한국농공학회논문집
제50권 제1호

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, JAN. 2008, pp. 49-57

폴리올레핀계 구조용 합성섬유보강 콘크리트의 휨성능 및 화재 저항성

Flexural Performance and Fire Resistance of Polyolefin Based Structural Synthetic Fiber Reinforced Concrete

박찬기* · 원종필*,†

Park, Chan Gi* · Won, Jong Pil*,†

Abstract

This study evaluated the flexural properties and fire resistance of polyolefin based structural synthetic fiber reinforced concrete. The effects of differing fiber length, dimension and fiber volume fraction were studied. Flexural and fire resistance test were conducted in accordance with the JCI SF-4 and RABT time heating temperature curve, respectively. The Flexural test results indicated that the polyolefin based structural fiber reinforcement showed an ability to increase the flexural toughness and good fire resistance significantly(as compared to steel fiber reinforcement).

Keywords : Flexural properties, Flexural toughness, Fire resistance, Polyolefin based structural synthetic fiber

I. 서 론

농업수리 콘크리트 구조물에 있어서 섬유보강 콘크리트의 적용은 기계화 경작로 포장에 균열 방지를 위하여 사용되는 와이어매쉬를 대체하여 1990년대 후반과 2000년대 초반에 폴리프로필렌섬유가 널리 적용되면서 도입되기 시작하였다(Won 등, 2002). 보강섬유가 적용되는 주요이유는 와이어 매쉬의 설치 곤란, 와이어 매쉬를 사용함에 따른 재료 및 시공가격 상승에 따른 경제성의 문제를 해결하고자 하는 것이다(원종필 등, 2002). 그러나 기계화 경작로 포장을 포함한 포장콘크리트 구조물의 경우 일반적인 초기 소성수축 및 건조수축에 의한 균열 뿐만아니라 장기적으로 교통하중에 노출되는 콘크리트 구조물로서 각종 하중에 의한 균열 및 파괴가 발생할 가능성이 있는 구조물이다(Ezeldin 등, 1991). 따라서 일반적인 수축균열 뿐만 아니라 윤하중을 포함한 각종 하중과 이와 같은 하중이 반복되는 피로하중에 견딜 수 있는 구조용섬유의 적용이 필요하다(Ezeldin 등, 1991). 최근 들어 농업수리구조물을 포함한 다양한 수리구조물에 있어서 섬유보강 콘크리트 적용의 필요성이 부각되고 있다(Heere 등, 1999). 외국의 경우 수리구조물의 건설 및 보수공사시 매우 협소한 지역에서의 철근 배근과 와이어매쉬의 설치 곤란에 따른 공사기간의 연장 등의 문제점을 해결하기 위하여 섬유보강 콘크리트의 적용이 검토되고 있다(Heere, 1999; Mirza,

* 공주대학교 지역건설공학전공
** 건국대학교 사회환경시스템공학과
† Corresponding author. Tel.: +82-2-450-3750
Fax: +82-2-2201-0907
E-mail address: jpwon@konkuk.ac.kr

1991; McDonald, 2000). 캐나다의 경우 수로구조물에 균열방지 및 성능 향상을 위하여 강섬유보강 콘크리트가 적용되었다(Heere, 1999; Campbell, 1999). 강섬유보강 콘크리트는 휨인성 등을 향상시켜 구조적인 안전성을 확보할 수 있는 재료로 수축균열 뿐만 아니라 구조적인 균열의 발생 및 성장을 제어할 수 있는 구조용섬유로서의 특성을 가지고 있다(Armelin 등, 1997; Chern 등, 1990; Singh 등, 2001). 그러나 강섬유는 비중이 크기 때문에 콘크리트 자체중량이 커지며 작업시 강섬유의 노출로 인한 안전성에 문제가 있다(Won 등, 2006). 결정적으로 수리구조물 및 수분과 접촉하거나 노출될 가능성이 있는 구조물에 적용할 경우 강섬유의 부식으로 인하여 구조성능이 저하될 가능성을 가지고 있다(Kosa, 1990). 콘크리트 구조물에서 강섬유의 부식은 강섬유 팽창으로 인한 콘크리트구조물의 균열 발생 및 성장 그리고 궁극적으로 콘크리트의 탈락을 유도하는 한편 부식된 강섬유는 팽창 후 단면의 손실로 인하여 구조성능의 저하를 발생시키게 된다(Nordstrom, 2000). 따라서 외국의 경우 수리구조물에 강섬유를 적용할 경우 부식에 대한 문제를 해결하기 위하여 라텍스와 같은 폴리머재료를 이용하여 부식에 대한 문제를 해결하고 있다(Xu, 2003; Chen 등, 1996). 강섬유보강 콘크리트의 또 다른 적용분야는 농산물을 포함한 상업용 제품을 저장할 수 있는 지하저장시설 등 지하공간 콘크리트 구조물이 있다(Cengiz, 2004). 해외의 경우 주요 저장시설을 포함한 지하공간의 주요지보재로서 강섬유보강 숏크리트를 이용하고 있다(Balagure 등, 1992). 국내의 경우도 일부 저장시설을 지하공간을 이용하고 있으나 국토이용의 효율화 측면에서 더욱 많은 다양한 제품 등을 지하공간을 이용하여 저장할 수 있는 시설의 유치가 필요하다. 지하저장고의 건설시 필요한 요구사항 중에 하나가 화재에 대한 저항성을 확보하는 것이다(Gabriel, 2003). 화재에 대한 저항성은 지하공간 시설뿐만 아니다 주거시설, 상업용 콘크리트 구조물에도 요구된다(Stefopoulos 등, 2007; Park 등, 2006). 화재가 발생하면 콘크리트는 온도 상승에 따라 내부 특성이 변화하며 특히 화재로 인한 수증기, 열기, 공기압 등이 팽창하여 콘크리트가 폭발하는 폭렬현상이 발생하게 되는데 이는 콘크리트 구조물의 안전성에 심각한 영향을 미칠 수 있다(Pierre 등, 2001). 따라서 현재 콘크리트 구조물의 화재에 대한 안전성을 확보하고자 하는 연구가 다양하게 진행되고 있다(kodur 등, 2004). 본 연구에서는 구조용섬유인 강섬유의 부식에 대한 저항성과 화재 저항성을 확보할 수 있는 방법으로 폴리올레핀계 구조용 합성섬유에 대한 평가를 실시하였다. 폴리올레핀계 구조용 합성섬유는 강섬유가 가지고 있는 구조성능을 발휘하면서 누수 및 수분과 접촉할 가능성이 있는 구조물에 보강재료로 적용가능성이 크다(Banthia 등, 2000; Won 등, 2007). 또한 융점이 약 165℃ 정도로 화재 발생시 콘크리트의 폭렬온도인 200℃에 도달하기 전에 섬유가 융해되어 폭렬을 억제할 수 있다(BarChip Synthetic Reinforcing Fiber, 2007).

본 연구에서는 상기와 같은 특성을 가진 폴리올레핀계 구조용 합성섬유의 길이, 두께와 같은 기하학적 형상과 섬유의 혼입률에 따른 휨성능과 화재저항성을 평가하고자 하였다.

II. 실험계획 및 방법

1. 폴리올레핀계 구조용 합성섬유

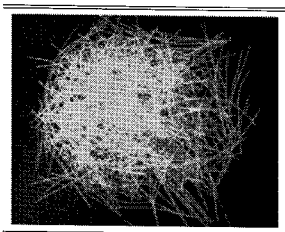
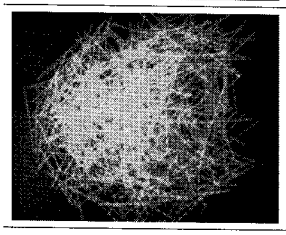
폴리올레핀계 구조용 합성섬유는 자체비중이 작고 합성섬유로서 강섬유가 가지고 있는 부식에 대한 우려가 없으며 각종 화학적 환경에 대한 저항성이 우수하다. 또한 폴리올레핀계 구조용 합성섬유는 crimped type으로 콘크리트 모체와의 부착성능을 향상시켰으며 섬유의 길이 및 단면적을 변화시켰다. 섬유의 형상 및 물리·역학적 특성은 Table 1과 같다.

2. 시멘트 및 골재

H사의 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 잔골재는 비중 2.6, 조립율 2.86 및 흡수율 0.67의 강모래를 사용하였다. 굵은 골재는 최대치수 13mm, 비중 2.65의 부순골재를 적용하였다.

3. 배합설계

Table 1 Properties of polyolefin based structural synthetic fiber

Fiber type	Dimension (mm)	Length (mm)	Density (kg/m^3)	Elastic modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Melting temperature(℃)	Ultimate elongation (%)
	0.1×0.3	30, 50	0.91	4,626.62	470.5	164	15.30
	0.7×1.4						

폴리올레핀계 구조용 합성섬유의 형상에 따른 성능을 평가하기 위하여 섬유보강 콘크리트 목표 휨강도를 4.5MPa으로 설정하여 이를 만족 하는 Table 2와 같은 배합을 실시하였다. 배합에서 굵은 골재의 최대치수는 13mm로 고정하였고 목표 슬럼프 값 10±2 cm와 공기량 5±1%를 만족하도록 AE 감수제를 조절하였다. 구조용 합성섬유는 콘크리트 배합에 9kg/m^3 (fiber volume fraction: 1%) 및 18kg/m^3(fiber volume fraction: 2%)을 첨가하였고 강섬유는 양단 후크형태의 30mm길이의 섬유를 휨거동을 비교하기 위하여 현재 가장 널리 적용되고 있는 40kg/m^{3}과 60kg/m^{3}을 첨가하였다(Won 등, 2004).

Table 2 Mix proportions of the concrete

Type of mixture	W/C (%)	S/a (%)	(kg/m^3)								
			W	C	Fine agg.	Coarse agg	Fibers				
							Structural				SF*****
							SM 30*	SM 50**	LM 30***	LM 50****	
SM 30: 1%	45	60	203	450	947	634	9	-	-	-	-
SM 30: 2%							18	-	-	-	-
SM 50: 1%							-	9	-	-	-
SM 50: 2%							-	18	-	-	-
LM 30: 1%							-	-	9	-	-
LM 30: 2%							-	-	18	-	-
LM 50: 1%							-	-	-	9	-
LM 50: 2%							-	-	-	18	-
SF 40							-	-	-	-	40
SF 60							-	-	-	-	60

* : Small dimension fiber, 30 mm length
** : Small dimension fiber, 50 mm length
*** : Large dimension fiber, 30 mm length
**** : Large dimension fiber, 50 mm length
***** : Hooked type steel fiber

III. 실험방법

1. 휨성능

보강섬유를 적용하는 주요 목적 중에 하나는 콘크리트의 첫 번째 균열 후 거동을 향상시키기 위한 것이다. 콘크리트의 균열 후 거동은 에너지 흡수능력 휨인성으로 정의할 수 있다(Armelin, 1997). 본 연구에서는 JCI-SF4(Method of tests for flexural strength and flexural toughness of fiber reinforced concrete) 기준에 따라 폴리올레핀계 합성섬유보강 콘크리트의 휨시험을 실시하였으며 시험공시체는 150×150×550mm의 각주형 공시체를 제작하였으며 재령 28일 측정하였다.

2. 내화시험

폴리올레핀계 구조용 합성섬유보강 콘크리트의 내화성능 평가는 Fig. 1에 보여 지는 RABT곡선을 사용하였다. RABT곡선은 Eureka 499 프로젝트의 결과물로 독일에서 개발되었으며 밀폐된 공간(터널 등)에서 화재가 발생하였을 경우 급격한 온도의 증가를 모사한 온도분포 곡선이다(Haukur 등, 2004).

IV. 시험결과 및 고찰

1. 하중-처짐 곡선

폴리올레핀계 구조용 합성섬유보강 콘크리트의 휨하중-처짐 거동은 Fig. 2와 같다. 시험결과 강섬유는 섬유 혼입률 40kg/m^{3}과 60kg/m^{3}에서 모두 첫 번째 균열 발생 후 처짐이 증가함에 따라 하중도 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 폴리올레핀계 구조용 합성섬유는 첫 번째 균열 발생 후 처짐이 증가함에 따라 휨하중이 증가하는 경향을 보여주고 있다. Fig. 2의 폴리올레핀계 구조용 합성섬유의 거동을 살펴보면 크게 2가지 거동으로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째 거동은 첫 번째 균열 발생 후 처짐이 증가함에 따라 휨하중도 증가하다가 궁극적인 파괴가 발생하는 경우이다. 두 번째 거동은 첫 번째 균열 발생 후 초기에는 처짐이 증가함에 따라 휨하중도 증가하지만 궁극적으로는 처짐이 증가함에 따라 휨하중이 감소하면서 파괴되는 경우이다. 첫 번째 거동의 경우 두께가 두껍고 길이가 긴(LM: 50 mm) 섬유에서 나타나고 있으며 두 번째 거동은 두께가 두껍고 길이가 짧은 섬유(LM: 30 mm)와 길이에 상관없이 두께가 얇은 섬유(SM: 50 mm 및 30 mm)에서 나타나고 있다. 또한 동일한 직경의 경우 길이가 긴 섬유가 휨하중-처짐 곡선이 상대적으로 우수한 경향을 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 형상비(길이/직경)가

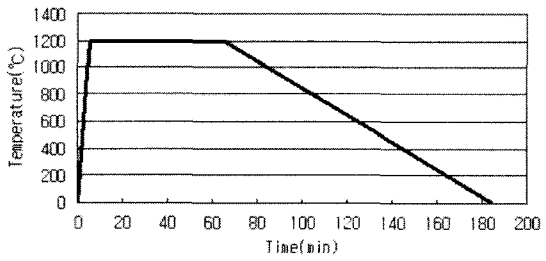
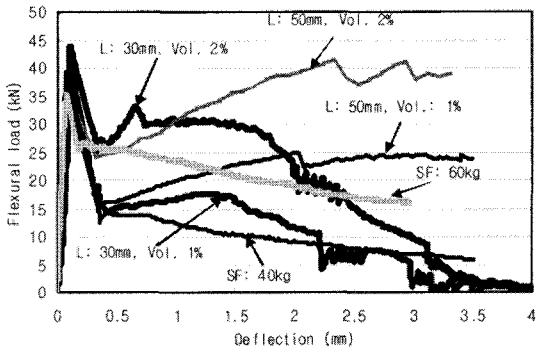
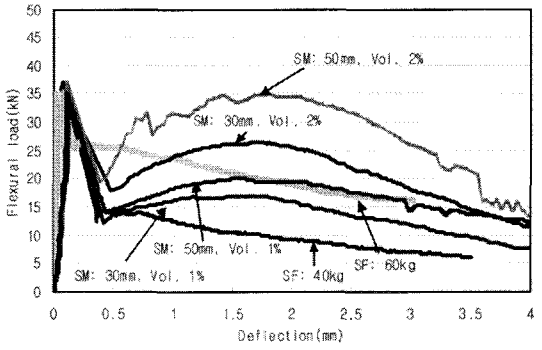


Fig. 1 Time-temperature curve



(a) Large dimension fiber



(b) Small dimension fiber

Fig. 2 Flexural load vs deflection behavior

큰 50mm 섬유가 콘크리트에서 인발되기 위한 정착길이가 상대적으로 크기 때문에 나타나는 결과로 휨인성 측면에서는 형상비가 큰 섬유가 유리하다는 것을 알 수 있다. 그러나 동일한 길이에서는 두께가 두꺼운 섬유가 처짐이 증가할수록 휨하중도 증가하다가 궁극적으로 파괴되는 거동을 나타내는데 비하여 두께가 얇은 섬유는 일정한 처짐까지는 처짐이 증가할수록 하중도 증가하지만 궁극적으로는 처짐이 증가함에 따라 휨하중이 감소하면서 파괴되는 경향을 보여주었다. 즉 형상비는 두께가 얇은 섬유가 크지만 휨하중-처짐 거동은 상대적으로 나빠지는 결과를 나타내었다. 이는 두께가 얇은 섬유의 경우 한 개의 섬유가 받을 수 있는 하중이 두께가 두꺼운 섬유가 받을 수 있는 하중보다 작기 때문에 일정한 휨하중에 도달하면 섬유가 파괴되거나 인발되기 때문에 나타난 결과이다.

2. 휨강도

폴리올레핀계 구조용 합성섬유와 강섬유를 혼입한 섬유보강 콘크리트의 휨강도시험 결과는 Fig. 3과 같다. 시험결과 강섬유 혼입률과 폴리올레핀계 구조용 합성섬유의 혼입률 및 길이 두께에 의한 휨강도의 큰 차이는 없었다. 이와 같은 결과는 본 연구에서 콘크리트 배합의 목표 설계 휨강도를 4.5MPa로 설정하였기 때문이다.

3. 휨인성

강섬유 및 폴리올레핀계 구조용 합성섬유의 휨인성 시험결과는 Fig. 4와 같다. 시험결과 구조용 합성섬유는 강섬유 혼입률 40kg/m^3 보다는 모두 우수한 휨인성 결과를 보여주었다. 그러나 강섬유 혼입률 60 kg/m^{3}과 비교하면 섬유 혼입률 9kg/m^{3}에서는 두께가 두꺼운 50mm 섬유를 제외하고는 모두 휨인성이 작게 나타났고, 18kg/m^{3}을 혼입한 모든 배합은 강섬유를 혼입한 배합보다 휨인성이 크게 나타났다. 섬유의 길이에 따른 결과는 섬유의 길이가 30mm에서 50 mm로 증가할수록 휨인성이 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 콘크리트에 정착되어 있는 섬유의 길이가 길면 인발에 필요한 강도가 증가하고 섬유가 효과적으로 인장응력을 전달하면서 균열의 성장을 최대한으로 억제하기 때문이다. 동일한 섬유 길이에서는 두께가 두꺼운 섬유가 휨인성이 크게 나타났다. 일반적으로 섬유의 형상비가 크면 콘크리트의 성능이 우수해진다. 그러나 본 연구에서는 일반 균열제어용 섬유가 아닌 구조용 섬유로 폴리올레핀계 합성섬유를 적용을 하였기 때문에 한 개의 섬유가 받을 수 있는 휨하중이 섬유의 두께가 커질수록 크기 때문에 형상비가 작더라도 두께가 두꺼운 섬유의 휨인성이 크게 나타났다. 따라서 두께가 두껍고 길이가 가장 긴 LM 50 섬유가 섬유 혼입률에 관계없이 가장 우수한 성능을 보여주었다.

4. 내화시험

폴리올레핀계 구조용 합성섬유를 콘크리트의 적용하였을 때 화재저항성을 평가하기 위하여 화재시험 전후의 표면관찰과 잔류휨강도를 측정하였다. 일반적으로 강섬유보강 콘크리트는 화재가 발생하여 콘크리트의 온도가 200℃로 상승하면 콘크리트가 폭발하는 폭렬현상이 발생하는 것으로 알려져 있다(Suhaendi

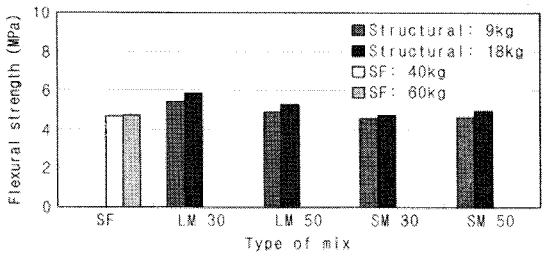


Fig. 3 Flexural strength results

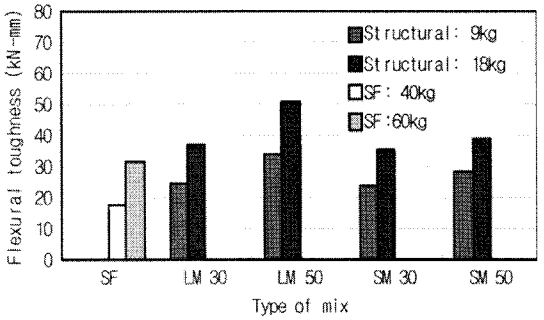
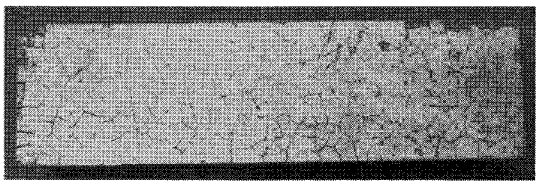
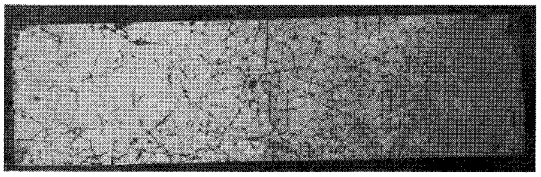


Fig. 4 Flexural toughness results

등, 2006; Tatnall, 2002). 따라서 본 연구에서는 강섬유보강 콘크리트는 폭렬이 발생한다고 판단하여 화재시험을 실시하지 않았다(Chen 등, 2006). 그러나 폴리올레핀계 구조용 합성섬유의 화재저항성에 대한 평가는 거의 이루어지지 않았기 때문에 화재시험을 실시하였다. 시험결과 폴리올레핀계 구조용 합성섬유를 혼입한 공시체의 경우 폭렬은 발생하지 않았지만 표면에 다량의 균열이 발생하였다. 표면에 나타난 균열은 경우 섬유의 두께, 길이 및 섬유의 혼입률에 큰 영향이 받지 않았다. Fig. 5는 LM 50의 섬유혼입률에 따른 표면관찰결과를 보여준다. 섬유의 혼입률에 관계없이 거의 유사한 균열의 발생량을 볼 수 있다. Fig. 6은 화재 노출 후 콘크리트 공시체의 휨하중-처짐 곡선을 보여준다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 동일한 두께를 가진 섬유에서는 섬유 길이, 혼입률에 관계없이 휨하중 -처짐 곡선이 거의 동일함을 알 수 있다. 또한 섬유의 두께가 다른 경우 두께가 얇은 섬유가 첫 번째 균열의 발생 후 좀 더 작은 처짐에서 파괴가 발생함을 알 수 있다. Fig. 7은 콘크리트 내화실험 후 표면을 절단하여 관찰한 결과이다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 화재 시험 후 폴리올레핀계 구조용 합성섬유의 융해로 인하여 공극이 발생하였음을 알 수 있다. 또한 부분적으로 화재에 영향을 받은 깊이에 있는 폴리올레핀계 구조용 합성섬유의 경우 융해가 발생하고 있으며 화재에 영향을 받지 않은 부분에는 폴리올레핀계 구조용 합성섬유가 융해되지 않고 남아 있음을 알 수 있다. 내화 전·후의 잔류 휨강도 및 휨인성 시험결과는 Fig. 8 및 9와 같다. 시험결과 섬유 혼입률, 섬유의 두께 및 길이에 따른 화재시험 후 잔류휨강도 및 휨인성은 거의 차이가 발생하지 않았다. 화재시험 후 섬유의 길이 및 두께에 상관없이 대부분의 섬유가 화재에 영향을 받기 때문에 잔류 역학적 특성에는 큰 효과를 발휘하지는 않았다. 잔류휨강도 및 휨인성은 섬유의 두께, 길이 및 혼입률에 관계없이 모두 5~10%내외를 보여주었다 (Fig. 8 및 9). 따라서 화재 발생시 콘크리트가 영향을 받는 깊이 등에 대한 향후 연구가 필요할 것이다. 즉 콘크리트 구조물에 화재 발생시 폴리올레핀계 구조용 합성섬유는 폭렬을 방지하는 효과는 있지만 화재 발생 후 대부분의 강도를 손실하기 때문에 안전성에 문제가 발생하였다. 따라서 실제 구조물에 적용하기 위해서는 화재에 발생시 영향을 받은 부분까지는 제거하고 보수 하는 등의 방법을 적용하기 위해서

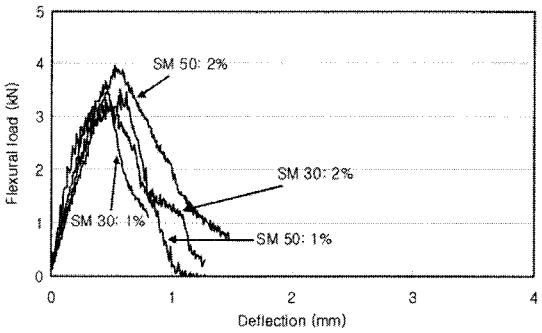


(a) Fiber volume fraction: 1%

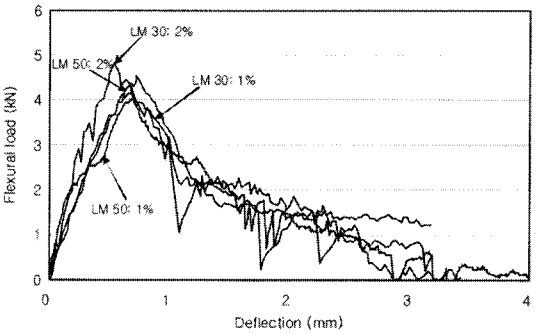


(b) Fiber volume fraction:2%

Fig. 5 Surface investigation of specimens after fire test: Mix No. LM



(a) Small dimension fiber



(b) Large dimension fiber

Fig. 6 Flexural load vs deflection behavior after fire test

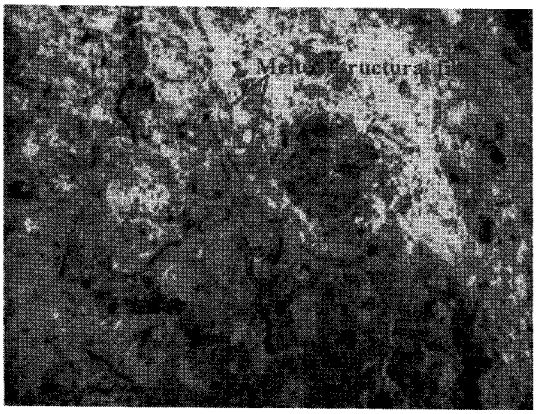
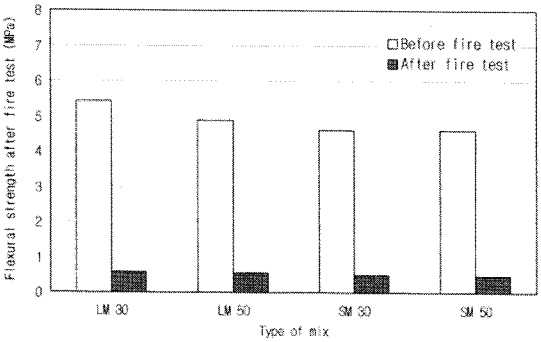
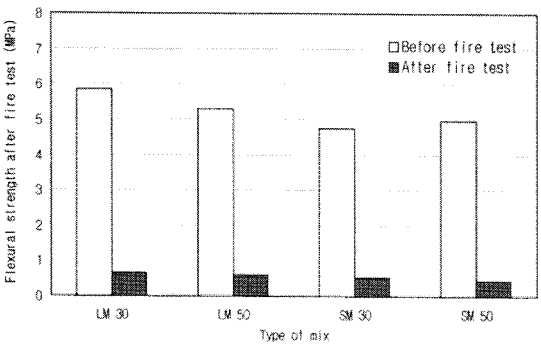


Fig. 7 Microstructural investigation of specimens after fire test



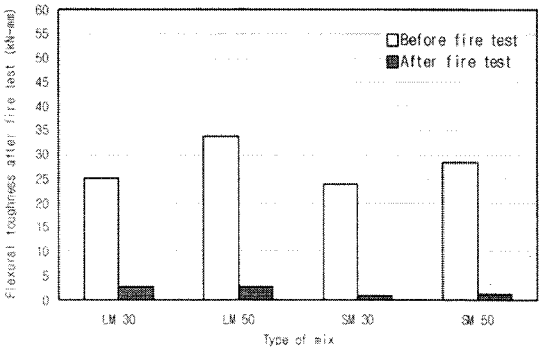
(a) Fiber volume fraction: 1%



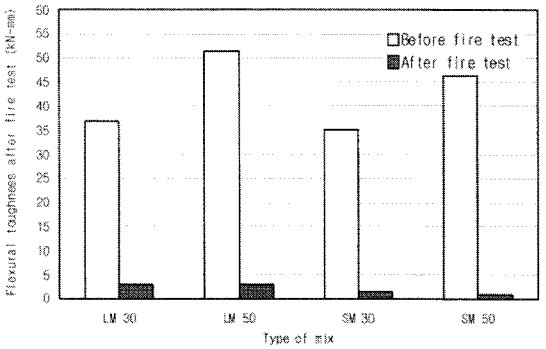
(b) Fiber volume fraction: 2%

Fig. 8 Flexural strength results before and after fire test

폴리올레핀계 구조용 합성섬유로 보강된 콘크리트의 내부 온도분포에 연구가 필요할 것이다. 그리고 화재시험결과 섬유의 혼입률이 1% 이상만 되면 콘크리트화재에 의한 폭렬을방지할 수 있었다.



(a) Fiber volume fraction: 1%



(b) Fiber volume fraction: 2%

Fig. 9 Flexural toughness results before and after fire test

V. 요약 및 결론

본 연구에서는 농업용 콘크리트 구조물에서 강섬유를 대체할 수 있는 폴리올레핀계 구조용 합성섬유 두께, 길이 및 혼입률의 변화에 따른 콘크리트의 성능을 평가하였다. 시험결과를 통한 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 폴리올레핀계 구조용 합성섬유의 두께, 길이 및 혼입률에 따른 휨성능 시험결과 휨강도는 콘크리트의 목표 설계 휨강도가 4.5MPa이기 때문에 섬유의 두께, 길이 및 혼입률에 상관없이 거의 비슷한 결과를 나타내었다.

2. 폴리올레핀계 구조용 합성섬유의 휨인성은 섬유의 두께 및 길이가 증가할수록 우수한 성능을 발휘하였다. 이는 섬유의 길이가 길수록 콘크리트 매트릭스에서의 정착길이가 길어져 휨하중 작용시 인발 및 파

괴에 대한 저항성이 커지기 때문이다. 또한 섬유의 두께 증가는 두께가 얇은 섬유에 비하여 각각의 섬유가 받을 수 있는 하중이 상대적으로 커지기 때문에 휨인성 증가에 효과가 있었다.

3. 폴리올레핀계 구조용 합성섬유의 첨가에 따른 콘크리트의 화재시험결과 섬유의 길이, 두께 및 혼입률에 관계없이 온도의 상승으로 인한 콘크리트의 폭렬은 방지하는 효과를 발휘하였다. 이는 폴리올레핀계 합성섬유는 약 165℃에서 섬유의 융해가 발생하여 콘크리트 내부의 수증기압 및 공극압을 효과적으로 배출할 수 있는 통로와 공간을 획득할 수 있기 때문이다.

4. 폴리올레핀계 구조용 합성섬유를 포함한 콘크리트의 화재시험 후 표면관찰결과 콘크리트의 표면은 다량의 균열이 발생하였다. 이와 같은 현상은 폴리올레핀계 합성섬유의 길이, 두께 및 혼입률에 관계없이 동일하게 나타났다. 이는 섬유의 길이, 두께 및 혼입률에 관계없이 모두 융해되어 화재 발생시 콘크리트 내부에 발생하는 수증기압과 공극압이 외부로 배출되면서 통로역할을 하는 균열과 콘크리트의 중성화 등으로 인한 균열이 발생하였기 때문이다.

5. 폴리올레핀계 구조용 합성섬유를 포함한 콘크리트의 화재시험 후 잔류 역학적 특성시험결과 섬유의 길이, 두께 및 혼입률에 관계없이 5～10% 내외의 잔류강도 및 인성을 나타내었다. 이는 섬유의 융해가 발생하면 콘크리트의 균열 및 공극이 다량으로 발생하기 때문이다.

References

1. A.K. Gabriel, 2003, Passive fire protection in tunnel, Concrete for the Construction Industry, Vol. 37, No. 2, pp. 31～36
2. A. Samer Ezeldin and Steven R. Lowe, 1991, Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Rapid-Set Materials, ACI Materials Journal, Vol. 88, No. 4, pp. 384-389
3. BarChip Synthetic Reinforcing Fiber, 2006, Product Data sheet, http://www.elastoplastic.com
4. B. Chen and J. Liu, 2004, Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures, Cement and Concrete Research, Vol. 34, No. 6, pp. 1065-1069
5. E. Nordstrom, 2000, Steel Fiber Corrosion in Cracks: Durability of Sprayed Concrete, Licentiate thesis, Division of Structural Engineering, Department of Civil and Mining Engineering, Lulea University of Technology, Sweden.
6. E.K. Stefopoulos, and D.G. Damigos, 2007, Design of emergency ventilation system for an underground storage facility, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 22, No. 3, pp. 293-302
7. H.S. Armelin and N. Banthia, 1997, Predicting the Flexural Postcracking Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete from the Pullout of Single Fibers, ACI Materials Journal, Vol. 94, No. 1, pp. 18-31
8. I. Haukur, and L. Anders, 2004, Recent Achievents Regarding Measuring of Time-Heat and Time-Temperature Development in Tunnel, Safe & Tunnels, First International Symposium, Prague, pp. 87～96
9. J. Mirza, 1991, Durability Properties of Overlays for Erosion-Damaged Concrete, ACI special publication, SP 126-15, Vol. 126, pp. 279-294
10. J. E. McDonald, 2000, Evaluation of Materials for Repair of Erosion Damage in Hydraulic Structures, ACI special publication, SP 192-54, Vol. 192, pp. 887-898
11. J.C. Chern and C.H. Young, 1990, Factors Influencing the Drying Shrinkage of Steel Fiber Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 87, No. 2, pp. 123-139
12. K. Pierre, C. Grégoire, and G. Christophe, 2001, High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibre from spalling to micro-

structure, Cement and Concrete Research, Vol. 31, No. 10, pp. 1487-1499
13. K. Kosa and A. E. Naaman, 1990, Corrosion of Steel Fiber Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 87, No. 1, pp. 27-37
14. N. Banthia, and C. Yan, 2000, Shrinkage cracking in polyolefin fiber reinforced concrete, ACI Materials Journal, Vol. 97, No. 4, pp. 432-437
15. O. Cengiz, L. Turanli, 2004, Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test, Cement and Concrete Research, Voll. 34, No. 8, pp. 1357-1364
16. Park, S-H, Oh, H-H. Shin, Y-S. Shin and Oh, S-J. Oh, 2006, A case study on the fire damage of the underground box structures and its repair works, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 21, No. 3-4, pp. 328
17. P.C. Tatnall, 2002, Shotcrete in fires: Effect of fibers on explosive spalling, Magazine of shtocrete, Fall, pp. 10-12
18. P.N. Balagure, and S.P. Shah, 1992, Fiber-Reinforced Cement Composites, McGraw-Hill, New York, pp. 2-8
19. P.W. Chen and D.D.L. Chung, 1996, Comparative Study of Concretes Reinforced with Carbon, Polyethylene, and Steel Fibers and Their Improvement by Latex Addition, ACI Materials Journal, Vol. 93, No. 2, pp. 129-146
20. R. Heere, D.R. Morgan, N. Banthia, and Y. Yogendran, 1996, Evaluation of Shotcrete Repaired Concrete Dams in British Columbia, ACI Concrete International, 18(3), 1996, pp. 24-33
21. S.L. Suhaendi, T. Horiguchi, 2006, Effect of short fibers on residual permeability and mechanical properties of hybrid fibre reinforced high strength concrete after heat exposition, Cement and Concrete Research, Vol. 36, No. 9, 2006, pp.1672-1678
22. S. P. Singh and S. K. Kaushik, 2001, Flexural Fatigue Analysis of Steel Fiber-Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 98, No. 4, pp. 306-312
23. V.K.R. Kodur, A. Bilodeau, and G.C. Hoff, 2004, Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire, Cement and Concrete Composite, Vol. 26, No. 2, pp. 163-174
24. Won, J-P, Baek, C-W, Park, C-G, and Jun, O-J, 2004, Performance of Steel Fiber Reinforced Shotcrete Using Alkali Free Based Accelerator, Journal of KSAE, Vol. 46, No. 3, pp. 65-72
25. Won. J-P, Lim. D-H, and Park, C-G, 2006, Bond behavior and flexural performance of structural synthetic fibre reinforced concrete, Magazine of concrete research, Vol. 28, No. 6, pp. 401-410
26. Won, J-P, Park, C-G, Jeong, I-S, and Jeon, W-J, 2002, Effect of Polypropylene Fiber on Reduction of Shrinkage Crack and Improvement of Durability of Rural Road Concrete Pavement, Journal of KSAE, Vol. 44, No. 1, pp. 134-141
27. Xu, H, Properties of Fiber Reinforced Concrete with Latex Modification, MSC thesis, University of British Columbia, 2003, Canada