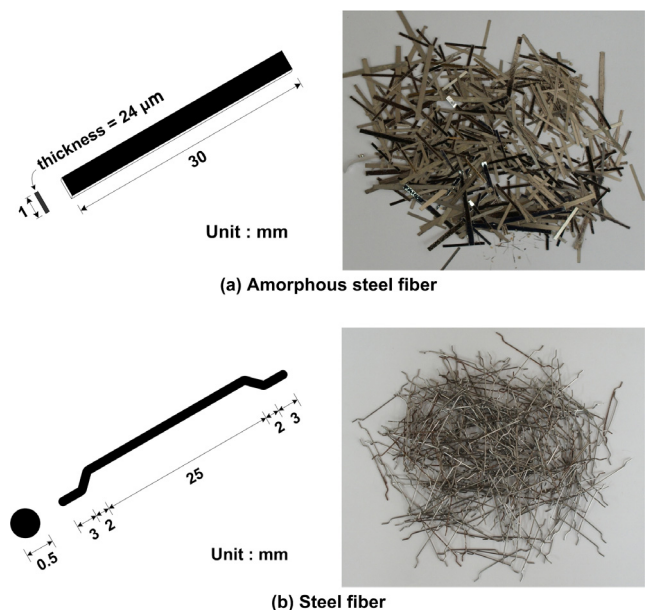
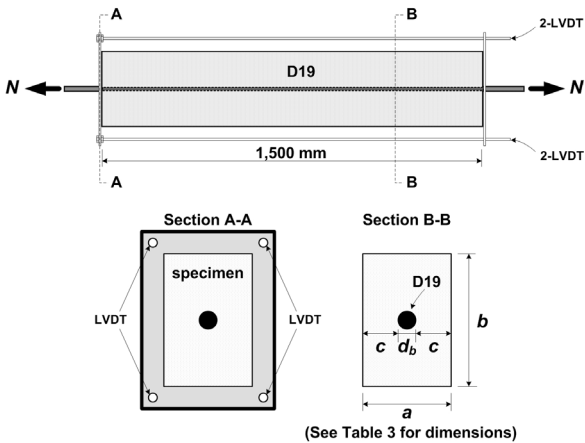


Fig. 2 Amorphous steel fibers and steel fibers

**Table 2** Properties of amorphous steel fiber and steel fiber

Fiber	Geometry	Cross section	Dimension				Tensile Strength	Aspect ratio*	Density
			Length	Width	Thickness	Diameter			
Amorphous steel fiber	Piece type straight fiber	Rectangular	30 mm	1 mm	24 $\mu\text{m}$	-	1,700 MPa	1,250	7,200 kg/m <sup>3</sup>
Steel fiber	Piece type end-hooked fiber	Circular	35 mm	-	-	0.5 mm	1,100 MPa	70	7,800 kg/m <sup>3</sup>

\* Amorphous steel fiber :  $l/t = 30/0.024 = 1,250$ , Steel fiber :  $l/d = 35/0.5 = 70$



**Fig. 3** Specimen geometry



**Fig. 4** Direct tension test setup apparatus

반 강섬유로 보강한 콘크리트를 사용하여 각각 6개씩 총 12개를 제작하였다. 양생 중 발생하는 건조수축의 영향을 최소화하기 위하여 실험전까지 습윤양생을 하였다.

하중재하 및 측정은 Fig. 4에 보인 것과 같은 변위제어 방식(1mm/min)의 자동 가력기(actuator)와 철근 지그를 이용하였으며, 철근의 사전 인장실험에 의한 응력-변형률 관계로부터 측정된 철근 항복변형량의 3배 이상이 되는 변형이 발생할 때까지 일축 인장하중을 재하하였으며, 200 kN 용량의 로드셀(loadcell)과 데이터 자동기록장치를 이용하여 작용하중을 실시간으로 측정하였다. 실험체 양단 사이에서 발생하는 매입 철근의 변형량은 Fig. 3에 보인 바와 같이 실험체 양쪽 하중단에 철근과 같이 거동할 수 있는 변위계 지지판 설치용 클램프를 부착한 후에 4개의 전기식 변위계(LVDT)를 변위 측정용 강봉에 고정하여 측정하였다.

이 연구에서는 각 모서리에서 측정된 4개의 철근 변형량을 평균값으로 하여 인장강성 거동을 대표하는 하중-변형률 관계를 분석하였다. 실험중 발생하는 균열의 관찰은 실험체 양쪽면에서 균열이 발생하는 순간의 하중을 실험체에 직접 기록하면서 전체적인 균열거동을 파악하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 강섬유 종류에 따른 균열거동

비정질 강섬유 및 일반 강섬유로 보강된 철근콘크리트 인장 실험체에서 첫번째 횡방향균열(transverse crack)과 쪼갬균열(splitting crack)이 발생한 하중을 피복두께와 철근 직경의 비  $c/d_b$  별로 Fig. 5에 비교하였다. 이와 함께, 비정질 강섬유 쪼갬인장강도로 계산한 횡방향균열하중  $N_{cr}$ 과 순수철근(bare bar)의 항복하중  $N_y$ 를 함께 나타내었다.

첫번째 횡방향균열 발생하중은 일반 강섬유 보강 콘크리트보다 비정질 강섬유 보강 실험체에서 높게 나타났다. 그리고 피복두께가 두꺼워짐에도 불구하고 보강된 강섬유의 종류와 무관하게 횡방향균열 하중은 모든 피복두께에서 큰 차이가 없이 비슷하게 나타났다. 이러한 결과는 강섬유로 보강된 철근콘크리트 부재의 횡방향균열은 피복두께의 영향을 크게 받지 않는다는 것을 의미한다. 또한 쪼갬인장강도 크기와는 다르게 재료의 인장강도가 높고 콘크리트와의 부착면적이 증가하는 비정질 강섬유가 횡방향균열에 대한 저항 성능이 일반 강섬유보다 비교적 우수하다는 것을 확인하는 결과이다.

반면에 첫 번째 쪼갬균열 발생하중은 횡방향균열 발생하중과 차이가 있음을 알 수 있다. 그림을 살펴보면, 비정질 강섬유 및 일반 강섬유로 보강된 실험체 모두 피복두께가 증가할수록 쪼갬균열 발생하중이 크게 증가하였다. 특히,  $c/d_b$ 가 2.0 또는 2.5 이상이 되면 인장철근의 항복하중 단계까지 쪼갬균열이 발생하지 않았다. 더욱 특기할 만한 점은 피복두께가 충분히 확보되었다고 할 수 있는  $c/d_b$ 가 3.0 이상에서 비정질 강섬유로 보강된 실험체에서는 쪼갬균열이 전혀 발생하지 않았다는 것이다.

이상과 같은 실험결과를 근거로 한다면, 비정질 강섬유 또는 일반 강섬유로 보강된 철근콘크리트 부재에서는

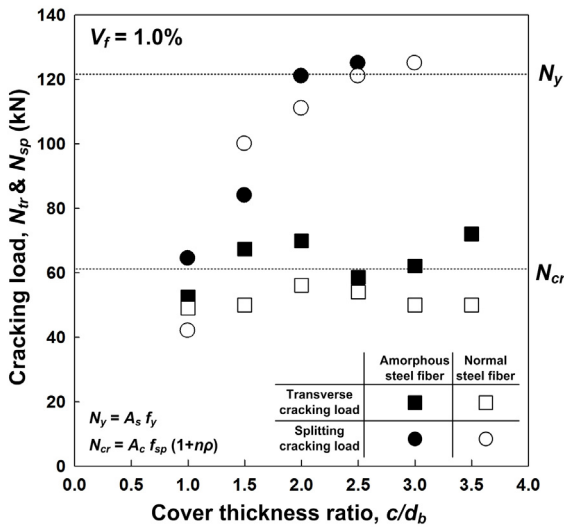
**Table 3** Specimen geometry and test results

Specimen	Cover thickness ratio ( $c/d_b$ )	Cross sectional dimensions $a \times b$ (mm)	Measured concrete strength		Initial cracking load		Average crack spacing $s_{r,m}$ (mm)
			Compressive strength (MPa)	Splitting Tensile strength (MPa)	Transverse crack $N_{tr}$ (kN)	Splitting crack $N_{sp}$ (kN)	
ATM10	1.0	60 × 385	26.2	2.48	50	64	162
ATM15	1.5	80 × 290			67	84	175
ATM20	2.0	100 × 230			69	121	219
ATM25	2.5	115 × 200			56	/	250
ATM30	3.0	135 × 170			62	/	375
ATM35	3.5	150 × 155			72	/	300
FTM10	1.0	60 × 385			25.5	2.63	50
FTM15	1.5	80 × 290	50	100			136
FTM20	2.0	100 × 230	56	111			167
FTM25	2.5	115 × 200	56	121			150
FTM30	3.0	135 × 170	50	/			159
FTS35	3.5	150 × 155	50	/			250

Note)

\* In all specimens, a D19 was placed at the center of the section and steel ratio kept constant of 1.24%

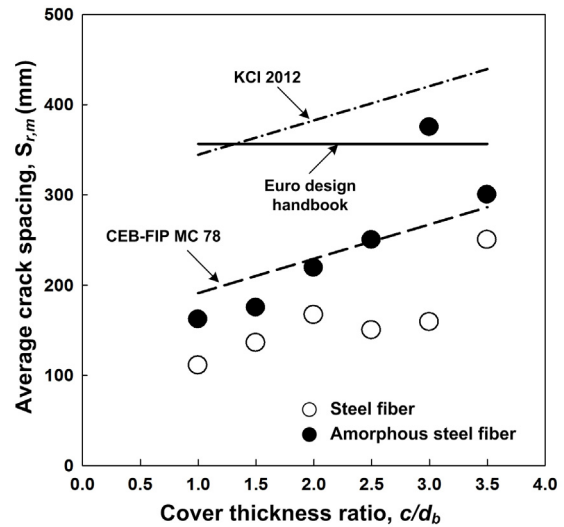
\*\* Each specimen is given a name according to type of steel fibers and cover thickness ratio(A or F : steel fiber type, 10 :  $c/d_b$ )



**Fig. 5** First cracking load of transverse crack and splitting crack

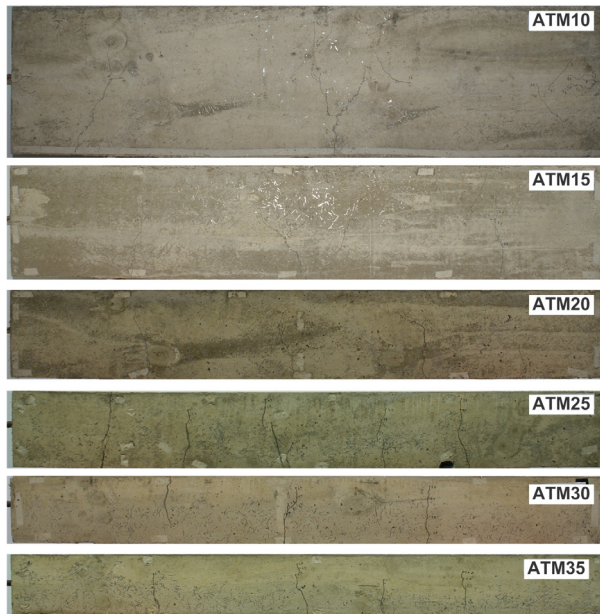
피복두께가 철근직경의 3배 이상으로 확보된다면 철근과의 부착 및 인장강화효과에 큰 영향을 주는 쪼갬균열을 억제할 수 있다는 점이다. 즉, 쪼갬균열을 제어하기 위하여 추가적인 횡방향 보강철근 등을 사용하지 않고 강섬유 보강 콘크리트의 재료 특성만으로 인장강화효과의 개선을 기대할 수 있을 것이다.

Fig. 6에 철근의 항복단계까지 인장하중을 재하하여 실험체에 발생한 균열들 중 횡방향균열의 평균균열간격  $s_{r,m}$ 을 비교하여 정리하였다(Fig. 7 참조). 이 그림을 살펴보면, 피복두께가 두꺼워질수록 비정질 강섬유 및 일반 강섬유로 보강한 철근콘크리트 실험체의 평균균열간격은

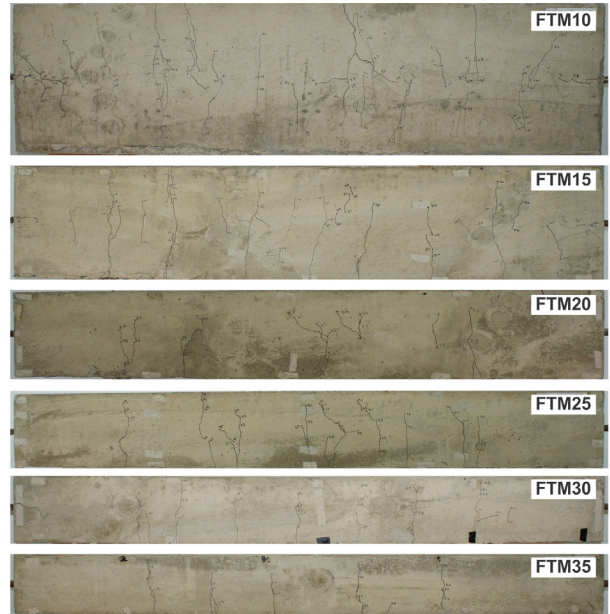


**Fig. 6** Comparison of average crack spacing

증가하는 것으로 나타났다. 특히, 비정질 강섬유로 보강된 ATM 계열 실험체가 일반 강섬유로 보강된 FTM 계열 실험체보다 평균균열간격이 더 크게 발생하였다. 그리고 평균균열간격을 정의하고 있는 설계기준들의 규정으로 계산한 결과와 실험결과를 함께 비교하였다. 이 결과를 살펴보면, 피복두께가 두꺼워짐에 따라 평균균열간격이 증가하는 경향을 반영하고 있지만, 강섬유가 보강되지 않은 보통 콘크리트를 기준으로 규정된 설계기준들의 평균균열간격은 CEB-FIP Model Code 1978<sup>13)</sup> (MC 78)을 제외하고 실험결과보다 크게 계산됨을 확인할 수 있다.<sup>14-16)</sup> 이러한 차이는 각 설계기준의 평균균열간격 계산식에서 규



(a) ATM Series



(b) FTM Series

Fig. 7 Final crack configuration

정하는 계수들이 서로 다르기 때문이다. 이 결과에 따르면 2012년 개정 콘크리트구조기준<sup>17)</sup>(KCI 2012)의 규정으로 강섬유보강콘크리트의 균열간격을 계산하면 예측 결과의 차이가 크게 발생할 수 있으므로, 이 특성을 반영할 수 있는 계수 또는 상수의 도입이 필요하다고 판단된다.

### 3.2 피복두께에 따른 인장강화효과

비정질 강섬유 및 일반 강섬유로 보강한 철근콘크리트 인장부재의 인장강화효과를 파악하기 위하여 작용하중  $N$ 과 그에 따른 철근의 평균변형률  $\epsilon_{sm}$ 의 관계를 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 피복두께별로 정리하였다. 여기서, 철근의 평균변형률은 4개의 LVDT로부터 측정된 철근의 변형량을 평균하여 시험체 길이로 나눈값이다. 그리고 CEB-FIP Model Code 1990<sup>7)</sup> (MC 90)과 EUROCODE 2<sup>8)</sup> (EC 2)에서 규정하고 있는 인장강화효과 예측식인 식 (1)과 식 (2)로 계산된 결과를 함께 비교하였다.

비정질 강섬유로 보강된 철근콘크리트 인장부재의 피복두께별 인장강화효과를 비교한 Fig. 8을 살펴보면, 피복두께가 두꺼워질수록 인장강화효과도 증가하였다. 다만, 피복두께가 상대적으로 얇은 ATM 10 ( $c/d_b=1.0$ )과 ATM15 ( $c/d_b=1.5$ ) 시험체에서는 두꺼운 피복두께를 갖는 시험체들과 비교하여 인장강화효과는 크게 증가하지 않는 것으로 나타났다. 또한 비정질 강섬유의 보강 효과를 알아보기 위하여 보통 콘크리트를 기준으로 하는 MC 90<sup>7)</sup> 및 EC 2<sup>8)</sup>의 인장강화효과 규정과 비교하면, 얇은 피복두께를 갖는 ATM 10, ATM 15 시험체에서는 설계기준 규정과 비교적 유사한 거동을 보이지만, 피복두께가 철근 직경의 2배 이상인 시험체에서는 설계기준의 규정보다 인장강화효과가 크게 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 일

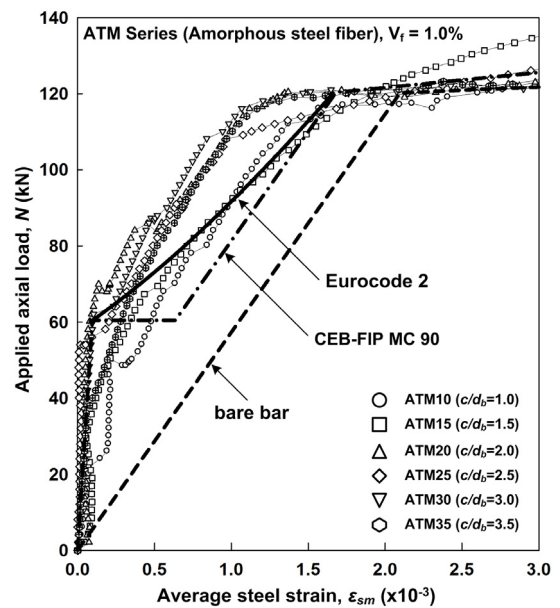


Fig. 8 Tension stiffening behavior in ATM specimens according to cover thickness ratio

반 강섬유로 보강된 철근콘크리트 인장부재의 피복두께에 따른 인장강화효과를 비교한 Fig. 9를 살펴보면, 비정질 강섬유로 보강된 ATM 계열의 시험체와 유사하게 피복두께가 두꺼워질수록 인장강화효과는 증가하였다. 그러나 피복두께에 따른 증가율은 비정질 강섬유로 보강된 시험체에 비하여 크지 않음을 알 수 있다. 또한 MC 90<sup>7)</sup> 및 EC 2<sup>8)</sup>에서 규정하고 있는 인장강화효과와 비교하였을 때, 피복두께가 철근직경의 3.0배인 FTM30 시험체까지 보통 콘크리트 기준의 설계기준 규정과 비교적 유사한 거동을 나타낸다. 그리고 피복두께가 상대적으로 두꺼운 FTM35 시험체에서만 설계기준 규정보다 인장강화

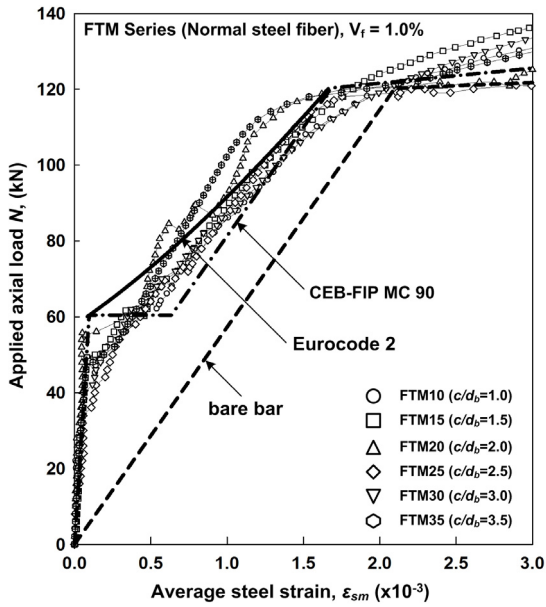


Fig. 9 Tension stiffening behavior in FTM specimens according to cover thickness ratio

효과가 증가하는 것으로 나타났다.

이상과 같은 결과로부터 강섬유로 보강된 철근콘크리트 부재는 보통 콘크리트보다 인장강화효과가 개선된다는 점을 확인할 수 있다. 특히, 비정질 강섬유를 보강재로 사용하면 피복두께가 상대적으로 얇은 경우에도 보통 콘크리트와 유사한 인장강화효과를 얻을 수 있으며, 피복두께를 충분히 확보할 경우에는 인장강화효과 개선효과를 크게 얻을 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

### 3.3 인장강성 계수 비교

Fig. 1에 보인 것과 같은 철근콘크리트 인장부재의 인장강화효과는 식 (1) 및 식 (2)로서 정의되는데, 이 식들은 인장부재에 작용하는 인장력  $N$ 이 부착에 의해 전달되어지는 철근의 저항력  $N_s$ 와 콘크리트의 저항력  $N_c$ 의 합과 평형을 이뤄야 하는 다음과 같은 힘의 평형조건으로부터 유도한 것이다.

$$N = N_s + N_c = A_s E_s \epsilon_{sm} + A_c E_c \epsilon_{cm} \quad (3)$$

여기서,  $A_s$ 와  $A_c$ 는 각각 철근과 콘크리트의 단면적,  $E_s$ 와  $E_c$ 는 각각 철근과 콘크리트의 탄성계수이고,  $\epsilon_{sm}$ 과  $\epsilon_{cm}$ 은 각각 철근과 콘크리트의 평균변형률이다.

그런데, 철근콘크리트 인장부재에 작용하는 인장력  $N$ 은  $N = A_s E_s \epsilon_{so}$ (여기서  $\epsilon_{so}$ 는 순수철근의 변형률)와 같으며, 이 값은 균열이 발생하였을 때 균열면에서 철근이 저항하는 인장력과 같다. 이 값은 식 (3)과 같아야 하므로 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$A_s E_s \epsilon_{so} = A_s E_s \epsilon_{sm} + A_c E_c \epsilon_{cm} \quad (4)$$

식 (4)의 양 변을  $A_s E_s$ 로 나눈 후, 철근의 평균변형률  $\epsilon_{sm}$  항으로 정리하면 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$\epsilon_{sm} = \epsilon_{so} - \frac{\epsilon_{cm}}{n\rho} \quad (5)$$

여기서,  $n$ 은 탄성계수 비( $=E_s/E_c$ ),  $\rho$ 는 단면의 기하적 철근비( $=A_s/A_c$ )이다.

식 (5)의 우변 두 번째 항이 부착에 의해 전달되는 인장력을 콘크리트가 부담함으로써 감소하게 되는 철근의 변형률 양이며, 이 크기가 콘크리트의 인장강화효과가 된다. 또한, MC 90<sup>7)</sup> 및 EC 2<sup>8)</sup>의 인장강화효과 규정은 식 (5)를 각각 다음과 같이 변형한 형태라고 할 수 있다.

$$\epsilon_{sm} = \epsilon_{so} - \frac{\epsilon_{cm}}{n\rho} = \epsilon_{so} - \frac{f_d}{E_s \rho} \quad (6)$$

$$\epsilon_{sm} = \epsilon_{so} - \frac{\epsilon_{cm}}{n\rho} = \epsilon_{so} \left(1 - \frac{f_{sr}}{f_{so}}\right) \quad (7)$$

여기서,  $f_{sr}$ 은 첫 횡방향균열 발생시 균열면에서의 철근 응력으로서,  $f_{sr} = f_{st}/\rho$ 로 정의된다.

인장강화효과는 철근과 콘크리트의 부착에 직접적인 영향을 받는데, 콘크리트 강도, 철근 직경 및 응력의 크기, 피복두께, 하중 조건 등에 따라서 부착 특성이 달라지므로 인장강화효과도 변화할 수 있다. 이러한 이유로 인하여 MC 90<sup>7)</sup> 및 EC 2<sup>8)</sup>에서는 이러한 특성을 반영할 수 있는 인장강성 계수  $\beta_t$ 를 도입하여 인장강화효과를 규정하고 있는데, 앞 절에서 설명한 바와 같이 MC 90<sup>7)</sup>에서는 상수로, EC 2<sup>8)</sup>에서는 비선형 함수로 정의한다. 따라서 비정질 강섬유 및 일반 강섬유로 보강된 철근콘크리트 인장 부재의 인장강성 거동을 보다 명확하게 파악하기 위해서는 작용하중 단계에 따른 인장강성 계수를 확인할 필요가 있다.

이를 위하여 실험으로부터 측정된 철근의 평균변형률과 작용하중을 이용하여 직접인장실험체들의 인장강성 계수를 계산하여 하중단계별로 Fig. 10에 피복두께별로 정리하고, 이와 함께 MC 90<sup>7)</sup> 및 EC 2<sup>8)</sup>에서 규정하는 인장강성 계수를 함께 비교하였다. 이 그림을 살펴보면, 비정질 강섬유 및 일반 강섬유로 보강된 실험체들의 인장강성 계수는 모두 MC 90<sup>7)</sup>에서 규정하는 0.4보다 크다는 것을 알 수 있다. 또한, 작용하중이 증가함에 따라 인장강성 계수가 감소하도록 정의하고 있는 EC 2<sup>8)</sup> 규정과는 반대로 피복두께가 두꺼워질수록 인장강성 계수는 증가하는 것을 알 수 있다.

이러한 사실은 Fig. 1에 개념적으로 도해한 것과 같이 균열이 발생함에 따라 콘크리트의 인장 기여도가 감소하게 되는 보통콘크리트와는 다른 거동으로서, 보강된 강섬유의 균열 저항성이 우수하다는 것을 증명하는 결과라

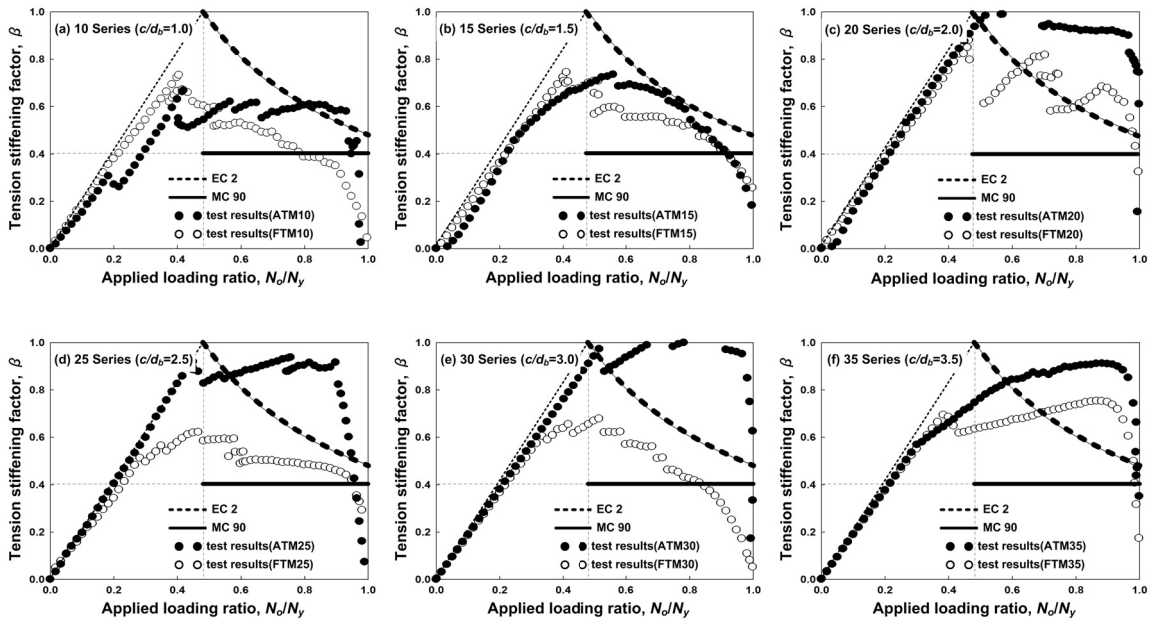


Fig. 10 Comparison of tension stiffening factor

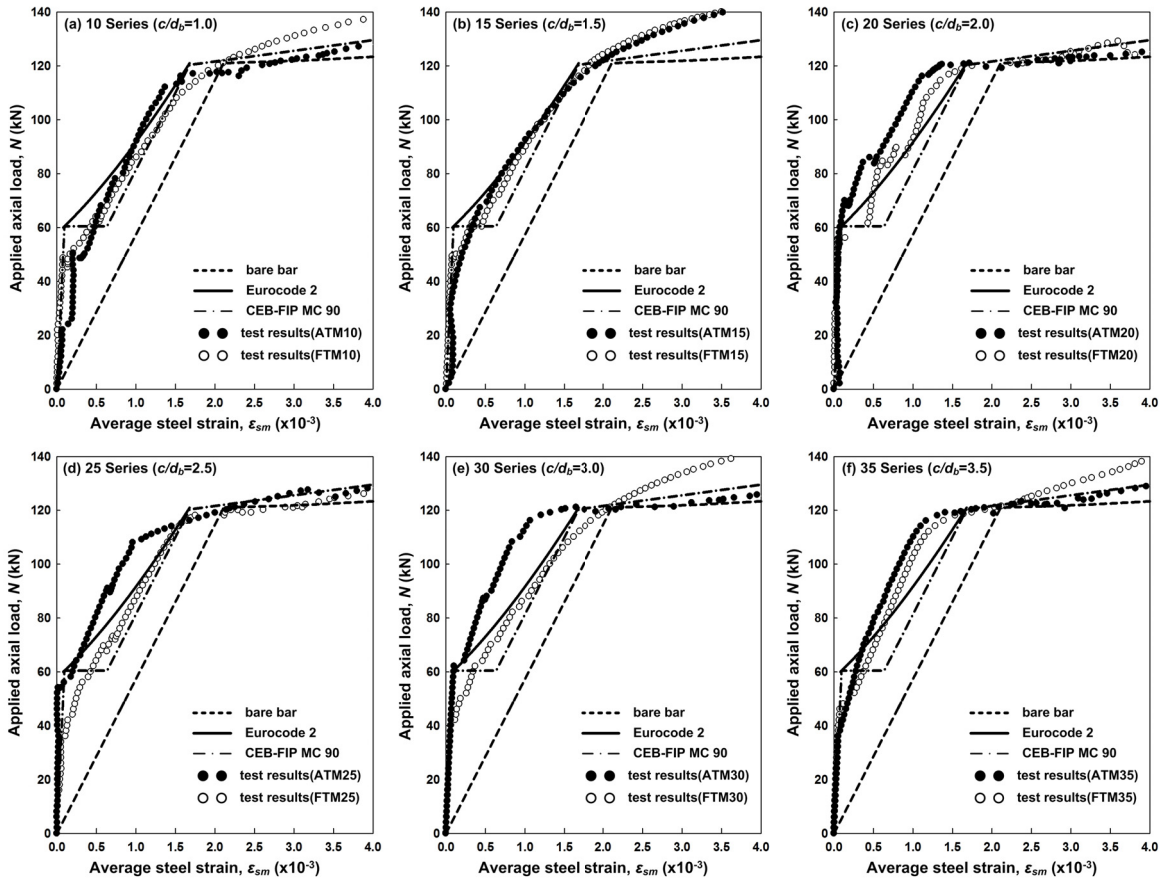


Fig. 11 Comparison of tension stiffening effect

고 할 수 있다. 특히, 일반 강섬유에 비하여 비정질 강섬유로 보강된 실험체 모두에서 인장강성 계수가 더 큰 것으로 나타났는데, 이 결과는 비정질 강섬유의 보강 효과가 비교적 우수하며, 콘크리트의 인장 성능 및 균열 저항성 개선을 위한 새로운 보강 재료로 사용할 수 있는 가능성을 확인한 것이다.

### 3.4 강섬유 종류에 따른 인장강화효과

앞 절에서 언급한 비정질 강섬유의 우수성 및 적용성을 검증하기 위하여 일반 강섬유 및 비정질 강섬유로 보강된 실험체의 인장강화효과를 각 피복두께별로 직접 비교하여 Fig. 11에 정리하였다.

이 그림을 살펴보면,  $c/d_b$ 가 1.5 이하인 얇은 피복두께를 갖는 경우에는 비정질 강섬유와 일반 강섬유의 보강 효과는 비교적 유사한 것으로 나타났다. 또한 강섬유가 보강되지 않은 보통 콘크리트를 기준으로 하는 MC 90<sup>7)</sup> 및 EC 2<sup>8)</sup>에서 규정하는 인장강화효과와 비교적 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 피복두께가 철근 직경의 2배( $c/d_b = 2.0$ ) 이상인 실험체는 비정질 강섬유로 보강된 실험체가 일반 강섬유로 보강된 경우보다 인장강화효과가 비교적 우수함을 확인할 수 있다. 특히, 비정질 강섬유로 보강된 경우에는 현행 설계기준들에서 규정하는 것보다 큰 인장강화효과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 다만, 피복두께가 충분히 확보되었다고 간주할 수 있는  $c/d_b$ 가 3.5 인 실험체에서는 일반 강섬유의 보강 효과가 커져서 비정질 강섬유로 보강된 실험체와 비교적 유사한 인장강화효과를 보이고 있음을 알 수 있다.

따라서 현재까지 콘크리트 성능 개선을 위한 보강재로서 주로 사용되고 있는 일반 강섬유를 대체할 수 있는 새로운 보강재로서 비정질 강섬유의 적용 가능성을 확인하는 결과라고 할 수 있다. 또한, MC 90<sup>7)</sup> 및 EC 2<sup>8)</sup> 설계기준에서 규정하고 있는 인장강화효과는 강섬유로 보강된 콘크리트 구조 부재에 그대로 적용하게 되면 상당한 차이가 발생할 수 있으므로, 강섬유의 보강 효과를 반영할 수 있도록 강섬유 종류에 따른 인장강성 계수의 수정이 반드시 필요하다고 판단된다.

#### 4. 결 론

비정질 강섬유 및 일반 강섬유로 보강한 철근콘크리트 인장부재의 직접인장실험을 통하여 얻어진 하중-변형을 관계로부터 인장강성 거동 분석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 강섬유 보강 콘크리트는 얇은 피복두께를 갖는 경우에도 인장강화효과에 영향을 주는 조짐균열의 발생 및 진행을 억제하는 효과가 우수하며, 특히 비정질 강섬유가 일반 강섬유보다 우수한 보강효과를 보였다.
- 2) 현행 설계기준의 규정과는 다르게 피복두께가 두꺼워질수록 인장강화효과는 증가하였으며, 비정질 강섬유로 보강한 실험체의 경우 피복두께가 철근 직경의 2배 이상 확보되면 설계기준 규정으로 예측한 값보다 큰 인장강화효과를 얻을 수 있다.
- 3) 인장강화효과의 크기를 결정하는 인장강성 계수는 일반 강섬유로 보강한 경우에는 두꺼운 피복두께를 갖는 경우를 제외하면 설계기준의 규정과 비교적 유사하지만, 비정질 강섬유로 보강한 실험체의 경우에는 얇은 피복두께를 제외한  $c/d_b = 2.0$  이상인 경우에는 설계기준 규정과는 다르게 작용하중이 증가함에 따라 인장강성 계수가 커지는 것으로 나타났다.

- 4) 현행 설계기준에서 규정하고 있는 인장강화효과 예측식에 강섬유 보강에 따른 개선 효과를 적절히 반영할 수 있는 인장강성 계수의 수정이 필요하다.

#### 감사의 글

이 연구는 POSCO의 지원으로 수행된 연구 결과의 일부입니다. 연구 지원에 감사드립니다.

#### References

1. Shah, S. P., "Do Fibers Increase the Tensile Strength of Cement-Based Matrixes," *ACI Materials Journal*, Vol. 86, No. 6, 1991, pp. 595-602.
2. Abrishami, H. H. and Mitchell, D., "Influence of Steel Fibers on Tension Stiffening," *ACI Structural Journal*, Vol. 94, No. 6, 1997, pp. 769-776.
3. Hong, C. W., Yun, K. K., Lee, J. H., and Park, J. S., "Development of Tension Stiffening Models for Steel Fibrous High Strength Reinforced Concrete Members," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 11, No. 6, 1999, pp. 35-46 (in Korean).
4. Bischoff, P. H., "Tension Stiffening and Cracking of Steel Fiber-Reinforced Concrete," *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 15, No. 2, 2003, pp. 174-182.
5. Lee, S. C., Kim, J. H., Cho, J. Y., and Shin, K. J., "Tension Stiffening of Reinforced High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 6, 2010, pp. 859-866 (in Korean).
6. Hameed, R., Turatsinze, A., Duprat, F., and Sellier, A., "A Study on the Reinforced Fibrous Concrete Elements Subjected to Uniaxial Tensile Loading," *KSCCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 14, No. 4, 2010, pp. 547-556.
7. CEB-FIP, *CEB-FIP Model Code 1990*, Comite Euro-International Du Beton, Paris, 1991, pp. 247-251.
8. European Committee for Standardization, *Eurocode 2-Design of Concrete Structures*, European Committee for Standardization, Brussels, 2002, pp. 124-131.
9. Fields, K. and Bischoff, P. H., "Tension Stiffening and Cracking of High-Strength Reinforced Concrete Tension Members," *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 4, 2004, pp. 447-56.
10. Yang, J. M., Yoon, S. H., Choi, S. J., and Kim, G. D., "Development and Application of Pig Iron Based Amorphous Fiber for Concrete Reinforcement," *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 25, No. 4, 2013, pp. 38-41 (in Korean).
11. Ganesan, N., Indira, P. V., and Sabeeba, M. V., "Tension Stiffening and Cracking of Hybrid Fiber- Reinforced Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 110, No. 6, 2013, pp. 715-721.



12. Kim, Y. S., *Crack Spacings Relationship and Tension Stiffening Effect on Axially Loaded Tension Members Reinforced with Amorphous Steel Fibers*, Department of Architectural Engineering, Gwangju University, Master's Thesis, 2014 (in Korean).
13. CEB-FIP, *CEB-FIP Model Code for Concrete Structures*, Comite Euro-International Du Beton, 1978, 348pp.
14. Lee, S. C., Cho, J. J., and Vecchio, F. J., "Tension Stiffening Model for Steel Fiber-Reinforced Concrete Containing Conventional Reinforcement," *ACI Structural Journal*, Vol. 110, No. 4, 2013, pp. 639-648.
15. Deluce, J. R., Lee, S. C., and Vecchio, F. J., "Cracking Model for Steel Fiber-Reinforced Concrete Members Containing Conventional Reinforcement," *ACI Structural Journal*, Vol. 111, No. 1, 2014, pp. 93-102.
16. Deluce, J. R. and Vecchio, F. J., "Cracking Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Members Containing Conventional Reinforcement," *ACI Structural Journal*, Vol. 110, No. 3, 2013, pp. 481-490.
17. Korea Concrete Institute, *Structural Concrete Design Code*, Kimoonang Publishing Company, Seoul, 2012, pp. 300-302 (in Korean).

**요 약** 이 논문은 비정질 강섬유 및 일반 강섬유로 보강된 철근콘크리트 인장 부재의 인장강화효과에 대해서 직접인장 실험을 통하여 비교·분석한 것이다. 이를 위하여 피복두께를 변수로 하는 직사각형 단면의 비정질 강섬유 및 일반 강섬유로 보강된 직접인장실험체를 각 6개씩 제작하여 실험을 실시하였다. 실험결과에 따르면 강섬유로 보강된 철근콘크리트 인장부재는 피복두께가 두꺼워질수록 인장강화효과가 증가하였으며, 비정질 강섬유가 일반 강섬유보다 인장강화효과가 더 우수하였다. 강섬유 보강에 따른 쪼갬균열의 발생 및 진행이 크게 감소하였으며, 비정질 강섬유로 보강된 경우는 철근 직경의 2배 이상 피복두께가 확보되면 쪼갬균열이 억제되고 그에 따라서 인장강화효과가 크게 증가하였다. 특히 일반 강섬유와 비교하여 비정질 강섬유로 보강된 철근콘크리트 부재의 경우는 현행 설계기준의 인장강화효과 규정과는 다르게 작용하중에 따라서 인장강화효과가 증가하였는데, 이 결과는 인장강화효과의 크기를 결정하는 인장강성 계수의 분석을 통하여 확인하였다.

**핵심용어** : 비정질 강섬유, 피복두께, 인장강화효과, 쪼갬균열, 강섬유