

숏크리트 강섬유 형상에 따른 인발 거동에 대한 연구

김상환¹, 김지태^{2*}

A study on pull-out behaviours of shotcrete steel fibers according to bifferent shapes

Sang-Hwan Kim, Ji-Tae Kim

Abstract This paper presents the tensile strength of shotcrete steel fibers depending on the shape of steel fiber. The experimental and numerical analyses are performed in this study. In experimental study, a series of laboratory pullout tests are carried out by changing both the angle and the length of the embedded steel fiber according to the corresponding type of steel fiber in order to derive the optimal type of steel fiber. Results obtained from the experimental work are evaluated and compared with the numerical analysis results. The results clearly show that the pull-out strength of the steel fiber are increased with increasing the hook angle and embedded angle of steel fiber. It is also found that the pull-out strength of the steel fiber is larger in case of the short steel fiber body length.

Keywords: Steel fiber shotcrete, Pullout test, Steel fiber hook angle, Steel fiber body length

요 지 본 논문에서는 강섬유 형상에 따른 인발력 거동에 대한 연구를 수행하였다. 최적의 강섬유 형상을 도출하기 위하여 매입 된 강섬유가 이루는 각도와 길이를 변화시켜가며 인발실험을 시행하였다. 또한 인발실험 결과를 모사하기 위해 수치해석을 수행하였다. 그 결과 강섬유 형상에 있어서 Hook 각도와 설치각도 클수록 인발력이 뛰어나며, 특히 강섬유의 길이가 짧아짐에 따라 인발력도 뛰어난 것으로 판단되어졌다.

주요어: 강섬유 숏크리트, 인발실험, 강섬유 Hook각, 강섬유본체길이

1. 서 론

최근 급속한 산업화로 인하여 물류 및 여객의 신속한 수송이 요구됨에 따라 도로, 철도 및 지하철 건설이 증가되고 있다. 이러한 사회간접시설의 증가는 국토의 면적이 좁은 국내 실정을 고려할 때 절실히 필요하다. 따라서 용지의 효율적인 이용, 환경훼손 최소화 그리고 경제적인 노선계획으로 점차 터널 및 교량구조물의 비중이 커지고 있다. 특히 국토의 70% 이상이 산악지형으로 이루어진 국내의 여건상 유리한 선형계획과 친환경적인 사회적 요구에 따라 터널 건설이 증가 하는 추세에 있다. 국내에서 이루어지는 터널시공의 주요 공법으로 NATM 공법이 많이 채택되어 이용되고 있다. NATM공법은 원지반의 강도를 유지하고 보강하는 수단으로 록볼트, 숏크리트, 지보재를 이용하여 굴착 후 지반의 변위를 최소

한으로 허용하면서 지반의 강도를 유지한 상태에서 지반과 지보재의 평형을 이루는 것으로 터널의 안전성을 유지시키는 공법이다.

이중 숏크리트는 별도의 거푸집이 필요 없이 숏크리트 장비를 사용하여 굴착된 원지반에 공기압으로 뿜어 붙이는 콘크리트로서 지반의 이완을 방지하고 원지반의 강도를 유지하여 콘크리트 아치로서 하중을 분담하는 역할을 하게 된다. 과거에는 와이어메시를 이용한 숏크리트가 주로 사용되었으나 1995년 이후 국내 고속도로 터널현장에 강섬유 보강 숏크리트가 적용되었다. 이러한 강섬유 보강 숏크리트는 터널뿐만 아니라 구조물의 보강, 사면안정 등 그 적용범위가 급속도로 확대되고 있다.

국외의 경우 강섬유 인발실험(Pull out test)에 대한 연구가 진행되어 왔다. Chanvillard와 Aitcint(1996)는 corrugated steel fibers에 관한 인발 거동 연구를 하였다. Hadjis와 Piggott(1997)는 강섬유 인발력에 대한 시험체 응력의 영향에 대해 연구하였다. Marchese와 Marchese(1993)

¹정희원, 호서대학교 토목공학과 교수

²정희원, 호서대학교 토목공학과 박사과정

*교신저자: 김지태 (E-mail: ver23@nate.com)

는 섬유 인발과 미세구조의 관계에 대한 연구를 하였는데 최근에 Robins 등(2001)은 후크타입의 강섬유 인발 거동에 대한 연구를 하였다. 그러나 국내의 강섬유에 대한 연구는 강섬유 혼입률, 실리카흙 혼입율과 강섬유보강 슛크리트의 휨인성등에 국한되어 있고 강섬유의 인발 거동에 대한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 새로운 형태의 강섬유를 제작하고 강섬유의 인발실험을 통하여 새로운 형태의 강섬유 보강 슛크리트를 개발하고자 하였으며 수치해석을 통한 해석을 동시에 수행하였다.

2. 강섬유 특성

강섬유는 일반적으로 ASTM A 820의 규격에 따라 생산되는데 제조사별로 다양한 종류의 모양과 크기로 생산되고 있다. 강섬유의 생산방법에는 3가지의 방법이 적용되며 제조사별로 각기 다양한 형태와 크기로 제작되어 강섬유의 재질과 형태별로 고유한 특성을 갖는다.

강섬유의 단면형상은 주로 원형, 사각형, 박판형 또는 다각형 등으로 제작되고 있으며 강섬유 자체의 극한인장강도는 $3,500 \sim 21,000 \text{ kg/cm}^2$ 의 범위에 있다. 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 노즐직경의 한계로 인하여 길이 30 mm 정도의 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 것 그리고 강섬유 양단을 약간 확장시킨 형태 등이 적용된다.

강섬유의 특성은 이와 같이 섬유의 인장강도, 기하학적 형상에 따라 달라지며, 특히 섬유의 길이를 단면의 유효직경으로 나눈 형상비(Aspect Ratio)가 중요한 특성이 된다. 강섬유의 형상비는 $30 \sim 150$ 의 다양한 것들이 사용되고 있으며 일반적으로 형상비가 클수록 강섬유보강 슛크리트의 역학적 특성이 우수해지는 것으로 나타나고 있다. 그러나 형상비가 지나치게 클 경우 배합시 강섬유의 분사 불량, 뽑어 붙이는 작업의 어려움 등으로 사용성이 저하되는 경향이 있으므로 슛크리트에 적용되는 강섬유의 형상비는 일반적으로 $40 \sim 100$ 의 값을 갖는다.

3. 강섬유 인발시험

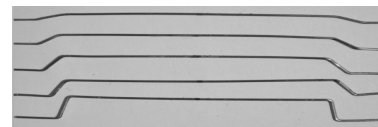
본 실험은 강섬유 형상이 인발력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 각각의 형상에서 실시한 기본 거동실험이다. 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 강섬유는 Hook ends타입으로 슛크리트에 강섬유를 혼입하여 사용하고 있다. 또한 선행 연구자들에 의해 강섬유 혼입률, 강섬유 슛크리트의 휨인성과 압축강도, 혼입제 등에 대한 많은 연구가 이루어 졌다. 본 실험에서는 Hook ends타입 강섬유에서 Hook각도와 강섬유 body길이, 그리고 Embedded 각도 등을 변화시켜가며 기본적인 거동실험을 실시하였다.

3.1 시험방법

시험체를 얻기 위해 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 의 거푸집을 제작하여 성형하였으며, 진동기에 1분 가량 진동다짐하여 시험체를 제작하였다. 실험체는 석고(2): 물(1): 표준사(1)의 배합비로 제작하였다. 실험에 사용되어진 강섬유는 국내 현장에서 사용되어지고 있는 제품으로 강섬유의 역학적 성질은 표 1과 같다.

표 1. 강섬유 역학적 성질

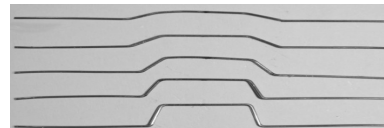
Fiber Length	50 mm
Average Equivalent Diameter	0.5 mm
Tensile Strength	1,000 MPa
Aspect ratio	100



(a) 강섬유 Body 36 mm



(b) 강섬유 Body 24 mm



(c) 강섬유 Body 12 mm

그림 1. 시험에서 사용한 강섬유의 형태

시험에 사용된 강섬유는 Hook ends타입에 변형을 주어 Hook 각도(15°, 30°, 45°, 60°, 75°)과 강섬유 body 길이(36 mm, 24 mm, 12 mm)에 변화를 주어 제작하였으며 형상은 그림 1과 같다.

시험체를 만들기 위해 석고, 물, 표준사를 배합하여 강섬유를 고정 시켰으며 강섬유의 길이는 50 mm로 하였다. 강섬유 형상에 따라 인발깊이를 25 mm로 하였으며 강섬유의 Embedded 각도는 0°와 45°로 하여 실내 Pull-out 시험을 실시하였다.

실시한 시험 모두 36조합으로 이 시험조합을 요약 정리하면 표 2와 같다.

표 2. 실내 Pull-out 시험 조합

Steel Fiber			
Embedded Angle	Body Length	Hook Angle	cases
0°	12 mm	15°	1-1
		30°	1-2
		45°	1-3
		60°	1-4
		75°	1-5
	24 mm	15°	2-1
		30°	2-2
		45°	2-3
		60°	2-4
		75°	2-5
	36 mm	15°	3-1
		30°	3-2
		45°	3-3
		60°	3-4
		75°	3-5
45°	12 mm	15°	4-1
		30°	4-2
		45°	4-3
		60°	4-4
		75°	4-5
	24 mm	15°	5-1
		30°	5-2
		45°	5-3
		60°	5-4
		75°	5-5
	36 mm	15°	6-1
		30°	6-2
		45°	6-3
		60°	6-4
		75°	6-5

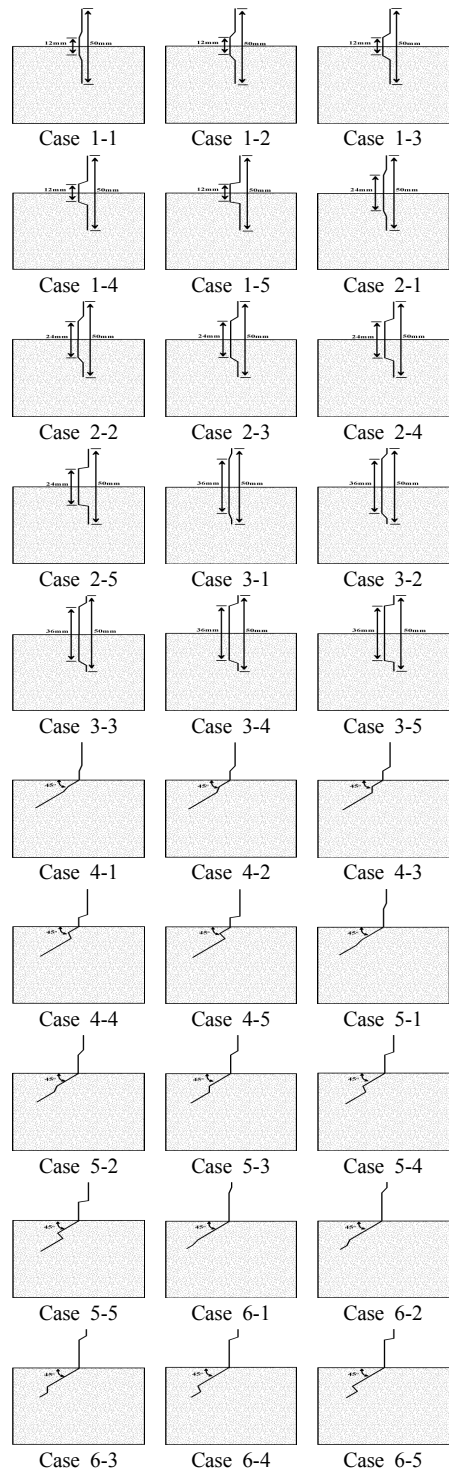


그림 2. 시험 Cases

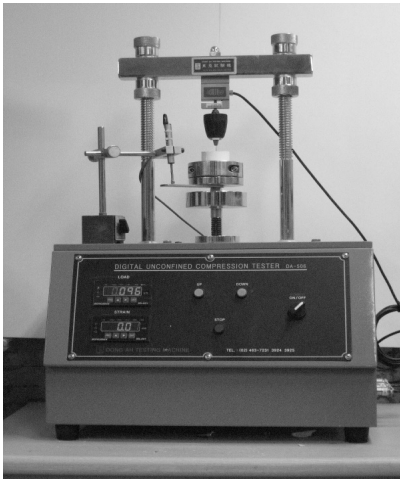
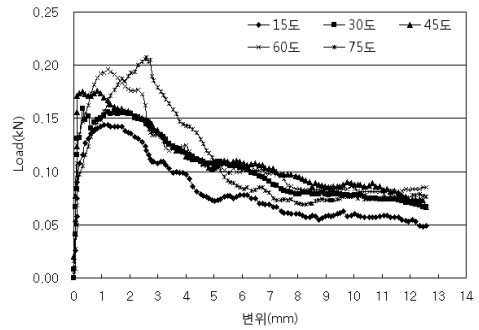


그림 3. 인발시험장비

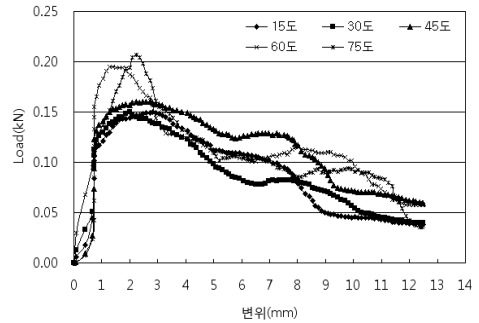
상기 시험 case에 대하여 상세히 나타내면 그림 2와 같다. 강섬유 인발시험에 사용한 시험장비는 인발속도를 제어할 수 있는 특수한 강섬유 인발시험장치를 제작하였다. 인발센서와 LVDT를 장착하여 강섬유 형상과 인발 깊이에 따른 인발력과 변위를 측정할 수 있도록 하고 데이터를 저장할 수 있는 프로그램을 제작하여 컴퓨터에서 시험장비 작동 및 측정값을 확인할 수 있게 하였다. 시험 순서는 그림 3과 같이 시험체를 고정 시키고 강섬유가 지그에 닿을 때 까지 올려준다. 지그에 강섬유를 고정시키고 LVDT를 연결한다. 컴퓨터에서 인발속도를 10 mm/min으로 설정하였다. 이후 장비를 작동시켜 인발시험을 실시하여 얻은 시험값을 정리하여 강섬유의 형상, 각도 변화에 따른 인발력과 비교 분석하였다.

3.2 실험결과 분석

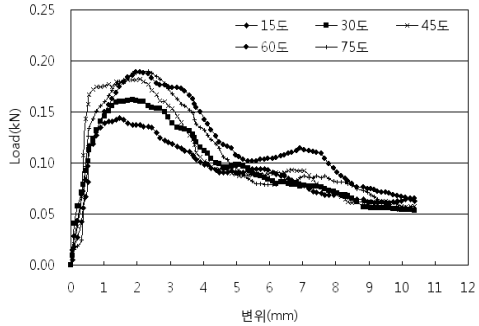
본 시험에서는 Hook ends타입 강섬유와 Hook를 이루는 각도와 강섬유 body길이에 따라 인발시험을 실시하였으며 그림 4는 강섬유의 Embedded 각도(인발각도)를 0°로 하고 각 형상별로 나타나는 변위에 따른 인발력 시험을 한 결과를 나타낸 그래프이며 그림 4(d)는 인발력에 따른 Peak Load(최대 인발력)를 나타낸 것이다. 그림 4(a)는 강섬유 body의 길이가 12 mm일 때 강섬유형상변화에 따른 인발응력을 비교한 그래프로 형상의 각도가 75°일 때 경우 최대 인발응력을 나타냈으며 형상의 각도가 60°일 때 인발응력은 약 5.6% 감소하였다.



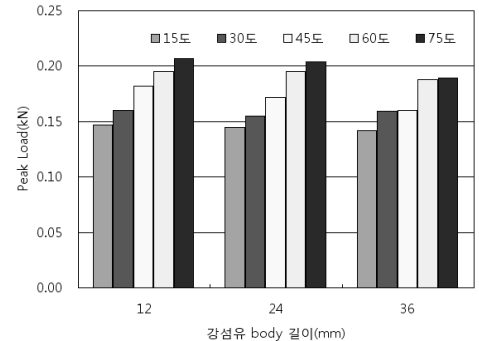
(a) 강섬유 body길이 12 mm



(b) 강섬유 body길이 24 mm



(c) 강섬유 body길이 36 mm



(d) 강섬유 형상에 따른 Peak Load

그림 4. Embedded 각도가 0°인 경우 시험 결과

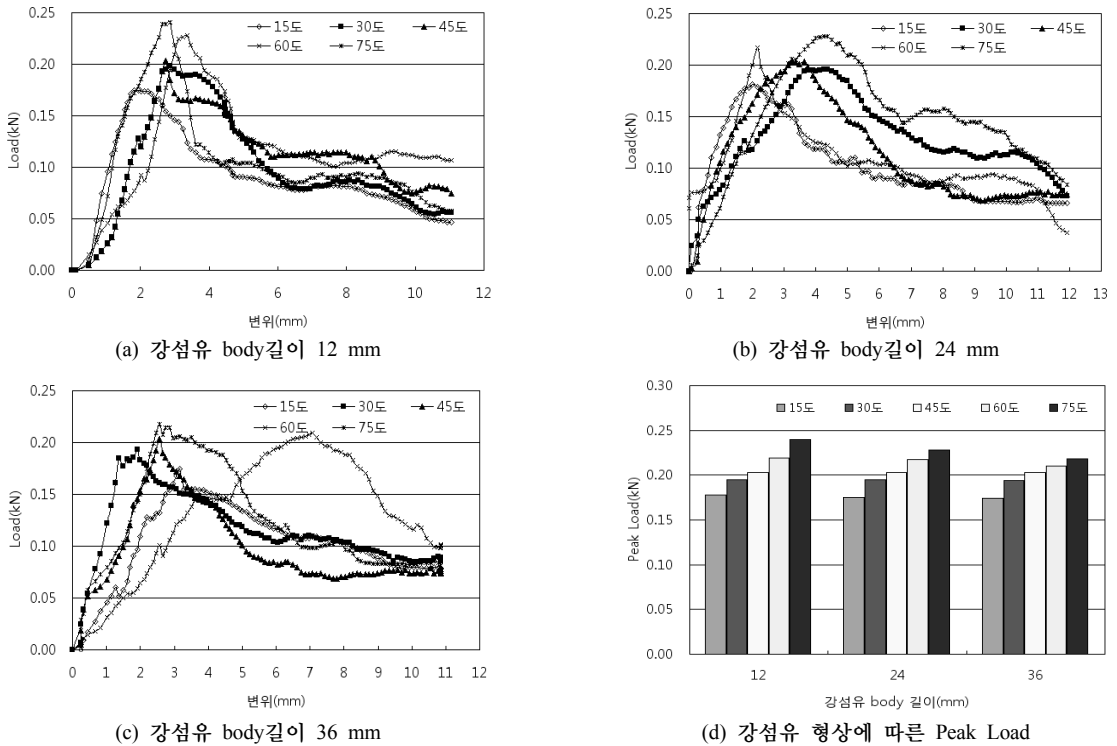


그림 5. Embedded 각도가 45°인 경우 시험 결과

또한 45°의 경우 약 18%, 30°의 경우 약 23%, 15°의 경우 약 30% 인발응력이 감소하였다. 그림 4(b)는 강섬유 body의 길이가 24 mm일 때의 강섬유형상변화에 따른 인발응력을 비교한 그래프로 강섬유형상의 각도가 75°일 때 최대 인발응력을 나타냈으며 형상의 각도가 60°일 때 약 6% 감소하였다. 또한 45°의 경우 약 24%, 30°의 경우 약 29%, 15°의 경우 약 30% 인발응력이 감소하였다. 그림 4(c)는 강섬유 body의 길이가 36 mm일 때의 인발응력을 비교한 그래프로 최대인발응력은 역시 강섬유형상의 각도가 75°일 때 나타났다. (d)는 강섬유 형상별 최대 인발응력을 나타낸 그래프로 강섬유 body의 길이가 12 mm일 때 보다 강섬유 body가 24 mm이고 형상을 이루는 각이 75°의 경우 약 21%, 60°의 경우 약 26%, 45°의 경우 27%, 30°의 경우 28%, 15°의 경우 35% 감소하였다. 또한 강섬유 body의 길이가 24 mm일 때보다 강섬유 body가 36 mm이고 강섬유를 이루는 각이 75°일 때 약 17% 감소하였으나 60°, 45°, 30°, 15°의 경우는 최대인발응력은 감소율이 미미하게 나타났다.

그림 5는 강섬유의 Embedded 각도를 45°로 하고 형상에 따라 시험한 결과이다. 시험결과로부터 변위에 따른 응력 곡선 Peak Load 값을 비교한 그래프는 그림 5(d)와 같다.

그림 5(a)는 인발각도(45°)와 강섬유 body 길이가 12 mm일 때 나타난 결과로 강섬유형상 각도가 75°일 때 최대 인발응력을 나타냈으며 인발각도가 0°일 때 보다 약 14% 증가하였다. 형상의 각도가 75°보다 60°일 때 인발응력은 약 6% 감소하였으며 또한 45°의 경우 약 20%, 30°의 경우 약 23%, 15°의 경우 약 25% 인발응력이 감소하였다. 그림 5(b)는 강섬유 body의 길이가 24 mm일 때의 강섬유형상에 따라 인발응력을 비교한 그래프로 강섬유형상의 각도가 75°일 때 최대 인발응력을 나타냈으며 형상의 각도가 60°일 때 약 4% 감소하였다. 또한 45°의 경우 약 16%, 30°의 경우 약 19%, 15°의 경우 약 25% 인발응력이 감소하였다. 그림 5(c)는 강섬유 body의 길이가 36 mm일 때의 인발응력을 비교한 그래프로 최대 인발응력은 강섬유형상의 각도가 75°일 때 나타났다. 그

림 5(d)는 강섬유 형상별 최대 인발응력을 나타낸 그래프로 강섬유 body의 길이가 12 mm, 24 mm일 때의 최대 인발응력보다 36 mm일때의 최대 인발응력은 약 14% 감소하였다.

4. 수치해석 분석

본 수치해석은 실험에서 얻은 결과를 검증하기 위하여 유한요소 해석프로그램인 Visual FEA를 사용하여 비교 분석하였다.

4.1 해석과정 및 방법

본 해석은 모형실험과 동일한 조건을 적용하였으며 지반은 탄소성거동을 나타내는 Mohr-Coulomb Model을 적용하였다. 또한 슛크리트의 물성치를 적용하였고 강섬유의 물성치는 표 3과 같다. 2차원 수치해석의 경우 지반의 초기응력상태를 고려하기 위하여 토압계수(k_0)는 0.5로 하였다.

4.2 수치해석 결과

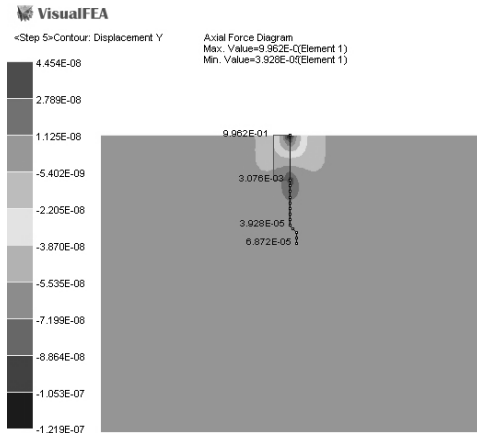
실내시험에서 실시한 강섬유 형상에 따른 Embedded 각도(인발각도)별로 실시한 수치해석결과를 나타내면 다음과 같다.

그림 6은 강섬유 Embedded각(인발각도)이 0°에서 Hook각을 45°인 경우 강섬유의 Body 길이에 따른 대표적인 수치해석 결과를 나타낸 그래프이다.

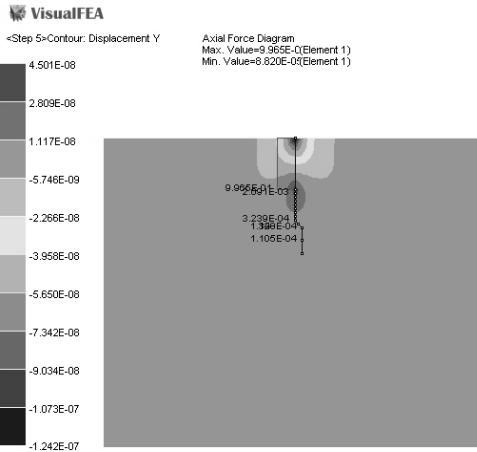
그림 7은 인발각도 0°에서 강섬유 형상에 따른 수치해석 결과를 나타낸 그래프이다. 그림 7(a)는 강섬유 body의 길이가 12 mm일 때 강섬유형상에 따라 인발력을 비교한 그래프로 형상의 각도가 75°일 때 최대 인발력을 나타냈으며 형상의 각도가 60°일 때 인발력은 약 16%

표 3. 적용 물성치

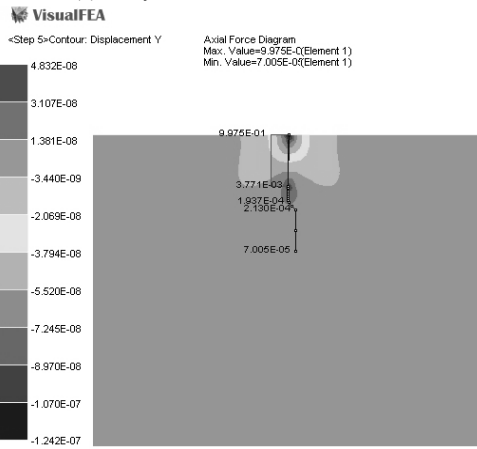
구분	강섬유	스츛크리트
탄성계수(kPa)	2.1×10^7	1.5×10^7
프아송비	-	0.2
단위중량(kN/m ³)	78.5	24
점착력(kPa)	-	300
내부마찰각	-	35°



(a) Body길이 = 36 mm, Hook각 = 45°



(b) Body길이 = 24 mm, Hook각 = 45°



(c) Body길이 = 12 mm, Hook각 = 45°

그림 6. 강섬유 Body 길이별 대표수치해석 (강섬유 Embedded각 = 0°, Hook각 = 45°인 경우)

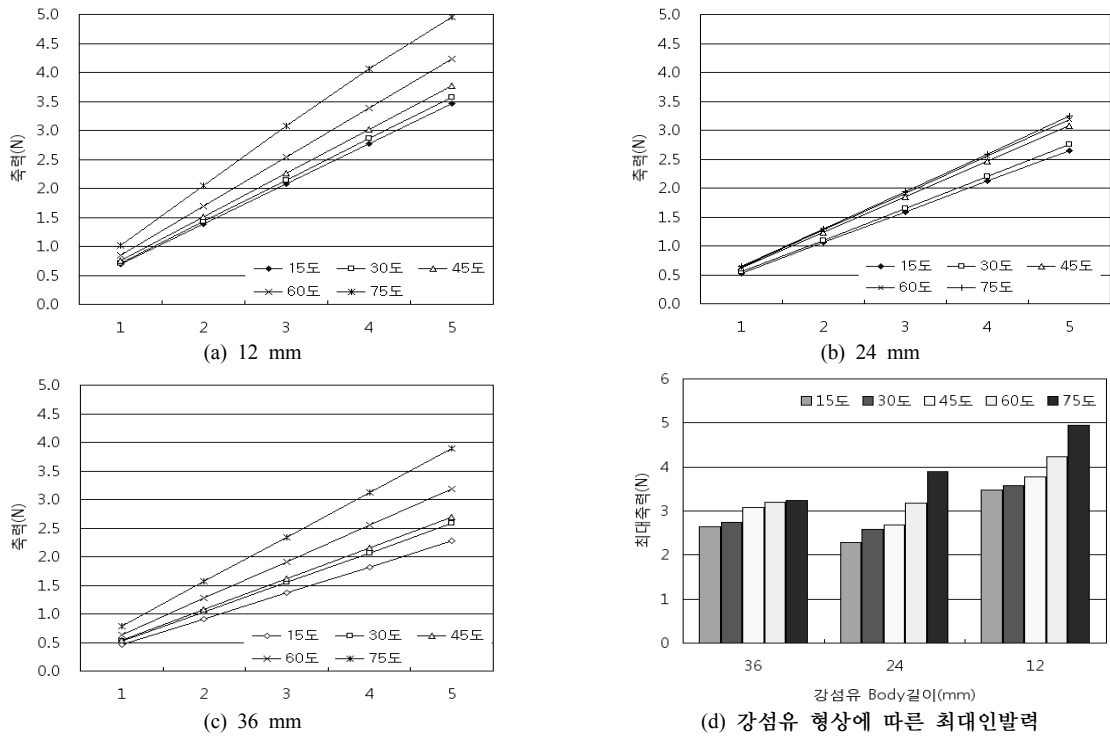
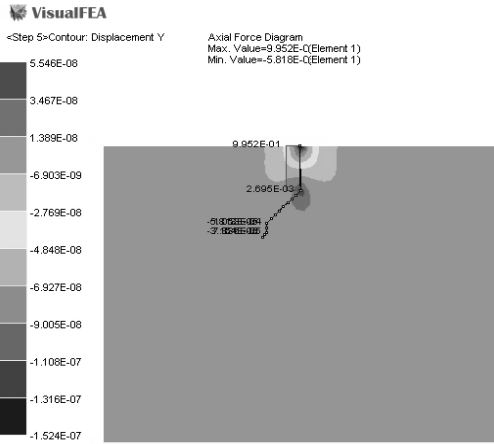


그림 7. 수치해석 결과(강섬유 Embedded각 = 0°)

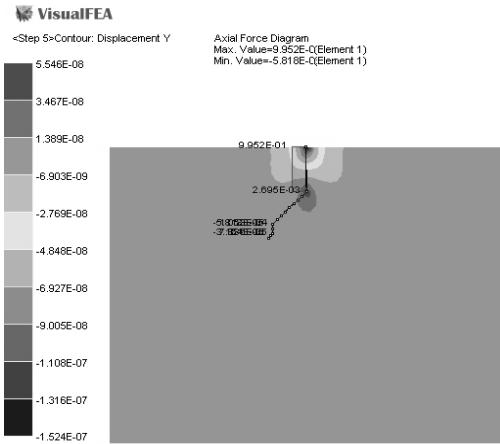
감소하였다. 또한 45°의 경우 약 30%, 30°의 경우 약 32%, 15°의 경우 약 35% 인발력이 감소하였다. 그림 7(b)는 강섬유 body의 길이가 24 mm일 때의 강섬유형상에 따라 인발력을 비교한 그래프로 강섬유형상의 각도가 75°일 때 최대 인발력을 나타냈으며 형상의 각도가 60°일 때 약 20% 감소하였다. 또한 45°의 경우 약 33%, 30°의 경우 약 35%, 15°의 경우 약 43% 인발력이 감소하였다. 그림 7(c)는 강섬유 body의 길이가 36 mm일 때의 인발력을 비교한 그래프로 최대인발력 또한 강섬유형상의 각도가 75°일 때 나타났다. 그림 7(d)는 강섬유 형상별 최대 인발응력을 나타낸 결과로 강섬유 body의 길이가 12 mm일 때 보다 24 mm이고 형상을 이루는 각이 75°의 경우 약 21%, 60°의 경우 약 26%, 45°의 경우 27%, 30°의 경우 28%, 15°의 경우 35% 감소하였다. 또한 강섬유 body의 길이가 24 mm일 때보다 강섬유 body가 36 mm이고 강섬유를 이루는 각이 75°일 때 약 17% 감소하였으나 60°, 45°, 30°, 15°의 경우는 최대 인발응력은 감소율이 미미하게 나타났다.

그림 8은 형상에 따라 강섬유 Embedded각(발각도)을 45°로 변화 시킨 경우에 대표적인(Hook각=45°) 수치해석의 결과를 나타낸 것이다.

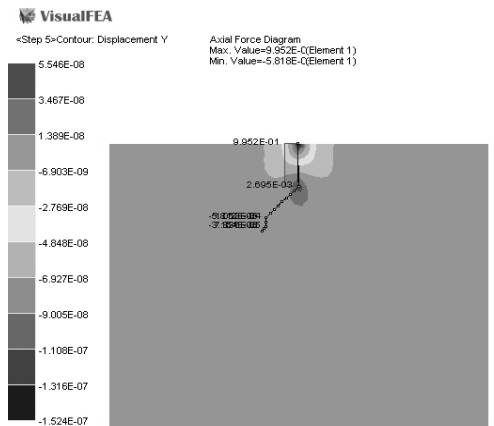
그림 9은 인발각도가 45°인 경우 강섬유 형상에 따른 수치해석 결과를 나타낸 그래프이다. 그림 9(a)는 강섬유 body의 길이가 12 mm일 때 강섬유형상에 따라 인발력을 비교한 그래프로 형상의 각도가 75°일 때 경우 최대 인발력을 나타냈으며 형상의 각도가 60°일 때 인발력은 약 16% 감소하였다. 또한 45°의 경우 약 22%, 30°의 경우 약 25%, 15°의 경우 약 30% 인발력이 감소하였다. 그림 9(b)는 강섬유 body의 길이가 24 mm일 때의 강섬유형상에 따라 인발력을 비교한 그래프로 강섬유형상의 각도가 75°일 때 최대 인발력을 나타냈으며 형상의 각도가 60°일 때 약 6% 감소하였다. 또한 45°의 경우 약 12%, 30°의 경우 약 17%, 15°의 경우 약 18% 인발력이 감소하였다. 그림 9(c)는 강섬유 body의 길이가 36 mm일 때의 인발력을 비교한 그래프로 최대인발력 또한 강섬유형상의 각도가 75°일 때 나타났다. 그림



(a) Body길이 = 36 mm, Hook각 = 45°

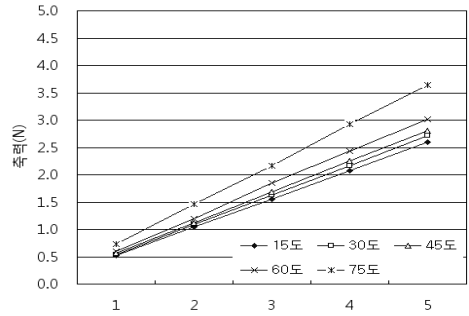


(b) Body길이 = 24 mm, Hook각 = 45°

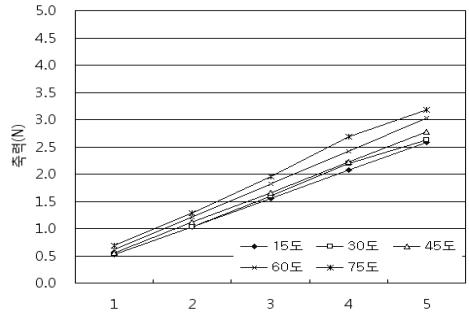


(c) Body길이 = 12 mm, Hook각 = 45°

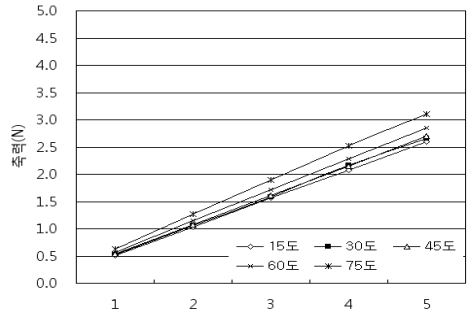
그림 8. 강섬유 Body 길이별 대표수치해석
 (강섬유 Embedded각 = 45°, Hook각 = 45°인 경우)



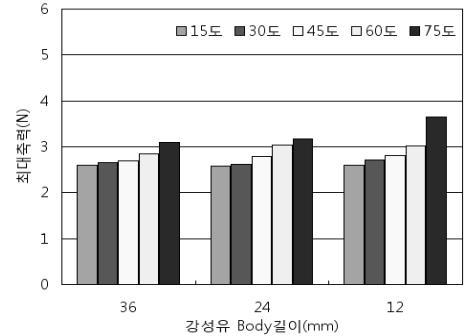
(a) 12 mm



(b) 24 mm



(c) 36 mm



(d) 강섬유 형상에 따른 최대인발력

그림 9. 수치해석 결과(강섬유 Embedded각 = 45°)

9(d)는 강섬유 형상별 최대 인발응력을 나타낸 그래프로 강섬유 body의 길이가 12 mm일 때 보다 강섬유 body가 24 mm이고 형상을 이루는 각이 75°의 경우 약 12% 감소하였으며 60°, 45°, 30°, 15°의 경우 최대인발응력은 감소율이 미미하게 나타났다. 또한 강섬유 body의 길이가 24 mm일 때보다 강섬유 body가 36 mm일 때 모든 형상에서 최대인발력은 감소하였으나 감소율은 미미하게 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 새로운 형태의 강섬유를 개발하기 위한 기초적 시험으로 새로운 형태의 강섬유를 제작하고 강섬유의 강섬유용 특수인발시험을 실시하였다. 또한 기존의 강섬유와 개발된 강섬유를 수치해석을 통하여 비교분석하였으며 이로부터 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

1. 인발시험을 통하여 기존의 Hooked ends형 강섬유와 hook각도를 변화시켜 인발력을 분석한 결과, 이루는 각이 75°일 경우 가장 큰 인발력을 나타냈으며 수치해석에서도 가장 큰 인발력을 나타냈다. 또한 Hook ends형 강섬유 Body의 길이를 변화시켜 인발시험을 실시한 결과 기존의 36 mm보다 12 mm에서 큰 인발력을 나타냈으며 수치해석에서도 같은 결과를 나타냈다.
2. 강섬유의 Embedded각 즉, 인발각도(0, 45°)에 따른 인발시험을 실시한 결과 인발각도(0°)에서 Hook각도가 75°이고 강섬유 Body의 길이가 12 mm일 때 가장 큰 인발력을 나타냈으며 또한 시험과 수치해석결과에 따른 강섬유의 거동도 유사하게 나타났다.

본 연구에서는 강섬유의 인발시험을 통해서 기존의 Hook

ends형 강섬유와 Hook각도와 강섬유 body 길이를 변화시킨 새로운 형상을 갖는 강섬유의 거동을 비교 분석하였다. 분석결과 실내시험과 수치해석에서 강섬유의 Hook 각도와 body 길이에 따라 기본적으로 동일한 양상을 보이나 인발력 거동이 서로 다르다는 것을 확인 할 수 있었다. 추후 이 실험 결과를 바탕으로 휨실험, 압축강도실험 등을 실시하고 국내 현장상황에 맞는 강섬유 형상을 도출하는 연구가 필요할 것으로 판단되어진다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 “신개념 고성능 터널지보 시스템 이론 및 지보재료 개발에 대한 연구”(과제번호: 2010-0000251) 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 손영현, 박우진(1998), 강섬유보강 숏크리트의 역학적 특성 및 경제성 평가, 한국안전학회지, 제13권 제2호, pp. 122~129.
2. 백신원, 김동백(1996), 강섬유보강 숏크리트에 관한 실험적 연구, 대한토목학회논문집, Vol. 16, No. 1-3, pp. 217~226.
3. Chanvillard, G., Aitcint, P. C. (1996), Pull-out behavior of corrugated steel fibers, Advanced Cement Based Materials, Vol. 4, pp. 28~41.
4. Hadjis, N., Piggott, M. R. (1997), The effect of matrix stresses on fibre pull-out forces, Journal of Materials Science, Vol 24, pp. 358~364.
5. Marchese, B., Marchese, G. (1993), Fibre pullout-microstructural relationships for cementitious mortars, Journal of Materials Science, Vol. 12, pp. 1592~1595.
6. Robins, P., Austin, S., and Jones, P. (2001), Pull-out behaviour of hooked steel fibres, Materials and Structures, Vol 35, pp. 434~442.

접수일(2011.1.10), 수정일(2011.1.20), 게재확정일(2011.1.27)