

폴리프로필렌섬유보강 콘크리트의 성능평가 연구

이수열¹⁾, 박연준^{2)*}, 김수만²⁾, 유광호²⁾, 장성일³⁾, 서영호⁴⁾

A Study on the Performance Evaluation of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete

Soo-Yul Lee, Yeon-Jun Park, Su-Man Kim, Kwang-Ho You, Sung-Il Jang, Young-Ho Suh

Abstract Submarine tunnels are affected by the surrounding environments more than regular tunnels. Especially, they are often vulnerable to damage by salt in seawater. Seawater is more likely to affect reinforcing rods and steel fibers than concrete. Recently the usage of anti-corrosive fibers increases in the tunnel which is subject to the possibility of damage. By comparing the capability of polypropylene fibers with that of steel fibers, the proper mixture ratio is decided and the supporting capability of polypropylene fibers was tested using round panel and beam specimens. The results of this study can be of great use in selecting the fiber material and designing of fiber reinforced shotcrete of submarine tunnels.

Key words Polypropylene Fiber Reinforced Concrete (PFRC), Flexural toughness test, Round Panel Test

초 록 해저에 시공되는 터널은 일반시공보다 환경에 더 많은 영향을 받는다. 특히 해수의 침입에 따른 염해의 위험에 노출되어 있으며, 이는 콘크리트에 포함된 철근과 강섬유의 부식에 큰 영향을 미친다. 해수 침투에 따른 염해 가능성이 염려되는 터널에서 최근 내부식성 섬유로 그 활용도가 증가하고 있는 폴리프로필렌섬유를 대상으로 강섬유와의 성능 비교를 통하여 적정 배합비를 결정하고, 원형패널 시험과 휨인성 시험을 통해 지보재로서의 성능을 평가하였다. 본 연구의 결과는 해저에 시공되는 터널에서 섬유보강재의 선택 및 섬유보강 슛크리트 설계에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심어 폴리프로필렌섬유보강 슛크리트, 휨인성시험, 원형패널시험

1. 서 론

해저에 시공되는 터널은 일반시공보다 환경에 더 많은 영향을 받는다. 특히 해수의 침입에 따른 염해의 위험에 노출되어 있다. 기존 연구에 따르면 염해는 콘크리트 보다는 콘크리트에 포함된 철근과 강섬유의 부식에 지대한 영향을 미친다. 특히 터널의 1차 지보재인 슛크리트는 터널 시공 중 주요 지보재로서 염해에 의해

스utc리트의 강도가 저하될 경우 터널의 안정성은 보장될 수 없다. 따라서 해수의 침투에 따른 염해 가능성을 정량적으로 예측하여 평가하고, 필요시 내부식성 섬유로 대체할 필요가 있다.

본 연구에서는 해저에 시공되는 터널에서 해수의 침투에 따른 염해 가능성을 우려하여 최근 내부식성 섬유로 그 활용빈도가 증가하고 있는 폴리프로필렌섬유를 대상으로 강섬유와의 성능 비교를 통하여 적정 배합비를 결정하고, 슛크리트 복합체의 거동 특성을 파악하여 지보재로서의 성능을 평가하고자 한다.

2. 폴리프로필렌섬유의 특성

폴리프로필렌(polypropylene, PP)섬유의 비중은 0.91로 비중이 2.6인 유리섬유나 7.0~8.0인 철선보다 상대적으로 가볍다. 이는 재료의 허용중량에 비하여 훨씬

¹⁾ 수원대학교 토목공학과 대학원 박사과정, 현대건설 전문

²⁾ 수원대학교 토목공학과 교수

³⁾ 수원대학교 토목공학과 석사졸업

⁴⁾ 현대건설 기술개발원 부장

* 교신저자 : yjpark@suwon.ac.kr

접수일 : 2010년 10월 12일

심사 완료일 : 2010년 10월 19일

게재 확정일 : 2010년 10월 25일

많은 양의 섬유가 함유됨을 의미하며, 따라서 불과 수 kg의 섬유가 1 m³의 숏크리트에 대하여 효과적인가 하는 의문의 근본 이유가 된다. 유리섬유 또는 강섬유와 함께 동일한 중량의 섬유를 첨가할 때, 그 양이 훨씬 많아질 수밖에 없어서 이들 섬유에 비해 단위중량 당 첨가되는 PP섬유의 양은 훨씬 많을 수밖에 없다. 섬유가 물보다도 가벼워 숏크리트 배합시 위쪽으로 뜨는 경향이 있지 않을까 하는 우려도 있으나, 섬유 혼합 사이클 중에 숏크리트에 의해 그 표면이 코팅되고, 콘크리트의 본질상 밀도가 높아 섬유의 이동이 불가하여 결코 그런 일은 생길 수 없다.

PP는 화학변화를 일으키지 않는 불활성의 재료로서, 산이나 알칼리에 대하여 영향을 받지 않는다. 이는 유리섬유가 콘크리트 속에서 알칼리에 의해 품질기능이 떨어지거나, 강섬유가 녹슬고 부식되는 것과 비교되어 사실상 PP로 만들어진 컨테이너는 많은 화학물질을 취급하는 선박이나 창고에서 쓰이며, 연판과 황산으로 만들어지는 자동차 배터리는 PP 케이스에 담겨진다. PP는 섬유로 압출하는 과정에서 PP 레진에 자외선 억제제를 혼합시키지 않으면 태양광선의 자외선에 의해 그 품질 및 기능이 떨어지게 된다.

적합한 길이의 선택은 여러 가지 요인에 따라 달라지는데 주로 물리적 특성과 사용목적에 따라 결정된다. 일반적으로 38~52 mm의 긴 섬유는 콘크리트 제품의 생산에 쓰이는 반면 12~19 mm의 짧은 섬유는 슬래브와 펌프를 이용하는 콘크리트에 쓰인다. 콘크리트 1 m³ 내의 섬유 중량이 동일할 때 그 길이가 짧을수록 더 많은 수의 섬유가 보유됨을 알 수 있다.

길이가 짧은 12 mm 섬유는 보다 큰 섬유 덩어리를 분산시킬만한 큰 골재를 갖고 있지 못한 시멘트 제품 생산에 쓰이며, 섬유의 길이는 콘크리트 구조물에 주어지는 응집력의 정도에 결정적인 영향을 미치고 섬유의 길이가 증가함에 따라 총 응집력도 증가하게 되는데 반해 혼합 시 슬럼프가 줄어든다(하태욱, 2002).

시험에 사용된 PP섬유는 폴리프로필렌 호모(polypropylene homo) 재질로 인장강도는 최소 500 MPa, 탄성계수는 5 GPa이며, 길이는 50 mm이다. 본 시험에서 사용되는 강섬유와 PP섬유의 특성을 비교하여 표 1에 정리하였다.

표 1. 강섬유와 PP섬유의 특성 비교

분 류	Length (mm)	S.G (specific gravity)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
PP섬유	50	0.91	500	5
강섬유	30	7.85	1,100	200

3. 콘크리트 성능평가

섬유보강 콘크리트의 역학적 성능을 평가하는 방법으로 재료 자체의 압축강도 및 휨강도 특성을 평가하는 방법과 콘크리트 부재가 받는 하중과 재료의 항복 이후에도 어느 정도의 지보력을 발휘할 수 있는지를 함께 고려한 휨인성 특성을 평가하는 방법의 2가지를 사용하였다.

휨인성 특성을 평가하는 방법으로는 ASTM C 1018 및 JCI-SF4에서 제시한 성능평가 방법 및 EFNARC (European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems)에서 제시한 사각패널에 의한 평가방법이 주로 사용되었다. 그러나 성능을 평가하는 방법이나 성능기준에 대한 연구가 활발히 진행되면서 기존의 평가방법들은 섬유보강 콘크리트의 성능을 정확하게 평가하지 못한다는 결론을 내리고 있다. 따라서 기존의 평가방법들의 단점을 보완한 방법이 제시되었는데, 바로 호주의 RTA(Roads and Traffic Authority)에 의해 제안된 원형패널시험이다.

원형패널은 터널에서 숏크리트 라이닝이 실제로 거동하는 형태와 유사하며, 발생하는 균열이 규칙적인 방향으로 형성되고 하중-처짐 곡선도 일정한 형태를 갖는다. 최대하중은 패널의 콘크리트 강도에 의하여 결정되며, 최대하중 이후의 하중-변위 곡선은 섬유에 의한 인장특성을 반영한다(이상필, 2007).

본 연구에서는 PP섬유보강 숏크리트의 휨인성 특성 평가를 위해 RTA에서 제안한 원형패널시험(TEST METHOD T373)과 국내규정인 KS F 2566(2005)에 의한 3등분점재하시험을 수행하였다. 연구의 목적상 숏크리트 시료를 사용하여야 하나, 현장의 온도 및 습도 조건에 따른 양생 환경의 변화가 시험결과에 미치는 영향이 크므로 이를 배제하고자 부득이 실험실에서 콘크리트시료를 제작하여 시험에 사용하였다.

3.1 성능평가 기준

국내의 터널설계 기준에 규정된 숏크리트 혼합물의 강도는 표 2와 같다. 여기서 휨인장강도는 재령 28일 이상에서 시험하여 시편의 처짐이 경간 길이의 1/150

이 될 때까지의 인성을 휨인성계수(등가휨강도)로 표시한 것이며, 휨인성을 나타내는 등가휨강도는 3.0 MPa 이상이고, 최대휨강도는 4.5 MPa 이상이 되어야 한다고 규정하고 있다.

표 2. 콘크리트 혼합물의 강도기준(터널표준시방서, 2009)

구 분	강 도(MPa)		비 고
	1일	28일	
압축강도	10.0	21.0	일 반
휨인장강도	2.1	4.5	강섬유보강

표 3. RTA 패널의 에너지 흡수능력 예상기준(Bernard, 1999)

인성 등급	EFNARC 패널의 에너지 흡수능력 기준, 25 mm (Joule)	환산된 RTA 패널의 에너지 흡수능력 기준, 40 mm (Joule)
A	500	202
B	700	282
C	1000	403

한국도로공사를 제외한 타 기관의 경우에는 주로 압축 강도 기준을 사용하고 있는데, 재령 28일 기준강도를 19.6 MPa이나 20.6 MPa로 규정하고 있으며, 터널표준시방서의 경우에는 압축강도를 20.6 MPa로 정하고 있다.

원형패널시험 결과에 따른 에너지 흡수 능력에 대한 기준은 별도로 정해진 바 없으나, Bernard(1999)의 시험결과와 거의 일치하는 한국도로공사의 연구결과(2001)에서 RTA 원형패널 시험 결과와 유럽통합규정 EFNARC의 사각패널시험 결과의 상관관계를 식 (1)과 같이 보고 있다.

$$E_{EFNARC} = 2.481 \times E_{RTA} \quad (1)$$

식 (1)을 이용해 EFNARC에서 규정하고 있는 사각패널의 에너지 흡수능력 기준을 RTA 원형패널의 에너지 흡수능력기준으로 환산하면 표 3과 같다.

3.2 시편의 규격 및 제작

본 연구를 위하여 무보강 콘크리트와 강섬유보강 콘

표 4. 콘크리트 배합표

배합	W/B (%)	S/a* (%)	단위재료량(kg/m ³)					고성능감수제*** (cement×%)	
			W	Binder(B)		S	G		Fiber
				C	HPA**				
1	41	60	197	456	24	988	675	-	0.75
2								40 (강섬유)	1.00
3								6 (PP섬유)	0.85
4								8 (PP섬유)	0.90
5								10 (PP섬유)	0.95
6								12 (PP섬유)	1.00

* 잔골재율(S/a = sand 용적 / aggregate 용적 × 100)

** 고강도 숯크리트용 고성능 분체 혼화제(ROADCON®-HPA)

*** 폴리카르복실산계 고성능 감수제(ROADCON®-PEMA)

표 5. 배합 종류에 따른 시편 개수

배합종류		공시체 번호	빔 (150×150×550 mm)	원형패널 (Ø800×75 mm)	실린더 (Ø150×300 mm)
무보강		A	3	3	3
강섬유	40 kg/m ³	SF	3	3	3
	6 kg/m ³	PP-6	3	3	3
PP섬유	8 kg/m ³	PP-8	3	3	3
	10 kg/m ³	PP-10	3	3	3
	12 kg/m ³	PP-12	3	3	3
합계			18	18	18

크리트 그리고 PP섬유보강 콘크리트를 포함하여 총 6 종류의 배합으로 콘크리트 시편을 제작하였다. 이때 PP섬유보강 콘크리트는 PP섬유의 혼입량을 6, 8, 10, 12 kg/m³로 하였다. 콘크리트 배합표는 표 4에 나타내었다.

시험 종류는 일축압축강도, 원형패널을 이용한 에너지 흡수율 시험, 휨강도 및 휨인성 시험을 하였으며, 제작된 시편의 종류 및 개수는 표 5와 같이 재령 28일 강도시험을 위해 종류별로 각각 3개씩 총 18개를 제작하였다.

콘크리트의 강도 증진을 위하여 시멘트 중량의 5%를 고성능 분체 혼화제(High Performance Admixture; 이하 HPA로 표기함)로 치환한 콘크리트를 기준콘크리트로 설정하였으며, 단위수량을 일정하게 하고 슬럼프 값을 동일하게 하기 위하여 폴리카르복실산계 고성능 감수제를 시멘트 대비 0.75~1.00% 첨가하여 그림 1과 같이 시편을 제작하였다.

또한 배합설계의 품질을 확인하기 위해 종류별 각각 3개의 실린더형 시편을 제작하여 일축압축강도 시험을 수행하였다. 재하속도는 시편에 충격을 주지 않는 등속

변위 재하방식을 적용하였다. 표 6에 정리된 바와 같이 평균 일축압축강도는 50 MPa 이상으로 매우 높게 나타났으며, 변동계수는 10% 이하로 콘크리트 시편에 대한 품질관리가 매우 양호한 수준으로 나타났다.

3.3 원형패널을 이용한 에너지 흡수율 시험

원형 패널에 대한 휨인성 평가는 호주 RTA의 TEST METHOD T373(Determination of the toughness of a fiber reinforced shotcrete mix)에 따라 수행하였다. 이 시험에서는 지름 800 mm, 두께 75 mm의 원형패널시편 중앙부의 처짐과 하중을 측정하여, 시험 결과로 얻어지는 하중-변위곡선 하부의 면적으로 표시되는 에너지 흡수능력을 휨인성 평가 자료로 사용하고 있다.

호주의 RTA 원형패널 시험은 3점 지지 형식이기 때문에 균열이 인접한 지지점들 사이에서 형성되어 일정한 형태를 갖는다. 하중-변위곡선의 최대하중은 패널의 강도에 의하여 결정되며, 최대하중 이후의 하중-변위곡선은 섬유에 의한 인장특성을 반영한다.

시험장치는 그림 2에 도시한 바와 같이 원형패널을 지지하기 위해 120° 각도로 배열된 세 개의 지지점과

표 6. 콘크리트의 일축압축강도시험 결과

구 분	일축압축강도 (MPa)	평균 일축압축강도 (MPa)	표준편차 (MPa)	변동계수 (%)	시편 개수 (개)	
재령 28일	A	54.4, 50.7, 47.0	50.7	3.70	7.30	3
	SF	56.0, 54.6, 58.1	56.2	1.76	3.13	3
	PP-6	53.7, 53.4, 54.8	54.0	0.74	1.37	3
	PP-8	55.2, 54.7, 54.1	54.7	0.55	1.01	3
	PP-10	54.5, 51.3, 52.7	52.8	1.60	3.04	3
	PP-12	52.6, 52.2, 53.5	52.8	0.67	1.26	3

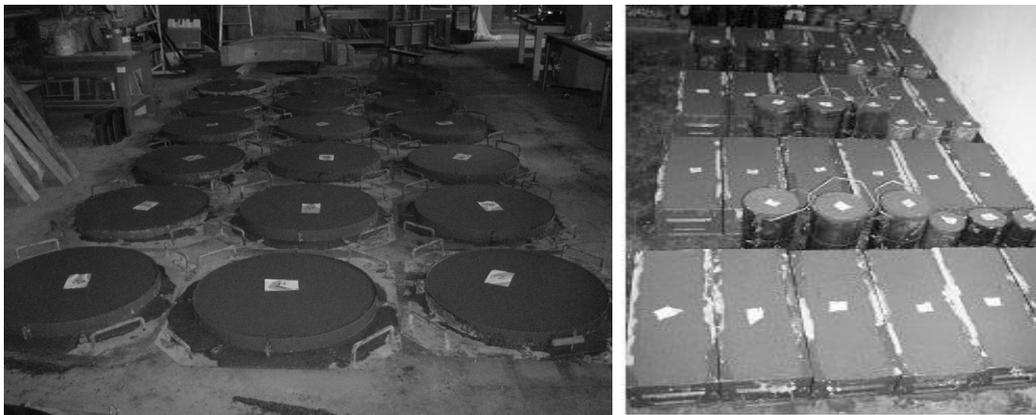


그림 1. 제작된 여러 가지 시편

자연스럽게 회전이 가능한 하부 지지대로 구성된다. 세 개의 패널의 변형 및 파괴 후에도 안정하게 패널을 지지할 수 있도록 회전이 가능하며, 하중점으로부터 반경 방향으로 375 mm 지점에 위치한다.

시편의 중앙에 지름이 100 mm이고 접촉면의 곡률반경이 100 mm인 원기둥 형태의 재하판을 이용하여 하중을 가한다. 원형패널 중앙부의 최대 처짐을 1초 단위로 측정하여 하중-변위곡선을 얻는다. 이때의 하중-변위곡선으로 시편이 흡수한 에너지를 구하여 섬유보강 콘크리트의 성능을 평가하게 되는데, 시험 시 중앙부 균열 폭이 크게 되면 최대 처짐을 얻지 못하는 경우가 발생할 수 있으므로 주의를 하여야 한다. 최대 처짐은 40 mm까지 얻어야 하며, 재하속도는 10 mm/min이다. 재하속도는 사각패널보다 약 7배 정도 빠르지만, 최대 처짐이 크고 균열 발생형태가 일정한 양상을 보이기 때문에 양호한 결과를 얻을 수 있다.

만약 시험 중 최대처짐이 40 mm가 되기 전에 처짐을 측정할 수 없게 된 경우나 패널의 균열이 일정한 각을 유지하면서 세 방향으로 형성되지 않고 다른 균열형태를 보일 경우에는 시험결과를 사용할 수 없게 된다.

원형패널에 대한 시험결과는 시편의 총에너지흡수량으로 판단한다. 재하시험을 통해 하중-변위곡선 아래의 면적으로써 에너지 흡수량을 구하게 되며, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_E = \int_{\delta_0}^{\delta_{40}} P \delta d\delta \quad (2)$$

여기서, T_E = 총에너지량(N·mm)

P = 하중(N)
 δ = 처짐(mm)

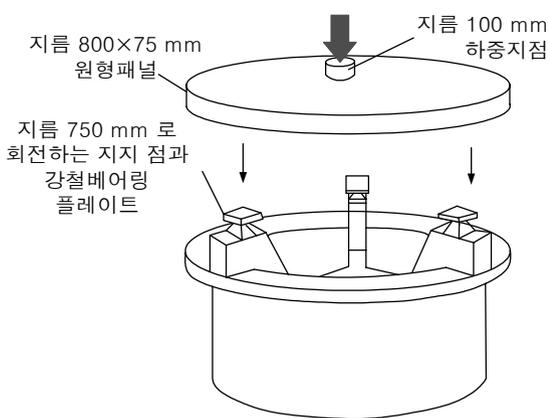
RTA에서 원형패널 시험결과에 따른 규정은 별도로 없으나, Bernard(1999)가 제안한 표 3과 같이 EFNARC에서 규정하고 있는 사각패널의 흡수에너지 기준을 RTA 원형패널의 흡수에너지로 환산하여 인성등급에 따라 A는 202 J, B는 282 J, C는 403 J로 보고 있으며, 고성능 콘크리트의 인성으로는 400 J 이상의 에너지를 제시하고 있다(Clements, 2002).

3.4 Beam 시편을 이용한 휨인성 시험

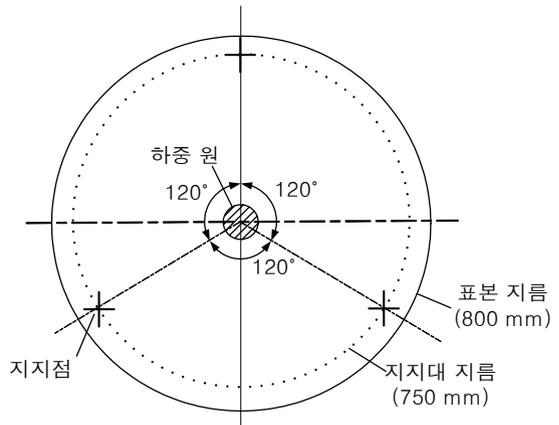
휨인성 시험은 강섬유보강콘크리트의 휨인성 시험방법(KS F 2566)의 시험 규정에 따라 150×150×550 mm 규격의 휨강도시험용 몰드에 콘크리트를 타설한 후 습윤양생하여 시편을 제작하였다.

휨인성 시험은 Yoke 방식으로 시행하였는데, 이 방법에서는 시험 결과의 정확성 제고를 위해 시험기가 충분히 견고해야 하며, 재하방식은 하중제어방식이 아닌 처짐 제어 방식이어야 한다. 그리고 3등분점 하중 재하를 위한 장치는 일정 처짐까지 시편의 변형을 구속하지 않는 구조이어야 하며, 하중 재하속도는 분당 L/1500~L/3000로 일정한 속도를 유지하여야 한다. 그림 3은 휨인성 시험을 위한 Yoke 방법의 하중재하 장치이다.

시편의 하중-처짐곡선을 구하기 위하여 사용하는 처짐 측정장치는 전기적인 변위계 및 이를 고정시키는 기구로 구성되어 있으며, 높은 정밀도로 측정이 가능한 것이어야 한다. 처짐 측정장치는 어떠한 외적인 처짐도 배제한 순수 처짐을 측정하여야 하는데, 외적 변형의



(a) 대표적인 원형패널 시험 장치



(b) 패널지지를 위한 받침대 배열

그림 2. 원형패널을 이용한 인성 평가 시험장치의 구조

유무에 따라 계산되는 인성 값이 상당히 큰 차이를 나타내므로 처짐 측정시 외적 변형을 제거하는 것은 정확한 인성의 평가에 있어서 중요한 요소 중의 하나이다.

휨인성을 엄밀하게 평가할 경우에는 처짐을 재하점 위치에서 측정(그림 4(a))하여야 하지만, 보통은 경간 중앙지점에서 측정한 처짐(그림 4(b))을 사용하여도 무방하다. 외부 처짐을 배제하게 되면 초기 균열 처짐량은 아주 작으며, 인성과 잔류강도 값은 크게 나타난다.

본 연구에서는 Yoke 방법에서의 처짐 측정장치를 응용하여 그림 4(b)와 같은 3등분점 하중재하 시험의 중앙점 처짐 측정장치를 적용하였다.

ASTM C 1018에서 규정된 3등분점 하중재하 시험에서 중앙점의 처짐을 측정한 경우의 휨강도는 식 (3)으로 계산된다.

$$f_b = \frac{PL}{bh^2} \tag{3}$$

여기서, f_b : 휨강도(MPa)

P : 시험기가 나타내는 최대하중(N)

L : 경간(mm)

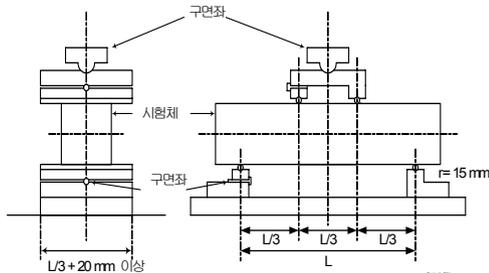


그림 3. 휨인성 시험을 위한 하중 재하 장치

b : 파괴단면 폭(mm)

h : 파괴단면 높이(mm) 이다.

그림 5는 등가휨강도의 개념도를 나타낸 것이다. 등가휨강도는 최대하중에 도달한 후 일정한 변위까지의 휨인성계수(flexural toughness factor)로서 평균강도의 개념을 가진다. 이것은 콘크리트에서 휨인장균열이 발생한 이후의 강섬유에 의한 휨인성을 차원을 갖는 수치로 나타낸다는 장점이 있다. 현재 한국도로공사의 경우 일본 JSCE의 휨인성 평가 개념을 그대로 이용하고 있는데, 이 등가휨강도는 차원을 갖는 값이므로 시편의 크기 및 형상에 따라 그 값이 달라질 수 있다.

3등분점하방식에서의 등가 휨강도는 식 (4)에 의해 계산된다.

$$f'_b = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \times \frac{L}{bh^2} \tag{4}$$

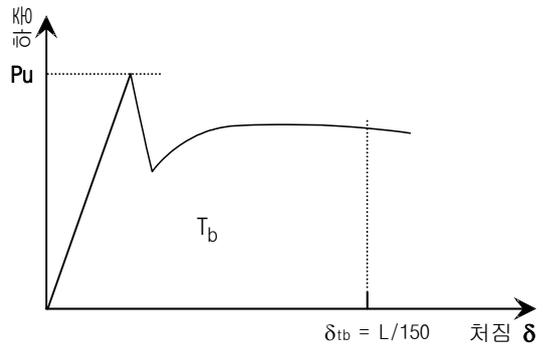
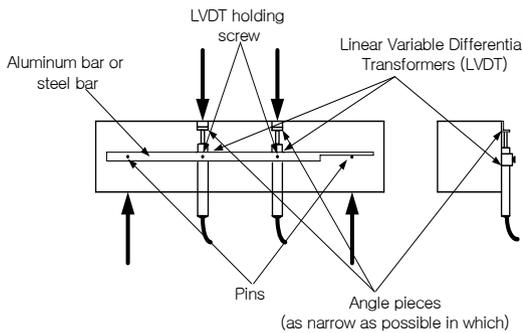
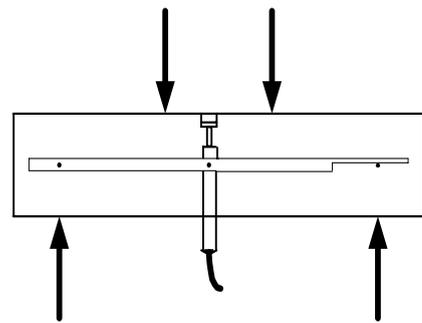


그림 5. 3등분점 재하시험에서의 하중-변형곡선



(a) 재하점의 처짐 측정



(b) 중앙점의 처짐 측정

그림 4. 처짐 측정 장치의 예

여기서, f'_b : 등가휨강도(MPa)
 δ_{tb} : 경간의 1/150의 처짐(mm), 여기서는 3 mm
 T_b : δ_{tb} 까지의 면적(N·mm) 이다.

4. 성능평가 시험결과

4.1 원형패널 시험의 파괴형태

원형패널의 파괴형태는 그림 6에서 보는 바와 같이 일정한 균열양상과 파괴형상을 보여주었다. 원형패널의 균열은 중앙점을 중심으로 세 지점의 가운데로 세 개의 균열이 일정하게 진전되어 파괴되는 것을 관찰할 수 있

었다.

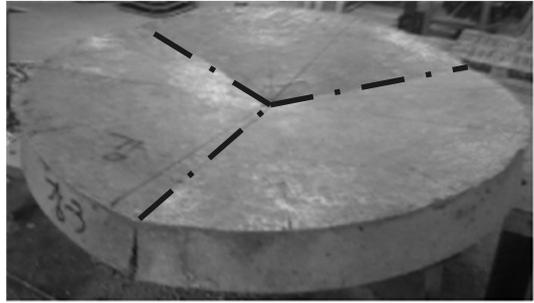
무보강 콘크리트 시편의 경우, 파괴면이 뚜렷이 관찰되나, 섬유보강 콘크리트 시편의 경우에는 섬유의 작용으로 인하여 파괴면이 뚜렷이 관찰되지 않아 파괴면을 선으로 도시하였다.

4.2 원형패널 시험에 의한 휨인성 평가

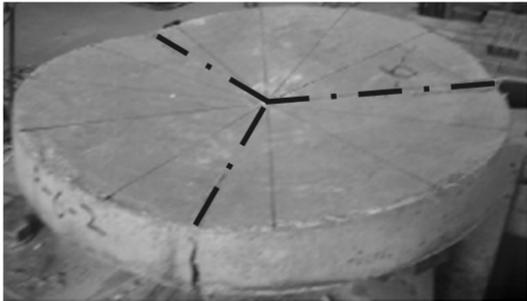
원형 패널에서는 앞서 기술한 바와 같이 지름 800 mm 에 두께 75 mm의 원형패널 시편을 40 mm의 처짐 변위까지 하중을 재하하여 측정된 하중과 중앙점의 처짐에 대한 관계를 이용하여 콘크리트의 에너지 흡수율을



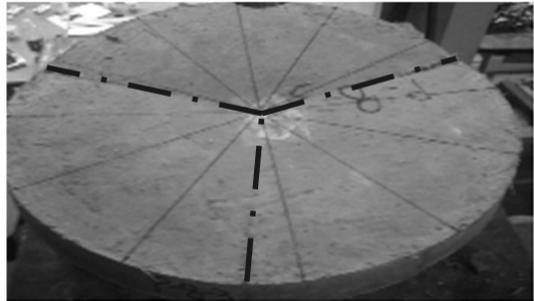
(a) A-3



(b) SF-3



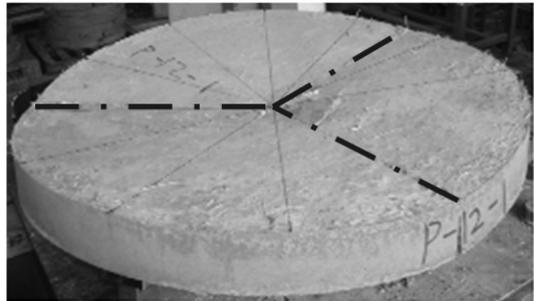
(c) PP-6-2



(d) PP-8-3



(e) PP-10-2



(f) PP-12-1

그림 6. 원형패널 시험의 파괴형태

표 7. 원형패널 시편의 최대하중 및 에너지 흡수율

구 분	최대하중(kN)	평균최대하중(kN)	에너지흡수율(J)	평균에너지흡수율(J)
A	23.92, 24.72, 23.21	24.00	2.46, 9.11, 9.80	7.12
SF	33.11, 33.22, 31.97	32.77	289.16, 249.60, 265.29	268.02
PP-6	28.07, 25.27, 25.53	26.29	260.57, 269.77, 217.92	249.42
PP-8	25.43, 27.01, 25.87	26.10	393.06, 421.34, 402.10	405.50
PP-10	24.51, 25.71, 24.97	25.06	401.74, 435.18, 420.22	419.05
PP-12	23.68, 26.84, 22.98	24.50	475.85, 467.43, 471.17	471.48

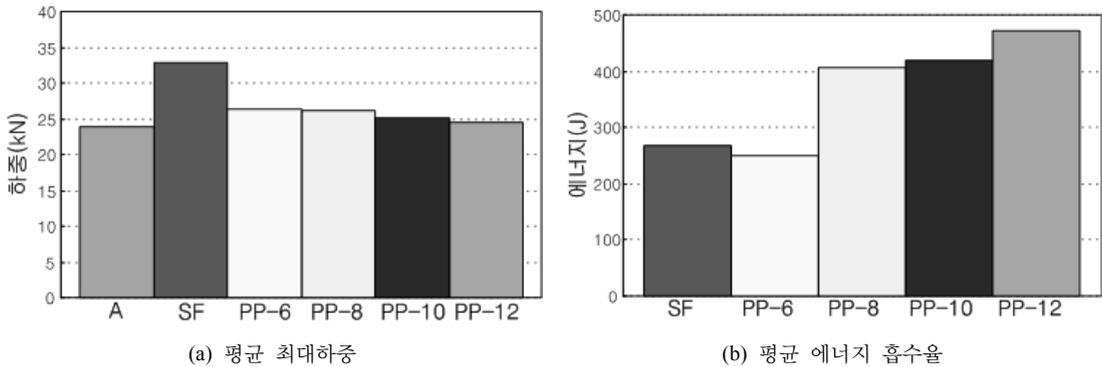


그림 7. 원형패널 시편의 보강 종류별 결과비교

측정하여 휨인성을 평가하였다. 보강재 및 섬유 투입량에 따라 원형패널의 최대하중과 에너지 흡수율을 계산하고 이들의 평균값을 구하여 표 7에 나타내고, 이를 그래프로 비교하여 그림 7에 도시하였다.

최대하중은 약 23~33 kN의 범위를 보였는데, 평균 최대하중은 강섬유 보강의 경우가 32.77 kN 으로 가장 크게 나타났으며 PP섬유 보강의 경우에는 무보강의 경우와 큰 차이를 보이지 않았으며 섬유 투입량에 따른 차이도 보이지 않았다.

에너지 흡수율은 무보강의 경우를 제외하면 249~471 J의 범위를 나타내었는데, 최대하중과 에너지 흡수율은 비례하는 결과를 보이지 않았다. 평균 최대하중은 강섬유가 32.77 kN 으로 가장 크게 나타났으나, 평균 에너지 흡수율은 강섬유의 경우 267 J, PP섬유의 경우에는 사용량에 따라 249 J(6 kg), 406 J(8 kg), 419 J(10 kg), 471 J(12 kg) 등으로 PP섬유의 함량 증가에 따라 큰 폭으로 증가함을 알 수 있다.

원형패널시험에서 얻어진 하중-변위 그래프를 보강 종류별로 그림 8에 도시하였다. 이 그래프를 살펴보면 모든 경우에서 초기 균열이 최대하중점에서 나타남을 알 수 있다. 또한 무보강의 경우에는 최대하중에서 파괴가 발생한 후 즉시 지지력을 상실하는 취성파괴 형태

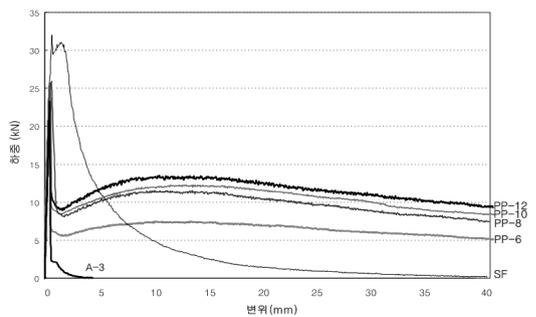


그림 8. 원형패널 시편의 하중-변위곡선

를 보이고 있으나 강섬유보강의 경우에는 최대하중에서 균열이 발생하기는 하지만 강섬유의 작용으로 인해 지지력이 점차 감소하다가 잔류강도에 도달하는 것을 볼 수 있다. PP섬유보강의 경우에도 최대하중에서 균열을 보이지만 섬유 함유량에 따라 잔류강도가 점차 증가하는 것을 볼 수 있는데, 섬유의 함량이 8 kg이 넘는 경우에는 섬유 투입량의 증가에 따른 강도의 증가가 그리 크지 않음을 알 수 있다.

Bernard(1999)와 Clements(2002)는 재령 28일에서 고성능 콘크리트의 원형패널시험에 의한 품질관리기준

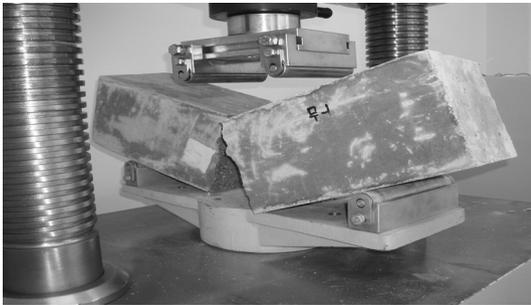
을 에너지 흡수능력 400J 이상으로 제시하였다. 이 기준을 이번 결과에 적용시켜 원형패널의 에너지 흡수능력을 평가한다면, 강섬유는 기준에 미치지 못하는 반면, PP섬유 8 kg 이상 사용 시에는 이 기준을 만족함을 알 수 있다.

4.3 빔 시편의 파괴형태

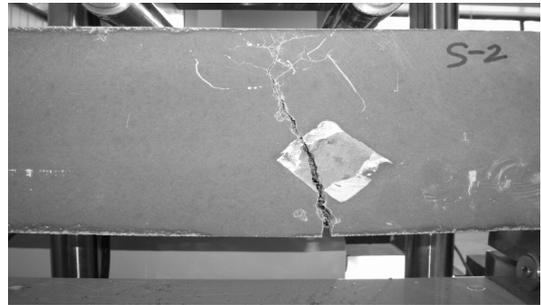
그림 9는 빔 시편들의 파괴형태를 보여주는 사진이다. 시편의 균열 발생 형태는 보강 방법과 무관하게 대체로 시편 중앙부에서 수직방향으로 발생하였으나, 균열의 깊이와 벌어짐 정도는 섬유 종류와 사용량에 따

라 다소 다르게 나타났으며, 동일한 보강의 경우에도 시편마다 다소 다르게 나타났다. 이러한 차이는 시험 결과에도 영향을 미쳐 결과의 변동성에 영향을 미치는 요인으로 판단된다. 3등분점 재하시험의 경우 선하중 재하 방식이므로 시편의 뒤틀림이나 표면의 상태 등에 따라 경계조건을 완벽하게 구현하기가 어렵고, 시편의 크기가 보강재인 섬유의 크기에 비해 충분히 크지 않아 균열발생면에 위치한 보강섬유의 수에 차이가 있을 수 있어 시편에 따른 차이가 발생하는 것으로 판단된다.

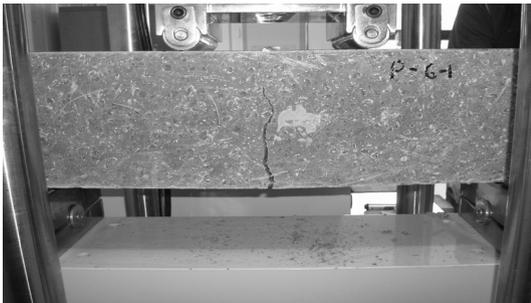
4.4 빔 시편의 휨인성 평가



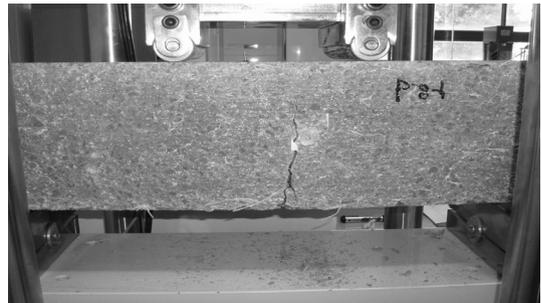
(a) A-1



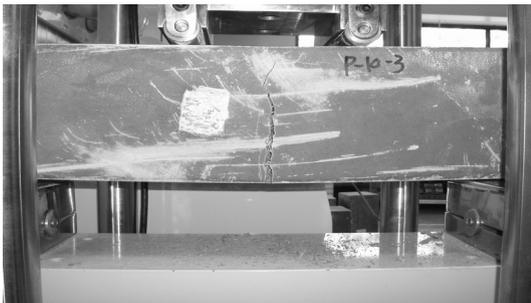
(b) SF-2



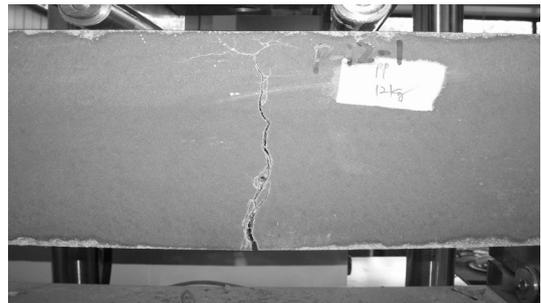
(c) PP-6-1



(d) PP-8-1



(e) PP-10-3



(f) PP-12-1

그림 9. 빔 시편의 파괴형태 (계속)

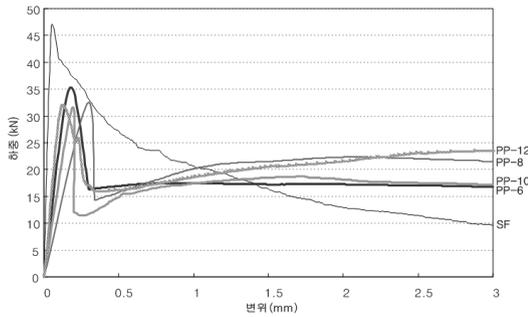


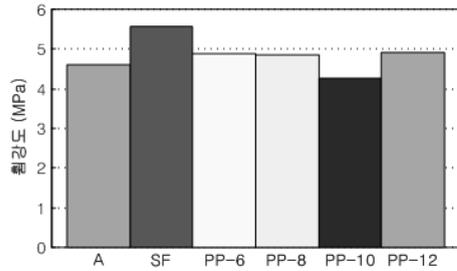
그림 10. 빔 시편의 하중-변위곡선

빔 시편에서 얻어진 하중-변위 그래프를 보강종류별로 그림 10에 도시하였다. 원형패널시험에서 얻어진 하중-변위 그래프와 마찬가지로 초기 균열이 최대하중에서 발생하였으며, PP섬유보강의 경우에 비해 강섬유보강시 변위의 증가에 따른 하중의 감소가 더 큼을 알 수 있다.

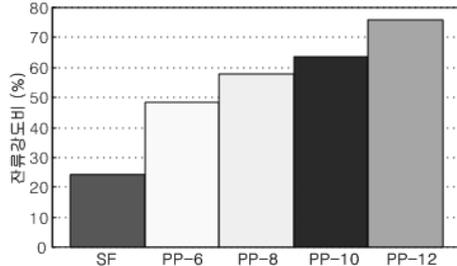
식 (3)과 (4)를 이용하여 휨강도와 등가휨강도 및 잔류강도를 각각 구하고, 이들로부터 잔류강도비와 등가휨강도비를 구하여 표 8에 정리하고, 그림 10에 그래프로 도시하여 비교하였다.

등가휨강도는 하중-변위 곡선을 응력-변형률 선도로 변환하여 기준처짐(δ_c) 3 mm에서의 잔류강도까지의 응력변화를 평균하여 등가의 휨강도로 변환한 것을 의미한다. 등가휨강도비라는 것은 등가휨강도를 최대휨강도에 대해서 나눈 값을 의미하며, 이러한 등가휨강도비를 통해 시편에 처음 응력이 발생했을 때부터 잔류강도까지의 평균 강도 값을 판정하여 지보재에 변위가 발생하는 동안의 평균 강도 값과 최대강도와와의 비를 파악하여 지보재로서의 강도변화에 대한 안정성을 분석할 수 있다.

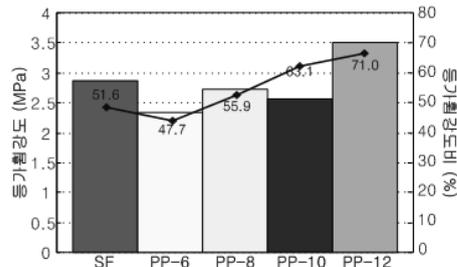
잔류강도비는 하중-변위 곡선에 의해 구한 기준처짐(δ_c) 3 mm에서의 잔류하중으로부터 잔류휨강도 값을 산정하여 휨강도로 나눈 값을 의미한다. 잔류강도비를



(a) 평균 휨강도



(b) 평균 잔류강도비



(c) 평균 등가휨강도 및 등가휨강도비

그림 11. 빔 시편의 종류별 결과비교

통해 터널의 지보재에 외력이 작용하는 경우에 지보재의 변형이 진행됨에 따라 얼마나 강도가 감소하게 되는지를 파악할 수 있다.

표 8. 빔 시편의 휨강도

구분	평균 초기변위 (mm)	평균 휨강도 (MPa)	평균 잔류강도 (MPa)	평균 잔류강도비 (%)	평균 등가휨강도 (MPa)	평균 등가휨강도비 (%)
A	0.05	4.62	-	-	-	-
SF	0.05	5.58	1.35	24.2	2.88	51.6
PP-6	0.11	4.88	2.36	48.4	2.33	47.7
PP-8	0.28	4.87	2.82	57.9	2.72	55.9
PP-10	0.19	4.53	3.06	67.8	2.86	63.1
PP-12	0.12	4.93	3.75	76.1	3.50	71.0

무보강의 경우를 포함하여 모든 경우에서 휨강도는 4.5 MPa를 초과하여 설계기준강도를 만족하였다. 그러나 성능평가 기준이 되는 휨강도 4.5 MPa 과 등가휨강도 3.0MPa 이상을 모두 만족하는 것은 PP섬유 12 kg 사용한 경우뿐이며, 강섬유와 원형패널시험에서 최고 등급인 C 등급 기준을 만족하는 PP섬유 8 kg 사용한 경우에는 등가휨강도 기준을 만족하지 못하여 에너지 흡수능력에 의한 평가와는 다른 결과를 보였다.

대체로 잔류강도비와 등가휨강도비는 비슷한 양상을 보이고 있으며, 평균휨강도는 강섬유가 5.58 MPa로 가장 크지만 잔류강도비는 24.2%로 가장 적은 비율을 보여 균열 발생 후의 전체적인 지지능력은 PP섬유가 강섬유보다 우수함을 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 강섬유 및 PP섬유로 보강된 콘크리트 복합체의 거동 특성을 원형패널시험과 휨인성시험을 통해 지보재로서의 성능을 평가하고 그 결과를 비교분석해 보았다.

시험을 통하여 본 연구에서 얻은 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 일축압축시험결과 재령 28일에는 전부 50.0 MPa 이상의 높은 강도를 보였고, 강섬유 사용 시 56.2 MPa로 가장 높은 강도를 보였다.
- 2) 원형패널에 대한 시험결과 평균 최대하중은 강섬유가 32.77 kN으로 가장 크게 나타났으나, 평균 에너지 흡수율은 강섬유의 경우 268 J, PP섬유의 경우에는 사용량에 따라 249 J(6 kg), 406 J(8 kg), 419 J(10 kg), 471 J(12 kg)으로 PP섬유의 함량 증가에 따라 큰 폭으로 증가하였다.
- 3) EFNARC 패널시험 결과에 대한 평가 기준을 RTA 원형패널시험 결과에 적용시켜 에너지 흡수능력을 평가한다면, 강섬유는 기준에 못 미치는 반면, PP섬유 8 kg/m³ 이상 사용 시에는 EFNARC 규정을 환산한 최고등급인 C등급(403 J)을 만족하였다.
- 4) 고성능 감수제와 고성능 분체혼화제를 사용한 콘크리트 배합설계(표 4)를 적용한 결과, 무보강을 포함하여 모든 시편에서 4.5 MPa 이상을 보여 설계기준 강도를 만족하였으며, 강섬유 보강의 경우 평균 최

대휨강도가 5.58 MPa로 가장 크게 나타났다. 그러나 잔류강도비는 24.2%로 가장 적은 비율을 보여 균열 발생 후의 전체적인 지지능력은 PP섬유가 강섬유보다 우수함을 나타내었다.

- 6) PP섬유 12 kg의 평균 등가휨강도는 3.5 MPa로 한국도로공사 품질기준인 등가휨강도기준 3.0MPa를 만족하였지만, PP섬유 10 kg 이하의 경우와 강섬유 보강의 경우에는 평균 등가휨강도가 3.0 MPa 이하로 나타나 기준에는 다소 못 미치는 결과를 보였다. 그러나 PP섬유 10 kg/m³의 경우 평균잔류강도는 3.0 MPa를 상회하는 결과를 보여 현장 적용에는 문제가 없는 것으로 판단되었다.

이상의 결과를 살펴보면 PP섬유 10 kg/m³ 이상을 적용할 경우 강섬유 40 kg/m³를 적용한 경우보다 에너지 흡수능력과 휨인성이 더 우수한 것을 알 수 있으며, 호주 등지에서 기준으로 삼고 있는 에너지흡수능력을 감안하면 PP섬유 8 kg/m³ 이상만 적용하여도 강섬유와 대등한 보강능력을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 이상필, 류종현, 이상돈, 전석원, 이정인, 2007, 터널 영구 지보재로서의 슛크리트 고성능화 및 내구성 평가에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제17권, 제4호, pp. 266-284.
2. 하태욱, 2002, 슛크리트용 폴리프로필렌 섬유의 개발 연구, 석사학위논문, 전남대학교.
3. 한국도로공사, 2001, 강섬유보강 슛크리트의 성능향상 및 품질기준정리(II).
4. 한국산업규격(KS F 2566), 2005, 강섬유보강 콘크리트의 휨인성 시험방법.
5. 한국터널공학회, 2009, (국토해양부 제정) 터널표준시방서.
6. Bernard E.S., 1999, Correlations in the performance of fiber reinforced shotcrete beams and panels, Engineering report (University of Western Sydney, Nepean. School of Civic Engineering and Environment), no. CE9.
7. Clements, M.J., 2002, The Future of Fibre Reinforced Sprayed Concrete, Proc. the 4th Int. Symp. on Sprayed Concrete, Norwegian Concrete Association, pp. 73-81.
8. EFNARC, 1996, European specification for sprayed concrete.
9. RTA, 2001, Test Method T373 (Determination of the Toughness of a Fibre Reinforced Shotcrete Mix Round Determinate Panel Test).



이수열
 1978년 연세대학교 공과대학 토목공학과
 공학사
 2003년 강원대학교 산업대학원 토목공학
 과 공학석사
 Tel: 02-746-2172
 E-mail: 7865375@hdec.co.kr
 현재 수원대학교 토목공학과 박사수료,
 현대건설(주) 토목환경사업본부장



박연준
 1981년 서울대학교 공과대학 자원공학과
 공학사
 1983년 서울대학교 대학원 자원공학과 공
 학석사
 1992년 미국 Minnesota 대학교 대학원 토
 목공학과 공학박사
 Tel: 031-220-2580
 E-mail: yjpark@suwon.ac.kr
 현재 수원대학교 토목공학과 교수



김수만
 1971년 고려대학교 토목공학 공학사
 1981년 고려대학교 토목공학 공학석사구
 조공학
 1985년 고려대학교 토목공학 공학박사구
 조공학
 Tel: 031-220-2159
 E-mail: smkim@suwon.ac.kr
 현재 수원대학교 토목공학과 교수



유광호
 1984년 연세대학교 공과대학 토목공학과
 공학사
 1986년 연세대학교 대학원 토목공학과 공
 학석사
 1992년 미국 Minnesota 대학교 대학원 토
 목공학과 공학박사
 Tel: 031-220-2566
 E-mail: khyou@suwon.ac.kr
 현재 수원대학교 토목공학과 교수



장성일
 2008년 수원대학교 공과대학 토목공학과
 공학사
 2010년 수원대학교 대학원 토목공학과
 공학석사
 Tel: 031-231-1048
 E-mail: jsisw01@hanmail.net
 현재 수원대학교 대학원 토목공학과 공학
 석사 졸업



서영호
 1986년 서울대학교 공과대학 자원공학과
 공학사
 1988년 서울대학교 대학원 자원공학과
 공학석사
 1993년 서울대학교 대학원 자원공학과
 공학박사
 Tel: 02-456-0711
 E-mail: skkim@dic.co.kr
 현재 현대건설(주) 토목사업본부 부장