

강섬유보강 슛크리트의 휨인성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Flexural Toughness of SFRS

류 종 현* 한 승 환** 김 진 철*** 안 태 송**** 이 상 돈*****
Ryu, Jong Hyun Han, Seung Hwan Kim, Jin Chel An, Tae Song Lee, Sang Don

ABSTRACT

Addition of steel fiber to shotcrete is to improve the brittleness of concrete. Quality of steel fiber reinforced shotcrete can be evaluated by quantitative analysis of toughness characteristics after cracking. The toughness characteristics can be expressed by absolute value of energy absorption capacity, non-dimensional toughness index related to the energy absorption capacity, and equivalent flexural strength at arbitrary deflection. In this study, merits and demerits of flexural toughness by RTA round panel of Australia and other specifications have been analyzed.

1. 서론

스츛크리트에 강섬유를 혼합하는 것은 콘크리트의 취성을 개선하기 위한 것이므로 슛크리트의 균열 발생 후 인성특성을 정량적으로 표현함으로써 강섬유보강 슛크리트의 성능을 평가할 수 있다. 인성특성을 나타내는 방법으로는 RTA 및 EFNARC에서 규정하는 에너지 흡수능력을 절대값으로 나타내는 방법, ACI 및 ASTM에서 규정하는 에너지 흡수능력과 관련하여 무차원의 지수(Toughness Index)로 나타내는 방법 및 JSCE, 도로공사에서 규정하는 균열 발생 후 임의 처짐까지의 등가휨강도(equivalent flexural strength)로 나타내는 방법 등이 있다. 현재 국내에서는 보시편을 이용하여 등가휨강도를 구하는 방법을 사용하고 있다. 유럽에서는 EFNARC에서 규정하고 있는 사각형태의 패널을 이용하여 에너지 흡수능력을 구하고 있으나, 최근에는 사각패널의 문제점을 보완한 호주 RTA에서 규정하는 원형 형태의 패널을 이용하여 휨인성을 평가하고 있다. 본 연구는 현재 슛크리트의 휨인성시험방법으로 사용되고 있는 보시편의 등가휨강도, EFNARC의 사각패널 및 RTA의 원형패널에 의한 에너지 흡수능력의 절대값 측정결과에 대한 분산, 균열형태 및 각 시험방법 상관성을 분석하였다.

2. 시험체 제작 및 시험방법

- * 정회원, 한국도로공사 도로연구소 재료·환경연구그룹 연구원
- ** 정회원, 한국도로공사 도로연구소 포장연구그룹 책임연구원
- *** 정회원, 한국도로공사 도로연구소 재료·환경연구그룹 책임연구원
- **** 정회원, 한국도로공사 도로연구소 재료·환경연구그룹 수석연구원
- ***** 정회원, 한국도로공사 도로연구소 지반연구그룹 수석연구원

2.1. 시험규정 및 방법

표 1 시험규정 차이점

	RTA 원형패널	EFNARC 사각패널	보시편
시편형상	R 800×75 mm	600×600×100mm	150×150×550mm
재하속도	10mm/min	2.5mm/min	L/1500~3000 mm/min
최대처짐	40mm	25mm	L/150
지지조건	3점 지지	4변 지지	2점 지지
재하관형상	반구형태	사각판 형태	2점 선하중 형태

현재 국내에서는 휨인성을 보시편을 이용하여 구하고 있으나, 이것은 터널 내의 라이닝의 거동을 완전하게 표현할수 없으며, 재료 자체만의 품질평가만을 할 수 있는 것이기 때문에 실제 라이닝의 거동을 표현할수 있는 패널의 형태로 휨인성을 평가하는 EFNARC패널과 RTA패널을 이용한 방법을 검토하였다. 여기서는 JCI, EFNARC, RTA의 규정에 대하여 기술하였다.

각 규정은 다른 시편형상, 재하속도, 지지조건등을 제시하고 있으며, 휨인성 결과에 대한 등급도 각각 제시하고 있다.

RTA패널과 EFNARC패널은 중앙의 최대 처짐을 측정하였으며, 지점에 정확한 거치를 위하여 시편에 선을 미리 그어 두었다. 또한 RTA 원형패널에는 30°간격으로 선을 그었으며, EFNARC패널에는 50mm 간격으로 선을 그어, 균열의 진행방향, 균형형상, 지점이동량, 지지조건변화등을 살피는 데 이용하였다. 시험시에 오차를 줄이고 오차를 보정하기 위하여 시편의 크기를 측정하여 보정하였으며, RTA패널과 EFNARC패널의 경우는 각각 규정하는 일정한 균열이 발생하지 않거나 최대처짐이 발생전에 시험이 종료되면 결과값을 계산하지 않도록 하였다. 보시편은 시편에 중앙과 3등분 부분에 표시를 하여 균열의 발생 위치를 구할수 있도록 하였다.

2.2. 시험체 제작

시험체는 강섬유의 형상비를 변화 시킴으로써 수행하였으며, RTA와 EFNARC 패널시편의 경우 몰드에 직접숫팅하여 제작하였고, 보시편은 750×750×250mm의 패널에 숫팅한 후, 소정의 크기로 컷팅하여 제작하였다.

표 2 현장시험에 적용된 실험변수

	강섬유	S/a (%)	급결제	W/C (%)
R(S)-H0530-S65	0.5×30mm(40kgf/m ³)	65	알루미늄에이트계 5%	0.45
R(S)-H0535-S65	0.5×30mm(40kgf/m ³)	65	"	0.45

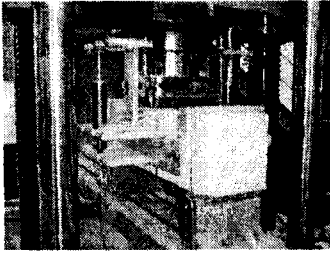


그림 1 보시편의 재하장면



그림 2 원형패널의 재하장면

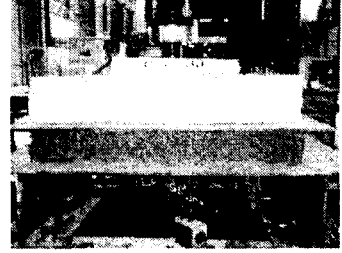


그림 3 EFNARC패널의 재하장면

3. 시험결과

3.1 균열형상

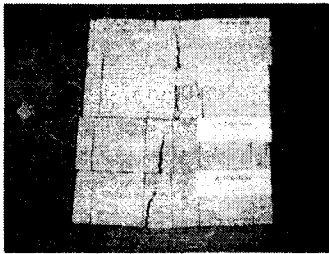


그림 4 보시편의 균열형태

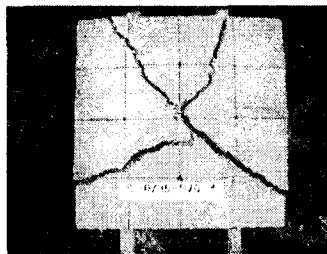


그림 5 사각패널의 균열형태

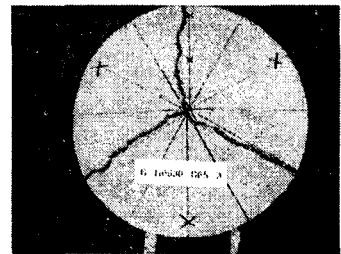


그림 6 원형패널의 균열형태

보시편의 경우 그림 4에서처럼 시편 3등분의 가운데 부분에서 거의 모든 균열이 발생하였다. 그러나 보시편은 파괴단면의 면적이 작기 때문에 실제 터널의 거동을 파악하지 못하는 단점이 있다.

EFNARC패널은 그림 5처럼 방사형의 균열, 십자형이나 대각선형태 등과 같이 여러형태의 균열을 나타내었다. EFNARC패널의 경우 슛팅에 의해 제작될 경우 시편형상이 일정하지 못함에 따라 균열진행 방향이 바뀔수 있으나 EFNARC패널의 경우 지지조건의 변화가 더 큰 원인인 것으로 판단된다. EFNARC패널의 경우 실험 중 지지조건이 4면지지에서 패널의 모서리가 떠 오르는 현상이 발생함에 따라 지지조건이 바뀔수 있다.

RTA원형패널은 그림 6에서 보는 바와 같이, 120°의 일정한 간격을 유지하는 것을 볼 수 있다. 시편제작시 시편형상이 일정하지 못하여 균열이 다소 120°를 유지하지 못하는 경우가 발생하더라도 초기균열발생 후에 지지조건이 변화가 없고, 지점부가 힌지로 구성되어 시편처짐에 따라 시편형태를 유지할수 있기 때문에 간격을 유지하는 것으로 판단된다.

3.2 하중-처짐곡선

보시편은 하중-처짐곡선은 그림 7에 있는데, 보시편의 경우 휨인성시험에서 강섬유 전체가 단면에서의 인성을 나타내기 보다는 강섬유 소수가 인성을 나타내는 경우가 있어 결과의 분산성을 높이는

결과를 나타냈다. 패널의 하중-처짐 곡선은 그림 8과 9에서 보는 바와 같이, EFNARC패널은 산이 여러군데 나타나는 반면, 원형패널은 최대점이 하나로 나타난다. 그 원인으로 EFNARC패널은 지지조건 변화에 따른 것으로 판단된다. 반면 원형패널은 초기 콘크리트에 의한 하중-처짐곡선을 나타내다가 이후에는 강섬유에 의한 인성을 잘 나타내는 하중-처짐곡선을 이루고 있다.

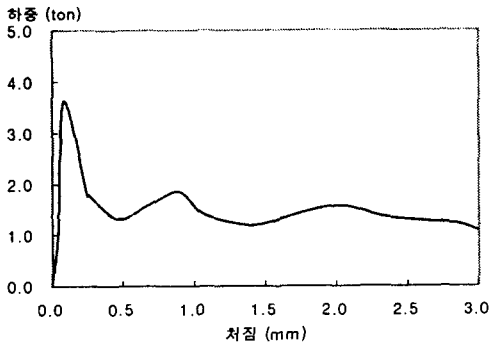


그림 7 보시편의 하중-처짐곡선

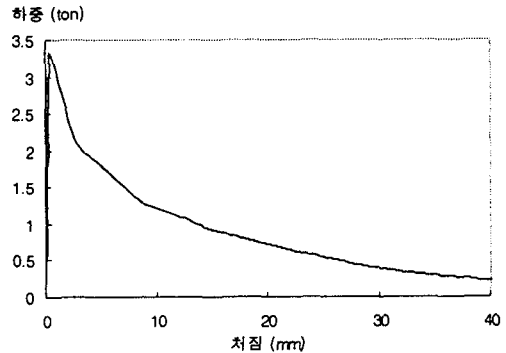


그림 8 원형패널의 하중-처짐 곡선

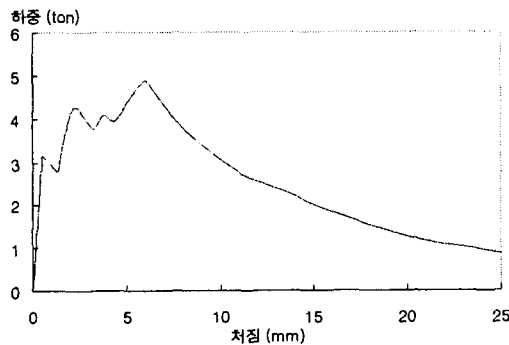


그림 9 EFNARC패널의 하중-처짐 곡선

3.3 휨인성결과

표 3에서는 휨인성결과를 구한 것으로, 보시편의 처짐 3mm까지의 등가휨강도비를 구한 것이며, EFNARC패널과 RTA패널은 일정처짐까지의 흡수에너지량을 구한 것이다.

보시편은 표 3에서 보는 바와 같이, 솟딩한 휨강도는 타설에 의한 휨강도의 약 70% 정도이며, 등가휨강도비에서도 약 84%정도로 감소한 것을 알수 있는데, 이것은 시편의 다짐상태, 급결제사용에 의한 강도 저하등에 원인이 있는 것으로 판단된다. 또한 강섬유 형상비에 대한 결과에서는 형상비 60보다는 형상비 70인 경우가 더 높은 값을 나타내었다. EFNARC패널의 결과를 살펴보면, 형상비 70인 시편결과보다는 형상비 60인 시편결과가 약 1.03~1.07배 정도로 높게 나왔으며, RTA패널의 경우도 형상비 70인 시편결과보다는 형상비 60인 시편결과가 약 1.05~1.2배 정도로 높게 나왔다.

표 3의 결과 중 중요한 결과는 바로 분산계수이다. 보시편의 경우 분산계수가 약 17.8~20.1% 정도가

표 3 휨인성시험 결과 분석표

	강섬유 (mm)	휨강도 (kgf/cm ²), 최대하중(ton)			등가휨강도비 (%), 흡수에너지 (J)			
		평균	표준편차	분산계수	평균	표준편차	분산계수	
보시편	타설	0.5×30	60.5	7.9	13.1 %	85.2	6.5	7.6 %
		0.5×35	62.5	7.7	12.3 %	86.9	3.4	3.8 %
	숫팅	0.5×30	43.0	5.1	11.9 %	71.8	12.8	17.8 %
		0.5×35	44.7	7.4	16.4 %	73.3	14.7	20.1 %
EFNARC 패널	0.5×30	5.8	1.4	24.1 %	832.2	202.3	24.3 %	
	0.5×35	5.4	1.0	18.5 %	806.3	183.4	22.7 %	
RTA 패널	0.5×30	3.2	0.1	3 %	390.3	30.1	7.7 %	
	0.5×35	2.5	0.1	4 %	371.6	30.3	8.2 %	

나왔으며, EFNARC패널은 22.7~24.3%로 나왔고, RTA패널은 7.7~8.2%로 나타났다. 실제 현장에서는 몰드에 직접숫팅을 하여 보시편을 제작하고 이 제작된 시편을 이용하여 휨인성을 평가한다. 실험결과에서 보듯이 보시편의 분산계수는 EFNARC패널보다는 작지만, RTA패널보다는 큰 것을 알수 있다.

4. 휨인성결과의 상관성

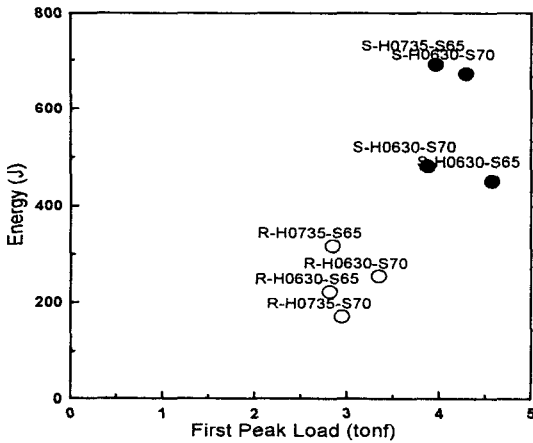


그림 10 초기균열하중과 흡수에너지 관계

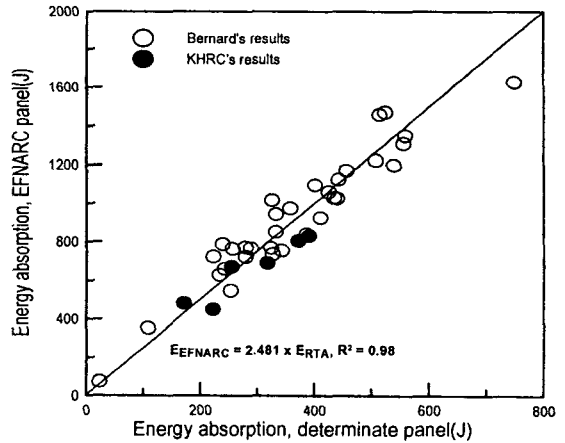


그림 11 RTA패널과 EFNARC패널의 상관성 그래프

그림 10에서는 패널의 초기 균열하중과 흡수에너지간의 관계를 나타낸 것이다. 이 관계를 보면, EFNARC 패널보다는 RTA패널의 산포가 더 좋은 것을 알수 있으며, 초기균열하중은 비슷하나 강섬유 형상비에 대한 효과 때문에 흡수에너지가 증가하는 것을 알수 있다. 또한 이 관계에서는 잔골재율이 휨인성 자체에는 효과를 나타내고 있지 않다는 점을 알수 있다.

그림 11에서 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 0.98로

서 선형성이 매우 높은 것을 알 수 있다. 그림에서 보듯이, 본 연구결과가 Bernard의 실험결과와 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

1. RTA 패널과 EFNARC 패널을 균열형태 비교에서는 RTA패널의 균열이 일정하게 형성되는 반면, EFNARC패널의 균열은 지지조건의 변화 때문에 일정하지 않다는 것을 알 수 있었다.
2. RTA패널의 하중-처짐 곡선이 일정한 반면, EFNARC패널의 곡선은 여러산이 형성되는 것을 볼 수 있었는데, 이것은 지지조건이 바뀔에 따라 패널의 파괴 메커니즘이 바뀌기 때문인 것으로 판단된다.
3. 휨인성결과 비교에서는 RTA 패널의 분산계수가 일정하면서 작게 나왔으며, EFNARC패널은 상대적으로 높게 나왔다. 또한 보시편은 등가휨강도비가 일정하지 않은 결과를 나타내었다.
4. 패널시험체의 상관성을 분석해 보면, 초기균열하중과 흡수에너지는 상관성을 찾지 못했지만, EFNARC패널에 비해 RTA패널이 산포가 좋은 것을 알 수 있었으며, EFNARC패널과 RTA 패널의 상관성분석 결과, 호주의 Bernard와도 비슷한 결과를 도출한 것을 알 수 있었다.

-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 reinforced Concrete," 1990.
3. EFNARC, European Specification for Sprayed Concrete, 1996.
4. Bernard, E. S., "Correlations in the Performance of Fiber Reinforced Shotcrete Beams and Panels," University of Western Sydney.