

철근 이중 콘크리트 보의 휨 및 전단 거동

박대호^{1)*} · 박재민¹⁾ · 김희대¹⁾

¹⁾ 한양대학교 토목공학과

(2004년 12월 9일 원고접수, 2005년 4월 28일 심사완료)

Flexural and Shear Behavior of Reinforced Dual Concrete Beam

Tae-Hyo Park^{1)*}, Jae-Min Park¹⁾, and Hee-Dae Kim¹⁾

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

(Received December 9, 2004, Accepted April 28, 2005)

ABSTRACT

In this study, reinforced dual concrete beam (RDC beam) composed of steel fiber reinforced concrete (SFRC) in the tension part and normal strength concrete (NSC) in the compression and remaining part is proposed. It is the epochal structural system that improves the overall structural performances of beam by partially superseding the steel fiber reinforced concrete in the lower tension part of conventional reinforced concrete beam (RC beam). Flexural and shear tests are performed to prove the structural excellence of RDC beam in comparison with RC beam. An analytical method is proposed to understand the flexural behavior and is compared to experimental results. And for shear behavior, experimental results are compared to empirical equations predicting the ultimate shear strength of full-depth fiber reinforced concrete beam to examine the behavior of RDC beam under shear. From this studies, it is proved that RDC beam has more superior structural performance than RC beam, and the analytical method for flexural behavior agrees well with experimental results, and the partial-depth fiber reinforcements have no noticeable effect on ultimate shear strength but it is considerably effective to control and prevent evolutions of crack.

Keywords : reinforced dual concrete beam, conventional reinforced concrete beam, steel fiber reinforced concrete

1. 서 론

기존 철근콘크리트 보 (Conventional Reinforced Concrete Beam, RC 보)에서는 콘크리트의 낮은 인장강도와 인장 변형률 때문에 콘크리트에 균열이 발생하게 되면 인장부의 콘크리트 하중 저항 능력은 상실되는 것으로 간주한다. 많은 연구자들은 RC 보의 이러한 제약을 없애고 구조적으로 보다 우수한 성능을 얻기 위한 방안으로 일반 RC 보에 섬유를 보강한 섬유 보강 콘크리트 보 (Fiber Reinforced Concrete Beam, FRC 보)에 대한 활발한 연구를 통해 FRC 보는 일반 RC 보에 비해 휨 강성, 균열 및 극한 강도가 향상되고, 섬유에 의해 균열 진전이 억제되는 효과가 있음을 보여주었다¹⁾.

그러나 섬유는 다른 콘크리트 구성 재료에 비해 상대적으로 고가이므로 실제 구조물에 적용하기에는 경제적 측면에서 많은 한계가 따른다. 그런데 Gunasekaran²⁾가 단면

의 1/2 높이까지 섬유를 보강한 콘크리트를 적용한 새로운 구조의 콘크리트 보를 제안한 이후 몇몇 연구자들에 의해서 이와 유사한 형태의 보에 대한 구조적 성능 검증 연구가 진행 되어오고 있다. 이는 고가인 섬유의 양을 최소화하여 경제적 한계를 극복함과 동시에 FRC의 장점이 효과적으로 반영되어 구조적 성능이 향상된 FRC 보의 실제 적용 가능성이 있음을 의미한다.

Gunasekaran²⁾은 단면의 1/2 높이까지 FRC가 적용된 보와 전 단면에 걸쳐 FRC가 적용된 보의 휨 성능을 평가한 결과 두 보의 구조적 성능이 유사함을 보여주었다. Swamy and Al-Ta'am³⁾는 휨 철근의 종류 및 양 그리고 콘크리트에 보강된 섬유의 양을 주요 변수로 하여 단면의 전체 및 반까지 FRC가 적용된 보에 대한 휨 실험 연구로부터 단면 높이의 반까지 FRC가 적용된 보에 비해 전 단면에 걸쳐 FRC가 적용된 보의 구조적 성능이 일반적으로 우수하지만 그 차이는 미미하다는 것을 보여주었다.

본 논문에서는 철근콘크리트 보의 인장부 하단 일부에만 강섬유 보강 콘크리트 (Steel Fiber Reinforced Concrete, SFRC)가 부분적으로 적용되어 기존의 FRC 적용깊이 보

* Corresponding author

E-mail : cepark@hanyang.ac.kr

©2005 by Korea Concrete Institute

다 훨씬 작은 적용깊이를 통해서 구조적 성능의 향상은 물론 경제적 효율성도 동시에 고려된 철근 이중 콘크리트 보 (Reinforced Dual Concrete Beam, RDC 보)가 제안된다. 또한 SFRC 적용 높이를 달리한 두 종류의 RDC 보와 비교를 위한 기준 시험체인 RC 보의 휨 및 전단 성능과의 비교 평가를 통해 RDC 보의 효율을 검증하고 RDC 보의 휨 성능 예측을 위한 방법을 제안하고자 한다. 본 연구에서 제안된 RDC 보의 구조가 Fig. 1에 나타나 있다.

2. 실험계획

2.1 사용재료

본 연구에서는 SFRC 제조를 위해 Table 1과 같은 배합이 실시되었다. 시멘트는 I종 보통 포틀랜드 시멘트가 사용되었고, 고로 슬래그와 실리카 흙이 각각 바인더 중량의 20%, 5%로 치환되어 사용되었다. 유동성 확보를 위해 $G_{max}=13\text{mm}$ 인 굵은골재가 사용되었고 잔골재로는 깨끗한 강사가 사용되었다. 섬유는 항복강도 687MPa, 형상비가 60인 번들타입의 crimped-end 형태의 강섬유가 사용되었다. 또한 섬유 및 바인더의 고른 분산을 위해 폴리카본산계 감수제가 사용되었다. 그리고 보통 강도 콘크리트 (Normal Strength Concrete, NSC)는 압축강도가 29.1MPa인 레디 믹스트 콘크리트가 사용되었다. 휨철근은 항복강도가 343MPa인 이형철근이 사용되었다. 경화된 콘크리트의 역학적 특성값은 각각 KS F 2403, 2405 그리고 2408 규정에 따라 각각 100mm × 200mm 원주형 공시체와 100mm × 100mm × 400mm 각주형 공시체를 제작하여 측정된 평균값이 사용되었으며 탄성 계수는 콘크리트

구조 설계기준에 규정된 식을 통해 계산된 값이 사용되었다. 경화된 콘크리트의 역학적 특성값은 Table 2와 같다.

2.2 시험 보

본 연구에서는 총 9개의 시험 보들이 제작되었다. 휨 시험 보의 경우, 두 개의 인장 철근비 $\rho=0.26\rho_b$ ($A_s=11.61\text{cm}^2$)와 $\rho=0.45\rho_b$ ($A_s=19.27\text{cm}^2$)에 대해 각각 SFRC를 130mm와 170mm 높이까지 적용하여 제작되었고 전단 시험 보의 경우, $\rho=0.45\rho_b$ 에 대해서만 제작되었다. 휨 시험보들은 전단 파괴를 막기 위해 전단 철근이 보강되었고 전단 시험보들은 전단 파괴를 유도하기 위해 전단 철근이 생략되었다. 보의 길이는 5.4m 이고 단면의 크기는 폭 300mm, 높이 500mm이다. 시험 보의 제원과 개요가 Fig. 2와 Table 3에 제시되어 있다.

2.3 타설 및 양생

RDC 보 타설 시 두 층간의 분리 및 혼합을 막고 일체화 거동을 확보하기 위해 SFRC 타설 후 4~8시간의 타설 간격을 두고 NSC를 타설하였다. 4~8시간의 타설 간격으로 제작된 공시체의 단면의 모습이 Fig. 3에 나타나 있다. 두 층간의 분리는 발생되지 않았으며 타설 간격은 적절한 것으로 확인되었다.

Table 2 Measured properties of hardened concrete

Class	f_{ck} (MPa)	f_t (MPa)	f_r (MPa)	E (GPa)
NSC	29.1	2.6	4.7	25.4
SFRC	84.0	11.2	14.3	37.9

Table 1 Mix design of SFRC

Gmax (mm)	Slump (cm)	w/c (%)	Air (%)	v_f (%)	Unit weight (kg/m ³)						S.P (c×0.02 %)
					w	c	BFS	SF	S	G	
13	15	26	3.7	1.5	170	480	131	33	678	805	9.81

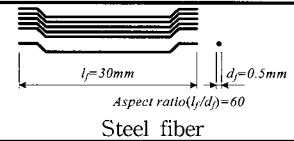


Table 3 Summary of experimental programs

Class	Designation	Reinforcement ratio		Stirrups	SFRC application depth (mm)
		ρ	ρ		
Flexural test	RC I (f)	$\rho=0.26\rho_b$	0.00294	11-D13	-
	RDC I -130(f)				130
	RDC I -170(f)				170
	RC II (f)	$\rho=0.45\rho_b$			-
	RDC II -130(f)				130
	RDC II -170(f)				170
Shear test	RC II (s)	-			
	RDC II -130(s)	130			
	RDC II -170(s)	170			

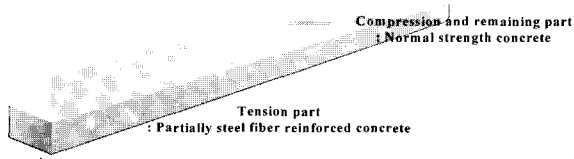


Fig. 1 System of reinforced dual concrete beam

SFRC의 양생조건은 콘크리트의 역학적 특성값에 큰 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다⁴⁾. 따라서 초기 급격한 건조로 인한 품질 저하를 막기 위해 양생포를 덮고 살수를 실시하여 시험 보들이 양생되었다.

2.4 시험방법

9,810 kN 용량의 UTM (Universal Testing Machine)을 이용하여 3mm/min의 속도의 변위 제어 방식으로 4점 가력되었고 중앙 경간 및 중앙 경간과 지점 사이에 LVDTs (Linear Variable Differential Transducers)를 설치하여 처짐이 측정되었다. 시험보가 설치된 후의 측정 장비 배열이 Fig. 4에 나타나 있다.

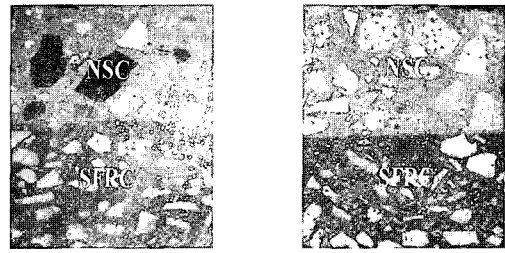
3. 휨 거동

3.1 기본 가정 사항

RDC 보의 휨 거동을 해석하기 위해 하중-처짐 곡선은 Fig. 5에 보이는 바와 3단계로 가정되었다. 적용된 가정 사항은 다음과 같다.

1) Bernoulli의 가설에 따라 변형률 분포는 선형이다.

- 2) 철근 및 주위 콘크리트의 변형률은 콘크리트의 균열이나 철근의 항복 이전에는 동일하다.
- 3) 극한 상태에서 압축부의 보통 강도 콘크리트의 등가 직사각형 응력 블록은 $0.85f_{ck}$ 을 적용한다.
- 4) 초기 균열까지 RDC 보는 선형 탄성 재료이고 선형 탄성 이론을 적용하여 균열 하중 및 처짐을 계산할 수 있다.
- 5) 극한 상태까지 인장부 하단의 강섬유 보강 콘크리트는 인장응력에 일정하게 저항한다.
- 6) 모든 재료는 완벽히 부착한다.



(a) After 4hours (b) After 8hours
Fig. 3 Section state after casting interval, 4 and 8 hours

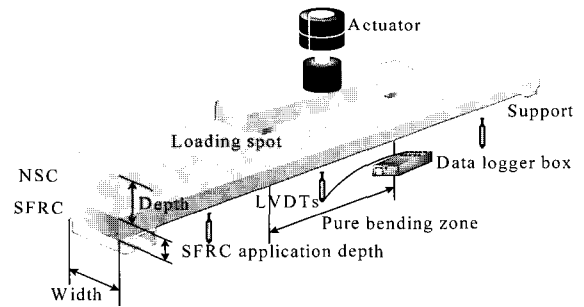


Fig. 4 Experimental setting of test beam

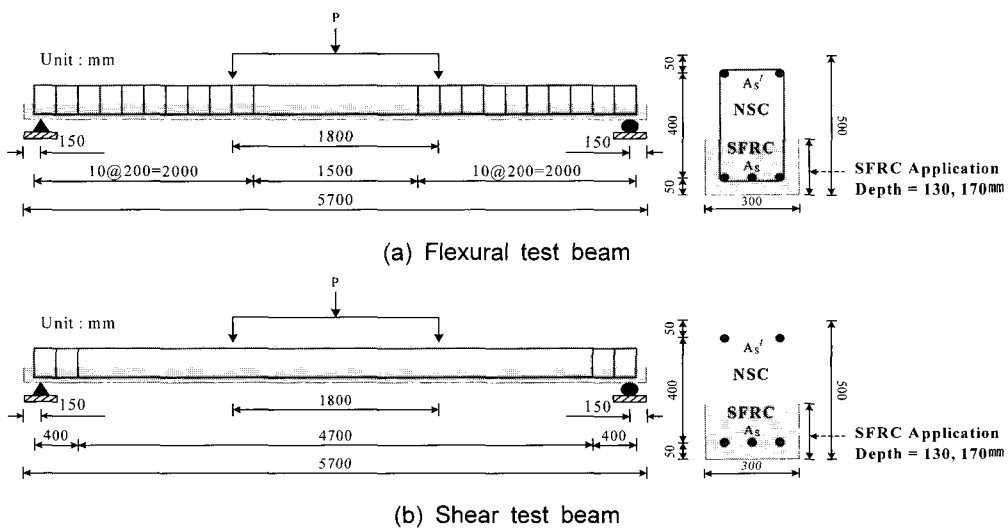


Fig. 2 Details of test beam

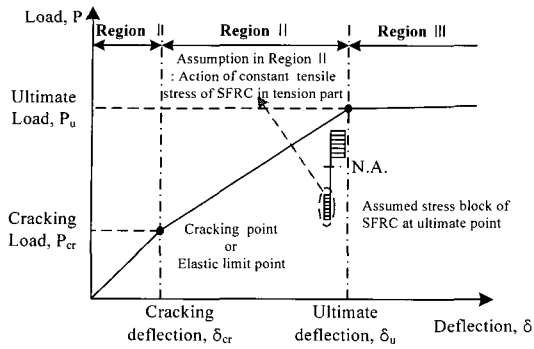


Fig. 5 Assumed load-deflection curve

3.2 탄성한계

탄성한계, 즉 초기 균열 시점의 하중 및 처짐을 구하기 위해서 인장부 하단의 SFRC의 증가된 탄성 계수를 고려하여 Fig. 6과 같이 RC 보에 적용되는 환산 단면적을 이용한다. RDC 보의 중립축의 깊이는 단면 일차 모멘트를 적용하면 다음과 같다.

$$c = \frac{b(H-\gamma)^2/2 + (n_s - 1)(A'_s d' + A_s d) + n_c b \gamma (H - \gamma/2)}{b(H-\gamma) + (n_s - 1)(A'_s + A_s) + n_c b \gamma} \quad (1)$$

여기서, c 는 단면의 중립축의 깊이, H 는 단면의 높이, b 는 단면의 폭, γ 는 SFRC 적용 높이, A_s 는 인장철근 단면적, A'_s 는 압축철근 단면적, d 는 유효깊이, d' 은 단면 상단에서 압축철근 도심까지의 깊이, n_s 는 NSC에 대한 철근의 탄성계수비, 그리고 n_c 는 NSC에 대한 SFRC의 탄성 계수 비이다. 그리고 철근 자신의 축에 관한 이차 모멘트를 무시하면 환산 단면적의 이차 모멘트는 다음과 같이 표현된다.

$$I_{cr} = \frac{b(H-\gamma)^3}{12} + b(H-\gamma) \left(c - \frac{H-\gamma}{2} \right)^2 + \frac{(n_c b) \gamma^3}{12} + (n_s - 1) [A'_s (c-d)^2 + A_s (d-c)^2] + n_c b \gamma (H-c-\gamma/2)^2 \quad (2)$$

균열은 단면 하단의 인장응력이 파괴계수에 도달할 때 시작되기 때문에 균열모멘트 및 균열하중은 다음과 같이 표현될 수 있다. 또한 중앙에서의 처짐은 다음과 같다.

$$M_{cr} = \frac{f_r I_{cr}}{y_t} \quad (3)$$

$$P_{cr} = 2 \frac{M_{cr}}{l_p} \quad (4)$$

$$\delta_{cr} = \frac{P_{cr} l_p^3}{48 E_c I_{cr}} (3l^2 - 4l_p^2) \quad (5)$$

여기서, M_{cr} 은 균열모멘트, P_{cr} 은 균열하중, f_r 은 보통 강도 콘크리트 파괴계수, y_t 는 중립축에서 단면 하단까지

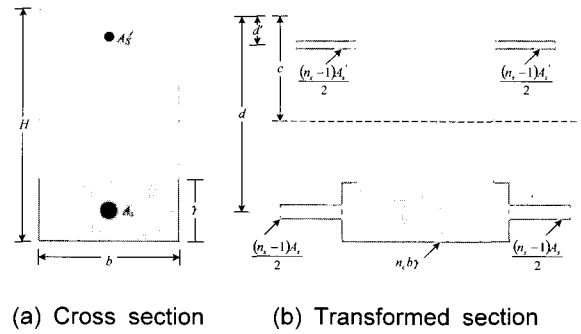


Fig. 6 Transformation of beam section

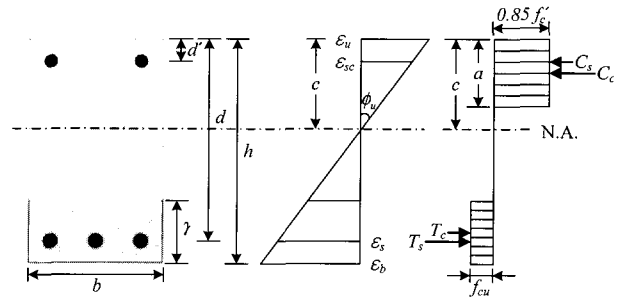


Fig. 7 Assumed stress and strain distribution of section at ultimate state

의 거리, l 은 지간, l_p 는 지점에서 가력점까지의 거리, 그리고 E_c 는 NSC의 탄성계수이다.

3.3 극한상태

극한상태에서 가정된 응력 및 변형을 분포가 Fig. 7에 나타나 있다. 응력 분포는 힘의 평형 관계로부터 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$C_c + C_s = T_c + T_s \quad (6)$$

여기서, C_c 는 NSC의 압축력, C_s 는 압축철근이 받는 힘, T_c 는 SFRC의 인장력, 그리고 T_s 는 인장철근이 받는 힘이고 이들은 각각 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$C_c = 0.85 f_{ck} a b \quad (7)$$

$$C_s = A'_s E_s \epsilon_{sc} \quad (8)$$

$$T_c = f_{cu} \gamma b \quad (9)$$

$$T_s = A_s f_y \quad (10)$$

여기서, f_{ck} 는 NSC의 압축강도, f_{cu} 는 균열 후 SFRC 인장강도, f_y 는 철근의 항복강도, ϵ_{sc} 는 압축철근 변형률 그리고 a 는 등가 직사각형 응력 블록의 깊이이다. ϵ_{sc} 는 변형률 적합으로부터 다음과 같이 인장철근의 변형률로 표현될 수 있다.

$$\varepsilon_{sc} = \frac{c-d}{d-c} \varepsilon_s \quad (11)$$

여기서, 철근의 변형률 ε_s 는 극한 상태에서 철근의 항복 변형률과 같다.

식 (7)~(11)을 식 (6)에 대입하면, 다음과 같은 중립축 c 에 관한 이차 방정식을 얻고 중립축의 깊이를 구할 수 있다.

$$Xc^2 - Yc + Z = 0 \quad (12)$$

여기서,

$$X = 0.85\beta f_{ck} b \quad (13)$$

$$Y = 0.85\beta f_{ck} b d + A'_s E_s \varepsilon_y + f_{cu} \gamma b + A_s f_y \quad (14)$$

$$Z = (f_{cu} \gamma b + A_s f_y) d + A'_s E_s \varepsilon_y d' \quad (15)$$

$$\beta = 0.85 - 0.05 \left(\frac{f_{ck} - 27.6}{6.9} \right) \quad (16)$$

따라서 극한모멘트와 극한하중은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$M_u = C_s(c-d') + C_c(c-a/2) + T_s(d-c) + T_c(H-c-\gamma/2) \quad (17)$$

$$P_u = 2 \frac{M_u}{l_p} \quad (18)$$

극한상태에서의 처짐은 곡률 및 강성을 이용하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\phi_u = \frac{\varepsilon_u}{c} \quad (19)$$

$$(EI)_u = \frac{M_u}{\phi_u} \quad (20)$$

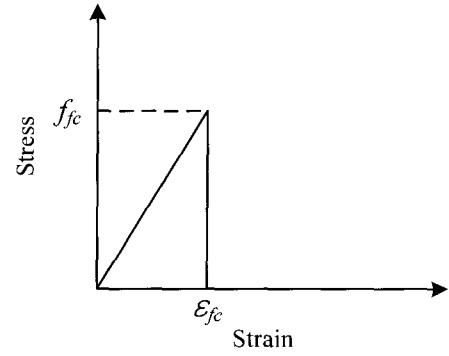
$$\delta_u = \frac{(P_u - P_x) l_p}{48(EI)_u} (3l^2 - 4l_p^2) \quad (21)$$

여기서, ε_u 는 단면의 상부 변형률이다.

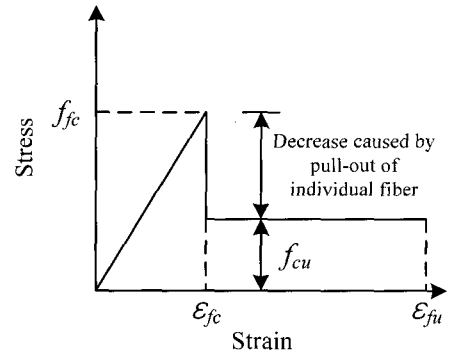
3.4 균열 후 SFRC의 인장응력

균열 후 SFRC의 인장응력 f_{cu} 는 다음과 같이 산정된다. Fig. 8에서 나타낸 바와 같이 NSC는 최대 인장응력에 도달한 후에는 응력에 저항할 수 없지만 SFRC는 매트릭스의 균열 이후에도 섬유가 인장응력을 담당한다. 매트릭스의 균열 이후 각각의 섬유의 뽑힘 (pull-out) 및 파괴는 인장응력을 감소시키지만 본 연구에서는 일정한 인장응력을 가정한다. 복합재의 혼합 이론을 적용하면 강섬유를 포함하는 복합재의 응력은 다음과 같이 표현된다.

$$f_c = f_m v_m + \lambda_b \lambda_l \lambda_o f_f v_f \quad (22)$$



(a) Plain concrete



(b) Fiber reinforced concrete

Fig. 8 Comparison of tensile stress-strain curve

여기서, f_m 은 매트릭스의 인장응력, v_m 은 매트릭스의 부피 분율, f_f 는 섬유의 인장응력, v_f 는 섬유의 부피분율, 그리고 λ_b , λ_l , λ_o 는 섬유의 부착효율계수, 길이효율 계수, 방향효율계수로써 실제 복합재 내에서의 섬유 분포 양상을 고려한 계수이다. 매트릭스 균열 발생 후 인장강도는 다음과 같이 표현된다.

$$f_{cu} = \lambda_b \lambda_l \lambda_o f_f v_f \quad (23)$$

여기서, f_{fu} 는 Bowling and Groves⁵⁾에 의해 다음과 같이 제안되었다.

$$f_{fu} = \tau_{fu} \left(\frac{l_f}{2r_f} \right) \quad (24)$$

여기서, l_f 는 섬유의 길이, r_f 는 섬유의 반경 그리고 τ_{fu} 는 섬유 보강 콘크리트의 경계면 평균 부착강도이고 Swamy and Mangat⁶⁾에 의한 인발저항 실험을 통해 측정되었다. 따라서 식 (22)는 다음과 같이 수정된다.

$$f_c = \lambda_b \lambda_l \lambda_o \tau_{fu} \left(\frac{l_f}{2r_f} \right) v_f \quad (25)$$

부착강도효율계수는 직선 강섬유에 대해 완전한 부착이

가정되면 1.0으로 산정되고 방향효율계수는 Table 4와 같이 여러 연구자들에 의해 제안된다. 길이효율계수 λ_l 는 Laws⁷⁾에 의해 다음과 같이 제안되었다.

$$\lambda_l = 1 - \frac{\tanh(\beta_1 l_f / 2)}{(\beta_1 l_f / 2)} \quad (26)$$

$$\beta_1 = \left[\frac{2G_m}{E_f r_f^2 \ln(S/r_f)} \right]^{1/2} \quad (27)$$

$$S = 25 \sqrt{\frac{d_f}{v_f l_f}} \quad (28)$$

여기서, d_f 는 섬유 직경, E_f 는 섬유의 탄성계수, G_m 은 매트릭스와 섬유의 경계면에서 매트릭스의 전단 탄성계수, 그리고 S 는 매트릭스 내에서의 섬유의 평균 간격이다.

3.5 휨 실험 및 해석 결과 비교

Fig. 9에서 보이는 바와 같이 RDC 보는 RC 보에 비해 균열 및 극한 하중의 증가와 균열 및 극한 처짐의 감소를 보임으로써 하중지지 능력의 향상은 물론 사용성 측면에서도 우수한 성능 향상을 보인다. 본 연구에서 제안된 RDC 보 해석 방법에 의한 분석치는 실험치와 잘 일치된다. 또한 해석 방법의 정확성 확인을 위해 기존에 제안되었던 이론값¹⁰⁾과 비교되었다(Table 5, Fig. 10).

4. 전단 거동

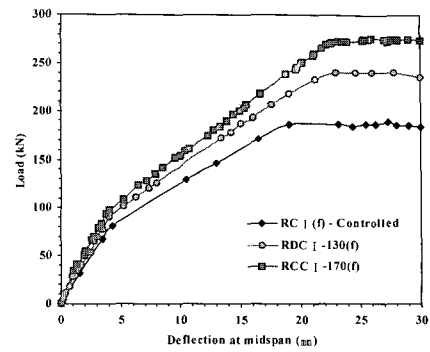
여러 연구자들이 RC 보의 전단 거동에 대한 섬유 보강의 효과에 대해서 연구해왔다. 많은 실험 및 해석적 연구들은 섬유의 종류, 부피 분율, 형상비, 그리고 스테럽의 유

Table 4 Orientation efficiency factor of fiber

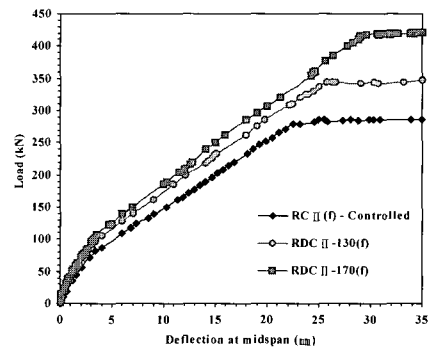
Reference	λ_o	
	Radndom 2D	Random 3D
Laws ⁷⁾	1/3	1/6
Allen ⁸⁾	1/2	-
Aveston et al. ⁹⁾	2/π	1/2

Table 5 Comparison between experimental and analytical results

Beam designation	At elastic limit						At ultimate stage					
	Load (kN)			Deflection (mm)			Load (kN)			Deflection (mm)		
	Ex	An	Ex/An	Ex	An	Ex/An	Ex	An	Ex/An	Ex	An	Ex/An
RDC I -130(f)	90	95	0.947	4.0	4.46	0.897	233	238	0.979	21.26	21.0	1.012
RDC I -170(f)	98	97	1.010	4.02	3.40	1.182	272	266	1.023	22.64	21.12	1.072
RDC II -130(f)	98	101	0.970	3.4	3.63	0.937	345	352	0.980	25.79	25.21	1.023
RDC II -170(f)	107	102	1.049	3.55	3.65	0.973	418	400	1.045	29.59	26.5	1.117



(a) I series

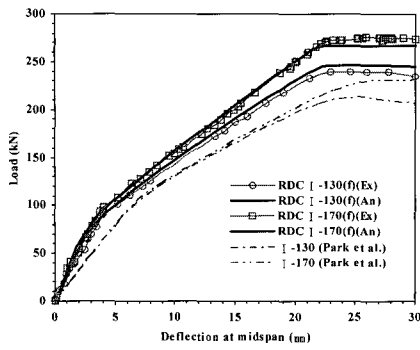


(b) II series

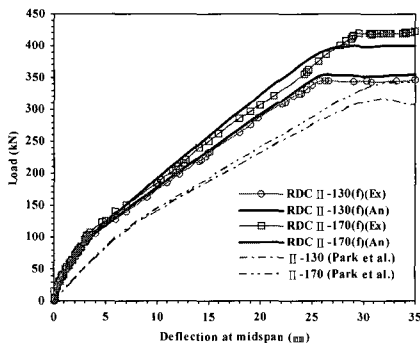
Fig. 9 Experimental load-deflection curve (Flexural test)

무 등 여러 가지 변수를 가지고 섬유 보강으로 전단 보강재인 전단철근을 대체할 수 있는 지의 가능성에 대해서 초점을 두고 진행되어왔다. 이러한 연구들의 결과, 섬유의 첨가는 균열 전단강도 및 극한 전단강도를 크게 증진시키고 초기 균열 후의 강성 및 연성을 개선하는 데 효과가 있는 것으로 나타났다^{11,12)}. 그러나 이러한 연구들은 단면의 전체 높이에 걸쳐 섬유를 보강한 보에 국한되어왔기 때문에 본 연구와 같이 인장부 일부에만 섬유를 보강한 FRC 보에 대한 연구는 미흡하다.

본 연구에서는 전단의 영향을 받는 RDC 보의 실험결과와 전 단면에 섬유가 보강된 FRC 보의 극한 전단강도 예측 경험식 값과 비교된다. 이러한 비교를 통해 인장부 일



(a) I series



(b) II series

Fig. 10 Experimental and analytical load-deflection curve

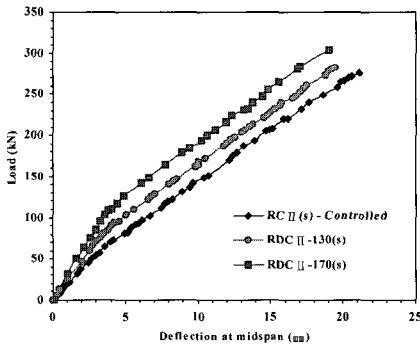


Fig. 11 Experimental load-deflection curve (Shear test)

부분에 SFRC가 적용된 보의 전단 보강 효과가 간접적으로 평가된다(Table 7). 비교를 위해 도입된 경험식들은 Sharma¹³⁾, Narayanan and Darwish¹⁴⁾, Ashour 등¹⁵⁾ 및 Imam 등¹⁶⁾에 의해 제안된다.

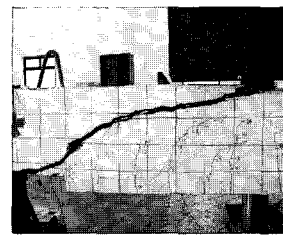
전단의 영향을 받는 전단 시험 보의 시험결과 전단의 영향을 받는 RDC 보는 전체 단면에 섬유 보강 콘크리트를 적용한 보와 마찬가지로 초기 균열 하중 향상에는 상당한 효과가 나타나지만 극한 전단강도의 증진 효과는 거

Table 6 Comparison of experimental results

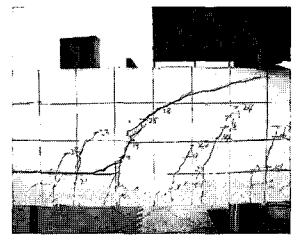
Beam designation	Load (kN)		Deflection (mm)	
	P_{cr}	P_u	δ_{cr}	δ_u
RC II (s)	57	275	3.172	21.102
RDC II-130(s)	72	281	2.993	19.485
RDC II-170(s)	103	303	3.6	19.0

Table 7 Comparison between experimental results of RDC beam and shear strength prediction equations

Beam designation	$v_{u,ex}/v_{u,an} \times 100$ (%)			
	Sharma	Narayanan and Darwish	Ashour et al.	Imam et al.
RDC II-130(s)	20	37	49	24
RDC II-170(s)	21	40	52	26



(a) RC II



(b) RDC II

Fig. 12 Comparison of failure mode

의 없다(Table 6, Fig. 11).

따라서 인장부 일부에 SFRC를 적용하는 것만으로 전단 철근을 대체하는 것은 사실상 불가능하다. 그러나 Fig. 12에 보이는 것처럼 인장부 일부에만 SFRC를 적용해도 RC 보에서 자주 발생하는 급격한 전단 파괴는 억제할 수 있으며 보다 연성적인 파괴 모드로의 전환이 가능하다.

5. 균열 경향

실험 보들의 균열 양상이 Fig. 13에 도식적으로 표현되었다. 기록된 숫자는 균열 확인 시의 하중 수준이다. RDC 보는 RC 보에 비해 많은 미세 균열들로 분포되어 있다. 그 이유는 강섬유가 균열 사이를 연결하여 하중을 전달시키는 작용을 하고 주 균열로의 성장을 억제하며 많은 미세한 균열들을 발생시키기 때문이다. 인장부 일부에만 SFRC를 적용하여도 이러한 강섬유의 기능은 충분히 그 효과가 나타나는 것을 알 수 있으며 처짐, 균열 폭 감소, 보다 연성적인 파괴 모드 등 전체 구조물의 성능에도 효과적임을 보여준다.

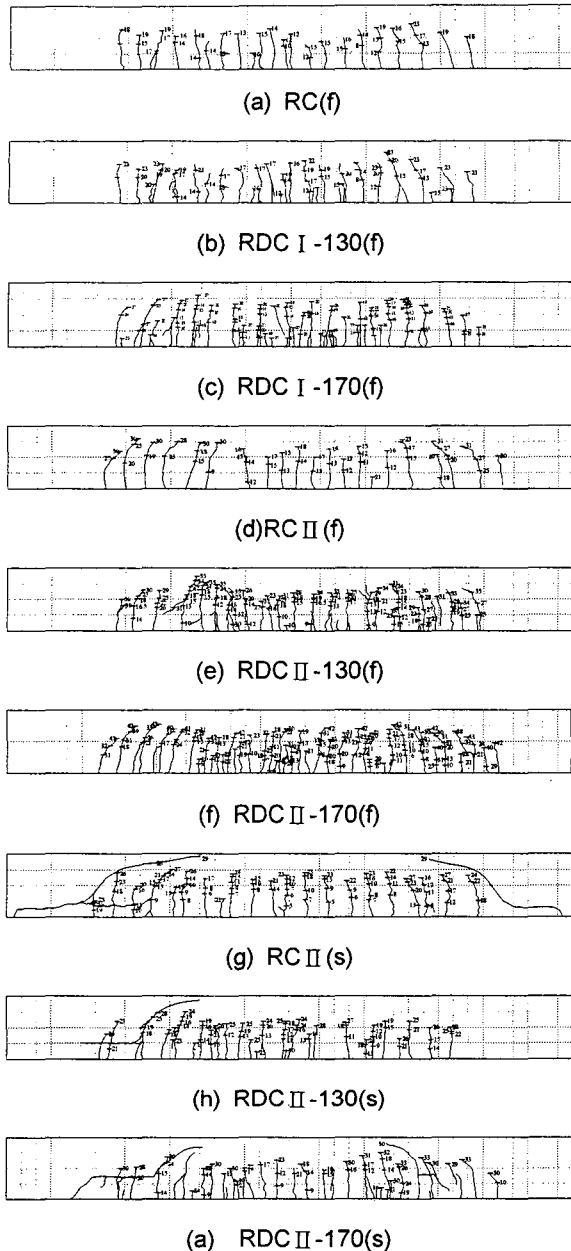


Fig. 13 Schema of crack patterns (Unit : Figure $\times 9.81$ kN)

6. 결 론

철근 이중 콘크리트 보와 일반 철근콘크리트 보와의 실험 및 해석적 비교 연구를 통해 도출된 결과는 다음과 같다.

- 1) 철근 이중 콘크리트 보의 휨에 대한 균열 및 극한 하중 그리고 강성은 철근콘크리트 보에 비해 상당히 증가된다. 즉 인장부 하단 일부에만 강섬유 보강 콘크리트를 적용하여도 구조물의 하중지지 능력은 크게 향상된다.
- 2) 철근 이중 콘크리트 보의 처짐 및 균열 폭은 강섬유의 균열 제어 작용을 통해 철근콘크리트 보에 비해

- 상당히 감소된다. 특히 전단 영향을 받는 보의 급격한 전단 파괴모드가 보다 연성적인 형태로 전환되어 인장부 일부에만 강섬유 보강 콘크리트를 대체하여도 전체 구조물이 안정화되어 사용성이 크게 개선되었다.
- 3) 본 논문에서 제안된 휨 해석 방법은 실험결과와 잘 일치한다.
 - 4) 최종적으로, 철근 이중 콘크리트 보의 구조적 성능 및 사용성은 일반 철근콘크리트 보의 그것에 비해 훨씬 뛰어나므로 철근 이중 콘크리트 보의 새로운 구조 형식 도입을 통한 전체 구조물의 성능 향상 가능성은 매우 크다.

감사의 글

본 연구는 “건설교통부의 건설교통기술혁신산업(02 산학연A03-01)”의 일환으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Ashour, S.A. and Wafa, F.F. “Flexural behavior of high-strength fiber reinforced concrete beams”, *ACI Structural Journal*, Vol. 90, No. 3, 1993, pp.279~287.
2. Gunasedaran, M., “Strength and behaviour of lightweight concrete beams made with sintered fly-ash aggregates and fiber-reinforced partially”, *The Indian Concrete Journal*, Vol.49, No.11, 1975, pp. 332~334.
3. Swamy, R.N. and Al-Ta'an, S.A. “Deformation and ultimate strength in flexural of reinforced concrete beams made with steel fiber concrete”, *ACI Journal*, Vol.78, No.5, pp.395~405.
4. Toutanji, H. and Bayasi, Z., “Effects of manufacturing techniques on the flexural behavior of steel fiber-reinforced concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol.28, No.1, 1998, pp.115~124.
5. Bowling, J. and Groves, G.W., “Debonding and pull-out of ductile wires from a brittle matrix”, *Journal of Material Science*, Vol.14, No.2, 1979, pp. 431~442.
6. Swamy, R.N. and Mangat, P.S., “The interfacial bond stress in steel fiber cement composites”, *Cement and Concrete Research*, Vol.6, No.5, 1976, pp.641~649.
7. Laws, V., “The efficiency of fibrous reinforcement of brittle matrices”, *Journal of Physics D, Applied Physics*, Vol.4, No.10, 1971, pp.1737~1746.
8. Allen, H.G., “The strength of thin composites of finite width, with brittle matrices and random discontinuous reinforcing fiber”, *Journal of Physics D, Applied Physics*, Vol.5, No.2, 1972, pp.331~343.

9. Aveston, J., Mercer, R.A., and Sillwood, J.M., Fibre reinforced cements—scientific foundations for specifications, In *Composite-Standards, Testing and Design*, Proc. National Physical Laboratory Conference, UK, 1974, pp.93~103.
10. 박대효, 부준성, 조백순, “섬유보강 고인장 강도 콘크리트를 이용한 이중 콘크리트 보의 휨 거동 해석”, 콘크리트학회 논문집, 13권 6호, 2001, 12, pp.584~592.
11. Baston, G., Jenkins, L., and Spatney, R., “Steel fibers as shear reinforcement in beams”, *ACI Journal*, Vol.69, No.10, 1972, pp.640~644.
12. Furlan, S. and de Hanai, J.B. “Shear behaviour of fiber reinforced concrete beams”, *Cement and Concrete Composites*, Vol.19, No.4, pp.359~366.
13. Sharma, A.K., “Shear strength of steel fiber reinforced concrete beams”, *ACI Journal*, Vol.83, No. 4, 1986, pp.624~628.
14. Narayanan, R. and Darwish, I.Y.S., “Use of steel fibers as shear reinforcement”, *ACI Structural Journal*, Vol.84, No.3, 1987, pp.216~227.
15. Ashour, S.A., Hasanain, G.S., and Wafa, F.F., “Shear behavior of high-strength fiber reinforced concrete beams”, *ACI Structural Journal*, Vol.89, No.2, 1992, pp.176~184.
16. Imam, M., Vandewalle, L., Mortelmans, F., and Van Gemert, D., “Shear domain of fibre-reinforced high-strength concrete beams”, *Engineering Structures*, Vol.19, No.9, 1997, pp.738~747.

요 약

본 연구에서는 인장부에 강섬유 보강 콘크리트를 사용하고 압축부 및 나머지 부분에 보통 강도 콘크리트를 사용한 철근 이중 콘크리트 보가 제안된다. 이것은 일반 철근콘크리트의 인장부 하단에 강섬유 보강 콘크리트를 부분적으로 대체함으로써 전체적인 구조적 성능을 개선시킨 혁신적인 구조 시스템이다. RC 보에 비해 RDC 보가 구조적으로 우수함을 입증하기 위해 휨 및 전단 실험이 실시되었다. 또한 강섬유가 보강된 철근콘크리트 보의 휨 거동을 정확히 이해하고 모델링하기 위한 해석적 방법이 제안되어 실험결과와 비교되었다. 전단 거동은 전 단면에 걸쳐 섬유로 보강된 철근콘크리트 보의 전단 강도 예측을 위해 제안된 기존의 경험식 결과와 RDC 보의 전단 실험 결과가 비교 분석되었다. 본 연구로부터 RDC 보는 RC 보에 비해 보다 우수한 구조적 성능을 발휘하고, 휨 해석 방법은 실험결과와 잘 일치되는 것으로 나타났다. 또한 인장부 일부에만 부분적으로 섬유를 보강할 경우 극한 전단강도에는 큰 영향을 미치지 못했지만 균열을 제어하고 진전을 억제하며 구조물 파괴모드를 안정적으로 유도하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 철근 이중 콘크리트 보, 철근콘크리트 보, 강섬유 보강 콘크리트