

슬러리 충전 강섬유 보강 콘크리트의 압축 및 인장강도 특성

김석기^{1)*} · 최진호¹⁾

¹⁾단국대학교 토목환경공학과

Compressive and Tensile Strength Properties of Slurry Infiltrated Fiber Concrete

Suk-Ki Kim^{1)*} and Jin-Ho Choi¹⁾

¹⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dankook University, Cheonan 330-714, Korea

ABSTRACT The slurry infiltrated fiber concrete (SIFCON) is recognized as one of the most promising new construction materials. Compressive and direct tensile tests are performed to investigate the mechanical property of SIFCON. Hooked-end steel fibers are used in the mix with fiber volume fraction varied from 4% to 10%. The water/cement ratio is kept constant at 0.4. The amount of silica fume added is 10% by weight of cement and 0.5% of water reducing agent is added to improve the workability of the slurry. The test results in this study show that the compressive strength of SIFCON is about 1.59 to 2.68 times in comparison with the cement paste. Tensile strength is showed the enhancement of about 2.51 to 8.77 times. It is also observed that the toughness and ductility of SIFCON are increased significantly with the increasing in fiber volume fraction.

Keywords SIFCON, direct tensile test, cement slurry, toughness, ductility

1. 서 론

고급합성재료로서의 강섬유 역할 및 관련규정의 제정 등에 기인하여 90년대 후반부터 강섬유에 대한 연구가 다시 활발히 진행되고 있으며, 최근에는 일부 구조물에 대하여 강섬유 보강 콘크리트가 사용되고 있다. 국내의 강섬유 보강 콘크리트에 대한 대부분의 연구가 강섬유의 혼입률이 2% 이내의 저혼입률 강섬유 보강 콘크리트에 관한 연구로 4~15%의 고혼입률로 이루어진 고성능 섬유 보강 콘크리트에 대한 국내의 연구¹⁾는 아직 미흡한 상태이다.

고혼입률의 고성능 섬유 보강 콘크리트인 슬러리 충전 섬유 보강 콘크리트(SIFCON, slurry infiltrated fiber concrete)는 Lankard²⁾에 의해 처음 연구되었다. 압축 및 휨 특성, 충격 저항성, 연성, 지진 저항성 등과 같은 SIFCON의 특성은 최근까지 많은 연구가 진행되었지만 직접인장강도 시험은 Homrich³⁾과 Reinhardt⁴⁾와 같은 극소수의 연구자에 의해 수행되었다.

Shah⁵⁾는 SIFCON과 같은 고혼입률의 고성능 섬유 보강 콘크리트는 높은 혼입률의 영향으로 합성체의 인장강

도가 증가될 뿐만 아니라 균열 후 내하력이 강화되는 것을 고찰하여 고혼입률 강섬유 보강 콘크리트에 대한 많은 응용을 이끌어 내었다.

일반 콘크리트에 비하여 인장성능 및 수밀성이 우수한 고성능 섬유 보강 콘크리트의 활용 방안으로는 콘크리트 거더의 연성개선과 인장부의 균열제어, 공항의 프리캐스트 포장판, 교량의 상판이나 교각의 보수⁶⁾, 고압수로 등 수밀성이 요구되는 부재 및 골조 부재의 내진 성능개선 등에 적용하면 큰 효과를 기대할 수 있다⁷⁾.

본 연구에서는 압축강도시험과 직접인장강도시험을 통해 강섬유 혼입률에 따른 SIFCON의 역학적 특성을 분석함으로써 이의 활용을 위한 참고자료를 제시하고자 한다.

2. 실험체 제작 및 실험 방법

2.1 슬러리

SIFCON은 저혼입률의 강섬유 보강 콘크리트 제작방법과 달리 거푸집에 먼저 강섬유를 충전한 후 슬러리를 침투시키는 방법으로 제작하게 되므로 슬러리의 유동성이 크게 요구된다. 또한 SIFCON의 강도는 강섬유의 혼입률 뿐만 아니라 그라우트재의 영향을 크게 받으므로 슬러리 제작시 실리카폼을 사용하였다.

*Corresponding author E-mail : skim@dankook.ac.kr
Received August 28, 2006, Accepted September 8, 2006
©2006 by Korea Concrete Institute

슬러리는 국내산 보통포틀랜드시멘트와 노르웨이 E사의 분말형 실리카폼을 시멘트 중량 대비 10%를 혼입하여 물-시멘트비 W/C=0.40로 제작하였다. 실리카폼을 10%이상 사용한 시멘트 페이스트는 그 유동성이 현저히 저하되기 때문에 작업성 확보를 위하여 고성능 감수제의 사용이 필요하다. 따라서, 본 실험에서는 국내 A사의 멜라민계 고유동화제를 사용 하였으며 제품의 사용법에 따라 시멘트 중량 대비 0.5%를 혼입하였다.

슬러리의 제작은 강제식 팬믹서에 시멘트, 실리카폼을 투입하고 약 30초동안 건비빔을 실시한 후, 물과 유동화제를 넣고 저속으로 약 1분간, 고속으로 약 1분간 혼합하여 적정한 유동성을 확보한다.

시멘트페이스트 슬러리의 배합표는 Table 1과 같다.

2.2 시험체 제작

본 실험에서 사용한 강섬유는 국내 I사에서 생산되고 있는 ASTM A 820-85 Type I의 강섬유(hooked-type round steel fiber)로 직경 $d_f=0.5$ mm, 길이 $l_f=30$ mm이고 형상비가 $l_f/d_f=60$ 이다.

강섬유 혼입률 0%, 4%, 6%, 8%, 10%에 대하여 압축강도 시험체와 직접인장강도 시험체를 제작하였으며, 24시간 후에 탈형 후, 수중양생을 실시하였다.

압축강도 시험체는 KCI-SF106 “강섬유 보강 콘크리트의 강도 및 인성 시험용 공시체 제작 방법”에 의해 강섬유의 길이가 30 mm이므로 $\Phi 100 \times 200$ mm의 원주형 공시체를 제작하였다.

원주형 몰드에 강섬유 충전 시, 혼입률 4%, 6%는 진동없이 섬유 뭉침 현상이 생기지 않도록 손으로 골고루 뿌려가며 충전이 가능하지만, 혼입률 8%, 10%는 강섬유를 모두 충전할 수 없으므로 판 진동을 주면서 강섬유를 충전하였다. 혼입률 4%의 경우는 슬러리 투입시 판 진동을 통해 충전하게 되는데 이때 강섬유가 침하하는 현상이 발생하게 된다. 따라서 다른 시험체와 달리 먼저 3/4가량의 강섬유를 최대한 형틀의 상단 부까지 충전한 후 나머지 1/4은 슬러리를 침투시키는 과정에서 충전한다.

Fig. 1은 $\Phi 100 \times 200$ mm의 몰드에 6%의 강섬유가 충전된 상태를 보인 것이다.

직접인장강도시험의 표준 공시체에 대한 규준이 없으므로 본 실험에서는 Fig. 2와 같은 중간 단면 폭 30 mm, 높이는 54 mm의 형상을 사용하였으며, 거푸집은 강섬유 충전 상태와 슬러리 침투를 확인하기 위하여 두께 8 mm의 투명 아크릴 판을 사용하여 제작하였다.

인장강도시험체도 압축강도시험체 제작 시와 같은 방법으로 제작되었으며, 제작된 형상은 Fig. 3과 같다.

Table 1 Mix proportion of slurry

W/C (%)	Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Admixture (kg/m ³)	
			Silica fume	Water reducing agent
40	487	1,217	122	6.1

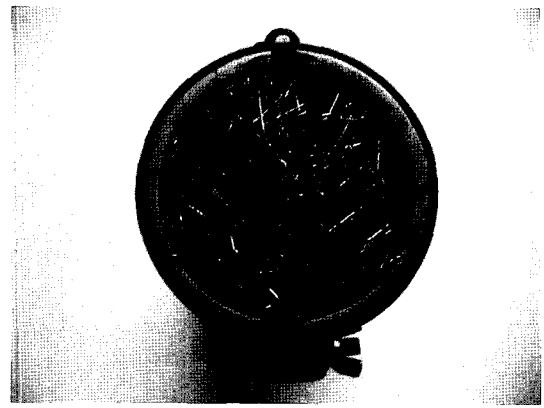


Fig. 1 Fabrication of compression specimen for 6% volume fraction

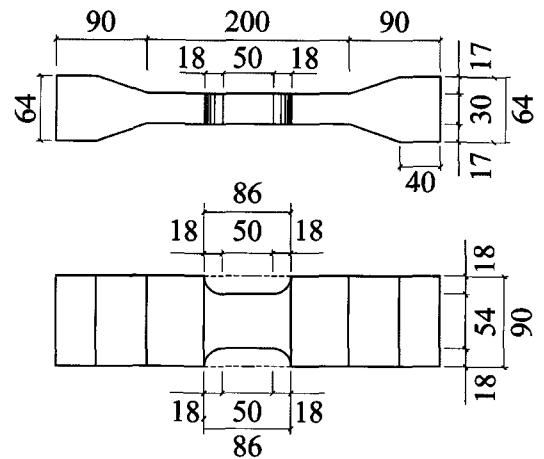


Fig. 2 Dimension of the tension specimen(unit: mm)

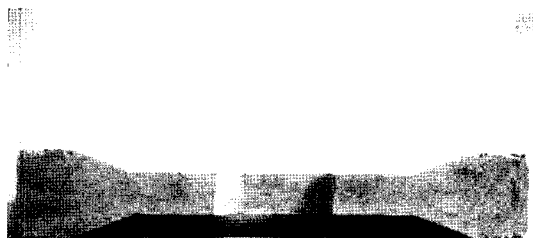


Fig. 3 Direct tensile test specimen

2.3 실험 방법

시험은 국내 S사의 유압 서보 만능 시험기와 데이터 이력기록기를 이용하였다.

압축강도시험은 1000 kN 용량을 갖는 로드셀을 사용하였으며 재하속도는 0.5 mm/min의 변위제어방식으로 유효 측정범위 30 mm의 LVDT를 설치하여 수직변위를 측정하였다.

인장강도는 직접인장강도시험으로 100 kN 용량의 로드

셀을 사용하여 측정하였으며 재하속도는 변위제어방식으로 0.05 mm/min의 속도로 실시하였다. 변위측정은 유효 측정 범위 ± 5 mm의 PIDT(PI-5-100)를 표점거리 50 mm가 되도록 자체 제작한 고정대를 사용하여 시험부재에 부착하였다. 또한 PIDT의 작동상태의 적정성 여부를 감시하기 위한 보조 측정장치로 유효측정범위 10 mm의 LVDT를 시험체 측면에 설치하였다. 인장시험의 실험용 장치는 Fig. 4와 같다.

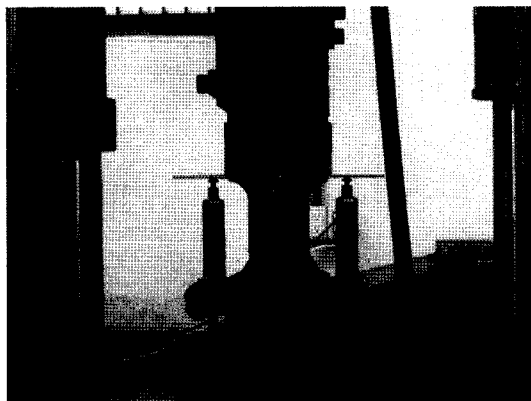
3. 실험 결과 및 분석

3.1 압축 실험

압축강도는 본 실험의 경우 혼입률이 0%인 시멘트 페이스트 슬러리의 압축강도에 비해 혼입률 4%에서 10%까지 크게 증가하였다. 이는 하중재하방향과 수직되게 배열된 강섬유가 압축강도를 증대시키고 충전되는 강섬유의 혼입량에 따라 그 효과가 증가됨을 알 수 있다. 본 실험의 실험결과를 정리한 Fig. 5의 섬유 혼입률에 따른 압축응력-변형률곡선에서 혼입률 8%의 경우와 혼입률 10%의 경우 압축강도 증가량의 차가 적음을 알 수 있다. 압축강도를 증가시키는 강섬유의 구속능력은 혼입률이 일정치 이상이 되면 압축강도에 미치는 영향이 적은 것으로 판단되며, 이는 섬유와 섬유사이의 간격이 매우 조



(a) Front view



(b) Side view

Fig. 4 Experimental setup for testing tensile strength

밀해짐에 따라 그 사이에 침투된 콘크리트와의 구속능력이 저하되기 때문이라 사료된다.

Fig. 6는 압축시험시 파괴된 섬유 혼입률 0%(slurry)와 10%의 공시체의 모양을 보여주고 있다.

SIFCON은 보통 콘크리트에 비해 강섬유가 시험체의 횡방향 변형을 구속하는 효과로 인해 최대강도 이후 압축인성을 크게 증대시키고, 연성적인 압축파괴 경향을 보이며 혼입률이 증가할수록 그 효과는 큰 것으로 나타났다. 응력-변형률곡선에서 혼입률 8%와 10%에서의 압축강도는 거의 비슷하지만 압축인성은 10%에서 더 크게 나타남을 Fig. 5의 강섬유 혼입률에 따른 압축응력-변형률 곡선에서 알 수 있다.

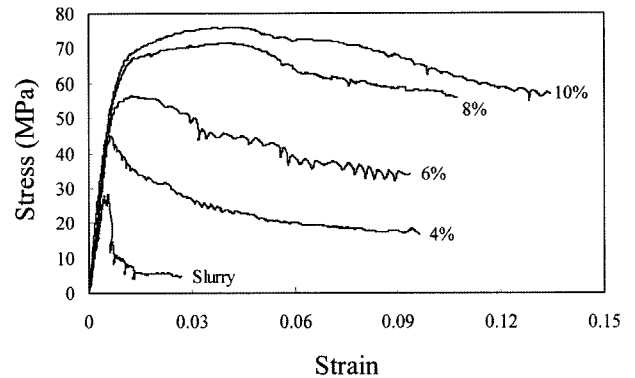
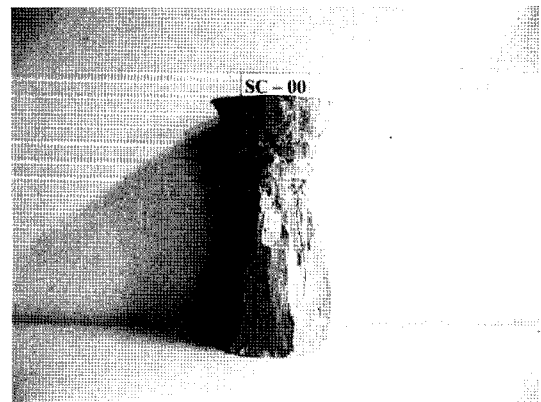
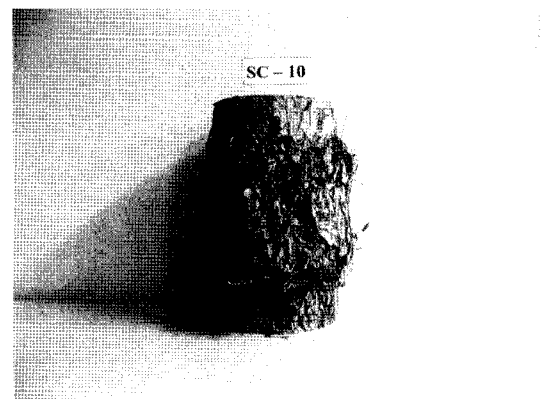


Fig. 5 Stress-strain curves of SIFCON in compression



(a) Slurry



(b) SIFCON of 10% volume fraction

Fig. 6 Failure patterns of slurry and SIFCON

Table 2와 Fig. 7에 혼입률별 압축강도와 강섬유가 혼입되지 않은 슬러리 강도에 대한 상대 강도비를 나타내었다. 본 실험의 경우 섬유 혼입률이 10%까지는 섬유 혼입률에 대한 압축강도비는 거의 직선적으로 증가하나 섬유 혼입률의 증가에 따른 탄성계수의 변화는 크지 않음을 알 수 있다.

3.2 인장 실험

강섬유 혼입률에 따른 직접인장시험 결과, 압축강도와 달리 강섬유 혼입률 0%와 10%를 비교했을 때 최대 8.7 배에 이르는 높은 강도 증진 효과를 보였으며 강섬유 혼입률이 증가할수록 인장강도는 크게 증가하였다. 혼입률 0%(slurry)의 경우는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 변형률 0.04%에서 파괴가 일어났는데, 이는 시멘트페이스트의 큰 취성적 특성과 본 실험에서의 변위제어속도 0.05 mm/min로 인한 것이라 판단된다.

Table 2 Compressive strength ratio of SIFCON to slurry

Volume fraction (%)	Modulus of elasticity(MPa)	Compressive strength(MPa)	Strength ratio
0	6,728	28.3	1
4	9,332	45.1	1.59
6	9,456	56.4	1.99
8	9,517	71.5	2.53
10	9,718	75.9	2.68

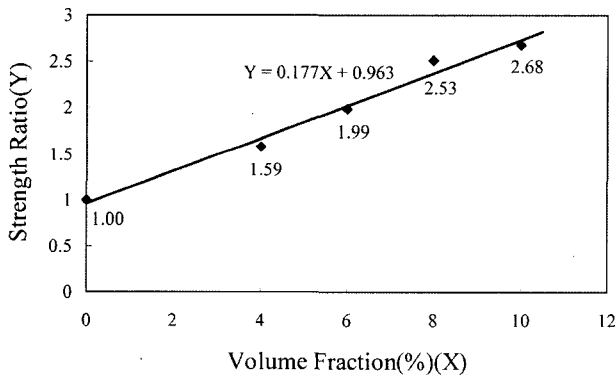


Fig. 7 Effects of fiber volume fraction on compressive strength

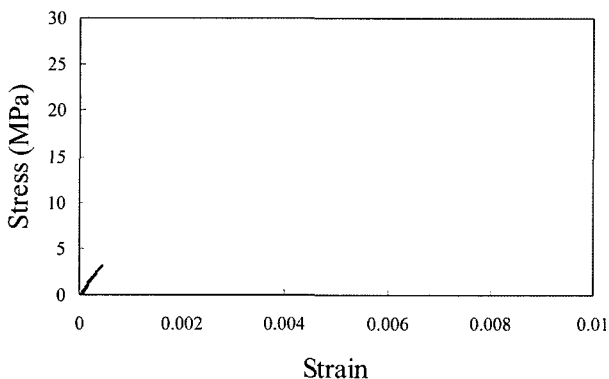


Fig. 8 Stress-strain curves of slurry in tension

SIFCON의 경우 최대하중에 도달하기 전에 한 개 또는 여러 개의 균열이 위험단면에 발생하였고 이들 균열은 최대하중 이후부터 성장하여 한 개의 큰 균열로 파괴에 이른다. Fig. 9는 강섬유 혼입률 10% 인장시험체의 파괴형상을 보여주고 있다.

Fig. 10의 강섬유 혼입률에 따른 인장응력-변형률 곡선은 강섬유 혼입률이 증가할수록 강도뿐만 아니라 연성도 크게 증가함을 보여주고 있다. 이는 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 단위 면적당 강섬유의 수가 증가하여 이로 인한 콘크리트 단면 내 인장응력에 의한 균열 확산을 제어하고, 균열을 가로 지르는 강섬유의 인발저항 메커니즘으로 인한 것으로 판단된다.

Table 3과 Fig. 11에 섬유 혼입률 별 인장강도와 강섬유가 혼입되지 않은 슬러리 강도에 대한 상대 강도비를 나타내었다. 본 실험의 경우 섬유 혼입률이 10%까지는 섬유 혼입률에 대한 인장강도비는 Fig. 11과 같이 2차적으로 증가함을 알 수 있다.

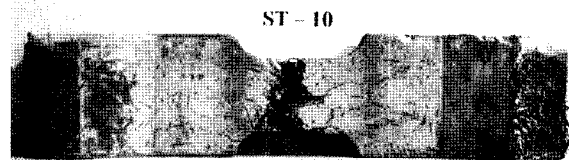


Fig. 9 Tension failure pattern of SIFCON with 10% volume fraction

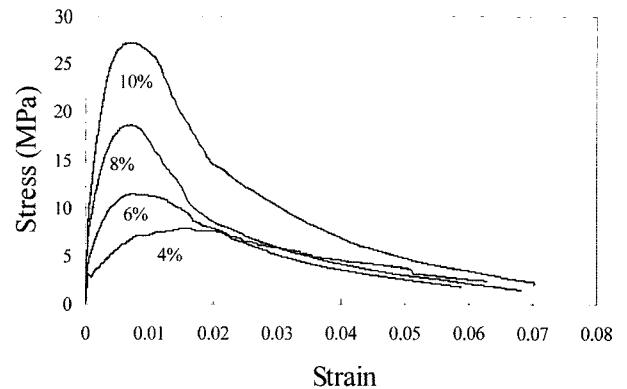


Fig. 10 Stress-strain curves of SIFCON in tension

Table 3 Tensile strength ratio of SIFCON to slurry

Volume fraction(%)	Tensile strength(MPa)	Strength ratio
0	3.1	1
4	7.8	2.51
6	11.5	3.71
8	18.6	6.0
10	27.2	8.77

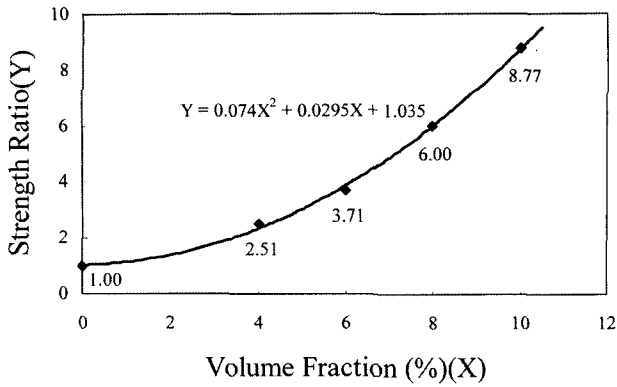


Fig. 11 Effects of fiber volume fraction on tensile strength

SIFCON의 인장거동을 고찰해 보면 균열이 발생한 이후의 거동은 하나의 주 균열의 확대에 의해 지배된다. 그러므로 균열 이전의 탄성 영역에서는 응력-변형률 곡선으로 인장 거동을 설명할 수 있지만 균열이 발생한 이후의 거동을 설명하기 위해서는 응력-변위의 관계를 나타내는 연화 곡선의 도입이 필요하다.

인장강도 이후 SIFCON의 인장 거동을 예측하기 위하여 Navalurkar⁸⁾가 제안한 표준화된 응력-변위 개념을 이용하였다. 인장강도 후 영역은 연성파괴를 하며 균열은 시험체 파괴단면 전반에 걸쳐 동시에 발생하고 그 후 강섬유의 인발거동에 의해 지배하는 것으로 가정한다. 또한, 균열을 가로지르는 강섬유의 브릿징 효과는 인발변위가 섬유 절반 길이와 같아질 때 완전히 감소한다고 가정한다. 따라서, 응력은 합성체의 인장강도에 의해, 최대하중 이후의 변위는 강섬유의 0.5배 길이에 의해 표준화 하며 표준화된 응력-변위 모델은 다음 식 (1)과 같다.

$$\left(\frac{f}{f_t}\right)^m + \left(\frac{w}{w_c}\right)^n = 1 \quad (1)$$

여기서, f 는 인장응력, f_t 는 인장강도, w 는 인장강도 이후의 인발변위, w_c 는 최대 인발변위(강섬유 길이의 0.5배, 15 mm)를 나타낸다.

본 실험 결과에 대한 표준화된 응력-변위곡선을 Figs. 12~15에, 연화 곡선에 대한 실험상수 m , n 을 Table 4에 나타내었다.

Figs. 12~15에 나타난 것과 같이 Navalurkar가 제안한 식 (1)의 표준화된 응력-변위 모델은 SIFCON의 최대하중 이후의 연화현상을 잘 묘사한다.

Table 4 Empirical constants for softening curves of SIFCON

Volume fraction	m	n
4%	0.22	1.17
6%	0.15	1.12
8%	0.23	0.76
10%	0.18	0.94

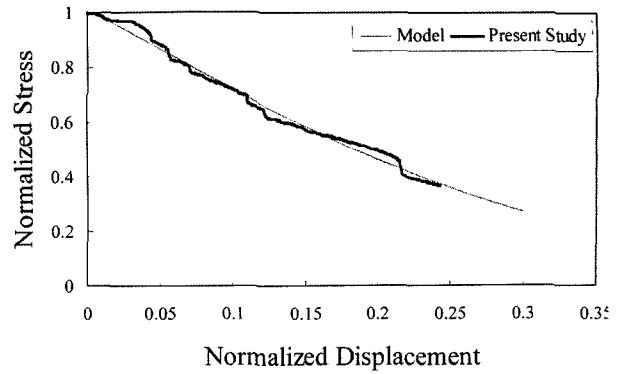


Fig. 12 Normalized stress-crack opening displacement curve of 4% volume fraction

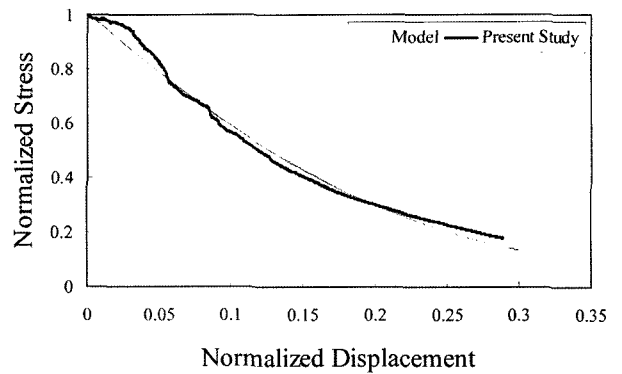


Fig. 13 Normalized stress-crack opening displacement curve of 6% volume fraction

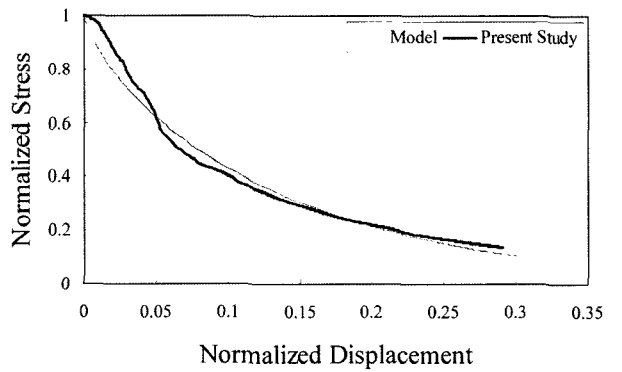


Fig. 14 Normalized stress-crack opening displacement curve of 8% volume fraction

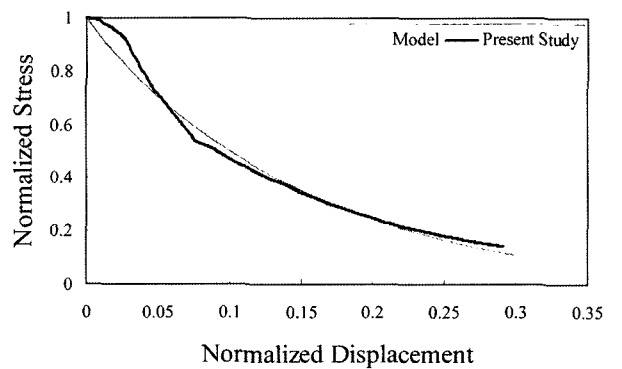


Fig. 15 Normalized stress-crack opening displacement curve of 10% volume fraction

4. 결 론

강섬유 혼입률의 변화에 따른 SIFCON의 강도 특성을 파악하기 위한 일련의 압축파괴실험과 인장파괴실험에서 구한 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

강섬유 혼입률의 증가에 따른 강도와 연성의 변화는 압축강도와 인장강도 모두 크게 증가하였다. 그러나 강섬유가 보강되지 않은 시멘트페이스트 슬러리와와 상대 강도비는 인장강도가 압축강도에 비해 강섬유 보강으로 인한 강도 증진 효과가 더 크다는 것을 알 수 있었다. 특히 압축강도는 강섬유 혼입률이 일정치 이상이 되면 강도에 미치는 영향이 적으며 단지 연성을 증가시킨다는 것을 알 수 있었다.

최대 인장강도 이후의 연화현상을 예측하기 위한 Navalurkar가 제안한 표준화된 응력-변위 모델은 SIFCON의 최대하중 이후의 파괴거동을 잘 나타낸다.

참고문헌

1. 한천구, 김성수, 박구병, “섬유혼입을 변화에 따른 고강

도 섬유보강 콘크리트의 방폭특성”, 한국구조물진단학회 논문집, 4권 3호, 2000, pp.129~1136.

2. Lankard, D. R. and Newell, J. K. *Preparation of Highly Reinforced Steel Fiber Reinforced Concrete Composites*, ACI SP-81, 1984, pp.286~306.
3. Homrich, J. and Naaman, A.E., *Stress-Strain Properties of SIFCON in Uniaxial Compression and Tension*, Report No. UMCE 87-7, University of Michigan, report submitted to AirForce Weapons Lab, 1987.
4. Reinhardt, H. W., “Optimization of SIFCON Mix”, *Proceedings of the International Conference on Recent Development in Fiber Reinforced Cements and Concretes*, Cardiff, UK, 18-20 September, 1989, pp.11~20.
5. Shah, S. P., “Do Fibers Increase the Tensile Strength of Cement-Based Matrix?” *Journal of ACI Materials*, Vol.88, No.6, 1991, pp.595~602.
6. Zeng, J., Klingenberg, P., and Bayasi, Z., *Slurry Infiltrated Mat Concrete(SIMCON) for Rehabilitation of Bridges and Pavements*, ACI SP-185, 2000, pp.55~68.
7. Naaman, A. E., *HPFRCCs: Properties and Application in Repair and Rehabilitation*, ACI SP-185, 2000, pp.1~16.
8. Navalurkar, R. K., Hus, C. T., Kim, S. K., and Wecharatana, M., “True Fracture Energy of Concrete”, *Journal of ACI Materials*, Vol.96, No.2, 1999, pp.213~225.

요 약 역학적 특성이 개선되고 고성능 건설 재료로 가장 주목받고 있는 슬러리 충전 섬유 콘크리트(SIFCON)의 역학적 특성을 분석하기 위해서 양단 폭크형의 강섬유를 4~10%의 체적비로 혼입하여 시험체를 제작한 후, 압축강도시험과 직접인장시험을 실시하였다. 물-시멘트 비는 0.4, 슬러리의 워커빌리티를 향상시키기 위해 실리카 흙과 유동화제를 각각 시멘트 중량의 10%, 0.5%를 혼입하였다. SIFCON의 강섬유 혼입률별 시험에서 나타난 압축강도는 강섬유가 혼입되지 않은 시멘트 페이스트와 비교 하였을 때 약 1.59~2.68배 증가하였으며, 인장강도는 약 2.51~8.77 증가하였다. 또한 강섬유의 혼입률이 증가함에 따라 인성과 연성도 크게 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 슬러리 충전 섬유 콘크리트, 직접인장시험, 시멘트슬러리, 인성, 연성