

재생 PET섬유 보강 고강도 콘크리트 원형기둥의 내화성능

Fire Resistance Performance of Recycling PET Fiber Reinforced High Strength Concrete Circular Column

서 태 석¹ 공 민 호² 권 해 원^{2*}

Seo, Tae-Seok¹ Gong, Min-Ho² Kwon, Hae-Won^{2*}

Advanced Material R&D Team, Hyundai Engineering & Construction, Giheung-gu, Yongin, 16910, Korea ¹
Research & Development Center, Hyundai Engineering, jongno-gu, Seoul, 03058, Korea ²

Abstract

This study evaluates the fire resistance performance for 60MPa high strength concrete reinforced by recycling polyethylene-terephthalate(PET) fiber(fiber content : 0.05 vol.%). Because there is no fire resistance test results for circular concrete column, a fire resistance test was carried out for circular concrete column specimens. As a result, it was confirmed that PET fiber was effective against the spalling control of high strength concrete. However, the specimen with cover thickness 30mm did not satisfy the temperature standard of main reinforcement, and the specimen with cover thickness 40mm satisfied the temperature standard of main reinforcement. Therefore, more than 40mm cover thickness was demanded for stable fire resistance performance.

Keywords : fire resistance performance, PET fiber, high strength concrete circular column, over thickness

1. 서 론

고강도 콘크리트는 보통 콘크리트와 달리 Figure 1과 같이 조직이 치밀하므로 화재시 콘크리트 구조체 내부에 큰 수증기압이 발생함으로써 구조부재의 단면손실을 유발할 수 있는 폭발현상이 발생하게 된다[1,2]. 화재로 인한 폭발발생은 콘크리트 구조물의 사용수명을 급격히 저하시킬 뿐만 아니라, 심한 경우에는 구조물의 붕괴를 유발시킬 수 있어, 대형 인명 피해마저 발생할 수 있다.

이러한 문제에 대응하기 위하여 국토해양부에서는 콘크리트 설계기준강도 50MPa 이상의 콘크리트를 사용한 구조체는 내화성능을 확보해야하는 기준을 고시하였다[3]. 따라서 화재 발생 시 고강도 콘크리트 구조체의 폭발발생 및 내부온도

를 감소시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적으로 섬유보강재 혼입을 통한 고강도콘크리트의 폭발특성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있고, PET섬유(Polyethylene-terephthalate fiber)[4,5,6], 또는 강섬유가 폭발제어에 효과가 있는 것으로 보고되고 있다[7,8,9].

한편 음료수 용기로 사용되는 PET 병은 사용 후 버려지는 양이 매우 많아 환경적 측면에서 문제가 제기되고 있어 재생 PET섬유를 콘크리트에 혼입한 다양한 연구가 진행되고 있다[10,11,12]. 특히 PET섬유는 상변이 과정에서 에너지 흡수율이 높은 섬유이므로 화재 발생시 주철근의 온도상승을 지연시킬 것으로 기대되어 PET섬유를 혼입한 고강도 콘크리트의 내화특성에 관한 연구결과도 발표되었다[13,14].

하지만 기존의 PET섬유를 혼입한 고강도 콘크리트의 내화특성 연구는 주로 원주형공시체(150×300mm)를 이용한 실험이 대부분이었으며 실 구조부재를 대상으로 한 연구결과는 매우 부족한 실정이었다. 그러므로 고강도 콘크리트의 내화성능 확보 공법으로써, PET섬유 혼입 공법이 더욱더 기술적 신뢰를 확보하고 안전하게 현장에 적용되기 위해서

Received : July 27, 2016

Revision received : September 7, 2016

Accepted : October 11, 2016

* Corresponding author : Kwon, Hae-Won

[Tel: 82-2-2134-7570, E-mail: goodjaya@hec.co.kr]

©2016 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

는 실 구조부재를 대상으로 한 실험적 검토가 절실하다.

따라서, 본 연구에서는 PET섬유 보강 콘크리트의 내화특성을 검토하기 위하여 60MPa 고강도 철근콘크리트 원형 기둥부재를 대상으로, 피복두께 30과 40mm 두 가지에 대해 내화시험을 실시하도록 한다. 이를 통해, 미적요소의 부가를 위해 최근 증가하고 있는 건축물 내부 원형 기둥에서의 PET 섬유 혼입 공법에 따른 내화 특성을 확인하고, 40MPa 이상인 고강도 콘크리트 적용에 따른 피복두께 10mm 저감 규정 [15]의 적용 가능성을 본 연구를 통해 확인하도록 한다.

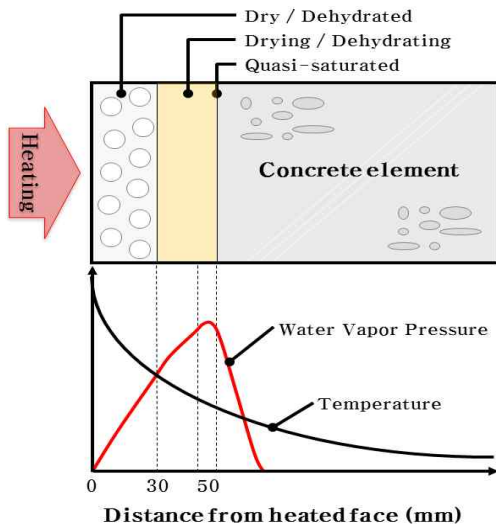


Figure 1. Mechanism of spalling explosion[1]

2. 실험계획 및 방법

2.1 사용재료

본 연구에 사용된 PET섬유의 기초물성은 Table 1과 같으며, 그 제조 공정은 Figure 2에 나타내었다. PET섬유는 폐 PET섬유를 수집하여 건조/습윤법을 이용하여 불순물을 제거한 뒤 압쇄 분쇄한 다음 용해하여 방사공정(Figure 2(a))을 거친 후에 후처리(Figure 2(b))를 하게 된다. 후처리에는 권취(Quench), 연신, 열처리, 유제코팅 공정으로 생산된다. 연신속도, 연신온도에 따라 분자배향이 결정되며, 열처리를 통해 물성이 고정된다.

PET섬유에 친수성을 부여하고 유동성을 개선시키기 위하여 섬유 표면에 Alkyl Phosphate계의 유제를 코팅하여 (Figure 3) 콘크리트와의 부착 능력이 향상되어 콘크리트와 배합 후 흐르지 않고 간혀 있는 형태를 형성하게 되고, 콘크리트와 정전기적 반발력을 유도하여 유동성을 개선하였다.

사용된 콘크리트는 60MPa 고강도 배합이며, Table 2에 배합에 사용된 재료의 물성을 나타내었다.

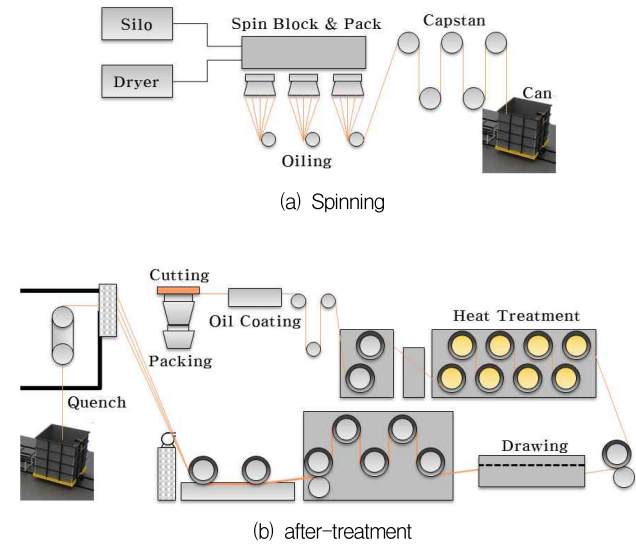


Figure 2. Manufacturing process

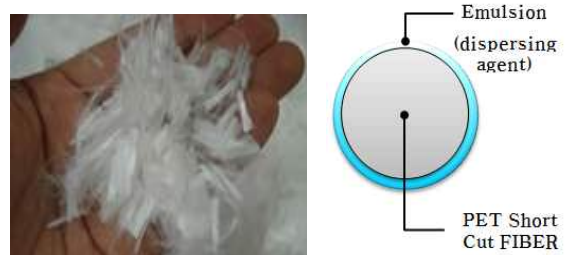


Figure 3. PET fiber

Table 1. Properties of PET fiber

Length (mm)	Diameter (μm)	Density (g/cm ³)	Tensile strength(MPa)	Melting point (°C)
12	20	1.38	420.7	256

Table 2. Properties of cement and aggregate

Ordinary Portland Cement	Density(g/cm ³) : 3.15	Specific surface area : 3 390cm ² /g
Blast Furnace slag Powder	Density(g/cm ³) : 2.91	Specific surface area : 4 100cm ² /g
Fly ash	Density(g/cm ³) : 2.22	Specific surface area : 3 150cm ² /g
Coarse aggregate	Density(g/cm ³) : 2.62	Water Absorption ratio : 0.73%
Fine aggregate	Density(g/cm ³) : 2.61	Water Absorption ratio : 0.85%

2.2 실험계획

실험계획은 아래 Table 3과 같이 선행연구를 통해서 폭열 제어 성능이 확인된 PET섬유 0.05vol.%를[14] 혼입한 60MPa의 고강도 콘크리트를 사용하였으며, 배합으로 Table 4와 같은 실험요인에 대해 슬럼프 플로, 공기량의 경시변화와 압축강도 테스트를 실시하도록 한다. 슬럼프 플로와 공기량의 경시변화는 30분, 60분, 90분에 대하여 측정하였고, 압축강도는 7일, 14일, 28일에 측정하였다.

실험에 사용된 시험체 형상은 Figure 4와 같으며, 비재하 내화시험을 실시하기 위하여 시험체의 직경 700mm, 높이 1500mm인 원형 기둥으로 2개의 시험체를 제작하였다. 시험체(#1)는 피복두께를 30mm로 제작하였고, 시험체(#2)는 피복두께를 40mm로 제작하였다. 주철근은 8-SHD22-600으로 항복강도 600MPa이며, 띠철근은 HD10@300-SD400으로 항복강도 400MPa의 것을 사용하였다.

Table 3. Mixture proportions

W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)						PET (vol.%)
		W	C	BS	FA	S	G (20 mm)	
27.4	48.9	160	298	160	125	843	884	0.05

* W(Water), C(Cement), BS(Blast furnace slag), FA(Fly ash), S(Sand), G(Gravel)

Table 4. Experimental Item

Fresh concrete	Slump flow: 600±100mm Air content: 3.5±1.5%
Hardened concrete	Compressive strength: 7, 14, 28days
Fire resistance test	Fire test without loading (ISO-834) : Cover depth 30, 40mm

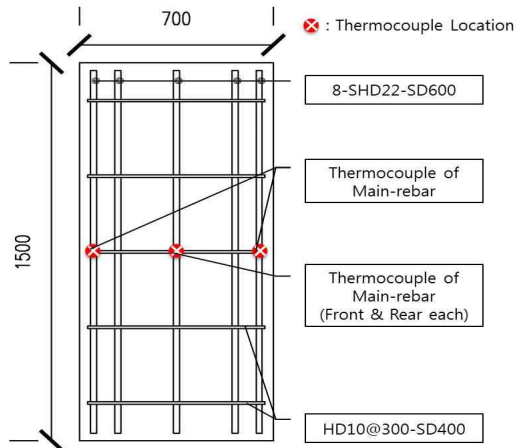


Figure 4. Shape of specimen

2.3 실험방법

온도센서 설치 위치를 Figure 5에 나타내었다. 철근 내부의 온도를 측정하기 위하여 Figure 6과 같이 주철근에 직경 3mm, 길이 5mm의 구멍을 뚫어 철근 내부에 열전대를 삽입하였다. 열전대는 동서남북 방향의 4개의 주철근에 설치하였으며 본 실험에 사용된 열전대는 -200~1250℃까지 측정 가능한 K-type 열전대(thermocouple K-type)를 사용하였다. Figure 6에 온도센서 설치전경을 나타내었다.

시험체는 제작 후 3일째 탈형하고 대기양생을 실시하여 총 77일간 양생한 것으로 내화시험 기준에 따라, 방재시험연구원 내화 실험동에서 실시하였고, ISO-834 표준화재 가열 곡선을 적용하였으며, 180분간 비재하 내화시험을 실시하여 최고온도 1109℃에서 실험을 종료하였다.

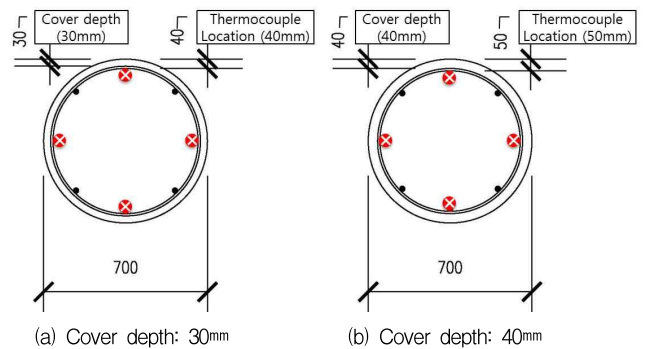


Figure 5. Location of sensors



Figure 6. Installation of sensor

3. 결과 및 고찰


3.1 콘크리트 물성 검토

PET섬유를 혼입한 설계기준강도 60MPa 고강도 콘크리트의 슬럼프 플로와 공기량의 경시변화를 Table 5에 나타내었다. 초기와 30분, 60분, 90분에서의 경시변화 실험결과

KS F 4009에서 기준하고 있는 슬럼프 플로 $600 \pm 100\text{mm}$ 와 공기량 $3.5 \pm 1.5\%$ 범위를 모두 만족하는 것으로 나타났다. 그 이유는 섬유 표면에 코팅된 Alkyl Phosphate 계의 유제가 유동성을 개선시켰기 때문인 것으로 판단된다. 본 실험을 통하여 0.05vol.% PET섬유 혼입 고강도 콘크리트의 시공성 확보에 문제가 없는 것으로 확인되었지만 섬유 혼입율 변화에 따른 물성검토를 추가적으로 실시할 필요가 있다.

재령별 압축강도 시험결과를 Figure 7에 나타내었으며, 재령별 압축강도 특성은 삼성분계배합임에도 불구하고, 재령 7일에 설계기준 강도 60MPa의 약 90%를 발현하여 보통 콘크리트에 비해 상대적으로 높은 압축강도 발현율을 보이는 것으로 나타났다. 이는 낮은 물-결합재비로 조기강도 발현율이 증대됨에 따라 나타난 특성인 것으로 사료된다. 재령 14일에는 설계기준강도를 상회하였으며, 재령 28일에는 설계 기준강도의 약 115%를 나타내었다.

Table 5. Properties of the fresh 60MPa concrete with PET Fiber

time (min)	Properties of fresh concrete				picture
	Without PET(Plain)		PET containing Concrete		
	Slump flow (mm)	Air content (%)	Slump flow (mm)	Air content (%)	
0	600	4.4	590	4.7	
30	610	4.1	580	4.5	
60	570	4.1	565	4.1	
90	550	4.0	540	3.8	

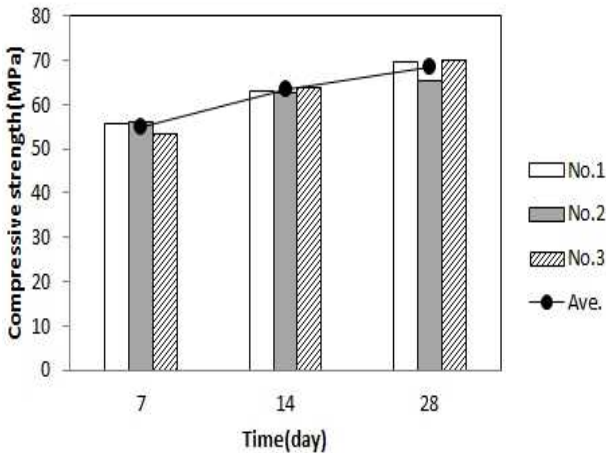
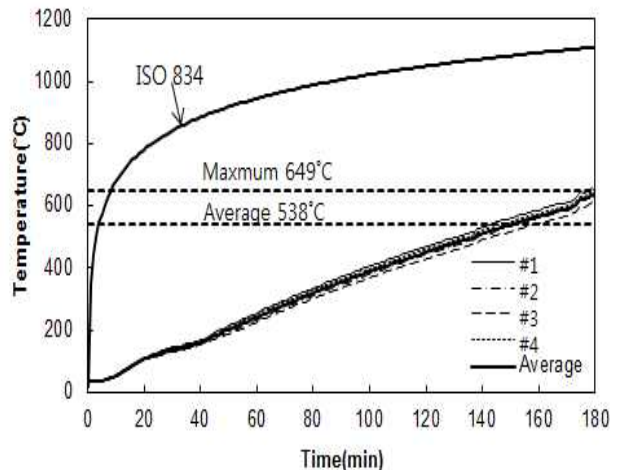


Figure 7. Compressive strength of 60MPa concrete with PET fiber

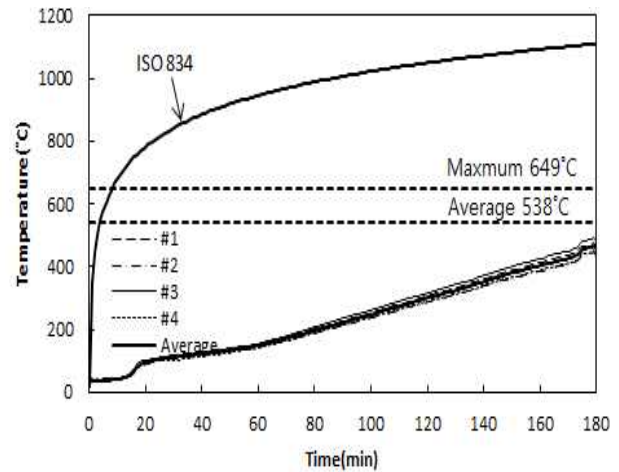
3.2 내화성능

3.2.1 주철근 온도

Figure 8에 PET섬유를 0.05vol.% 혼입한 설계기준강도 60MPa 고강도 콘크리트 기둥 부재의 3시간 내화시험 결과를 나타내었다. 피복 두께가 30mm인 시험체(#1)의 경우 (Figure 8(a)) 대략 150분 후에 주철근 평균온도가 545°C로 기준온도(538°C)를 초과하였고, 180분 후에 주철근 최고온도가 656°C로 기준온도(649°C)를 초과하는 것으로 나타났다. 피복 두께가 40mm인 시험체(#2)의 경우(Figure 8(b)) 180분 후에 주철근 평균온도와 최고온도가 각각 465°C와 474°C로 주철근 온도 기준을 충분히 만족하였으며 피복두께가 10mm 증가로 주철근 평균 및 최고 온도가 약 28% 정도 감소하는 것으로 나타났다(Figure 9).



(a) #1 specimen (cover depth 30mm)



(b) #2 specimen (cover depth 40mm)

Figure 8. Fire test result

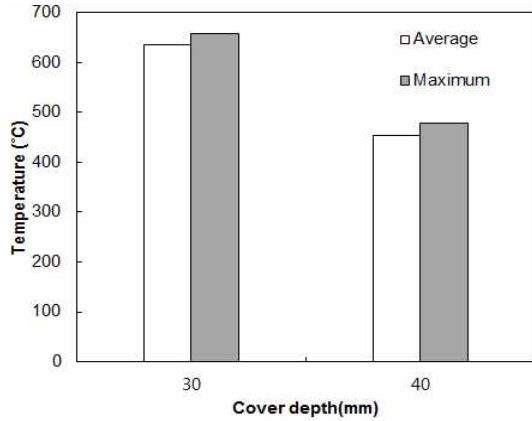


Figure 9. Temperature reduction by cover depth

또한 기존 연구에 의하면[6,14,16] 각형기둥의 경우 상대적으로 비표면적이 큰 모서리 부분에 열이 집중하여 모서리 부분의 주철근 온도가 다른 부위의 주철근 온도보다 큰 것으로 나타나지만 원형기둥의 경우 주철근에 발생하는 온도가 측정 위치에 따라 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. Figure 10에 기존 연구와 본 연구의 주철근 최고온도와 주철근 평균 온도와의 관계를 나타내었다. 각형 기둥의 경우 주철근 최고 온도가 평균온도보다 16~30%정도 높은 것으로 조사되었지만, 본 실험에서 사용된 원형기둥의 경우 주철근 최고온도와 평균온도의 차이가 1~2% 수준으로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

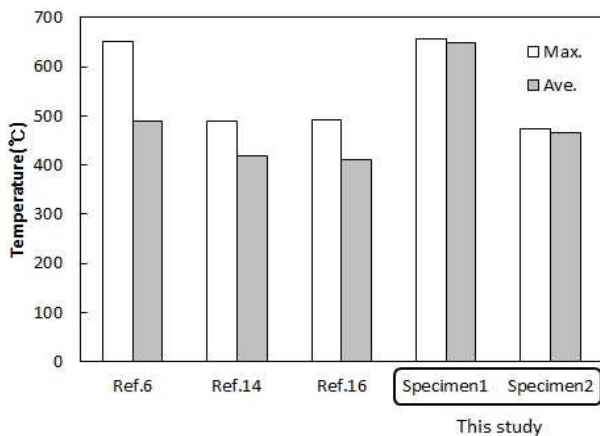


Figure 10. Comparison between maximum and average temperature

3.2.2 외관 조사

Figure 11은 내화시험 종료 후, 시험체 외관 검사 결과를 나타내었다. 시험체(#1)에서 일부 폭발현상이 발생하였지만

#1, #2 모든 시험체 전반에서는 폭발현상이 발생하지 않았다. 그 이유는 256°C(Table 1)의 용융점을 갖는 PET섬유가 녹아서 생긴 빈 공간에 의해 콘크리트 내부의 수증기들이 외부로 배출되어 수증기압이 감소되었기 때문인 것으로 판단된다. 0.05vol.% PET섬유의 보강으로 고강도 콘크리트 폭발현상을 제어하였지만, 피복두께 30mm에서는 주철근 온도 기준을 만족시키지 못하는 것으로 나타나, 폭발이 방지되더라도, 국내 고시기준을 만족하기 위해서는 최소 피복두께 40mm 이상을 확보하는 것이 필요할 것으로 판단된다.



(a) Before (b) After
Figure 11. Appearance of specimen

4. 결 론

본 연구에서는 직경 700mm의 고강도 콘크리트 원형기둥을 대상으로 3시간 내화시험을 실시하였고, 피복두께별 주철근 온도변화와 내화시험 후의 시험체 외관조사를 실시한 결과, 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 0.05vol.% PET섬유를 혼입한 60MPa 고강도 콘크리트의 슬럼프 플로우와 공기량의 경시변화 물성은 모두 KS F 4009의 기준을 만족하였고, 재령 28일 압축강도 역시 68.4MPa로 설계기준강도를 만족하였다.
- 피복 두께가 30mm인 시험체(#1)의 경우 주철근 평균온도와 최고온도 규정을 만족시키지 못하는 것으로 나타났지만 피복 두께가 40mm인 시험체(#2)의 경우 주철근 평균온도와 최고온도 규정을 모두 만족한 것으로 나타났으며, 피복두께 10mm 증가에 따라 주철근 평균 및 최고 온도가 약 28%감소한 것으로 나타났다.

- 3) 각형기둥을 대상으로 한 기존 내화 연구에 의하면 상대적으로 비표면적이 큰 모서리 부분에 열이 집중하여 모서리 주철근 온도가 다른 부위의 주철근 온도보다 높게 나타났으나, 원형기둥을 대상으로 한 이번 연구에서는 온도편차가 적게 나타났다. 이는 주철근의 비표면적이 서로 같이 때문인 것으로 사료되나, 추가적인 실험을 통해 검증할 필요가 있을 것으로 판단된다.
- 4) 0.05vol.% PET섬유의 보강으로 모든 시험체에서 폭렬현상이 발생하지 않았지만 피복두께 30mm에 해당하는 위치에서의 주철근 온도는 기준을 만족시키지 못하는 것으로 나타났으므로 최소 피복두께를 40mm 이상 확보하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

요 약

본 연구에서는 PET섬유(혼입율: 0.05vol.%)로 보강된 60MPa 고강도 콘크리트의 내화특성을 검토하였다. 특히 원형 기둥에 대한 내화실험 결과가 아직까지 없기 때문에 콘크리트 원형기둥을 대상으로 내화시험을 실시하였다. 그 결과 PET섬유가 고강도 콘크리트 폭렬 제어에 효과가 있는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 피복두께 30mm 시험체에서는 주철근 온도규정을 만족시키지 못하는 것으로 나타났고 피복두께 40mm 시험체에서는 주철근 온도규정을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 내화성능을 만족하기 위해서는 40mm 이상의 피복두께가 필요할 것으로 판단된다.

키워드 : PET섬유, 내화특성, 고강도 콘크리트 원형기둥, 피복두께

References

1. Kim GY, Lee TG, Kim YS, Nam JS, Lee SH, Technology of Fire Resistance Performance of High Strength Concrete Column, Magazine of the Korea Concrete Institute, 2012 Jan;24(1):51-5.
2. Yeo IH, Criteria for Fire Resistant Performance Evaluation of Reinforced Concrete Members, Magazine of the Korea Concrete Institute, 2014 Nov;26(6):43-6.
3. Ministry of Land & Transport and Maritime Affairs, Notification, No.2008-334 Fire Resistance Performance Management Standard for Column & Girder of the High Strength Concrete, Seoul, Korea, 2008 Jul.
4. Nishida A, Ymazaki N, Inoue H, Schneider U, Diederichs U, Study on the Properties of High-Strength Concrete with Short Polypropylene Fiber for Spalling Resistance, Proceed -ings of International Conference on Concrete under Severe Conditions(CONSEC'95,). 1995 Feb;2(1):1141-50.
5. Atkinson T, Polypropylene Fibers Control Explosive Spalling in High-Performance Concrete, Japan Concrete Institute, 2004;38(10):69-70.
6. Song YC, Kim YR, Kim OJ, Lee DB, Evaluation on Fire Resistance Performance of High Strength Concrete Containing Fibre, Journal of the Korea Institute of Building Construction, 2010 Oct;10(5):129-36.
7. Purkiss J A, Steel Fiber Reinforced Concrete at Elevated Temperatures, International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 1984;6(3):179-84.
8. Lie T T, Kodur V K R, Thermal and Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete at Elevated Temperatures, Canadian Journal of Civil Engineering, 1996;23:511-17.
9. Suhaendi S L, Takashi H, Effect of Short Fibers on Residual Permeability and Mechanical Properties of Hybrid Fibre Reinforced High Strength Concrete after Heat exposition, Cement and Concrete Research, 2006;36:1672-78.
10. Won JP, Park CG, Kim HH, Lee SW, Effect of Recycled PET Fiber Geometry and Length on the Plastic Shrinkage Cracking of Cement Based Composites, Journal of the Korea Concrete Institute, 2007 Apr;19(2):233-39.
11. Kim SB, Kim JH, Han BG, Hong GH, Song JG, An Experimental Study on the Creep Behavior and Crack Resistance of Hwangtoh Concrete Mixed with Recycled -PET Fiber, Journal of the Korea Concrete Institute, 2009 Jun;21(3):265-73.
12. Vachirapanyakun S, Lim MK, Choi DU, Seismic Performance of Circular RC Columns Retrofitted Using Ductile PET Fibers, Journal of the Korea Concrete Institute, 2016 Jun;28(3):289-98.
13. Stephen L, Rosen, Christopher S, Brazel, Fundamental Principles of Polymeric Materials, 3rd rev. ed, New York: Wiley; 2012, 107 p.
14. Song YW, Yoon S, Jeong Y, Gong MH, Properties of Fire Resistance of High-Strength Concrete with Diameter and Fiber Content of PET Fiber, Conference of the Korea Concrete Institute, 2009 Spring;21(1):475-6.
15. Ministry of Land & Transport and Maritime Affairs, Standard for Concrete Structure, Seoul, Korea, pp.86, 2012
16. Youm KS, Jeon HK, Kim HY, Fire Test of Fiber Cocktail Reinforced High Strength Concrete Columns without Loading, Conference of the Korea Concrete Institute, 2009 Aug;21(4):465-71.