

-shotcrete 모사 콘크리트 공시체에 혼합된 강섬유의 분산도가 휨강도 및 인성에 미치는 영향

Effect of Steel-fiber Distribution on Flexural Strength and Toughness of Shotcrete-mimicked Concrete Specimen

박 성 식¹ Park, Sung-Sik

김 상 중² Kim, Sang-Jung

Abstract

A 5-20 cm thick shotcrete has been routinely constructed for NATM tunneling method to stabilize and confine the excavated rock of tunnel construction site. A 40 kg/m³ of steel fibers are usually mixed into such shotcrete but these steel fibers may not be evenly distributed depending on shotcrete machines, mixing ratios and excavated rock conditions. In this study, square column shotcrete-mimicked concrete specimens of 15 cm × 15 cm × 55 cm were prepared with 5 equal layers and 5 or 20% cement ratio. The specimens were prepared with different reinforced- patterns: non-reinforced, middle layer-reinforced, 1, 3, and 5 layers-reinforced, or all layers reinforced. The specimens were air-cured for 7 days and tested for flexural strength. The influence of steel-fiber distribution on flexural strength and toughness of shotcrete-mimicked concrete specimens was investigated. In the case of a specimen with cement ratio of 20%, a flexural strength increased as a number of fiber-reinforced layer increased. The flexural strength of one-layer reinforced specimen showed 20% less than that of evenly fiber-distributed specimen. On the other hand, a specimen with cement ratio of 5% decreased as the number of fiber-reinforced layers increased. A toughness index increased as the number of fiber-reinforced layers increased, regardless of cement ratios. The toughness index of evenly fiber-distributed specimen showed 2-3 times as large as that of one-layer reinforced specimen.

요 지

NATM공법을 이용한 터널 시공에서 초기에 원지반을 구속시키고 암반과의 일체화를 통해 터널의 안정성을 확보하기 위해 통상 5-20cm 두께의 shotcrete를 시공하며 여기에는 강섬유가 40kg/m³ 정도 포함되도록 설계하고 있다. shotcrete 내에 혼합된 강섬유는 shotcrete를 뽑아 내는 장비 특성, 혼합비 그리고 현장 암반 상태에 따라 shotcrete 내 강섬유가 골고루 분산될 수도 있고 그렇지 않을 수도 있다. 본 연구에서는 단면이 15cm × 15cm이고 길이 55cm인 사각기둥 모양의 시멘트 혼합비가 5% 또는 20%인 공시체를 3cm씩 다섯 층으로 나누어 강섬유를 혼합하지 않거나, 중간층만 혼합하거나, 1, 3, 5층만 혼합하거나, 전층을 혼합한 네 종류의 shotcrete를 모사한 콘크리트 공시체를 제작하였다. 7일 동안 공시체를 대기중 양생한 다음 휨강도시험을 실시하여 층별로 강섬유가 분산되거나 집중될 경우 휨강도와 인성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 시멘트 혼합비가 20%인 경우 강섬유 혼합층이 증가할수록 휨강도는 증가하였으며, 동일한 양의 강섬유가 골고루 분산되지 않고 한 곳으로 집중될 경우 휨강도가 20% 정도 감소하였다.

1 정회원, 경북대학교 공과대학 건축토목공학부 토목공학전공 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ., Tel: +82-53-950-7544, Fax: +82-53-950-6564, sungpark@knu.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 경북대학교 공과대학 건축토목공학부 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

한편 시멘트 혼합비가 5%로 낮은 경우에는 강섬유 혼합층이 증가할수록 오히려 휨강도는 감소하였다. 시멘트 혼합비에 관계없이 강섬유 혼합층이 증가할수록 인성지수는 점점 증가하는 경향을 보였으며, 강섬유가 중간층으로 집중된 경우보다 골고루 분산된 경우 인성지수는 2-3배 정도 증가하였다.

Keywords : Steel fiber, Shotcrete, Flexural strength, Toughness index, Distribution

1. 서론

국내 터널 시공 시에 주로 사용되는 NATM(New Austrian Tunneling Method)공법에서는 터널 굴착 후에 1차 지보재인 슛크리트와 록볼트로 암반의 붕락이나 터널의 초기 안정성을 확보한다. 슛크리트는 터널의 2차 지보라 할 수 있는 라이닝을 시공하기 전에 터널의 안정성을 확보하기 위한 수단으로 시공되고 있으며, 암반의 이완에 따른 하중을 지지하는 역할을 하게 된다. 이와 같이 터널 천공 초기에 암반의 안정성을 확보하는 수단으로 사용되는 슛크리트는 일반적으로 강섬유를 혼합하여 천공된 벽면에 뿔어 붙이게 된다. 강섬유 혼합 슛크리트는 팽창성 점토질 지반, 암반파열 혹은 압축이 발생하는 조건에서 발생하는 지반하중을 분산시키고 굴착면을 안정시키기 위해 주로 사용된다. 한편 터널 벽면에 뿔어 붙인 슛크리트 내에 포함된 강섬유는 기계 자체의 특성이나 암반 벽면, 슛크리트의 배합비 등의 영향으로 슛크리트 내 강섬유가 한 곳으로 집중될 수 있다. 이와 같은 현상이 발생할 경우에 슛크리트의 휨강도 또는 인성의 감소나 불균질성으로 구간에 따라 균열이나 누수 등으로 인한 낙석이 발생할 수도 있다.

모래와 같은 사질토를 시멘트로 고결시킬 경우 시멘트 혼합도의 인장력 부족을 보완하기 위해 PE(폴리에틸렌), PVA(Polyvinyl alcohol)와 같은 다양한 섬유를 혼합하는 경우가 있으며, Park et al.(2007)은 이와 같은 시멘트 혼합토에 포함된 섬유의 분산 정도에 따른 일축압축강도의 불확실성에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 시멘트 혼합토에 포함된 섬유의 분산 정도에 따라 일축압축강도가 최대 30%까지 저하될 수 있다는 연구 결과를 발표하였다. 한편 콘크리트도 인장력 증진을 위해 콘크리트 내에 강섬유, PVA와 같은 다양한 섬유를 혼합한 연구 사례(Ravindrarah and Tam, 1984; Kim and Kim, 2000; Song et al., 2005; Altun et al., 2007; Dawood and Ramli, 2010)가 있으며, Kang et al.(2008)과 Akkaya et al.(2000)와 같은 연구자는 슛크리트 내에 포함된 섬유

의 방향성이나 분포성이 슛크리트의 휨강도에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 하지만 이렇게 포함된 강섬유의 분산이나 집중 정도가 공시체의 휨강도에 어떤 영향을 미치는 지에 대한 연구 사례는 여전히 부족한 상황이다. Barton et al.(1992)은 슛크리트의 공학적 특성과 관련하여 지반의 변위가 크게 발생할 우려가 있을 경우에는 슛크리트의 휨강도(flexural strength)와 인성지수(toughness index)가 중요한 요소로 고려되며, 지반의 변위가 작은 경우에는 슛크리트의 압축강도가 가장 중요한 요소가 된다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 터널 굴착 후 지반의 변위가 크게 발생할 수 있는 굴착 표면에 뿔어 붙이는 슛크리트에 포함된 강섬유의 분산이나 집중 정도가 강섬유 혼합 슛크리트의 휨강도와 인성에 미치는 영향을 사각기둥 모양의 슛크리트를 모사한 콘크리트 공시체를 이용한 휨강도시험을 실시하여 연구하였다.

2. 공시체의 휨강도시험

2.1 휨강도시험법

콘크리트보에 휨모멘트를 가하여 파괴시켜 인장 측에 생기는 휨강도를 구하는 휨강도시험법(KS F 2408, 2000)에 따라 실험을 실시하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용한 휨강도 시험기의 모식도와 사진이며, 직사각형 모양의 보를 시험기에 올려 놓고 3등분점 재하방식으로 상부에서 공시체가 파괴될 때까지 서서히 하중을 가하는 방식이다. 공시체 몰드의 규격은 15cm × 15cm × 55cm의 각주체를 사용하였다. 휨강도는 파괴위치에 따라 다음 각 식으로 계산하여 유효숫자 세 자리까지 구한다. 먼저, 공시체가 인장측 표면 지간방향 중심선의 3등분점 사이에서 파괴되었을 경우에 휨강도 f_b 는 다음 식(1)과 같이 구할 수 있다.

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

여기서, P: 시험기가 표시하는 최대하중; L: 표점거리 (지간); b: 파괴단면의 폭; h: 파괴단면의 높이이다. 공시체가 지간의 3등분점 바깥쪽에서 파괴되고, 또한 3등분점에서 파괴단면과 중심선이 교차하는 점까지의 거리가 지간의 5% 이내인 경우 휨강도 f_b 는 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$f_b = \frac{3Pa}{bh^2} \quad (2)$$

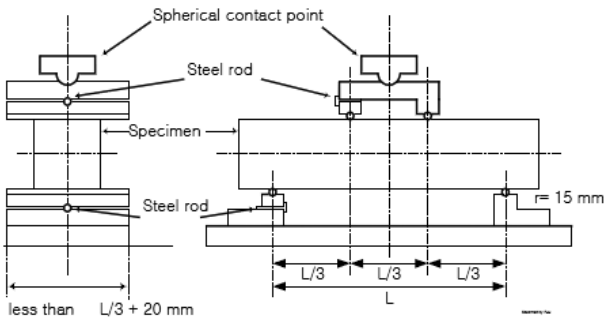
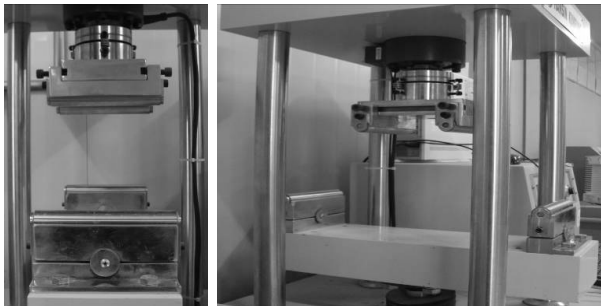


Fig. 1. Schematic diagram of test setup for flexural strength

여기서, a: 파괴단면과 이것에 가까운 쪽 바깥지점과의 거리를 인장표면에서 지간방향으로 두 곳 측정하는 것의 평균값으로, 소수점 이하 첫째 자리에서 끝맺음한다.

2.2 휨강도 공시체 제작방법

숏크리트를 모사한 콘크리트 공시체 제작에 사용한 모래는 대구 낙동강지역에서 채취한 모래로 비중이 2.6이며 입도분포는 0.15mm에서 2.50mm 사이이다. 본 연구에서 사용한 강섬유는 Fig. 2와 같이 Ends Hook Type 형상으로 규격은 직경 0.5mm, 길이 30mm의 형상을 하고 있다. 터널표준시방서(Korean Tunnelling and Underground Space Association, 2009)에는 숏크리트 1m³당 40kg의 강섬유를 혼입하도록 돼 있으며, 터널 공사 현장에서 사용되고 있는 숏크리트 배합비는 Table 1과 같다. 본 연구에서는 숏크리트에 포함되는 강섬유의 분산 정도가 휨강도에 미치는 영향에 대하여 연구하기 위해 Table 1과 같은 현장 숏크리트 배합비를 참조한 다음 모래, 시멘트, 물 및 강섬유를 혼합하여 숏크리트를 모사한 공시체를 제작하였다. 한편 시멘트 혼합비는 손비빔 시에 발생하는 시멘트 뭉침과 분리현상을 최소화하기 위하여 Table 1에서 제시한 30%보다 낮은 5%와 20%를 사용하였다. 먼저 물과 시멘트를 혼합한 후 모래를 투입할 경우 재료 뭉침현상이 발생되므로, 건조한 모래와 시멘트를 손비빔으로 골고루 혼합하였다. 건조

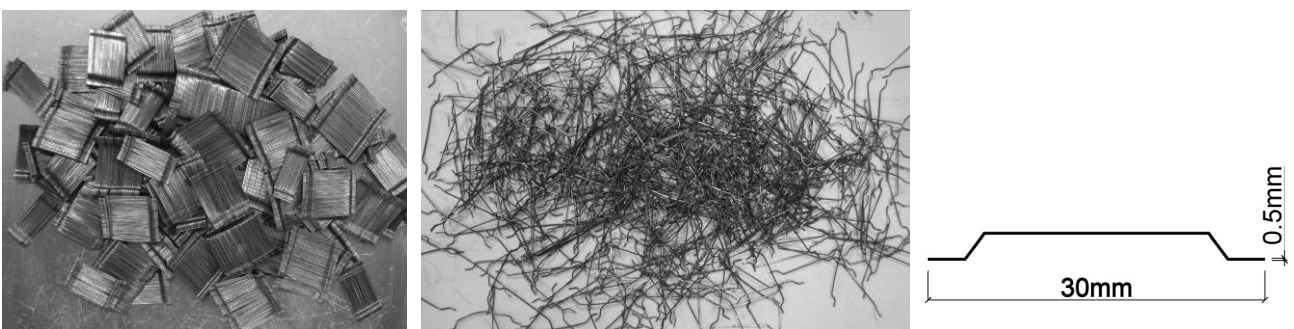


Fig. 2. Steel fibers: before and after separation, shape of single fiber

Table 1. Shotcrete mixing design

Design strength	Max size of coarse aggregate	Slump	Air content	Material per 1 m ³ concrete					
				Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Super-plasticizer	Steel fiber
MPa	mm	mm	%	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
4.5	10	80	2.5	218	477	943	654	4.77	40

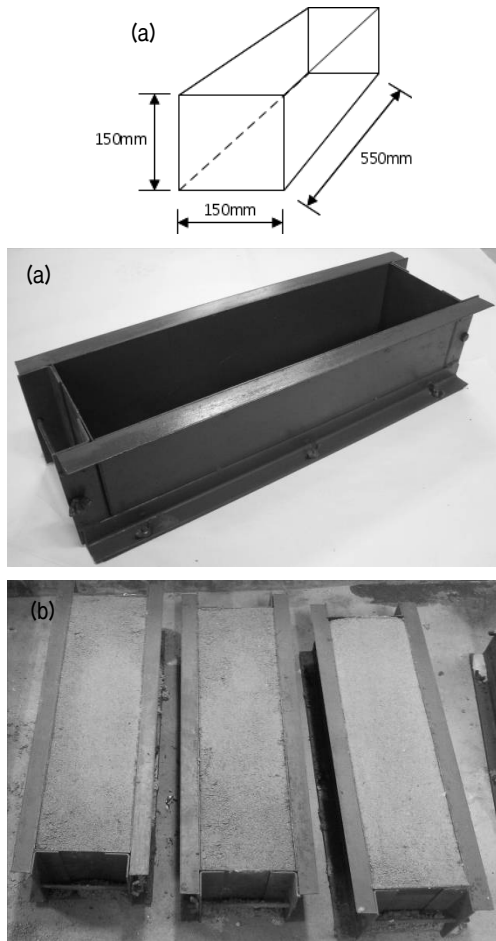


Fig. 3. Test specimens: before and after preparation

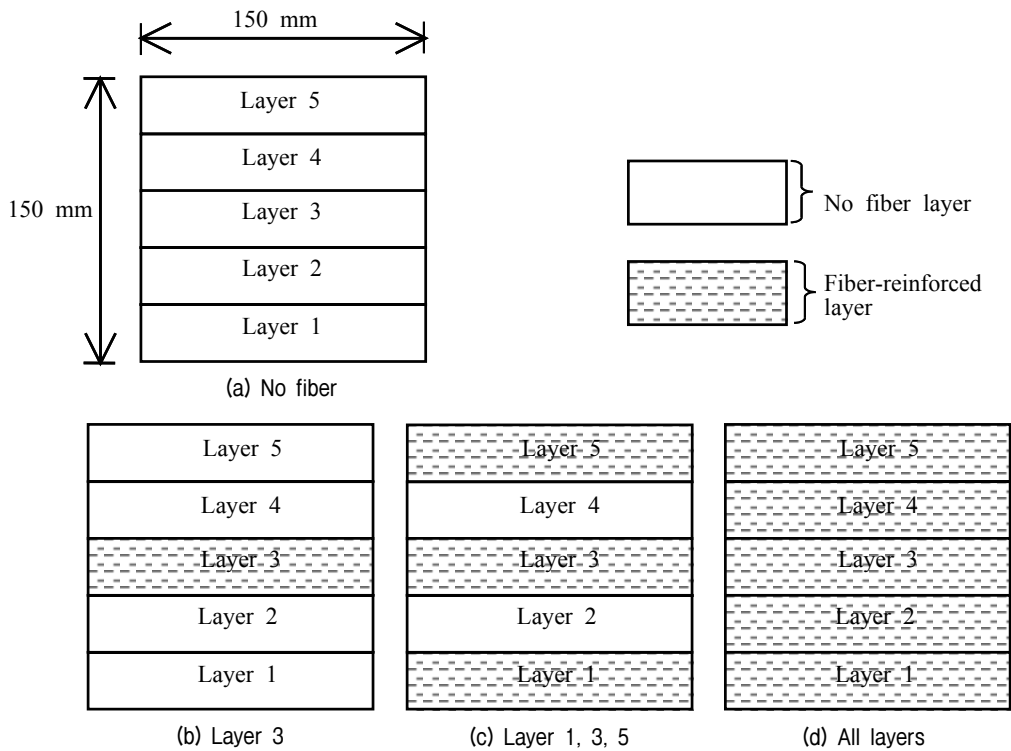


Fig. 4. Reinforcement types of steel fibers

모래 14% 중량에 해당하는 물에 강섬유를 넣어서 강섬유를 결합하고 있는 풀을 녹여 분산시킨다. 최종적으로 강섬유가 혼합된 물을 건조한 모래와 시멘트를 혼합한 재료에 넣고 손비빔하여 재료 뭉침과 분리현상을 최소화하였다.

일반적으로 고압으로 분사되는 공기를 이용하여 슛크리트를 타설하지만, 본 연구에서는 실험 상 편의를 위해 다짐방법으로 공시체를 제작하였다. 즉, 배합한 시료를 Fig. 3(a)와 같은 공시체에 층별 3cm 높이로 5층으로 나누어 2.5kg 다짐용 램머를 이용하여 램머를 자유낙하하지 않고 위쪽에서 아래쪽 정지점까지 내려서 견고하게 층당 25회 다짐하여 Fig. 3(b)와 같이 공시체를 제작하였다. 다진 후 구멍이 남지 않도록 주의하여 각 층을 골고루 같은 방법으로 다짐하였으며, 제작된 공시체는 7일 동안 대기 중에서 양생시켰다.

스utc리트 모사 콘크리트 공시체의 종류는 층별로 동일한 양의 강섬유를 혼합한 경우인 L(Layer) 시리즈와 공시체 전체에 동일한 양의 강섬유를 혼합한 T(Total) 시리즈로 구분된다. 시멘트 혼합비가 5%인 경우에는 L 시리즈만 제작하여 실험하였으며, 시멘트 혼합비가 20%인 경우에는 L 시리즈와 T 시리즈 모두 제작하여 실험하였다. 공시체 내 강섬유의 분산도는 Fig. 4(a)와 같이

혼합하지 않은 경우, Fig. 4(b)와 같이 3층(중간층)만 혼합한 경우, Fig. 4(c)와 같이 1, 3, 5층만 혼합한 경우, 그리고 Fig. 4(d)와 같이 전층을 모두 혼합한 경우로 나눌 수 있다.

3. 휨강도시험 결과

Table 2와 3에 정리한 시멘트 혼합비 5%와 20%인 7

일 양생한 공시체를 휨강도와 인성지수를 측정할 수 있는 휨인성시험기를 사용하여 1mm/min의 속도로 휨강도를 시험하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

3.1 시멘트 혼합비 5%인 공시체의 휨강도 특성

동일한 공시체를 3개씩 제작하여 실험하였으며, 그 중 차이가 큰 경우를 제외한 두 경우에 대한 평균값을

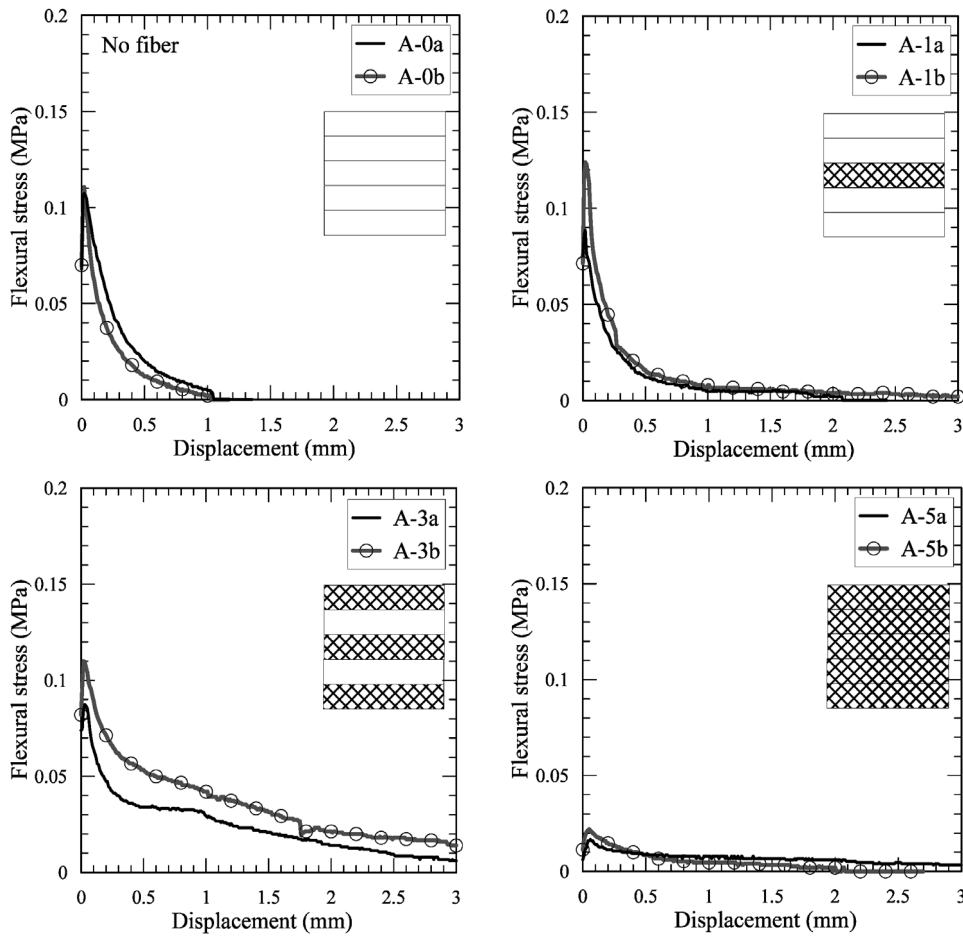


Fig. 5. Stress-displacement curves of specimens with cement ratio 5%

Table 2. Results of flexural strength tests on specimens with cement ratio 5%

Specimen	Reinforced layer	Total fiber ratio (%)	Layer fiber ratio (%)	Flexural strength (MPa)	Mean flexural strength (MPa)	Toughness index (%)	Mean Toughness index (%)
A-0a	No fiber	No fiber	No fiber	0.107	0.109	4.9	4.6
A-0b				0.111		4.3	
A-1a	Layer 3	0.20	0.20	0.089	0.107	9.3	9.7
A-1b				0.124		10.1	
A-3a	Layer 1, 3, 5	0.60	0.20	0.087	0.099	27.7	29.2
A-3b				0.110		30.7	
A-5a	All layers	1.00	0.20	0.017	0.020	34.8	32.5
A-5b				0.022		30.3	

본 결과 분석에 사용하였다. Table 2는 시멘트 혼합비가 5%인 공시체를 대상으로 실시한 휨강도시험 결과로 평균 휨강도를 비교하고 있다. 휨강도는 파괴형태에 따라 식 (1) 또는 (2)를 사용하여 계산한다. 본 시험에서는 공시체의 파괴위치가 공시체 인장쪽 표면 지간방향 중심선의 3등분점 사이에서 파괴되어 식 (1)을 사용하였다. Fig. 5는 강섬유의 혼합형태가 다른 각각의 공시체에 대한 휨응력-변위 곡선을 비교하고 있다. 재하 초기 미소 변형에서 응력이 급작스럽게 증가하면서 0.1mm 이내에서 대부분 최대 응력에 도달하였다. 한편 급작스런 응력 증가로 초기 미소변형에서의 응력값을 측정하기 어려웠다.

강섬유를 혼합하지 않은 경우와 일부 혼합한 경우의 휨강도는 대부분 0.1MPa로 서로 크게 차이가 나지 않았다. 특히 강섬유가 혼합된 층의 개수가 증가할수록 휨강도가 증가하기 보다는 오히려 조금씩 감소하는 경향을 보였으며, 전층에 강섬유를 혼합한 경우에는 혼합하지 않은 경우보다 오히려 5배 정도 휨강도가 감소하였다. 시멘트 혼합비가 낮을 경우 시멘트 수화반응으로 생성되는 수화물이 충분치 않아 혼합되는 강섬유가 공시체 내 입자들을 분리시켜 결국 시멘트 모르타르의 결합력을 오히려 약화시키므로 이로 인하여 강섬유 혼합층이 증가할수록 휨강도는 감소하는 경향을 나타낸 것으로 판단된다.

Fig. 6은 휨강도시험의 공시체의 재하 모습을 나타내고 있으며, 수직방향으로 직선에 가깝게 파괴되는 현상이 발생한 것을 볼 수 있다. 강섬유 혼합층이 증가하더라도 시멘트 혼합비가 낮은 경우에는 시멘트 모르타르의 수화작용에 의한 수화물 부족으로 강섬유와의 결합력이 저하되어 휨강도시험에 의한 공시체의 파괴형태는 직선에 가깝게 부러지는 듯한 파괴가 발생한 것으로 판단된다.

3.2 시멘트 혼합비 20%인 공시체의 휨강도 특성

시멘트 혼합비가 20%인 공시체의 경우도 동일한 공시체를 3개씩 제작하여 실험하였으며, 그 중 차이가 큰 경우를 제외하고 두 경우에 대한 평균값을 본 휨강도 분석에 사용하였다. Fig. 7과 8은 섬유가 포함되지 않은 경우를 포함하여 L 시리즈와 T 시리즈의 휨응력-변위 관계를 비교하고 있다. Fig. 7에서와 같이 휨응력이 급작스럽게 증가하다가 휨응력이 최대값에 도달한 이후 강섬유가 포함되지 않은 경우에는 응력이 급작스럽게 감소하지만 강섬유가 포함된 경우에는 서서히 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고 강섬유 혼합층이 증가함에 따라 휨강도의 크기도 증가하는 것을 볼 수 있다.

먼저 강섬유가 포함되지 않은 경우 휨강도는 약 1MPa 정도로 가장 낮은 값을 보였다. L 시리즈와 T 시리즈 모두 강섬유의 혼합층이 증가함에 따라 휨강도는 증가하는 경향을 보였다. L 시리즈의 경우 중간층(Layer 3)만 혼합된 경우에는 1.049MPa, 3개 층(Layer 1,3,5)이 혼합된 경우 1.166MPa이며 모든 층(All layers)이 혼합된 경우 1.399MPa이었다. T 시리즈의 경우는 중간층만 혼합된 경우 1.168MPa, 3개 층이 혼합된 경우 1.242MPa, 모든 층이 혼합된 경우 1.445MPa이었다. T 시리즈에서는 공시체 전체에 동일한 양의 강섬유가 사용되었지만 강섬유가 골고루 분산된 경우(T-5)보다 중간층에만 집중된 경우(T-1)에 약 20% 정도의 강도 감소가 발생하였다. L 시리즈와 T 시리즈를 비교할 경우에 혼합형태(보강층)가 동일한 경우에는 강섬유의 혼합량이 높은 T 시리즈의 휨강도가 높았다.

Fig. 9는 휨강도시험 후의 공시체 모습을 보여준다. 공시체는 실험 시작부터 응력이 최대값이 도달할 때까지 균열 및 파괴 징후를 발견할 수 없었고, 응력이 최대값에 도달한 이후 서서히 균열이 생기기 시작하며 Fig. 9와 같이 파괴가 일어났다. 시멘트 혼합비가 높은

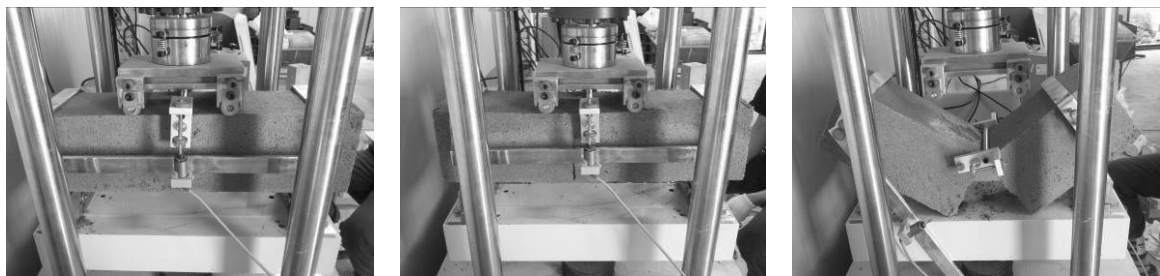


Fig. 6. Specimen images during testing (start loading, crack initiation, failure)

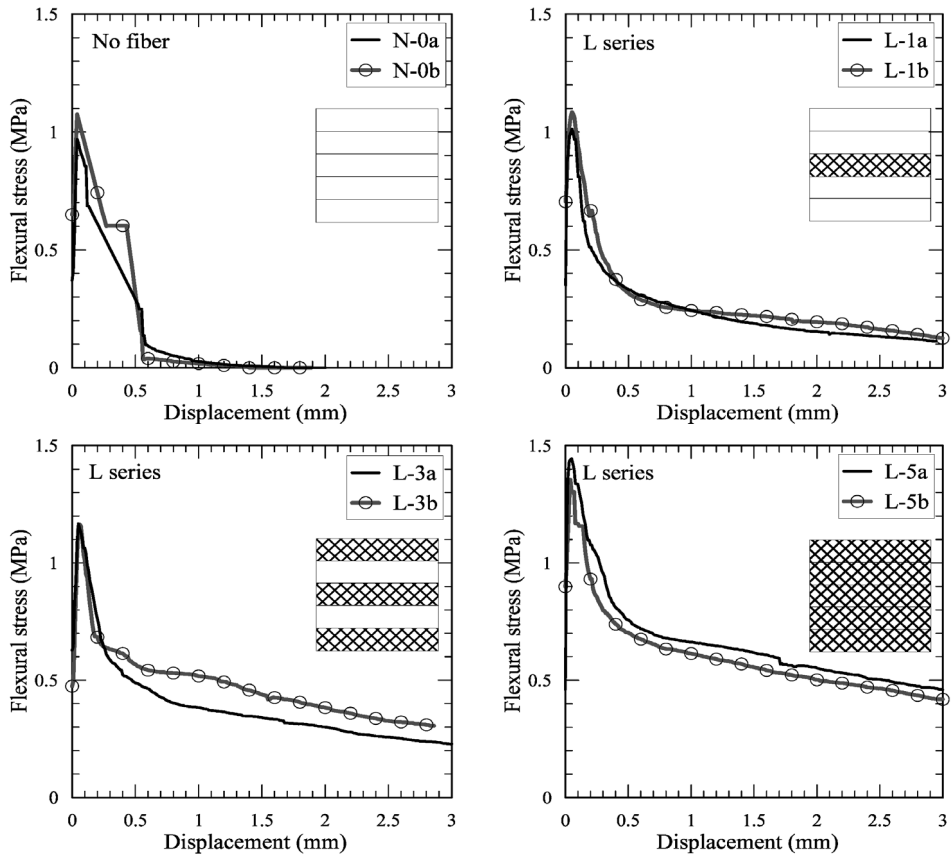


Fig. 7. Stress-displacement curves of L series specimens with cement ratio 20%

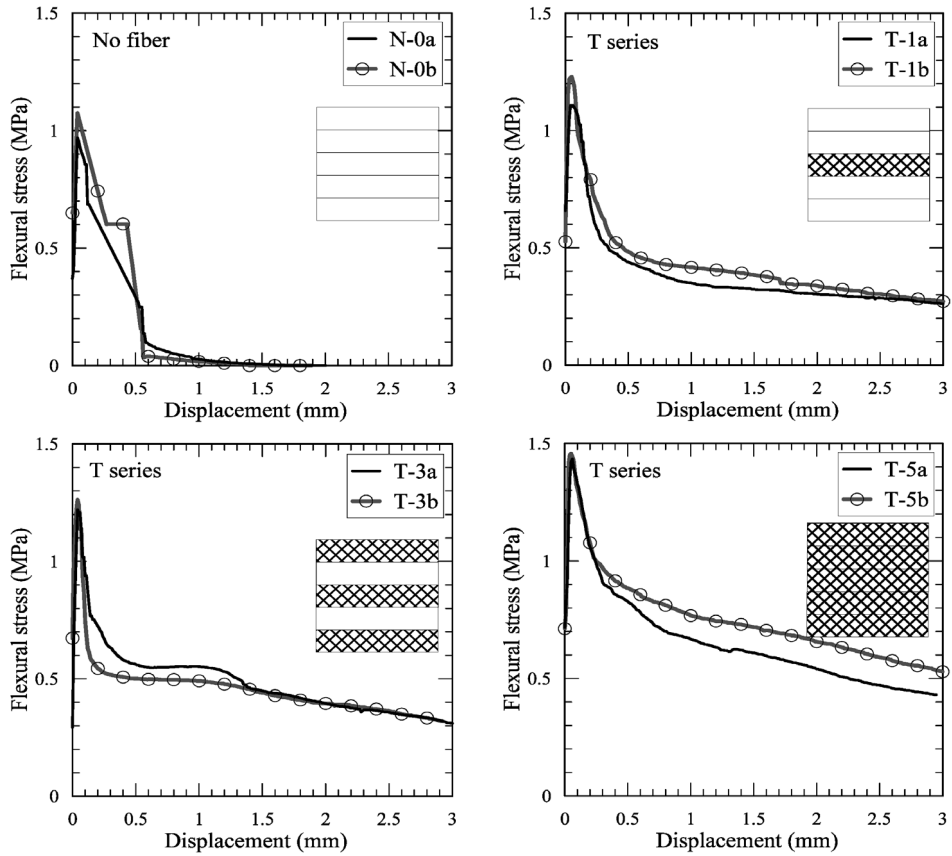


Fig. 8. Stress-displacement curves of T series specimens with cement ratio 20%

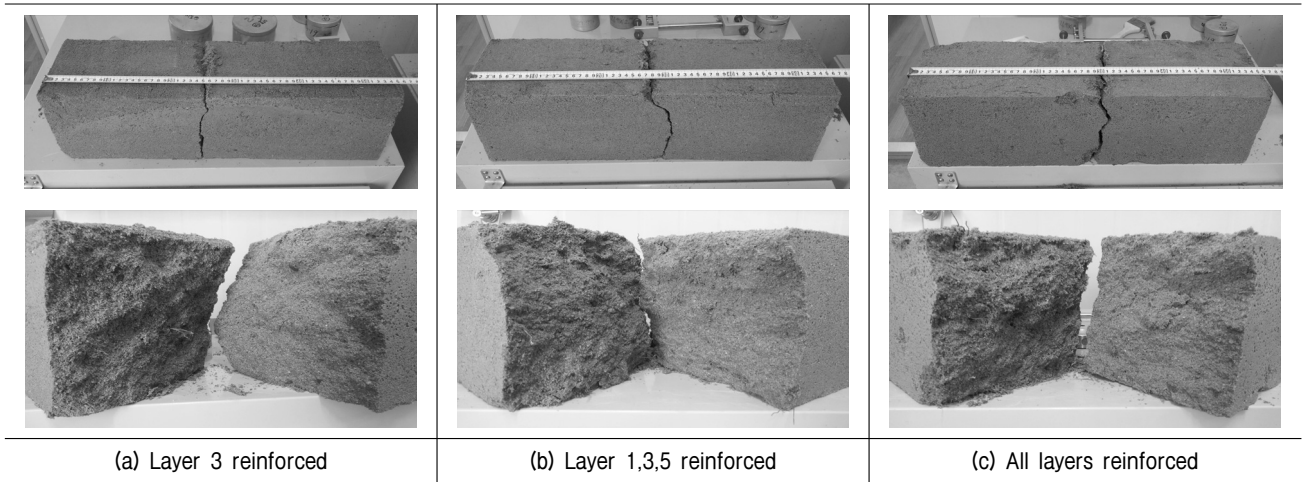


Fig. 9. Specimens before and after testing

경우에는 시멘트 모르타르의 수화작용에 의한 수화물 증가로 강섬유와의 결합력이 증가되어 공시체의 파괴 형태는 강섬유가 투입된 부분에서 강섬유에 인장력이 전달되어 구불구불한 형태로 파괴가 발생한 것으로 판단된다.

3.3 공시체의 인성 비교

등가휨강도는 강섬유 보강 슛크리트의 휨인성과 관계되는 값으로 최대하중에 도달한 후 일정한 변위까지의 휨인성계수로서 평균강도의 개념을 가진다(Kim and Kim, 2000). 등가휨강도 f_c 는 시편의 규정 처짐으로 $L/150$ 이 될 때까지의 휨인성 T_b 를 사용하여 식 (3)과 같이 계산된다. 식 (1) 또는 (2)로부터 계산된 휨강도와 식 (3)의 등가휨강도의 비인 식 (4)를 인성지수 R_e (Toughness index)라 한다. 한국도로공사(Korean Expressway Corporation, 2012) 고속도로 전문시방서(Highway Construction Guide Specification) 기준에 의하면, 재령 28일 휨강도 4.5MPa 및 휨인성을 나타내는 등가휨강도는 3.0MPa 이상이어야 하며, 인성지수는 휨강도에 대한 상대기준으로 68% 이상의 조건을 요구하고 있다.

$$f_c = \frac{T_b}{L/150} \times \frac{L}{bh^2} \quad (3)$$

$$R_e = \frac{f_c}{f_b} \quad (4)$$

여기서, T_b : 지간거리(L)의 1/150까지의 변위와 하중이

차지하는 면적이다.

휨강도시험으로부터 계산된 인성지수는 Table 2와 3에 정리하였으며, 강섬유의 혼합층이 증가할수록 인성지수는 증가하는 경향을 보였으며, 시멘트 혼합비에 따라 정리하면 다음과 같다.

3.3.1 시멘트 혼합비 5%인 공시체의 인성 특성

Table 2에 비교한 시멘트 혼합비가 5%인 공시체는 강섬유 혼합층이 증가할수록 휨강도는 감소하는 경향을 보였으나, 잘 갈라지거나 깨지지 않는 성질을 나타내는 인성지수는 오히려 증가하는 경향을 보였다. 강섬유가 혼합되지 않은 경우 평균 인성지수는 4.6%이며, 중간층만 혼합된 경우에는 9.7%, 3개 층이 혼합된 경우에는 29.2%, 모든 층이 혼합된 경우에는 32.5%이었다. 이는 시멘트 혼합비가 낮을 경우에는 수화반응으로 생성되는 수화물이 충분하지 않아서 휨강도는 감소하는 경향을 보였으나, 휨파괴가 발생된 이후 공시체가 완전히 절단되어 부러질 때까지 강섬유의 잔류 결합력으로 강섬유의 혼합층이 증가할수록 인성지수는 상대적으로 증가하는 경향을 보인 것으로 판단된다. 한편 강섬유가 중간층에만 집중된 경우보다 강섬유가 모든 층에 골고루 분산될 경우 3배 정도의 인성이 증가하였다.

3.3.2 시멘트 혼합비 20%인 공시체의 인성 특성

Table 3에 비교한 시멘트 혼합비가 20%인 공시체는 L 시리즈와 T 시리즈 모두 강섬유가 혼합된 층의 개수가 증가할수록 휨강도가 증가하면서 인성 또한 증가하는 경향을 보였다. 강섬유가 혼합되지 않은 경우 인성은

Table 3. Results of flexural strength tests on specimens with cement ratio 20%

	Specimen	Reinforced layer	Total fiber ratio (%)	Layer fiber ratio (%)	Flexural strength (MPa)	Mean flexural strength (MPa)	Toughness index (%)	Mean Toughness index (%)
No fiber	N-0a	No fiber	No fiber	No fiber	0.969	1.022	5.9	6.3
	N-0b				1.075		6.7	
L series	L-1a	Layer 3	0.20	0.20	1.013	1.049	25.6	25.2
	L-1b				1.085		24.7	
	L-3a	Layer 1, 3, 5	0.60	0.20	1.168	1.166	35.1	37.2
	L-3b				1.164		39.3	
	L-5a	All layers	1.00	0.20	1.444	1.399	53.9	51.7
	L-5b				1.355		49.5	
T series	T-1a	Layer 3	1.00	1.00	1.107	1.168	29.3	28.5
	T-1b				1.229		27.7	
	T-3a	Layer 1, 3, 5	1.00	0.33	1.220	1.242	42.2	40.5
	T-3b				1.263		38.7	
	T-5a	All layers	1.00	0.20	1.433	1.445	51.3	53.3
	T-5b				1.457		55.2	

약 6% 정도이었으며, L 시리즈의 경우 강섬유가 중간층만 혼합된 경우에는 25.2%, 3개 층이 혼합된 경우에는 37.2%, 모든 층이 혼합된 경우에는 51.7%이었다. T 시리즈의 경우 강섬유가 중간층만 혼합된 경우에는 28.5%, 3개 층이 혼합된 경우에는 40.5%, 모든 층이 혼합된 경우에는 53.3%이었다. 이 값들은 모두 한국도로공사 (Korean Expressway Corporation, 2012)에서 요구하는 인성지수 68%에 미치지 못하였으며, 이것은 공시체를 수중양생(온도 20±2℃)이 아닌 대기중 양생을 실시하고 양생일 수가 7일로 짧았던 것이 가장 큰 원인으로 판단된다.

L 시리즈와 T 시리즈를 비교한 결과 강섬유의 혼입량이 높을수록 높은 값의 인성을 나타내었으며, 강섬유가 모든 층에 골고루 분산된 경우에는 중간층에 집중된 경우보다 약 2배 정도의 인성이 증가하였다. 이는 시멘트 혼합비가 높은 경우에는 수화반응으로 생성되는 수화물 증가로 강섬유와의 결합력이 증가되어 휨강도 증가와 함께 인성 또한 증가하는 경향을 보인 것으로 판단된다.

4. 결론

NATM공법으로 시공되는 터널 현장에서 굴착 벽면에 뿔어 붙이는 강섬유 보강 슛크리트에 포함된 강섬유는 골고루 분산되지 않고 특정한 곳으로 집중될 수 있다. 슛크리트 배합 시 강섬유 함유량에 대한 기준이 정

해져 있으나 터널 벽면에 타설한 후에 함유량 확인은 어려운 상황이다. 본 연구에서는 이와 같이 슛크리트 내 강섬유가 골고루 분산되지 않은 경우 강섬유의 분산 정도가 슛크리트 휨강도와 인성에 어떤 영향을 미치는지 연구하였다. 15cm 높이의 직사각형 모양의 휨강도 공시체를 5층으로 나눈 다음 강섬유의 혼합층을 달리하여 슛크리트 모사 콘크리트 공시체를 제작한 다음 휨강도 시험을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 시멘트 혼합비가 5%로 낮을 경우에는 강섬유의 혼합이 오히려 공시체의 휨강도를 저하시킬 수 있으나, 인성은 강섬유의 혼합층이 증가할수록 증가하였다. 강섬유가 중간층에 집중된 경우보다 골고루 분산될 경우 인성은 3배 정도 증가하였다.
- (2) 일반 슛크리트와 유사하게 시멘트 혼합비가 20%일 경우 강섬유 혼합층이 증가할수록 휨강도는 증가하였으며, 동일한 양의 강섬유가 골고루 분산되지 않고 한 곳으로 집중될 경우 휨강도가 20% 정도 감소하였다. 혼합형태(보강층)가 동일한 경우에는 혼합층에 보강된 강섬유의 양이 많을수록 휨강도가 높았다.
- (3) 일반 슛크리트와 유사하게 시멘트 혼합비가 20%일 경우 공시체의 인성은 혼합층이 증가할수록 증가하였으며, 강섬유가 한곳으로 집중된 경우보다 골고루 분산될 경우 인성이 2배 정도 증가하였다.
- (4) 슛크리트 시공 시 사용되는 강섬유가 골고루 분산

되지 않고 집중될 경우 강도나 인성이 감소할 수 있으므로 강섬유의 분산도에 따른 이와 같은 영향을 설계에 반영할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 국토교통과학기술진흥원이 시행하는 2012년도 지역기술혁신사업(12지역 기술혁신B01)의 지원을 받아 수행되었으며, 일부는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 공공복지안전기술개발사업 지원을 받아 수행되었으며 (No. 2012M3A2A1050982) 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Akkaya, Y., Picka, J., and Shah, S. P. (2000), "Spatial distribution of aligned short fibers in cement composites", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.12(3), pp.272-279.
2. Altun, F., Haktanir, T., and Ari, K. (2007), "Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams", *Construction and Building Materials*, 21, pp.654-661.
3. Barton, N., Grimstad, E., Aas, G., Opsahl, O.4., Bakken, A., Pedersen, L., and Johansen, E.D. (1992), Norwegian Method of Tunnelling, World Tunnelling, June and August.
4. Dawood, E. T. and Ramli, M. (2010), "Development of high strength flowable mortar with hybrid fiber", *Construction and Building Materials*, 24, pp.1043-1050.
5. Kang, S.T., Kim, Y.Y., Lee, B.Y., and Kim, J.K. (2008), "Fiber orientation impacts on the flexural behavior of steel fiber reinforced high strength concrete", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.20(6), pp.731-739.
6. Kim, J. and Kim, D. Y. (2000), "A study on the flexural toughness evaluation method of steel fiber reinforced shotcrete", *Tunnel & Underground*, Vol.10, pp.196-210.
7. Korean Expressway Corporation (2012), *Highway Construction Guide Specification*.
8. Korean Tunnelling and Underground Space Association (2009), *Scope of Standard Specification for Tunnel Work*.
9. KS F 2408 (2000), *Method of test for flexural strength of concrete*.
10. Park, S.-S., Kim, Y.-S., and Lee, J.-C. (2007), "Unconfined compressive strength of fiber-reinforced cemented sands by fiber reinforcement form", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.8, pp.159-169.
11. Ravindrarajah, R. S. and Tam, C.T. (1984), "Flexural strength of steel fibre reinforced concrete beams", *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol.6(4), pp. 273-278.
12. Song, P. S., Hwang, S., and Sheu, B.C. (2005), "Strength properties of nylon-and polypropylene-fiber-reinforced concretes", *Cement and Concrete Research*, 35, pp.1546-1550.

(접수일자 2013. 4. 10, 심사완료일 2013. 6. 4)