

## 재활용 플라스틱 섬유보강 콘크리트의 역학적 특성

# The Mechanical Properties of Recycled Plastic Fiber-Reinforced Concrete

양인환<sup>1\*</sup>

In-Hwan Yang<sup>1\*</sup>

(Received September 15, 2014 / Revised September 17, 2014 / Accepted September 18, 2014)

This paper concerns the mechanical properties of recycled plastic fiber-reinforced concrete. It presents experimental research results of recycled fiber-reinforced concrete with fiber volume fractions of 0, 0.5, 1.0, 1.5, and 2%. Experiments were performed to measure mechanical properties such as compressive strength, elastic modulus, tensile strength, and length changes. The results show that both compressive strength and elastic modulus decreased as fiber volume fraction increased. In addition, the experimental results show that recycled fiber-reinforced concrete is in favor of split tensile strength, flexural tensile strength, characteristic regarding crack mouth opening displacement, and length changes. The results of this study can be used to provide realistic information for modeling of mechanical properties in recycled plastic fiber-reinforced concrete in the future.

**키워드** : 재활용 플라스틱, 섬유보강 콘크리트, 압축강도, 인장강도

**Keywords** : Recycled plastic, Fiber-reinforced concrete, Compressive strength, Tensile strength

## 1. 서론

콘크리트는 현재 가장 널리 사용되는 건설재료임에도 불구하고 압축강도에 비해 상대적으로 낮은 인장강도, 균열저항성에 기인하는 낮은 연성과 에너지 흡수능력을 내포하고 있다(Balaguru and Shah, 1992; Li, 2002; Yang et al., 2010). 이에 따라, 콘크리트가 취성적인 재료라는 인식은 여전히 남아 있으며, 콘크리트의 연성과 인성을 증진을 위한 다양한 연구가 진행되어 왔으며, 섬유보강 콘크리트(fiber-reinforced concrete)가 가장 대표적인 연구분야이다(Bayasi and Zeng, 1993; Naaman and Reinhardt, 2006; Yang et al., 2011).

섬유보강 콘크리트는 강(steel), 유리뿐만 아니라 탄소, 나일론, 폴리에틸렌(PE), 폴리프로필렌(PP), PET 등의 다양한 재료의 섬유를 콘크리트에 혼입하여 균열발생시 균열면에 위치한 섬유에 의해 균열 성장을 억제하여 연성과 인성을 개선한 콘크리트이다(Casanova and Rossi, 1999).

한편, 산업의 고도화에 따라 사용이 간편한 다양한 플라스틱의 사용이 급격하게 증가하고 있다. 그러나, 플라스틱은 사용 후 폐기 처리 시 환경오염을 유발할 가능성이 크므로, 자원의 효율적인 재생 또는 재활용 측면에서 폐플라스틱의 다양한 활용 연구가 필요한 실정이다(Meyer, 2009; Siddique et al., 2008). 플라스틱 재질의 산업용품과 생활용품은 사용한 후 펠릿으로 제조하여 플라스틱 원료로 재활용하거나 일부는 폐기된다.

기존 대부분의 섬유보강 콘크리트에 대한 연구는 신재(new materials)의 섬유를 사용하여 콘크리트의 재료 및 구조 특성에 관해 수행되었으나, 최근에 폐플라스틱을 콘크리트용 보강섬유로 활용하는 연구결과가 제시된 바 있다(Fraternali et al., 2011; Kim et al., 2010; Ochi et al., 2007; Olivaresa and Barluengab, 2004). 그러나, 재활용 플라스틱 섬유(recycled plastic fibers)를 활용한 섬유보강 콘크리트의 연구는 미미한 수준이며, 이에 따라 재활용 플라스틱 섬유보강 콘크리트의 성능평가 실험연구자료도 거의 미비한 실정이다.

\* Corresponding author E-mail: [ihyang@kunsan.ac.kr](mailto:ihyang@kunsan.ac.kr)

<sup>1</sup>군산대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk, 573-701, Korea)

재활용 플라스틱 섬유는 폐플라스틱을 재활용하여 만든 섬유로서 폐플라스틱의 건설자원 재활용 측면에서 친환경적이다. 따라서, 이 연구에서는 환경친화적인 측면에서 보강섬유로써 PE 재질의 플라스틱 재활용 섬유를 활용한 섬유보강 콘크리트의 특성을 연구하였다. PE 재질의 폐플라스틱을 재활용하여 가공한 섬유를 콘크리트에 혼입하여 섬유보강콘크리트를 제조하였다. 재활용 섬유보강 콘크리트는 섬유량을 0~2%를 포함하였다. 섬유량에 따른 섬유보강콘크리트의 압축강도, 탄성계수, 인장강도 및 길이변화 특성 등을 파악하였다.

## 2. 재활용 섬유보강 콘크리트 배합

### 2.1 재활용 섬유의 제조

이 연구에서의 재활용 섬유는 PE 재질의 폐플라스틱을 이용하



(a) PE pellets



(b) Recycled fibers

Fig. 1. Recycled plastic fibers

여 섬유를 제조하였다. 폐플라스틱을 선별하여 세척한 후 펠릿 (pellet)을 형성한다. 펠릿을 용융한 후 노즐이 달린 압출기를 이용하여 압출한다. 노즐의 끝단을 원형으로 하여 섬유의 단면을 원형으로 가공하였다. 압출된 섬유를 일정한 길이로 절단하여 콘크리트 보강용 섬유를 생산한다. Fig. 1에 이 연구에서 적용한 재활용 플라스틱 섬유를 나타내었다.

재활용 섬유의 직경은 0.8mm, 길이는 50mm로써 섬유의 길이-직경 비는 5.0이다. 섬유의 비중은 0.84이고 인장강도는 230MPa이다.

### 2.2 재활용 섬유보강 콘크리트 배합 설계

재활용 섬유보강 콘크리트의 단위 체적당 기본 배합표를 Table 1에 나타내었다. 굵은골재의 최대 치수는 25mm이다. 물-시멘트 비( $w/c$ )는 42%이며, 잔골재-굵은골재 비( $S/a$ )는 45.4%이다. 콘크리트의 유동성을 확보하기 위해 고성능 감수제를 사용하였다. 섬유 혼입량은 부피 비 기준으로 0, 0.5, 1.0, 1.5 및 2.0%를 적용하여 성능평가를 수행하였다.

### 2.3 재활용 섬유보강 콘크리트의 제조

재활용 섬유보강 콘크리트의 제조는 시멘트와 골재를 섞는 건비빔 단계, 배합수와 혼화제의 액상재료 투입단계, 1차 믹싱, 섬유 투입단계 및 2차믹싱 단계로 순차적으로 진행하였다.

먼저, 시멘트, 굵은골재 및 잔골재를 섞어 건비빔을 실시한다. 건비빔 후 배합수, 고성능 감수제 등의 액상 재료를 투입한다. 믹서 내부의 재료들이 배합수와 충분히 믹싱되어 재료 유동이 확보되었는지를 확인한다. 1차 믹싱을 완료하고 재활용 섬유를 투입한다. 이때, 재활용 섬유는 한꺼번에 투입하지 않고 소량씩 나누어 투입한다. 재활용 섬유투입 완료 후 2차 믹싱을 실시한다.

## 3. 재활용 섬유보강 콘크리트의 특성실험

### 3.1 압축강도

재활용 섬유보강 콘크리트의 압축강도는 직경 100mm, 높이 200mm의 원주형 공시체의 압축실험을 수행하여 획득하였다. 압축강도 실험시 하중재하는 만능시험기(UTM)를 사용하여 변위제

Table 1. Mix proportion ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

Maximum agg. size	W/C	S/a	Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	SP	Fiber
25 mm	0.42	0.45	172	410	744	898	2.34	0 ~ 2.0%



Fig. 2. Compressive strength test

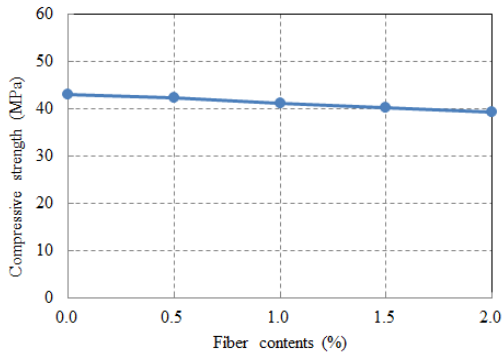


Fig. 3. Compressive strength test result

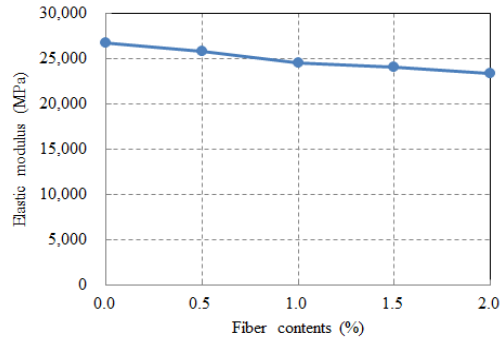
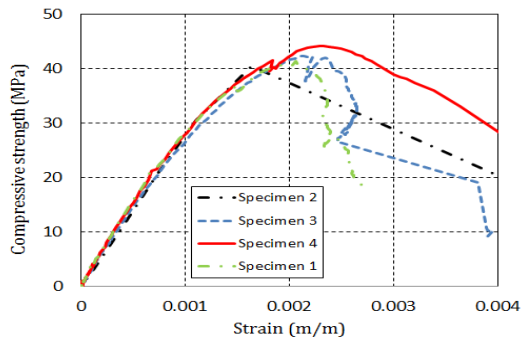
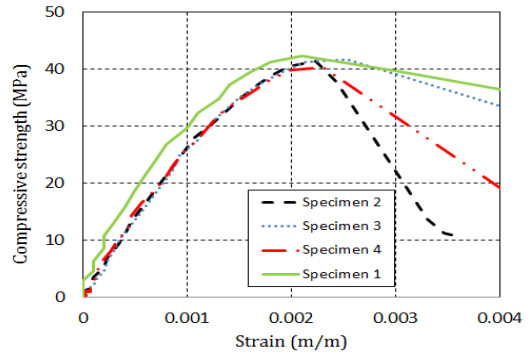


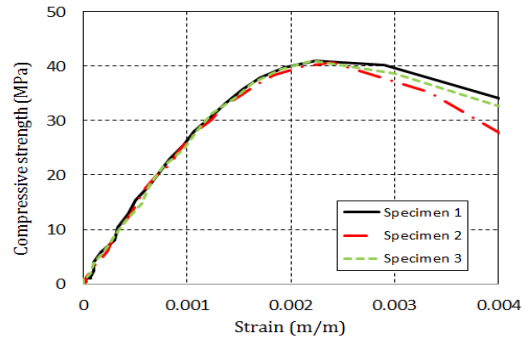
Fig. 4. Elastic modulus test result



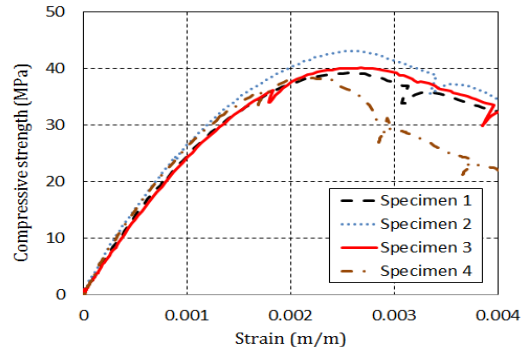
(a) Fiber content = 0%



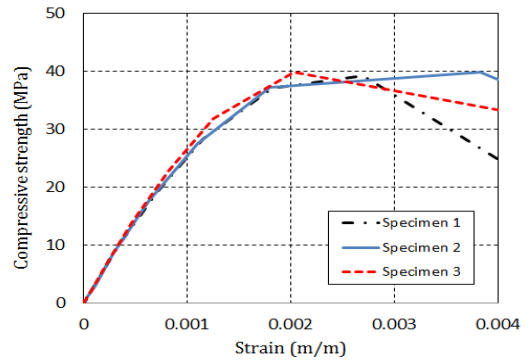
(b) Fiber content = 0.5%



(c) Fiber content = 1.0%



(d) Fiber content = 1.5%



(e) Fiber content = 2.0%

Fig. 5 Compressive stress-strain curves

어방식으로 하중을 재하하였다. 압축시험시에 공시체 원주 둘레로 3개의 LVDT를 설치하여 하중재하시 압축변형을 측정하였다(Fig. 2). 시험시 측정된 하중-변위 관계를 바탕으로 섬유보강 콘크리트의 응력-변형을 관계 곡선을 획득하였으며, 이로부터 압축강도와 탄성계수를 산정하였다.

Fig. 3에 압축강도 측정결과를 정리하여 나타내었으며, Fig. 4에 탄성계수 측정값을 나타내었다. 또한, Fig. 5에 콘크리트의 압축 응력-변형을 곡선을 나타내었다. 일반콘크리트의 경우, 평균 압축 강도는 43.1MPa이며, 재활용 섬유보강콘크리트의 압축강도는 섬유량이 0.5, 1.0, 1.5 및 2.0%로 변함에 따라 각각 42.3, 41.1, 40.2, 및 39.3MPa를 나타내었다. 섬유량이 2%인 섬유보강콘크리트의 압축강도는 일반콘크리트 압축강도(섬유량=0%)보다 8.8% 작게 나타난다. 또한, 탄성계수는 섬유량이 증가함에 따라 감소하고 있다. 섬유량이 2%인 섬유보강콘크리트의 탄성계수는 일반콘크리트 탄성계수(섬유량=0%)보다 12.4% 작게 나타난다.

섬유보강콘크리트의 섬유밀도가 콘크리트 매트릭스의 밀도보다 작으므로 이러한 밀도의 차이가 압축강도와 탄성계수 감소에 영향을 미친 것으로 판단된다.

### 3.2 쪼갠장강도

재활용 섬유보강콘크리트의 인장거동 특성을 파악하기 위하여 쪼갠장강도실험을 수행하였다(Fig. 6). 쪼갠장강도 시편은 100(지름)×200(높이)mm인 원주형 공시체를 이용하였다. 시험은 만능시험기를 사용하여 변위제어방식으로 하중을 재하하였다.

쪼갠장강도는 식 (1)에 의하여 산정하였다.

$$f_{sp} = \frac{2P}{\pi dL} \quad (1)$$

여기서,  $P$  : 시험 하중(N)

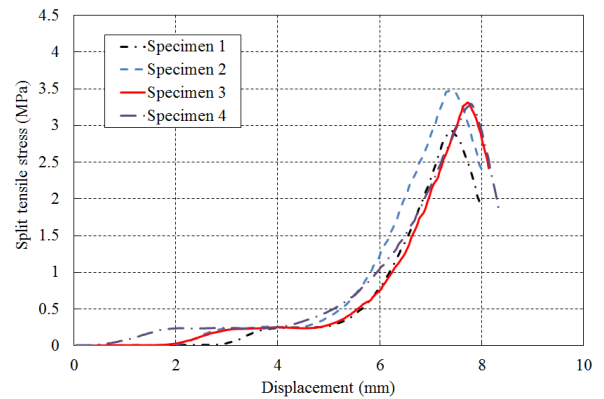
$d$  : 원주형 공시체의 직경(mm)

$L$  : 원주형 공시체의 높이(mm)

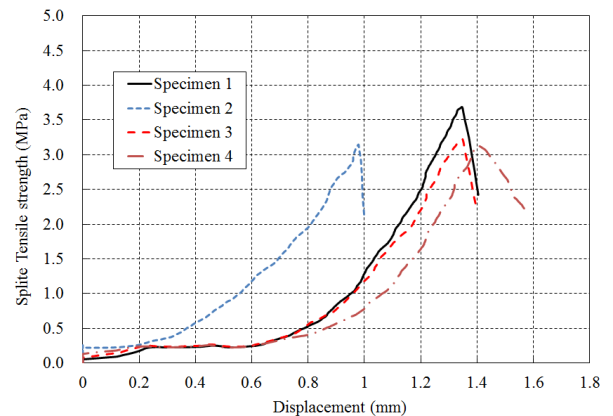
Fig. 7에 대표적으로 섬유량이 1.0과 1.5%인 경우의 재활용 섬유보강 콘크리트의 쪼갠장강도-변위 관계를 나타내었다. 또한, Fig. 8에 쪼갠장강도 측정결과를 정리하여 나타내었다. 일반콘크리트의 경우, 평균 쪼갠장강도 2.62MPa이며, 재활용 섬유보강콘크리트의 쪼갠장강도는 섬유량이 0.0, 0.5, 1.0, 1.5 및 2.0%로 변함에 따라 각각 3.07, 3.26, 3.29 및 3.62MPa를 나타내었다. 재활용 섬유보강콘크리트의 쪼갠장강도는 보통콘크리트의



Fig. 6. Split tensile strength test



(a) Fiber content =1.0%



(b) Fiber content =1.5%

Fig. 7. Split tensile stress-displacement curves

쪼갠장강도보다 17.2~38.2% 크게 나타난다. 섬유보강콘크리트의 쪼갠장강도 증가는 플라스틱섬유가 콘크리트 매트릭스의 취성파괴를 완화시키기 때문이다.

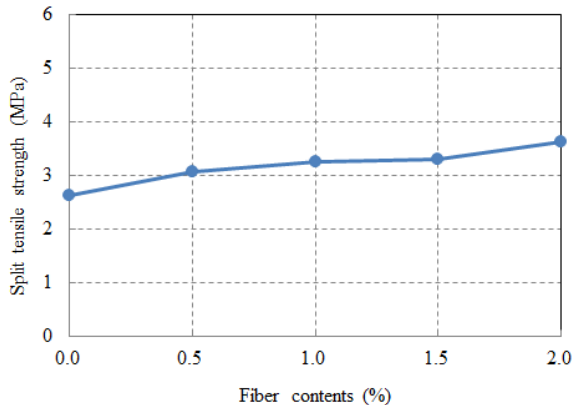


Fig. 8. Split tensile strength result



Fig. 9. Flexural tensile test

### 3.3 힘인장거동 실험

재활용 섬유보강 콘크리트의 인장강도 특성을 파악하기 위하여 150mm(가로) × 150mm(세로) × 550mm(길이)의 프리즘 형상의 시편을 제작하여 4점하중재하 힘인장실험을 수행하였다(Fig. 9). 하중은 만능시험기를 사용하여 변위제어방식으로 하중을 재하하였다. 힘인장강도는 식 (2)를 사용하여 계산하였다.

$$f_{fl} = \frac{3PL}{2b(h_{sp})^2} \quad (2)$$

여기서,  $P$  : 최대 하중

$L$  : 시편 지간길이

$b$  : 시편의 단면폭

$h_{sp}$  : 시편의 단면높이

각 배치에서의 시편의 힘인장강도 측정 평균값을 Fig. 10에 나타내었다. 일반콘크리트의 경우, 평균 힘인장강도 4.29MPa 이며, 재활용 섬유보강콘크리트의 힘인장강도는 섬유량이 0.0, 0.5, 1.0, 1.5 및 2.0%로 변환에 따라 각각 4.67, 4.83, 4.95 및 5.06MPa을 나타내었다.

재활용 섬유보강콘크리트의 힘인장강도는 보통콘크리트의 힘인장강도보다 8.9~17.9% 크게 나타난다. 재활용 섬유보강콘크리트의 힘인장강도 증가는 플라스틱 재활용 섬유가 콘크리트 매트릭스의 인장강도를 증가시키기 때문으로 판단된다.

### 3.4 파괴역학 특성

재활용 섬유보강 콘크리트의 파괴역학 특성을 파악하기 위하여

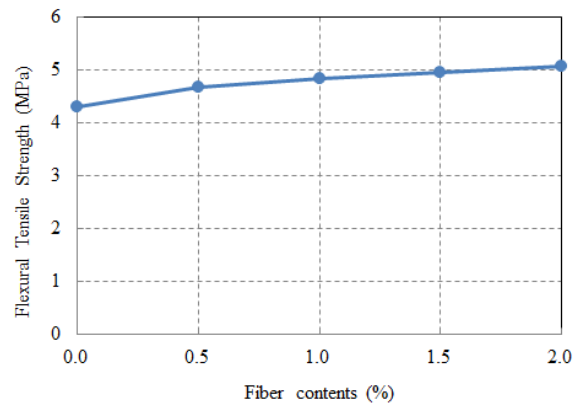


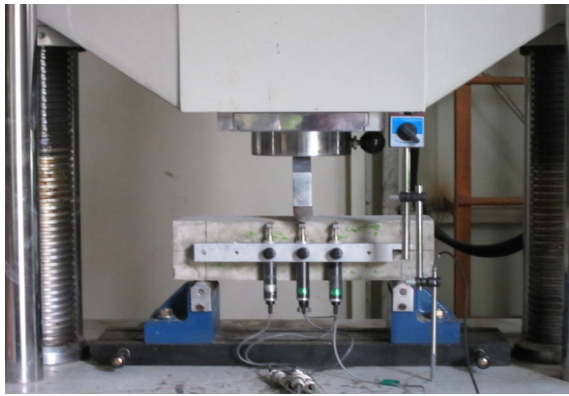
Fig. 10. Flexural tensile test result

Fig. 11과 같이 노치(notch)가 있는 시편을 제작하여 3점 하중재하법에 의해 힘인장시험을 수행하였다. 힘인장시편은 프리즘 형상이며, 크기는 100mm(가로) × 100mm(세로) × 400mm(길이)이다. 프리즘 시편의 콘크리트 타설면을 기준으로 90° 회전한 면의 지간중앙단면에 노치를 내었으며, 노치의 깊이는 10mm이고 폭은 3.4mm이다.

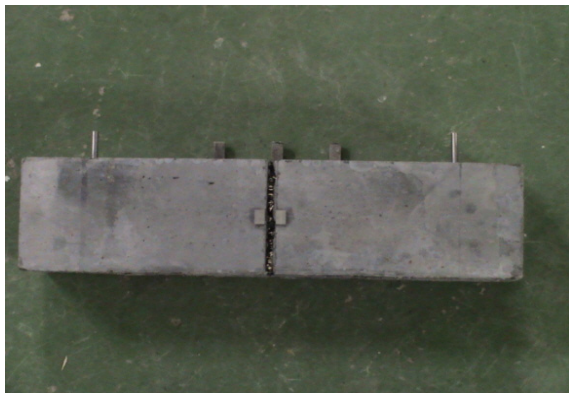
시편 하면의 노치 끝단에 5mm 용량의 균열계이지(clip gauge)를 설치하여 하중에 따른 노치의 균열개구변위(crack mouth opening displacement, CMOD)를 측정하였다.

대표적으로 Fig. 12에 섬유량이 1.0 및 1.5%일 때의 하중-CMOD 변위 관계 측정결과를 각각 나타내었다. 또한, Fig. 13에 균열개구 변위시험 측정결과를 정리하여 나타내었다. 재활용 섬유보강콘크리트의 최대하중은 섬유량이 0.5, 1.0, 1.5 및 2.0%로 변환에 따라 각각 8.74, 10.78, 11.27 및 11.55 kN을 나타내었다.

섬유보강콘크리트의 균열개구변위 실험 시의 최대하중증가량은 23.3~32.2% 정도이다. 섬유보강콘크리트의 최대하중 증가는



(a) Front view of prism specimen with notch



(b) Bottom view of prism specimen with notch

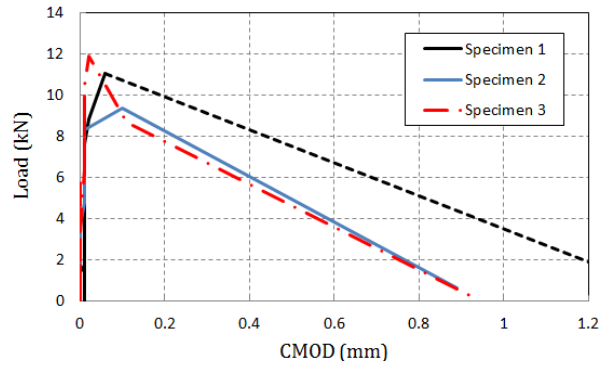
Fig. 11. CMOD test setup

재활용 섬유가 콘크리트 매트릭스의 인장강도를 증가시키기 때문이다.

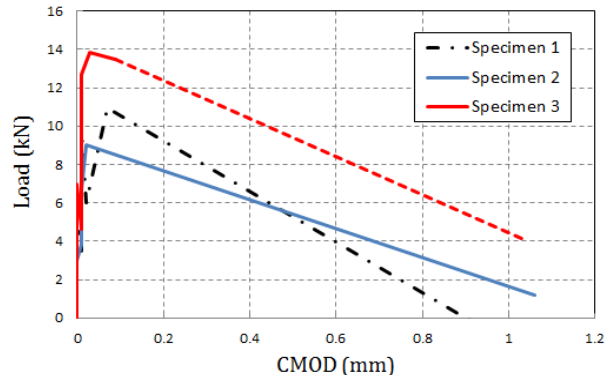
### 3.5 길이변화 특성 실험

재활용 섬유보강 콘크리트의 길이변화특성을 실험을 수행하였다. 프리즘 형상의 콘크리트 시편을 거푸집에서 탈형한 후, Fig. 14(a)와 같이 프리즘 시편의 밑면을 제외한 3개 면에 콘크리트 변형률게이지를 부착하였다. 이후, Fig. 14(b)와 같이 항온항습 조건에서 재활용 섬유보강 콘크리트의 시간에 따른 변형률 변화를 측정하였다.

Fig. 15에 일반콘크리트(섬유량=0%)와 재활용 섬유보강 콘크리트(섬유량 0.5%)의 31일 동안의 길이변화 측정결과를 나타내었다. 일반콘크리트의 변형률 변화량은  $325 \times 10^{-6}$  m/m이고, 섬유보강 콘크리트의 변형률 변화량은  $280 \times 10^{-6}$  m/m로써 재활용 섬유보강 콘크리트의 길이변화량은 일반콘크리트보다 약 14% 작게 나타난다. 이러한 특성은 재활용 섬유보강 콘크리트의 수축특



(a) Fiber content = 1.0%



(b) Fiber content = 1.5%

Fig. 12. Load-CMOD curves

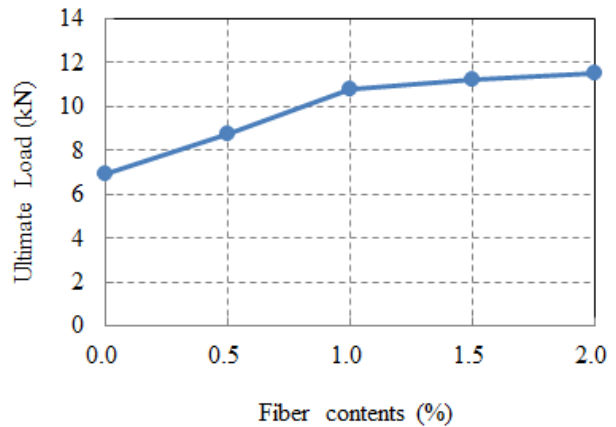


Fig. 13. Maximum load in CMOD test

성이 일반콘크리트의 수축특성보다 우수한 것을 타낸다.

## 4. 결론

이 실험연구에서는 친환경적인 재활용 플라스틱 섬유를 이용한



(a) Installation of concrete strain gauges



(b) Measurement of strain at various days

Fig. 14. Test of length changes

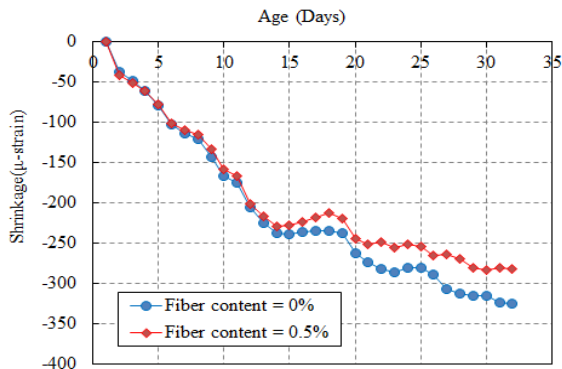


Fig. 15. Length change test results

섬유보강 콘크리트의 재료특성 실험을 수행하였으며, 주요 결론은 다음과 같다.

1. 물-시멘트 비는 0.42, 잔골재-골재 비는 0.45, 섬유 부피 비는 1.0~2.0%를 적용하여 굳은 콘크리트의 재료 특성을 향상시킬 수 있는 재활용 섬유보강 콘크리트의 최적 배합을 도출하였다.

2. 재활용 섬유보강콘크리트의 압축강도는 섬유량이 증가함에 따라 감소한다. 또한, 탄성계수도 섬유량이 증가함에 따라 감소하고 있다. 보강섬유와 콘크리트 매트릭스의 밀도 차이가 압축강도와 탄성계수 감소에 영향을 미친 것으로 판단된다.
3. 재활용 섬유보강콘크리트의 쪼갬인장강도는 보통콘크리트의 쪼갬인장강도보다 17.2~38.2% 크게 나타나며, 이는 재활용 플라스틱 섬유가 콘크리트 매트릭스의 취성파괴를 완화시키기 때문이다.
4. 재활용 섬유보강콘크리트의 휨인장강도는 보통콘크리트의 휨인장강도 보다 섬유량 증가에 따라 8.9~17.9% 증가한다.
5. 재활용 섬유보강콘크리트의 균열개구변위 실험 시의 최대하중증가량은 23.3~32.2%로 나타난다. 섬유보강콘크리트의 최대하중 증가는 재활용 섬유가 콘크리트 매트릭스의 인장강도 증진에 매우 효과적임을 나타낸다.
6. 재활용 섬유보강 콘크리트의 길이변화량은 일반콘크리트보다 14% 작게 나타난다. 이러한 특성은 재활용 섬유보강 콘크리트의 수축특성이 일반콘크리트의 수축특성보다 우수한 것을 나타낸다.

## References

- Balaguru, P.N., Shah, S.P., (1992). Fiber reinforced cement composites, McGraw-Hill, 530 p.
- Batayneh, M., Marie, I., Asi, I. (2007), Use of selected waste materials in concrete mixes, *Waste Management*, **27**, 1870-1876.
- Bayasi, Z., Zeng, J., (1993). Properties of polypropylene fiber reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, **90(6)**, 605-610.
- Casanova, P., Rossi, P. (1999), Analysis of metallic fibre-reinforced concrete beams submitted to bending, *Materials and Structures*, **29(190)**, 354-361.
- Fraternali, F. Ciancia, V., Chechile, R., Rizzano, G., Feo, L., Incarnato, L. (2011). Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete, *Composite Structures*, **93**, 2368-2374.
- Kim, S.B., Yi, N.H., Kim, H.Y., Kim, J.H.J., Song, Y.S. (2010). Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete, *Cement & Concrete Composites*, **32**, 232-240.
- Li, V.C., Fischer, G. (2002), Reinforced ECC - an evolution

- from materials to structures, Proceedings of the 1st fib congress – Concrete Structures in the 21st Century, 105–122.
- Meyer, C. (2009), The greening of the concrete industry, Cement & Concrete Composites, **31**, 601–605.
- Naaman, A.E., Reinhardt, H.W. (2006), Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response, Materials and Structures, **39**, 547–555.
- Ochi, T., Okubo, S., Fukui, K. (2007), Development of recycled PET fiber and its application as concrete–reinforcing fiber, Cement & Concrete Composites, **29**, 448–455.
- Olivaresa, F.H., Barluengab, G. (2004), Fire performance of recycled rubber–filled high–strength concrete, Cement and Concrete Research, **34**, 109–117.
- Siddique, R., Khatib, J., Kaur, I. (2008), Use of recycled plastic in concrete: A review, Waste Management, **28**, 1835–1852.
- Soroushian, P., Plasencia, J., Ravanbakhsh, S., (2003), Assessment of reinforcing effects of recycled plastic and paper in concrete, ACI Materials Journal, **100(3)**, 203–207.
- Yang, I.H., Joh, C, Kim, B.S. (2010), Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending, Engineering Structures, **32(11)**, 3478–3487.
- Yang, I.H., Joh, C.B., Kim, B.S. (2011), Flexural strength of large scale ultra high performance concrete prestressed T–beams, Canadian Journal of Civil Engineers, **38(11)**, 1185–1195.

#### 재활용 플라스틱 섬유보강 콘크리트의 역학적 특성

이 연구에서는 재활용 플라스틱 섬유 (recycled plastic fibers)로 보강된 콘크리트의 역학적 특성을 파악하고자 하였다. 부피비 0, 0.5, 1.0, 1.5 및 2.0%의 섬유비를 갖는 재활용 섬유보강 콘크리트의 역학특성 실험결과를 분석하였다. 섬유보강 콘크리트의 압축강도, 탄성계수, 인장강도와 길이변화 특성 실험을 수행하였다. 실험결과는 섬유비가 증가함에 섬유보강 콘크리트의 압축강도와 탄성계수는 증가하는 것을 나타낸다. 또한, 재활용 섬유보강 콘크리트는 일반콘크리트에 비해 쪼갬인장강도, 휨인장강도, 균열개구변위 및 길이변화에 우수한 특성을 나타낸다. 연구결과는 추후 재활용 플라스틱 섬유보강 콘크리트의 재료 모델을 위한 실제적인 기초실험자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.