

터널라이닝 구조재로서 SFRC 적용에 관한 연구

Application of SFRC as a lining material in tunnels



이상근*
Yi, Sang-Keun



김동인*
Kim, Dong-In



조규성*
Jo, Gyu-Seung

Abstract

As the topography of Korea consists of mountains at about seventy percent, there is necessarily an increasing demand for tunnel construction according to the expansion of the existing highway and construction of new highway. The concrete lining of tunnel portals has been designed with reinforced concrete to resist the cracking due to the difference in temperature in the inside and outside of tunnel. In the paper, the application of steel fiber reinforcement concrete was analyzed as the lining concrete at tunnel portals and through structure analysis and field model test the suitability of the steel fiber reinforcement concrete was assessed as the lining member of tunnel portal.

Keywords: SFRC

*1 정회원, 한국도로공사 기술심사실 부장

*2 정회원, 한국도로공사 기술심사실 과장

요 지

산지가 70%를 차지하고 있는 우리나라 지형특성상 고속도로 건설에 비례하여 터널연장의 증가는 필연적이라 할 수 있다. 본 연구에서는 터널 내,외부의 온도차이에 의한 균열에 저항할 수 있도록 하기위해 터널 입,출구부에 설치되는 철근콘크리트 라이닝의 시공성 및 안전성,경제성을 확보할 수 있는 방안으로 강섬유보강 콘크리트(Steel Fiber Reinforcement Concrete, SFRC)의 적용성에 대해 연구하였다. SFRC의 특징을 조사하고 터널 갱구부 라이닝 구조부재로서 구조해석과 현장 시험시공을 통해 SFRC의 적용방안과 차후 확대 적용을 위한 개선방안을 제시하였다.

주요어: 강섬유보강콘크리트

1. 서론

고속도로에서 터널이 차지하는 연장은 70년대초 0.82%에서 최근에는 3.46%로 급속한 증가추세를 보이고 있다. 터널 갱구부 라이닝 콘크리트에는 터널 내,외부의 온도차이에 의해 발생하는 균열에 저항할 수 있도록 하기 위해 철근콘크리트로 설계되고 있다. 그러나 터널 갱구부 라이닝에 설치되는 철근은 완전히 조립되어 자립이 된 후에는 안전하지만 원형형상의 터널단면 특성상 비계위에서 철근을 조립하다보면 작은 실수에도 조립중인 철근이 처짐에 의해 붕괴되어 인명피해를 수반하는 사고가 가끔 발생하고 있다.

물론 철근조립중의 안전사고를 예방하기 위해 최근에는 방수앵커 또는 격자지보재등을 설치하는 등의 보완방법을 설계에 반영하기도 하지만 공사비 추가부담등의 문제가 있어 이에대한 근본적인 해결방안으로 SFRC(Steel Fiber Reinforcement Concrete)에 대한 심도있는 연구가 필요하다.

SFRC는 이미 오래전부터 유럽 및 일본등에서 구조재로 사용되고 있으나 국내 적용을 위해서는 우선 사용용도에 맞는 강섬유재료의 선택 및 구조적 안정성,경제성 확보여부와 배합설계 및 강도시험을 거쳐 시공성에 대한 검증이 필수적이다.

본 연구는 기존의 국내,외 관련자료들을 검토하여 SFRC의 역학적 특성과 적용강도의 적정성에 대해 분석

하였다.

또한 터널 입,출구부의 구조특성을 감안하여 국내 2,3,4 차로 터널 각각에 대하여 주변 지형조건이 열악하여 터널 갱구부 라이닝 콘크리트에 단면력이 크게 발생하는 터널을 대상으로 구조검토 및 해석을 통해 철근보강 라이닝 콘크리트 대체용으로 SFRC의 응력상태를 분석하였다.

그리고 시험시공을 통해 소요강도 발현을 위한 배합설계와 강도시험 및 SFRC의 타설성능에 대한 실험을 통해 현장 적용을 위한 방안을 제시코자 한다.

2. SFRC의 역학적 특성

강섬유의 종류 및 SFRC의 역학적 특성은 다음과 같다

2.1 강섬유의 종류

2.1.1 절단방식

압연 인발된 강선을 절단기를 사용하여 소정 길이로 절단한 것이다. 이 섬유는 다른 방법으로 제조된 것에 비해 인장강도가 크고 일정한 단면치수를 얻을 수 있으나 제조비가 크고 콘크리트와의 부착강도가 작은 결점이 있다. 그러나 이 결점은 강섬유의 표면에 변형을 준 이형 강섬유로 극복이 가능하다.

2.1.2 전단방식

냉연박강판(冷延薄鋼板)을 전단하여 제조하는 것으로 미리 섬유길이가 일치하는 폭으로 된 코일재로부터 연속적으로 인출된 띠모양의 강판을 절단기로 전단하여 제조하는 것이다.

2.1.3 절삭방식

두꺼운 강판이나 블럭을 사용하여 회전하는 평면 절단기로 절삭을 하여 제조한 섬유로서 절삭시에 매우 큰 소성변형이 가해져서 만들어지는 점이 특징이다. 따라서 보통의 연강재를 사용해도 가공경화(加工硬化)에 따라서 원재료의 2.5배 정도의 고강도가 되며 거기에다 절삭가공에 따라서 표면에 복수의 선모양 변형이 형성되기 때문에 콘크리트와의 부착강도도 높게 된다. 이 섬유는 보강효과, 시공성 및 경제성을 종합하면 세 종류중 가장 우수하다

SFRC는 불연속성의 짧은 강섬유를 콘크리트속에 균등하게 분산시켜 인장강도, 휨강도, 균열에 대한 저항성, 인성, 전단강도, 내충격성 등을 개선한 복합재료이다.

강섬유는 일반적으로 길이 25~70mm 지름 0.3~0.6mm로서 지름에 대한 길이의 비 즉 형상비(aspect ratio)가 50~80정도인 것이 사용되며, 콘크리트에 대한 혼입률의 범위는 용적백분율로 0.5~2.0%(약 40~160kgf/m³)이다. SFRC는 내부균열의 진행을 강섬유가 구속하기 때문에 균열발생에 대한 저항성이 우수하며, 인장강도도 강섬유 혼입률을 증가시키는데 따라 커진다. 또 균열이 발생한 후에도 균열을 가로질러 위치한 강섬유에 인장력이 전달되어 힘의 균형이 유지되기 때문에 겉보기 소성변형이 증대되며 휨강도도 개선되지만 특히 인성이 현저히 증대된다. 또한 균열에 대한 저항성과 동결융해 작용에 대한 저항성이 개선되기 때문에 내구성을 높일 수 있고 역학적 특성을 요약하면 다음과 같다.

(1) 강섬유의 배향

섬유가 단면 및 부재 전체에 완전히 균일하게 분산되었

어도 배향상태에 따라 보강효과가 다르게 된다. 직접인장을 받는 SFRC 부재에 있어서 섬유가 인장응력 방향으로 배열되어 있는 경우(그림 1.(a)) 혼합한 섬유의 이용효율은 최고로 높게 된다. 섬유가 인장응력 방향에 직각인 평면내에 무작위(random)로 분산되어 있는 경우(그림 1.(b)) 보강효과는 이론상으로는 0 이다. 섬유가 3차원상에 임의방향으로 된 경우(그림 1.(c)) 인장응력에 대하여 유효하게 거동하는 섬유는 혼합섬유의 1/2정도 된다.

섬유의 배향에 영향을 미치는 주된 요인은 콘크리트의 다짐방법, 부재치수, 섬유의 길이 및 배합 등이다. 다짐방법의 영향은 특히 진동다짐의 경우에 현저하다.

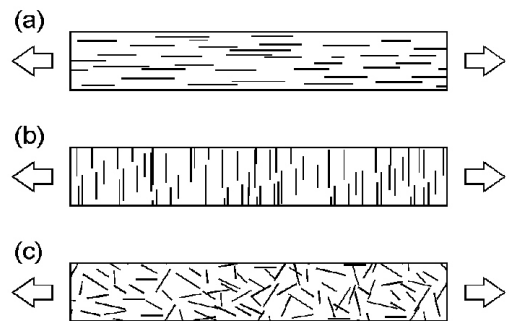


그림 1. 강섬유의 배향형태

(2) 작업성 (workability)

SFRC의 작업성은 배합, 운반, 다짐과정이 중요하다. 강섬유의 기하구조 및 수분흡수는 작업성을 저하시키며, 여러 형태의 섬유는 굵은 골재 또는 섬유의 양이 많거나 일정한 과정으로 첨가되지 않으면 뭉쳐지는 경향이 있는데, 이는 펌핑되는 콘크리트나 슛크리트에서 호스가 막히는 결과를 초래해 구조물의 품질에 영향을 미친다.

섬유뭉침(fiber balls)의 더 큰 문제는 작업도중에는 발견되지 않으나, 차후에 재료의 결합으로 발전되므로 SFRC의 작업성은 이것의 품질에 결정적인 영향을 미친다. 섬유의 분산에 영향을 미치는 주된 요인은 섬유 혼입

률과 섬유유형의 형상치수, 콘크리트의 배합, 혼합방법 및 다짐방법으로 섬유용침은 일반적으로 다음 조건하에서 생기기 쉽다.

- ① 섬유 혼입률이 2%를 넘는 경우
- ② 섬유의 지름이 가늘고(0.2mm 이하) 형상비가 80을 넘는 경우
- ③ 슬럼프가 작은 콘크리트를 장시간에 걸쳐서 혼합시키는 경우

(3) 균열

강섬유의 가장 큰 영향은 균열성장 억제에 있는데, 균열의 발전을 억제시키며 균열발생시 하중을 균열지역에 전달하는 역할을 하여 균열이 발생된 콘크리트의 변형에 결정적인 역할을 한다. 변형의 정도는 섬유의 모양, 함유량, 하중의 특징에 좌우된다. 또한 강섬유는 균열의 분포 개선에 도움이 된다. 휨응력의 경우 강섬유함유량이 충분할 경우 SFRC의 균열분포는 철근 콘크리트보다 훨씬 양호하며, 강섬유의 첨가는 초기균열 강도보다는 균열후 콘크리트 강도를 증가시킨다.

(4) 다짐도

SFRC는 일반 콘크리트에 비해 많은 다짐에너지를 요구하므로, 섬유함유량 변화에도 불구하고 동일한 시간으

로 다질 경우 공극량은 그림 2와 같이 섬유함유량이 많을수록 커진다.

따라서 공극량을 줄이기 위해서는 섬유함유량에 따라 다짐시간을 증가시켜야 하며, SFRC의 공극량은 일반 콘크리트에 비해 크고, 다짐과정이 섬유의 분산 및 배향에 영향을 미친다.

(5) 인장응력

일반 콘크리트와 달리 SFRC는 균열이 발생한 인장범위에서도 하중저항 능력이 있다. 그림 3은 휨시험에 의한 SFRC의 하중-처짐 곡선이다.

곡선①은 무근 콘크리트에서 균열강도 초과직후에 파괴가 발생한 것을 나타내며, 곡선②~곡선④는 SFRC에서 섬유형태와 섬유량에 따라 다른 특성을 보여준다. 곡선④에서 균열강도초과시 하중이 감소하는 것은 다음에 의해 발생할 수 있다.

- 상대적으로 작은 섬유혼입량 (용적비로 거의 0.7% 까지)
- 정적마찰저항으로 인해 섬유의 부착력 감소시
- 섬유가 뽑히지 않고 파단되었을 때

곡선③, 곡선④는 hooked type이나 anchorage type 이고 양호한 부착력과 높은 인발 저항력을 가진 섬유에서 흔히 볼 수 있다. 곡선④에서 균열 발생후 하중의 증가는

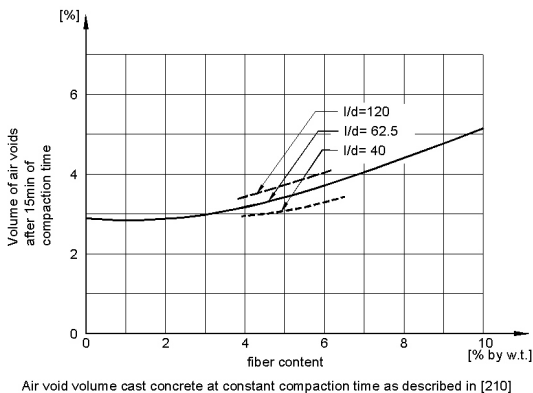


그림 2. 강섬유 혼입량과 콘크리트의 공극량

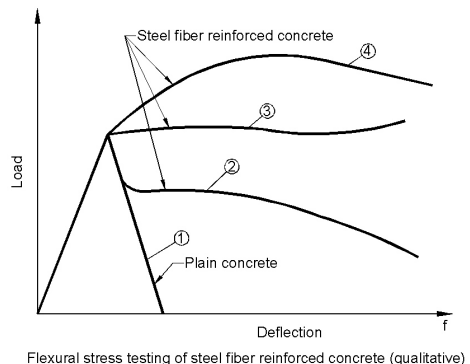


그림 3. 하중-처짐 곡선

근본적으로 섬유 함유량에 의존한다.

(6) 인성

다른 형태의 응력하에서 SFRC의 하중-변형 반응은 강섬유의 영향범위를 나타낸다. 무근 콘크리트가 파괴되기 쉬운 여러 가지 응력상태에서도 SFRC는 극한하중이 초과되고 변형이 증가되더라도 하중 지지력이 소멸되지 않는다. 이러한 특징은 하중-처짐곡선 하부에 해당하는 인성을 평가함으로써 증명할 수 있다. 그림 4는 섬유 함유량증가에 따른 인성의 발달을 설명해준다.

인장범에서 인성의 증가는 명백한데, 용적비 1%의 섬유에 의해 1,500%의 인성증가를 얻을 수 있으며, 재료강도에 영향을 미치지 않는 극소량의 섬유량에 의해서도 인성에는 중요한 영향을 미친다.

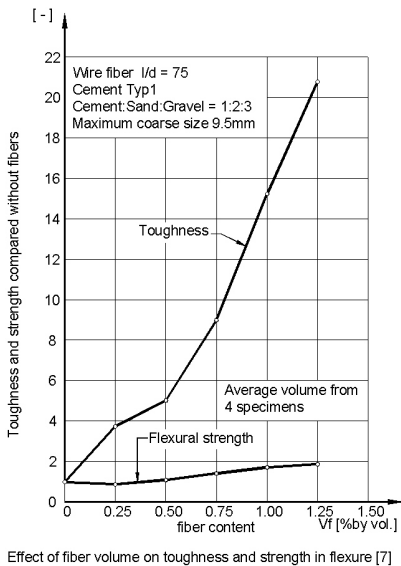


그림 4. 강섬유 함유량과 인성

3. 터널 차로별 갱구부 라이닝 구조재로서 SFRC 적정성 분석

3.1 터널 차로별 구조 안정성 검토

1 방향 차로수별 터널의 구조 안정성 검토를 위해 기설 계 된 터널을 대상으로 4차로, 3차로, 2차로 터널별로 다음과 같이 현재 일반적으로 터널갱구부 라이닝 콘크리트 설계시 이용되고 있는 재료강도와 기본가정 조건을 적용하여 SFRC의 터널 갱구부 라이닝 구조부재로서 구조해석을 실시하였다.

재료

- 콘크리트 $f_{ck} = 240 \text{ kgf/cm}^2$
- 철근 SD30 $f_y = 3,000 \text{ kgf/cm}^2$
- 강섬유: H60/0.75 함량 $W=40 \text{ kgf/m}^3$ (체적비 $V=0.5\%$)
- 강섬유 콘크리트의 균열후 인장강도 $f=13.5 \text{ kgf/cm}^2$

기본가정

- 강도감소계수는 강섬유보강 콘크리트가 철근콘크리트 보다 인성이 좋으므로 $\phi = 0.7$ 로 한다.
- 강섬유보강 콘크리트의 최대 압축변형률은 0.35%로 하고, 최대 인장변형률은 0.5%로 한다.
- 균열후 중립축에서 인장연단까지 강섬유보강 콘크리트의 인장응력 분포는 균등한 것으로 본다. (직사각형 응력분포)
- 압축축의 응력분포는 Whitney의 응력사각형 분포로 본다.
- 극한상태에 대해 검토하는 경우 강섬유보강 콘크리트의 부식을 고려하여 노출된 표면층은 유효두께에서 2cm를 공제한다.

3.2 4차로 터널 갱구부 라이닝 구조 안정성 검토

(1) 하중조합

- CASE 1 : 자중
- CASE 2 : 자중 + 수평수압 + 수직수압
- CASE 3 : 자중 + 온도하중
- CASE 4 : 자중 + 수평수압 + 수직수압 + 온도하중

(2) 단면력 집계

최대 moment	최대 전단력	최대 축력
5.502 tonf·m	5.314 tonf	60.925 tonf

(3) 응력검토

가. 철근 보강
 $M_u = 5.502 \text{ tonf}\cdot\text{m}$, $P_u = 60.925 \text{ tonf}$
 $S_u = 5.314 \text{ tonf}$
 $e = M_u / P_u = 0.09 \text{ m} = 9 \text{ cm}$
 $h = 40 \text{ cm}$, $b = 100 \text{ cm}$, $d_c = 6 \text{ cm}$, $d = h - d_c = 34 \text{ cm}$
 인장철근 $A_s = D19@15 = 19.1 \text{ cm}^2$, $d = 34 \text{ cm}$
 압축철근 $A_s' = D19@15 = 19.1 \text{ cm}^2$, $d' = 34 \text{ cm}$

균열허중산정

• 소성중심

$$C_c = 0.85 f_{ck} \times A_g = 0.85 \times 240 \times 4000 = 816,000 \text{ kgf}$$

$$C_{s1} = A_s \times f_y = 19.1 \times 3000 = 57,300 \text{ kgf}$$

$$C_{s2} = 57,300 \text{ kgf}$$

$$X_p = \frac{[C_c \times h/2 + C_{s1} \times d' + C_{s2} \times (h-d')]}{(C_c + C_{s1} + C_{s2})}$$

$$= 20 \text{ cm}$$

$$d'' = X_p - h + d = 20 - 40 + 34 = 14 \text{ cm}$$

• 균형상태

$$C_b = \frac{0.003}{0.003 + \frac{3000}{(2.04 \times 10^6)}} \times 34 = 22.82 \text{ cm}$$

$$a_b = k_1 \times C_b = 19.40 \text{ cm}$$

$$f_s' = f_y = 3,000 \text{ kgf/cm}^2$$

$$C_c = 0.85 f_{ck} \times a_b \times b = 395,760 \text{ kgf}$$

$$T = A_s \times f_y = 57,300 \text{ kgf}$$

$$C_s = A_s' \times (f_s' + 0.85 f_{ck}) = 53,404 \text{ kgf}$$

• 균형 하중 및 균형 편심

$$P_b = C_c + C_s - T = 395,760 + 53,404 - 57,300 = 391,864 \text{ kgf}$$

$$M_b = C_c \times (d - \frac{a_b}{2} - d'') + C_s \times (d - d' - d'')$$

$$+ T \times d'' = 56.26 \text{ tonf}\cdot\text{m}$$

$$e_b = M_b / P_b = 14.36 \text{ cm}, e < e_b \text{ 이므로 압축지배}$$

$$\phi P_n = \phi \left\{ \frac{A_s' f_y}{\frac{e}{d-d'} + 0.5} + \frac{b h f_{ck}}{\frac{3 h e}{d^2} + 1.18} \right\} = 366.7 \text{ tonf}$$

$$\phi P_n > P_u = 60.925 \text{ tonf} \dots\dots\dots \text{OK}$$

$$\phi M_n = e \times \phi P_n = 33.0 > M_u = 5.502 \text{ tonf}\cdot\text{m}$$

$$\dots\dots\dots \text{OK}$$

나. 강섬유 보강

• 균형하중 및 균형 편심

$$C_b = \frac{0.0035}{0.005 + 0.0035} \times 38 = 15.65 \text{ cm}$$

$$a_b = 0.85 \times 15.65 = 13.30 \text{ cm}$$

$$C_c = 0.85 \times f_{ck} \times a_b \times b = 271.32 \text{ tonf}$$

$$T_c = 13.5 \times (38 - 15.65) \times 100 = 30.17 \text{ tonf}$$

$$P_{nb} = C_c \times T_c = 271.32 - 30.17 = 241.15 \text{ tonf}$$

$$M_{nb} = 30.17 \times (19 - \frac{22.35}{2}) + 271.32 \times (19 - \frac{13.3}{2})$$

$$= 35.86 \text{ tonf}\cdot\text{m}$$

$$e_b = \frac{35.86}{241.15} = 14.87 \text{ cm}$$

1) a = 32 cm로 가정하면

$$h_1 = 38 - \frac{32}{0.85} = 0.35 \text{ cm}$$

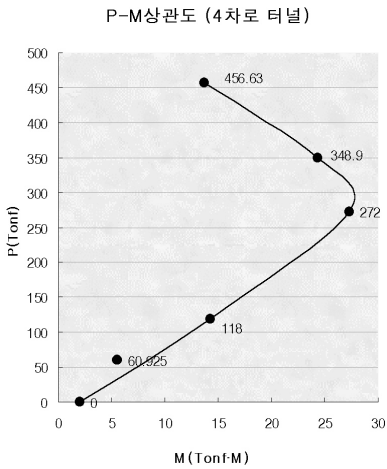


그림 5. 4차로터널의 P-M상관도

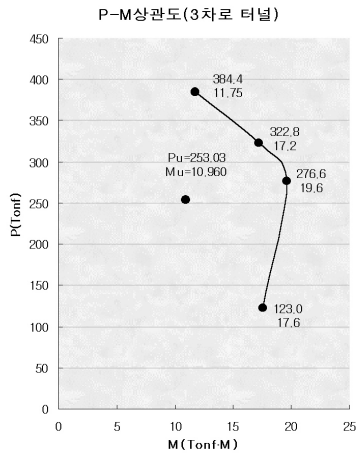


그림 6. 3차로터널의 P-M상관도

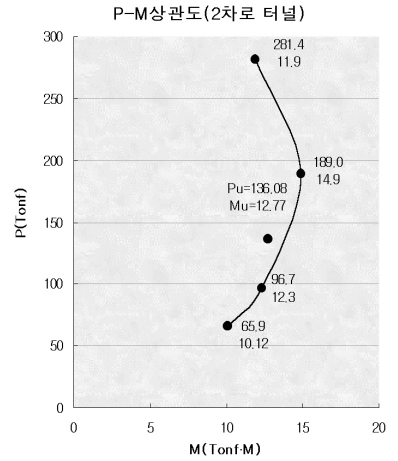


그림 7. 2차로터널의 P-M상관도

$$C_c = 0.85 \times 240 \times 32 \times 100 = 652.8 \text{ tonf}$$

$$T_c = 13.5 \times 0.35 \times 100 = 0.472 \text{ tonf}$$

$$P_n = 652.8 - 0.472 = 652.33 \text{ tonf}$$

$$M_n = 0.472 \times \left(19 - \frac{0.35}{2}\right) + 652.8 \times \left(19 - \frac{32}{2}\right)$$

$$= 19.67 \text{ tonf}\cdot\text{m}$$

$$e = \frac{19.67}{652.3} = 3.01 \text{ cm}$$

$$\phi P_n = 0.7 \times 652.33 = 456.63 \text{ tonf}$$

$$\phi M_n = 0.7 \times 19.67 = 13.77 \text{ tonf}\cdot\text{m}$$

2) a = 25 cm로 가정하면

$$h_1 = 38 - \frac{25}{0.85} = 8.59 \text{ cm}$$

$$C_c = 0.85 \times 240 \times 25 \times 100 = 510 \text{ tonf}$$

$$T_c = 13.5 \times 8.59 \times 100 = 11.6 \text{ tonf}$$

$$P_n = 498.8 \text{ tonf}$$

$$M_n = 11.6 \times \left(19 - \frac{8.59}{2}\right) + 510 \times \left(19 - \frac{25}{2}\right)$$

$$= 34.9 \text{ tonf}\cdot\text{m}$$

$$e = \frac{19.67}{652.3} = 3.01 \text{ cm}$$

$$\phi P_n = 348.9 \text{ tonf}$$

$$\phi M_n = 24.4 \text{ tonf}\cdot\text{m}$$

3) a = 20 cm로 가정하면

$$\phi P_n = 272 \text{ tonf}, \phi M_n = 27.3 \text{ tonf}\cdot\text{m}$$

4) a = 10 cm로 가정하면

$$\phi P_n = 118 \text{ tonf}, \phi M_n = 14.3 \text{ tonf}\cdot\text{m}$$

3.3 3차로 터널 갱구부 라이닝 구조 안정성 검토

3차로 터널의 구조검토 결과는 그림 6과 같다.

3.4 2차로 터널 갱구부 라이닝 구조 안정성 검토

2차로 터널의 구조검토 결과는 그림 7과 같다.

3.5 분석결과

4차로, 3차로, 2차로 터널을 대상으로 구조 해석 결과 다음 표 1과 같이 터널 입 출구부 철근을 강섬유로 대체할 경우 구조적으로 안전한 것으로 나타났다

표 1. 구조해석결과

구분	Moment (tonf·m)			축력 (tonf)		
	철근 보강시	강섬유 보강시	Mu	철근 보강시	강섬유 보강시	Pu
	ϕM_n	ϕM_n		ϕP_n	ϕP_n	
4차로 터널	33	24.4	5.502	366.7	348.9	60.925
3차로 터널	18.89	17.2	10.96	436.2	322.8	253.03
2차로 터널	21.6	14.9	12.77	230.3	189.0	136.09

강섬유는 콘크리트 내에서 고루 분산이 되어야 하며, 콘크리트 내에서 빠지지 않고 잘 견뎌야 한다. 또한 높은 인장강도로서 외부응력에 강력히 대응하여야 하며, 절곡과 절단이 되지 않을 정도의 탄력성을 유지하여야 한다. 본 연구에 사용된 강섬유는「길이(60mm)×지름(0.75mm)」형상비 80이며, 섬유의 길이가 너무 길면 뭉침현상이 생기고, 부러지거나 휘기 쉽고 워커빌리티가 나빠지므로 재질에 대하여 각별히 유의하여 뭉침현상을 방지코자 양단 Hook형 bundle type으로 된 재료를 사용하였다.

4. SFRC 적용 시험시공

4.1 SFRC 배합설계

4.1.1 사용재료

4.1.2 콘크리트 재료원

콘크리트는 일반적으로 터널라이닝에 사용하는 2종 ($f_{ck}=240\text{kgf/cm}^2$)을 기준으로 생산하여 slump, 공기량, 압축강도, 휨강도, 등가휨강도 등을 비교 검토하였다.

조골재(25m/m): 현장 터널암 유용

세골재: 육상사(충북 음성군 소미면 봉정리)

표 2. 1차 실내배합결과

구분	단위투입량(kgf/m ³)						W/C (%)	S/a (%)	Slump (cm)	Air (%)
	W	C	S	G	AE제	고유 동화제				
I plain	173	346	705	1054	0.519	-	50	41	15	4.6
II 강섬유 40kgf	190	346	705	1054	0.519	-	55	41	15.7	3.7
III 강섬유 40kgf	173	346	705	1054	0.519	1.038	50	41	14.7	3.5
IV 강섬유 45kgf	178	346	705	1054	0.519	1.038	51	41	15	5.7

표 3. 1차 실내배합휨강도결과

구분	시험결과: 28일강도 (kgf/cm ²)	평균(kgf/cm ²)	비고
I. plain (w=173kgf)	휨강도 61, 59, 69, 59, 62, 65	63	15×15×55
II. 강섬유 40kgf (w=190kgf)	휨강도 64, 63, 70, 68, 64, 68	66	15×15×55
	등가 휨강도 63, 65, 53, 64, 53, 51	58	10×10×45
III. 강섬유 40kgf (w=173kgf)	등가 휨강도 47, 45, 47, 33, 47, 45	44(76%)	10×10×45
	휨강도 68, 74, 73, 67, 60, 73, 65, 82, 73	71	10×10×45
IV. 강섬유 45kgf (w=178kgf)	등가 휨강도 56, 34, 47, 57, 46, 48, 45, 46, 48	47(67%)	10×10×45
	휨강도 78, 74, 67, 61, 77, 62, 73, 61, 68	76	15×15×55
	등가 휨강도 54, 48, 46, 57	66	10×10×45
		51(77%)	10×10×45

시멘트: 1종 보통 포틀랜드 시멘트

AE 감수제: LIGACE-UA

유동화제: LIGACE-F

4.1.3 1차 실내시험

1차 실내시험 배합은 표 2와 같다

실내시험시 사용된 Mixer는 5L의 소형믹서를 사용하였으며, 1회 믹싱은 30L, 믹싱타임은 현장조건에 맞춰 1분을 기준으로 하였다. plain 배합시 slump는 15cm를 유지하였으나, 강섬유를 40kgf/m³ 투입시 슬럼프가 급격히 떨어져(저하량:7cm), II, III과 같이 혼합수 또는 고유동화제로 적정 slump를 확보토록 하였다. Mixing과정을 육안 관찰한 결과, 일반 콘크리트에 비하여 강섬유 혼합으로 인한 골재와의 뭉침현상으로 Mixer에 과부하가 걸려 원활한 혼합이 어려웠다. 실내 배합결과 휨강도 시험 결과는 표 3과 같다

상기 결과에서 보면, 강섬유 40kgf 및 45kgf 투입시 등가 휨강도는 약 10%정도의 차이를 보였으며, 동일한 배합내에서는 휨강도와 휨인성시험시 휨강도 값은 약 15%정도 공시체 규격에 따른 차이를 보였다.

그리고, 강섬유를 45kgf 투입시 일부 강섬유의 뭉침현상이 나타났으며, 이는 Mixer 자체 용량상의 문제라고 판단되었다.

(※ 현장 B/P에서는 뭉침현상이 발생되지 않았음)

4.1.4 제 2차 실내시험 및 현장 타설

2차 실내배합시 1차배합과 동일하게 강섬유 첨가로 인한 slump의 급격한 저하로 고유동화제 (0.2% → 0.8%)와 혼합수를 증가시켜 2차 실내배합II로서 적정 slump를 유지하였다. 또한 s/a를 증가시켜 강섬유(L=60mm)와 골재와의 뭉침현상을 최대한 억제토록 하였다.

「2차 실내배합II」에 맞춰 현장 B/P에서 Con'c를 생산 타설 하였으며, 강섬유는 B/P에 있는 골재 BIN을 통하여 투입하였다.



사진 1. B/P장에서 강섬유 혼입

이와같이 배합표를 조정하여 현장 소구조물에 시험시공 결과 배합 및 콘크리트 펌프카의 종류, 펌프카 over size 제거망의 크기등에 따라 타설성능이 크게 차이가 났다.

4. 결론

- 1) 본 논문에서는 터널 갱구부 라이닝 콘크리트에서 온도차이에 의해 발생하는 균열의 생성을 억제하기 위해 현행 적용되는 철근보강 방식을 강섬유로 대체가 가능한지에 대한 적부를 판단하였다.
- 2) 터널구조물은 반원형이고 터널단면이 점차 3차로, 4차로 터널이 대단면화 되어가면서 갱구부 라이닝 철근 조립중 철근의 처짐으로 인한 붕괴사고가 가끔 발생하여 인명사고로 인한 경제적 손실이 막대하다. 본 논문에서는 터널 갱구부 라이닝 콘크리트에 강섬유 보강의 적정성을 평가하기 위해 2차로, 3차로, 4차로 터널 각각에 대하여 구조해석을 실시한 결과 기존의 철근보강으로 강섬유보강으로 대체가능한 것으로 분석되었다.
- 3) 구조해석결과의 적정성을 평가하기 위해 1차에서 3차에 걸쳐 수행된 현장시험결과 평균 등가 휨강도는 36.8kgf/cm²으로 평가되어 구조해석을 위한 가정조

건을 만족하였다.

- 4) 현장시험을 통해 강섬유와 굵은 골재의 뭉침현상 방지를 위해 일반적으로 적용되는 잔골재율(s/a)43%에서 52%로 증가시키고 시멘트는 346kgf에서 370kgf로 증가시켜 다소 부배합으로 되도록 해야 시공성이 확보되었다.
- 5) 본 연구를 통해 강섬유 적용시 양생수축균열 제어에 매우 유리하고 내 충격성이 10배 이상 증가되어 내구성이 대폭 향상되므로 철근보강에 비해 안전성 및 비용상에서 매우 만족스러운 것으로 판단되었다.
- 6) 다만 균열후 인장강도 값은 몇 번의 실험을 통해 본 논문에서 가정한 13.5 kgf/cm²가 적정한 것으로 나타났으나 설계시 구조검토를 위해서는 콘크리트 강도 및 강섬유 함유량에 따른 균열후 인장강도값에 대한 추가연구가 필요한 실정이다.

참고문헌

1. Kaser P.K. (1980), "Effect of stress- history on the deformation behavior of underground openings", 13th Canadian Rock Mechanics Symp., Cmm, Montreal, pp.133~140
2. America Concrete Institute (1986), Guide to Shotcrete by ACI Committee 506, ACI 506R-85, Detroit
3. America Concrete Institute (1989), State-of-Art Report on Fiber Reinforced Shotcrete, Reported by ACI Committee 506, ACI 506.1R-84, Detroit
4. Bernhard R. Maidi (1991), "Steel Fibre Reinforced Concrete", pp. 41~125
5. 社団法人 鋼材俱樂部 "Manual of Steel Fiber Reinforced Concrete" [第 3版], pp.9~25

