



전단보강근이 없는 강섬유 보강 합성보의 강도 및 연성 능력

오영훈^{1)*} · 남영길¹⁾ · 김정해¹⁾

¹⁾건양대학교 건축공학과

Strength and Ductility of Steel Fiber Reinforced Composite Beams without Shear Reinforcements

Young-Hun Oh^{1)*}, Young-Gil Nam^{1)*}, and Jeong-Hae Kim¹⁾

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Konyang University, Nonsan 320-711, Korea

ABSTRACT Experimental study was carried out to investigate the structural performance of composite beams with steel fiber concrete and angle. For this purpose, seven specimens composed of two RC beams with or without steel fiber and five composite beams with steel fiber and angle were constructed and tested. All specimens had no web shear reinforcement. Main variables for the specimens were tensile reinforcement ratio and fiber volume fraction. Based on the test results, structural performance such as strength, stiffness, ductility and energy dissipation capacity was evaluated and compared with the predicted strength. The prediction of flexure and shear strength gives a good relationship with the observed strength. The strength, ductility and energy dissipation capacity are increased, as the fiber volume fraction is increased. Meanwhile, high tensile reinforcement ratio resulted in the reduction of ductility and energy dissipation capacity for the composite beams.

Keywords steel fiber, composite beams, strength, ductility, energy dissipation capacity

1. 서 론

1.1 연구의 목적 및 내용

복합구조 시스템은 구조 재료의 특성을 효과적으로 활용할 수 있다는 점에서 향후 구조시스템의 대안으로서 많은 관심의 대상이 되고 있다. 이러한 복합구조 시스템은 기존의 구조 재료 또는 새롭게 개발한 구조 재료를 사용하여 기존 구조시스템의 성능과 경제성을 확보할 수 있는 방향으로 개발되어야 할 것이다.

지금까지 국내에서는 강섬유를 혼입한 철근콘크리트 부재의 거동 특성을 조사하기 위한 다수의 연구¹⁻⁵⁾가 수행되었다. 하지만 강섬유를 사용한 합성보 시스템의 구축을 위한 연구는 전무한 상태이다. 국외에서는 Khuntia⁶⁾에 의하여 후크형 강섬유를 혼입한 콘크리트와 앵글을 활용한 합성구조 시스템의 구축 방안을 모색한 연구가 수행된 바 있으며, 이 연구에서는 10개의 강섬유 보강 합성보 실험체를 대상으로 강도와 파괴 특성을 조사하는 연구가 수행된 바 있다. Khuntia의 연구는 강섬유 보강 합성보의 가능성을 보여준 의미있는 연구이지만 제한적

인 실험체를 대상으로 수행된 연구이므로, 보다 충분한 실험변수와 실험 결과에 입각한 강섬유 보강 합성보의 구조성능을 평가할 필요성이 있다.

따라서 본 연구에서는 후크가 달린 강섬유와 형각(double angle)을 사용하여 합성보 시스템을 구성하고자 계획하였으며, 합성보의 강도 예측과 구조 성능을 평가하고자 실험 연구를 수행하였다. 모든 실험체에는 전단보강근을 배근하지 않았다. 강섬유 보강 철근콘크리트 보 및 강섬유 보강 합성보의 거동을 전통적인 철근콘크리트 보의 구조성능과 비교·검토하였고, 강섬유 보강 합성보의 강섬유 혼입률, 인장보강근비, 그리고 유효인장보강근비의 변수에 대한 강섬유 보강 합성보의 강도, 연성능력 및 에너지소산능력을 평가하였다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험 계획 및 실험체

강섬유 보강 콘크리트 합성보의 균열 특성과 최종파괴 모드, 휨강도, 전단강도 및 연성능력 등의 역학적 특성을 고찰하기 위하여 인장축에만 보강된 철근콘크리트 보와 강섬유 보강 철근콘크리트 보, 강섬유 보강 콘크리트 합성보 실험체를 각각 제작하였다. 실험체의 단면은

*Corresponding author E-mail : youngoh@konyang.ac.kr
Received September 25, 2006, Accepted January 31, 2007
©2007 by Korea Concrete Institute

b = 200 mm, h = 300 mm, 전체 길이 2,700 mm, 지점간 경간길이를 2,400 mm로 동일하게 하였고, 인장보강근의 피복두께는 30~40 mm로 하였다. Table 1에서는 실험체의 제원과 주요 특징을 정리하여 보여주고 있으며, Fig. 1은 실험체의 형상과 단면이 나타나 있다.

RCB-0-4.0 및 RCB-1-4.0 실험체에 사용된 철근은 중앙부에 D22 철근을 배치하고, 좌·우측으로 60 mm 간격을 두고 D19 철근을 사용하였으며, RCB-1-4.0 실험체에는 체적비 1%의 강섬유를 혼입하였다. SCB-2-S₃-4.0 실험체를 제외한 합성보 실험체들은 인장보강근비를 변수로하여 약 1%씩의 차이를 주어가며 각각의 실험체를 제작하였으며, SCB-2-S₃-4.0 실험체는 SCB-1-S₃-4.0 실험

체와 동일 조건 하에 강섬유 체적비가 2%로 증가한 실험체이다. 강섬유는 갈고리(hook)형을 사용하였으며, 체적비는 0%, 1%, 2%로 변화를 주었다.

본 연구에 사용된 콘크리트 배합표는 Table 2에서 보여주고 있으며, 인장보강근의 역학적 특성은 Table 3에서 정리하였다. Table 4는 강섬유의 재료적 특성을 보여주고 있다. Fig. 2는 SCB-1-S₂-4.0와 SCB-1-S₄-4.0 실험체 공시체의 압축강도 실험 결과와 인장보강근 시험편의 인장 실험결과에서 나타난 하중-변형률 곡선을 보여준다.

2.2 실험 장치 및 실험 방법

실험체는 Fig. 3과 같이 1,000kN 용량의 구조프레임에 설치하였으며, 오일잭을 이용하여 전단경간비 4.0이 되도록 단조중가 4점 가력(four point loading) 하였다. 변위 측정을 위한 LVDT는 실험체 중앙부와 좌·우측의 경간

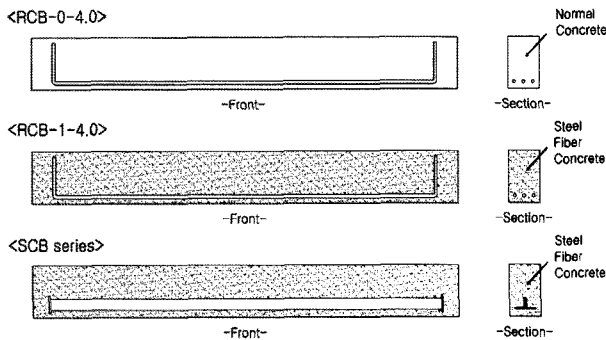


Fig. 1 Configuration of specimens

Table 2 Mix proportion for steel fiber reinforced concrete

f _{ck} (Mpa)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight(kgf/m ³)					
			W	C	S	G	Steel fiber content	
							1%	2%
30	55	65	220	400	1,003	551	78	157

Table 1 Test specimen details

Specimen	b(mm)	h(mm)	d(mm)	A _s (mm ²)	ρ(%)	f _{ck} (MPa)	f _y (MPa)	ρ/ρ _b	L(m)	a/d	Steel fiber volume, V _f (%)	Web reinforcement	Remark
RCB-0-4.0	200	300	260	960	1.85	30	400	0.58	2.4	4.0	0	No	RC
RCB-1-4.0	200	300	260	960	1.85	30	400	0.58	2.4	4.0	1.0	No	RC
SCB-1-S ₂ -4.0	200	300	244	938	1.92	30	240	0.30	2.4	4.0	1.0	No	Composite
SCB-1-S ₃ -4.0	200	300	252	1,505	2.99	30	240	0.47	2.4	4.0	1.0	No	Composite
SCB-2-S ₃ -4.0	200	300	242	1,505	3.11	30	240	0.49	2.4	4.0	2.0	No	Composite
SCB-1-S ₄ -4.0	200	300	241	1,952	4.05	30	240	0.64	2.4	4.0	1.0	No	Composite
SCB-1-S ₅ -4.0	200	300	238	2,538	5.33	30	240	0.84	2.4	4.0	1.0	No	Composite

① SCB : Composite beam, RCB : RC beam

S(R)CB-□-S◇-4.0 ② □ : Fiber volume fraction (%)

① ② ③ ④ ③ S : Singly reinforced beam, ◇ : Tensile reinforcement ratio (%)

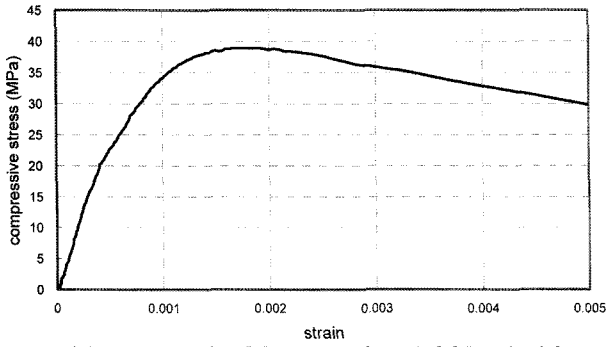
④ Shear span-to-depth ratio

Table 3 Mechanical properties of reinforcements

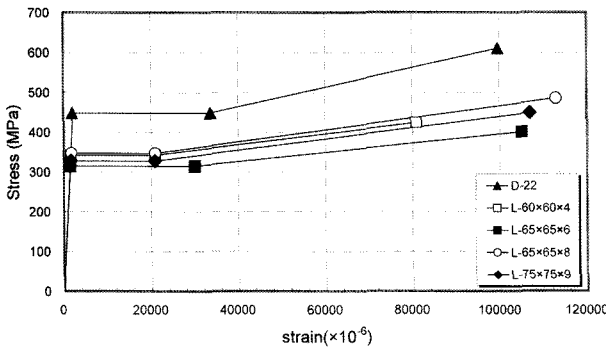
Reinforcement	Yield strength(MPa)	Yield strain	Tensile strength(MPa)	Elastic modulus(MPa)	Elongation (%)	Location
Rebar 19 mm	410.0	0.00203	560.2	201,970	13.8	Tension reinforcement in RCB-0-4.0, RCB-1-4.0
Rebar 22 mm	448.3	0.00206	621.4	217,621	15.3	Tension reinforcement in RCB-0-4.0, RCB-1-4.0
L-60×60×4 mm	342.0	0.00164	459.3	208,536	27.5	Tension reinforcement in SCB-1-S ₂ -4.0
L-65×65×6 mm	314.2	0.00142	422.5	221,573	20.8	Tension reinforcement in SCB-1-S ₃ -4.0, SCB-2-S ₃ -4.0
L-65×65×8 mm	346.8	0.00173	499.5	200,100	16.4	Tension reinforcement in SCB-1-S ₄ -4.0
L-75×75×9 mm	327.3	0.00161	470.1	203,292	17.2	Tension reinforcement in SCB-1-S ₅ -4.0

Table 4 Properties of steel fiber

Type of steel fiber	Length (mm)	Diameter (mm)	Aspect ratio	Tensile strength (MPa)
Hooked end	30.5	0.5	62	1,267



(a) Concrete for SCB-1-S₂-4.0 and SCB-1-S₄-4.0



(b) Steel reinforcement

Fig. 2 Stress-strain curves of concrete and steel reinforcement

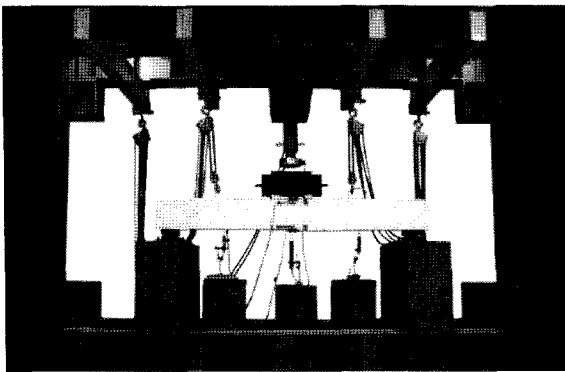


Fig. 3 Setup for testing

1/4 지점, 그리고 곡률측정을 위해 실험체 정면부 중앙의 상하부에 설치하였다.

인장보강근의 스트레인게이지는 Fig. 4와 같이 인장철근과 앵글 중앙부에 설치하고 좌·우 200 mm 간격으로 총 5개의 게이지를 부착하여 변형률을 측정하였다.

각 재하하중 단계마다 처짐 및 변형률을 측정하고, 보의 전면 및 후면의 균열상태와 하중값을 표시하였으며, 균열폭을 측정하였다.

3. 실험 결과 및 분석

실험체에 가해지는 하중이 커지면서 보의 중앙부 인장

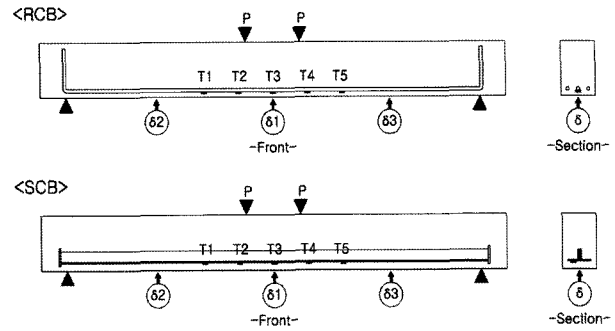


Fig. 4 Instrument for displacement and strain

영역에서 수직의 휨균열이 발생하기 시작하였다. 하중이 증가함에 따라 강섬유를 혼입하지 않은 RCB-0-4.0 실험체는 휨균열이 휨-전단균열로 진행하였으며, 이후 사인장 균열이 발생하면서 아치 작용에 의한 전형적인 전단 파괴가 일어났다. 반면에 강섬유 체적비 1%인 RCB-1-4.0 실험체와 SCB-1-S₃-4.0 실험체는 RCB-0-4.0 실험체와 비교할 때 강섬유 혼입의 유무만 다르게 한 경우로서 두 실험체 모두 휨파괴의 양상을 보여주었다. 이는 강섬유 보강이 전단강도에 충분히 기여하고 있음을 보여주는 결과로 판단할 수 있다.

실험체의 하중-변위 관계에서 각각의 실험체들은 항복 이후 다른 양상의 거동 특성을 보여주고 있으며, 강섬유를 혼입한 실험체는 RC보에 비하여 우수한 연성능력을 보여주었다. SCB-1-S₂-4.0 실험체와 SCB-1-S₃-4.0 실험체, 그리고 SCB-2-S₃-4.0 실험체의 처짐, 균열, 강도 등의 거동 특성은 RCB-1-4.0 실험체와 비교하여 유사하거나, 혹은 오히려 우수한 거동을 보여주고 있다. 그러나 SCB-1-S₄-4.0 실험체와 SCB-1-S₃-4.0 실험체의 강도는 다른 실험체들에 비하여 다소 높게 나타났지만, 연성적인 거동은 다소 떨어지는 것을 보여주고 있다.

3.1 균열 발생 및 파괴 상황

Fig. 5는 최종 파괴시 실험체의 균열 발생 형태를 보여주고 있다. 실험체의 주요 균열은 일정한 간격을 두고 나타났으며, 초기 휨균열은 30~50 kN의 하중범위 내에서 발생하였다. 하지만 SCB-1-S₃-4.0 실험체는 다른 실험체에서 일반적으로 발견된 휨균열과 휨전단균열 등의 잔균열이 거의 발견되지 않고 중앙으로 균열이 집중되는 현상을 보여주는 것으로 나타나있으며, 이는 콘크리트 타설 과정에서 다짐과 비빔이 원활하게 이루어지지 못한 데 기인하는 결과로 판단된다.

RCB-0-4.0 실험체의 경우 휨 모멘트 지배구간에서 많은 미세균열이 발생하였으며, 최종적으로 보 우측부분에서 갑작스런 사인장 전단파괴를 보여주었다. RCB-1-4.0, SCB-1-S₂-4.0, SCB-1-S₃-4.0, SCB-2-S₃-4.0 실험체는 실험체 계획단계에서 휨파괴를 예상하였는데 실제 실험 결과에서도 보 상단의 콘크리트 압축파괴와 인장보강근의 항복에 의한 휨파괴 양상을 보여주었으며, 그에 따라 균열

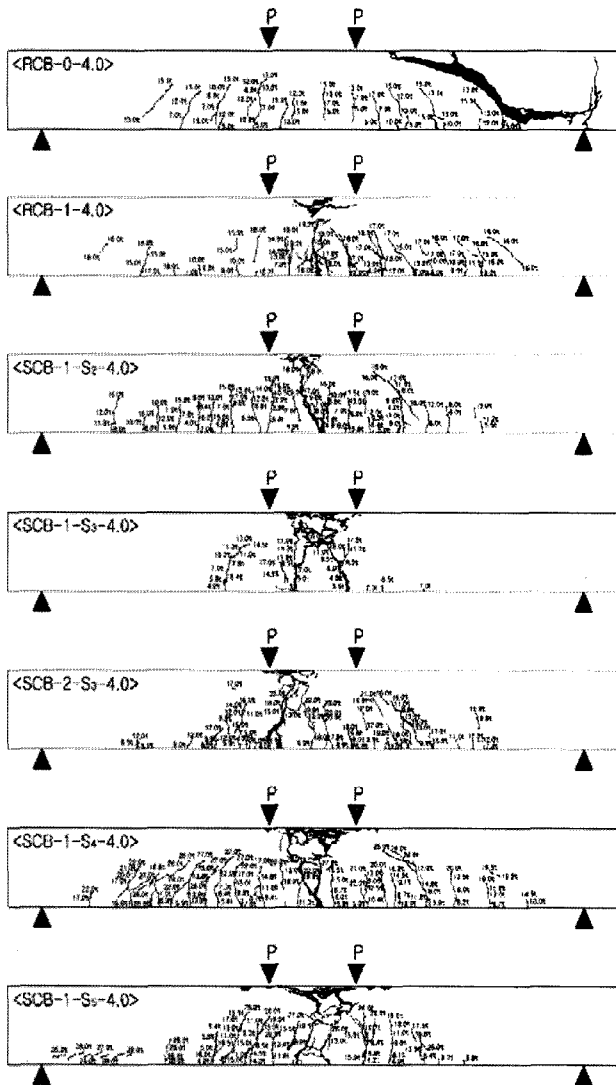


Fig. 5 Cracking pattern of specimens

폭도 다소 크게 나타났다. 반면에 SCB-1-S₄-4.0과 SCB-1-S₅-4.0 실험체는 최종적으로 전단 파괴를 예측하였으며, 실험시 사인장 균열의 발생이후 중앙부 콘크리트 압축파괴에 의한 휨-전단파괴 양상을 보여주었다.

3.2 하중-변위 곡선

Fig. 6은 보의 중앙부에서 측정된 하중-변위 관계와 초기 휨균열, 휨-전단 균열 및 사인장 균열 발생시의 강도를 보여주고 있으며, 유효강성과 휨강도 및 전단강도의 계산값을 동시에 보여주고 있다.

실험체는 보강재가 처음 항복에 이르기까지는 거의 선형적인 거동을 나타냈으나 그 이후 파괴에 이르기까지 비선형적인 거동을 보여주고 있다. 강섬유를 혼입하지 않은 RCB-0-4.0 실험체는 147 kN에서 갑작스런 강도가 저하하는 전형적인 RC보의 전단파괴 형태가 나타났다. 반면에 균형철근비의 50% 이하의 인장보강근비를 갖는 강섬유 보강 합성보 실험체(SCB-1-S₂-4.0, SCB-1-S₃-4.0, SCB-2-S₃-4.0, SCB-1-S₄-4.0)는 부재의 항복이후에도 연성적인 하중-변위 관계를 보여주고 있다. 그러나 인장보

강근비가 균형철근비의 60% 이상인 합성보 SCB-1-S₄-4.0 및 SCB-1-S₅-4.0 실험체는 부재항복과 동시에 최대 강도를 나타낸 후 점차 강도가 저하하는 휨-전단파괴의 양상을 보여주었다.

RCB-1-4.0과 SCB-1-S₂-4.0, 그리고 SCB-1-S₃-4.0 실험체는 상당히 연성적인 거동을 보이며 휨 파괴에 이르렀고, SCB-2-S₃-4.0 실험체는 SCB-1-S₃-4.0 실험체와 동일한 조건 하에 강섬유 혼입률을 2%로 크게 함으로써 보다 충분히 연성적인 거동을 예상하였지만, 비선형영역에서 변위계측장치의 작동불량으로 인해 충분한 연성능력을 확인하지 못하고 예상보다 빨리 실험이 종료되었다.

실험체의 항복 이후 취성적인 거동을 보인 합성보 SCB-1-S₄-4.0 실험체와 SCB-1-S₅-4.0 실험체는 각각의 인장보강근비가 균형철근비의 63%, 83%로 과도한 인장보강으로 인한 최대강도와 파괴강도의 차이가 약 20% 미만인 다른 실험체들과 비교할 때 35% 정도의 강도저하를 나타내면서 최종 파괴하였다. 그 결과 취성적인 형태의 휨-전단파괴 현상을 보여주었다.

강섬유 보강 합성보의 유효강성 I_e 는 강섬유의 체적비가 1%인 경우 평균적으로 비균열 단면의 단면 2차 모멘트 I_g 의 35~50% 범위에 있음을 확인할 수 있었으며, 강섬유의 체적비가 2%로 증가하면 실험체의 유효강성 I_e 또한 증가함을 확인할 수 있었다.

3.3 휨 강도 및 전단 강도의 평가

강섬유 보강 RC보와 합성보의 공칭휨강도(M_n)를 계산하기 위하여 콘크리트의 압축파괴 변형률을 0.003으로 가정하여 Fig. 7과 같이 Whitney의 등가응력블록⁷⁾을 사용하였다. 강섬유 보강 콘크리트 보의 휨강도는 중립축에 대한 강섬유 보강 콘크리트의 압축력에 의한 휨강도(M_{nc})와 철근의 인장력에 의한 휨강도(M_{ns}), 강섬유의 인장력에 의한 휨강도(M_{nf})의 합으로 구할 수 있으며, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_n = 0.85f_{ck}ab\left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2}\right) + A_s f_y \left(d - \frac{h}{2}\right) + 0.5\sigma_{pc}(h - c)b\frac{c}{2} \dots (1)$$

Table 5는 실험에 의한 최대 휨강도와 식 (1)의 계산 결과를 정리하여 보여주고 있으며, Fig. 8은 계산 결과와 실험 결과를 비교하여 그래프로 나타낸 것이다. 결과에서 나타난 것과 같이 강섬유를 보강하지 않은 일반 철근콘크리트 보 RCB-0-4.0 실험체와 중앙부 균열 집중에 의해 파괴한 SCB-1-S₂-4.0 실험체를 제외한 모든 실험체의 계산값은 실험값과 비교하여 10% 이내의 오차범위 내에서 예측이 가능하였다. 7개의 실험체 전체에 대한 휨강도 계산값과 실험값의 비율에 대한 평균은 1.00으로 나타났으며, 변동계수(C.O.V.) 10.5%의 비교적 정확한 예측 결과를 보여주었다.

한편 강섬유로 보강된 합성보의 극한전단강도의 계산은 다음과 같이 기존 연구⁶⁾에서 제안된 산정식을 사

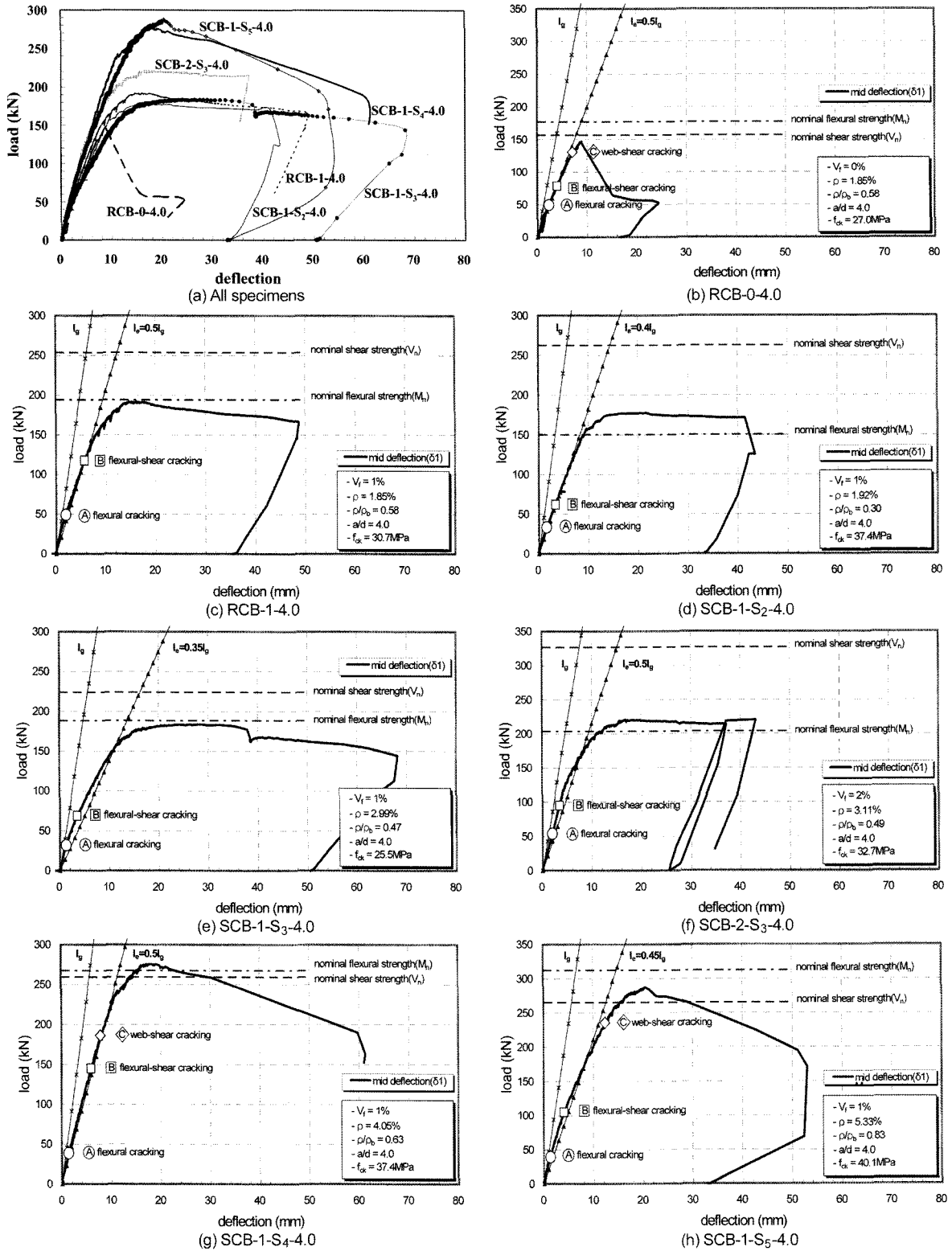


Fig. 6 Load-deflection relationship of specimens

용하였다.

$$V_n = (0.29\alpha + 0.25F)\sqrt{f_{ck}}bd \quad (2)$$

where, $\alpha = 1$ for $a/d \geq 2.5$, $\alpha = 2.5d/a \leq 3.0$ for $a/d \leq 2.5$

$$F = V_f l_f / d_f \text{ (강섬유계수)}$$

Table 6에서는 실험에서 구한 최대강도와 식 (1) 및 (2)에 의해 구한 휨강도와 전단강도와의 비교를 보여주고 있다. 실험 결과로부터 구한 최대강도는 식 (1)의 휨강도

를 전단경간으로 나누어준 강도와 극한전단강도 중에서 작은 값으로 결정한 예측 강도와 비교하였으며, 그 결과는 평균적으로 4%의 오차범위에서 매우 정확한 예측이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 또한 예측강도 계산에 의해 실험에서 나타날 파괴형태를 예상할 수 있었고, 실제 실험 결과와 일치함을 확인할 수 있었다. Fig. 9는 계산식에 의하여 구한 최대 예측강도와 실험으로 구한 최대강도의 비교를 보여주고 있다.

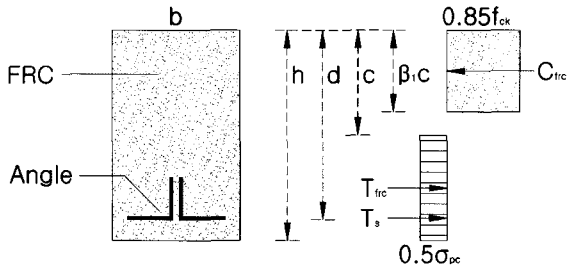


Fig. 7 Equivalent stress block for nominal flexural strength

Table 5 Comparison to test and predicted flexural strengths (M_n) for specimens

Specimen	M_{test} (kNm)	$M_{predicted}$	M_{test} / M_n
		M_n (kN·m)	
RCB-0-4.0	76.3	92.2	0.83
RCB-1-4.0	99.5	101.0	0.99
SCB-1-S ₂ -4.0	86.6	73.3	1.18
SCB-1-S ₃ -4.0	92.3	94.9	0.97
SCB-2-S ₃ -4.0	106.6	98.6	1.08
SCB-1-S ₄ -4.0	133.3	129.0	1.03
SCB-1-S ₅ -4.0	136.8	148.7	0.92

3.4 균열강도의 평가

강섬유 보강 합성보의 초기 휨 균열강도(M_{cr})와 휨-전단 균열 강도(V_{fs})의 예측을 위하여 다음의 식 (3)과 식 (4)를 사용하였다. 초기 휨 균열강도 예측에 사용된 식 (3)은 일반 철근콘크리트 보에서 사용하고 있는 초기 휨 균열강도 예측식을 이용한 것이며, 휨-전단균열강도의 예측은 Khuntia에 의해 제안된 산정식이다.

$$M_{cr} = 0.63 \sqrt{f_{ck}} \frac{I_g}{y} \quad (3)$$

$$V_{fs} = (0.167\alpha + 0.25F) \sqrt{f_{ck}} bd \quad (4)$$

where, $\alpha = 1$ for $a/d \geq 2.5$, $\alpha = 2.5d/a \leq 3.0$ for $a/d \leq 2.5$

$$F = V_f l_f / d_f \text{ (강섬유계수)}$$

Table 7에서는 휨균열 및 휨-전단균열 발생시의 예측 강도와 실험에 의한 강도와의 비교를 보여주고 있으며, Figs. 10과 11은 각각의 식에 의한 예측강도와 실험에 의한 강도와의 비교 평가를 보여주고 있다. Table 7과 Fig. 10에서 보여지는 바와 같이 기존의 RC 보를 위한 초기

Table 6 Comparison of test and predicted shear strengths for specimens

Specimen	f_{28} (MPa)	f_y (MPa)	ρ / ρ_b	V_n (kN)	M_n/a (kN)	Test strength	Test/predicted	Failure mode	
						V_{max} (kN)		Predicted	Test
RCB-0-4.0	27	436	0.71	78.3	88.6	73.4	0.94	Shear	Shear
RCB-1-4.0	31	473	0.71	126.8	97.1	95.9	0.99	Flexure	Flexure
SCB-1-S ₂ -4.0	37	342	0.42	131.3	75.1	88.7	1.18	Flexure	Flexure
SCB-1-S ₃ -4.0	26	314	0.75	111.9	94.1	91.7	0.97	Flexure	Flexure
SCB-2-S ₃ -4.0	33	314	0.65	163.3	101.8	110.3	1.08	Flexure	Flexure
SCB-1-S ₄ -4.0	37	347	0.90	129.7	133.8	138.3	1.07	Shear	Flexure-shear
SCB-1-S ₅ -4.0	40	327	1.03	132.6	156.2	143.7	1.08	Shear	Flexure-shear

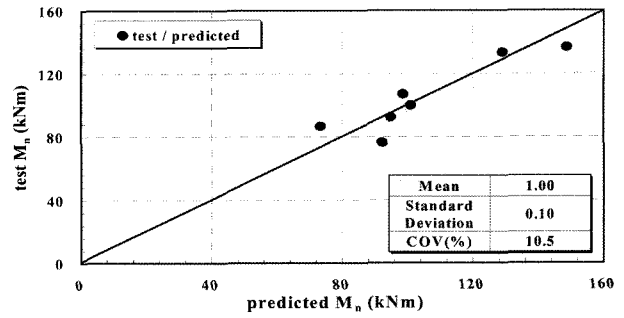


Fig. 8 Comparison of calculated and tested flexural strength (M_n)

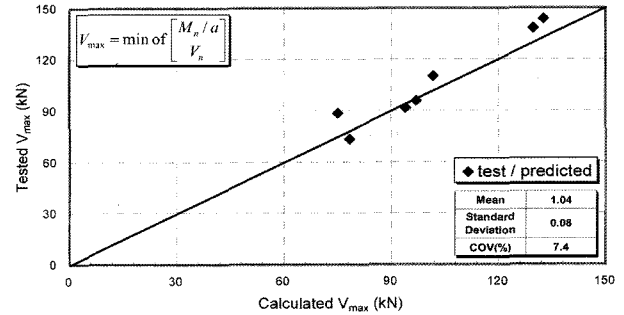


Fig. 9 Comparison of calculated and tested maximum strength (V_{max})

휨 균열강도 예측식은 지나치게 안전측으로 평가됨으로써 본 연구의 강섬유로 보강된 실험체의 휨균열 발생강도를 예측하는데 적절하지 않다고 판단된다. 초기 휨-전단 균열강도의 예측은 Table 7과 Fig. 11에서 보여지는 바와 같이 평균 1.13 및 변동계수 34.1%의 비교적 양호한 예측 결과를 보여주고 있다. 따라서 휨균열 강도의 적절한 예측을 위해서는 강섬유의 인장강도 기여효과를 감안한 강도예측이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

3.5 연성능력과 에너지소산능력의 평가

Table 8은 실험 결과로부터 구한 각각의 실험체의 강도와 변형의 특성을 Fig. 12와 같이 최대강도, 연성능력 및 에너지소산능력으로 세분하여 정리한 것을 보여주고 있으며, 이러한 특성을 강섬유 혼입률, 인장보강근비(ρ / ρ_b)와 유효인장보강근비($\rho f_y / \sqrt{f_{ck}}$)의 변화에 따른 상관관계를 Fig. 13에서 보여주고 있다.

Table 7 Comparison of test and predicted cracking strengths(M_{cr} , V_{fs}) for specimens

Specimen	Test		Predicted		M_{cr} Test/predicted	V_{fs} Test/predicted
	Flexural cracking strength M_{cr} (kN m)	Flexural-shear cracking strength V_{fs} (kN)	Flexural cracking strength M_{cr} (kN m)	Flexural-shear cracking strength V_{fs} (kN)		
RCB-0-4.0	49.4	78.5	9.8	45.1	5.03	1.74
RCB-1-4.0	49.0	117.7	10.5	91.3	4.68	1.29
SCB-1-S ₂ -4.0	33.3	61.7	11.6	94.6	2.88	0.65
SCB-1-S ₃ -4.0	31.4	68.6	9.5	80.7	3.28	0.85
SCB-2-S ₃ -4.0	53.9	95.1	10.8	129.3	4.99	0.74
SCB-1-S ₄ -4.0	38.2	145.0	11.6	93.4	3.31	1.55
SCB-1-S ₅ -4.0	39.2	104.9	12.0	95.6	3.27	1.10
				Mean	3.92	1.13
				Standard deviation	0.86	0.39
				COV(%)	22.0	34.1

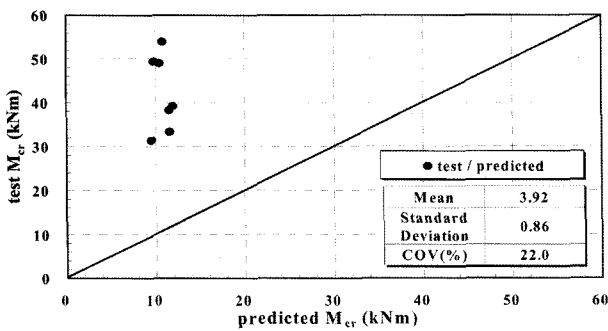


Fig. 10 Comparison of calculated and tested flexural cracking strength (M_{cr})

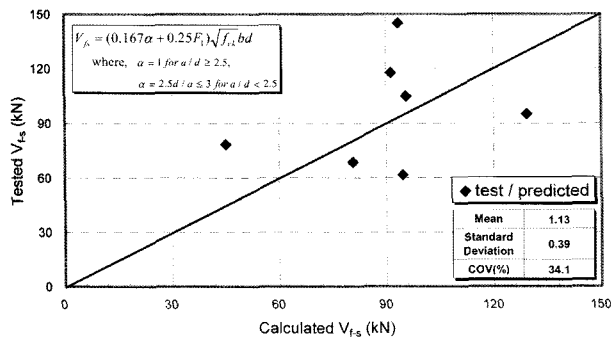


Fig. 11 Comparison of calculated and tested flexural cracking strength (V_{fs})

3.5.1 최대강도

Table 8 및 Fig. 13(a)에서 나타난 바와 같이 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 실험체의 최대강도가 상승하는 결과가 나타났고, 인장보강근비와 유효인장보강근비의 증가 또한 실험체의 최대강도를 상승시키는 결과를 보여주었다.

3.5.2 연성 능력

실험체의 연성 능력은 강섬유 혼입률의 증가함에 따라 함께 증가하는 결과가 나타났다. Table 8 및 Fig. 13(b)에서 보여지는 바와 같이 균형철근비의 약 65% 이내에서는 인장보강근비의 증가는 변위연성비가 최대 4.9까지

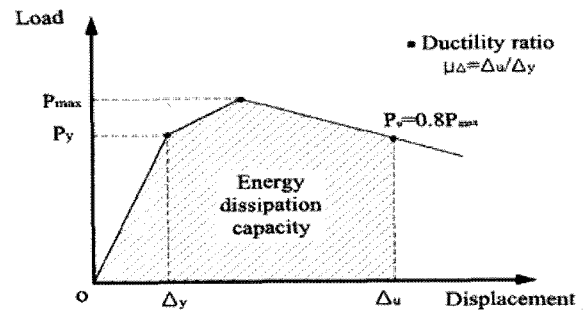


Fig. 12 Deformation characteristics definition

Table 8 Deformation characteristic of tested beams

Specimen	f_{28} (MPa)	f_y (MPa)	ρ / ρ_b	$\rho f_y \sqrt{f_{ck}}$	P_y (kN)	P_{max} (kN)	P_u (kN)	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	μ_Δ (Δ_u / Δ_y)	E (kN·mm)	$E/P_y \Delta_y$
RCB-0-4.0	27	436	0.71	150.5	140.7	146.8	117.4	8.19	11.09	1.4	1,047.5	0.9
RCB-1-4.0	31	473	0.71	140.5	167.5	191.8	153.4	10.02	48.44	4.8	7,923	4.7
SCB-1-S ₂ -4.0	37	342	0.42	108.0	165.1	177.4	141.9	11.28	42.69	3.8	6,521.9	3.5
SCB-1-S ₃ -4.0	26	314	0.75	184.2	174.2	183.3	144.2	14.8	68.23	4.5	10,607.6	4.0
SCB-2-S ₃ -4.0	33	314	0.65	170.1	178.4	220.6	176.5	8.57	41.68	4.9	7,991.2	5.2
SCB-1-S ₄ -4.0	37	347	0.90	230.9	265.9	276.6	221.3	14.77	46.35	3.1	10,371.3	2.6
SCB-1-S ₅ -4.0	40	327	1.03	275.8	263.9	287.3	229.8	15.3	40.87	2.7	9,049.4	2.2

P_y : yielding strength
 P_{max} : maximum load
 P_u : failure load ($P_u=0.8P_{max}$)

Δ_y : displacement at the yielding
 Δ_u : displacement at the failure load
 E : area of load-deflection curve up to failure load

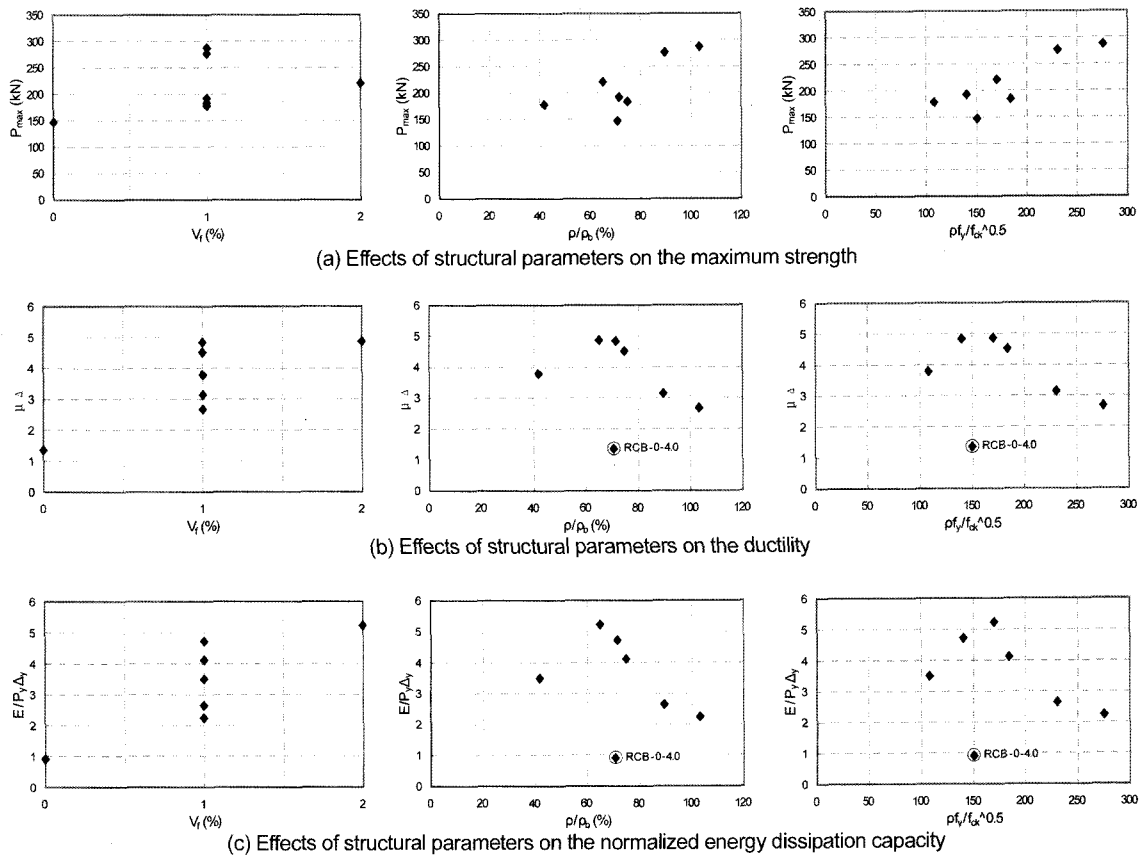


Fig. 13 Effect of fiber volume fraction and tensile reinforcement ratio on the structural performance

나타났지만 그 이상의 인장보강근비를 갖는 SCB-1-S₄-4.0와 SCB-1-S₅-4.0 실험체의 변위연성비는 3.1 및 2.7로 급격히 감소하는 것으로 나타났다.

유효인장보강근비(ρ_f/f_{ck}) 역시 170을 기준으로 작은 범위에서는 변위연성비의 상승에 효과가 있지만, 그 이상의 유효인장보강근비는 변위연성비가 감소하는 결과를 보여주고 있다.

3.5.3 에너지소산능력

강섬유 혼입률의 증가는 Table 8 및 Fig. 13(c)와 같이 에너지소산능력을 향상시키는 결과를 보여주었지만, 균형철근비에 대한 인장보강근비는 약 65% 범위 이내에서 무차원화된 에너지소산능력이 3.5에서 최대 5.2의 값을 보여주고 있다. 하지만 균형철근비의 75%를 초과하여 인장보강된 실험체(SCB-1-S₄-4.0, SCB-1-S₅-4.0)는 연성 능력과 마찬가지로 급격한 에너지소산능력의 감소가 나타났다.

유효인장보강근비의 영향 역시 170을 기준으로 에너지소산능력의 상승과 감소효과를 나타내는 경계가 되고 있음을 알 수 있다.

3.6 보강근의 변형률 특성

Fig. 14는 전단 파괴가 일어난 RCB-0-4.0 실험체를 제외한 각 실험체의 인장보강철근과 앵글의 중앙부에 부착한 스트레인 게이지의 변형률 곡선을 보여주고 있다.

그 결과 전단파괴된 RCB-0-4.0 실험체를 제외한 모든

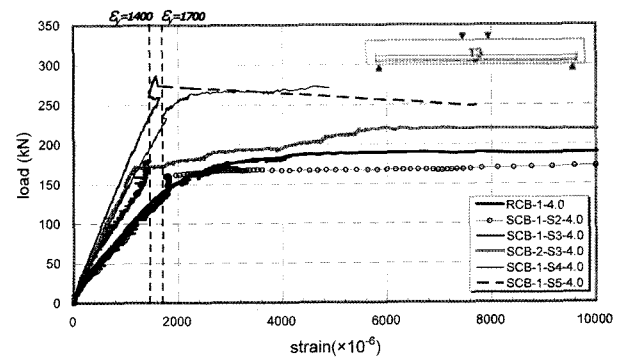


Fig. 14 Load-strain relationship at the midspan of specimens

실험체의 인장보강근이 항복하였음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 앵글과 강섬유 콘크리트로 구성된 합성보의 구조 실험을 통하여 강섬유의 보강효과와 합성보의 구조 성능을 평가하고자 하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 강섬유 보강 합성보의 휨강도와 전단강도의 평가 및 파괴모드의 예상을 위한 예상강도 산정식은 실험에 의한 최대강도와 비교하여 평균 1.04(변동계수 7.4%)의 정확한 예측 결과를 보여주었다.
- 2) 강섬유 보강 합성보의 초기 휨-전단균열 강도의 예측식은 평균 1.13, 변동계수 34.1%의 범위에서 비

참고문헌

- 교적 양호한 평가가 가능함을 확인할 수 있었다.
- 3) 강섬유 혼입률의 증가는 합성보의 최대하중과 연성 능력, 그리고 에너지소산능력을 모두 증가시키는 우수한 보강효과를 보여주고 있다.
 - 4) 인장보강근비와 유효인장보강근비의 증가는 합성보의 최대강도 증가에는 효과가 있지만, 연성 능력과 에너지소산능력은 일정 수준을 넘어서면 오히려 역효과가 나타나므로, 연성적인 거동을 확보하기 위해서는 인장보강근비를 균형철근이의 75% 이하, 유효인장보강근비는 200 이하의 범위로 제한할 필요가 있다고 판단된다.
 - 5) 강섬유보강 합성보는 증가한 강섬유 콘크리트의 인장강도에 의해 휨균열 강도, 휨-전단균열강도, 전단강도 및 휨강도가 모두 보통 철근콘크리트 부재의 그것과 다르게 나타나고 있다. 따라서 강섬유보강 합성보의 강도 산정식은 유효한 수준으로 강섬유 콘크리트의 인장강도를 고려하여 평가하여야 한다.
- ### 감사의 글
- 본 논문은 2006년도 학술진흥재단의 지역대학우수과학자지원사업의 연구비 지원(KRF-2004-202-D00697)에 의한 것이며, 이에 감사드립니다.
1. 김우석, 백승민, 이정석, 권진환, 박윤근, “강섬유보강 콘크리트보의 휨내력에 관한 연구”, 대한건축학회 논문집, 18권, 9호, 2002, pp.3~11.
 2. 김우석, 박윤근, 김주범, “강섬유보강 콘크리트보의 휨내력 예측식의 제안”, 콘크리트학회 논문집, 18권, 3호, 2006, pp.361~370.
 3. 이권옥, 박경호, “강섬유보강 철근콘크리트 보의 휨 거동에 관한 연구”, 대한건축학회 학술발표논문집, 15권, 2호, 1995, pp.601~605.
 4. 오병환, 이형준, 백신원, 임동환, “강섬유 보강 콘크리트의 강도 및 역학적 특성 연구”, 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 2권, 2호, 1990, pp.175~178.
 5. 이현호, 이화진, “강섬유 계수 및 혼입률을 고려한 SFRC의 강도 및 변형 특성”, 콘크리트학회 논문집, 16권, 6호, 2004, pp.759~766.
 6. Khuntia, M., *Behavior of Fiber Reinforced Concrete-encased Composite Members under Monotonic and Reversed Cyclic Loading*, Ph.D. Thesis, Univ. of Michigan, 1998, 210pp.
 7. ACI, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, ACI Committee 318, American Concrete Institute, 2002, 113pp.

요 약 본 연구는 강섬유 보강 콘크리트와 앵글을 사용한 합성보의 구조성능을 평가하고자 실험 연구를 수행하였다. 이러한 목적으로 일반 RC보와 강섬유가 혼입된 RC보, 그리고 강섬유 보강 합성보로 구성된 총 7개의 실험체를 제작하였으며, 모든 실험체에는 별도의 전단보강을 하지 않았다. 실험체의 주요 변수는 강섬유의 혼입률과 인장보강근비이며, 합성보의 강도 예측식의 평가와 실험 결과로부터 합성보의 강도, 강성, 연성능력, 에너지소산능력 등의 구조 성능을 평가하였다. 실험 결과들을 평가한 결과, 합성보의 공칭강도 산정식은 매우 정확한 예측이 가능하였으며, 휨균열강도 예측식은 강섬유 보강 효과의 고려가 필요하다고 판단되었다. 강섬유 체적비는 실험체의 강도와 연성 능력, 그리고 에너지소산 능력을 모두 증가시키는 것으로 나타났다. 인장보강근비와 유효인장보강근비의 증가는 실험체의 최대강도 증가에는 효과가 있지만, 반면에 연성 능력과 에너지소산 능력은 일정 수준을 초과하면 연성 능력과 에너지소산 능력이 저하하는 것으로 나타나고 있으므로 적절한 인장보강근비와 유효인장보강근비가 적용될 수 있도록 제한할 필요성이 있다고 판단된다.

핵심용어 : 강섬유, 합성보, 강도, 연성, 에너지소산능력