

## 형상을 개선한 강섬유보강 슛크리트의 강도특성

### The Strength Characteristic of Shotcrete Reinforced with Improved Shape Steel Fiber

김 상 환<sup>1</sup> Kim, Sang-Hwan  
박 인 준<sup>2</sup> Park, Inn-Joon  
김 지 태<sup>3</sup> Kim, Ji-Tae

#### Abstract

The laboratory tests were performed to investigate the strength characteristic of shotcrete reinforced with improved shape steel fiber developed in this study. Two different type of tests, the flexural toughness test and the bending strength test, were conducted for analyzing shotcrete strengths using three types of specimens (unreinforced shotcrete, existing steel fiber reinforced shotcrete, and new concept steel fiber reinforced shotcrete). The results of tests represented the advancement of the strength characteristic of shotcrete reinforced with improved shape steel fiber with respect to that of shotcrete reinforced with existing steel fiber.

#### 요 지

본 연구에서는 형상을 개선한 강섬유를 개발하였으며, 개발 강섬유로 보강된 슛크리트의 강도특성에 대해 알아보기 위하여 실내실험을 실시하였다. 본 연구에서 사용한 시료는 무보강 슛크리트, 기존 후크형 강섬유보강 슛크리트와 형상을 개선한 강섬유보강 슛크리트이며, 이들 시료를 이용해서 강도특성을 분석하기 위해 수행한 실험은 압축강도 및 휨인성시험이다. 실험결과를 통해 형상을 개선한 강섬유보강 슛크리트의 강도특성이 기존 강섬유보강 슛크리트에 비해 향상됨을 확인했다.

**Keywords** : Bending strength, Flexural toughness, Shotcrete, Steel fiber, Strength characteristic

#### 1. 서 론

고도의 산업 발달과 급속한 경제 성장에 따라 도심지역의 교통 문제 해소를 위해 지하철, 지하차도 등 터널을 비롯한 지하공간의 효율적인 이용에 대한 필요성이 증대되면서 지하 공간의 개발이 활발하게 진행되고 있다. 국내 터널 시공 시 대부분 NATM공법에 의해 시공되고 있다. 국내 터널공사에 주로 적용되고 있는 NATM

공법은 발파에 의해 암반굴착 직후 원지반의 지지능력을 최대한 활용하면서 슛크리트와 록볼트 등을 주시보재로 사용하여 터널의 안정성을 유지시키는 공법이며, NATM공법에서 필수적으로 적용하고 있는 무보강 슛크리트는 보강하지 않은 콘크리트와 같이 균열이나 파괴를 억제해줄 수 있는 균열 저항능력이 거의 없기 때문에 취성파괴가 발생하는 단점이 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 무보강 슛크리트에 강섬유를 혼입하

1 정회원, 호서대학교 토목공학과 교수 (Professor, Department of Civil Engineering, Hoseo University. kimsh@hoseo.edu, 교신저자)

2 정회원, 한서대학교 토목공학과 교수 (Professor, Department of Civil Engineering, Hanseo University.)

3 정회원, 호서대학교 토목공학과 박사과정 (Graduate student, Dept of Civil Engineering, Hoseo University.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

여 인장강도, 휨강도, 균열에 대한 저항성 등을 증대시키며 더 나아가 시공기술의 발전을 통한 공기향상을 목적으로 현재는 강섬유 보강 슛크리트가 국내 대다수 터널현장에서 사용되고 있다. 이러한 강섬유 보강 슛크리트는 터널뿐만 아니라 구조물의 보강, 사면안정 등 강섬유의 적용범위가 확대되면서 강섬유보강 슛크리트에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

국외의 경우 Muhammad 등(2009)은 FRP로 콘크리트 시험체의 표면을 보강한 시험체와 내부에 강섬유(steel fiber)가 혼입된 시험체, 그리고 철근으로 보강된 시험체에 대하여 중앙 집중하중 및 편심하중을 재하 했을 경우의 콘크리트 부재 거동에 대하여 연구하였으며, Eren 등(2009)은 콘크리트에서 분쇄된 석회재료와 같이 갈고리로 된 강섬유간의 영향에 대하여 연구하였다.

국내의 경우 광계환 등(2006)은 강섬유의 형상비와 혼입률에 따른 강섬유 보강 콘크리트 보의 역학적 특성에 대한 모형개발에 대해서 연구하였다. 김상환 등(2009)은 강섬유 형상에 따른 인발 거동에 대한 연구결과 후크형이 가장 큰 인발응력을 나타내는 것으로 확인되었다. 또한 김상환(2010)은 새로운 형태의 강섬유를 제작하고 강섬유의 인발실험을 통해 새로운 형태의 강섬유보강 슛크리트를 개발하였으며, 그 결과 강섬유 몸체의 길이가 12mm일 때 가장 큰 인발력을 얻었다. 그 외 다수의 연구자들이 강섬유 혼입율이나 강섬유 형상비 및 시험방법 등에 변화를 주어 강섬유의 콘크리트 보강재로서의 특성과 응용에 관한 연구들을 발표한바 있다(이승호 등, 2006; 전찬기, 1992). 그러나 최근까지 개발된 다양한 강섬유의 형태에 따른 종합적인 비교 연구가 부족하며, 특히 보강에 따른 휨강도 특성에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 새롭게 개발한 강섬유가 슛크리트 강도특성에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 다양한 조건의 슛크리트에 대한 실내실험을 실시하였다. 본 연구에서 수행한 실내시험은 압축강도 및 휨인성 실험이며, 그 시험결과를 토대로 각 공시체의 파괴형태 및 강도특성에 대해 비교 분석하였다.

## 2. 강섬유 특징

강섬유는 일반적으로 ASTM A 820의 규격을 따라 생산되며 강섬유의 생산방법에는 철선 또는 얇은 철판을 절단하거나 Cold-Drawn 형태, 또는 Melt-Extraction 방

법 등 총 3가지의 방법이 적용되며 제작사별로 각기 다양한 형태와 크기로 제작되어 강섬유의 재질과 형태별로 고유의 특성을 갖는다.

일반적으로 강섬유의 단면형상이 원형, 사각형, 다각형 등으로 주로 생산되고 있으며 강섬유 자체의 극한인장강도는  $3,500 \sim 21,000 \text{kg/cm}^2$ 의 범위에 있다(백신원 등, 1996). 단면의 유효직경은  $0.25 \sim 1.0 \text{mm}$ , 길이는  $20 \sim 65 \text{mm}$ 의 범위에 있는 것이 일반적이다. 그러나 슛크리트에 사용되는 강섬유는 타설장비의 노즐직경에 한계로 인하여 길이 30mm의 강섬유가 주로 적용된다. 강섬유의 형상에 있어서는 단순한 직선형보다 뽑힘 저항능력을 크게 할 수 있도록 여러 가지 형태로 변형시킨 것이 주로 사용된다. 여기에는 강섬유의 양단을 구부린 형태 또는 길이 전체에 걸쳐 주름형으로 변형을 시킨 형태와 강섬유 양단을 약간 확장시킨 형태 등이 적용된다.

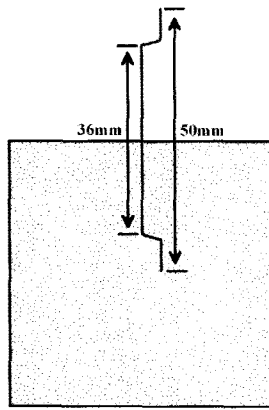
강섬유의 특성은 섬유의 인장강도(tensile strength)와 기하학적 형상(geometrical shape) 등으로 나타내며, 특히 섬유의 길이를 단면의 유효직경으로 나눈 형상비(aspect ratio)가 중요한 특성이 된다. 강섬유의 형상비는 30~150의 다양한 것들이 사용되고 있으며 일반적으로 형상비가 클수록 강섬유보강 슛크리트의 역학적 특성이 우수해지는 것으로 나타나고 있다. 그러나 형상비가 지나치게 클 경우 배합시 강섬유의 분사불량, 뿔어 붙이는 작업의 어려움 등의 사용성이 저하하는 경향이 있으므로 슛크리트에 적용되는 강섬유의 형상비는 일반적으로 40~100의 값을 갖는다.

## 3. 슛크리트 압축강도 실험 및 휨인성 실험

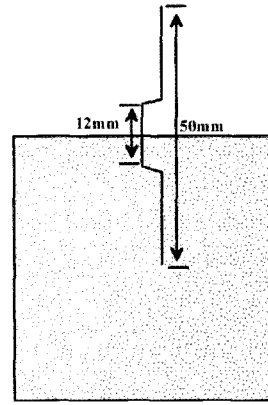
본 연구는 강섬유를 혼입하지 않은 무보강 슛크리트와 기존 강섬유보강 슛크리트 및 새로운 형태인 형상을 변화한 강섬유보강 슛크리트와 비교 분석하기 위하여 압축강도 실험 및 휨인성 실험을 실시하였다.

### 3.1 슛크리트 시료

선행연구로 김상환 등(2010)은 그림 1(a)와 같이 기존의 후크형 강섬유와 후크의 각과 강섬유 Body의 길이를 변형시킨 새로운 형상의 강섬유를 인발실험을 통하여 비교 분석하였다. 분석결과 그림 1(b)와 같이 후크를 이루는 각이  $75^\circ$ 와 강섬유 Body의 길이가 12mm일 때 인발력이 가장 큰 것으로 나타났다.

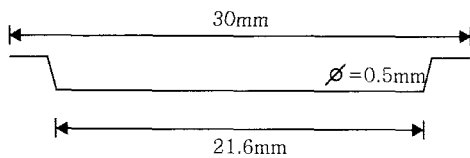


(a) 기존 강섬유

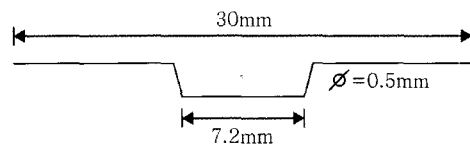


(b) 형상을 변화한 강섬유

그림 1. 인발실험을 통한 강섬유 형상



(a) 기존 강섬유



(b) 형상을 변화한 강섬유

그림 2. 실험에 사용한 강섬유

선행된 인발실험을 통해 최적의 강섬유 형상비를 도출하였으며, 이를 검증하기 위해 콘크리트에 형상을 변화한 강섬유를 배합하여 휨인성 실험과 일축압축강도 실험을 실시하기 위한 공시체를 제작하였다. 실험에 사용한 강섬유는 그림 2와 같이 기존 강섬유와 인발실험을 통해 개발한 형상을 변화한 강섬유를 가지고 슛크리트에 사용하였다. 실험 조건은 무보강 슛크리트 시료, 기존 강섬유보강 슛크리트 시료 그리고 형상을 변화한 강섬유보강 슛크리트 시료를 선정하였다.

### 3.2 실험 방법

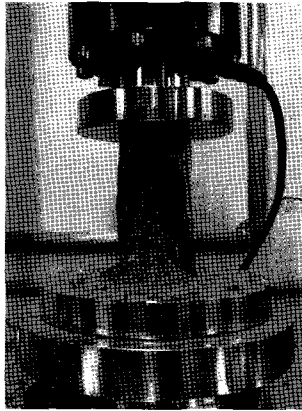
형상을 변화한 강섬유 혼입 슛크리트와 기존 강섬유

혼입 슛크리트에 대한 강도특성을 비교 분석하기 위하여, 본 연구에서는 기존 강섬유로는 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 후크형 강섬유(유효지름 0.5mm, 길이 30mm)를 사용하였다. 강섬유보강 슛크리트의 인성을 확보하기 위한 최소 혼입량 기준인 1m<sup>3</sup>당 30kg로 제시하고 있는 자료(이승호 등, 2006)를 토대로 본 연구에서는 강섬유 혼입량을 가로(350mm) × 세로(100mm) × 높이(100mm)당 105g로 선정하였으며, 국내 슛크리트 배합은 한국도로공사의 강섬유 혼입 습식 슛크리트 배합(한국도로공사, 2003)을 기준배합으로 선정하여 다음 표 1과 같이 시방배합표를 나타냈다.

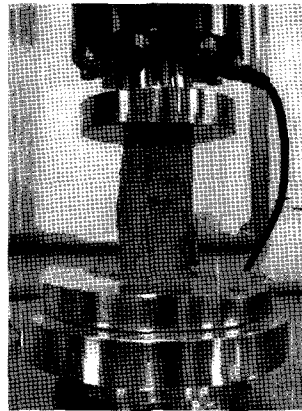
압축강도 실험용 공시체는 직경(Ø)50mm × 높이(H) 100mm의 원주형 공시체를 이용하여 무보강 슛크리트,

표 1. 시방배합표(한국도로공사, 2003)

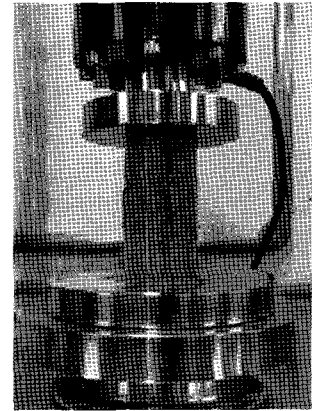
굵은골재 최대치수	슬럼프	공기량	물시멘트 비(W/C)	잔골재율 (S/A)	단 위 재 료 량				
					물(W)	시멘트(C)	잔골재(S)	굵은골재(G)	강섬유
(mm)	(mm)	(%)	(%)	(%)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
10	100	1.5	44	60	738.5	1680	3367	2307	105



(a) 무보강 슛크리트 실험 후



(b) 기존 강섬유보강 실험 후



(c) 형상을 변화한 강섬유보강 실험 후

그림 3. 일축압축 실험

기존 강섬유 슛크리트, 형상을 변화한 강섬유 슛크리트를 재령일을 3일과 7일로 하여 공시체를 각각 6개씩, 총 36개를 제작하여 압축강도 실험을 실시하였다. 압축강도 실험은 KS F 2405(콘크리트 압축강도 실험방법)에 의거하여 수행하였다. 시험체의 재하는 5ton 용량의 압축강도시험기를 사용하였으며, 하중의 재하속도는 1mm/min로 일정한 속도를 유지하여 강도를 측정하였다.

휨인성 실험은 가로 350mm, 세로 100mm, 높이 100mm의 콘크리트 공시체를 제작하였으며, 혼합믹서기를 이용하여 2분 동안 혼합하여 실험체를 제작하였다. 실험체의 강도발현을 위해 표준수중양생(KS F 2403)에 의거하여 20±3℃로 일정하게 온도를 유지하여 수중양생을 실시하였다. 휨인성 시험방법은 KS F 2408(콘크리트의 휨강도 시험방법)에 따라 수행하여 무보강 슛크리트와 기존 후크형 강섬유보강 슛크리트 및 형상을 변화한 강섬유보강 슛크리트의 재령일을 3일과 7일로 하여 공시체를 각각 6개씩, 총 36개를 제작한 후 휨강도 시험기를 사용하여 3등분점재하를 실시하였다. 하중의 재하속도는 0.24mm/min로 일정하게 속도를 유지하여 휨강도 시험을 실시하였으며, 휨강도 데이터를 얻기 위하여 상부에 로드셀과 하부에 와이어 LVDT를 설치하였다. 휨강도( $\sigma_b$ )는 아래 식을 이용하여 경간(span)방향 중심선의 3등분점 사이에서 파괴되었을 때에 최대하중을

이용하여 산출하였다(안민호, 2009).

$$\sigma_b = \frac{P \times l}{b \times h^2}$$

여기서,  $\sigma_b$  : 휨강도, P : 시험기의 최대하중(kg), l : 경간(mm), b : 파괴단면의 폭(mm), h : 파괴단면의 높이(mm)

#### 4. 실험결과 분석

본 실험에서는 국내 현장에서 일반적으로 사용되는 무보강 슛크리트와 기존 강섬유보강 슛크리트 및 형상을 변화한 강섬유보강 슛크리트를 제작하여 강섬유 형태에 따른 압축강도 실험 및 휨인성 실험을 실시하였으며, 그 실험 결과를 비교 분석하였다.

##### 4.1 압축강도 실험 결과

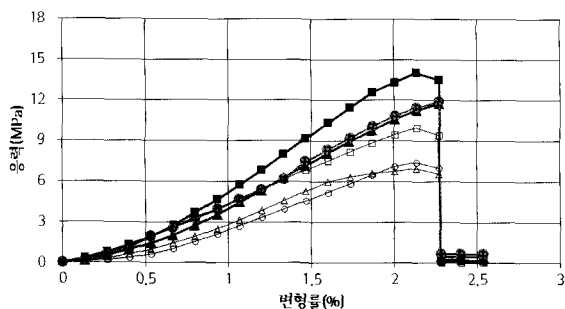
각 실험 공시체로 3일, 7일의 재령일 일 때 강섬유를 혼입하지 않은 무보강 슛크리트, 기존의 강섬유보강 슛크리트, 형상을 변화한 강섬유보강 슛크리트에 대하여 6개씩 총 36개의 공시체를 파괴한 후 공시체 6개의 평균을 하나의 결과값으로 압축강도 실험을 실시한 결과 그림 3과 같이 파괴가 일어났다.

공시체의 파괴 형태는 그림 3(a)과 같이 강섬유를 혼입하지 않은 무보강 슛크리트의 경우 하단부에 미세균열이 발생함과 동시에 1/3 이상이 절단되어 취성파괴가 발생하였으며, 그림 3(b)와 같이 기존의 강섬유를 슛크리트에 혼입하였을 때 취성파괴는 발생하지 않고 인장축에 많은 미세균열이 발생하였다. 그림 3(c)와 같이 형상을 변화한 강섬유를 슛크리트에 혼입하였을 경우 기존 강섬유보강 슛크리트 보다 인장축에 미세균열이 적게 발생하는 것으로 나타났다.

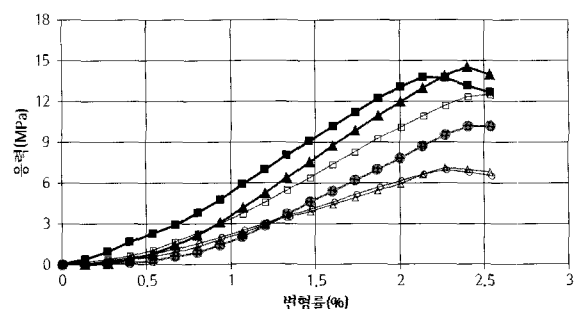
그림 4는 각 강섬유 형태에 따른 재령 3일에서의 일축압축강도를 나타낸 그래프이다. 변형률에 따른 응력을 비교해본 결과 강섬유를 혼입한 경우 응력이 증가하는 경향을 나타냈다. 그림 4(a)와 같이 무보강 슛크리트의 변형률이 2.2%일 때 최대응력이 14.04MPa로 측정되었으며, 그림 4(b)와 같이 기존의 강섬유를 혼입한 슛크리트의 변형률이 2.4%일 때 최대응력이 14.53MPa로 측정되었다. 그림 4(c)와 같이 형상을 변화한 강섬유를 혼입한 슛크리트의 변형률이 2.2%일 때 최대응력이 17.21MPa로 가장 크게 측정되었다. 그림 4(d)와 같이 각 실험조건별 재령 3일 일 때의 평균강도를 나타낸 그래프로써, 무보강 슛크리트의 평균 압축강도는 10.01MPa(표준편차 2.68MPa)인데 반해 기존의 강섬유를 혼입한 슛크리트의 평균 압축강도는 10.84MPa(표준편차 3.30MPa)로 약 7.59% 증가하는 것으로 나타났으며, 기존 강섬유를 혼

입한 슛크리트와 비교했을 때 형상을 변화한 강섬유를 혼입한 슛크리트의 평균 압축강도는 13.39MPa(표준편차 3.03MPa)로 약 19.08% 증가하는 것으로 나타났다. 또한 기존 강섬유를 혼입한 슛크리트보다 형상을 변화한 강섬유를 슛크리트에 혼입했을 때 표준편차가 8.11% 감소하는 것으로 나타났다. 재령 3일에 대한 일축압축강도 실험결과는 표 2와 같이 나타났다.

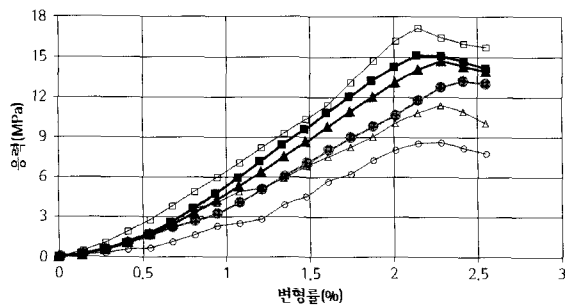
그림 5는 각 강섬유 형태에 따른 재령 7일에서의 일축압축강도를 나타낸 그래프이며, 변형률에 따른 응력을 비교해본 결과 그림 4와 같이 비슷한 경향을 나타냈다. 그림 5(a)와 같이 무보강 슛크리트의 변형률이 2.5%일 때 최대응력이 17.22MPa로 측정되었으며, 그림 5(b)와 같이 기존의 강섬유를 혼입한 슛크리트의 변형률이 2.67%일 때 최대응력이 21.59MPa로 측정되었다. 그림 5(c)와 같이 형상을 변화한 강섬유를 혼입한 슛크리트의 변형률이 3.1%일 때 최대응력이 24.66MPa로 가장 크게 측정되었다. 그림 5(d)와 같이 각 실험조건별 재령 7일 일 때의 평균강도를 나타낸 그래프로써, 무보강 슛크리트의 평균 압축강도는 13.27MPa(표준편차 3.06MPa)인데 반해 기존의 강섬유를 혼입한 슛크리트의 평균 압축강도는 18.32MPa(표준편차 3.83MPa)로 약 27.6% 증가하는 것으로 나타났으며, 기존 강섬유를 혼입한 슛크리트와 비교했을 때 형상을 변화한 강섬유를 혼입한 슛크리트의 평균 압축강도는 20.90MPa(표준편차 3.54MPa)



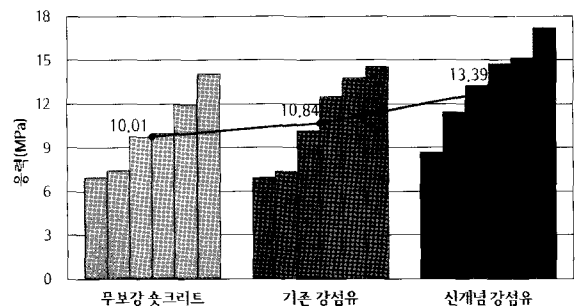
(a) 무보강 슛크리트



(b) 기존 강섬유 슛크리트



(c) 형상을 변화한 강섬유 슛크리트

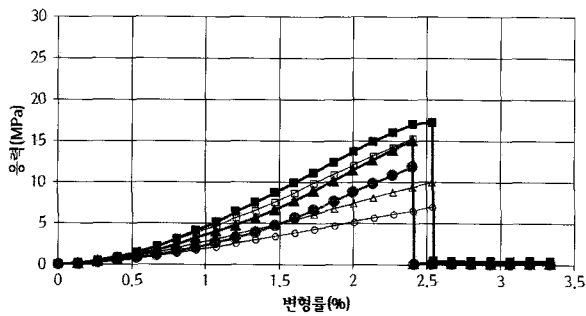


(d) 재령 3일 평균 압축강도

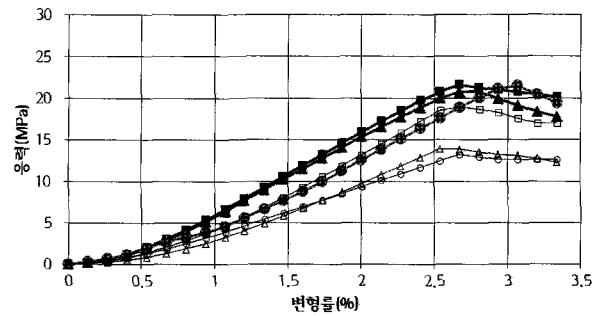
그림 4. 일축압축강도 측정 결과(재령 3일)

표 2. 재령 3일에 따른 압축강도 측정 결과(MPa)

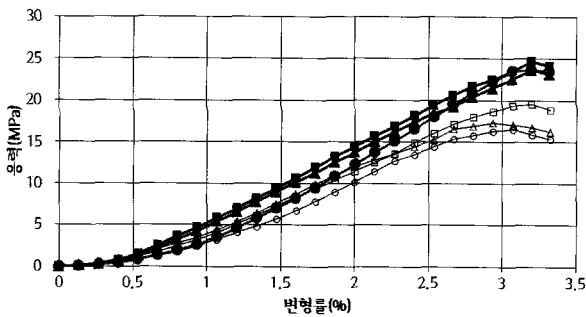
재 료		재 령	3일	재 료		재 령	3일	재 료		재 령	3일
무보강 숏크리트		1	6.95	기존 강섬유 숏크리트		1	6.96	형상을 변화한 강섬유 숏크리트		1	8.64
		2	7.42			2	7.10			2	11.41
		3	10.00			3	10.17			3	13.22
		4	11.77			4	12.49			4	14.74
		5	11.90			5	13.76			5	15.12
		6	14.04			6	14.53			6	17.21
		평균	10.01			평균	10.84			평균	13.39
		표준편차	2.68			표준편차	3.30			표준편차	3.03



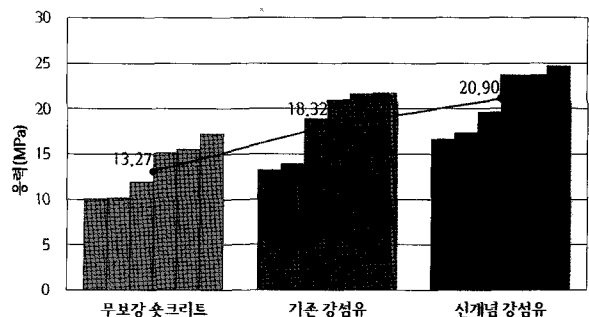
(a) 무보강 숏크리트



(b) 기존 강섬유 숏크리트



(c) 형상을 변화한 강섬유 숏크리트



(d) 재령 7일 평균 압축강도

그림 5. 일축압축강도 측정 결과(재령 7일)

표 3. 재령 7일에 따른 압축강도 측정 결과(MPa)

재 료		재 령	3일	재 료		재 령	3일	재 료		재 령	3일
무보강 숏크리트		1	9.99	기존 강섬유 숏크리트		1	13.18	형상을 변화한 강섬유 숏크리트		1	16.55
		2	10.00			2	13.91			2	17.30
		3	11.89			3	18.92			3	19.59
		4	15.12			4	20.85			4	23.67
		5	15.40			5	21.50			5	23.66
		6	17.22			6	21.59			6	24.66
		평균	13.27			평균	18.32			평균	20.90
		표준편차	3.06			표준편차	3.83			표준편차	3.54

로 약 7.38% 감소하는 것으로 나타났다. 또한 기존 강섬유를 혼입한 숏크리트보다 형상을 변화한 강섬유를 숏크리트에 혼입했을 때 표준편차가 7.38% 감소하는 것

으로 나타났다. 재령 7일에 대한 일축압축강도 실험 결과는 표 3과 같이 나타났다.

## 4.2 휨인성 실험 결과

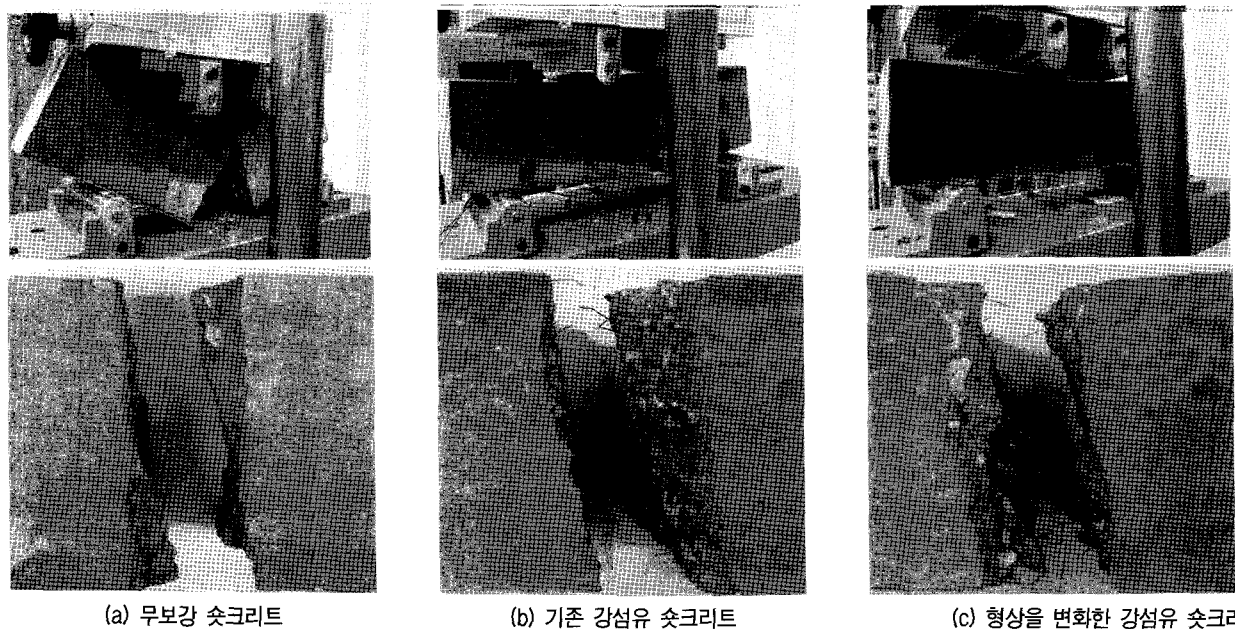
각 실험조건별 공시체로 3일, 7일의 재령일 일 때 강섬유를 혼입하지 않은 무보강 슛크리트, 기존의 강섬유보강 슛크리트 및 형상을 변화한 강섬유보강 슛크리트에 대하여 6개씩 총 36개의 공시체를 파괴한 후 공시체 6개의 평균을 하나의 결과값으로 휨인성 실험을 실시하였으며, 공시체의 파괴 형태는 그림 6과 같이 나타났다.

공시체의 파괴 형태는 그림 6(a)와 같이 강섬유를 혼입하지 않은 무보강 슛크리트의 경우 중앙부 하단의 인장부분에서 균열이 발생하여 최대하중에 도달하였을 때 균열폭이 크게 벌어짐과 동시에 시험체 상단까지 관통하는 균열로 진행되면서 두 조각으로 절단되는 취성 파괴를 보여주고 있다. 그림 6(b)와 같이 기존의 강섬유를 보강한 슛크리트는 초기 휨균열의 발생위치와 균열진전 상황은 무보강 슛크리트와 유사하게 나타났지만, 시험체 내부에 불규칙적으로 분포되어 있는 강섬유가 인장력을 전달하는 역할을 하면서 최대하중 이후에도 인장측에서 균열폭이 커지기는 하지만 반으로 절단되는 파괴로 이어지지는 않았다. 그림 6(c)와 같이 형상을 변화한 강섬유 보강 슛크리트의 경우 기존 강섬유 보강 슛크리트와 유사한 거동으로 나타났지만, 강섬유의 분포는 기존 강섬유 보다 형상을 변화한 강섬유를 혼입한 슛크리트에서 균일하게 분포하는 것을 확인할 수 있었다.

그림 7은 각 강섬유 형태에 따른 슛크리트 재령 3일

에서의 휨강도를 나타낸 그래프이다. 변위에 따른 휨강도를 비교해본 결과 강섬유를 혼입한 경우 휨강도가 증가하는 경향을 나타냈다. 그림 7(a)와 같이 무보강 슛크리트의 변위가 0.35mm일 때 최대휨강도가 1367kPa이 측정되었으며, 그림 7(b)와 같이 기존의 강섬유를 혼입한 슛크리트의 변위가 0.4mm일 때 최대휨강도가 1602kPa이 측정되었다. 그림 7(c)와 같이 형상을 변화한 강섬유를 혼입한 슛크리트의 변위가 0.4mm일 때 최대휨강도가 1698Pa로 가장 크게 측정되었다. 그림 7(d)와 같이 각 실험조건별 재령 3일 일 때의 평균 휨강도를 나타낸 그래프로써, 무보강 슛크리트의 평균 휨강도는 1218kPa(표준편차 143kPa)인데 반해 기존의 강섬유를 혼입한 슛크리트의 평균 휨강도는 1396kPa(표준편차 194kPa)로 약 12.75% 증가하는 것으로 나타났으며, 기존 강섬유를 혼입한 슛크리트와 비교했을 때 형상을 변화한 강섬유를 혼입한 슛크리트의 평균 휨강도는 1552kPa(표준편차 107kPa)로 약 10.04% 증가하는 것으로 나타났다. 또한 기존 강섬유를 혼입한 슛크리트보다 형상을 변화한 강섬유를 슛크리트에 혼입했을 때 표준편차가 44% 감소하는 것으로 나타났다. 재령 3일에 대한 휨강도 실험결과는 표 4와 같이 나타났다.

그림 8은 각 강섬유 형태에 따른 슛크리트 재령 7일에서의 휨강도를 나타낸 그래프이다. 변위에 따른 휨강도를 비교해본 결과 강섬유를 혼입한 경우 휨강도가 증가하는 경향을 나타냈다. 그림 8(a)와 같이 무보강 슛크리트

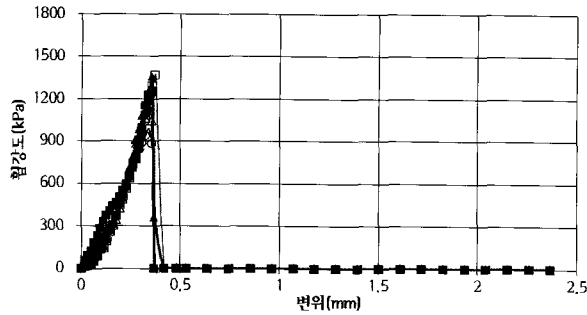


(a) 무보강 슛크리트

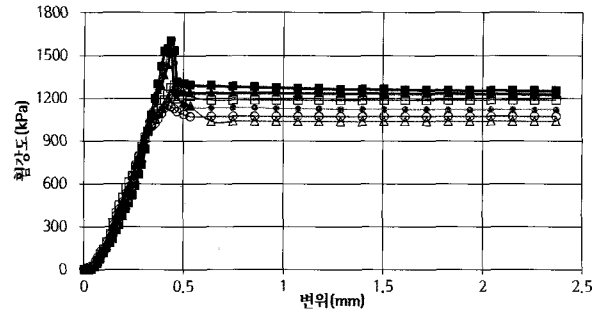
(b) 기존 강섬유 슛크리트

(c) 형상을 변화한 강섬유 슛크리트

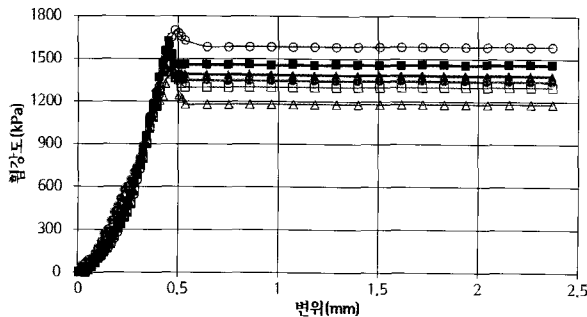
그림 6. 시험체의 파괴 형태



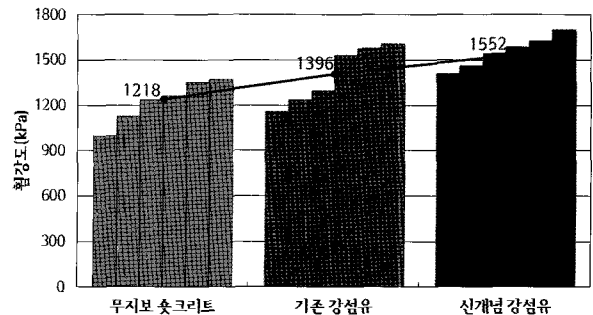
(a) 무보강 슛크리트



(b) 기존 강섬유 보강 슛크리트



(c) 형상을 변화한 강섬유 보강 슛크리트



(d) 재령 3일 평균 휨강도

그림 7. 휨강도 측정 결과(재령 3일)

표 4. 재령 3일에 따른 휨강도 측정 결과(kPa)

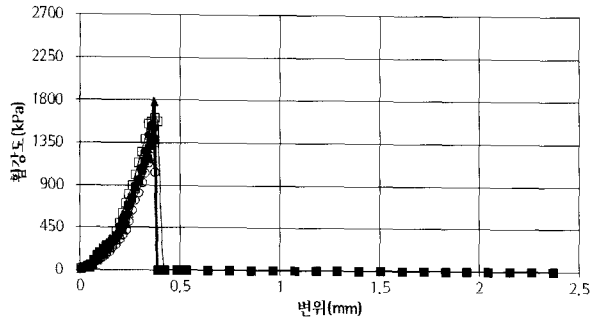
재 료	재 령	3일	재 료	재 령	3일	재 료	재 령	3일
	1	2		1	2		1	2
무보강 슛크리트	1	989	기존 강섬유	1	1154	형상을 변화한 강섬유	1	1426
	2	1120		2	1228		2	1456
	3	1228		3	1294		3	1534
	4	1256		4	1528		4	1579
	5	1348		5	1572		5	1620
	6	1367		6	1602		6	1698
	평균	1218		평균	1396		평균	1549
	표준편차	143		표준편차	194		표준편차	107

트의 변위가 0.37mm일 때 최대휨강도가 1779kPa이 측정되었다. 그림 8(b)와 같이 기존의 강섬유를 혼입한 슛크리트의 변위가 0.44mm일 때 최대휨강도가 2065kPa이 측정되었으며, 그림 8(c)와 같이 형상을 변화한 강섬유를 혼입한 슛크리트의 변위가 0.45mm일 때 최대휨강도가 2510kPa로 가장 크게 측정되었다. 그림 8(d)와 같이 각 실험조건별 재령 7일 일 때의 평균 휨강도를 나타낸 그래프로써, 무보강 슛크리트의 평균 휨강도는 1557kPa(표준편차 194kPa)인데 반해 기존의 강섬유를 혼입한 슛크리트의 평균 휨강도는 1725kPa(표준편차 351kPa)로 약 9.79% 증가하는 것으로 나타났으며, 기존 강섬유를 혼입한 슛크리트와 비교했을 때 형상을 변화한 강섬유를 혼입한 슛크리트의 평균 휨강도는 1925kPa(표준편

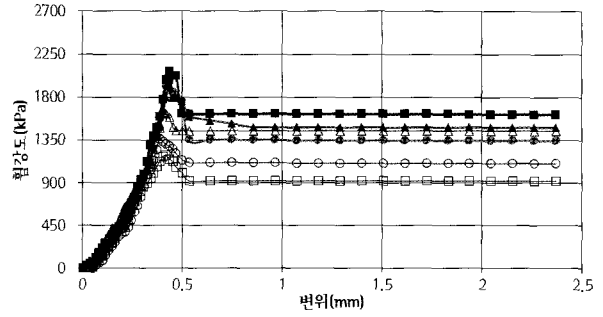
차 332kPa)로 약 12.86% 증가하는 것으로 나타났다. 기존 강섬유를 혼입한 슛크리트보다 형상을 변화한 강섬유를 슛크리트에 혼입했을 때 표준편차가 5.3% 감소하는 것으로 나타났다. 재령 7일에 대한 휨강도 실험결과는 표 5와 같이 나타냈다.

실험결과 기존 강섬유 보강 슛크리트 보다 형상을 변화한 강섬유를 슛크리트에 보강하였을 때 일축압축강도 및 휨강도 모두 증가하는 것으로 나타났다. 또한 선행연구에서 후크형 강섬유와 후크의 각도와 강섬유 Body의 길이를 변형시켜 각각의 Case에 대한 인발실험을 실시한 결과 콘크리트와 강섬유의 결합시 강섬유 후크 각도와 Body의 길이에 따른 형상비의 변화가 부착력을 강하게 하여 인발력 차이가 발생하는 것으로 나타났습니다.

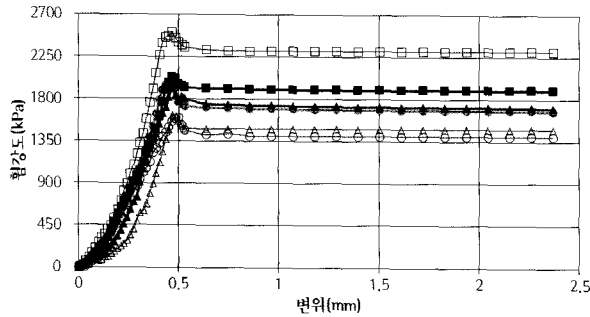




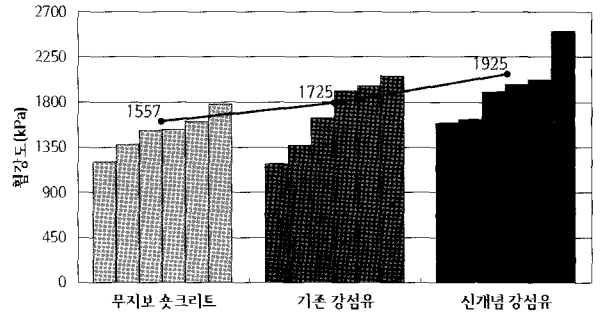
(a) 무보강 슛크리트



(b) 기존 강섬유 보강 슛크리트



(c) 형상을 변화한 강섬유 보강 슛크리트



(d) 재령 7일 평균 휨강도

그림 8. 휨강도 측정 결과(재령 7일)

표 5. 재령 7일에 따른 휨강도 측정 결과(kPa)

재 료	재 령		재 료	재 령		재 료	재 령	
	재 령	3일		재 령	3일		재 령	3일
무보강 슛크리트	1	1211	기존 강섬유	1	1191	형상을 변화한 강섬유	1	1593
	2	1383		2	1374		2	1629
	3	1524		3	1644		3	1905
	4	1530		4	1912		4	1983
	5	1613		5	1967		5	2032
	6	1779		6	2065		6	2510
	평균	1507		평균	1692		평균	1942
	표준편차	194		표준편차	351		표준편차	332

## 5. 결 론

본 연구에서는 형상을 개선한 강섬유를 개발하였으며, 개발한 강섬유를 혼입한 슛크리트의 강도특성에 대해 알아보기 위하여 실내실험을 실시하였다. 본 연구에서 사용한 시료는 무보강 슛크리트, 기존 후크형 강섬유 보강 슛크리트와 형상을 변화한 강섬유보강 슛크리트이며, 이들 시료를 이용해서 강도특성을 분석하기 위해 수행한 실험은 압축강도 및 휨강도시험이다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 압축강도 파괴형태에서는 형상을 변화한 강섬유 보강 슛크리트의 경우 기존 강섬유 보강 슛크리트와

유사한 거동으로 나타났지만, 기존 강섬유를 보강한 것 보다 형상을 개선한 강섬유를 보강하였을 때 인장측에 미세균열이 적게 발생하는 것으로 나타났다. 또한 휨강도 파괴형태는 기존 강섬유를 보강한 것 보다 형상을 변화한 강섬유를 보강하였을 때 공시체 내부에 강섬유가 균일하게 분포하는 것을 확인할 수 있었다.

(2) 재령 3일, 7일의 공시체에 대한 압축강도 실험결과 강섬유를 혼입한 경우 압축강도가 증가하는 경향이 나타났으며, 형상을 개선한 강섬유보강 슛크리트 재령 3일 일 때의 평균 압축강도가 13.39MPa로 기존 강섬유보강 슛크리트 보다 약 19.08% 증가하였으며, 재령 7일 일 때의 평균 압축강도가 20.90MPa

로 기존 강섬유보강 슛크리트 보다 약 12.34% 증가하는 것으로 나타났다. 또한 재령 3일, 7일에 따른 표준편차는 각각 7.38%, 8.11% 감소하는 것으로 나타났다.

- (3) 재령 3일, 7일의 공시체에 대한 휨강도 실험결과 강섬유를 혼입한 경우 휨강도가 증가하는 경향이 나타났으며, 형상을 변화한 강섬유보강 슛크리트 재령 3일 일 때의 평균 휨강도가 1552kPa로 약 10.04% 증가하였으며, 재령 7일 일 때의 평균 휨강도가 1925kPa로 약 10.37% 증가하는 것으로 나타났다. 또한 재령 3일, 7일에 따른 표준편차는 각각 5.3%, 44.75% 감소하는 것으로 나타났다.

본 연구결과 강섬유를 혼입하지 않은 무보강 슛크리트와 기존 강섬유를 슛크리트에 혼입하였을 때 보다는 강섬유 후크의 각도와 Body의 길이를 변화시킨 새로운 형태의 형상을 개선한 강섬유를 사용하여 보강용 슛크리트 타설하였을 때 압축강도 및 휨인성 모두 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 새로운 강섬유 개발을 위하여 강섬유 재료의 역학적 거동 실험과 배합기법, 실제 시험 시공을 통한 리바운드율이나 강섬유혼입의 균일성 등 현장실험을 통해 현장 적용성을 확보해야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 기초과학연구지원 사업 중 “신개념 고성능 터널지보 시스템 이론 및 지보재료 개발에 대한 연구”(과제번호 : 2011-0000511) 과제의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

1. 광계환, 황해성, 성배경, 장화섭 (2006), “강섬유의 형상비와 혼입률에 따른 강섬유 보강 콘크리트 보의 역학적 특성 추정 모형 개발”, 한국농공학회논문집, 제48권 제3호, pp.85-94.
2. 김상환, 윤승기 (2009), “강섬유 형상에 따른 인발 거동에 대한 연구”, 대한토목학회 정기학술대회, pp.1035-1039.
3. 김상환 (2010), “스틁크리트용 강섬유 형상에 따른 인발 거동에 대한 연구”, 한국터널공학회, 제13권 제1호, pp.51-59.
4. 백신원, 김동백 (1996), “강섬유보강 슛크리트에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회논문집, 제16권 제3호, pp.217-226.
5. 안민호 (2009), 실내시험을 통한 반달형 강섬유 보강 슛크리트의 특성에 관한 연구, 석사학위논문, 상지대학교, pp.42-44.
6. 이승호, 김상환, 배규진, 정형식 (2006), “터널 굴착시 강섬유 슛크리트의 적정 강섬유 함유량에 관한 연구”, 대한토목학회 정기학술대회, pp.4262-4265.
7. 전찬기 (1992), “강섬유의 형태에 따른 SFRC보의 휨거동에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 제12권 제4호, pp.95-106.
8. 한국도로공사 (2003), 터널 슛크리트 품질기준 개선(안).
9. Eren, O. and Marar, K. (2009), “Effects of limestone crusher dust and steel fibers on concrete”, Construction and Building Materials 23, pp.1102-1108.
10. Muhammad, N. S. and Hadi, C. S. (2009), “Behaviour of eccentric loading of FRP confined fibre steel reinforced concrete columns”, Construction and Building Materials 23, pp.981-988.

(접수일자 2011. 11. 17, 심사완료일 2011. 12. 26)