PET FIBER를 혼입한 콘크리트의 숏크리트 터널 적용에 관한 연구
A Research on the Shotcrete Tunnel Application to Concrete mixing PET Fiber

김주석† 유상건* 이용준** 신현승*** 김은겸****
Kim, Joo-Seok Yoo,Sang-Geon Lee,Yong-Jun Shin Hyum-Seong Kim, Eun-Kyum

ABSTRACT

Resently, Fiber Reinforced Concrete is used for not only preventing crack of concrete but also reinforcing general methods. Steel Fiber and PP(poly-propylene) Fiber are usually used as fiber reinforced materials. However, using these materials for shotcrete on Railway tunnel can cause some problems such as damage of pressure hose and shotcrete rebound. In addition, Steel fiber is an expensive material and it can cause safety problems during applying to shotcrete. PP Fiber can cause a problem in fiber balling during applying to shotcrete railway tunnel construction.

A purpose of the research is applying a development of PET(Poly Etylene Terephtalate) fiber by recycling pet bottles to the shotcrete tunnel exposed to explosion spalling. To investigate the reinforcement effect of the PET fiber, some basic tests are accomplished to physical properties and explosion spalling by fire. As a result of the tests, a concrete mixing the PET fiber has stronger resistance effect in the explosion spalling by high temperature than another strong fiber concrete does, and that the former concrete is also equal or more effective on the result of the above tests to physical properties like compression and strain than the latter one is demonstrated.

1.서론

터널 공사에서 숏크리트를 타설할 때 철근이나 와이어매쉬를 사용할 경우 설치곤란, 부착력감소 등 여러가지 문제점이 발생하여 그 해결을 위한 새로운 보강재 개발이 요구되고 있다. 최근에는 터널 숏크리트 타설시 콘크리트의 균열저감 및 보강방법으로 섬유보강 숏크리트의 적용이 증가되고 있다. 섬유보강 콘크리트에 혼입되는 섬유는 강섬유가 일반적이며, PP(Poly Propylene)섬유의 사용이 검토되고 있다.

강섬유를 터널 숏크리트에 적용하면 압송호스의 마모손상 및 파열이 발생하며, 단가가 높고 섬유의 리바운드량이 많아 안전관리상 문제가 된다. 또한 강섬유는 터널에 화재가 발생할 경우 폭열이 발생하므로서 철근이 800℃ 이상의 고온에 노출되어 강도를 거의 기대할 수 없게 되는 문제점이 있다. 또한, PP섬유는 숏크리트에 다량 첨가할 경우 섬유뭉침 현상이 발생하고 타설할 때 리바운드량이 증가한다.

본 연구에서는 강섬유나 PP섬유를 혼입한 콘크리트를 터널용 숏크리트에 적용할 경우 발생할 수 있는 문제점을 보완할 수 있는 대체 재료로서 폐 PET병을 활용한 PET(Poly Etylene Terephtalate)콘크리트

† 책임저자 : 정회원, 국립서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 정회원
E-mail : concrete@snut.ac.kr
TEL : (02)970-6507 FAX : (02)948-0043
* 비회원, 서울도시철도공사 팀장
** 비회원, 포스코건설 팀장
*** 비회원. (주)동명건설엔지니어링 대표이사
****정회원, 국립서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수

용 섬유를 개발하는데 역점을 두었다. PET섬유를 콘크리트용 섬유로서의 사용이 가능할 경우 환경부하의 저감, 경제성 확보, 시공성의 개선 등이 기대된다. 본 연구에서는 PET섬유의 콘크리트용 보강재로서의 효과를 검토하기 위해 기본적인 물리적 특성 시험을 수행하였으며, 화재에 의한 폭열방지 효과 실험 등을 수행하였다. 그 결과 PET섬유를 혼합한 콘크리트는 강섬유 콘크리트에 비해 고온에 의한 폭열 효과가 있으며, 압축 및 인장 등 물리적 특성 시험 결과에 있어서도 PP섬유와 동등 이상의 효과가 있는 것으로 확인되었다. 본 연구 결과는 폭열 등에 대한 보다 상세한 실험 및 현장 숏크리트 시험 등을 통해 터널, 특히 화재 위험성이 있는 지하철 유치선 터널 등에 대한 적용성 검토를 수행할 예정이다.

2.실험개요

2.1 사용재료

2.1.1 시멘트, 골재 및 혼화재

시멘트는 S사의 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였다. 잔골재는 밀도 2.59g/cm인 해사를 사용하였고, 굵은골재는 최대치수 13mm, 밀도 2.61g/cm^3 인 부순굵은골재를 사용하였다, 유동성 및 시공성 확보를 위해 슬럼프 및 공기량의 시간적 변화가 적은 E사의 폴리카르본산계 고성능AE감수제를 사용하였다.

2.1.2 섬유

본 연구에서 사용된 섬유는 강섬유, PP섬유, PET섬유 등 3종이다. 표 1은 각각의 섬유에 대한 형상특성 및 물리적 성질을 나타낸 것이다. 강섬유의 단면형상은 원형이며, PP섬유 및 PET섬유는 모두 직사각형의 형상으로서 짧은 변의 길이를 지름으로 표시하였다

표 1. 시험에 사용된 각 섬유의 물리적 특성

	형상	길이(mm)	지름(mm)	형상비	인장강도(MPa)
강섬유	hooked end type	32	0.5	64	-
PP섬유	sinusoidal type	30	0.6	50	33
PET섬유	crimped type	30	0.6	50	90

강섬유 PP섬유 PET섬유

그림1. 본 연구에 사용된 섬유형상

2.2 섬유콘크리트의 배합 및 시험 방법

2.2.1 섬유콘크리트의 배합

표 2는 섬유를 혼합한 콘크리트의 배합설계 일람을 나타낸 것이다. 시멘트 사용량은 400kg과 450kg의 2종으로 하였으며, 잔골재율은 60% 및 70%의 2종류로 하였다. PET섬유의 역학적 특성을 고찰하기 위해 기준 배합으로서는 시멘트 450kg, 잔골재율 70% 물-결합재비 45%를 택하였으며, 섬유 첨가량은 용적비로 각각 0.5%, 1.0%, 1.5%로 하였다.

2.2.2 섬유콘크리트 시험체 제작 및 시험 방법

압축강도 및 압축인성 시험은 KCI-SF105, 휨강도 및 휨인성시험은 KS F 2566에 의해 실시하였다. 압축강도용 시험체는 φ100× 200mm의 원주형 표준공시체를 사용하였으며, 휨인성시험은 150× 150× 500mm의 각주형 공시체를 사용하였다. 또한 내화시험용 시험체는 압축강도용 시험체를 사용하였다.

표 2. 배합설계

구분		W/B (%)	Gmax (mm)	S/a (%)	단위량(kg/m^3)					
					W	C	S	G	섬유량	고성능감수제
PET 섬유	400-60-0.5	45	13	60	180	400	988	666	7.0	2.00
	400-60-1.0						980	660	14.0	2.67
	400-60-1.5						972	656	21.0	3.67
	400-70-0.5			70			1152	500	7.0	3.00
	400-70-1.0						1143	496	14.0	3.70
	400-70-1.5						1134	492	21.0	4.00
	450-60-0.5			60	202.5	450	928	626	7.0	0.67
	450-60-1.0						921	621	14.0	1.00
	450-60-1.5						913	616	21.0	1.33
	450-70-0.5			70			1083	470	7.0	1.25
	450-70-1.0						1074	466	14.0	1.50
	450-70-1.5						1065	462	21.0	1.75
강 섬유	450-70-0.5						1083	470	40.0	0.75
	450-70-1.0						1074	466	80.0	1.25
	450-70-1.5						1065	462	120.0	2.25
PP 섬유	450-70-0.5						1083	470	4.5	1.75
	450-70-1.0						1074	466	9.0	1.92
	450-70-1.5						1065	462	13.5	2.00

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 압축강도

그림2는 섬유혼입량과 압축강도와의 관계를 나타낸 것이며, 그림3은 이에 대한 압축인성 시험 결과를 나타낸 것이다. 압축강도는 강섬유를 혼합한 경우 가장 큰 값을 나타내고 있으며, 섬유혼입량의 증가에 따라 그 차는 작다. 특히, 섬유혼입량이 1.5%인 경우 PET섬유와 PP섬유의 압축강도는 거의 동일한 것으로 나타났다. 압축인성은 섬유혼입량이 증가할수록 섬유종류에 의한 차이는 커지고 있으며, 강섬유를 혼입한 경우 가장 큰 압축인성을 나타내었다.

그림4 및 그림5는 PET섬유의 경우, 시멘트량 및 잔골재율의 변화가 압축강도에 어떠한 영향을 미치는지를 고찰하기 위한 것이다. 이들 그림으로부터 섬유혼입량에 관계없이 시멘트량이 증가하더라도 압축강도 증진은 거의 없지만, 잔골재율이 70%에서 60%로 감소할 경우 압축강도는 10MPa 정도 증가한다.

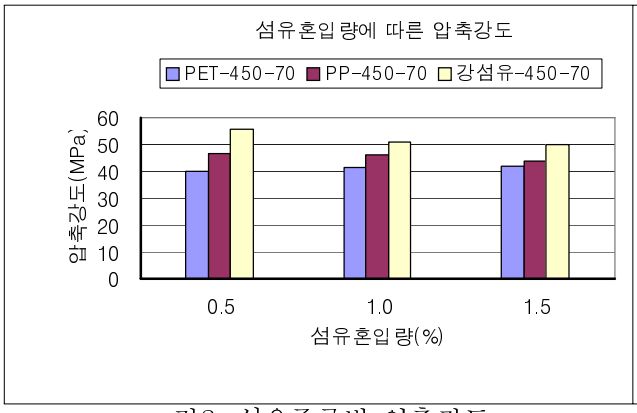

그림2. 섬유종류별 압축강도

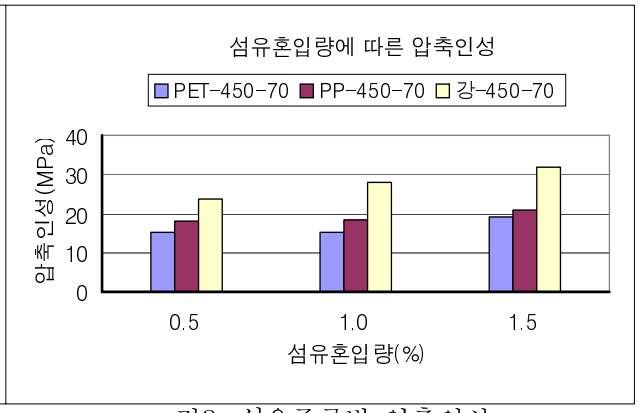

그림3. 섬유종류별 압축인성

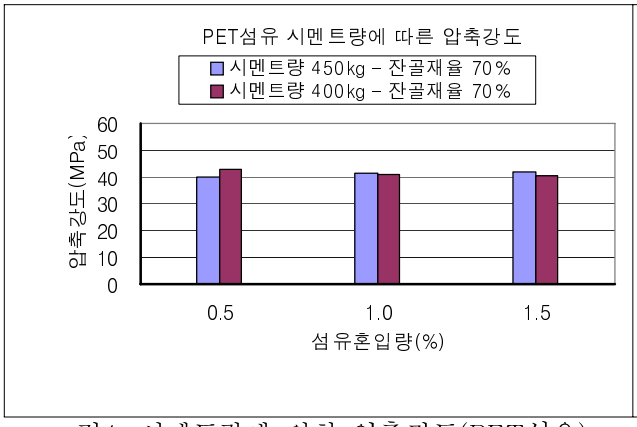

그림4. 시멘트량에 의한 압축강도(PET섬유)

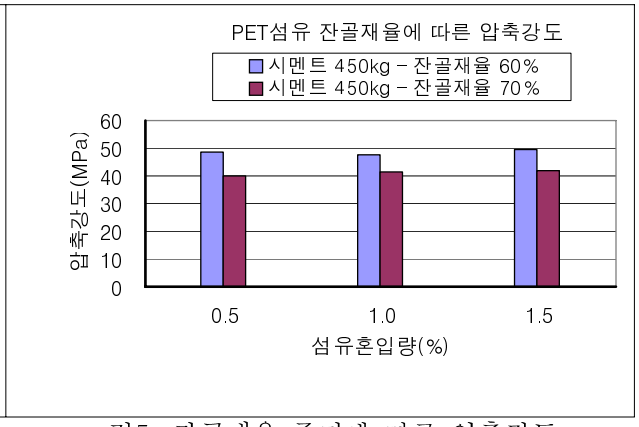

그림5. 잔골재율 증가에 따른 압축강도

3.2. 휨인성시험

일반적으로 섬유를 혼입한 콘크리트는 균열이 진행되면서 균열저항성, 충격저항성, 에너지 흡수성이 증대되고, 균열이 발생한 후에도 하중 전달 능력이 개선된다. 이들을 판단하는 척도로서 사용하고 있는 것이 휨인성지수이며, 콘크리트의 1차균열이 발생할 때까지의 탄성에너지와 섬유를 혼입함으로서 증가된 소성에너지의 비를 산출하였다.

그림6 ~그림11은 휨인성 실험 결과를 나타낸 것이다. 그림6으로부터 강섬유의 휨인성은 PET섬유나 PP섬유에 비해 크며, 특히 섬유혼입율이 증가할수록 그 경향은 현저하다. 그러나, PET섬유와 PP섬유의 휨인성 차는 없는 것으로 나타났다. 그림7 및 그림8은 휨인성지수를 나타낸 것이다. 강섬유와 PET섬유의 휨인성지수가 큰 반면, PP섬유의 휨인성지수는 상대적으로 낮은 값을 보였다. 특히 PET섬유의 휨인성지수는 강섬유에 근접하는 결과를 나타냄으로서 PET섬유의 에너지 흡수능력이 우수함을 알 수 있다. 특히, 그림9로부터 휨인성지수 수준이 높을수록 PET섬유 혼입량의 효과는 크다는 것을 알 수 있다.

그림10 및 그림11은 PET섬유의 경우 시멘트량과 잔골재율의 변화가 휨인성지수에 미치는 영향을 고찰하기 위한 것으로서 시멘트량이 증가하더라도 휨강도 증가가 없으며, 잔골재율을 70%에서 60%로 줄일 경우 휨강도는 1MPa 정도 증가하고 있음을 알 수 있다.

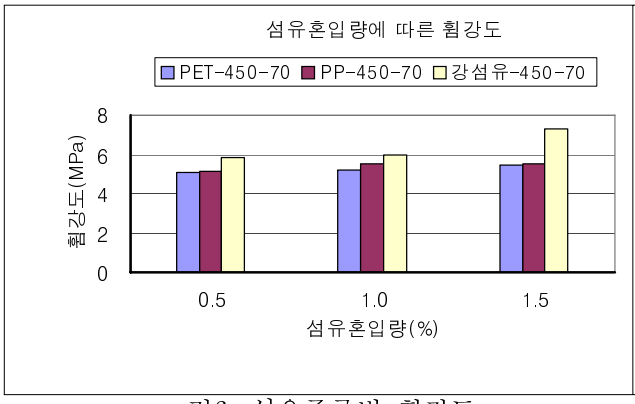

그림6. 섬유종류별 휨강도

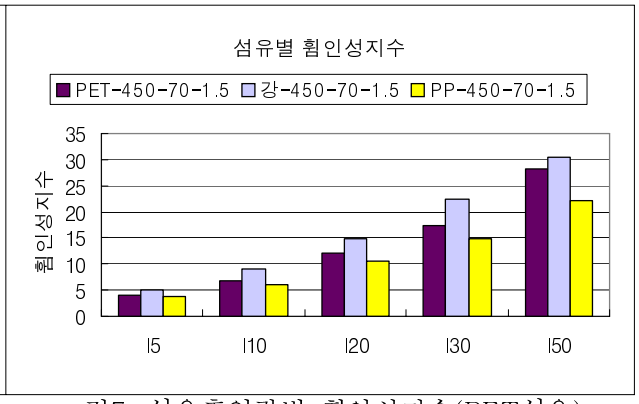

그림7. 섬유혼입량별 휨인성지수(PET섬유)

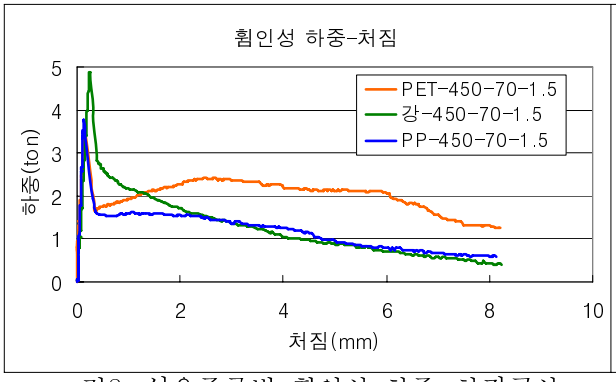

그림8. 섬유종류별 휨인성 하중-처짐곡선

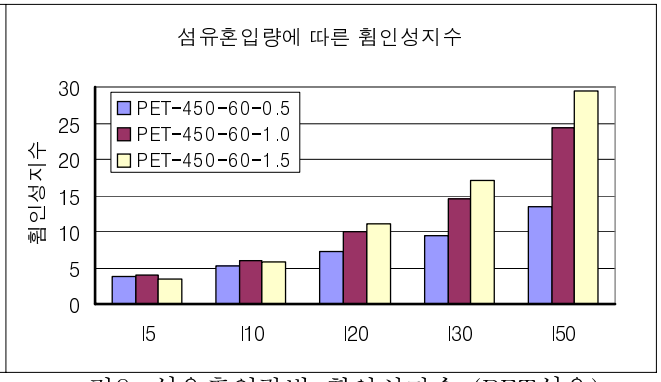

그림9. 섬유혼입량별 휨인성지수 (PET섬유)

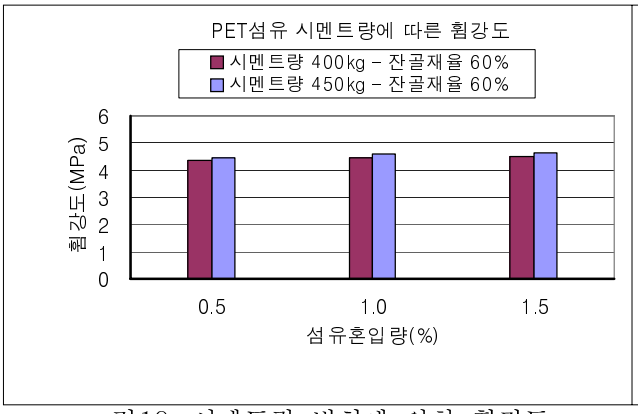

그림10. 시멘트량 변화에 의한 휨강도

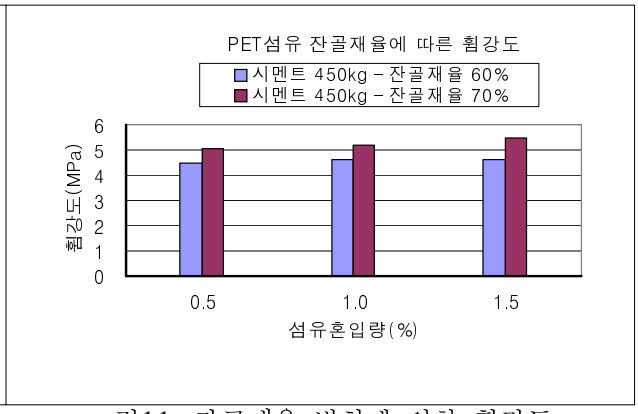

그림11. 잔골재율 변화에 의한 휨강도

3.3. 폭열시험

폭열(explosive spalling)은 화재시의 열로서 콘크리트가 박리 · 비산하는 현상이다. 콘크리트 파편이 폭발음과 함께 심하게 비산하기 때문에 박리와 구분하여 표현하고 있다. 콘크리트에서 폭열이 발생하는 주된 원인은 아직 명확하지는 않지만, 대체적으로 가열에 의한 콘크리트 내부의 수증기압의 상승 또는 열응력에 기인하는 것으로 밝혀져 있다. 폭열은 철근콘크리트 구조물에 치명적인 손상을 주지만, 폭열 방지가 가능하다면 피복콘크리트에 의해 철근의 온도상승이 억제되어 구조물의 내하력 저하를 억제할 수가 있다.

이노우에의 연구에 의하면 콘크리트의 함수률이 3.5% 이하이면 물-시멘트비나 골재의 암종에 관계없이 폭열이 발생하지 않는다고 하며, 와타나베의 연구에 의하면 고강도콘크리트에서 함수률이 3.9% 이하면 폭열이 발생하지 않는다는 실험결과를 제시하고 있다. 이와 같은 연구 결과는 콘크리트 중의 수증기압을 개방하면 폭열을 경감시킬 수 있다고 하는 관점에서 최근 주목을 받게 되었다. 수증기압의 개방을 위해서는 콘크리트 중에 저융점의 섬유를 혼입하는 것으로서 열로 소실된 섬유의 공극을 통해

수증기압이 개방됨으로서 폭열 억제 효과를 기하는 방법이다.

본 연구에서는 이와 같은 관점에서 폭열을 경감시키기 위한 대책으로서 2종의 저융점 섬유를 콘크리트에 혼입한 시험체에 대하여 내화시험을 수행하였으며, 비교를 위해 강섬유를 추가하였다. 내화시험에 사용된 시간온도곡선은 독일의 RABT(ZTV)의 곡선을 적용하였으며, 그림12에 본 실험에 적용한 곡선식을 제시하였다. 내화시험의 조건은 가열개시 후 800℃까지 온도를 높이고 1시간, 2시간, 3시간을 유지시킨 뒤 자연냉각하는 방식을 취하였다.

그림13은 본 실험에서 수행한 내화시험 결과의 한 예를 나타낸 것이다. 800℃에서 2시간 경과하였을 때 섬유혼입량 1.0%에서 강섬유를 혼입한 시험체가 폭열하는 결과를 나타내었다. 반면 PP섬유는 섬유혼입량에 관계없이 폭열이 없었으며, 잔존압축강도 2~3MPa를 나타내어 열을 받지 않은 건전한 시험체에 비하여 10% 정도 강도가 잔존하는 것으로 나타났다. 그러나 섬유혼입률 0.5%와 1.5%의 경우에는 모든 시험체에서 폭열이 발생하지 않아 섬유혼입량 1.0%와는 상이한 결과를 보였다.

한편 그림14 및 그림15는 시멘트량과 잔골재율이 내화성능에 미치는 영향을 나타낸 것으로서 시멘트량 및 잔골재율이 증가하면 내화성능이 감소하는 것으로 나타났다. 이상의 내화시험 결과로부터 폭열저항성은 강섬유보다는 저융점의 화학섬유를 혼입한 경우 효과적이며, 특히 PET섬유는 폭열이 없어 효과가 큰 것으로 나타났다.

이상의 실험결과는 향후 콘크리트의 함수률 다양하게 조절한 시험체에 대한 내화실험을 통해 그의 매카니즘을 상세히 검토할 예정이다.

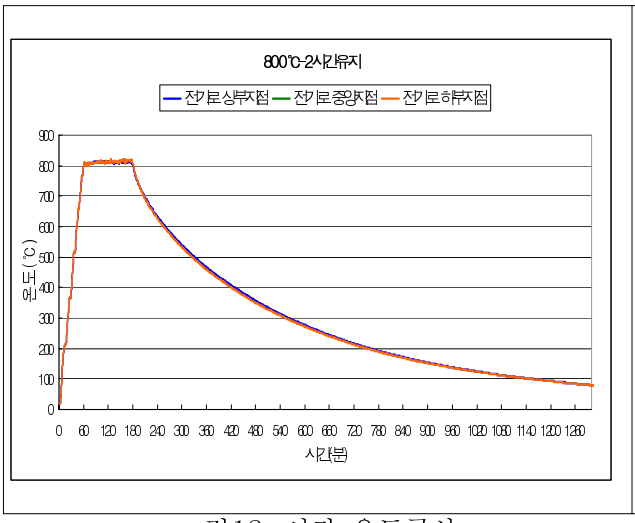

그림12. 시간 온도곡선

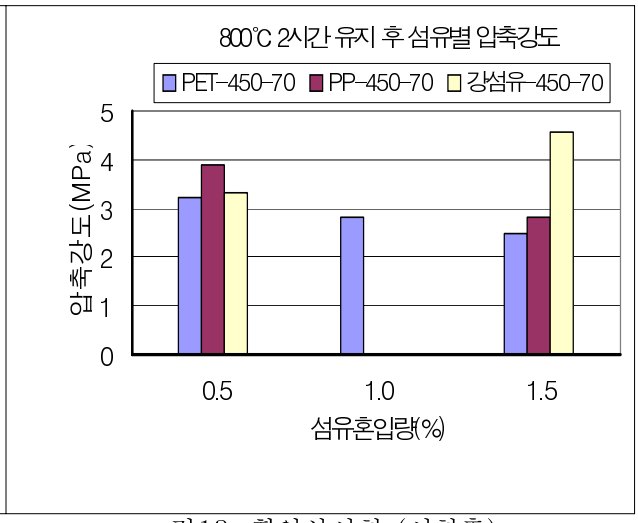

그림13. 휨인성시험 (시험후)

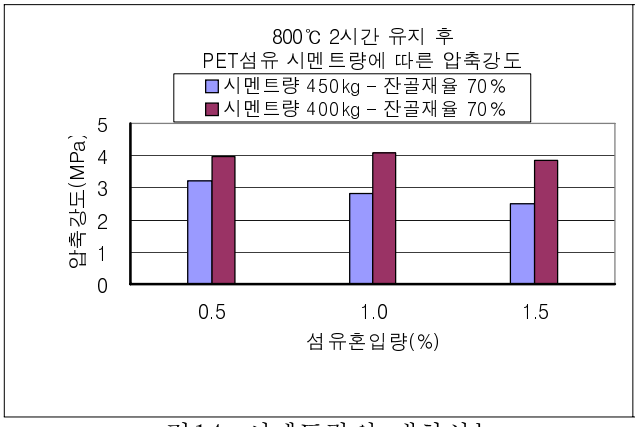

그림14. 시멘트량의 내화성능

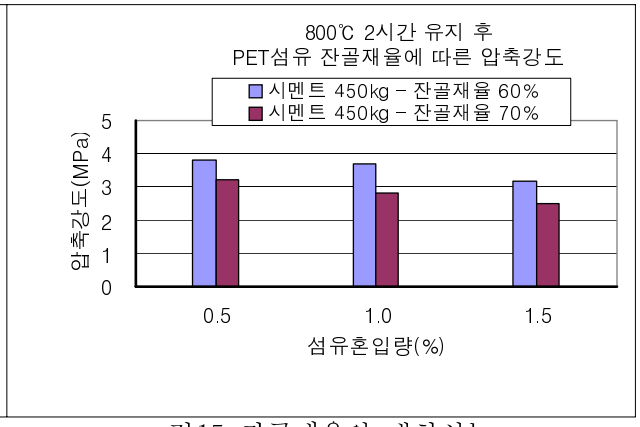

그림15 잔골재율의 내화성능.

4.결론

본 연구는 화재에 노출될 수 있는 터널용 숏크리트에 보강재로서 화학섬유(PET섬유)를 적용하는 경우를 상정한 기초적인 실험 연구로서, 본 연구 범위 내에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 압축강도는 강섬유를 혼합한 경우 가장 큰 값을 나타내었으며, 섬유혼입량의 증가에 따라 그 차는 작다. 특히, 섬유혼입량이 1.5%인 경우 PET섬유와 PP섬유의 압축강도는 거의 동일한 것으로 나타났다.
2. 휨인성지수는 강섬유와 PET섬유에서 크게 나타난 반면, PP섬유는 상대적으로 낮은 값을 보였다. 또한 PET섬유의 휨인성지수가 강섬유와 거의 근접한 값을 나타냄으로서 PET섬유의 에너지 흡수능력이 양호하다는 사실을 알 수 있었다.
3. 폭열시험에서 사용된 시간온도곡선은 독일의 RABT(ZTV)의 곡선을 채택하였으며, 800℃에서 2시간 경과하였을 때 섬유혼입량 1.0%에서는 강섬유를 혼입한 시험체가 폭열하였으나, PP섬유는 섬유 혼입량에 관계없이 폭열 현상이 없었다.
4. 이상의 결과를 종합하면, PET섬유를 혼합한 콘크리트는 강섬유 콘크리트에 비해 고온에 의한 폭열 효과가 있으며, 압축 및 인장 등 물리적 특성 시험 결과에 있어서도 PP섬유와 동등 이상의 효과가 있는 것으로 확인되었다. 특히, 특히 폭열 저항성은 터널용 숏크리트 재료로서의 적용 가능성이 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국도로공사, 강섬유보강 Shotcrete 시공 및 품질관리지침
2. ASTM C 1018, Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete
3. 박성수 · 이정훈 (2004), “강섬유보강 콘크리트의 휨인성 특성에 관한 연구” 한국구조물진단유지관리학회, 구조물진단학회지 제8권 제4호, 2004. 10, pp. 203 ~ 210 (8pages)
4. 오병환, 김규왕, 한일영. 권지훈, 유홍종(2000) “섬유의 종류 및 휨인성 평가방법에 따른 섬유보강 콘크리트의 휨인성 특성”, 한국콘크리트학회 2000년도 가을 학술발표회논문집
5. 일본토목학회(2004) “콘크리트구조물의 내화기술연구소위원회 보고 및 심포지움 논문집”