

하이브리드 유기섬유 보강 콘크리트의 제조 및 휨성능 평가

A Processing and Flexural Performance Evaluation of Hybrid Organic Fiber Reinforced Concrete

Chanki Jeon^{a,1}, Joongkyu Jeon^{a,*}, Jaeyeong Shim^a

^a Department of Urban and Construction Engineering Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon Korea

ABSTRACT

Organic fiber reinforced concrete is applicable to many applications for construction material. In general, organic fibers have low tensile strength and elastic modulus, but they have many advantages such as high crack resistance, impact resistance, chemical resistance, flexural behavior and corrosion resistance. In this study, hybrid organic fibers were prepared by mixing polyamide (PA) fibers and high strength polyester (PET) fibers. Then, flexural performance test of fiber reinforced concrete containing hybrid organic fiber was performed. The energy absorption capacity of the hybrid organic fiber reinforced concrete was evaluated.

KEYWORDS

Hybrid organic fiber
Organic fiber reinforced concrete
Flexural performance
Energy absorption capacity
Polyamide fiber
Polyester fiber

일반적으로 유기섬유는 섬유 자체의 인장강도 및 탄성계수는 작지만, 내화성 및 내부식성이 우수하고, 콘크리트의 균열 제어 및 내충격 성능 향상에 효과적인 섬유이다. 따라서, 유기섬유는 콘크리트용 보강 섬유로서의 적용성이 매우 높은 재료이다. 본 연구에서는 폴리아미드(PA)섬유와 고강력의 폴리에스터(PET)섬유를 혼입한 하이브리드 유기섬유를 개발하였으며, 하이브리드 유기섬유를 혼입한 섬유보강 콘크리트의 휨성능 시험을 통해 하이브리드 유기섬유 보강 콘크리트의 에너지 흡수능력을 평가하고자 한다.

하이브리드 유기섬유
유기섬유 보강 콘크리트
휨성능
에너지 흡수능력
폴리아미드섬유
폴리에스터섬유

© 2017 Society of Disaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Tel. 82-32-835-8983. Fax. 82-32-835-0726.
Email. jkjeon31@hanmail.net

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

ARTICLE HISTORY

Received May. 22, 2017

Revised May. 23, 2017

Accepted Jun. 30, 2017

1. 서론

구조용 섬유를 혼입한 섬유 보강 콘크리트(Fiber Reinforced Concrete)는 보강 섬유의 가교작용에 의한 균열의 제어 및 응력의 분산에 의해 휨, 인장, 전단하중에 대한 콘크리트의 강도 및 인성을 향상시킨 재료이다. 이러한 섬유보강 콘크리트를 구조부재에 적용하면 구조물의 안전성과 내구성능의 향상을 기대할 수 있기 때문에 콘크리트 구조물의 보수 및 보강재로 널리 사용되고 있다. 국내에서 콘크리트 보강용 섬유로 가장 많이 사용되고 있는 강섬유의 경우, 콘크리트 비빔시 발생하는 섬유의 뭉침(fiber ball), 섬유와 매트릭스간의 부착성능 저하, 섬유의 부식으로 인한 내구성 저하 등이 개선사항으로 요구되고 있으며, 2009년 개정된 규정에 의하면 강섬유 이외의 재료보강이 가능해짐에 따라 콘크리트 보강용 섬유로 강섬유 이외의 다양한 섬유에 대한 개발 및 연구가 수행되고 있다(Jeon et al., 2010, Kim et al., 2012).

한편, 해외에서는 유기섬유를 활용한 섬유보강재의 개발 및 적용이 활발하게 진행되고 있으며, 콘크리트 보강재로 사용되는 유기섬유로는 나일론, 폴리프로필렌, 폴리에틸렌, 폴리에스터 등 여러 가지 합성섬유가 있다(Bolat H et al., 2014).

국내에서 개발된 다발형 폴리아미드섬유 보강 콘크리트는 기존에 사용된 강섬유 보강 콘크리트에 비해 경제적이고, 화학적 저항성 및 내구성이 우수하지만, 섬유 자체의 인장강도가 낮아 유기섬유를 혼입한 콘크리트의 역학적 특성, 즉 인성 및 에너지 흡수능력이 다소 떨어지는 문제점이 있다(Lee et al., 2013, Yoon et al., 2012, Kim et al., 2015).

이에 본 연구에서는 기존의 유기섬유 보강재에 사용된 폴리아미드(PA)섬유와 고강력의 폴리에스터(PET)섬유를 혼입한 하이브리드 유기섬유를 제안하였으며, 하이브리드 유기섬유를 혼입한 섬유보강 콘크리트의 휨인성 시험을 통해 하이브리드 유기섬유 보강 콘크리트의 에너지 흡수능력에 따른 성능을 평가하고자 한다.

2. 실험 개요

2.1 사용재료 및 콘크리트 배합

Table 1에 하이브리드 유기섬유의 데니어(Denier)에 따른 섬유보강 콘크리트의 휨특성 평가를 위한 실험계획과 하이브리드 유기섬유의 물리적 특성을 나타내었다. 실험은 1단계와 2단계로 나누어 수행하였으며, 1단계에서는 섬유의 데니어를 1590D, 2050D, 2510D, 2970D의 4가지 변수로 하여 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 휨특성을 평가하였다. 2단계에서는 1단계의 시험에서 가장 우수한 성능이 얻어진 2970D보다 데니어를 증가시킨 3430D와 4100D의 섬유를 개발하여, 섬유보강 콘크리트의 휨특성 평가를 수행하였다.

본 연구에서 개발된 하이브리드 유기섬유는 PA와 PET모사를 혼합하여 제조되었으며, 모사의 물리적 특성은 Table 2에 나타내었다. Fig. 1은 PA와 PET 모사를 하이브리드하기 위한 제조 공정을 나타낸 것으로 모노필라멘트(Mono-filament)를 멀티필라멘트(Multi-filament), 즉 다발형태로 제조하기 위하여 원사가공 방법 중 ATY(Air textured yarn) 방식을 선택하였다.

Table 3에 섬유보강 콘크리트 배합에 사용된 재료의 물리적 특성을 나타내었다. 시멘트는 밀도 3.15g/cm³, 분말도 3,200cm²/g의 보통 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 굵은골재는 최대치수 13mm, 밀도 2.62g/cm³, 흡수율 0.90%, F.M 6.2의 꺾자갈을 사용하였으며, 잔골재는 밀도 2.60g/cm³, 흡수율 0.97%, F.M : 2.0인 것과 밀도 2.60g/cm³, 흡수율 1.51%, F.M 3.2인 것을 사용하였다. 섬유보강에 의한 슬럼프 저하를 고려하여 폴리카르본산계 고성능 감수제를 시멘트량에 대하여 중량비로 0.6~1.15% 혼입하였다.

Table 4에 섬유보강 콘크리트의 배합을 나타내었다. W/C 38.0%, S/a 63.0%, 단위 수량은 222kg으로 설정하였으며 섬유의 혼입량은 9kg으로 모두 동일하게 설정하였다.

2.2 시험체 제작

섬유보강 콘크리트의 비빔은 먼저 결합재와 잔골재 및 굵은 골재를 1차 건비빔 한 후 섬유를 투입하여 섬유가 충분히 혼합 되도록 2차 건비빔을 실시하였다. 그 후, 물과 혼화제(감수제, AE제)를 투입하고 소정의 유동성을 만족하도록 충분한 비빔을 실시하였다.

비빔 된 섬유보강 콘크리트는 몰드에 타설하고 항온·항습실에서 1일간 양생하였으며, 1일 후 모든 시험체는 탈형되어 28일간 표준수준양생을 실시하였다.

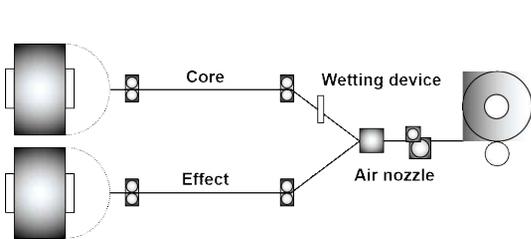
압축강도 시험용 시험체는 KS F 2403 「콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법」에 준하여 지름 100mm, 높이 200mm의 원주형 시험체를 제작하였다. 휨특성 시험용 시험체는 길이 550mm, 너비 150mm, 두께 150mm의 각형 시험체로 제작하였으며, 각 시험 수준에 대하여 3개의 시험체를 제작하였다.

Table 1. Details of specimen and mechanical properties of hybrid organic fiber

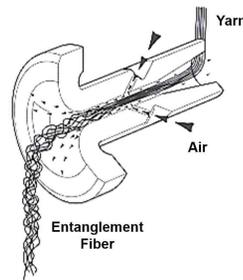
Series	Specimen	PA (%)	PET (%)	Elongation (%)	Denier (D)	T (g/d)	Tensile strength (MPa)
1	1590D	53	47	19.89	1,590	4.89	541.0
	2050D	51	49	20.26	2,050	4.85	538.3
	2510D	50	50	20.53	2,510	4.72	525.1
	2970D	49	51	20.46	2,970	4.98	554.4
2	2970D	49	51	15.49	2,970	4.41	528.3
	3430D	49	51	18.87	3,430	4.82	574.6
	4100D	51	49	16.73	4,100	4.94	586.8

Table 2. Mechanical properties of yarn

Name	Density (g/cm ³)	Filament	Filament Diameter (μm)	Tensile Load (N)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
PA	1.14	68f	19.40	18.1	902	26.5
PET	1.38	120f	36.12	145.7	1,185	13.2



(a) Manufacturing system



(b) Air extrusion nozzle



(c) Air textured yarn device

Fig. 1. Production process of hybrid organic fiber using air textured yarn

Table 3. Mechanical properties of the used materials

Materials	Mechanical properties
Cement	Ordinary portland cement, Density : 3.15g/cm ³ , Fineness : 3,200cm ² /g
Gravel	Crushed gravel, Maximum size : 13mm, Density : 2.62g/cm ³ , Absorptance : 0.90%, F.M : 6.2
Sand1	Density : 2.60g/cm ³ , Absorptance : 0.97%, F.M : 2.0
Sand2	Density : 2.60g/cm ³ , Absorptance : 1.51%, F.M : 3.2
Super plasticizer	Polycarboxylic acid type

Table 4. Mix proportion of fiber reinforced concrete

W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)						AD (C*%)
		W	C	S1	S2	G	Fiber	
38.0	63.0	222	584	642	274	545	9	0.6~1.15

2.3 실험 방법

압축강도 시험은 Fig. 2(a)에 나타난 시험장치를 사용하여 KS F 2405 「콘크리트 압축 강도 시험방법」에 준하여 실시하였다. 섬유보강 콘크리트 보의 휨특성 시험은 Fig. 2(b)의 시험장치를 사용하여 KS F 2566 「강섬유 보강 콘크리트의 휨인성 시험 방법」에 준하여 실시하였다. 각 시험 수준에 대하여 □150×150×550mm를 3개 제작하여 시험을 실시하였으며, 휨강도의 계산은 다음의 식 (1)을 사용하여 계산하였다(KS F 2566, 2000).

$$f_r = \frac{Pl}{bh^2} \tag{1}$$

여기서, f_r 휨강도(MPa), P 최대하중(N), l 지간(mm), b 파괴 단면의 폭(mm), h 파괴단면의 높이(mm)를 나타낸다. 등가휨강도는 식 (2)에 의하여 계산되었다.

$$f'_r = \frac{A_b}{\delta_{tb}} \times \frac{l}{bh^2} \tag{2}$$

여기서, f'_r 등가휨강도(MPa), δ_{tb} 지간의 1/150의 처짐(mm), A_b 는 δ_{tb} 까지 하중-처짐 곡선의 면적, l 지간(mm), b 파괴 단면의 폭(mm), h 파괴단면의 높이(mm)이다. 등가휨강도란 주어진 변위(지간의 1/150)에서의 평균 휨강도를 나타내는 것으로 최대휨강도 이후의 변형연화 또는 변형경화에 의한 하중의 유지능력(휨인성)을 평가하는 지표로 활용된다.



(a) Compressive test (b) Flexural test
Fig 2. Test set up of mechanical properties

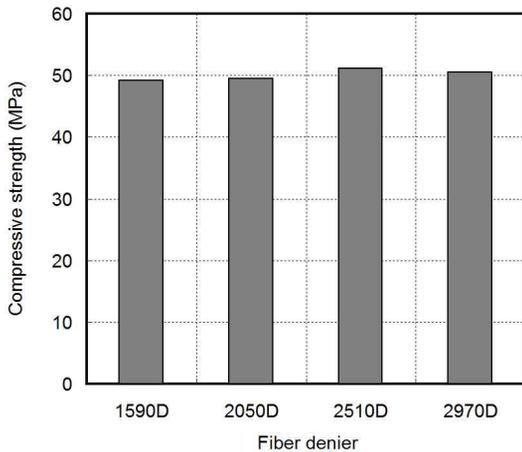
3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축특성

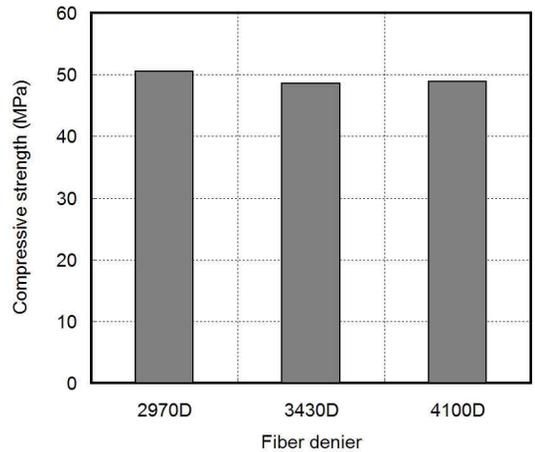
Fig. 3은 재령 28일에서의 압축강도 측정 결과를 나타낸 것이다. 섬유의 데니어에 관계없이 모든 시험체는 재령 28일에서 목표 강도를 상회하는 결과를 얻을 수 있었으며, 섬유 데니어에 의한 압축강도의 영향은 없는 것으로 판단된다.

3.2 휨특성

Fig. 4(a)에 Series 1의 휨응력-처짐 곡선을 나타내었다. 모든 시험체에서 초기 균열이 발생한 후 응력이 감소하는 구간이 나타났다. 이는 매트릭스에 균열이 발생한 후 균열 개구부에서 섬유와 매트릭스의 부착에 의한 저항력이 발생하기 전 유기섬유의 연신률에 의해 응력이 감소하는 현상으로 사료된다. 한편, 1590D와 2050D 시험체의 경우, 초기 균열과 함께 응력의 감소한 후, 섬유가 매트릭스로부터 인발되지 않고 끊어지는 것에 의한 변형연화 거동을 보였다. 반면, 2510D와 2970D의 경우 초기 균열과 함께 응력 감소한 후, 섬유와 매트릭스의 부착에 의해 응력이 재상승하는 변형 경화 거동을 보였으며, 초기 균열 강도보다 높은 피크 응력을 나타내었다. 2970D의 경우 초기 균열강도는 가장 작았으나, 변형 경화에 의한 피크 응력은 가장 큰 값을 나타내었다. 이러한 결과를 바탕으로 유기섬유의 경우 섬유와 매트릭스간의 부착력은 크지만, 섬유 자체의 연신률이 크기 때문에 초기 균열 발생 후 응력이 저하하는 현상이 발생하였으며, 최종적으로 섬유가 끊어지는 파괴 거동을 나타내었다.

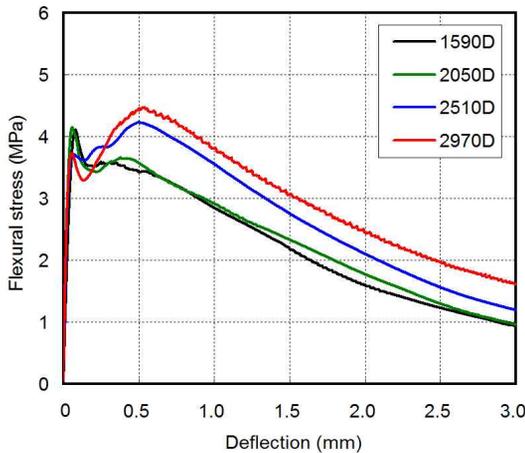


(a) Series 1

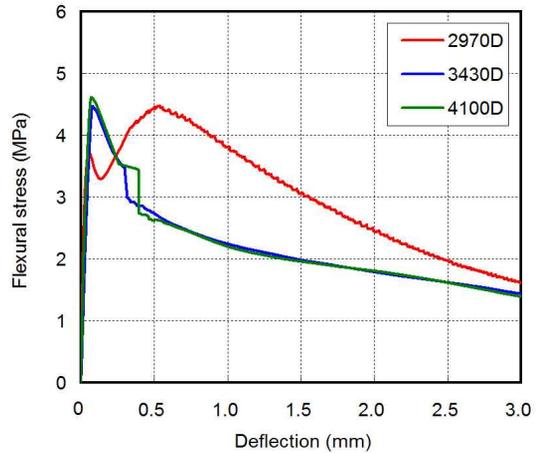


(b) Series 2

Fig. 3. Compressive strength



(a) Series 1



(b) Series 2

Fig. 4. Flexural stress-deflection curve by fiber denier

Fig. 4.(b)에 Series 2의 휨응력-처짐 곡선을 나타내었다. Series 2는 Series 1에서 가장 우수한 휨성능을 보인 2970D 시험체를 기준으로 데니어를 3430D 및 4100D로 증가시킨 섬유를 사용하였다. 3430D와 4100D 시험체의 경우 내부 섬유의 가교작용에 의한 응력의 분산 및 균열제어의 효과로 2970D 보다 초기 균열강도는 증가하였으나, 초기 균열이 발생한 후 응력이 재상승하는 변형 경화 거동은 관찰되지 않았다. 이는 섬유의 데니어가 증가함에 따라 초기 균열 강도는 향상되지만, 파괴단면에서의 섬유의 개체수가 감소하기 때문에 초기 균열이 발생한 후의 변형경화 거동이 발생하지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 5에 섬유 데니어에 따른 휨강도, 등가휨강도 및 등가휨강도비를 나타내었다. Serise 1에서 섬유의 데니어가 증가할수록 휨강도, 등가휨강도 및 등가휨강도비는 모두 증가하는 경향을 보였으나, 휨강도에 비해 등가휨강도와 등가휨강도비의 증가량이 더 큰 것으로 나타났다. 이는 섬유의 데니어가 1590D에서 2970D으로 증가함에 따라 초기 균열 발생이후 변형 경화 거동이 나타나고, 섬유가 끊어지면서 발생하는 변형 연화 구간에 있어서 응력의 저하가 서서히 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

한편, Serise 2에서는 섬유의 데니어의 증가에 따른 휨강도의 향상 정도는 크지 않았으며, 데니어가 3430D 이상으로 증가함에 따라 등가휨강도와 등가휨강도비가 감소하는 경향이 나타났다. 이는 섬유의 데니어가 증가해도 파괴 단면에서 섬유와 매트릭스 사이에서 가교 작용을 하는 섬유의 개체수가 감소하기 때문에 응력의 저하가 크게 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

Table 5에 휨시험에 의해 얻어진 휨특성의 값의 평균치와 표준 편차를 정리하여 나타내었다.

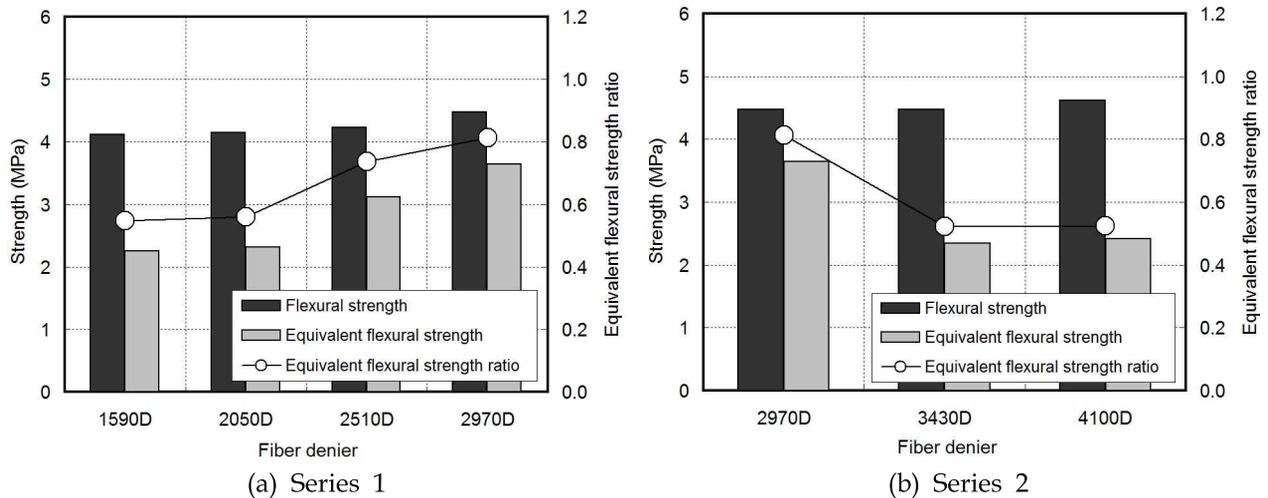


Fig. 5. Flexural properties by fiber denier

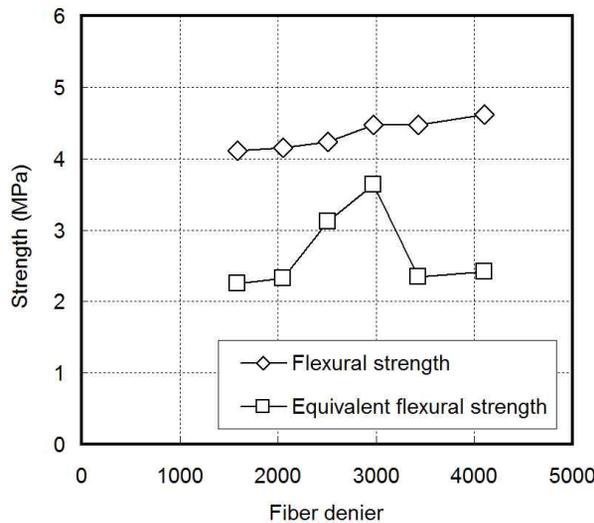


Fig. 6. Relationship between flexural strength and fiber denier

Table 5. Flexural test result (Standard deviation)

ID.	f_r [MPa]	f_r' [MPa]	f_r'/f_r
1590D	4.11 (0.61)	2.25 (0.74)	0.55 (0.12)
2050D	4.15 (0.21)	2.32 (0.95)	0.56 (0.10)
2510D	4.23 (0.45)	3.12 (0.97)	0.74 (0.13)
2970D	4.48 (0.76)	3.64 (0.84)	0.81 (0.10)
3430D	4.47 (0.23)	2.34 (1.12)	0.52 (0.02)
4100D	4.62 (0.24)	2.42 (0.94)	0.52 (0.07)

f_r : Flexural strength (MPa), f_r' : Equivalent flexural strength(MPa), f_r'/f_r : Equivalent flexural strength ratio

Fig. 6.은 섬유 테니어와 휨강도 및 등가휨강도의 관계를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 1590D에서 4100D까지의 범위에서 6 변수에 대한 휨특성을 평가하였으며, 그 결과로부터 섬유보강 콘크리트의 휨강도는 섬유의 테니어가 클수록 증가하지만, 등가휨강도는 테니어와 함께 섬유의 개체수에 대해서도 고려할 필요가 있다는 것을 확인하였다. 따라서, 본 연구의 범위에서는 휨강도와 등가휨강도 모두를 고려하였을 때 2970D가 가장 우수한 휨성능을 갖는 것으로 판단하였다.

4. 결 론

PA와 PET 모사 하이브리드 유기섬유의 테니어에 따른 섬유보강 콘크리트의 휨성능에 대하여 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 섬유 테니어가 증가할수록 섬유와 매트릭스의 가교작용에 의한 응력의 분산 및 균열 발생 억제에 의해 휨강도가 증가하는 경향을 보였으나, 그 정도는 크지 않았다.

(2) 섬유 테니어가 2970D까지는 휨강도, 등가휨강도 및 등가휨강도비 모두 증가하는 경향을 보였으며, 특히 2050D 및 2970D에서는 초기 균열 발생이후 발생하는 변형 경화 거동에 의한 등가휨강도 및 등가휨강도비가 크게 향상되었다.

(3) 섬유 테니어가 3430D 및 4100D에서는 휨강도는 향상되었으나, 휨과괴 단면에서의 섬유개체수가 감소하기 때문에 초기 균열 발생 이후 변형 경화 거동이 나타나지 않았으며, 등가휨강도 및 등가휨강도비가 크게 감소하는 경향을 보였다.

(4) 유기섬유보강 콘크리트의 휨특성은 섬유의 테니어와 섬유의 개체수를 모두 고려해야 할 필요가 있다고 판단되며, 본 연구의 범위에서는 2970D에서 가장 우수한 휨성능이 나타났다.

(5) 유기섬유는 매트릭스와의 부착성능은 우수하지만, 섬유 자체의 연신률이 크기 때문에 초기 균열 발생 후 응력이 감소하는 현상이 발생하였다. 향후의 연구에서는 유기섬유의 연신률을 감소시키기 위하여 강섬유 또는 탄소섬유의 등의 무기계 섬유와 하이브리드한 섬유를 개발하고, 이에 대한 성능 평가의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 인천대학교 2016년도 자체연구비의 지원을 받아 수행된 연구 결과이며, 이에 감사드립니다.

References

- Bolat H., Simsek O., Çullu M., Durmus G., Can O. (2014.) "The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete.", *Composites Part B: Eng*, Vol.61, pp.191-198.
- Jeon, J.K., Jeon, C.K. (2010). "Manufacture and Construction Technology of Polyamide Fiber Reinforced Shotcrete in Tunnel.", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.14, No.6, pp.41-45.
- Kanda, T., Li Victor, C. (1998), "Interface property and apparent strength of high strength hydrophilic fiber in cement matrix.", *Journal of Materials in Civil Engineering, JMCE*, Vol.10, No.1, pp5-13.
- Kim, H.S., Kim, G.Y., Gucunski, N., Nam, J.S., Jeon, J.K. (2015). "Assessment of flexural toughness and impact resistance of bundle-type polyamide fiber-reinforced concrete.", *Composites Part B: Eng*, Vol.78, pp.431-446.
- Kim, Y.G., Kim, S.C., Kim, M.H. (2012). "A Study on the Dynamic Properties of Cement Mortar with Recycled PET Fiber.", *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol.2, No.4, pp.113-122.
- KS F 2566:2000. (2000). "Test Method for Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete.", Korean Standards Association.
- Lee, I.W., Kim, S.H., Choi, T.J., Hong, B.T., Kim, H.H., Won, J.P. (2011). "Fracture Performance of Structural Synthetic Fiber Reinforced Concrete.", *Conference paper on Korea Concrete Institute*, Vol.23, No.2, pp.103-104.
- Yoon, J.H., Jeon, J.K., Jeon, C.K., Lee, S.C. (2012). "Experimental Construction of Polyamide Fiber Reinforced Shotcrete Technology.", *Journal of the Korean Recycled Construction Resource Institute*, Vol.7, No.2, pp.78-83.