

## 폴리프로필렌 및 강섬유 보강콘크리트의 휨 성능에 관한 비교 연구

조백순\* · 이종한\*\* · 백성용\*\*\*

Cho, Baiksoon\* · Lee, Jong-Han\*\* · Back, Sung Yong\*\*\*

### Comparative Study on the Flexural Performance of Concrete Reinforced with Polypropylene and Steel Fibers

#### ABSTRACT

Short discrete fibers compounded with concrete can enhance the tensile resistance and ductility of concrete. Recently, the effectiveness of the reinforcement has increased according to the increasing length of steel fiber. However, the lengthening of steel fiber requires reducing the ratio of the fiber content to remain the workability and quality of concrete. Thus, the present study evaluated the flexural performance of fiber reinforced concrete with less than 1.0% fiber volume ratios of steel fiber, 30mm and 60mm long, and polypropylene fiber, being evaluated as a good reinforcing material with chemical stability, long-term durability, and cost effectiveness. Concrete with more than 0.25% steel and 0.5% polypropylene fibers improved the brittle failure of concrete after reaching cracking strength. Concrete reinforced with polypropylene exhibited deflection-softening behavior, but that with more than 0.5% polypropylene delayed stress reduction and recovered flexural strength by 60 to 80% after cracking strength. In conclusion, concrete reinforced with more than 0.75% polypropylene could improve structural flexural performance. In particular, energy absorption capacity of reinforced concrete with 1.0% polypropylene fiber was similar to that with 0.5% and 0.7% steel fibers.

**Key words :** Flexural performance, Ultimate strength, Residual strength, Energy absorption capacity, Fiber reinforced concrete, Steel fiber, Polypropylene fiber

#### 초 록

섬유를 콘크리트의 보강재로 소량 혼입한 섬유 보강 콘크리트는 콘크리트의 인장저항 능력과 연성능력을 향상시킬 수 있다. 최근에는 강섬유의 적용성이 확대됨에 따라 강섬유 길이의 연장을 통해 보강의 효과를 증대시키고 있다. 섬유의 길이 연장은 동일한 시공성과 품질성을 위해 섬유 혼입률을 동시에 감소시킬 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 35mm, 60mm 길이의 강섬유와 화학적인 안정성과 내구성, 경제성 등이 우수한 보강 재료로 평가되어지고 있는 폴리프로필렌 섬유에 대해 섬유혼입률 1.0% 이하에서의 휨 성능을 평가하였다. 강섬유 혼입률이 0.25% 이상, 폴리프로필렌 섬유는 혼입률 0.5% 이상에서 균열강도 도달 후 취성 파괴되는 무보강보의 파괴거동을 개선하는 효과가 나타났다. 다만, 폴리프로필렌 섬유가 혼입된 보강 콘크리트는 균열 이후 deflection-softening 거동을 보였다. 그러나, 0.5%이상의 폴리프로필렌이 혼입된 보강보는 균열 이후 최대강도가 균열강도의 약 60~80%정도 강도회복을 보였으며, 강섬유에 비해 균열 이후 응력감소현상을 지연시키는 경향이 뛰어난 것으로 판단된다. 결론적으로 폴리프로필렌 보강콘크리트는 0.75% 혼입률 이상에서는 충분히 만족할 만한 구조적 휨 성능 향상을 보일 수 있을 것으로 판단된다. 특히, 폴리프로필렌 1.0% 보강 콘크리트의 에너지 흡수 성능은 0.5%, 0.75%가 혼입된 강섬유 보강 콘크리트의 에너지 흡수 성능과 거의 비슷한 것으로 평가되었다.

**검색어 :** 휨 성능, 최대강도, 잔류강도, 에너지 흡수성능, 섬유 보강 콘크리트, 강섬유, 폴리프로필렌 섬유

\* 정희원 · 인제대학교 토목도시공학부 부교수 (Inje University · civcho@inje.ac.kr)

\*\* 정희원 · 교신저자 · 대구대학교 토목공학과 조교수 (Corresponding Author · Daegu University · jonghan@daegu.ac.kr)

\*\*\* 정희원 · 인제대학교 토목도시공학부 교수 (Inje University · civsyb@inje.ac.kr)

Received April 16, 2014/ revised May 26, 2014/ accepted October 15, 2014

## 1. 서론

콘크리트는 건설재료로 사용하기에 충분한 압축성능을 지니고 있다. 그러나, 콘크리트의 저조한 인장성능은 건설재료로서 콘크리트의 사용을 제한한다. 특히, 최근 콘크리트 구조물이 장대화되고 고층화됨에 따라 고성능·고강도 콘크리트에 대한 관심이 증가하고 있다. 이에 따라 강재, 플라스틱, 유리, 천연재료 등으로 제작된 짧은 섬유를 콘크리트에 소량 혼입하여 콘크리트의 인장균열 성장을 억제하고, 상당한 인장 에너지 흡수능을 향상을 기대할 수 있다. 섬유를 콘크리트의 보강재로 혼입하여 콘크리트의 인장저항 능력과 연성능력을 개선한 콘크리트를 섬유 보강 콘크리트(Fiber Reinforced Concrete, FRC)라 한다. 섬유 보강 콘크리트의 성능에 영향을 미치는 주요인자는 섬유의 재료 성능(강도, 강성, 포아송비), 섬유의 형상과 형상비, 섬유혼입률, 콘크리트의 재료 성능, 그리고, 콘크리트와 섬유의 부착 성능 등이다. 콘크리트의 재료적 종류가 결정되면 섬유의 종류와 섬유혼입률이 섬유 보강 콘크리트의 성능과 경제성 관점에서 가장 큰 영향을 미치는 인자라 할 수 있다. 즉, 모든 조건이 같다면, 섬유혼입률이 낮으면서 성능이 우수한 섬유 보강 콘크리트가 경제성 관점에서 유리하다.

섬유 보강 콘크리트는 1970년대 이후부터 이론적인 연구가 이루어지기 시작하여 1980년대에 강섬유 보강 콘크리트(Steel Fiber Reinforced Concrete, SFRC)에 대한 기본 강도특성과 섬유 혼입 효과에 대한 실험적·이론적 연구가 진행되었다. Soroushian and Bayasi (1991)가 혼입률 2%에 대한 강섬유 보강 콘크리트의 우수한 휨 강도를 보고한 이후, 최근 Kim et al. (2008)이 보강보에 대한 휨 실험을 수행하여 강섬유 보강 콘크리트의 휨 강도와 균열 이후의 에너지 흡수 성능의 우수성을 보였다. 최근에는 강섬유 보강 콘크리트의 향상된 인장성능을 활용하여 강섬유 보강 콘크리트의 지반 위 슬래브에 대한 적용성을 연구하였다(Sorelli et al., 2006). 또한, Chiaia et al. (2007) and Meda et al. (2012)이 강섬유 보강 콘크리트의 균열 후 잔류강도를 이용한 철근콘크리트 부재의 인장철근량을 감소시키는 연구를 실시하였고, Farhat et al. (2006) and Martinola et al. (2010)은 강섬유 보강 콘크리트를 이용한 철근 콘크리트 보의 보수 및 보강에 대한 연구를 실시하였다.

한편 폴리프로필렌(Polypropylene, PP)는 강섬유에 비해 상대적으로 낮은 탄성계수와 낮은 강도 등이 단점으로 지적되어 왔지만, Nurdian and Jalan (1990)의 연구에 의하면 폴리프로필렌 섬유를 적당량 혼입함으로써 콘크리트의 재료 분리를 억제하고 균열발생 진전 방지 등의 효과가 있다고 보고되었다. 최근, Kakooei et al. (2012)는 폴리프로필렌 섬유는 유리섬유, 강섬유 등의 타 보강 재료에 비해 낮은 비중을 가지고 화학적으로도 안정되어 있어, 콘크리트의 보강재료로 적용 시 내구성이 우수하고 충격, 마모,

피로 등에 대한 저항성을 증대시킬 수 있음을 보였다. 특히 실제 건설현장 적용 시 폴리프로필렌이 다른 섬유에 비해 경제적이고 배합이나 혼합방법, 섬유 뭉침현상 등에 대한 염려가 적어 이를 적용하려는 경향은 점차 높아지고 있다.

현재까지 대부분의 섬유 보강 콘크리트의 휨 거동에 대한 연구 및 실 적용은 20~40mm 길이의 강섬유를 대상으로 이루어졌다. 최근에는 강섬유의 적용성이 확대됨에 따라 강섬유 길이의 연장을 통해 섬유 보강의 효과를 증대시키고 있다. 그리고, 강섬유의 혼입량은 일반적으로 0.5~2.0%의 혼입률이 사용되고 있다. 섬유혼입률이 증가함에 따라 강도 증진의 효과는 증가하지만, 배합이나 운반 등의 어려움이 발생한다. 특히, 섬유의 길이가 증가할수록 동일한 시공성과 품질성을 유지하기 위해 혼입률을 감소시키는 것이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 섬유 혼입률 1%이하에서의 혼입률 변화에 따른 35mm와 60mm 길이의 강섬유에 대한 휨 강도와 균열강도 그리고, 균열 이후의 잔류강도, 에너지 흡수 성능 등을 평가하였다. 또한, 화학적인 안정성과 우수한 내구성, 경제성 등으로 우수한 보강 재료로 평가되어지고 있는 폴리프로필렌 섬유 보강 콘크리트에 대해서도 동일한 섬유혼입률에 따른 균열 전·후의 휨 성능을 평가함으로써 deflection-hardening 거동으로 향상시킬 수 있는 섬유혼입률을 규명하였다.

## 2. 섬유 보강 콘크리트 보의 휨 성능 실험

### 2.1 실험 변수 및 실험체 제작

섬유 보강 콘크리트 실험체를 제작하기 위해 자갈과 모래, 시멘트의 건비율을 먼저 실시한 후, 고성능 감수제가 투입된 물을 섞어 비빔을 실시하였다. 이후 섬유를 투입하여 섬유가 골고루 분산될 때까지 비빔을 실시하였다. 본 연구에서 사용된 콘크리트 배합비는 물-시멘트비 40%에 대하여 현재 콘크리트 공사에서 일반적으로 사용되고 있는 슬럼프값 15cm 이상의 배합을 설정하여 시멘트량, 골재량, 고성능 감수제량을 결정하였다. Table 1이 본 연구에서 사용된 콘크리트의 배합비이다. 비빔 후 굳지 않은 콘크리트는 150mm x 150mm x 500mm 강제몰드에서 24시간 동안 양생되었으며, 양생 중 수증기의 증발을 방지하기 위하여 표면에는 비닐을 덮어 두었다. 24시간 양생 후 몰드에서 꺼낸 섬유 보강 콘크리트 실험체는 휨 실험 실시 24시간 전까지 26일 동안 23±1°C 수조에서 양생하였다.

섬유 종류가 섬유 보강 콘크리트의 휨 성능에 미치는 영향을

Table 1. Mix Proportion of Concrete (units: kg/m<sup>3</sup>)

Cement	Water	Gravel	Sand	Silica fume	Super-plasticizer
516	206	902	804	20	1.2

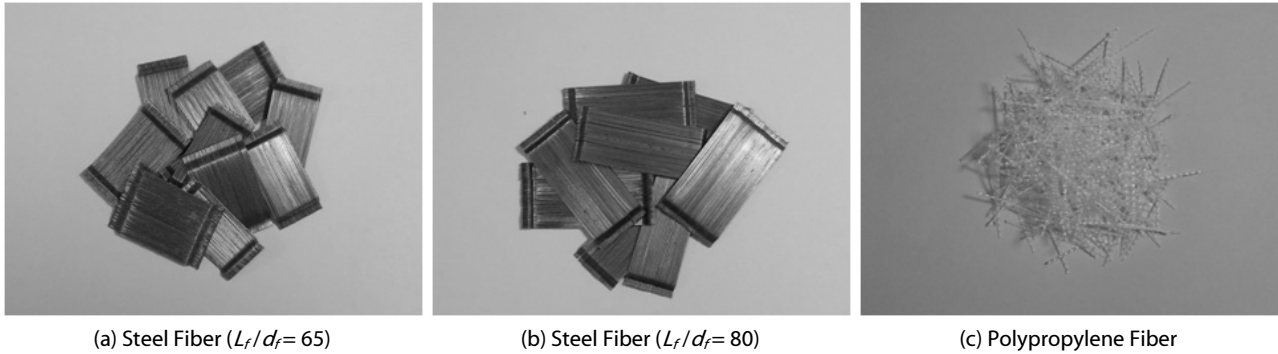


Fig. 1. Picture of Polypropylene and Steel Fibers

Table 2. Physical Properties of Steel and Polypropylene Fibers

Fiber type	Fiber shape	Length, $L_f$ (mm)	Diameter, $d_f$ (mm)	Aspect ratio, $L_f/d_f$	Tensile Strength (MPa)
Steel	Hooked-end	35	0.538	65	1100
		60	0.75	80	1200
Polypropylene	-	26	0.85	30	450

Table 3. Test Variables and Specimens

Name of specimen	Fiber type	$L_f/d_f$	Fiber content (Vol. %)	No. of specimen
CS	-	-	-	4
S65-0.25	Steel	65	0.25%	4
S65-0.50			0.50%	4
S65-0.75			0.75%	4
S65-1.00			1.00%	4
S85-0.25	Steel	80	0.25%	4
S85-0.50			0.50%	4
S85-0.75			0.75%	4
S85-1.00			1.00%	4
PP-0.25	Polypropylene	30	0.25%	4
PP-0.50			0.50%	4
PP-0.75			0.75%	4
PP-1.00			1.00%	4

알아보기 위해 강섬유와 폴리프로필렌 섬유 두 종류를 사용하였다. 강섬유는 hooked-end 형태이며, 폴리프로필렌 섬유는 직선에 가로 줄눈이 간 형태이다(Fig. 1 참조). 또한, 강섬유는 길이 35mm와 60mm인 형상비(섬유 지름에 대한 길이 비)가 각각 65와 80인 두 종류의 강섬유를 사용하였다. 섬유혼입률은 부피비 0.25, 0.50, 0.75, 1.00%인 네 종류를 선택하였다. 본 논문에서 사용된 형상비 65인 강섬유의 인장강도는 1,100MPa, 형상비 80인 강섬유의 인장강도는 1,200MPa, 폴리프로필렌 섬유의 인장강도는 450MPa이다. 본 연구에서 사용된 강섬유와 폴리프로필렌 섬유의 형상 및

물리적 성질을 Table 2에 나타내었다.

Table 3은 섬유종류와 섬유혼입률에 따라 구성된 총 12종류의 섬유 보강보와 비교 목적으로 섬유가 혼입되지 않은 무보강보 실험체에 대한 각각의 실험변수를 나타내었다. 실험에 대한 신뢰성 확보를 위해 각 종류당 4개씩, 합계 52개의 보에 대한 체계적인 실험을 실시하였다.

## 2.2 실험방법

ASTM C-1609 (2007)와 KS F 2403 (2010) 규정을 준수하여 300 kN 용량의 재료시험기를 사용하여 섬유 보강 콘크리트 보의 휨 실험을 실시하였다. 실험보를 지지하기 위해 재료시험기의 하부에 강제 하중지지대를 설치하였다. 단순지지 경계조건을 만족시키기 위해 하중지지대에 강제 롤러로 구성된 지지점을 설치하였으며, 지지점과 지지점 사이의 거리는 450mm이다. 실험보는 콘크리트 타설방향을 측면으로하여 지지점 강제 롤러에 올려졌으며, 실험보 하부와 지지점 강제 롤러 사이에는 고무판을 설치하여 지지력을 균등하게 작용시켰다. 실험보에 하중을 가력하기 위해 재료 시험기 상부에 강제 하중가력대와 하중가력장치를 설치하였으며, 하중 가력점 사이의 거리는 150mm로 순수 휨응력을 받는 구간이다. 실험보의 상부와 하중가력강제 사이에 고무판을 설치하여 콘크리트의 국부 균열을 방지하였을 뿐 아니라 하중을 균등하게 작용할 수 있게 하였다.

실험 시 보의 중앙 하부에서 측정된 처짐은 보의 실제 처짐뿐 아니라 하중가력장치의 탄성 및 비탄성 거동에 의한 변위와 시편의 미끄럼에 의한 부가적인 처짐을 포함한다. Gopalaratnam et al.

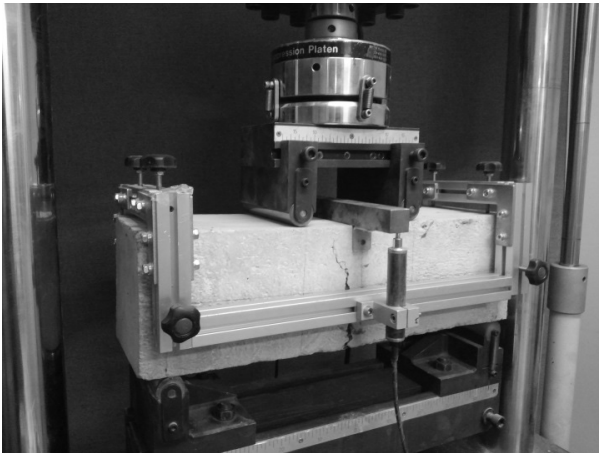


Fig. 2. Flexural Test of Fiber Reinforced Concrete Beam

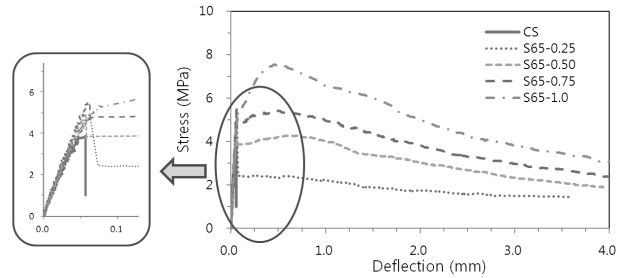
(1991)은 보의 중앙 하부에서 측정된 균열강도 도달 처짐은 실제 처짐보다 약 2배에 가깝다고 보고하였다. 따라서, 본 논문에서는 ASTM C 1609 (2007)의 제안에 따라 특수 제작된 처짐 측정장치를 사용하여 부가적인 처짐을 제외한 실험보의 실제 처짐을 측정하였다. 또한 보의 중앙부 앞면과 뒷면에는 변위계를 각각 설치하여 편심을 제어하였다. 하중은 재료시험기에 부착된 변위계를 0.2mm/min.의 속도로 실험이 끝날 때까지 가력하였다. 실험은 보의 지간 길이 450mm의 1/150인 3mm 처짐을 확보할 때까지, 약 10분 동안 지속되었다. Fig. 2는 섬유 보강콘크리트 보의 4점 휨 실험 광경이다.

### 3. 실험결과 및 논의

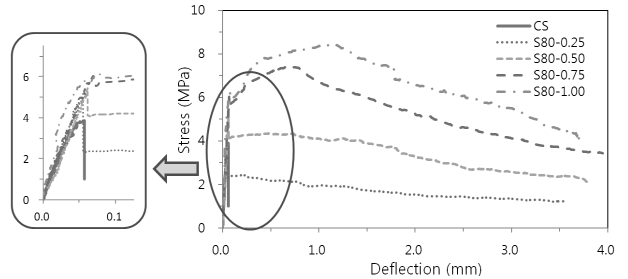
#### 3.1 응력-처짐 선도

폴리프로필렌 섬유와 강섬유 보강 콘크리트 보의 휨 실험에서 측정된 응력-처짐 선도를 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3(a)는 형상비가 65인 강섬유 보강보, Fig. 3(b)는 형상비가 80인 강섬유 보강보, Fig. 3(c)는 폴리프로필렌 섬유 보강보의 실험결과를 나타낸다. 처짐은 처짐 측정 장치에 설치된 2개의 변위계에서 측정된 처짐의 평균으로 하였고, 응력은 ASTM C 1609의 응력 산정식인  $f = PL/bd^2$ 을 사용하여 계산하였다. 여기서,  $f$ 는 응력,  $P$ 는 하중,  $L$ 은 보의 지간,  $b$ 는 보의 폭,  $d$ 는 보의 깊이다.

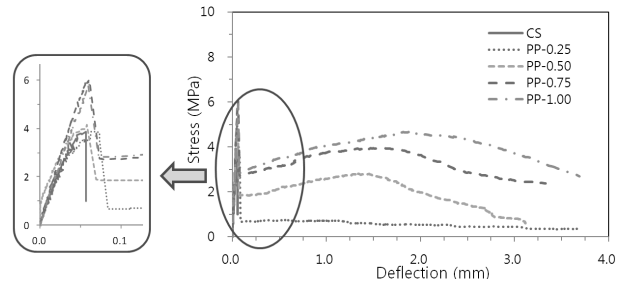
무보강보의 응력-처짐 선도는 콘크리트 균열이전구간에서 탄성 거동하며, 균열 발생 후 파괴되는 매우 취성적인 거동을 보여준다. 섬유 보강보의 응력-처짐 선도의 균열이전구간은 무보강보와 매우 비슷하게 측정되었다. 그러나 콘크리트 내에 혼입된 섬유는 콘크리트의 인장균열의 성장을 억제하여 섬유 보강보의 균열강도는 조금 향상된 것으로 평가된다. 그러나, 균열강도는 섬유혼입률에 비례하여 증가하지는 않았고, 보강 섬유 종류에 따른 차이는 나타나지



(a) Reinforced Concrete Beams with Steel Fiber ( $L_f/d_f=65$ )



(b) Reinforced Concrete Beams with Steel Fiber ( $L_f/d_f=80$ )



(c) Reinforced Concrete Beam with Polypropylene Fiber

Fig. 3. Stress and Deflection Curves Experimentally Measured from Steel and Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Beam Tests

않았다. 콘크리트 균열 발생 시 무보강보의 처짐은 0.053mm로 측정되었고, 보강보의 처짐은 0.053~0.076mm로 측정되었다. 이는 보강 섬유가 콘크리트 인장균열의 성장을 억제시켜, 콘크리트 균열 발생 시 보의 처짐 발생을 지연시키는 경향이 있는 것으로 평가된다.

균열이후구간에서 섬유 보강보의 응력-처짐 선도는 무보강보와는 확연히 달랐으며, 섬유에 의한 콘크리트 인장균열 제어로 하중 저항성능과 처짐 저항성능이 매우 크게 향상되었다. 특히, 본 연구에서 사용된 최소 섬유혼입률인 0.25%에서도 균열강도 도달 후 취성 파괴되는 무보강보의 파괴거동을 개선하는 효과가 있었다. 다만, 0.25% 폴리프로필렌 섬유 보강보는 강섬유 보강보에 비해 콘크리트 균열 발생 직후 응력의 감소가 크게 나타났다. 그러나, 0.5%이상 혼입된 폴리프로필렌 보강보에서는 균열강도 이후 응력이 서서히 증가하여 파괴거동을 개선하는 효과가 나타났다.

형상비 65 혼입률 0.5% 이하의 강섬유 보강보는 균열 발생 직후 강도감소가 나타나 균열 이후 구간에서 균열강도 이상의 강도를 회복하지 못하였다. 섬유가 0.75% 혼입된 보강보는 균열 발생 직후 응력의 감소는 거의 나타나지 않았으며, 최대응력은 균열강도와 거의 비슷하게 측정되었다. 섬유가 1.0% 혼입된 보강보는 균열 발생 후에도 응력감소현상이 발생하지 않고, 최대강도에 도달할 때까지 응력이 지속적으로 증가하였다. 최대강도 도달 시 처짐은 약 0.5mm로 측정되었다. 따라서, 형상비가 65인 강섬유는 섬유혼입률이 1.0%일 때 최대응력이 균열강도를 초과하는 **deflection-hardening** 거동을 하였다.

형상비 80인 강섬유 보강보도 섬유혼입률이 0.5% 이하인 경우 강도 감소가 나타났으며, 이 후의 강도는 균열강도를 회복하지 못하였다. 섬유가 0.75%와 1.0% 혼입된 보강보는 균열 발생 후에도 최대강도에 도달할 때까지 강도가 지속적으로 증가하였다. 따라서 형상비 80 혼입률 0.75% 이상의 강섬유 보강보는 균열강도 도달 후 응력이 증가하는 **deflection-hardening** 거동을 하였다. 섬유혼입률이 높을수록 최대강도 도달 처짐도 증가하여, 혼입률 0.75%와 1.0% 섬유 보강보의 최대강도 도달 처짐은 각각 약 0.7mm, 약 1.0mm로 측정되었다.

폴리프로필렌 섬유 보강보는 앞서 기술한 바와 같이, 모든 보강보에서 콘크리트 균열 이후 최대응력이 균열강도를 초과하지 않는 **deflection-softening** 거동을 하였다. 다만 0.5%이상 혼입된 보강보는 균열 이후 최대강도에 도달할 때까지 응력은 지속적으로 증가하였으며, 균열 이후 최대강도는 균열강도의 약 60~80%의 강도회복을 나타냈다. 섬유혼입률이 1.0%인 보강보의 균열 이후 최대강도 도달 처짐은 폴리프로필렌 섬유가 약 1.8mm, 형상비 65인 강섬유가 약 0.5mm, 형상비 80인 강섬유가 1.0mm로 측정되어 폴리프로필렌 섬유가 강섬유에 비해 균열 이후 구간에서 응력감소현상을 지연시키는 성향이 뛰어난 것으로 평가된다.

### 3.2 균열강도와 최대강도

균열강도는 콘크리트에 인장균열을 발생시키는 응력으로 응력-처짐 또는 하중-처짐 선도상 기울기가 처음으로 급변하는 탄성구간의 마지막 단계이다. Fig. 3에서 보인 바와 같이 섬유 보강보는 탄성구간내의 휨 성능에 미치는 영향은 매우 제한적이다. 즉, 보강 섬유는 콘크리트의 인장균열을 제어하고 보강보의 균열강도를 향상시키는 경향은 있지만 그 영향은 매우 미비한 것으로 평가된다.

최대강도는 섬유 보강보 휨 실험에서 측정된 최대응력으로, Fig. 4에 섬유혼입률 증가에 따른 최대강도의 관계를 도시하였다. 앞서 언급한 **deflection-softening** 거동을 하는 섬유 보강보는 콘크리트 균열 이후 균열강도 이상의 강도 회복이 나타나지 않으므로, 균열강도가 최대강도가 된다. 강섬유 보강보의 최대강도는 섬유혼

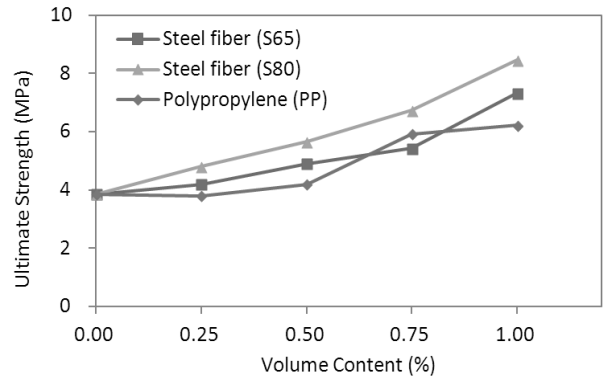


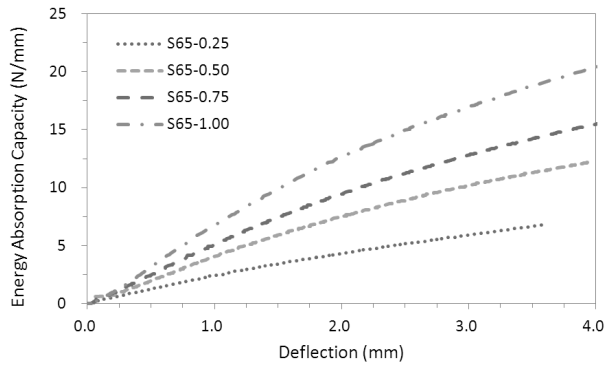
Fig. 4. Ultimate Strength of Fiber Reinforced Concrete Beams with an Increase in Fiber Volume Content

입률 1.0%까지 혼입률에 비례적으로 증가하는 것으로 평가된다. 형상비 80인 강섬유를 1.0% 혼입한 보강보의 최대강도는 8.47 MPa이며 무보강보에 비해 약 119% 증가하였고, 형상비 65인 강섬유를 1.0% 혼입한 보강보의 최대강도는 7.34 MPa로 무보강보에 비해 약 90% 증가하였다. 폴리프로필렌 섬유 보강보는 Fig. 4에 보인 바와 같이, 섬유혼입률 0.5%까지는 뚜렷한 강도 증가를 보이지 않다가, 섬유혼입률 0.75%에서 최대강도 6.22MPa로 무보강보에 비해 약 61% 증가하였다. 이는 형상비 65, 섬유혼입률 0.75%의 강섬유 보강보의 최대강도 5.44MPa 보다 약 14% 증가된 값이며, 형상비 80, 섬유혼입률 0.75%의 강섬유 보강보의 최대강도 6.73MPa와 비교 시에도 큰 차이가 나지 않았다. 그리고, 폴리프로필렌 섬유 1.0%를 혼입한 보강보의 최대강도는 0.75% 혼입한 보강보와 매우 비슷한 최대강도를 보였다. 이는 현재의 연구결과만으로 결론을 짓기는 어려우나 폴리프로필렌 섬유 보강보는 혼입률 0.75%에서 최대강도의 효과를 나타내며, 그 이상의 혼입률에서는 강도 증진율이 감소하는 것으로 보인다.

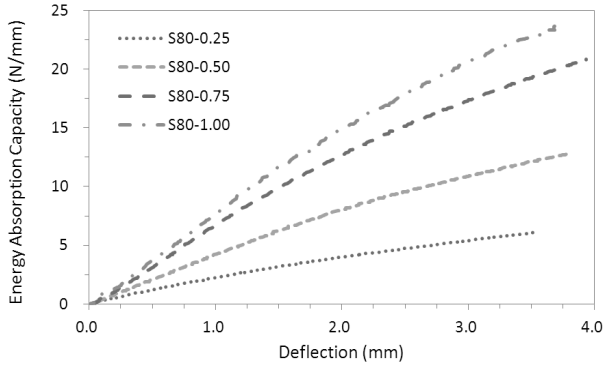
## 4. 섬유 보강보의 인장성능 평가

### 4.1 에너지 흡수성능

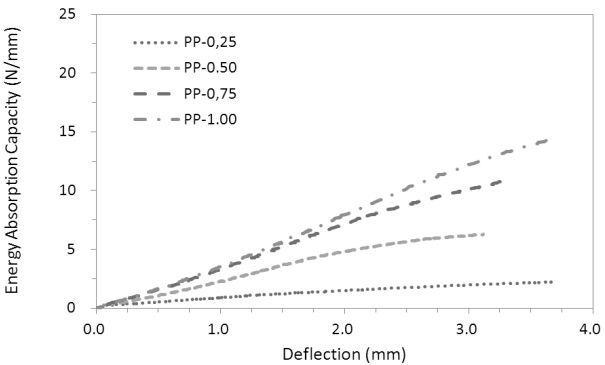
에너지 흡수 성능은 ASTM C-1609(2007)기준에 의해 수행된 섬유 보강보 휨 실험의 하중-처짐 선도의 면적에 의해 계산되었다. 섬유의 종류와 섬유의 형태, 혼입률에 따른 에너지 흡수 성능-처짐 선도를 Fig. 5에 도시하였다. Fig. 5(a)는 형상비가 65인 강섬유, Fig. 5(b)는 형상비가 80인 강섬유, Fig. 5(c)는 폴리프로필렌 섬유 보강보 실험에서 측정된 에너지 흡수 성능이다. 에너지 흡수 성능-처짐 선도는 섬유의 종류 및 형태, 섬유 혼입률에 큰 영향을 받았다. 그러나 선도의 형태는 섬유의 종류 및 형태, 섬유 혼입률에 거의 영향을 받지 않았으며, 처짐이 증가할수록 에너지 흡수 성능은



(a) Reinforced Concrete Beams with Steel Fiber ( $L_r/d_f=65$ )



(b) Reinforced Concrete Beams with Steel Fiber ( $L_r/d_f=80$ )

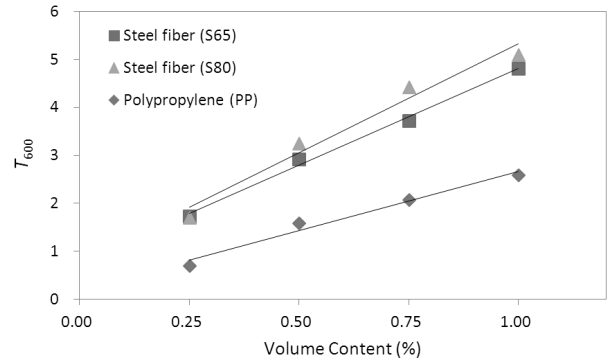


(c) Reinforced Concrete Beam with Polypropylene Fiber

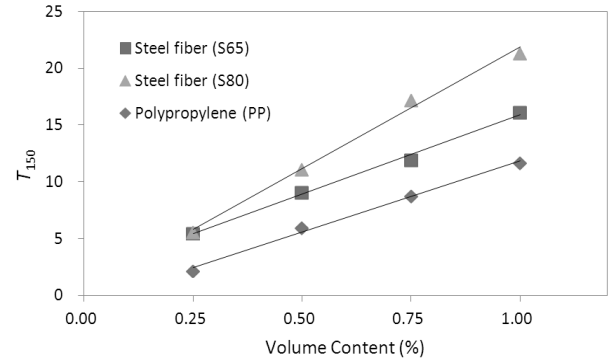
Fig. 5. Energy Absorption Capacity and Deflection Curves Experimentally Measured from Steel and Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Beam Tests

거의 선형적으로 증가하였다.

Fig. 6에 섬유 보강보의 에너지 흡수 성능과 섬유 혼입률의 관계를 도사하였다. Fig. 6(a)는 처짐 L/600인 0.75mm에서 측정된 에너지 흡수 성능  $T_{600}$ 이며, (b)는 처짐 L/150인 3.0mm에서 측정된 에너지 흡수 성능  $T_{150}$ 이다. 각 선들은 세 종류의 섬유를 혼입한 보강보의 에너지 흡수 성능을 직선회귀분석한 결과이다. 회귀분석한 직선은 섬유 보강보 실험결과를 잘 반영하고 있으며, 섬유 혼입률 1.0%까지 에너지 흡수 성능은 섬유 혼입률에 비례하여 증가하는



(a) Energy Absorption Capacity  $T_{600}$  Measured at L/600 (0.75 mm)



(b) Energy absorption capacity  $T_{150}$  measured at L/150 (3.0 mm)

Fig. 6. Relationship between Energy Absorption Capacity and Fiber Volume Ratio

것으로 평가된다.  $T_{600}$ 은 섬유혼입률이 증가함에 따라 형상비 80인 강섬유와 형상비 65인 강섬유의 에너지 흡수 성능 증가율이 매우 비슷하게 나타났으며, 폴리프로필렌 섬유의 증가율은 강섬유에 비해 다소 작은 것으로 나타났다. 그러나, 섬유 보강보의 처짐 3.0mm에서 측정된 에너지 흡수 성능  $T_{150}$ 은 형상비 80인 강섬유 보강보가 형상비 65인 강섬유에 비해 우수한 에너지 흡수 성능을 보였으며, 폴리프로필렌 섬유 보강보는 형상비 65인 강섬유의 에너지 흡수 성능 증가율과 비슷하였다. 이는 폴리프로필렌 섬유 보강보는 균열 이후 구간에서 응력감소현상을 지연시켜 에너지 흡수 성능이 증가하는 것으로 판단된다. 형상비 80인 강섬유를 1.0% 혼입한 보강보의 에너지 흡수 성능은 무보강 보에 비해 약 173배, 형상비 65인 강섬유를 1.0% 혼입한 보강보의 에너지 흡수 성능은 무보강 보에 비해 약 131배, 폴리프로필렌 섬유를 1.0% 혼입한 보강보의 에너지 흡수 성능은 무보강보에 비해 약 95배 증가하였다.

#### 4.2 잔류강도

ASTM C-1609 (2007)는 처짐 L/600와 처짐 L/150에서 측정된 응력을 각 처짐에 대한 잔류강도라 하였다. 이외는 달리 JSCE (1984)는 처음부터 처짐 L/150까지 일정구간의 평균응력을 잔류강

도로 정의하였으며, JSCE의 잔류강도  $f_{JSCE}$  는 다음과 같이 계산되어진다.

$$f_{JSCE} = \frac{T_b L}{\delta_{tb} b h^2} \quad (1)$$

여기서,  $T_b$ 는 처짐 L/150에서 측정된 에너지 흡수 성능이며,  $\delta_{tb}$ 는 처짐 L/150 값이다. JSCE의 잔류강도는 균열강도 이전구간의 휨 성능도 포함하고 있기 때문에, 본 연구에서는 균열강도 이전구간의 휨 성능을 제외한 특정 처짐 구간의 평균응력을 평가할 수 있는 잔류강도 측정방법을 다음과 같이 제안하였다.

$$f_D^{eq} = \frac{T_D - T_{cr}}{\delta_D - \delta_{cr}} \quad (2)$$

여기서,  $f_D^{eq}$  는 균열처짐  $\delta_{cr}$ 에서 처짐 D인  $\delta_D$ 까지 잔류강도이며,  $T_D$ 는 처짐 D까지 에너지 흡수 성능,  $T_{cr}$ 은 균열처짐까지 에너지 흡수 성능이다. 예를 들어 처짐 L/600까지 잔류강도  $f_{600}^{eq}$ 와 처짐 L/150까지 잔류강도  $f_{150}^{eq}$  다음과 같이 각각 계산할 수 있다.

$$f_{600}^{eq} = \frac{T_{600} - T_{cr}}{\delta_{600} - \delta_{cr}} \quad (3)$$

$$f_{150}^{eq} = \frac{T_{150} - T_{cr}}{\delta_{150} - \delta_{cr}} \quad (4)$$

위 식에서 계산되어진 처짐 L/600 (=0.75mm)까지 잔류강도  $f_{600}^{eq}$ 와 처짐 L/150 (=3.0mm)까지 잔류강도  $f_{150}^{eq}$ , 균열이전구간의 에너지 흡수 성능을 포함한 JSCE의 잔류강도  $f_{JSCE}$ 를 Table 4에 비교 정리하였다. JSCE 잔류강도  $f_{JSCE}$ 는 균열이전구간의 응력-처짐 선도 면적이 포함되었기 때문에 균열이후구간의 평균응력이 균열강도의 1/2보다 크면,  $f_{150}^{eq}$ 는  $f_{JSCE}$ 보다 크게 평가된다. 그 반대이면,  $f_{150}^{eq}$ 는  $f_{JSCE}$  보다 작게 평가된다.

Fig. 7에 섬유 보강보의 잔류강도와 섬유혼입률의 관계를 도시하였다. Fig. 7(a)는 처짐 L/600인 0.75mm에서 측정된 잔류강도  $f_{600}^{eq}$ 이며, Fig. 7(b)는 처짐 L/150인 3.0mm에서 측정된 잔류강도  $f_{150}^{eq}$ 이다. 각 선들은 세 종류의 섬유를 혼입한 보강보의 잔류강도를 직선회귀분석한 결과이다. 회귀분석한 직선은 섬유 보강보 실험결과를 잘 반영하고 있으며, 잔류강도는 섬유혼입률에 비례하여 증가하는 것으로 평가된다. 섬유혼입률에 대한 잔류강도는 앞에서 언급한 에너지 흡수 성능과 유사하게 나타났다. 형상비 80인 강섬유를 1.0% 혼입한 보강보의 잔류강도  $f_{150}^{eq}$ 는 7.22MPa, 형상비 65인 강섬유를 1.0% 혼입한 보강보의 잔류강도  $f_{150}^{eq}$ 는 5.45MPa, 폴리프로필렌 섬유를 1.0% 혼입한 보강보의 잔류강도  $f_{150}^{eq}$ 는 3.93MPa로 나타났다. 특히, 형상비 80인 1.0% 혼입한 보강보의 잔류강도는 균열강도보다 약 38.9% 높은 것으로 나타났다.

균열강도에 대한 잔류강도비를 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 8(a)는 처짐 L/600인 0.75mm에서 측정된 잔류강도비  $R_{600}$ 이며, Fig. 8(b)는 처짐 L/150인 3.0mm에서 측정된 잔류강도비  $R_{150}$ 이다. 각 선들은 세 종류의 섬유를 혼입한 보강보의 잔류강도비를 직선회귀분석한 결과로, 잔류강도비는 섬유혼입률에 비례하여 증가하는 것으로 평가된다. 형상비 80인 강섬유의  $R_{600}$ 은 형상비 60인 강섬

Table 4. Energy Absorption Capacity and Residual Strength Calculated from Experimental Results for Fiber Reinforced Concrete

Name of specimen	Energy absorption capacity (N/mm)			Residual strength (MPa)		
	Tcr	T600	T150	$f_{600}^{eq}$	$f_{150}^{eq}$	$f_{JSCE}$
CS	0.123	0.123	0.123	0	0	0
S65-0.25	0.123	1.735	5.506	2.286	1.836	1.836
S65-0.50	0.153	2.925	9.107	3.973	3.046	3.039
S65-0.75	0.170	3.724	11.939	5.139	3.996	3.988
S65-1.00	0.249	4.817	16.176	6.798	5.447	5.391
S85-0.25	0.128	1.706	5.603	2.269	1.854	1.865
S85-0.50	0.185	3.251	11.165	4.390	3.739	3.720
S85-0.75	0.200	4.428	17.231	6.129	5.797	5.738
S85-1.00	0.213	5.102	21.394	7.204	7.221	7.126
PP-0.25	0.120	0.699	2.164	0.832	0.689	0.717
PP-0.50	0.179	1.594	5.974	2.054	1.970	1.986
PP-0.75	0.209	2.077	8.764	2.724	2.907	2.915
PP-1.00	0.180	2.591	11.712	3.500	3.928	3.909

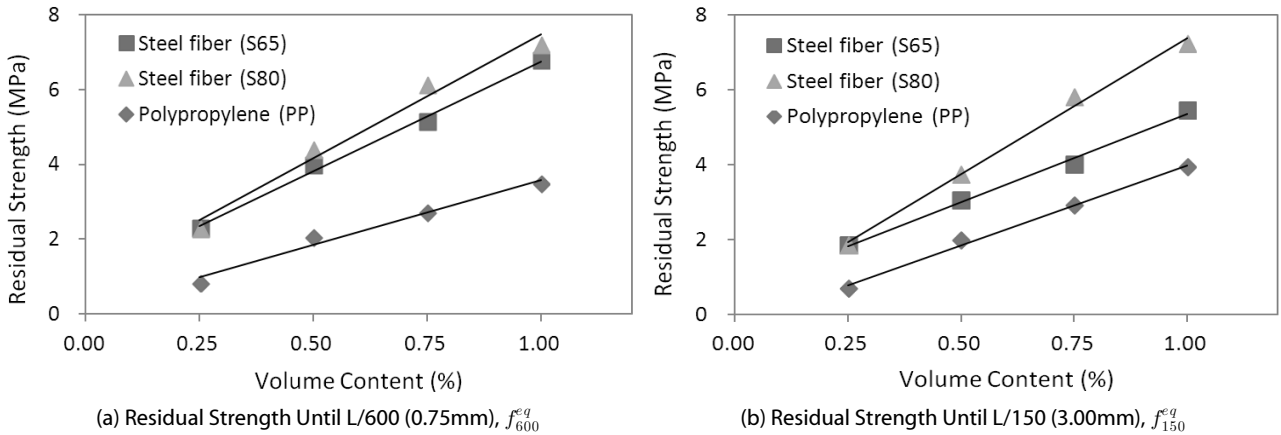


Fig. 7. Residual Strength Of Fiber Reinforced Concrete with an Increase in Fiber Volume Content

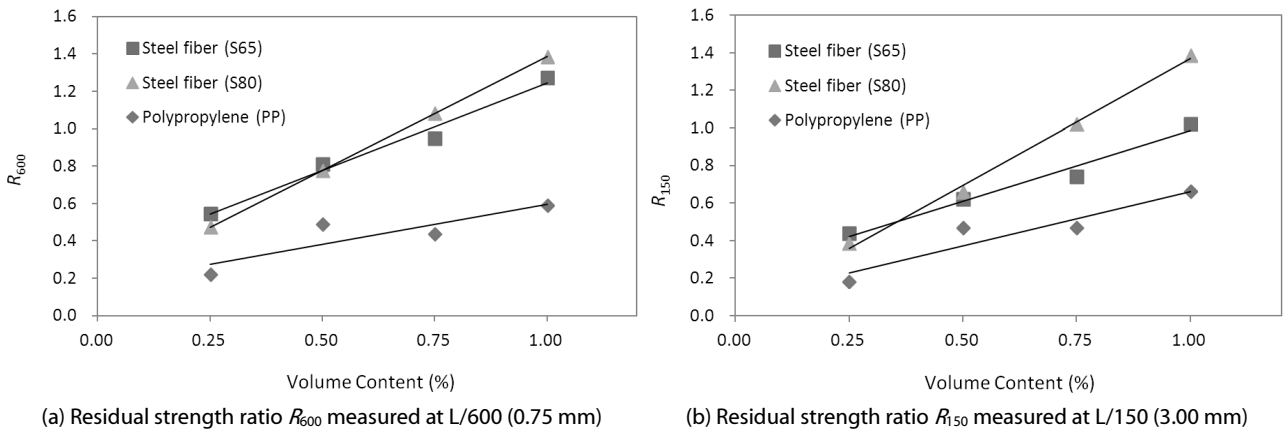


Fig. 8. Residual Strength Ratio of Fiber Reinforced Concrete with an Increase in Fiber Volume Content

유 보강보와 매우 비슷하게 나타났으며, 폴리프로필렌 섬유 보강보는 강섬유 보강보의 약 0.41~0.46배로 작게 나타났다. 그러나,  $R_{150}$ 에서는 형상비 80인 강섬유 보강보의 잔류강도비가 증가하여 형상비 65인 강섬유 보강보보다 우수한 것으로 평가되었다. 폴리프로필렌 섬유 보강보도  $R_{600}$ 에 비해  $R_{150}$ 의 잔류강도비가 증가하였다. 섬유혼입률 1.0%에 대하여 형상비 80인 강섬유 보강보의  $R_{150}$ 은 약 1.389, 형상비 65인 강섬유 보강보는 약 1.022, 폴리프로필렌 섬유 보강보는 약 0.664로 평가되었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 35mm, 60mm 길이의 강섬유와 화학적인 안정성과 내구성, 경제성 등의 장점으로 우수한 보강 재료로 평가되어지고 있는 폴리프로필렌 섬유에 대해 섬유혼입률 1.0%이하에서의 휨 성능을 실험적으로 비교 평가하였으며, 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 섬유 보강보의 균열이전의 휨 거동은 콘크리트 내에 혼입된 섬유가 콘크리트의 인장균열 성장 억제로 약간의 균열강도 향상은 보였으나, 섬유혼입률에 비례하여 증가하거나 보강 섬유 종류에 따른 차이는 나타나지 않았다. 균열이후구간에서는 콘크리트 인장균열 제어로 하중 저항성능과 처짐 저항성능이 매우 크게 향상되었다. 특히, 강섬유 혼입률인 0.25% 이상, 폴리프로필렌 섬유는 혼입률 0.5% 이상에서 균열강도 도달 후 취성 파괴되는 무보강보의 파괴거동을 개선하는 효과가 나타났다.
- (2) 섬유 보강보의 deflection-softening 거동과 deflection-hardening 거동을 비교 평가하였다. 길이 35mm (형상비 65) 강섬유가 1.0% 혼입된 보강보와 길이 60mm (형상비 80) 강섬유가 0.75% 이상 혼입된 보강보는 deflection-hardening 거동을 하였다. 폴리프로필렌 섬유가 혼입된 보강보는 deflection-softening 거동을 하였지만, 강섬유에 비해 균열 이후 응력감소 현상을 지연시키는 성향이 뛰어난 것으로 판단된다. 0.5%이상의 폴리프로필렌이 혼입된 보강보는 균열이후 최대강도가 균열



강도의 약 60~80%의 강도회복을 보였고, 최대강도 도달처짐은 강섬유 보강보의 약 1.8~3.6배였다.

- (3) 섬유혼입률 증가에 따른 섬유 보강보의 최대강도 증가율은 형상비 80인 강섬유 보강보와 형상비 65인 강섬유 보강보가 거의 동일하게 나타났다. 최대강도값은 무보강보의 최대강도와 비교 시 형상비 80인 강섬유를 1.0% 혼입한 보강보는 약 119%, 형상비 65인 강섬유를 1.0% 혼입한 보강보는 약 90% 증가하였다. 폴리프로필렌 섬유 보강보는 섬유 혼입률 0.5%까지는 뚜렷한 강도 증가를 보이지 않다가, 섬유 혼입률 0.75%에서 최대강도 6.22MPa로 무보강보에 비해 약 61% 증가하였다. 이는 형상비 65, 섬유혼입률 0.75%의 강섬유 보강보의 최대강도 5.44MPa 보다 약 14% 증가된 값이다.
- (4) 섬유에 의해 가장 크게 향상된 콘크리트의 휨 성능은 에너지 흡수 성능으로 형상비 80인 강섬유가 가장 효과있게 작용하였으며, 폴리프로필렌 섬유는 강섬유에 비해 다소 작은 것으로 나타났다. 그러나, 에너지 흡수 성능  $T_{130}$ 은 폴리프로필렌 섬유 보강보와 형상비 65인 강섬유 보강보와 비슷한 에너지 흡수 성능 증가율을 보였다. 무보강보에 비해 형상비 80인 강섬유를 1.0% 혼입한 보강보의 에너지 흡수 성능은 약 173배, 형상비 65인 강섬유를 1.0% 혼입한 보강보는 약 131배, 폴리프로필렌 섬유를 1.0% 혼입한 보강보의 에너지 흡수 성능은 약 95배 증가하였다.
- (5) 폴리프로필렌 보강콘크리트는 강섬유에 비해 강도 및 연성 성능 향상이 다소 감소하였지만, 0.75% 혼입률 이상에서는 충분히 만족할 만한 구조적 휨 성능 향상을 보일 수 있을 것으로 판단된다. 특히, 강섬유의 0.5%, 0.75%가 혼입된 보강 콘크리트의 에너지 흡수 성능은 폴리프로필렌 1% 보강 콘크리트와 거의 비슷한 성능을 발휘하는 것으로 판단된다. 그리고 강섬유 혼입률이 0.25%이하, 폴리프로필렌 섬유 혼입률이 0.5%이하인 보강콘크리트의 경우 휨 성능의 증가가 크지 않아 적용 시 주의가 필요할 것으로 여겨진다.

향후 연구에서는 폴리프로필렌 섬유의 인장강도 증가에 따른 섬유 보강 콘크리트의 휨 실험을 수행하고 본 연구의 폴리프로필렌 섬유 및 강섬유 보강 콘크리트의 강도 및 연성성능 평가 결과와 비교 검토할 필요가 있다.

## 감사의 글

이 논문은 2013년 대구대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되어졌으며, 이에 감사드립니다.

## References

- American Society for Testing and Materials (ASTM) (2007). *Standard test method for flexural performance of fiber reinforced concrete (using beam with third-point loading)*, ASTM C 1609/C 1609M-07, West Conshohocken, Pennsylvania.
- Chiaia, B., Fantilli, A. P. and Vallini, P. (2007). "Evaluation of minimum reinforced ratio in FRC members and application to tunnel linings." *Materials and Structures*, Vol. 40, pp. 593-604.
- Farhat, F. A., Nicolaides, D., Kanellopoulos, A. and Karihaloo, B. L. (2007). "High performance fibre-reinforced cementitious composite (CARDIFRC) - Performance and application to retrofitting." *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 74, pp. 151-167.
- Gopalaratnam, S., Shah, S. P., Batson, G. B., Criswell, M. E., Ramakrishnam, V. and Wecharatana, M. (1991). "Fracture toughness of fiber reinforced concrete." *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 4, pp. 339-353.
- Japanese Society of Civil Engineers (JSCE) (1984). *Method of tests for steel fiber reinforced concrete*, JSCE-SF4 for flexural strength and flexural toughness of SFRC, Concrete Library of JSCE, pp. 45-74.
- Kakooei, S., Akil, H. M., Jamshidi, M. and Rouhi, J. (2012). "The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures." *Construction and Building Materials*, pp. 73-77.
- Kim, D. J., Naaman, A. E. and El-Tawil, S. (2008). "Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites." *Cement & Concrete Composites*, Vol. 30, pp. 917-928.
- Korean Standards Association (KSA) (2010). *Standard test method for making and curing concrete specimens*, KS F 2403, Korea (in Korean).
- Martinola, G., Meda, A., Plizzari, G. A. and Rinaldi, Z. (2010). "Strengthening and repair of RC beams with fiber reinforced concrete." *Cement & Concrete Composites*, Vol. 32, pp. 731-739.
- Meda, A., Minelli, F. and Plizzari, G. A. (2012). "Flexural behaviour of RC beams in fiber reinforced concrete." *Composites: Part B*, Vol. 43, pp. 2930-2937.
- Nurdin, I. I. and Jalan, P. L. (1990). "The prospects of using polypropylene fibers as an additive in high quality concrete." *Fiber Mesh*, pp. 3-16.
- Sorelli, L. G., Meda, A. and Plizzari, G. A. (2006). "Steel fiber concrete slabs on ground: A Structural Matter." *ACI Structural Journal*, Vol. 103, pp. 551-558.
- Soroushian, P. and Bayasi, Z. (1991). "Fiber-type effects on the performance of steel fiber reinforced concrete." *ACI Material Journal*, Vol. 88, No. 2, pp. 129-134.