

# 전단철근이 없는 I형 휨보강 UHPCC 보의 거동해석

## Analysis of the Reinforced I section UHPCC (Ultra High Performance Cementitious Composites) beam without stirrup

김성욱\*    한상묵\*\*    강수태\*\*\*    공정식\*\*\*\*    강준형\*\*\*\*    전상은\*\*\*\*\*

Kim, Sung Wook   Han, Sang Muk   Kang, Su Tae   Kong, Jecng Shick   Kang, Jun Hyung   Jun, Sang Eun

### ABSTRACT

Over last decade extensive researches have been undertaken on the strength and behaviour of Fiber Reinforced Concrete(FRC) structures. But the use of Ultra-High Strength Steel Fiber Cementitious Concrete Composites is in its infancy and there is a few experiments, analysis method and design criteria on the structural elements constructed with this new generation material which compressive strength is over 150 MPa and characteristic behaviour on the failure status is ductile.

The objective of this paper is to investigate and analyze the behaviour of reinforced rectangular structural members constructed with ultra high performance cementitious composites (UHPCC). This material is known as reactive powder concrete (RPC) mixed with domestic materials and its compressive strength is over 150MP. The variables of test specimens were shear span ratio, reinforcement ratio and fiber quantity. Even if there were no shear stirrups in test specimens, most influential variable to determine the failure mode between shear and flexural action was proved to be shear span ratio. The characteristics of ultra high-strength concrete is basically brittle, but due to the steel fiber reinforcement behaviour of this structure member became ductile after the peak load. As a result of the test, the stress block of compressive zone could be defined. The proposed analytical calculation of internal force capacity based by plastic analysis gave a good prediction for the shear and flexural strength of specimens. The numerical verification of the finite element model which constitutive law developed for Mode I fracture of fiber reinforced concrete correctly captured the overall behaviour of the specimens tested.

### 1. 서론

근래에 섬유보강 고강도 콘크리트와 고성능 시멘트 복합재료에 대한 획기적인 발전이 계속되고 있다. 공극의 다소에 따라 시멘트 복합재료의 강도는 큰 영향을 받으므로 이를 감소시키기 위한 방법으로 macro defect free(MDF)시멘트와 고분체 미립자(Densified with Small Particle, DSP)를 사용한 고성능 시멘트 복합재료가 연구되었으며(Jenning 1992, Lin 1992), FRC 구성요소 중 굵은 골재만 뺀 상태의 ECC(Engineered Cementitious Composites)는 뛰어난 연성거동과 향상된 인장 변형률을 보이고 있으나 주로 보수보강재로 사용되고 있다. 이러한 DFRCC(Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites)중 RPC(Reactive Powder Concrete)는 150Mpa 이상의 압축강도, 15Mpa 정도의 인장강도

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 구조연구부 수석연구원 · E-mail: swkim@kict.re.kr  
\*\* 정회원 · 금오공과대학교 토목·환경공학부 교수 · E-mail: smhan@kumoh.ac.kr  
\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 구조연구부 연구원 · E-Mail: alphard@kict.re.kr  
\*\*\*\* 정회원 · 금오공과대학교 토목공학과 대학원 석사과정 · E-Mail: kongkor@kumoh.ac.kr  
\*\*\*\*\* 정회원 · 금오공과대학교 토목공학과 대학원 석사과정 · E-Mail: bonaphart@kumoh.ac.kr  
\*\*\*\*\* 정회원 · 삼성건설 토목기술팀

를 가진 초고성능 연성 콘크리트로서 구조부재에 사용된 예가 몇 가지 있다. 1997년 캐나다 퀘벡주 Sherbrook 인도교, 2002년 국내의 선유교는 보행자 교량으로 건설되었으며, 2003년 호주의 Shepherd's Gully Creek에 세계 최초의 차량 통행용 교량이 건설되었다. 본 연구에서는 국내의 재료로 150Mpa 이상의 강도를 구현할 수 있는 배합을 토대로 전단철근이 없는 I형 휩보강 초고강도 섬유보강 콘크리트로 보를 제작하여 실험 결과와 해석결과를 비교 검토하여 이러한 보를 해석할 수 있는 기반과 이론적 근거를 마련하고자 한다.

## 2. 초고강도 섬유보강 I형 콘크리트보의 실험

본 연구에서는 전단경간비, 철근비, 섬유혼입률, 단면형상을 변수로 하여 12개의 실험체를 제작하였다. 시험체의 종류와 실험변수 값은 표1과 같고 표2는 UHPCC의 기본배합이며, 그림1은 실험체의 단면형상이다.

표 1. 실험체의 종류와 실험변수 값

구분	철근비	섬유혼입률	전단경간비	
A 단면	SR20VF2SS4	20%	2%	4
	SR35VF2SS4	35%	2%	4
	SR50VF1SS4	50%	1%	4
	SR50VF2SS4	50%	2%	4
	SR50VF3SS4	50%	3%	4
	SR50VF2SS2	50%	2%	2
B 단면	SR41VF2SS4	41%	2%	4
	SR41VF2SS6	41%	2%	6
	SR41VF2SS8	41%	2%	8
	SR50VF2SS4	50%	2%	4
	SR50VF2SS6	50%	2%	6
	SR50VF2SS8	50%	2%	8

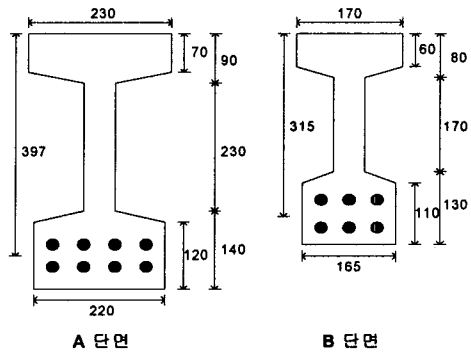


그림 1. 실험체의 단면치수 및 형상

표 2. UHPCC 시험체의 기본 배합표(중량비)

W/B	시멘트	실리카흄	충전재	잔골재	고성능감수제
0.2	1	0.25	0.3	1.1	0.016

## 3. 소성이론에 의한 내하력

Plastic theory에 의해 UHPCC 시험체에 대해서 휩과 전단에 대해 그 파괴거동을 해석하였다. UHPCC 시험체의 전단력은 보의 지점에서 발생하는 극한 하중과 사인장 균열 하중이 같다는 가정하에  $x$ 를 구하여  $V_u$ 와  $V_{cr}$ 를 계산하였다<sup>(1)</sup>  $V_u$ : 극한 하중,  $V_{cr}$ : 사인장 균열 하중

$$V_u = \frac{A_{af} f_c}{a'} \left[ \frac{0.118}{\frac{x'}{a'}} + \frac{0.25 \beta \sigma_f t}{1 - \frac{x'}{a'} \left(1 - \frac{t}{h}\right)} \right]$$

$$V_{cr} = \frac{f_t \cdot A_c \frac{e}{h} \left[ \left(\frac{a'}{h}\right)^2 \left(\frac{x}{a'}\right)^2 + 1 \right]}{\frac{a}{h} + \frac{a'}{h} \left(\frac{x}{a'} - 1\right)}$$

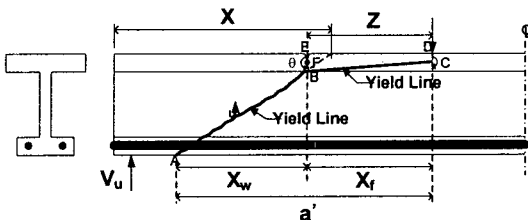


그림 2. Yield Line

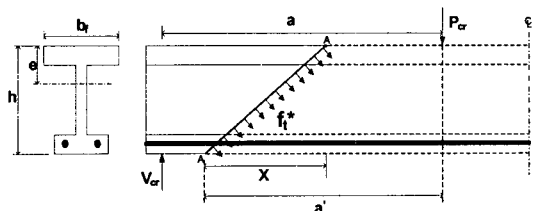


그림 3. Cracking load

UHPCC 시험체의 휨모멘트 산정은 그림4의 응력블럭 모델로 산출하였다. UHPCC의 압축구역의 응력 블록은 공시체 실험 및 보의 스트레인을 볼 때 삼각형 모양을 형성하고 있다. UHPCC는 초고강도의 압축강도뿐만아니라 강섬유 혼입으로 인해 상당한 인장강도를 지니고 있으므로 중립축 하부의 UHPCC 인장 응력 블록을 web부분과 flange 부분을 고려하였다.

$$M = A_s f_y (d - u) + f_{tc} (h - e) b_w \left( \frac{h}{2} + \frac{e}{2} - u \right) + f_{tc} t_b (b - b_w) \left( h - \frac{t_b}{2} - u \right)$$

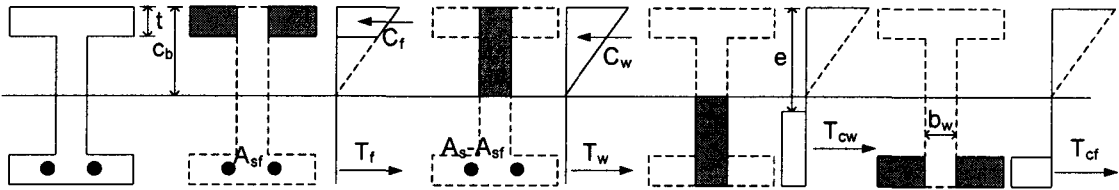


그림 4. 휨모멘트 산정 모델

각 시험체에 대해서 휨모멘트와 전단력에 상응하는 파괴하중과 파괴모드는 표3과 같으며, 실험결과와 Plastic analysis와 비교하였다.

표 3. UHPCC 실험체의 파괴하중과 파괴모드

구분	실험결과		Plastic analysis					
	파괴하중 (tonf)	파괴모드	휨모멘트 (tonf · m)	휨파괴 하중 (tonf)	전단력 Vcr (tonf)	전단파괴 하중 (tonf)	파괴모드	
A 단면	SR20VF2SS4	43	Flexural	30.49	38.40	19.67	39.33	Flexural
	SR35VF2SS4	52	Shear	52.28	65.84	19.67	39.33	Shear
	SR50VF1SS4	35	Shear	62.98	79.33	15.70	31.41	Shear
	SR50VF2SS4	38	Shear	66.25	83.44	19.67	39.33	Shear
	SR50VF3SS4	60	Shear	69.59	87.65	23.30	46.60	Shear
	SR50VF2SS2	110	Shear	66.25	166.89	26.61	53.22	Shear
B 단면	SR41VF2SS4	50	Shear	29.99	47.61	14.44	28.88	Shear
	SR41VF2SS6	27	Shear	29.99	31.74	12.31	24.62	Shear
	SR41VF2SS8	22	Flexural	29.99	23.81	11.03	22.06	Shear
	SR50VF2SS4	43	Shear	34.28	54.41	14.44	28.88	Shear
	SR50VF2SS6	31	Shear	34.28	36.27	12.31	24.62	Shear
	SR50VF2SS8	28	Flexural	34.28	27.20	11.03	22.06	Shear

#### 4. 유한요소 해석

유한요소 모델링에 있어서 콘크리트 요소는 2차원 평면 응력 요소, 즉 등방일축변형율을 이용하여 2축 응력을 받는 철근콘크리트 평면 응력 해석<sup>(2)</sup>을 수행하였다. 불규칙한 방향으로 불연속적으로 배치되어 있는 강섬유에 의한 콘크리트 인장응력을 VEM으로 모델링 하였다<sup>(3)</sup>. 철근은 선형/비선형 탄성/소성 특성을 지닌 2절점 트러스 요소로 모델링 하였다. 기하학적 비선형 방정식을 해석하는 해법으로 arclength 방법을 사용하였다. 그림5~8은 제작한 실험체를 유한요소해석을 실시하여 실험치와 비교한 것이다.

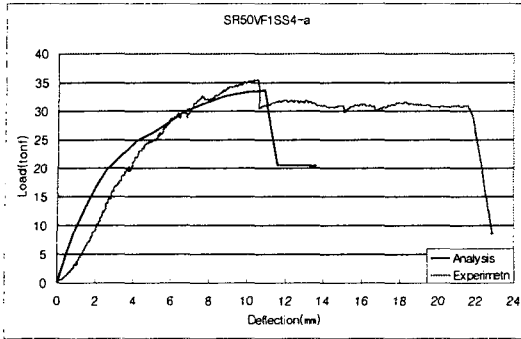


그림 5. SR50VF1SS4의 하중처짐곡선

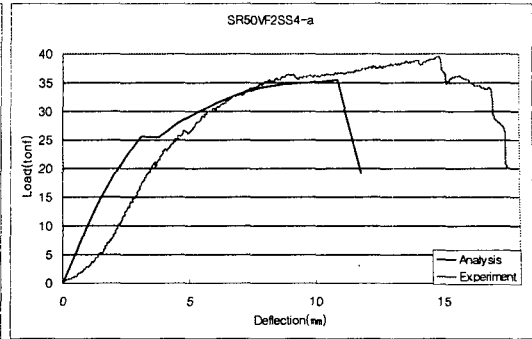


그림 6. SR50VF2SS4의 하중처짐곡선

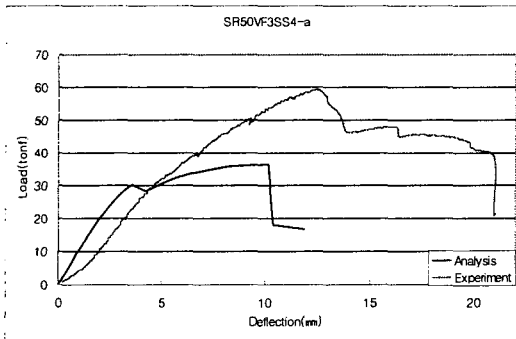


그림 7. SR50VF3SS4의 하중처짐곡선

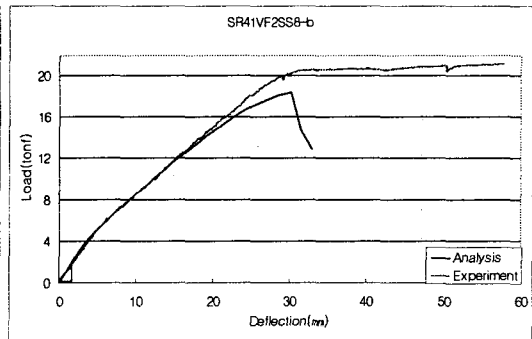


그림 8. SR41VF2SS8의 하중처짐곡선

## 5. 결론

- (1) 전단철근 보강을 하지 않고 복부폭이 50mm로 좁기 때문에 I형보는 전단파괴 양상이 지배적이나, 강섬유의 압축구역 구속효과와 인장응력 향상 효과로 인하여 전단철근 보강을 하지 않더라도 복부폭, 단면의 높이 등을 변화시켜 휨파괴 연성거동을 유도할 수 있다.
- (2) 초고강도 섬유보강 콘크리트의 압축구역에서 응력불균은 공시체 실험과 보부재 실험에서 삼각형 분포이다. 이 콘크리트 응력불균, 소성이론, 콘크리트 매트릭스의 Mohr-Column 이론 등을 이용하여 실험파괴하중과 근사한 전단파괴하중, 휨파괴하중을 산정하였다.
- (3) 유한요소해석에서 강섬유 혼입으로 인한 콘크리트 인장강도의 증진은 VEM 모델을 사용하여 반영하였으며 최대하중 이후의 softening 효과를 비교적 근사하게 해석하였으나, 전단경간비와 철근비 변화에 따른 콘크리트 파괴역학적 거동해석의 정확성을 보완해야할 필요성이 있다.

### 감사의 글

본 연구는 건교부 2003년도 산·학·연 과제 '초고성능 시멘트 복합재료를 활용한 교량거더 개발'에 관한 일련의 연구로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Jin-Ping, Zhang., " Strength of Cracked Concrete", ABK Department of Structural Engineering Danmarks Tekniske Universitet - Technical University of Denmark, 1994
2. Foster, S.J., 1992a. "An Application of the Arc Length Method Involving Concrete Cracking", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 33, No. 2, pp: 269-285
3. J Y L.Voo, S J Foster., " Variable engagement model for fibre reinforced concrete in tension", UNICIV REPORT No. R-420, The university of new south wales sydney 2052 australia, June, 2003