



## 폴리프로필렌 섬유보강 EVA 콘크리트의 휨 성능 Flexural Performance of Polypropylene Fiber Reinforced EVA Concrete

성찬용\* · 남기성\*\*,<sup>†</sup>

Sung, Chan Yong · Nam, Ki Sung

### Abstract

This study was performed to evaluate the effective analysis of flexural performance for polypropylene fiber (PF) reinforced EVA concrete that can be used in marine bridge, tunnel and agricultural structures under flexural load. The control design was applied in ready mixed concrete using 10 % fly ash of total binder weight used in batch plant. On the basis of the control mix design, there was designed mix types that contained PF ranged from 0 % to 0.5 % by volume ratio into two mix types of using 0 % and 5.0 % EVA contents of total binder weight. Before evaluating the flexural performance, we tested compressive strength and flexural strength to evaluate whether polypropylene fiber reinforced concrete could be used or not in site. The method of flexural performance evaluation was applied by ASTM C 1609. These results showed the maximum compressive strength and flexural strength was measured at each E5P1 and E5P2. Concrete reinforced with PF exhibited deflection-softening behavior. In the concrete reinforced with 0.4 % PF contents and containing 5.0 % EVA, the flexural performance was the best.

**Keywords:** polypropylene fiber; compressive strength; flexural strength; flexural performance

### 1. 서 론

콘크리트는 압축강도에 비해 낮은 인장강도, 휨강도 및 전단강도와 취성파괴의 특성을 지니고 있어, 이를 개선하기 위해 1960년대 이후 섬유보강 콘크리트에 대한 연구가 관심을 받고 있으며, 강, 폴리프로필렌, 나일론 및 PVA 등과 같은 섬유 보강재의 개발이 이루어지고 있다 (Yang, 2010). 이들 섬유는 콘크리트에 보강함으로서 콘크리트의 인장균열 억제 능력과 인장 에너지 흡수성을 향상시키는 특성을 지니고 있다. Cho et al. (2014)은 섬유보강 콘크리트의 성능에 영향을 미치는 주요인자는 섬유 자체의 성능, 섬유 혼입률, 형상과 형상비 및 콘크리트와의 부착성능 등이 있으며, 이 중 섬유의 종류 및 섬유 혼입률이 섬유보강 콘크리트의 성능과 경제성에 가장 크게 영향을 미치는 인자이고, 모든 조건이 같다면 섬유 혼입률이 낮고, 성능이 우수한 섬유보강 콘크리트가 경제성에 매우 유리하다고 하였다. 한편, 폴리프로필렌 섬유는 강섬유에 비하여 상대적으로 낮은 탄성계수와 강도 등의 단점을

지니고 있으나, 콘크리트 내부의 재료분리를 억제하고 균열 발생 진전을 방지하는 효과가 있으며, 강섬유, 유리섬유 등의 타 보강섬유에 비해 낮은 비중과, 화학적으로 우수한 특성을 지니고 있고, 마모, 충격, 피로 등에 대한 저항성을 증가시키는 것으로 알려져 있다 (Kakoei et al., 2012; Nam and Sung, 2015). 현재 건설현장에서는 폴리프로필렌 섬유가 타 섬유에 비해 경제성이 우수하여, 이를 적용하려는 노력이 증대되고 있다 (Cho et al., 2014; Nam and Sung, 2015).

섬유보강 콘크리트의 연구는 강섬유를 보강한 연구가 주를 이루고 있으며, 특히, 휨거동 연구는 KS F 2566 개정 이전에 강섬유보강 콘크리트나 콘크리트가 주로 이루어져, 그 외 섬유에 대한 연구와 현장적용 실적은 미미하였다 (Ku et al., 2014; Park et al., 2005). 최근에는 KS F 2566의 개정으로 강 섬유 외의 다른 섬유에 대한 휨거동 특성을 평가할 수 있게 되어 경제성이 우수한 폴리프로필렌 섬유에 대한 연구가 증가하고 있을 뿐만 아니라, 건설현장에서 사용이 늘어날 것으로 예상된다 (Lee et al., 2010).

구조물의 기능성 유지 및 내구성 증가를 위해 폴리머의 일종인 재유화형 분말수지인 EVA (ethylene vinyl acetate)에 대한 많은 연구가 진행되고 있다 (Kim and Sung, 2007; Sung and Nam, 2014; Nam and Sung, 2015). 재유화형 분말수지인 EVA는 굳지 않는 상태에서 분산과 볼베어링 효과가 있으며, 응결과정에서 폴리머 입자의 응집에 따른 접착성이 발생하여 굳은 후 폴리머 필름이 형성되어 콘크리트의 강도와 내

\* Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungnam National University

\*\* Dohwa Engineering Co., Ltd

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-42-821-5798 Fax: +82-42-821-8877

E-mail: nk1314@hanmail.net

Received: February 16, 2016

Revised: March 21, 2016

Accepted: March 23, 2016

구성이 증가하는 특성을 지니고 있는 것으로 알려져 있다 (Afridi et al., 1995; Kim and Sung, 2007; Sung and Nam, 2014).

따라서, 본 연구는 교량, 도로포장, 터널 및 농업수리구조물과 같은 휨적 특성이 고려되는 구조물에 적용하기 위해 설계 압축강도 21 MPa에 해당되는 EVA와 폴리프로필렌 섬유를 혼입한 폴리프로필렌 섬유보강 EVA 콘크리트를 개발하였으며, 압축강도, 휨강도를 고찰하여 적정성여부를 평가한 후, 휨 특성을 ASTM C 1609에 준하여 구해진 휨 하중-처짐곡선을 통해 휨 성능을 평가함으로써, EVA와 폴리프로필렌 섬유 혼입이 콘크리트의 휨 특성에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 사용재료

#### 가. 시멘트

시멘트는 국내 S사 제품인 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 그 물리적 성질과 화학성분은 Table 1과 같다.

#### 나. 골재

굵은골재는 대전지역의 석산에서 파쇄된 쇄석을, 잔골재는 금강유역에서 채취한 천연모래를 사용하였으며, 이에 따

른 물리적 성질은 Table 2와 같다.

#### 다. EVA

재유화형 분말수지인 EVA는 시멘트 혼화용 폴리머의 일정으로 안정제 등을 첨가하여 액상수지 에멀전을 스프레이 건조한 분산물질로, 물에 쉽게 재분산되는 EVA (ethylene vinyl acetate)계 공중합 폴리머 분말인 독일 W사의 제품으로 이에 대한 물리적 성질은 Table 3과 같다.

#### 라. 플라이 애시

입경이 0.15 mm이하인 플라이 애시 (KS L 5405)를 사용하였으며, 그 물리적 성질과 화학성분은 Table 4와 같다.

#### 마. 폴리프로필렌섬유

폴리프로필렌섬유는 고 결정상 필름상 물질로 가공된 화학적 불활성 탄화수소 중합체로, 압축과정에서 미세 섬유화하는 방법에 의해 생산된 mono-filament 섬유로 길이 19 mm, 비중 0.91, 인장강도 450 MPa 및 탄성계수  $5 \times 10^3$  MPa인 국내 S사 제품을 사용하였다.

#### 바. 혼화제

혼화제는 고성능 AE 감수제와 분말소포제를 사용하였으며, 그 일반적 성질은 Table 5, 6과 같다.

Table 1 Physical properties and chemical compositions of normal portland cement

Physical properties						Chemical compositions (wt. %)					
Specific gravity	Setting time (hr-mm)		Compressive strength (MPa)			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Others
	Initial	Final	3days	7days	28days						
3.15	5-7	7-20	19	22	32	20.12	5.02	3.43	3.02	62.00	6.41

Table 2 Physical properties of aggregates

Item	Size (mm)	Specific gravity (20 °C)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	Fineness modulus	Absorption ratio (%)
Crushed coarse aggregate	5~20	2.61	1,435	6.92	2.80
Natural fine aggregate	< 4.75	2.52	1,478	2.34	2.24

Table 3 Physical properties of EVA redispersible polymer powder

Series of polymer	Solid content	Specific gravity	Ash content	Apparent density	Stabilizing system	Particle size
EVA	99±1 %	1.1	11±2 %	540±50 g/L	Poly vinyl alcohol	400 μm

Table 4 Physical properties and chemical compositions of fly ash

Physical properties			Chemical compositions (wt. %)				
Specific gravity (20 °C)	Specific surface (cm <sup>2</sup> /g)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Others
2.39	3,880	2,270	53.14	33.91	5.81	2.54	4.60

## 2. 공시체 제작 및 양생

### 가. 콘크리트 배합

배합설계는 플라이 애시 10 %를 혼입한 레미콘 배합을 기준으로 슬럼프 12±2.5 cm, 공기량 4.5±1.5 %, 재령 28일의 설계기준강도 21 MPa 이상이 되도록 예비실험을 통해 기준배합 (E0P0)을 결정하였다. 기준배합의 조건을 만족하는 범위에서 EVA와 PP섬유를 콘크리트에 혼입함으로써 발생하는 역학적 특성 효과를 알아보기 위해, EVA 혼입률을 결합재 중량의 0 % (series 1)와 5.0 % (series 2)으로 하였고, EVA 혼입률에 따른 PP섬유 혼입률은 각각 0 %, 0.1 %, 0.2 %, 0.3 %, 0.4 %, 0.5 %로 하였다. 한편, 유동성 향상 및 W/B감소를 위하여 고성능 AE 감수제를 결합재 중량의 0.8 %를 사용하였고, EVA 사용에 따른 불필요한 공기의 발생을 방지하기 위해 분말소포제를 EVA량의 0.5 %를 사용하였으며, 이에 대한 배합설계는 Table 7과 같다.

### 나. 공시체 제작 및 양생

압축강도 공시체는 KS F 2405에 준하여  $\Phi 100 \times 200$  mm인 공시체를 제작하였고, 휨강도 공시체는 KS F 2408에 준하여 60×60×240 mm인 공시체를 제작하였으며, 휨 성능 공시체는 ASTM C 1609에 준하여 100×100×400 mm 공시체를 제작하였다. 공시체 제작 후 시험실내에서 양생포로 덮은 다음 24시간 이후 탈형하였으며, 양생방법으로는 초기 3일까지 수중양생을 하고, 3일 이후 소정의 재령까지 20±3 °C, 습도 60 %에서 기건양생을 실시하였다.

## 3. 시험방법

### 가. 압축강도

압축강도시험은 현장 적용성을 위해 재령 28일 설계기준 강도 이상의 강도가 발현되는지 여부를 확인하기 위해  $\Phi 100 \times 200$  mm인 공시체를 KS F 2405 (콘크리트의 압축강도 시험

Table 5 General properties of superplasticizer

Specific gravity (20 °C)	pH	Freezing point (°C)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	Principal ingredient	Color	Usage (%)
1.2	9±1	-2	1,190	Sodium salt of sulfonate naphthalene	Dark brown liquid	0.8 % of binder

Table 6 General properties of deforming agent

Composition	Ash content (%)	Apparent density (g/l)	Color	Usage (%)
Hydrocarbons and polyglycols	33	340	White	0.5 % of EVA

Table 7 Mix designs of PP fiber reinforced EVA concrete

Mix type	EVA (%)	PF (Vol.%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )								W/B (%)
			Binder			Water	Sand	Gravel	AE+SP	DA	
			C	FA	EVA						
Series 1	E0P0 (Control)	-	306	34	-	171	841	901	2.73	-	50.2
	E0P1	0.1				172	839	899			50.6
	E0P2	0.2				174	836	896			51.2
	E0P3	0.3				177	831	891			52.1
	E0P4	0.4				181	826	885			53.2
	E0P5	0.5				187	818	876			55.0
Series 2	E5P0	-	290	34	16	165	836	895	2.73	0.75	48.5
	E5P1	0.1				166	835	894			48.8
	E5P2	0.2				168	832	892			49.4
	E5P3	0.3				171	827	886			50.2
	E5P4	0.4				176	821	879			51.8
	E5P5	0.5				181	814	872			53.2

\* EP: PP fiber reinforced EVA concrete, \* EVA: ethylene vinyl acetate of redispersible polymer powder, \* PF: PP fiber, \* C: cement, \* FA: fly ash, \* AE: air entraining agent, \* SP: superplasticizer, \* DA: deforming agent, \* W/B: water/(C+FA+EVA)

방법)에 준하여 재령 7일, 28일에 측정하였다.

나. 휨강도

휨강도시험은 휨성능 시험 및 평가 전에 휨강도 발현에 대한 특성을 확인하기 위해 60×60×240 mm인 공시체를 KS F 2408 (콘크리트의 휨강도 시험방법)에 준하여 재령 7일, 28일에 측정하였다.

다. 휨 성능

휨 성능 시험은 ASTM C 1609 (standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete using beam with third-point loading)에 준하여 재령 28일에 시행하였으며, 100×100×400 mm 공시체의 하중과 중앙점 처짐량을 측정하기 위해 만능시험기 (UTM) 및 일본 S사 제품의 용량 25 ton의 B-Type, Auto-Graph를 이용하였다. 하중-처짐 곡선을 측정하기 위하여 공시체 중앙부에 변위계 (LVDT)가 장착된 측정 프레임을 설치하여 변위를 측정하였고, 실제 변위를 정확하게 구하기 위해 공시체 좌우에 2개의 LVDT로 상대 변위를 측정하였으며, 이들 변위를 통하여 하중-처짐 곡선을 구하였다.

라. 휨 성능 평가

ASTM C 1609는 기존 ASTM C 1018의 초기균열에 따른 휨인성을 평가했던 방법에서 잔류하중 및 휨강도를 중요시 하면서 2007년도 새로 만들어졌다. 이 방법은 Fig. 1과 같이 최대하중과 처짐  $L_c/150$  및  $L_c/600$ 에 해당되는 잔류하중을 식 (1)에 의해 구한 휨강도를 최대휨강도 및 잔류강도를 측정하고, 처짐  $L_c/150$ 에 해당하는 하중-처짐의 면적 (빗금친 부분)을 휨 인성지수를 구하여 휨 성능을 평가하는 방법이며, 2014년도에 KS F 2566 (섬유보강 콘크리트 휨 성능 시험방

법)의 기준이 되었다 (Cho et al., 2014). 한편, 본 연구에서는 최대휨강도와 휨 인성지수를 구하여 휨 성능을 평가하였다.

$$f = \frac{P_p L_c}{bd^2} \tag{1}$$

여기서,  $f$  = 휨강도,  $P_p$  = 측정된 최대 하중,

$L_c$  = 지간 (mm),  $b$  = 파괴단면 폭 (100 mm),

$d$  = 파괴단면 높이 (100 mm)

III. 결과 및 고찰

1. 압축강도

Fig. 2에서 보는 바와 같이, 재령 7일 및 28일 압축강도는 series 1의 경우 각각 17.5~19.1 MPa 및 21.1~23.5 MPa, series 2의 경우 각각 18.8~20.7 MPa 및 22.5~25.3 MPa로 나타나, 모든 배합이 재령 28일 설계기준강도 21 MPa 이상을 만족하였으며, EVA 혼입률에 상관없이 PP섬유 혼입률 0.1%에서 압축강도가 가장 큰 값을 나타내는 경향을 보였다. 또한, 같은 양의 PP섬유 혼입률일 경우, series 2가 series 1에 비해 상대적으로 압축강도가 크게 나타나는 경향을 보였다. 한편, 재령 7일 및 28일의 최대압축강도는 EVA 5.0%와 PP섬유 혼입률 0.1%인 E5P1에서 20.7 MPa 및 25.3 MPa로 가장 크게 나타났으며, E0P0의 재령 7일 및 28일의 압축강도 18.9 MPa 및 23.3 MPa에 비해 각각 9.5%와 8.6% 크게 나타났다. 이러한 결과는 EVA의 우수한 분산성과 구형의 입자에 의해 볼베어링 효과로 W/B가 감소하고, 폴리필름 형성으로 콘크리트 내부조직이 치밀해져 압축강도가 증가되나, PP섬유 혼입함으로써 W/B가 상승하고, 콘크리트 내의 공극이 증가하여 폴리머 시멘트 매트릭스와 섬유간의 접착력 저하로 이루어

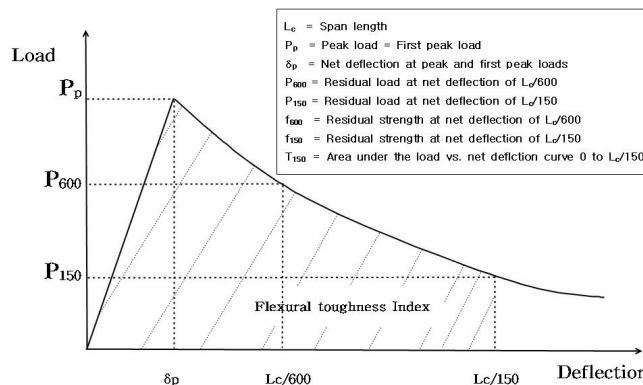


Fig. 1 Evaluation of flexural strength and flexural toughness according to ASTM C 1609

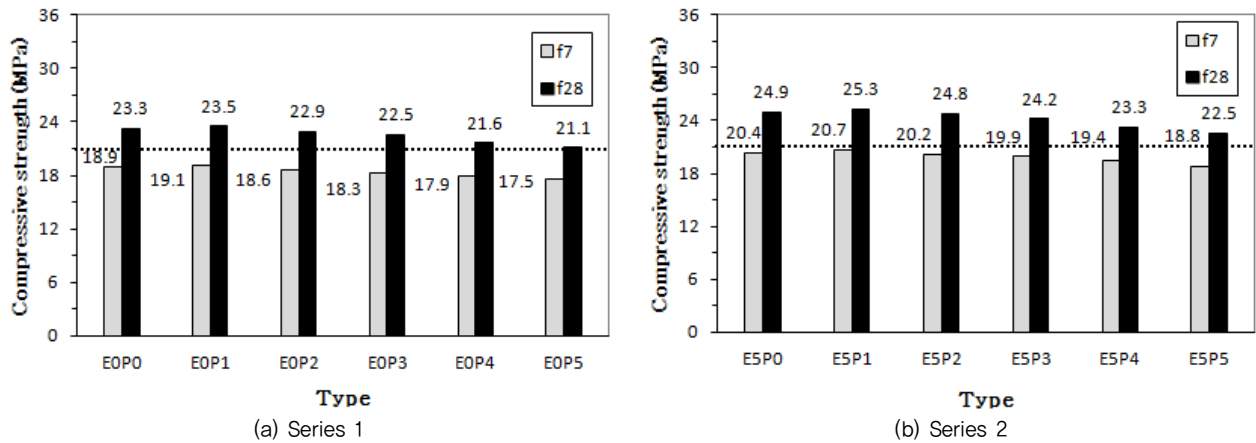


Fig. 2 Compressive strength of each series

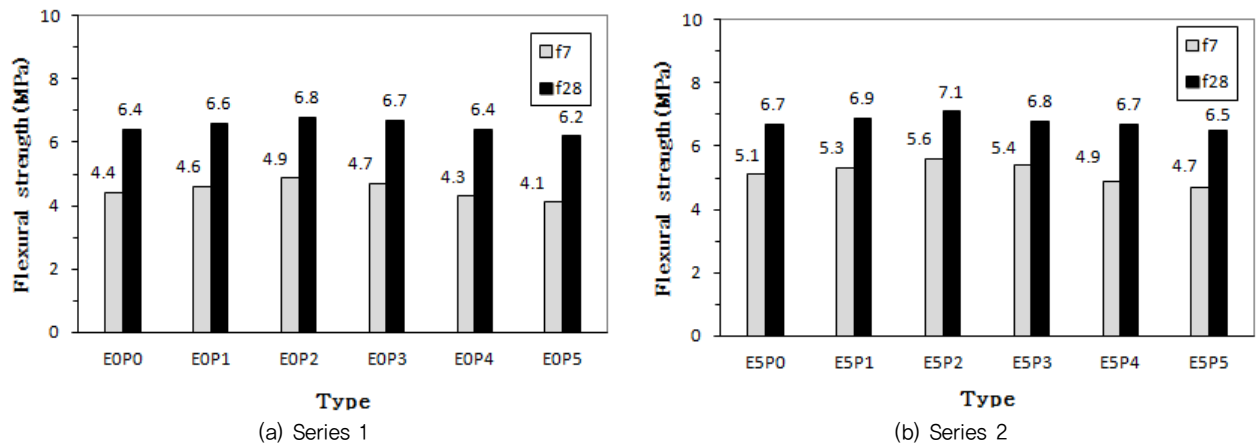


Fig. 3 Flexural strength of each series

어저 압축강도가 감소 된다는 기존 연구결과와 유사하였다 (Kwon et al., 2013; Nam and Sung, 2015; Noh and Sung, 2007; Silva et al., 2002; Silva and Monteiro, 2005).

## 2. 휨강도

폴리프로필렌 섬유보강 콘크리트의 재령별 휨강도 시험 결과는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 재령 7일 및 28일의 휨강도는 series 1의 경우 4.4~4.6 MPa와 6.2~6.8 MPa, series 2의 경우 4.7~5.6 MPa와 6.5~7.1 MPa로 나타났으며, EVA 혼입률과 상관없이 PP섬유 혼입률 0.2%에서 휨강도가 최대값을 나타낸 후, 혼입률 0.3% 이후에는 감소하는 경향을 보였다. 한편, 같은 양의 PP섬유 혼입률일 경우, series 2가 series 1에 비해 상대적으로 휨강도가 크게 나타나는 경향을 보였다.

최대휨강도는 EVA 5.0%와 PP섬유 혼입률 0.2%인 E5P2에서 재령 7일 5.6 MPa와 재령 28일 7.1 MPa로 가장 크게 나타났고, control의 재령 7일 4.4 MPa와 재령 28일 6.4 MPa에

비해 각각 27.3%와 10.9% 크게 나타났다. 이는 기존의 연구 결과에서 EVA를 일정량 혼입 시, 폴리머 필름 생성에 따른 탄성적 성질 및 시멘트 매트릭스간의 부착력 증대로 휨강도가 증가할 뿐만 아니라 PP섬유의 가교작용에 의해 강도가 증가된 것이며, 기존 강섬유 보강 EVA 콘크리트에 의한 휨강도 증가의 결과와 유사한 것으로 판단된다. 한편, series 1과 series 2가 공통적으로 PP섬유 혼입률 0.3% 이후 PP섬유 혼입률이 증가할수록 휨강도가 감소한 것은 PP섬유 혼입률 증가에 따른 W/B증가로 콘크리트의 강도저하가 이루어진 것이며, EVA와 섬유를 적정량 혼입할 경우, 휨강도가 증진되어 진다는 연구결과와 유사하였다 (Nam and Sung, 2015; Sung and Nam, 2014).

## 3. 휨 성능

### 가. 휨 거동

Fig. 4는 series 1과 series 2의 휨 하중-처짐 곡선을 보여주

고 있으며, 모든 배합에서 초기균열하중과 최대하중이 동일하였고, 균열발생 시 각 배합별 휨 하중은 휨강도의 발현과 유사한 경향을 나타내었다. 또한, PP섬유 무보강 배합을 제외한 모든 배합에서는 균열이 발생한 후에도 잔류하중이 발생하는 연성거동의 형태를 나타내었으며, 균열발생 이후, 최대하중은 균열하중보다 낮은 deflection-softening 거동을 하였고, PP섬유보강 콘크리트의 기존의 연구결과와 유사하였다(Cho et al., 2014; Lee et al., 2006).

또한, EVA 혼입여부와 상관없이 PP섬유를 혼입하지 않은 EOP0와 E5P0는 균열하중이 발생하는 순간 파괴가 되는 경향을 보였으며, PP섬유 혼입률 0.1%, 0.2% 및 0.3%를 혼입한 EOP1, EOP2, EOP3, E5P1, E5P2, E5P3은 초기균열이 발생한 후 급격하게 하중감소가 발생하였고, 일정구간 잔류하중을 유지한 후 PP섬유 혼입률 0.1%는 처짐 1.2 mm 부근에서, 0.2%는 2.2~2.4 mm에서, 0.3%는 3.0 mm 이상에서 파괴되는 경향을 보였다. PP섬유 혼입률 0.4% 이상인 EOP4, EOP5, E5P4, E5P5는 처짐이 증가할수록 잔류하중이 감소하다가 증가한 후 다시 감소하는 곡선의 형태를 보였으며, 처짐 3.0 mm 이상에서 파괴되는 경향을 보였다. 한편, 같은 PP섬유 혼입에 대한 균열발생구간부터 최종파괴 이전까지의 잔류하중 및 처짐은 series 2가 series 1에 비해 다소 높은 값을 나타내는 경향을 보였다. 균열하중은 series 1에서 5.3~16.9 KN, series 2에서 16.4~17.4 KN 범위로 측정되었으며, 같은 PP섬유 혼입률에 대하여 EVA를 혼입한 series 2의 균열하중이 series 1에 비해 다소 증가하는 경향을 보였다. 균열발생 시 처짐은 series 1의 경우, PP섬유를 무보강한 EOP0에서 0.032 mm, PP섬유를 보강한 EOP1~EOP5에서는 0.034~0.038 mm 범위로 측정되었

고, series 2의 경우, PP섬유 무보강한 E5P0에서 0.033 mm, PP섬유를 보강한 E5P1~E5P5에서 0.035~0.038 mm로 균열 시 처짐은 series 1과 series 2의 차이가 거의 없는 경향을 나타내었다.

이와 같이 휨 하중-처짐곡선을 분석한 결과, series 1과 series 2는 전반적으로 PP섬유 혼입률 0.4% 이상 시 휨 거동의 개선효과가 증가 되었으나, series 2가 series 1에 비해 균열 발생 이후 잔류하중 및 처짐이 증가하여 EVA가 휨 성능 개선에 다소 효과적인 것으로 나타났다. 이는 PP섬유의 인장균열 성장을 억제 및 처짐 발생 지연효과와 더불어 EVA에 의해 생성된 폴리머 필름에 의한 탄성적 성질에 의해 휨 성능이 개선된 것으로 판단된다(Cho et al., 2014; Nam and Sung, 2015; Sung and Nam, 2014).

나. 휨 성능 평가

Fig. 5는 Fig. 4의 휨 하중-처짐곡선에서 각 배합의 최대 휨 하중을 식 (1)로 구한 휨강도로써 series 1은 4.6~5.0 MPa, series 2는 4.9~5.3 MPa로 나타났으며, PP섬유 0.2%에서 최대값이 나타났고, EVA를 혼입한 series 2가 series 1보다 휨강도가 크게 나타났다. 특히, Series 2의 E5P2에서 5.3 MPa로 control의 4.7 MPa에 비해 약 12.8%가 크게 나타났는데, 이는 KS F 2408에 의해 구한 휨강도의 경향과 유사하였으나, 휨강도 발현은 작게 나타났다.

Fig. 6은 Fig. 4의 휨 하중-처짐 곡선에서 일정구간 처짐(지간/150, 2 mm)까지 휨 하중-처짐의 면적을 구한 휨 인성 지수로 PP 섬유 무보강 및 PP섬유 혼입률 0.1%에서는 처짐 2 mm 이내에서 파괴되어 휨 인성지수가 나타나지 않았다.

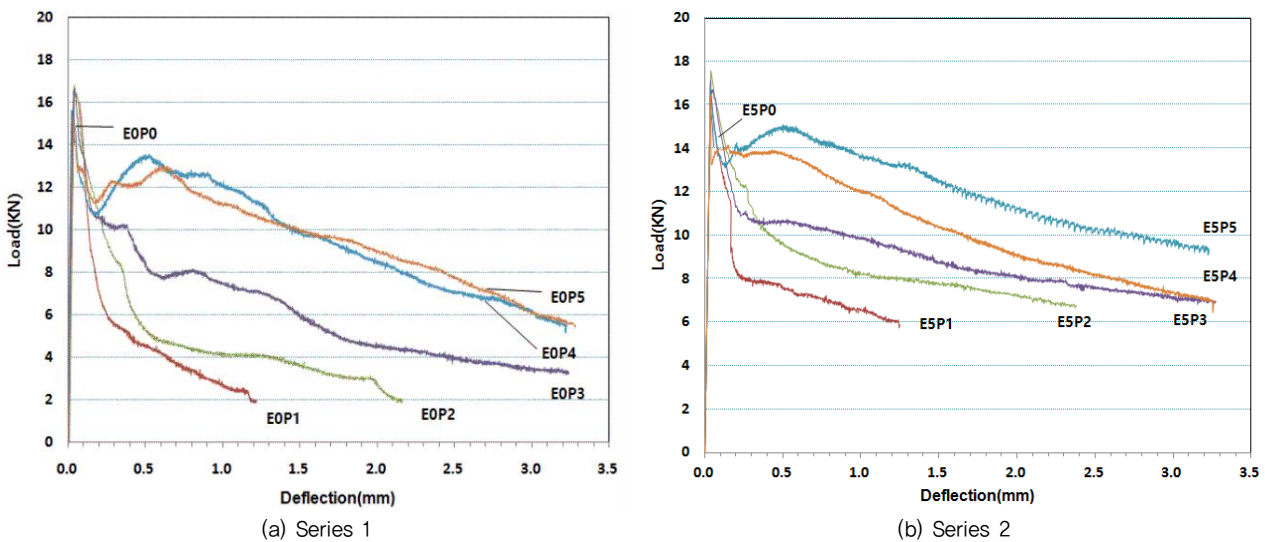


Fig. 4 Load-Deflection of each series with PP fiber contents



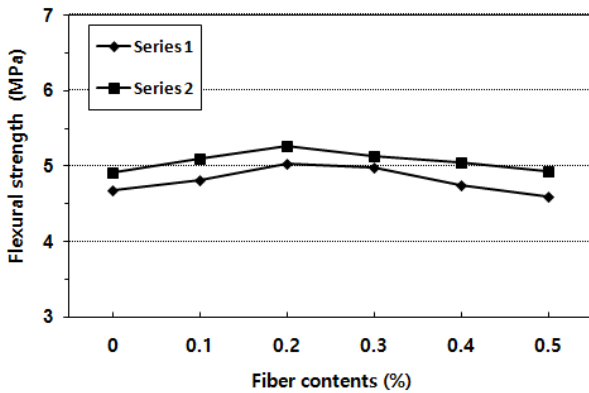


Fig. 5 Flexural strength with PP fiber contents according to ASTM C 1609

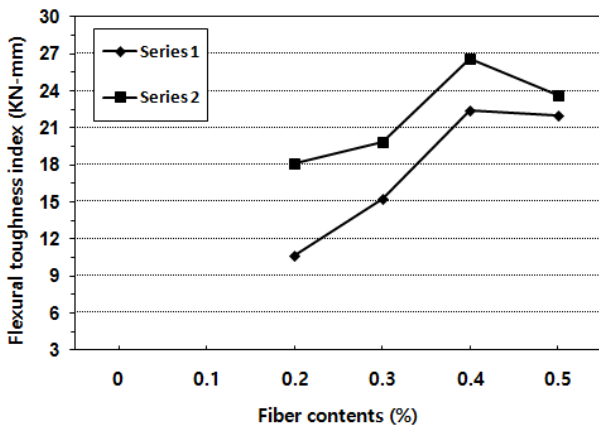


Fig. 6 Flexural toughness index with PP fiber contents according to ASTM C 1609

PP섬유 혼입률 0.2 % 이상에서의 휨인성지수는 series 1은 10.63~22.43 KN·mm, series 2는 18.16~26.17 KN·mm로 나타났으며, PP섬유 0.4 %에서 최대치가 나타난 후 감소하였다. 특히, series 2의 EVA 5.0 %와 PP섬유 0.4 %인 E5P4에서 26.17 kN·mm로 휨 인성지수가 가장 크게 나타나 휨성능이 가장 우수하였다.

#### IV. 결 론

본 연구는 레미콘 배합을 근거로 재령 28일 압축강도 21 MPa 이상, Slump 12±2.5 cm, 공기량 4.5±1.5 %에 적합한 배합을 설정하였고, 현장 사용성을 위해, 이에 적합한 EVA 혼입 유무에 따른 PP 섬유 혼입률을 변화시켜 휨 성능을 ASTM C 1609로 평가하였으며, 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 압축강도는 모든 배합에서 재령 28일에 21 MPa 이상을 만

족하였고, 동일한 PP섬유 혼입률에서 EVA를 혼입한 series 2가 EVA를 혼입하지 않은 series 1에 비해 상대적으로 크게 나타났으며, EVA를 혼입한 PP섬유 혼입률 0.1 %인 E5P1에서 최대값을 나타내었다.

2. 휨강도는 series 1과 series 2에서 PP섬유 혼입률 0.2 %에서 각각 최대로 나타났고, 동일한 PP섬유 혼입률에서는 series 2가 series 1에 비해 상대적으로 크게 나타났으며, EVA를 혼입한 PP섬유 혼입률 0.2 %인 E5P2에서 최대값을 나타내었다.
3. 휨 하중-처짐 곡선에서 균열 시 발생하는 하중은 휨강도의 경향과 비슷하게 나타났으며, PP섬유 혼입하지 않은 배합을 제외한 모든 배합에서 균열 후 잔류하중이 최대하중에 비해 작은 deflection-softening 거동을 하였다. 또한, PP 섬유 혼입률 0.3 % 이상 시 처짐 3.0 mm 이상에서 파괴가 이루어졌으며, 혼입률 0.4 % 이상에서는 잔류하중이 다소 증가한 후 감소하는 경향을 보였다.
4. ASTM C 1609에서 평가한 휨강도는 KS F 2408에 준하여 구한 휨강도 경향과 유사한 경향을 보였으며, 휨 인성지수는 EVA 혼입률과 상관없이 PP섬유 혼입률 0.2 %에서 나타나기 시작하여, PP섬유 혼입률 0.4 %에서 최대로 나타났다. 또한, 동일한 PP섬유 혼입률에서는 series 2가 series 1에 비해 상대적으로 크게 나타났다.
5. 압축강도 및 휨강도 발현 상태와 휨성능 등 전반적인 시험 결과를 고려할 경우, EVA 5.0 % 혼입한 PP섬유 0.4 %인 E5P4가 가장 실용성이 있는 배합이라 판단된다.

#### 사 사

본 논문은 2015년도 CNU 학술연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### REFERENCES

1. Afridi, M. U. K., Y. Ohama, M. Z. Iqbal, and K. Demura, 1995. Water retention and adhesion of powdered and aqueous polymer-modified mortars, *Cement & Concrete Composities* 17(2): 113-118.
2. Cho, B. S., J. H. Lee, and S. Y. Back, 2014. Comparative study on the flexural performance of concrete reinforced with polypropylene and steel fibers, *Journal of the Korea Society of Civil Engineers* 34(6): 1677-1685 (in Korea).
3. Kakoei, S., H. M. Akil, M. Jamshidi, and J. Rouhi, 2012. The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced

- concrete structures, *Construction and Building Materials* 27(1): 73-77.
4. Kim, Y. I., and C. Y. Sung, 2007. Strength and watertightness properties of EVA modified high strength concrete. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 49(1): 45-54 (in Korean).
  5. Ku, D. O., S. D. Kim, H. S. Kim, and K. K. Choi, 2014. Flexural performance characteristics of amorphous steel fiber-reinforced concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute* 26(4): 483-489 (in Korea).
  6. Kwon, M. H., H. S. Seo, J. H. Lim, and J. S. Kim, 2013. The properties of durability and strength of fiber-reinforced polymer-modified mortars using eco-friendly UM resin, *Journal of the Korea Concrete Institute* 25(3): 313-320 (in Korean).
  7. Lee, C. H., J. H. Lee, and Y. S. Yoon, 2006. Optimized mix proportioning of steel and hybrid reinforced concrete using harmony search algorithm, *Journal of the Korea Concrete Institute* 18(2): 151-159 (in Korea).
  8. Lee, S. Y., Y. J. Park, S. M. Kim, K. H. You, S. I. Jang, and Y. H. Suh, 2010. A study on the performance evaluation of polypropylene fiber reinforced concrete, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics* 20(5): 378-389 (in Korea).
  9. Nam, K. S., and C. Y. Sung, 2015. The compressive strength and durability properties of polypropylene fiber reinforced EVA concrete, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(4): 11-19 (in Korean).
  10. Noh, K. H., and C. Y. Sung, 2004. Mechanical and drying shrinkage properties of polypropylene fiber reinforced high flow concrete, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 46(5): 79-85 (in Korean).
  11. Park, C. K., M. H. Noh, and T. H. Park, 2005. Flexural and workable properties of high performance hybrid fiber reinforced concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute* 17(4): 543-550 (in Korea).
  12. Silva, D. A., H. R. Roman, and P. J. P. Gleize, 2002. Evidences of chemical interaction between EVA and hydrating portland cement, *Cement and Concrete Research* 32: 1383-1390.
  13. Silva, D. A., and P. J. M. Monteiro, 2005. ESEM analysis of polymeric film in EVA-modified cement paste, *Cement and Concrete Research* 35: 2047-2050.
  14. Sung, C. Y., and K. S. Nam, 2014. Mechanical properties and durability of abrasion of EVA concrete reinforced steel fiber, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(5): 45-54 (in Korean).
  15. Yang, K. H., 2010. Slump and mechanical properties of hybrid steel-PVA fiber reinforced concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute* 22(5): 651-658 (in Korea).