

터널 슛크리트 성능 향상을 위한 고기능성 합성섬유 보강 콘크리트의 물성 평가

Properties of Advanced Synthetic Fiber Reinforced Concrete for Improvement
of Tunnel Shotcrete Performance

전 찬 기[†] · 전 중 규*

Jeon, Chanki · Jeon, Joongkyu

Abstract The Application of Steel Fiber Shotcrete in tunneling construction has become part of tunneling practice at least since the 1970s because of its high bending and tensile properties. Over the past 3 decades, researcher from all over the world have been significantly developing the associated technologies for improved performance of SFRS. But still it has some major drawbacks in terms of durability, damage of pumping hose, wastage due to rebound concrete, corrosion and it costs high. To overcome this situation researcher has to look for some alternative material. Therefore, this part study deals with the three types of fiber in order to find good alternative for steel fiber. Polyamide and Polypropylene fiber were used in this study with 0.6, 0.5% mixing ratio. To evaluate its fresh and harden properties air content, slump, compressive, split tensile and bending strength were measured. After comparing the results of all three types of fiber reinforced concrete with its different mixing proportion this study propose that polyamide fiber with addition ratio of 0.6 % for field use.

Keywords Shotcrete, Polyamide Fiber, Steel Fiber, Polypropylene Fiber, Bending Strength

요 지 슛크리트의 보강재료로 사용되고 있는 강섬유는 강성이 크고 중량이 무거워 압송호스의 마모손상 및 파열 등 안전관리의 어려움이 있으며, 강섬유의 부식으로 인한 내구성 저하 및 높은 반발률 등이 개선사항으로 요구되고 있다. 이와 같이 2009년 개정된 규정에 의해 강섬유 외의 재료보강이 가능해짐에 따라 슛크리트 보강 재료로서 강섬유 이외의 다양한 섬유의 적용성 검토가 필요한 실정이다. 강섬유는 기타섬유에 비해 강성이 크고, 섬유의 형상에 따라 부착성능이 개선되지만, 유기섬유의 경우 강섬유에 비해 일반적으로 탄성계수 및 인장강도가 낮고 섬유의 뭉침 현상이 발생하여 슛크리트에서 재료보강으로 사용하기 어렵다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 직경 20 μ m의 미세섬유를 다발형 단일 개체로서 공기압출성형을 통해 부착 비표면적을 크게 하여 역학적 성능을 고려하고, 섬유의 표면을 계면 활성제로 개질하여 분상성을 향상시킨 폴리아미드섬유와 강섬유, PP섬유를 혼입한 콘크리트를 비교하여 현장 활용을 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

핵 심 어 슛크리트, 폴리아미드섬유, 강섬유, 구조용 PP섬유, 휨강도

† 교신저자 : 정희원, 인천대학교 도시과학대학 도시건설공학과 교수, 공학박사

E-mail : johnland@incheon.ac.kr

TEL : (032)835-8776 FAX : (032)835-4939

** 정희원, 코오롱건설(주) 기술연구센터 책임연구원, 공학박사

1. 서론

NATM 공법이 국내에 도입되면서 초기에는 건식 공법에 의한 슛크리트 시공이 일반적으로 이루어졌으나, 현재는 소규모 터널 및 지하철 공사 등 일부를 제외하고는 습식 슛크리트의 시공이 보편화되어 수행되고 있다. 슛크리트는 굴착 직후 발생하는 원지반의 초기 변위의 제어 및 풍화의 방지를 통한 굴착면의 안정 도모의 목적이 있으나, 최근 들어서는 구조물의 장기적인 사용성 및 안전성의 개념에서 슛크리트의 역할이 중요하게 부각되고 있다(마상준 등, 2008).

스�크리트용 보강재의 동향을 살펴보면, 초기의 슛크리트 시공은 와이어 메쉬를 암반에 부착시킨 다음 그 위에 슛크리트를 타설하는 방법인데, 반발률(Rebound)이 크고 와이어 메쉬 설치기간의 과다 소요 및 정확한 설치가 곤란한 점 등으로 빠른 보강 작업이 이루어지지 못하고 공기가 지연되고 비용이 증가하는 단점이 있다(오병환, 1996). 그래서 시공 상의 편리, 공기 단축, 보강특성 향상 등의 이유로 섬유보강 슛크리트가 사용되기 시작하였으며, 이중 대표적으로 사용되고 있는 것이 강섬유 보강 슛크리트로서 기존의 와이어 메쉬를 사용한 공법보다 시공이 간편하고 여굴 부위의 밀실한 충전이 얻어지며, 강도 및 인성특성이 우수하고 빠른 보강이 가능한 장점 등으로 인해 적용이 늘고 있다(김윤일 등, 2005).

한편, 강섬유 보강 슛크리트는 혼합시의 뭉침 현상, 타설 시의 노즐 및 압송호스 막힘 현상과 강섬유의 텀 및 반발률이 많이 발생되어 휨인성 및 품질 저하 문제가 발생하고 있다. 특히 강섬유는 내수성 및 내산성이 좋지 않아 부식으로 인한 균열 및 박리현상 발생과 더불어 가격이 고가인 점 등이 단점으로 지적되어 있다(최승환 등, 2000).

본 기술은 기존의 강섬유 보강 슛크리트의 시공성, 안전성, 내구성 및 경제성, 등의 문제점을 개선하기 위한 폴리아미드섬유 보강재, 즉 직경 20 μ m의 미세섬유를 다발형 단일개체로서 공기 압출성형을 통해 부착 비표면적을 크게 하여 역학적 성능을 고려하고, 섬유의 표면을 계면 활성제로 개질하여 분산성을 향상시킨 폴리아미드 섬유 보강 콘크리트의 기초자료를 제시하고자 하였다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험계획 및 배합

본 실험에서는 기존 슛크리트 시방 규정에 정해진 강섬유 40kgf/m³(약 0.5%) 혼입 조건에 준하여 Table 1에 나타난 바와 같이 시험체 종류는 섬유 무혼입 Plain 콘크리트, 폴리아미드섬유, 강섬유, 폴리프로필렌섬유 보강 콘크리트로 하였으며, 섬유 혼입율은 각각 0.6%, 0.5%, 0.5%로 혼입하였다(장필성 등, 2009, 한국도로공사, 2009).

측정항목은 경화한 콘크리트의 성상으로 재령 28일 경과 후 역학적 성능평가로 압축강도, 강섬유 보강 콘크리트의 기존 휨강도 4.5MPa를 고려하여 휨강도를 측정하였다. 본 연구에서 사용한 재료는 Table 2와 같이 굵은 골재는 도로공사 표준시방서 기준인 13mm크기의 부순자갈을 사용하였으며, 시멘트는 밀도 3.15g/cm³의 보통 포틀랜드시멘트(OPC)를 사용하였다.

Table 3 및 Fig. 1은 섬유의 물리적 성질 및 형상을 나타낸 것으로 PA섬유는 밀도 1.14g/cm³의 단섬유를 다발화하여 비표면적을 증가시켜 사용하였고, 강섬유는 밀도 7.85g/cm³의 후크형을 활용하였다. 또한 PP섬유의 경우 밀도 0.91g/cm³의 구조용 PP섬유를 사용하였다(원종필 등, 1999). 한편 Fig. 1에서 25배 SEM 확대 사진에서 나타난 바와 같이 PA섬유는 미세섬유 다발로 단일개체를 이루고 있어, 콘크리트 페이스트와 유기적 결합이 예상된다. Fig. 1의 25배 SEM 확대 사진에서 나타난 바와 같이 PA섬유는 미세섬유 다발로 단일개체를 이루고 있어, 콘크리트 페이스트와 유기적 결합이 예상된다.

2.2 폴리아미드섬유의 특성

1) 공기 압출성형에 의한 다발형 폴리아미드 단섬유 제조

공기 압출성형에 의한 다발형 폴리아미드섬유는 심사(Core yarn)와 초사(Effect yarn)인 멀티필라멘트가 서로 고압의 공기로 교락되어 제조되며, 이를 일정한 길이로 절단하는데, 심사와 초사를 동일한 소재 또는 서로 다른 종류의 소재로 구성할 수 있다(Fig. 2 참고).

Table 1. 콘크리트 배합

시험제 종류 ¹⁾	섬유 혼입율 (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit volume (L/m ³)					Unit weight (kgf/m ³)					평가 항목
				W	C	S	G	Fiber	W	C	S	G	Fiber	
Plain	-	43	66.0	205	152	417	201	-	205	478	1068	566	-	· 압축강도 (MPa)
PA0.6	0.6	43	66.0	205	152	417	201	6	205	478	1068	566	6.84	· 쪼갬인장강도 (MPa)
SF0.5	0.5	43	66.0	205	152	417	201	5	205	478	1068	566	39.25	· 휨강도 (MPa)
PP0.5	0.5	43	66.0	205	152	417	201	5	205	478	1068	566	4.55	· 등가 휨강도비(%)

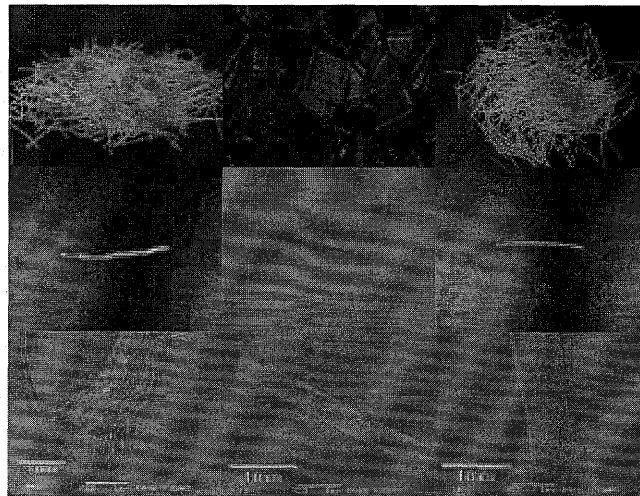
1) PA : Polyamide Fiber, SF : Steel Fiber, PP : PP Fiber

Table 2. 골재 물성

	입경 (mm)	조립율 (FM)	밀도 (g/cm ³)	흡수율 (%)	실적율 (%)
S (Sand)	5	2.85	2.56	0.97	65
G (Gravel)	13	5.8	2.82	0.64	55

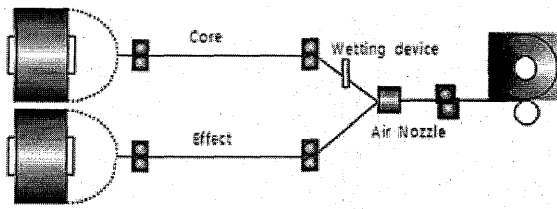
Table 3. 섬유 물성

	밀도 (g/cm ³)	길이 (mm)	직경 (mm)	형상비 (L/d)	인장강도 (MPa)
PA	1.14	30	0.42	71	594
SF	7.85	30	0.5	60	810
PP	0.91	50	0.5	100	450

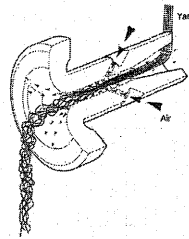


(a) PA (b) SF (c) PP

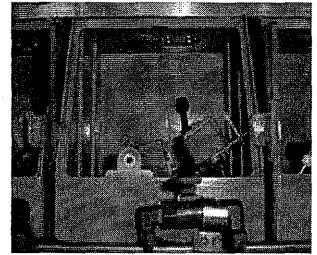
Fig. 1. 섬유 형상



[장치 개략도]



[공기 노즐]



[장치 사진]

Fig. 2. 공기 압출성형에 의한 다발형 폴리아미드섬유 제조

개발 단섬유는 기존 숏크리트에 사용되는 강섬유와 비교하여 동등 이상의 강도 및 성능을 확보하기 위한 섬유 단가가 낮아 원가절감이 가능하며, 기존 숏크리트 보강재와 달리 구부러지기 쉬운 형상을 나타내어 숏크리트 내에서 배합 성능이 우수하다.

2) 분산제 코팅 및 표면 다수 루프 형성

분산제는 섬유 표면에 윤활제, 계면활성제 및 대전방지제를 적정 비율로 혼합하여 코팅하였으며, 이 코팅제는 친수기와 친유기로 구성되어 있어 숏크리트 내에서 단섬유 간의 정전기적 반발력으로 분산성을 촉진시켜 뭉침 현상이 없다.(Fig. 3 참고) 또한 숏크리트 믹싱시 끝단의 풀림과 섬유 표면의 다수의 루프가 형성되어 시멘트 경화체와 단섬유 간의 부착 성능이 양호하게 발현되어 숏크리트의 품질향상에 기여한다.

2.3 비빔 및 시험체 제작

본 실험에서 콘크리트 비빔은 Fig. 4와 같이 60리터 용량의 1-Shaft 믹서를 사용하였으며, 시험체는 KS F 2403 「콘크리트 강도시험용 시험체 제작방법」에 준하여 제조하고, 28일 재령까지 온도 20±3℃의 수중에서표준 양생을 실시하였다. 압축강도 시험은 KS F 2405 「콘크리트 압축강도 시험방법」에 준하여 실시하였고, 쪼갬 인장강도 시험은 KS F 2423 「콘크리트의 인장강도 시험 방법」 휨강도 시험은 KS F 2566 「강섬유 보강 콘크리트의 휨 인성 시험 방법」에 준하여 실시하였다.

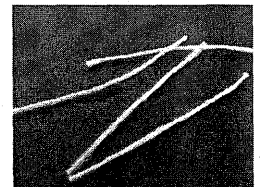
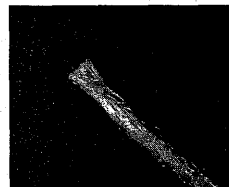
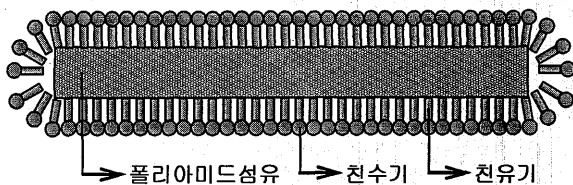


Fig. 3. 분산제 코팅 및 표면 다수 루프 형성



(a) 콘크리트 믹싱 (b) 시험체 제작

Fig. 4. 콘크리트 시험체 제작

3. 실험결과 및 분석

3.1 압축강도

Fig. 5는 공기 압출성형에 의한 다발형 폴리아미드섬유를 최적의 량으로 혼입하여 제작한 숏크리트의 압축강도를 나타낸 것으로, 섬유를 혼입하지 않은 Plain 콘크리트가 가장 큰 값을 보였으며, 또한 터널 설계기준에 제시한 재령 28일, 21MPa를 모두 만족하는 결과를 얻었다.

3.2 휨강도

Fig. 6과 Fig. 7은 3종류 섬유를 혼입한 숏크리트의 휨강도 및 등가 휨강도비를 나타낸 것이다. 먼저 터널 설계기준에서 '재령 28일 숏크리트의 휨강도는 4.5MPa 이상 그리고 휨인성을 나타내는 등가휨강도는 3.0MPa 이상이어야 한다' 라고 규정하고 있다. 더불어 한국도로공사 전문시방서의 경우, 등가 휨강도비는 68% 이상으로 규정되어 있다(건설교통부, 2007)

따라서 이들 그림에서 개발섬유 및 강섬유를 혼입한 숏크리트의 경우는 이상의 규정을 모두 만족하는 좋은 결과를 나타내었지만, 구조용 합성섬유를 혼입한 숏크리트는 설계기준 및 시방서 규정에 미달하는 결과를 얻었다(백신원 등, 2001).

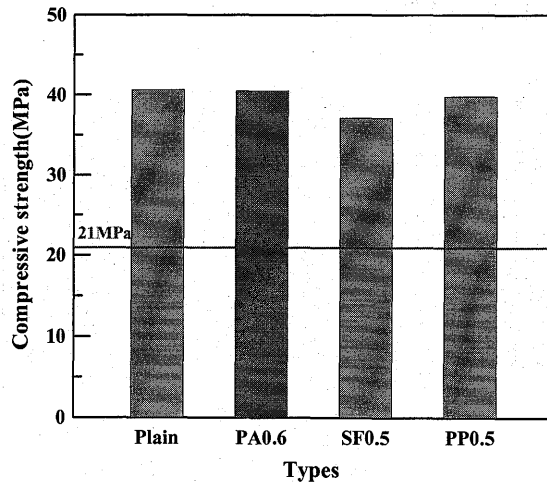


Fig. 5. 섬유 종류별 숏크리트의 압축강도

공기 압출성형에 의한 다발형 폴리아미드 단섬유보강 슛크리트는 사용 목적, 지반 조건, 시공성 등을 고려하여 설계되며, 본 슛크리트는 터널 설계 목적과 기준에 충분히 부합하는 강도 및 휨인성을 확보하며, 기존 슛크리트보다 낮은 슬럼프에서도 뽑어 붙이기 가능하므로 반발률 및 분진 발생을 최소화할 수 있으며, 섬유 부식이 발생되지 않아 충분한 내구성을 확보하여 터널의 공용기간 동안 소요의 기능을 발휘할 수 있다(한국고속철도공단, 2007).

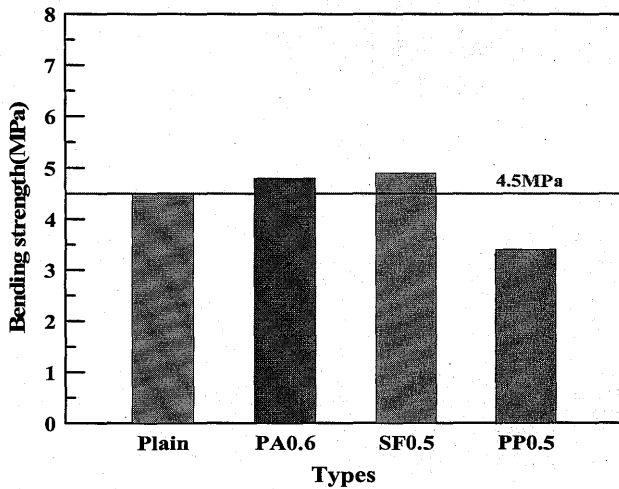


Fig. 6. 섬유 종류별 슛크리트의 휨강도

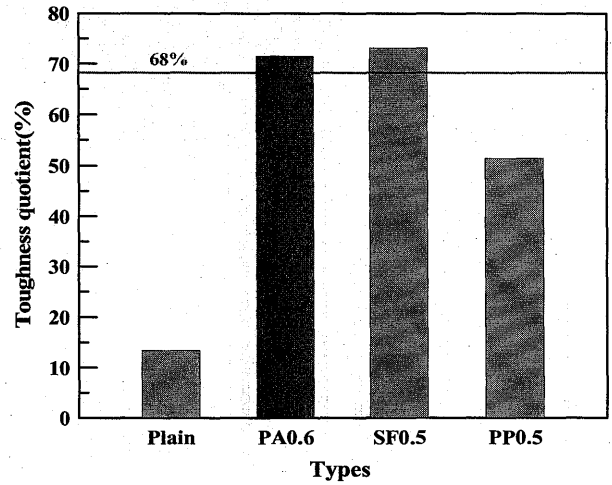


Fig. 7. 섬유 종류별 슛크리트의 등가휨강도비

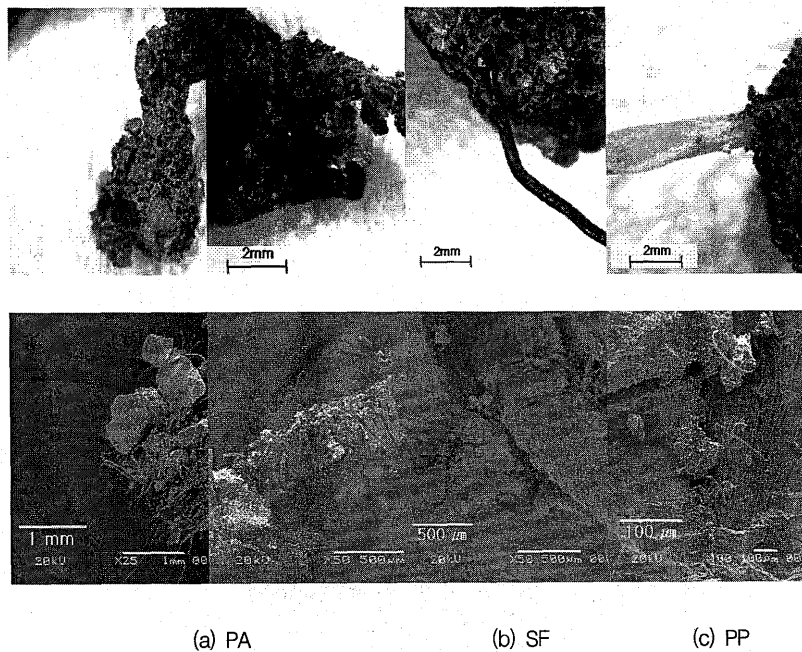


Fig. 8. 각종 섬유 보강 콘크리트의 SEM분석

3.3 숏크리트의 미세분석

Fig. 8은 혼입 섬유 종류별 시험체의 전자현미경 및 SEM 측정 사진을 나타낸 것으로 강섬유와 PP섬유의 경우 콘크리트가 섬유에서 인발 되어 뽑힘 현상이 발생하였지만 PA섬유의 경우 다발형 섬유 사이사이에 콘크리트 페이스트가 자리하고 있으며, 또한 PA섬유는 매트릭스에서 뽑히지 않고 끊어지는 현상이 관찰되어 부착력이 양호한 것을 확인할 수 있었다.

또한 Fig. 9는 섬유의 인장강도와 섬유 혼입 콘크리트의 쪼갬인장강도의 관계를 나타낸 것으로 PA섬유는 인장강도는 낮지만 콘크리트 시험체의 쪼갬인장강도는 높게 나타났다. 이는 강섬유의 인장강도가 가장 큼에도 불구하고 PA섬유 보강 콘크리트에 비하여 쪼갬인장강도가 낮게 나타나 PA섬유가 콘크리트 시험체의 쪼갬인장강도에 미치는 영향이 강섬유에 비해 큰 것으로 나타났다.

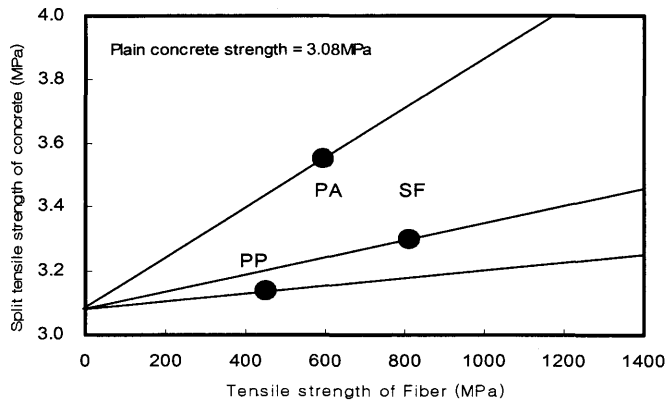


Fig. 9. 섬유의 인장강도와 콘크리트의 인장강도와의 관계

4. 결론

공기 압출성형에 의한 다발형 PA섬유를 사용한 콘크리트의 역학적 특성을 강섬유 및 PP섬유 보강 콘크리트와 비교한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 공기 압출성형에 의한 다발형 PA섬유 보강 콘크리트는 표면개질과 부착 비표면적의 개선에 의해 기존 강섬유 보강 콘크리트와 비교하여 동등 또는 동등 이상의 역학적 성능이 확인되었다.
- 2) 개발섬유 및 강섬유를 혼입한 숏크리트의 경우는 설계기준 및 시방서를 모두 만족하는 좋은 결과를 나타내었지만, 구조용 합성섬유를 혼입한 숏크리트는 설계기준 및 시방서 규정에 미달하는 결과를 얻었다.

본 개발기술의 공기 압출성형에 의한 다발형 폴리아미드섬유 보강을 통해 종전의 강섬유 보강재를 대체할 수 있을 것으로 사료되며, 또한 고품질 숏크리트의 시공을 통한 반발률 저감 및 하자보수의 경감으로 시공원가의 절감이 가능하다.

더불어 숏크리트의 구조물에서의 활용측면에서 살펴보면, 숏크리트의 고성능화 개발을 통해 구조물의 특성 및 환경조건에 맞는 다양한 숏크리트의 적용이 가능하다. 즉 터널 이외에 부식문제가 특히 우려되는 운하, 수로 등의 수리구조물, 지하 저장기지, 지하철 및 운하, 하수처리장, 사면안정 등 용도에 따라 다양하게 적용될 수 있다. 또한 상기 연구개발결과 및 현장 적용실적 등을 토대로 기술이전, 사업화가 가능할 것으로 판단되며, 외국 업체에 대한 기술경쟁력 또한 크게 증진될 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 인천대학교 2010년도 자체연구비의 지원에 의하여 수행된 연구 결과이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 김윤일, 박동순, 서치호 (2005). "강섬유 혼입량 증가에 따른 고강도 콘크리트 재료특성의 변화." 대한건축학회 논문집 구조계, Vol.21, No.2, pp.95-101.
- [2] 건설교통부 (2007), 터널설계기준.
- [3] 마상준, 최재석 (2008). "강섬유보강 슛크리트의 품질기준 및 시험방법 KS규격 표준화." 대한토목학회 학회지, Vol.16, No.I-3, pp.217-226.
- [4] 백신원, 한일영, 권지훈 (2001). "폴리프로필렌 섬유보강 슛크리트에 관한 실험적 연구." 대한토목학회논문집, Vol.21, No.6-C, pp.605-611.
- [5] 원종필, 박찬기 (1999). "폴리프로필렌섬유보강 콘크리트의 수축균열 및 내구특성." 대한토목학회논문집, Vol.19, No.1-5, pp.783-790.
- [6] 오병환 (1996). "섬유보강 콘크리트의 전망 및 필요성." 한국콘크리트학회논문집, Vol.8, No.4, pp.5-13.
- [7] 장필성, 최희섭, 김동민, 남관우 (2009). "휨인성 특성을 통해 구조용 합성섬유를 사용한 레디믹스트 슛크리트의 적정 혼입량 도출." 대한토목학회 정기학술대회논문집, pp.3651-3654.
- [8] 최승환, 김재욱, 김남욱, 배주성 (2000). "강섬유와 폴리프로필렌섬유를 이용한 섬유보강콘크리트의 하이브리드 조합에 관한 실험적 연구." 대한토목학회 학술발표대회논문집, pp.435-438.
- [9] 한국도로공사 (2009). 강섬유 보강 슛크리트 시공 및 품질관리 지침.
- [10] 한국고속철도공단 (2007). 강섬유 보강 슛크리트 공사시방서(안).

- ▶ 논문접수일 : 2011년 03월 11일
- ▶ 심사의뢰일 : 2011년 03월 14일
- ▶ 심사완료일 : 2011년 03월 29일