

초고강도 강섬유 보강 콘크리트의 휨특성에 관한 연구

A Study on the flexural Behavior of Ultra-Strength Steel Fiber Reinforced Concrete

류 금 성* 박 정 준** 강 수 태*** 고 경 택**** 김 성 욱*****

Ryu, Gum Sung · Park, Jung Jun · Kang, Su Tea · Koh, Kyung Taeg · Kim, Sung Wook

ABSTRACT

This paper presents a comparative evaluation of eight different types of steel fibers used as reinforcing material in concrete beams. The fibers which used ultra-strength steel fiber reinforced concrete were fiber length of 30 to 60mm, aspect ratio of 43 to 86, W/B ratio 0.16 to 0.30, fiber types of both ends hooked and straight shape and fiber volume fraction of 1 to 5%.

As for the test results, it estimated the influence of fiber volume, length and aspect ratio on the mechanical properties of high toughness concrete, the mechanical properties improved according to increase fiber volume, to increase aspect ratio and to long fiber length. And the reasonable fiber volume in high toughness concrete was analyzed 2% based on the results of mechanical properties.

1. 서론

콘크리트는 압축에 강한 특성을 지닌 재료로서 각종 건설공사에 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 콘크리트는 인장 및 휨강도가 낮고 균열에 대한 저항성이 약한 취성 재료라는 단점을 가지고 있으며, 이의 보완을 위해 철근이 사용되어 왔다. 또한 콘크리트의 인장 강도와 인성을 개선하기 위한 노력의 일환으로 최근 외국에서는 ECC(Engineered Cementitious Composite), RPC(Reactive Powder Concrete), CRC(Compact Reinforced Composite), SIFCON(Slurry Infiltrated Concrete), SIMCON(Slurry Infiltrated Mat Concrete) 등 다양한 고인성 시멘트 복합체가 개발되고 주목을 받고 있다. 특히 국내에서도 고인성 시멘트 복합체의 한 종류인 RPC로 선유도 보도교에 적용된 사례가 있어 관심이 높아지고 있으나, 이에 대한 연구는 전무한 실정이다.

고인성 시멘트 복합체는 시멘트계 재료를 섬유로 보강한 복합재료로서 종래의 섬유보강콘크리트(Fiber Reinforced Concrete, FRC)의 성능을 발전시켜 진일보된 재료이다. 역학적 특성으로서 휨, 인장, 압축 파괴 시에 인성이 대폭적으로 향상됨은 물론 휨응력 하에서도 다수의 균열이 분포되는 특성을 가지고 있으며, 다수 균열의 발생 이후에도 결보기 변형의 증가와 함께 응력이 증가하는 변형경화(straining hardening)와 무수한 미세 균열이 분산되는 특성을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 고인성 섬유보강 콘크리트의 휨거동을 파악하고자 강섬유의 혼입율, 형상비, 길이 및 물-결합재비를 변수로 하여 4점 하중재하 휨시험을 실시하였다. 이러한 연구 결과는 강섬유

* 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 연구원

** 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 연구원

*** 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 연구원

**** 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 선임연구원

***** 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 수석연구원

의 종류와 혼입율의 선택에 대한 방향을 제시하는데 유용한 자료가 될 것으로 판단된다.

2. 사용재료 및 시험방법

2.1 사용재료

본 연구에서 사용한 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트이며 혼화제는 실리카폼을 사용하였다. 골재는 5 mm이하의 모래만 사용하였고, 굵은 골재는 사용하지 않았으며, 밀도 2.62g/cm³, SiO₂ 93%인 규사를 사용하였다. 충전제는 SiO₂ 98%이상이고, 평균입경 13 μm, 비중 2.6인 것으로 사용하였다. 시멘트 복합체의 유동성을 확보하기 위해 폴리칼본산계의 고성능 감수제를 사용하였다. 배합시 혼합순서는 먼저 잔골재, 실리카 폼, 충전제 및 시멘트를 동시에 투입하여 건비빔을 실시한 후 물, 고성능 감수제를 넣고, 이후에 섬유를 고르게 투입하는 순서로 하였다. 이러한 과정을 통해 100×100×400 mm인 직사각형 단면의 공시체를 제작하였다. 표 2는 콘크리트 배합비를 나타내고 있고 표 3은 시험변수를 나타내고 있다.

표 2 압축시험용 콘크리트 배합(질량비)

W/B	0.16~0.3
시멘트	1
실리카폼	0.25
충전제	0.3
모래	1.1
고성능 감수제	0.016
강섬유	0.01~0.05

표 3 시험변수

기호	길이(mm)	직경(mm)	형상비	W/B	섬유타입	Vf(%)	비고
A80/L30	30	0.375	80	0.2	hooked	2	길이
A80/L40	40	0.5					
A80/L60	60	0.75					
A86/L30	30	0.35	86				
A60/L30		0.5	60				
A43/L30		0.7	-43				
A65/L13	13	0.2	65		straight	0	혼입률
A65/L30						1	
						2	
						3	
				4			
	5						
A65/L30	13	0.2	65	straight	0.16	2	W/B
					0.18		
					0.20		
					0.23		
					0.26		
					0.30		

2.2 시험방법

본 연구에서 이용한 시험장치는 하중과 변위 조절이 가능한 20tonf 용량의 UTM을 사용하였으며 하중제하 방식은 변위조절 방식을 택하여 가력속도를 분당 시편 지간(300 mm)의 1/1500으로 조절하여 시험을 실시하였으며 공시체의 처짐을 측정하기 위해서 50mm 용량의 LVDT를 사용하였다. 그림 1은 처짐 측정의 개요를 나타내고 있다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 강섬유 길이에 따른 휨거동

본 실험에서는 물-결합재비 20%에 대해 강섬유 길이를 각각 30, 40, 60mm에 대해 직경이 각각 0.375,

0.5, 0.75 mm, 후크형태의 형상으로 실험을 수행하였다.

그림 2는 강섬유 길이에 따른 휨강도와 처짐과의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 섬유의 길이에 상관없이 휨강도가 35MPa 이상으로 상당히 높은 것을 알 수 있으며, 이것은 일반 콘크리트의 휨강도에 비해 10배 이상 향상된 값이다. 강섬유의 길이의 영향을 살펴보면, 섬유의 길이가 길수록 등가 휨강도는 큰 차이를 보이지 않고 있으나, 휨강도-처짐 곡선을 보면 섬유의 길이가 길수록 휨강도가 크게 나타남과 동시에 최고하중 이후의 연성거동을 확인할 수 있다. 그러나 최초균열이 발생한 이후 변형률 증가와 함께 강도가 증가하는 변형률 경화(strain hardening) 현상은 다소 작은 변형률 구간에 대해서만 나타났다. 이것은 최초 균열 이후 섬유를 통한 응력 전이의 능력이 부족한 상태에서 응력의 재분포가 제대로 일어나지 못한 것에 기인하는 것으로 사료된다.

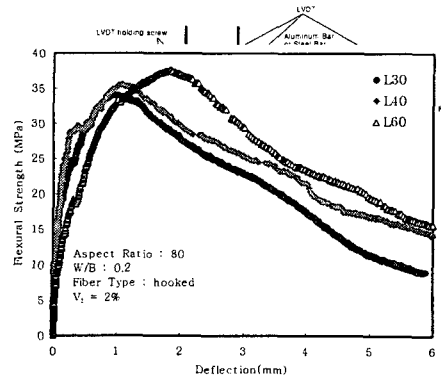


그림 2 강섬유 길이에 따른 휨강도-처짐 관계

3.2 강섬유 형상비에 따른 휨거동

본 실험에서는 물-결합재비 20%에 대해 강섬유 형상비를 각각 43, 60, 86 세 가지 경우에 대해 실험을 수행하였다. 강섬유는 직경이 각각 0.7, 0.5, 0.35 mm, 후크형태의 형상이고 국내생산 제품을 사용하였다.

그림 3은 강섬유에 대해 형상비에 따른 휨하중-처짐 관계곡선을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 형상비가 클수록 휨강도는 증가하였다. 이러한 결과는 섬유와 복합체 사이의 결합력과 계면전단력에 의해서 복합체에서 섬유로의 응력전달에 기인하기 때문에 같은 양의 혼입량에 대해서도 휨강도에 영향을 미치는 주요 인자는 섬유의 형상비임을 알 수 있다.

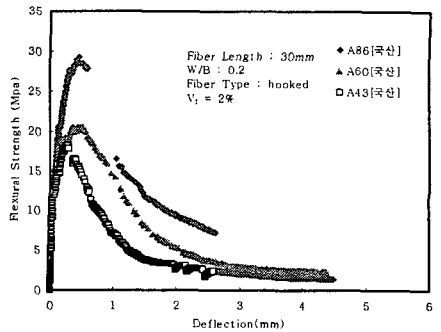


그림 3 강섬유의 형상비에 따른 휨강도-처짐의 관계

또한 그림 2와 그림 3의 결과에서 유사한 형상비를 비교해보면 국산 강섬유를 사용한 콘크리트의 휨강도는 외산 강섬유를 사용한 경우와 유사하나 인성거동에서 국산 강섬유를 사용한 경우가 외산 강섬유에 비해 상당히 취성 파괴 형태를 나타내고 있다. 이러한 결과는 현재로서 명확하지 않으나 국산 강섬유가 외산 강섬유에 비해 상대적으로 섬유와 매트릭스의 부착강도가 저하되기 때문으로 사료되고, 이에 대한 상세한 분석은 계속 수행할 예정이다.

3.3 강섬유 혼입률에 따른 휨거동 특성

본 실험에서는 물-결합재비 20%에 대해 강섬유 혼입률을 각각 1, 2, 3, 4, 5% 다섯 가지 경우에 대해 실험을 수행하였다. 강섬유는 $\phi 0.2 \times 13\text{mm}$ 의 직선 형태를 가진 것을 사용하였다. 그림 4는 강섬유에 대해 혼입률에 따른 휨강도-처짐 관계곡선 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 강섬유 혼입률이 증가할수록 휨강도는 점차 증가하는 경향을 나타내고 있으나, 1%와 5%를 제외한 2, 3, 4% 혼입률의 경우 등

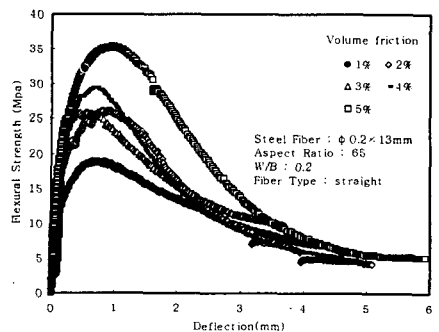


그림 4 강섬유 혼입률에 따른 휨강도-처짐 곡선

가휨강도 및 휨강도의 큰 차이가 없는 것으로 나타나 2%가 가장 적정 혼입률로 판단된다.

휨강도-처짐 곡선을 보면 최초균열이 발생한 이후 변형률 증가와 함께 강도가 증가하는 변형률 경화(strain hardening)현상은 다소 작은 변형률 구간에 대해서만 나타났다. 이것은 최초 균열 이후 섬유를 통한 응력 전이의 능력이 부족한 상태에서 응력의 재분포가 제대로 일어나지 못한 것에 기인하는 것으로 사료된다. 따라서 multi-cracking 현상이 나타나지 못하고 주로 하나의 주 균열이 크게 형성되는 형상으로 나타났다. 주로 섬유의 가교(bridging)역할로 인해 휨거동이 다소 향상된 것으로 판단된다.

3.4 W/B비에 따른 휨거동 특성

본 실험에서는 물-결합재비를 각각 0.18, 0.2, 0.23, 0.26, 0.3 다섯 가지 경우에 대해 실험을 수행하였다. 강섬유는 $\phi 0.2 \times 13\text{mm}$, 직선형태, 형상비 65의 강섬유를 사용하였다. 그림 5는 강섬유에 대해 W/B의 변화에 따른 휨강도-처짐 관계곡선을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 W/B비가 낮을수록 휨강도는 점차 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 결과는 압축강도가 증가할수록 섬유와 복합체 사이의 결합력이 증가하여 휨강도가 크게 나타내는 것으로 판단된다.

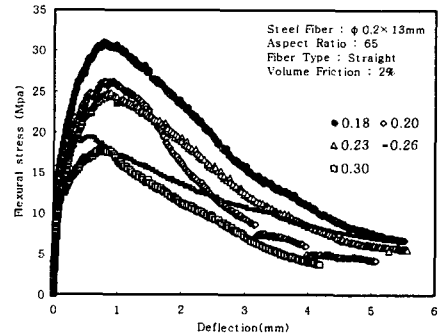


그림 5 물-결합재비에 따른 휨강도-처짐 곡선

4. 결론

본 연구에서는 초고강도 강섬유보강 콘크리트의 섬유길이, 형상비, 혼입률 및 물-결합재비 총 18가지의 휨거동을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 섬유의 길이가 길수록, 형상비가 클수록, 그리고 혼입률이 증가할수록 향상되었고 역학적 특성의 결과로부터 고인성 콘크리트에서 적정 섬유의 혼입률은 2%임을 확인하였다.
- (3) 최초균열이 발생한 이후 변형률 증가와 함께 강도가 증가하는 변형률 경화(strain hardening)현상은 다소 작은 변형률 구간에 대해서만 나타났다. 이것은 최초 균열 이후 섬유를 통한 응력 전이의 능력이 부족한 상태에서 응력의 재분포가 제대로 일어나지 못한 것에 기인하는 것으로 사료된다. 따라서 multi-cracking 현상이 나타나지 못하고 주로 하나의 주 균열이 크게 형성되는 형상으로 나타났다. 주로 섬유의 가교(bridging)역할로 인해 휨거동이 다소 향상된 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 한국건설기술연구원, "장수명 합리화 교량 바닥판 개발(I)", 2002. 12.
2. 전찬기, "강섬유의 형태에 따른 SFRC보의 휨거동에 관한 연구", 대한토목학회논문집 제12권 제4호, 1992. 12.
3. 배주성 외 3인 "장·단 강섬유를 혼입한 고강도콘크리트의 휨파괴특성" 대한토목학회논문집 제22권 제3-A호, 2002. 5.
4. 박승범 외 2인 "SFRC의 강섬유 형상과 시험방법에 따른 휨강도 및 휨인성 특성".
5. Romualya, James P. and Baston, Gordon B., "Behavior of Reinforced Concrete Beams with Closely Spaced Reinforcement", ACI Jour., Vol.60, June, 1963, pp775~790