

방폭 성능 강화용 유기계 섬유보강재 제조 및 이를 혼입한 섬유보강 콘크리트의 휨성능 평가

Organic fiber reinforcement for Performance improvement of Blast resistance and Flexural Performance Evaluation of Fiber reinforced concrete using organic fiber reinforcement

Chanki Jeon^{a,1}, Joongkyu Jeon^{b,*}, Sungil Kim^{c,2}, Kihyung Kim^{d,3}

^a Department of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 406-772, Republic of Korea

^b Technology Research Lab, Kolon Global Co., 46 Jeondae-ro 16-gil, Pogok-eup, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi 449-815, Republic of Korea

^c Technology Research Lab, Kolon Global Co., 46 Jeondae-ro 16-gil, Pogok-eup, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi 449-815, Republic of Korea

^d Department of Civil Engineering, Yeosu Institute of Technology, 338, Sejong-ro, Yeosu-si, Gyeonggi-do 469-705, Republic of Korea

ABSTRACT

This study propose the organic fiber reinforcement for performance improvement of blast resistance. Proposed fibers are polyamide fiber, PET fiber and aramid fiber and fiber reinforcements were produced by ATY method. To evaluate strain energy absorption capacity of organic fiber reinforced concrete using organic fiber reinforcement, 4-point bending test and 3-point bending tests on notched beam were performed. Test results show that PET fiber reinforced concrete has outstanding performance. It is thought that the PET fiber is effective for the performance improvement of blast resistance.

KEYWORDS

Organic fiber
Polyamide fiber
PET fiber
Aramid fiber
Fiber reinforcement

본 연구에서는 방폭 성능 강화를 위하여 유기계 다발형 섬유보강재를 제안하였으며, 제안된 섬유는 폴리아미드섬유, PET섬유 및 아라미드섬유이고, ATY 가공방식을 통해 다발형 단섬유를 제조하였다. 유기계 섬유보강재를 혼입한 콘크리트의 방폭 성능 평가를 대신하여 변형에너지 흡수 능력을 평가하였으며, 이를 위해 4점 휨시험과 노치보의 3점 휨시험을 수행하였다. 3종류의 유기계 단섬유를 혼입한 콘크리트의 휨성능 평가 결과, PET섬유 보강 콘크리트가 가장 우수한 결과를 나타내어, 방폭 성능 강화를 위하여 상당히 효과적일 것으로 판단된다.

유기섬유
폴리아미드섬유
PET섬유
아라미드섬유
섬유보강재

© 2015 Korea Society of Disaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Tel. 82-31-329-0663. Fax. 82-31-329-0601.
Email. jkjeon31@kolon.com

1 Tel. 82-32-835-8776. Email. johnland@incheon.ac.kr

2 Tel. 82-31-329-0627. Email. ksg85@kolon.com

3 Tel. 82-31-880-5222. Email. yitkim@yit.ac.kr

ARTICLE HISTORY

Received Apr. 21 2015

Revised Apr. 27 2015

Accepted May 20 2015

1. 서론

최근 군사시설물 이외 일반 국가 주요시설의 의도적인 사고에 대한 안전성 요구가 증가함에 따라 외부에서 가해지는 충격 에너지를 흡수·분산시키기 위한 고인성의 섬유 보강 콘크리트 개발에 대한 다양한 노력이 이루어지고 있다(Jeon et al., 2014).

섬유 보강 콘크리트에서 보강재료로 가장 많이 사용되고 있는 강섬유는 콘크리트 내에서 섬유의 뭉침, 부착성능 저하, 부식으로 인한 내구성 저하 등이 개선사항으로 요구되고 있으며, 2009년 개정된 규정에 의해 강섬유 외에 재료보강이 가능해짐에 따라 콘크리트 보강재료로써 강섬유 이외의 다양한 섬유에 대한 연구가 수행되고 있다(Jeon et al., 2011).

이에 유기섬유를 활용한 섬유보강재가 개발되었으나 유기계 섬유보강재는 콘크리트 내에서의 우수한 분산성 및 부착성에 비해 섬유 자체의 인장강도가 낮아 유기섬유를 혼입한 콘크리트의 역학적 성질, 즉 인성 및 파괴에너지가 다소 떨어지는 문제점이 있어 기존 유기섬유의 성능을 개선한 섬유의 개발이 필요한 실정이다(Kim et al., 2005; Kim et al., 2008).

따라서, 본 연구에서는 방폭 성능 강화를 위하여 고성능의 유기섬유, 즉 폴리아미드섬유, PET섬유 및 아라미드섬유를 제안하고, 이와 같은 유기섬유를 혼입한 콘크리트의 변형에너지 흡수 능력을 평가하기 위하여 4점 휨시험 및 노치보의 3점 휨시험을 실시하고자 한다.

2. 유기계 섬유보강재

2.1 유기계 섬유보강재 제조방법

본 연구에서는 섬유 혼입 시 필라멘트 개체수를 줄이기 위하여 단섬유 굵기를 Micro에서 Macro로, 즉 다발형 단섬유로 제작하였으며 다발형 단섬유는 ATY(Air Textured Yarn) 가공방법에 의해 제작되었다. ATY 가공 방법은 원사 가공 방법 중 하나로 Fig. 1과 같이 필라멘트 여러 가닥(Core Yarn, Effect Yarn)이 고속의 흐름으로 분사관에 주입되며, 분사 방향에 대해 사선방향으로 고압의 공기가 가해진다. 이때 Effect Yarn은 Core Yarn에 비해 필라멘트 투입속도가 느려 고압의 공기에 의해 다수의 루프(Loop)가 형성된다. 공기노즐(Air Nozzle)을 통과한 루프 가공사는 분리 방지를 위해 적정한 온도를 가해 가공사를 안정화시킨다. ATY 방법을 통해 가공된 다발형 단섬유는 일반적인 유기섬유보다 비표면적이 크기 때문에 콘크리트 내에서 부착성능이 매우 우수한 특징을 가지고 있다(Jeon et al., 2014).

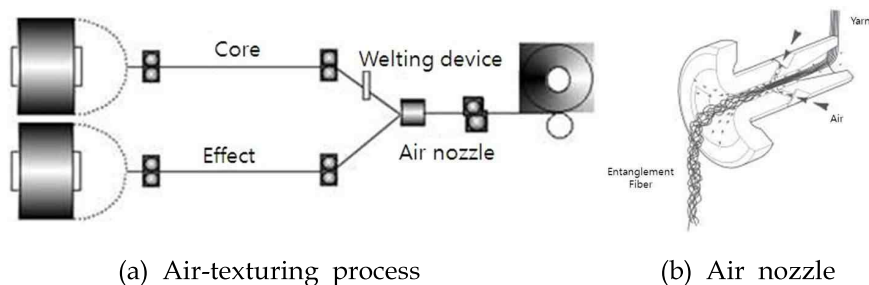


Fig. 1. Production process of fiber using air-textured yarn

2.2 유기계 섬유보강재 제조

본 연구에서 방폭 성능 강화용 유기계 섬유보강재를 제조하기 위해 3종류의 유기섬유를 사용하였다. 사용된 유기섬유는 폴리아미드섬유(이하 PA로 약함), PET섬유(이하 PET로 약함) 그리고 아라미드섬유(이하 AM로 약함)이며 3종류의 원사를 ATY 가공을 통해 Fig. 2와 같이 다발형 단섬유로 가공하였다.

섬유 원사와 ATY 방법을 통해 가공된 섬유보강재의 인장강도 및 신율을 Fig. 3에 나타내었다. ATY 가공 전의 인장강도는 PA가 가장 작고 AM이 가장 크게 나타났으며 AM은 3,000MPa 이상의 인장강도를 나타내었다. 반면에 신율은 PA가 가장 크고 AM이 가장 작은 값을 나타내었다.

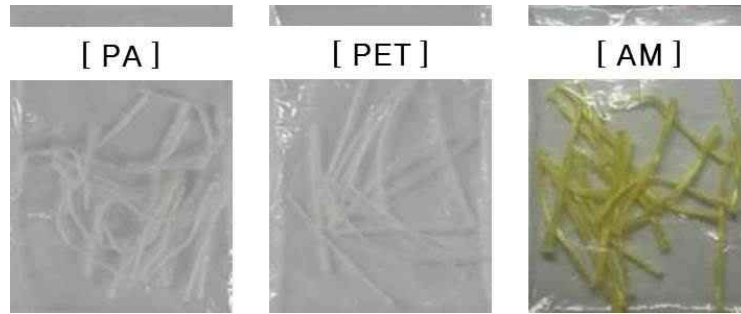


Fig. 2. Fiber reinforcements produced by air-textured yarn

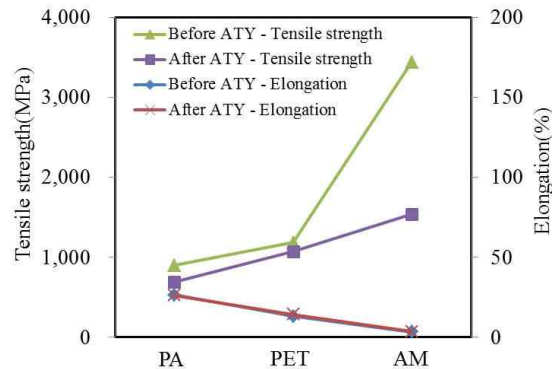


Fig. 3. Tensile strength and elongation

ATY 가공 후 PA, PET, AM의 인장강도는 각각 23.7%, 9.6%, 55.3% 씩 감소하였으나 신율은 큰 변화가 없었다. 다발형 단섬유의 인장강도 저하는 ATY 가공 시 섬유가 영감상태에서 하중이 가해지면서 섬유간의 마찰에 의한 손상 때문으로 사료된다.

섬유 보강 콘크리트에서 섬유의 인장강도는 콘크리트의 초기 균열 이후 인장저항능력에 큰 영향을 미치는 물성이므로 ATY 가공 시 섬유 본래의 인장강도를 유지하는 것이 매우 중요하다(Song et al., 2005). AM의 경우, 다른 섬유에 비해 원사와 다발형 단섬유 모두 가장 큰 인장강도를 가지고 있으나, ATY 가공을 할 경우 인장강도의 손실이 매우 크기 때문에 비효율적이라고 판단된다.

3. 실험개요

3.1 개요

본 연구에서 개발한 유기계 섬유보강재(PA, PET, AM)를 혼입한 콘크리트 시험체들(이하 PA-FRC, PET-FRC, AM-FRC로 약함)의 배합표는 Table 1과 같다. 본 배합에는 밀도 3.15g/cm³의 보통포틀랜드시멘트를 사용하였다. 굵은 골재 최대치수는 20mm이며 섬유는 혼입률에 따른 시공성 및 섬유 보강 콘크리트의 성능을 고려하여 체적 대비 1%로 혼입하여 시험체를 제작하였다.

Table 1. Mix design of concrete

Name	Gmax [mm]	W/B [%]	S/a [%]	Unit weight[kg/m ³]								AD [B×%]	Fiber [Vol.%]
				W	B	Ce	S/P	F/A	S1	S2	G		
PA-FRC	20	38.0	53.0	180	473	284	142	47	609	261	775	1.00	1.0
PET-FRC	20	35.9	53.0	175	488	293	146	49	609	261	775	1.00	1.0
AM-FRC	20	36.9	53.0	180	488	293	146	49	604	259	769	1.20	1.0

3.2 실험방법

(1) 4점 휨시험

유기섬유 보강 콘크리트의 하중-처짐 곡선, 휨강도, 등가 휨강도 그리고 휨인성 지수 분석을 위해 4점 휨시험을 수행하였다. 4점 휨시험은 KS F 2566 「강섬유 보강 콘크리트의 휨 인성 시험 방법」에 준하여 실시하였으며, 휨강도 및 등가 휨강도는 4점 휨시험에서 얻은 하중-처짐 곡선에서 다음 식(1), (2)을 이용하여 계산하였다.

$$\sigma_b = \frac{P_b L}{bh^2} \tag{1}$$

$$\sigma'_b = \frac{A_b L}{\delta_{tb} bh^2} \tag{2}$$

여기서, σ_b : 휨강도(MPa)

σ'_b : 등가 휨강도(MPa)

P_b : 최대하중 (N)

δ_{tb} : 지간의 1/150의 처짐(mm)

A_b : δ_{tb} 까지의 면적,

L : 지점간 거리(mm)

b : 실험편의 폭(mm)

h : 실험편의 높이(mm)

휨인성 지수는 I_5, I_{10}, I_{20} 으로 정의하고 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 초기 균열 처짐을 δ 라고 할 때 $3\delta, 5.5\delta$ 그리고 10.5δ 까지의 흡수에너지와 초기 균열 처짐 δ 까지의 흡수에너지의 비율이며 다음 식(3)으로 계산한다.

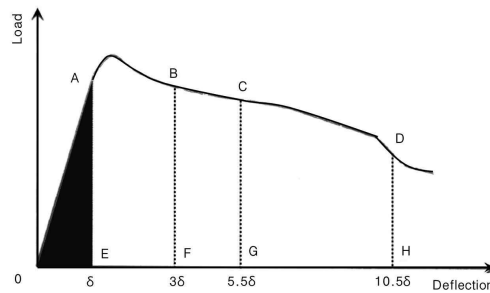


Fig. 4. Load-deflection curve

$$I_5 = \frac{OABF \text{ 면적}}{OAE \text{ 면적}}, I_{10} = \frac{OACG \text{ 면적}}{OAE \text{ 면적}}, I_{20} = \frac{OADH \text{ 면적}}{OAE \text{ 면적}} \tag{3}$$

(2) 노치보의 3점 휨시험

3종류의 유기섬유 보강 콘크리트의 잔류휨인장강도 측정을 위해 150mm×150mm×550mm 시험체에 25mm의 노치를 주어 노치보의 3점 휨시험을 수행하였으며(BS EN 14651, 2007), 잔류휨인장강도는 CMOD가 0.5mm 일 때 1.5MPa, 3.5mm 일 때 1.0MPa 이상을 목표로 하였다(BS EN 14889-2, 2006).

노치보의 3점 휨시험으로부터 얻은 하중-CMOD 곡선에서 다음 식(4)을 이용하여 잔류휨인장강도를 계산하였다.

$$\sigma_{R,j} = \frac{3P_jL}{2bh_{sp}^2} \tag{4}$$

여기서, $\sigma_{R,j}$: 잔류휨인장강도(MPa)

P_j : 하중(N)

L : 지점간 거리(mm)

b : 실험편의 폭(mm)

h_{sp} : 노치를 제외한 실험편의 높이(mm)

4. 실험결과 및 분석

4.1 4점 휨시험

(1) 하중-처짐 곡선

4점 휨시험에서 얻은 각 섬유 보강 콘크리트의 하중-처짐 곡선을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)와 같이 PA-FRC는 초기 균열 이후 하중이 약 56% 정도 급격히 저하되었으며 처짐이 증가함에 따라 하중은 약 4% 회복된 후 다시 감소하는 거동을 나타낸다.

PET-FRC는 Fig. 5(b)와 같이 초기 균열 이후 하중이 약 9% 정도 저하되었으며 처짐의 증가와 함께 하중이 약 15% 회복된 후 다시 감소하였다. PET-FRC의 경우, 2차 최대하중은 모두 초기 최대하중 이상을 나타내었다.

AM-FRC는 Fig. 5(c)와 같이 콘크리트의 초기 균열 이후 하중의 저하가 거의 없이 처짐이 증가함에 따라 초기 최대하중보다 약 20% 정도 증가한 후 감소하는 거동을 나타내었다.

일부 시험체의 경우 휨 저항성능이 상이한 경향을 나타내는데 이는 실험체에 혼입된 섬유가 30mm의 단섬유 형태로 혼입되고, 이에 따라 균열 발생부 및 균열 진전부위에 무작위로 배치된 섬유의 배열형태 및 배열수에 따른 상이한 휨성능이라고 사료된다.

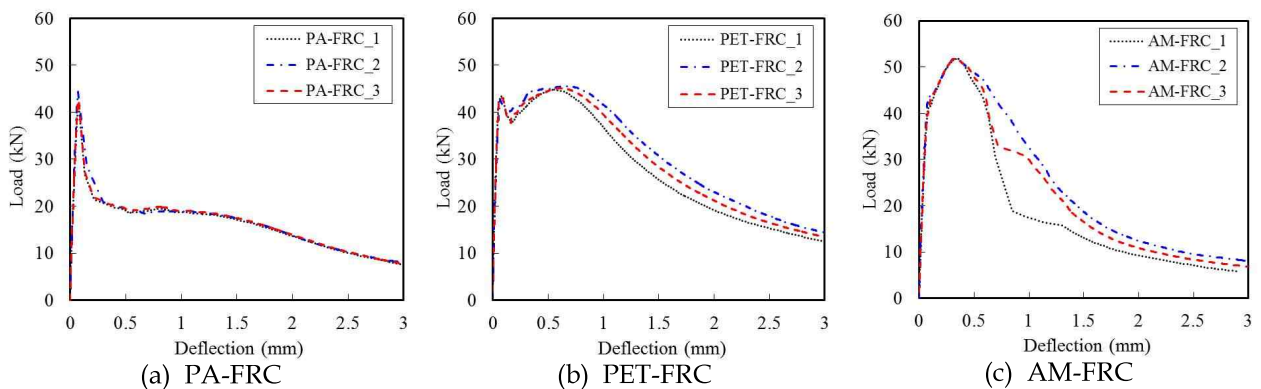


Fig. 5. Load-Deflection relationship

실험결과, 초기 균열 이후 하중의 감소는 섬유의 연신율이 가장 큰 PA-FRC가 가장 크게 나타났으며 섬유의 연신율이 작은 AM-FRC는 변위가 증가함에 따라 하중의 감소가 거의 없었다. 또한, 변위의 증가와 함께 하중이 회복되는 거동에서는 섬유의 인장강도가 큰 AM-FRC가 가장 큰 폭으로 회복되었으며, 섬유의 인장강도가 가장 낮은 PA-FRC가 가장 작았다.

따라서, 초기최대하중 이후 하중이 감소하는 경향은 시험체에 발생된 초기 휨균열 발생부위에 배치된 섬유의 연신율에 의한 것이고 이후 변위의 증가와 함께 하중이 회복되는 거동에는 섬유의 인장강도가 영향을 미친다고 판단된다.

(2) 휨강도 및 등가 휨강도

4점 휨시험에 의한 휨강도 계산 결과를 Fig. 6에 나타내었다. PA, PET, AM을 혼입한 콘크리트 시험체의 휨강도는 모두 동등한 수준의 결과를 나타내었다. 휨강도는 콘크리트의 초기 균열 이전의 성능으로 3종류의 유기섬유 보강 콘크리트는 섬유 종류에 따른 특성의 분석을 위해 동일한 배합을 사용하였기 때문에 동등한 수준의 강도를 발현하였다.

유기계 섬유보강재를 혼입한 콘크리트의 등가 휨강도와 등가 휨강도비를 Fig. 7에 나타내었으며 PET-FRC의 등가 휨강도 및 등가 휨강도비가 각각 3.89MPa, 0.68로 PA-FRC와 AM-FRC에 비해 가장 큰 것으로 확인되었다.

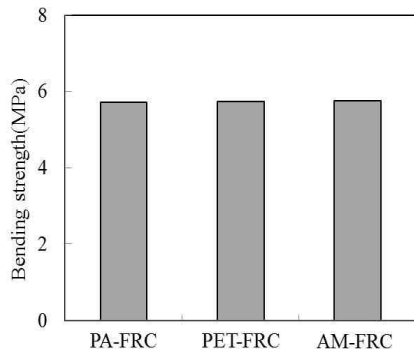


Fig. 6. Bending strength

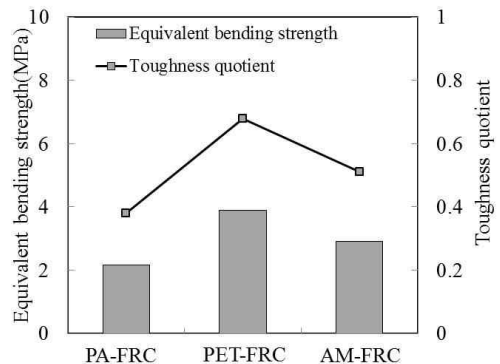


Fig. 7. Equivalent bending strength and toughness quotient

(3) 휨인성 지수

Fig. 5의 하중-처짐 곡선에서 휨인성 지수를 계산하였으며 Fig. 8에 나타내었다. 모든 휨인성 지수 I_5 , I_{10} , I_{20} 은 AM-FRC에서 가장 큰 값을 나타내었으며 섬유의 인장강도가 클수록 휨인성 지수가 큰 것으로 확인되었다. 따라서 휨인성 지수는 섬유의 인장강도와 관련이 있다고 사료된다(Kim. et al., 2011).

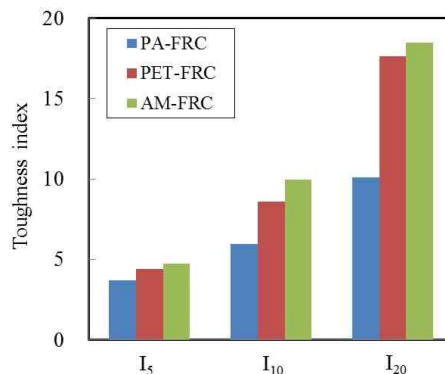


Fig. 8. Toughness index

4.2 노치보의 3점 휨시험

(1) 하중-CMOD 곡선

Fig. 9에 노치보의 3점 휨시험에 의한 하중-CMOD 곡선을 나타내었다. Fig. 9(a)과 같이 PA-FRC는 초기 균열 이후 하중이 약 43% 정도 저하되었으며 CMOD가 증가함에 따라 하중은 약 8% 회복된 후 다시 감소하는 거동을 나타낸다.

PET-FRC는 Fig. 9(b)와 같이 초기 균열 이후 하중이 약 7% 정도 저하되었으며 CMOD의 증가와 함께 하중은 약 5%에서 최대 약 30% 회복된 후 다시 감소하였다. PET-FRC의 경우, 2차 최대하중이 초기 최대하중 이상의 하중을 나타내기도 하였다.

AM-FRC는 Fig. 9(c)와 같이 콘크리트의 초기 균열 이후 하중의 저하가 거의 없이 초기 최대하중보다 최대 약 80% 정도 증가한 후 감소하는 거동을 나타내었다.

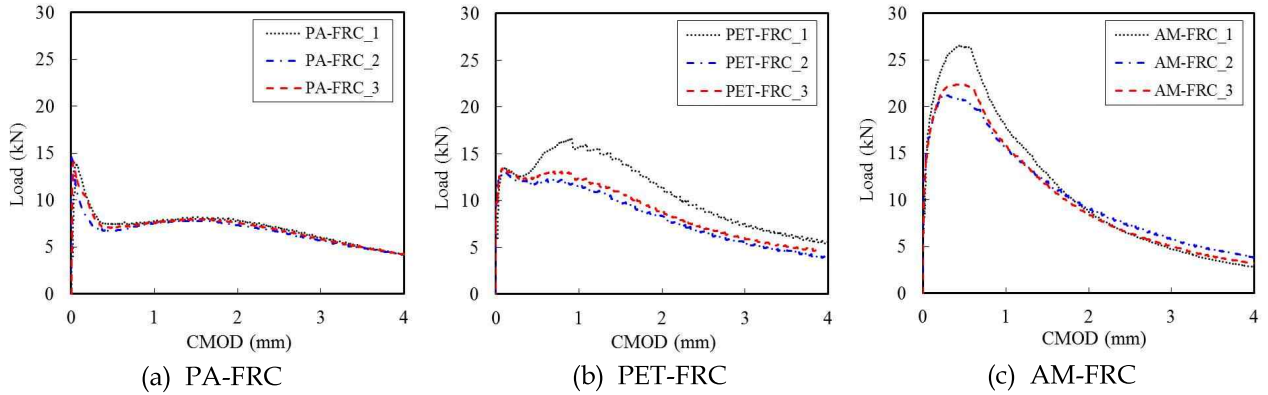


Fig. 9. Load-CMOD relationship

실험결과, 모든 시험체의 하중-CMOD 곡선은 4점 휨시험과 유사한 경향을 보였다. 이러한 결과는 4점 휨시험과 같이 초기최대하중 이후 하중의 감소는 섬유연신율에 의한 것이고 이후 CMOD의 증가에 따른 하중의 회복은 섬유의 인장강도에 의한 것이라고 판단된다.

(2) 잔류휨인장강도

하중-CMOD 곡선으로부터 계산한 잔류휨인장강도를 Table 2에 나타내었다. 잔류휨인장강도는 CMOD가 0.5mm 일 때 1.5MPa, 3.5mm 일 때 1.0MPa 이상을 목표로 하였으며 계산결과, CMOD가 0.5mm 일 때 PA-FRC, PET-FRC, AM-FRC의 잔류휨인장강도는 각각 2.26MPa, 4.11MPa, 7.40MPa로 1.5MPa 이상을 충족하였고 CMOD가 3.5mm 일 때 잔류휨인장강도는 각각 1.59, 1.69, 1.30으로 기준치인 1.0MPa 이상을 만족하였다.

Table 2. Residual flexural tensile strength

Name	CMOD=0.5mm [MPa]	CMOD=3.5mm [MPa]
PA-FRC	2.26	1.59
PET-FRC	4.11	1.69
AM-FRC	7.40	1.30

5. 결론

본 연구에서는 구조물의 방폭 성능을 강화할 수 있는 유기계 단섬유의 제조 및 유기계 섬유보강재를 혼입한 섬유 보강 콘크리트의 휨성능을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 방폭 성능 강화용 유기계 단섬유 개발을 위하여 Micro섬유보다는 Macro섬유가 필요하며, 이를 위해 ATY 방식으로 다발형 단섬유를 제조하였으며, 제조된 단섬유의 인장강도는 사용된 원사의 인장강도보다 감소하는 경향을 나타내었다.
- (2) 3종류 섬유보강 콘크리트의 휨강도는 동등한 수준의 강도를 발현하였으나, PET-FRC의 등가 휨강도 및 등가 휨강도비가 각각 3.89MPa, 0.68로 가장 큰 값을 나타내었다.

(3) 노치보의 3점 휨시험에 의한 잔류휨인장강도는 모든 시험체에서 요구되는 성능인 CMOD가 0.5mm 일 때 1.5MPa, 3.5mm 일 때 1.0MPa 이상을 만족하였다.

(4) 4점 휨시험 및 노치보의 3점 휨시험 결과 초기최대하중 이후 하중이 감소하는 거동은 섬유연신율에 의한 것이며, 변위가 증가함에 따라 하중이 회복되는 거동에는 섬유의 인장강도가 영향을 미친다고 판단된다.

(5) 실험결과를 종합한 결과, 본 연구에서 제시한 3가지의 섬유 중 방폭 성능 강화용으로는 PET가 가장 적절한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 건설기술연구사업 방호·방폭 연구단(과제번호 : 13건설연구S02)의 연구지원에 의해 수행되었습니다.

References

- BS EN 14651:2005+A1:2007. (2007), Test methods for metallic fibers concrete - Measuring the flexural tensile strength(limit of proportionality(LOP), residual), BSI
- BS EN 14889-2:2006. (2006), Fibres for concrete-Part 2 : Polymer fibers-Definitions, specifications and conformity, BSI
- Kim, D. J., Naaman, A. E., El-Tawil, S. (2008), Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites, *Cem. Concr. Compos*, 25, 4144-4155.
- Kim, D. J., Park, S. H., Ryu, G. S., Koh, K. T. (2011), Comparative flexural behavior of hybrid ultra high performance fiber reinforced concrete with different macro fibers, *Const. Build. Mater*, 30, 917-928.
- Kim, Y. I., Park, D. S., Seo, C. H. (2005), Variations of Material Characteristics of High-strength Concrete according to Increase of Steel Fiber Volum , *Journal of Architectural Institute of Korea, AIK.*, 21(2), 95-101
- Jeon, C K., Jeon, J. K. (2011), Properties of advance synthetic fiber reinforced concrete for improvement of tunnel shotcrete performance, *Journal of the Korea Society of Hazard Mitigation, KOSHAM*, 7(1), 43-50.
- Jeon, J. K., Kim, S. G., Jeon, C. K., Kim, K. H. (2014), Material Properties Evaluation of Organic Fiber Reinforcement for Performance Improvement of Impact-blast Resistance, *Proceeding of the Korea Concrete Institute, KCI.*, 26(2), 585-586.
- Jeon, J. K., Kim, W. S., Jeon, C. K., Kim, J. C. (2014), Processing and Mechanical Properties of Macro Polyamide Fiber Reinforced Concret, *Materials*, 7(12), 7634-7652.
- Song, P. S., Hwang, S., Sheu, B. C. (2005), Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concrete, *Cem. Concr. Res*, 35, 1546-1550.