강섬유보강 숏크리트의 휨 성능평가를 위한 보시편과 패널시편의 상관성 연구

Correlations in the Flexural Performance of SFRC Beams and Panels

류종현 *	한승환**	김진철**	안태송***	이상돈***
Jong-hyun Ryu	Seong-Hwan Han	Jin-Cheol Kim	Tae-Song An	Sang-Don Lee

ABSTRACT

Steel Fiber Reinforced Shotcrete(SFRS) has been prevalently used in lining to stabilize tunnel structures as temporary or permanent support. In recent, it is one of the major elements of tunnel construction, and so the quality control of SFRC should be clarified to guarantee the safety. The experimental study has been performed to verify the possible correlations in several chracteristics related to quality of SFRC and examine the applicability of round panel test for in field. The test variables were the type and dosage of accelerator, aspect ratio of fiber, and fiber content. The test results such as compressive strength, flexural strength, flexural toughness, and energy absorption capacity, were exmained and analyzed scrutinizingly.

1. 서론

국내 터널현장에서는 보 시편을 제작하여 숏크리트 휨인성 평가를 하고 있으나, 보 시편의 제작 시에 컷팅에 의한 오차가 발생하고, 시험 시에 부재의 크기에 따라 오차가 발생한다. 또한 결과분석시에는 휨인성지수를 구하기 위한 하중-처짐 곡선이 일정한 형태를 나타내지 않으므로 결과의 분산이 커지는 결과를 초래한다. 따라서, 강섬유보강 숏크리트의 휨인성을 평가하는 품질시험 방법 및 결과분석 시에 일관성과 객관성이 부족한 것으로 판단된다. 외국에서는 이러한 문제를 보완하기 위하여 EFNARC의 사각패널 및 호주 RTA 원형패널에 의한 휨인성 평가방법이 제시되고 있다. EFNARC의 사각패널의 경우 4변지지로 휨인성이 측정되므로 실험 시에 지지조건이 변화하여 결과의 오차가 발생하고 패널의 균열형태가 일정하지 않아 결과의 분산성이 높아진다.[3] 호주의 RTA(Road and Traffics Authority)[1]의 원형패널은 사각패널과는 달리 변지지가 아닌 점지지 형식을 채택하고 있어, 균열형태가 일정하고 하중-처짐 곡선에서도 일정한 형태의 그래프를 얻을 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 이 RTA의 원형패널을 이용한 휨인성평가방법과 국내의 보 시편을 이용한 휨인성평가방법을 비교하고 그 상관성을 분석하여, 원형패널의 적용성 및 사용성을 검토하였다.

* 정회원, 한국도로공사 도로연구소 연구원
** 정회원, 한국도로공사 도로연구소 책임연구원
*** 정회원, 한국도로공사 도로연구소 수석연구원

2. 실험개요

강섬유보강 숏크리트의 특성상 현장숏팅을 모사하는 것이 중요하므로 모든 시편은 현장숏팅에 의해 제작되었다. 시험체는 타설에 의해 제작된 시편과 숏팅에 의한 시편으로 나누고, 패널을 현장제작후 바로 양생하였고, 보 시편은 직사각형 패널에 숏팅하여 28일 양생한 후 컷팅하여 제작하였다. 급결제 첨가량은 숏팅머신 자체 조절기로 조절하여 숏팅하였으며, 강섬유는 현장배치에서 투입하였다. 배합은 다음 표 1와 같이 한국도로공사의 표준배합으로 하였으며, 현장배치에서 배합하였다.

표 1 실험에 사용된 현장배합

시멘트 (kg/m^3)	배합수 (kg/m^3)	물시멘트비 (W/C)%	잔골재율 (S/a)	굵은골재 (kg/m^3)	잔골재 (kg/m^3)	혼화제 (kg/m^3)
480	216	0.45	65	555	1030	4.8

2.1 실험변수

실험변수는 다음 표 2과 같이 강섬유의 혼입량, 형상비와 급결제 종류와 종류별 첨가량변화로 하였다. 국내에서는 강섬유 형상비는 60이상으로 규정되어 있으며, 혼입량은 $40kg/m^3$로 규정되어 있으므로, 이를 기준으로 강섬유 규격 및 혼입량을 선정하였다. 급결제는 현장마다 또는 숏팅 부위별로 다소 차이는 가지고 있으나, 실리케이트계는 12%, 알루미네이트계 와 시멘트광물계는 5%가 제조업체에서 제시하고 있는 표준첨가량이므로 이를 기준으로 변수를 선정하였다.

표 2 강섬유보강 숏크리트 휨인성 평가 실험변수

구 분	급결제 종류	급결제 투여량 (C에 대한 %)	강섬유 규격 (직경×길이, mm)	강섬유 혼입량 (kg/m^3)	비 고
S6-F30C40	실리케이트계	6	0.5×30	40	
S6-F30C40		9	0.5×30	40	
S6-F35C40		9	0.5×35	40	
S6-F30C50		9	0.5×30	50	
S6-F30C40		12	0.5×30	40	
S6-F30C40		15	0.5×30	40	
A3-F30C40	알루미네이트계	3	0.5×30	40	
A5-F30C40		5	0.5×30	40	
A7-F30C40		7	0.5×30	40	
C3-F30C40	시멘트 광물계	3	0.5×30	40	
C5-F30C40		5	0.5×30	40	
C7-F30C40		7	0.5×30	40	

2.2 실험방법

RTA패널과은 중앙의 최대 처짐을 측정하였으며, 지점에 정확한 거치를 위하여 시편에 선을 미리 그어 두었다. 원형패널에는 30°간격으로 선을 그어, 균열의 진행방향, 균형형상, 지점이동량, 지지조건변화등을 살피는 데 이용하였다. 시험 시에 오차를 줄이고 오차를 보정하기 위하여 시편의 크기를 측정하여 보정하였으며, RTA패널의 경우

는 각각 규정하는 일정한 균열이 발생하지 않거나 최대 처짐이 발생 전에 시험이 종료되면 결과 값을 계산하지 않도록 하였다. 보 시편은 시편에 중앙과 3등분 부분에 표시를 하여 균열의 발생 위치를 구할 수 있도록 하였다.

표 3 시험규정 차이점

	RTA 원형패널	보 시편
시편형상	R 800×75 mm	150×150×550mm
재하속도	10mm/min	L/1500~3000 mm/min
최대처짐	40mm	L/150
지지조건	3점 지지	2점 지지
재하판형상	반구형태	2점 선 하중 형태

3. 상관성 분석

3.1 숏크리트의 압축강도와 휨인성 특성간의 상관성

그림 1은 재령 7일 및 28일에 측정된 숏크리트의 코어압축강도와 RTA 원형패널에서 측정한 흡수에너지 사이의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 재령 7일의 경우 압축강도가 증가하여도 RTA 원형패널의 흡수에너지는 급결제의 종류에 관계없이 거의 일정하였으며, 250~300J 정도를 나타내었다. 재령 28일의 경우를 보면 코어압축강도와 원형패널의 흡수에너지 사이의 상관성은 거의 없지만, 압축강도의 증가에 따라 RTA 원형패널의 흡수에너지도 증가하는 경향은 나타내었다.

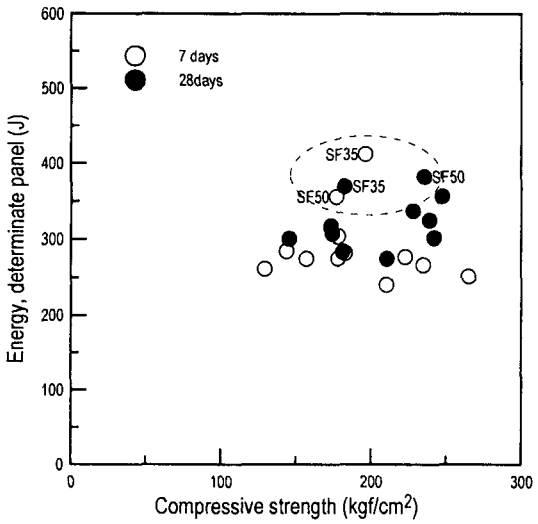

그림 1. 압축강도와 RTA패널 흡수에너지

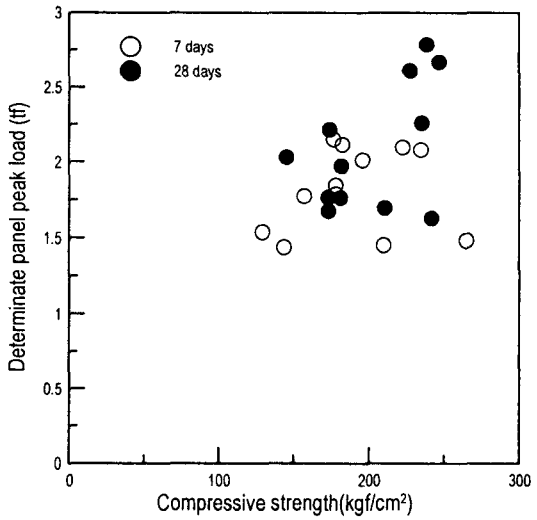

그림 2. 압축강도와 RTA패널 초기균열하중

숏크리트 중에 함유된 강섬유의 형상비 또는 혼입률을 변화시킨 SF 35(S9-F35C40) 및 SF 50 (S9-F30C50)의 경우 압축강도는 큰 차이가 없으나, RTA 원형패널의 흡수에너지는 강섬유의 혼입률 또는 형상비가 증가하면 크게 증가하였다. 즉 강섬유의 형상비를 60에서 70으로 변화시킨 SF35의 경우 흡수에너지는 재령에 관계없이 약 35% 정도 증가하였으며, 강섬유 혼입량을 50kg/m^{3}으로 증가시

킨 SF50의 경우 재령 7일 및 28일의 흡수에너지가 각각 17 및 39% 증가하는 결과를 나타내었다.

그림 2는 숏크리트의 코어압축강도와 RTA 원형패널의 초기균열하중 사이의 상관성을 고찰한 것이다. EFNARC 패널, RTA 원형패널의 초기균열하중과 압축강도 사이의 상관성을 고찰한 Bernard에 의하면[3] 패널의 초기균열하중과 압축강도간의 상관성은 거의 없으며, 특히 EFNARC 패널의 경우보다 RTA 패널의 초기균열하중과 압축강도 사이의 분산정도가 더 크다고 하며, 본 연구에서도 이와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 이와 같이 패널의 초기균열하중과 압축강도의 상관성이 거의 없는 이유에 대하여 Bernard는 숏크리트로 제작되는 패널 시험체의 두께가 균일하게 제작되지 못하므로 두께 변동에 의한 영향 때문이라고 지적하고 있다.

3.2 숏크리트의 휨강도와 휨인성 특성간의 상관성

그림 3은 숏팅시편으로부터 절단하여 제작된 보 시편을 3등분점 재하하여 측정된 휨강도와 하중과 재하점의 처짐곡선 아래의 면적인 보 시험체의 흡수에너지(T_b)로부터 계산되는 등가휨강도의 상관관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 직선은 등가휨강도가 최대휨강도의 68%인 점을 나타내는 것인데, 재령 28일의 경우 급결제의 종류에 관계없이 등가휨강도가 최대휨강도의 68% 이상을 나타냄으로써 시방규격을 만족하고 있음을 알 수 있다.

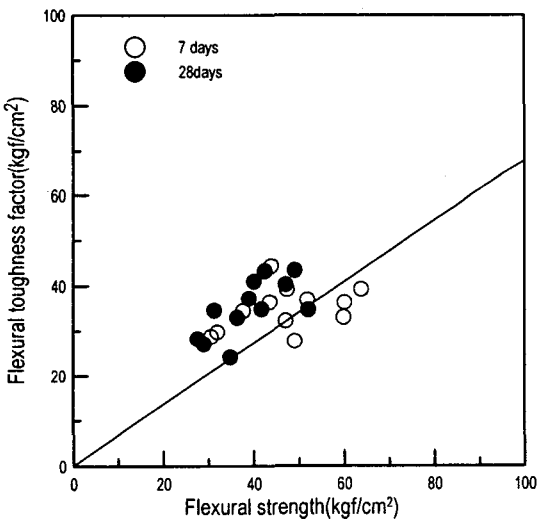

그림 3. 휨강도와 등가휨강도

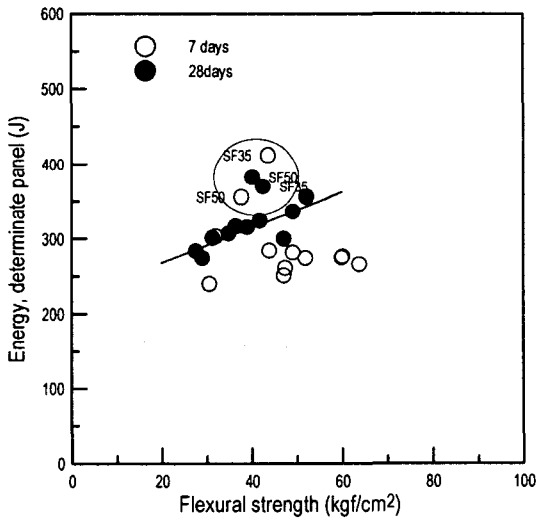

그림 4. 휨강도와 RTA패널 흡수에너지

그림 4는 휨강도와 RTA 원형패널의 흡수에너지 사이의 상관관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 강섬유의 혼입률 및 형상비가 다른 SF 35 및 SF 50을 제외하면 재령 7일의 경우 휨강도가 증가하여도 RTA 원형패널의 흡수에너지는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 그러나 재령 28일의 경우에는 휨강도와 RTA 원형패널의 흡수에너지가 양호한 상관성을 보여 상관계수가 0.84 정도인 선형관계를 나타내고 있다. SF 35 및 SF 50의 경우 강섬유 혼입률 및 형상비의 증가로 인한 휨강도 개선효과는 미미하였으나, RTA 원형패널의 흡수에너지가 크게 증가하였으며, 이는 강섬유의 혼입률 및 형상비 증가로 인하여 균열의 진전에 대한 저항성이 증가가 적절히 반영되어진 결과로 판단된다.

그림 5는 휨강도와 RTA 원형패널의 초기균열하중 사이의 상관성을 분석한 결과로서 상관관계가 거의 없음을 알 수 있으며, 이러한 결과는 원형패널 시험체의 두께 변동과 밀접한 관계가 있기 때문으로 생각된다.

3.3 숏크리트의 휨인성평가방법간의 상관성

그림 6은 절단된 보 시험체의 등가휨강도와 RTA 원형패널의 흡수에너지 사이의 상관관계를 나타내본 것이다. 보 시험체의 등가휨강도는 재하점의 처짐이 지간의 1/150이 되기까지 하중-처짐곡선 아래의 면적(보 시험체의 에너지, T_b)으로부터 계산되는 평균강도 개념으로서, 3등분점으로 재하된 휨강도 시편의 균열 이후 거동을 나타낸다. 따라서 3등분점으로 재하된 휨강도 시편의 흡수에너지로부터 계산되는 등가휨강도와 RTA 원형패널의 흡수에너지는 밀접한 상관관계가 있어야 한다. 그러나 이 그림에서 알 수 있듯이 보시험체의 등가휨강도가 증가함에 따라 원형패널의 흡수에너지도 증가하는 경향을 나타내지만, 시험값의 분산이 다소 심한데, 등가휨강도와 RTA 원형패널 흡수에너지 사이의 관계를 선형으로 나타낸 경우 상관계수가 0.55정도로서 다소 낮은 상관성을 보였다.

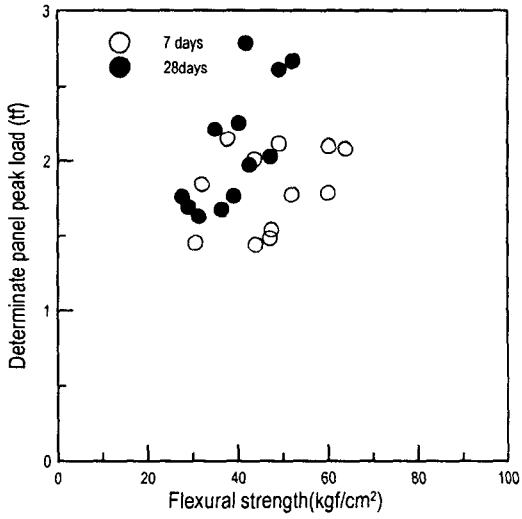

그림 5. 휨강도와 RTA패널 초기균열하중

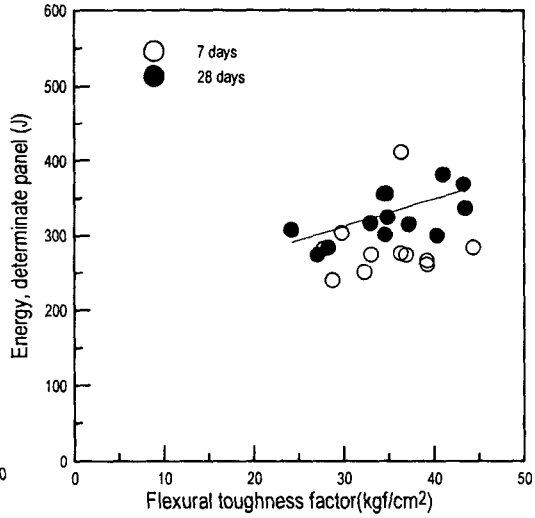

그림 6. 등가휨강도와 RTA패널 흡수에너지

그림 7은 보 시험체의 최대휨강도에 대한 등가휨강도의 비율과 RTA 원형패널 흡수에너지 사이의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 숏크리트 중에 포함된 강섬유의 특성이 다른 SF 35 및 SF 50의 경우를 제외하면 최대휨강도에 대한 등가휨강도의 백분율에 관계없이 RTA 원형패널의 흡수에너지는 재령 7일의 경우 250~300J, 재령 28일의 경우 300~350J 사이에 존재함을 알 수 있다. 또한 SF 35 및 SF 50의 경우에는 최대휨강도에 대한 등가휨강도의 백분율이 유사하게 나타났다.

그림 8은 25mm 처짐까지 구한 EFNARC 패널에 의한 흡수에너지와 40mm 처짐까지 구한 RTA 패널에 의한 흡수에너지 사이의 상관관계를 나타낸 것인데, 그림에서 수식은 Bernard가 제시한 두 휨인성값간의 관계식이다. 강섬유의 종류 및 첨가량을 변화시킨 Bernard와 Clements의 실험결과에 의하면 25mm 처짐까지 구한 EFNARC 패널의 흡수에너지 1000J은 40mm 처짐까지 구한 RTA 원형패널의

흡수에너지 400J에 해당하며, 이때 결정계수는 0.98로서 선형성이 매우 높은 것을 알 수 있다.

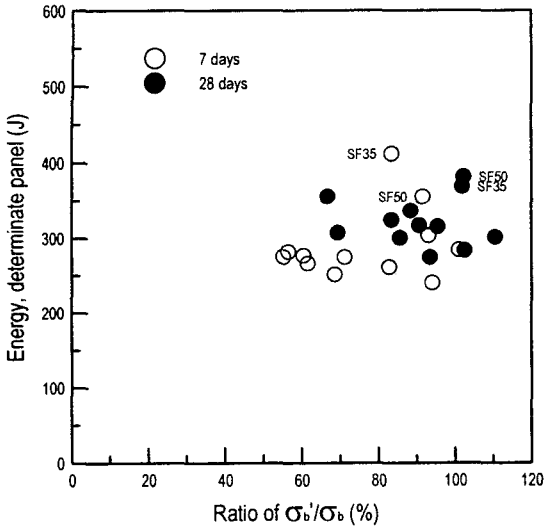

그림 7. 등가휨강도비와 RTA패널 흡수에너지

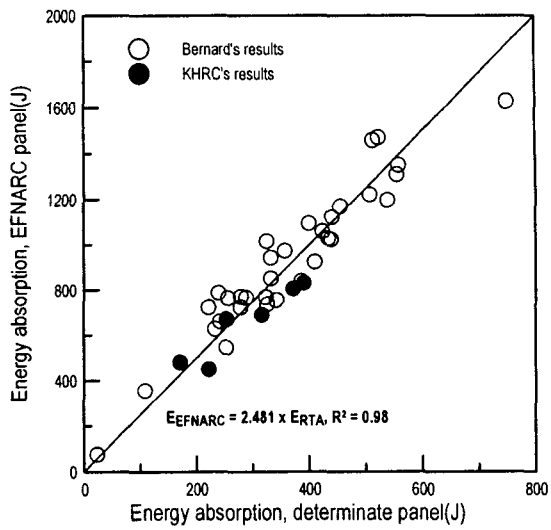

그림 8. RTA패널과 EFNARC패널 흡수에너지

본 연구에서도 현장 타설된 콘크리트 및 숏크리트에 대하여 얻은 결과를 Bernard의 실험결과와 비교하였다. 그림 8을 보면 본 연구결과가 Bernard의 실험결과와 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 현재 사용중인 강섬유보강 숏크리트의 휨인성평가방법과 RTA원형패널시편을 이용한 휨인성 평가방법의 상관성을 고찰하기 위한 실험적 분석을 수행하였다. 서로 다른 시편형상과 하중경계조건등에 의해 균열 후 휨거동에 차이를 나타내는 것을 실험결과를 통해 알 수 있었다. 이러한 차이는 역학적으로 패널의 2차원요소로서의 구조거동에 기인하는바가 큰 것으로 판단되며, 보 시편에서 휨인성 지수 산정시 도입되는 무차원량 개념의 강도비가 휨인성 특성을 적절히 반영하는데 미흡한 것으로 판단된다.

따라서 에너지 개념의 휨인성 특성과 강도개념의 휨강도, 압축강도는 서로 분리되어 고려되어야 하며, 실제 숏크리트 라이닝 거동에 근접하는 패널시편의 적용이 보다 합리적인 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. RTA, Test Method T373 " Determination of the Toughness of a Fibre Reinforced Shotcrete Mix-Round Determinate Panel Test", 1999.
2. JCI, SF4, "Method of Test for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber reinforcd Concerte", 1990.
3. Bernard, E. S., "Correlations in the Performance of Fiber Reinforced Shotcrete Beams and Panels", University of Western Sydney.