

반원형 강섬유보강 슛크리트의 휨인성 특성에 관한 연구

지영환¹, 정지수², 정춘교³, 이승호^{4*}

A study on the flexural toughness characteristics of the half-circle type steel fiber reinforced shotcrete

Young-Hwan Ji, Ji-Su Jeong, Chun-Kyo Jeong, Seung-Ho Lee

ABSTRACT Currently, the commonly used tunneling method in Korea is NATM (New Austrian Tunneling Method). This method uses the rock bolt, shotcrete, and supporting system to maintain the strength of original soil and ensures the stability of tunnel by stabilizing the soil using the original strength of the soil in maximum after the excavation. In past years, wire-mesh reinforced shotcrete was common ones but currently steel-fiber reinforced shotcrete is being widely used for the tunnel construction site in Korea to save construction time with the advanced construction technology. The results further indicate that needs for the establishment of not only the specifications for shotcrete but the strengthening methods for the under reinforced shotcrete sections. Therefore, this study deals with the development of a new steel-fiber to ensure the stability of tunnels that are under reinforced with steel-fibers and to overcome the shortcomings of conventional method.

Keywords: Tunneling, NATM, shotcrete, steel-fiber, half-circle type

요약 현재 국내터널에 주로 사용되는 공법은 NATM(New Austrian Tunneling Method)으로 원지반의 강도를 유지하고 보강하는 수단으로 록볼트, 슛크리트, 지보재를 이용하여 암반굴착 직후 원지반의 지지능력을 최대로 활용하여 지반을 안정화시킴으로 터널의 안전성을 유지시키는 공법이다. 과거에는 철망(wire mesh)보강 슛크리트가 주로 사용되었으나 시공기술의 발전을 통한 공기향상을 목적으로 현재는 강섬유보강 슛크리트(steel fiber reinforced shotcrete)가 국내 대다수 터널현장에 사용되고 있다. 그러나 터널 현장의 강섬유보강 슛크리트가 시공된 벽면의 강섬유 혼입량을 조사한 결과, 대부분 예상보다 부족한 것으로 측정되어 이에 대한 시방기준의 수립과 강섬유 부족구간의 보강대책의 필요성이 제기되고 있다. 따라서 본 연구에서는 강섬유 혼입량 부족 대한 터널의 안정성 확보 및 문제점을 보완하기 위해 새로운 형태에 강섬유보강재를 개발하려고 한다.

주요어: 터널, NATM, 슛크리트, 강섬유, 반원형

접수일(2010.9.14), 수정일(2011.2.18), 게재확정일(2011.3.20)

¹정회원, 상지대학교 토목공학과 박사과정

²정회원, 상지대학교 토목공학과 박사과정

³비회원, 국방부 주한 미군 이전사업단, 사무관

⁴정회원, 상지대학교 토목공학과 정교수

*교신저자: 이승호 (E-mail: shlee@sangji.ac.kr)

1. 서론

예전 터널 공사에서 사용된 강지보재로는 wire mesh, H형강, 격자 지보재 등이 사용되고 있으나 각자 문제점을 가지고 있다. wire mesh의 경우 암반에 부착시킨 후 슛크리트를 타설하므로 굴착면의 깊숙한 곳에 슛크리트가 들어가지 못해 효과를 보지 못하는 구간이 생기고 wire mesh 탈부착에 시간이 많이 소비되었다. H형강의 경우 자체 중량으로 인해 시공성이 떨어지고 슛크리트의 타설시 H형강 배면과 굴착 지반사이에 공동이 발생하여 굴착지반과 지보재가 완전히 밀착되지 않거나, 슛크리트와 강지보재가 일체화되지 않는 경우가 발생하였다. 이런 강지보재를 대체하기 위해 연구된 것이 강섬유 보강법이다(김재동과 김영덕, 2000).

스�크리트는 터널 굴착 후 빠른 시간 내에 굴착 단면에 크게 영향을 받지 않고 밀착되도록 시공이 가능하고 조기강도를 얻을 수 있는 공법으로 터널 굴착 직후 빠르게 굴착면을 보강함으로써 지반의 강도변화를 억제하고 풍화를 방지하여 원지반의 지지력을 증대시켜 지반의 거동을 최소화시키는 임시적인 보강 수단으로 사용되고 있다. 1907년 미국에서 최초로 사용되었고, 1970~1980년대에는 강섬유가 보강재 사용, 국내에서는 1980년대 NATM 공법의 도입과 함께 1990년대 습식타설 방식과 강섬유가 도입되면서 터널공사에 보편적으로 사용되고 있다. 강섬유보강 슛크리트에는 선형, 후크형, 원형 등 여러 형태의 강섬유들이 사용 중으로 기본적으로 후크형이 널리 사용되고 있다.

하지만 후크형은 콘크리트와의 배합 불량과 타설시 노즐 막힘 현상이 빈번히 발생하고, 휨 발생시 콘크리트와의 부착력이 좋지 못해 인성을 충분히 발휘하지 못하여 효율이 좋지 못한 것이 사실이다. 때문에 새로운 형태인 반원형 강섬유를 통하여 강도 및 인성을 증진 시키고 뭉침 현상을 방지하여 강섬유가 내포하고 있는 문제점을 보완 해결하여 보다 합리적인 강섬유의 형태를 제안하고자 한다.

2. 강섬유 보강 슛크리트(SFRS)의 특성

2.1 강섬유 종류 및 제원

강섬유보강을 하지 않은 일반 슛크리트는 일반 콘크리트와 마찬가지로 재료의 특성상 균열의 전파에 대한 저항이나 인장력 등이 약한 취성적 성질을 보인다. 강섬유는 상기와 같은 슛크리트의 취성적 성질을 보완하여 주기 위하여 혼입되는 보강 재료로서 사용하는 소재의 형태와 가공방법에 따라 크게 4종류(신선절단법, 박판절단법, 후판절삭법, 용강추출법)으로 나뉘며 국내에서는 신선절

표 1. 대표적 강섬유의 제원

제조 방법	치 수(mm)		소 재	형 상
	단 면	길 이		
박판전단법	0.5×0.5	25, 30	냉간압연강판	
	0.2×1.3	25, 30		
	0.25×2.0	40, 50		
	0.5×0.5	20, 25 30, 40		
	0.5×1.0	50	냉간압연강판 상당의 고강도재	
신선절단법	φ0.6	25, 30, 40	연강선재를 냉기 가공한 것	
	φ0.7	45, 50		
	φ0.6	30, 40		
	φ0.8	50, 60		
	φ0.6	30		
	φ0.8	30, 60		
후판절삭법	φ0.6	30, 40	용적구조용 압연 강판	
	φ0.8	50, 60		
용강추출법	φ0.4, 0.5	22, 25, 30 35, 40	마르텐사이트계 스테인리스강	
	φ0.3, 0.4, 0.5		오스테나이트계 스테인레스강	

단법과 박판절단법이 많이 사용되고 있다(표 1 참조).

2.2 강섬유보강 슛크리트의 개념

일반적인 슛크리트는 취성적 거동을 보이므로 파괴 후에는 지지력을 상실한다. 슛크리트의 인장 저항 능력을 증대시키고 균열의 생성 및 성장을 억제하기 위하여 불연속의 강섬유를 콘크리트 속에 균등하게 분산시켜 인장강도, 휨강도, 균열에 대한 저항성 등을 개선하기 위하여 강섬유를 보강한다.

일반 슛크리트의 경우 최대하중에 도달하면 즉시 파괴가 일어나나 강섬유보강 슛크리트는 최대 하중에서 파괴가 일어난 후에도 지지력을 상실하지 않고 그림 1과 같이 잔류강도를 가지며 연성적 거동을 하는 것을 볼 수 있다.

그림 1과 같은 거동을 하는 것은 최대 하중 이후 슛크리트 내부의 강섬유가 지속되는 하중에

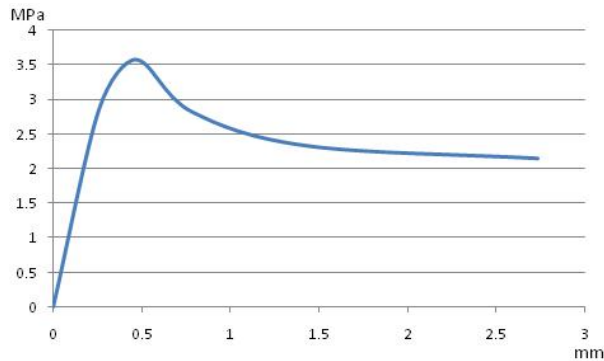


그림 1. 강섬유보강 슛크리트의 하중-변위 그래프(반원형 실험 데이터 HC9-5)

대해 저항을 하고 하중을 분산시켜 급속한 파괴가 일어나지 않게 되는 것이다. 이와 같은 거동을 현실적으로 해석하여 반영하려면 파괴인성과 관련된 특성들 즉 등가휨강도 및 인성계수, 잔류강도 등의 값들이 수치해석에 반영이 되어야 한다.

본 연구는 이러한 강섬유의 성능을 보다 높게 나타낼 수 있는 제원을 개발하여 강섬유의 품질을 향상시키려는데 중점을 두고 있다.

2.3 휨인성 평가 및 품질규정

휨인성 측정 방법은 KS F 2566에 준하여 실시하였으며, KS B 5533(압축실험기)를 이용하여 휨 실험장치를 부착하여 실험한다. 최대 하중까지의 재하 속도는 KS F 2408에 준하고, 최대 하중 이후의 처짐을 측정할 경우 처짐 속도가 거의 일정하게 유지 되도록 재하 하였다. 이때 처짐 속도는 분당 지간의 1/1500~1/300의 범위로 하였다(박홍용 외, 2010).

강섬유보강 슛크리트의 휨인성에 대한 품질검사규정은 인성지수를 산정한 후 평가하는 방법을 적용(ASTM C1116)하고 있는 미국의 규정, 인성지수와 잔류강도계수를 사용하여 SFRS의 등급을 평가하는 ITA의 규정, 등가휨강도를 산정하여 휨인성을 평가하는 일본의 JSCE-SF4 규정, 그리고 휨인성 실험체에 일정 처짐 변위에서의 잔류강도를 산정하여 잔류 강도 등급을 평가하고 slab test 를 하여 SFRS의 에너지 흡수력을 평가하는 두 가지 방법을 사용하는 유럽의 EFNARC 등이 있다.

국내의 경우 한국도로공사의 슛크리트 휨인성 기준은 일본에서 사용하는 JSCE 기준과 유사한데, 보 공시체에 대한 휨인성 실험을 통해 순수 처짐이 2 mm가 될 때까지 실험하여 등가휨강도(휨인성 계수)가 최대휨강도의 68%이상이 되어야 하며, 이때의 최대휨강도는 설계기준강도(4.4 MPa)이상 이어야 한다고 규정하고 있다(김재동과 김영재, 2000).

2.3.1 ASTM 규정

ASTM C 1018에 의한 SFERS의 휨인성실험에서 인성지수에 대한 ASTM의 주된 판단 규정은 콘크리트의 일차 균열이 발생할 때까지의 탄성에너지와 강섬유를 혼입함으로써 증가된 소성에너지의 비를 산출하는 것이다. 그리고 인성지수를 이용하여 일정구간까지의 잔류강도 계수를 산정하여 전체적인 SFERS의 품질을 평가하는 방법이다.

ASTM규정에 의한 실험 조건은 다음과 같다.

- 성형틀에 타설한 후 saw cutting
- 100×100×350 규격
- 실험 재령은 28일
- 3등분점 재하법 사용

인성지수 계산방법은 아래(그림 2)와 같으며 여기서 정해진 인성지수를 이용해서 잔류강도계수를 산정한다.

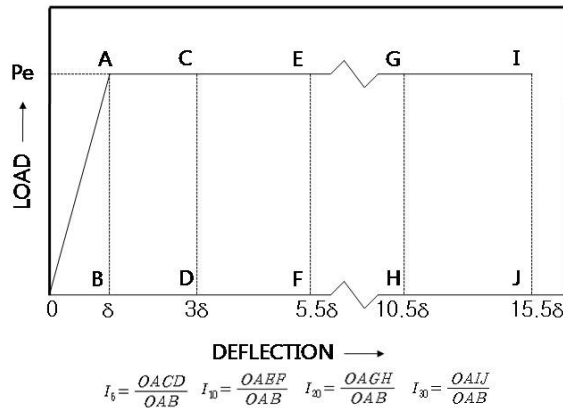


그림 2. 인성지수 그래프

표 2. 강섬유 보강 슛크리트 등급

항목	등급	I ₁₀	I ₃₀	I _{30/10}
I	Marginal	<4	<12	<40
II	Fair	4	12	40
III	Good	6	18	60
IV	Excellent	8	24	80

2.3.2 EFNARC 규정

EFNARC의 경우 강섬유 보강 슛크리트의 휨인성에 대해서 빔 실험에 의한 잔류강도등급과 플레리트 실험에 의한 에너지흡수등급으로 구분하여 규정하고 있다. 실험편의 제작은 슛크리트 타설패널로부터 그림 3처럼 75×125×600 mm 크기의 빔으로 절단한 빔을 수중양생하여 실험을 실시한다.

EFNARC의 잔류 강도 등급 실험 방법은 다음과 같다.

- 재하속도는 시편 중심점의 변형률로 제어
- 0.5 mm에 이를 때까지는 0.25±0.05 mm/min으로 제어하고 이후 4 mm까지는 1.0 mm/min의 속도로 재하
- 실험기의 하중 지지 점과 재하 점은 반경 10~20 mm의 둥근 강봉을 사용
- 실험편 중심점의 변형이 4 mm에 이르면 실험을 마침

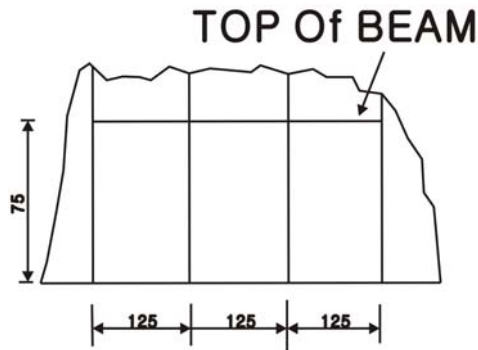


그림 3. 타설한 슛크리트를 통한 빔의 커팅

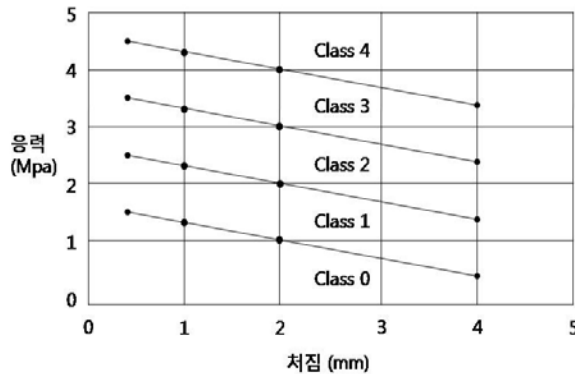


그림 4. 잔류 강도 등급

표 3. EFNARC의 인성 등급

등급	치짐 (mm)	강도등급			
		1	2	3	4
	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5
Low	1	1.2	2.3	3.3	4.3
Nomal	2	1.0	2.0	3.0	4.0
High	4	0.5	1.5	2.5	3.5

표 4. 한국도로공사의 슛크리트 규정

f_c (MPa)	σ_t (MPa)	R_c (%)
2.99	5.38	56
	4.89	61
	4.40	68
	3.91	76

EFNARC는 응력-변위 곡선의 모양에 따라 표 3과 같이 5가지 잔류 강도 등급으로 분류하여 강섬유 보강 슛크리트의 휨인성평가 규정으로 사용하며, 등급표는 아래와 같다(김재동과 김영덕, 2000).

2.3.3 한국도로공사 및 JSCE 규정

한국도로공사는 강섬유 보강 슛크리트의 품질관리 규정에 일본 JSCE-SF4에 의거한 등강휨강도 및 인성계수 개념을 참고하여 적용하고 있다. 등가휨강도는 강섬유 보강 슛크리트의 휨인성과 관계되는 값으로 최대하중에 도달한 후 일정한 변위까지의 휨인성계수로서 평균강도의 개념을 가진다. 휨인성 평가규정 방법으로 $4.8 \times 100 \times 100$ mm인 와이어메쉬를 보강한 두께 10 cm, 폭 100 cm인 슛크리트의 휨강도가 4.4 MPa 일 때 극한 휨모멘트는 3.195 Nm/m이다. 두께가 8 cm이고 폭이 100 cm 강섬유 보강 슛크리트에서 동일한 극한 휨 모멘트를 발현하기 위해서는 휨인성이 2.99 Nm/m가 되고 인성계수는 설계휨강도와 등가휨강도의 비로 나타난다. 설계휨강도에 따른 인성계수는 표 4와 같으며 이에 근거하여 한국도로공사의 강섬유 보강 슛크리트의 품질평가 규정에서는 설계휨강도 4.4 MPa 및 인성계수 68%의 조건을 각각 만족할 것을 요구하고 있다.

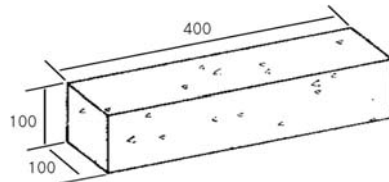
3. 실험 방법

3.1 휨인성 실험체 제작

본 연구는 현재 가장 일반적으로 사용되는 후크형의 강섬유와 새로 연구 중인 반원형의 강섬유를 사용하여 비교 분석 하였다(표 5 참조).

휨인성 실험을 위한 실험체는 KS F 2566 규정의 100×100×400 mm의 몰드를 사용하여 본 논문 에 적용한 숏크리트 배합비를 사용하여 몰드를 제작하였다. 숏크리트 몰드제작이 끝난 후 수분 증발을 방지하기 위하여 젖은 천으로 덮은 실험체를 약 24~48시간 이내에 몰드에서 떼어 낸다. 떼어 낸 실험체는 재령 28일까지 20±3 °C로 유지된 양생소에서 수증양생 하였다. 배합비는 알카리 프리 계 급결제 4%를 사용하였으며, 메타카올린이 강섬유의 휨인성 값에 영향을 미치는 것으로 확인되어 배합에서 제외시켰다. 굵은 골재는 최대 크기가 13 mm인것을 사용하였고 물/시멘트비를 38%로 맞추어 배합을 실시하였다(표 6 참조).

표 5. 휨인성 실험체



(a) 휨인성 실험체



강섬유 형태	 (b) 후크형 강섬유	 (c) 반원형 강섬유
형상비	60	60
길이	30 mm	30 mm
단면직경	0.5 mm	0.5 mm
개수(1 g당)	34~36	22~24
Bundle형	O	X

표 6. 실험에 사용된 숏크리트 배합비

배합명	급결제 (kg/m ³)	G _{max} (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	S/a (%)	Air (%)	Unit Weight (kg/m ³)					강섬유 (kg/m ³)
							W	C	S	G	SP (g/m ³)	
Plain	알카리 프리계 급결제 (4%)	13	10±2	38	60	3±1	182.5	480	991	673	19.2	40

3.2 휨인성 실험

휨인성 실험은 ASTM C 1018 및 KS F 2566을 기준으로 그림 5와 같이 yoke 방법의 3등분점 하중법을 사용하여 하중과 중앙점에서의 처짐을 측정하였다. 정확한 측정값을 얻기 위해 1/1000 mm의 LVDT를 사용하여 최대 하중까지의 재하속도는 KS F 2408에 준하여 실행하였고, 최대하중 이후의 처짐을 측정 시에는 분당 지간의 1/1500~1/300의 범위로 재하 하여 변위가 2 mm 될 때까지 실행하였다(배주성과 김경수, 1999; Skazlić and Bjegović, 2009).

인성실험 결과 표 7과 같이 반원형 강섬유를 사용한 실험체가 후크형 강섬유를 사용한 실험체에 비해 휨강도 및 등가휨강도 모두 우수한 것으로 나타났다.

다음의 공식은 KS규정(KS F 2566)의 휨강도와 등가휨강도 공식으로 강섬유의 결과값을 구하였다(정형식, 2006; 한국도로공사 도로연구소, 2000; Johnston and Skarendahl, 1992).

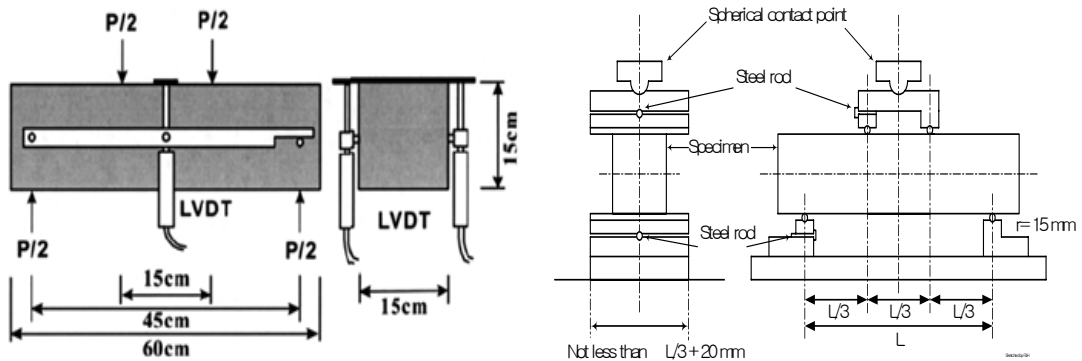


그림 5. 휨인성 측정을 위한 Yoke 방법

표 7. 강섬유 실험 결과

번호	실험체명	초기균열하중 (kg)	초기균열변위 (mm)	초기균열응력 (MPa)	최대하중 (kg)	휨강도 (MPa)	등가휨강도 (MPa)
1	HC9-1	1645	0.094	3.63	2091	6.15	3.63
2	HC9-3	1903	0.186	5.60	2585	7.60	4.62
3	HC9-4	2256	0.162	6.63	2665.5	7.84	5.04
4	HC9-6	2867	0.260	8.43	3572	10.51	5.42
5	HK9-1	1786	0.116	5.25	1786	6.08	2.18
6	HK9-2	2420.5	0.169	7.12	2420.5	7.12	1.47
7	HK9-4	1551	0.120	4.56	1974	5.80	1.78
8	HK9-5	1927	0.090	5.67	2091.5	6.15	1.84

$$f_b = \frac{Pl}{bh^2} \quad (1)$$

f_b : 휨강도, P : 시험기가 나타내는 최대하중, l : 지간, b : 파괴단면의 폭, h : 파괴단면의 높이

$$f_b' = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \times \frac{l}{bh^2} \quad (2)$$

f_b' : 등가휨강도, δ_{tb} : 기준처짐(지간의 1/150인 처짐(mm)) - 지간이 30 cm인 경우 2 mm

T_b : 기준처짐까지의 휨인성

3.3 실험 결과 분석

3.3.1 하중-변위 그래프

일반 배합비를 사용한 후크형과 반원형 강섬유 실험체를 비교해 보면, 초기 균열이 발생한 후 반원형 강섬유의 경우 처짐 변위에 비해 완만한 하중저하를 보이며 후크형 강섬유의 경우 급격한 하중저하를 보였다.

또한, 반원형 강섬유 실험체의 경우 초기 균열 발생 후 균열 부위의 강섬유가 지속되는 하중을 견디다가 끊어지는 현상을 자주 확인 할 수 있었으나, 반원형 강섬유 실험체의 경우 끊어지는 현상이 후크형에 비해 적었다. 이것은 아치 형태인 반원형이 콘크리트와의 부착력과 지지력이 후크형에 비해 우수하기 때문인 것으로 판단된다(그림 6, 7 참조).

3.3.2 휨인성 결과

휨인성은 Johnston 방식을 사용하여 실험체의 하중-처짐 그래프에서 보이는 초기 균열시 처짐의 면적을 초기 균열시 처짐까지의 면적으로 나누어 인성지수를 나타내었다. 여기서 I_5 , I_{10} , I_{20} 은 초기 균열 처짐의 3배, 5.5배, 10.5배까지의 면적을 초기 균열 처짐까지의 면적으로 나누었을 때의 인성지수를 나타내며 첨자 5, 10, 20은 실험체가 완전 탄성체라고 가정했을 때의 인성지수이다.

후크형 강섬유와 비교 하였을 때 반원형 강섬유의 경우 I_5 , I_{10} , I_{20} 의 각 구간에서 증가 양상이 두드러지며 후크형에 비해 적은 양의 강섬유로 보다 높은 인성을 보인다는 것을 확인 할 수 있다. 또한 등가휨강도를 포함해 잔류강도 및 인성계수가 한국도로공사와 JSCE 등에서 규정하고 있는 요구 값을 만족하는 것을 알 수 있다.

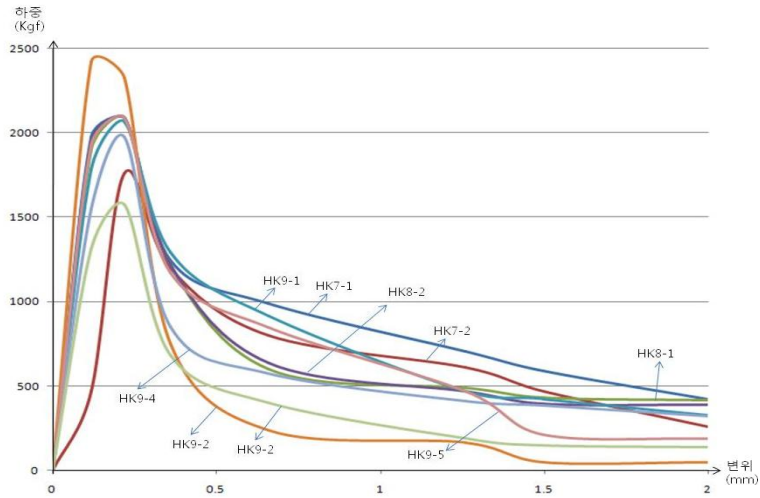


그림 6. 후크형 실험체 인성실험 그래프

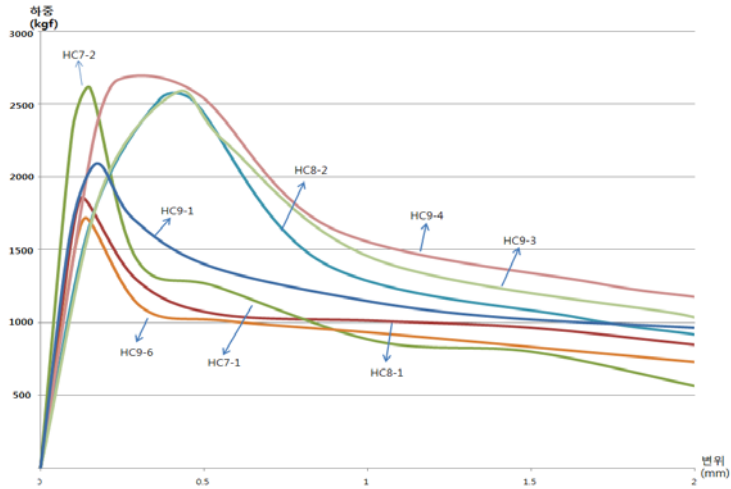


그림 7. 반원형 실험체 인성실험 그래프

재령 28일의 강섬유 보강 실험체의 휨강도와 압축강도의 결과를 비교해 보면 등가휨강도의 경우 반원형(평균 3.94 MPa)이 후크형(평균 2.05 MPa)보다 약 2배 높으며 인성계수의 경우 반원형(평균 88.53)이 후크형(평균 46.5)보다 약 2배 높은 인성계수를 보이는 것을 알 수 있다(그림 8, 표 8 참조).

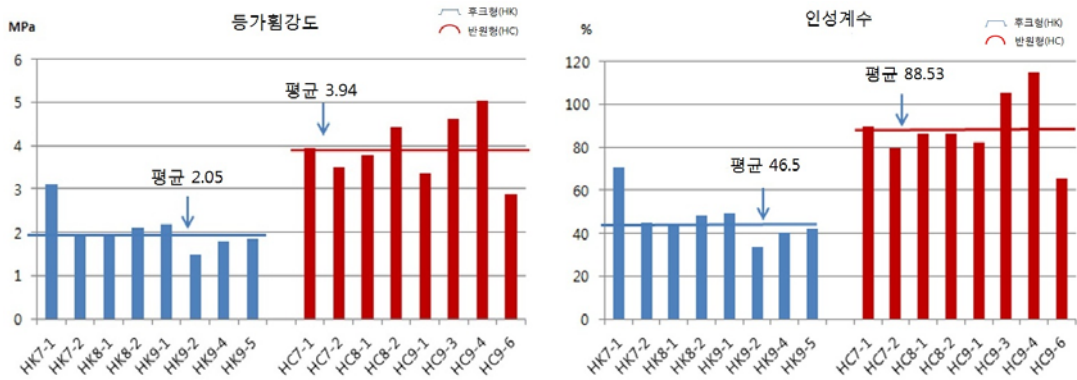


그림 8. 후크형과 반원형의 휨인성 비교

표 8. 강섬유 실험 결과(휨인성)

번호	실험체명	인 성 지 수			인성지수 비		잔류강도		인성계수 (%)
		I5	I10	I20	I10/5	I20/10	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$	
1	HC9-1	5.81	10.53	18.24	1.82	1.73	94.4	77.1	82.5
2	HC9-3	6.21	11.05	16.71	1.77	1.56	96.8	54.6	105
3	HC9-4	5.46	10.30	16.75	1.88	1.62	96.8	64.5	114.5
4	HC9-6	5.47	9.96	17.75	1.82	1.78	89.8	77.9	123.1
5	HK9-1	4.76	7.85	11.60	1.64	1.47	61.8	37.5	49.5
6	HK9-2	2.71	3.16	4.09	1.16	1.29	29	9.3	33.4
7	HK9-4	5.64	6.95	7.13	1.23	1.02	46.2	31.8	40.4
8	HK9-6	4.43	6.49	8.72	1.46	1.34	41.2	22.3	25.6

4. 결론 및 제안

본 연구는 한국도로공사와 KS 규정 및 JSCE, ASTM을 포함한 해외 규정들을 참고하여 후크형과 반원형 강섬유를 날개형으로 실험하여 등가휨강도와 인성계수에 의한 SFRS의 휨인성을 평가하고, 새로운 형태의 반원형을 기존에 사용되는 후크형과 비교·검토하였다. 종합적인 연구결론은 다음과 같다.

1. 실험결과 얻게 된 등가휨강도, 잔류강도 및 인성계수를 통해 등가휨강도의 경우 반원형 강섬유가 평균 3.94 MPa로 후크형 강섬유의 평균 2.05 MPa 보다 약 1.92배 높은 휨강도를 보였으며 인성계수를 비교하였을 시 반원형 강섬유가 평균 88.53%로 후크형의 평균 46.5% 보다 1.90배 인성이 우수한 것으로 나타났다. 이러한 결과가 향후 반원형 형태의 강섬유 연구의 가능성을 보인 것으로 판단된다.

2. 인성지수를 비교하였을 때 후크형 강섬유의 인성지수에 비해 반원형 강섬유의 인성지수인 $I_5 \sim I_{20}$ 이 1.3~1.7배 높은 것으로 나타났다. 결과값의 평균을 ASTM C101과 ITA Morgan 1985로 기준 인성 등급을 분류한 결과 후크형은 III등급(good)이고 반원형은 IV등급(excellent)으로 반원형 형태가 후크형 형태보다 효과적인 인성을 보이는 것을 알 수 있었다.
3. 반원형 강섬유와 후크형 강섬유의 비교결과 강섬유의 품질을 평가하는 모든 기준에서 후크형 강섬유에 비해 반원형 강섬유가 약 2배 우수한 것으로 나타났다.
4. 그러나 현재 반원형 강섬유는 생산성과 생산 설비의 부족으로 인해 bundle형을 제작이 어려워 본 논문에서 날개형의 반원형 강섬유를 사용하였다. 차후 반원형 강섬유에 대한 지속적인 연구 시에는 bundle형의 반원형 강섬유를 제작하여 실험하면 보다 정확하고 합리적인 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 2009년 건설교통부가 출현하고 한국건설교통평가원에서 위탁 시행한 건설핵심사업인 “IT 및 신소재를 활용한 급속 안정화 터널시공기술개발(과제번호 : 05건설핵심 D03-01)연구사업의 일환으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다. 또한 강섬유 원재료를 제공해 주신 (주)미성스틸 관계자 분들께도 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김재동, 김영덕(2000), “강섬유 보강 슛크리트의 휨인성 평가 방법 연구”, 터널과 지하공간, Vol. 10, pp. 196~210.
2. 정형식(2006), “강섬유 슛크리트의 품질관리”, 한국지반환경공학회 학술발표회 논문집, pp. 3~26.
3. 박홍용, 류중현, 조용범(2010), “이중 섬유 혼입비에 따른 섬유보강 콘크리트의 휨 인성 및 휨 인장강도에 관한 연구”, 한국터널공학회논문집, 제12권, 1호, pp. 51~60.
4. 배주성, 김경수(1999), “섬유보강콘크리트의 휨인성 평가기법에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 제19권, pp. 195~202.
5. 한국도로공사 도로연구소(2000), 강섬유보강 슛크리트의 성능향상 및 품질기준 정립(II)
6. Johnston, C.D., Skarendahl, Å., (1992), “Comparative flexural performance evaluation of steel fibre-reinforced concretes according to ASTM C1018 shows importance of fibre parameters”, Materials and Structures, Vol. 25, pp. 191~200.
7. Skazlić, M Bjegović, D (2009), “Toughness testing of ultra high performance fibre reinforced concrete”, Materials and Structures, Vol. 42, pp. 1025~1038.