

UHPCC를 사용한 철근 콘크리트 보의 휨강도 평가

Evaluation on Flexural Capacity of Reinforced Concrete Beams
with Ultra-High Performance Cementitious Composites

강 수 태*

박 정 준*

고 경 택**

김 성 욱**

Kang, Su-Tae

Park, Jung-Jun

Koh, Gyung-Taek

Kim, Sung-Wook

Abstract

This paper concerns the flexural capacity of reinforced concrete beams with ultra-high performance cementitious composites(UHPCC). It was investigated if the existing equations to estimate the flexural capacity of reinforced fiberous concrete beams are applicable with the experiments including lightly reinforced concrete beams. The reinforcing effect when the steel fiber reinforced concrete was used in beams was also estimated. The results showed that the equation to predict the flexural capacity of reinforced steel fiber concrete by ACI 544 committee didn't have a good agreement with the test results and underestimated the flexural capacity in especially lightly reinforced beams with under 1.5% reinforcement ratio. the enhancement of flexural capacity was quite considerable in lightly reinforced beams when the steel fiber reinforced concrete was used. A equation to predict the reinforcing effect of steel fiber in reinforced steel fiber beams was developed. the equation was proposed as a function of both the characteristics of steel fiber and reinforcement ratio.

요 지

본 연구에서는 UHPCC를 사용한 철근 콘크리트 보의 휨강도를 평가하였고, 낮은 철근비로 보강된 RC보를 포함한 휨 실험을 통해 기존의 섬유보강 콘크리트 보의 휨강도 예측식과의 일치 여부를 파악하였다. 또한 섬유보강 콘크리트에서 섬유 보강을 통한 보강철근의 대체효과를 정량적으로 평가하였다. 그 결과 ACI 544 위원회에서 제시하는 섬유보강 콘크리트를 사용한 철근보강 보의 휨강도 예측식은 압축강도 150MPa 이상의 UHPCC에 대해서는 잘 일치하지 않으며, 특히 철근비 1.5% 이하의 저보강 철근보에 대해서는 상당히 과소평가하는 것으로 나타났다. 섬유보강 콘크리트를 사용함으로써 얻을 수 있는 보의 휨내력 증가 효과는 저보강 철근보에서 상당히 큰 것으로 나타났으며, 실험결과를 바탕으로 강섬유의 특성과 철근비를 고려한 철근대체 효과 평가식을 제안하였다.

Keywords : Cementitious composites, Flexural strength, High performance, Steel fiber, Low reinforcement

핵심 용어 : 시멘트 복합체, 휨강도, 고성능, 강섬유, 저보강

* 정희원, 한국건설기술연구원 연구원

** 정희원, 한국건설기술연구원 책임연구원

E-mail : alphard@kict.re.kr 031-910-0106

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 2009년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

콘크리트는 경제적이고 내구성이 우수한 건설재료로서 강재와 더불어 가장 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 콘크리트는 인장강도와 휨강도가 작아 균열이 발생하기 쉬운 본질적인 결함을 가지고 있으며 또한 고강도 콘크리트의 실용화에 따른 압축강도의 증가로 콘크리트의 취성파괴가 문제가 되고 있다. 이런 콘크리트의 결함 및 문제점을 개선하기 위한 일환으로 강섬유 보강 콘크리트(Steel Fiber Reinforced Concrete, SFRC)에 대한 수많은 연구들이 수 십 년에 걸쳐 이루어져 왔다. 섬유 보강 콘크리트는 콘크리트 내에 길이가 짧고 단면이 작은 섬유를 임의로 혼입함으로써 콘크리트가 응력을 받을 때 발생하는 콘크리트 내 미세균열들을 임의방향으로 분포된 섬유가 가교(Bridging) 역할을 하여 균열진전을 억제하고 콘크리트의 강도 및 인성을 향상시키게 된다.

최근에 들어서는 섬유 보강 콘크리트가 강도의 향상, 자기충전성, 인성의 증대 등을 통해 고성능 콘크리트(High Performance Concrete, HPC) 또는 초고성능 시멘트 복합체(Ultra High Performance Cementitious Composites, UHPCC)로 새로이 변모하고 있으며, 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 현재 초고성능 시멘트 복합체로는 배합구성이나 재료의 특성에 따라 ECC(Engineered Cementitious Composites), RPC(Reactive Powder Concrete), SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber Concrete) 등 여러 가지 종류가 있으며, 본 연구에서의 UHPCC는 RPC 계열의 초고성능 시멘트 복합체로서 굵은골재를 사용하지 않으며 150MPa 이상의 압축강도를 발현하고 2% 부피비의 강섬유를 혼입하여 인성을 크게 향상시킨 시멘트 복합체이다. UHPCC를 보에 적용할 경우, 일반콘크리트보다 훨씬 높은 압축강도를 가지고 섬유보강 콘크리트와 같이 인장영역에서 콘크리트의 인장 응력블럭을 고려할 수 있기 때문에, 일반 콘크리트에 비해 훨씬 큰 휨내력을 가지게 된다. 일반 콘크리트 보에서 인장력을 모두 철근이 부담하는 것과는 달리 UHPCC와 철근이 함께 인장력을 부담하게 되므로 동일한 설계모멘트에 대해 인장철근의 양을 줄이는

효과가 있다. 이러한 효과는 저보강된 철근 콘크리트 보에서 더 크게 나타난다.

강섬유 보강 철근 콘크리트의 휨강도를 예측한 이론식은 Henager and Doherty(1976), Craig(1987), Imam et al(1995) 등에 의해 개발되었으나, 대체적으로 UHPCC가 아닌 일반 강섬유 보강 콘크리트의 휨강도 예측에 관한 내용이 주로 다루어졌으며, 연구 대상으로 한 인장 철근비도 1.5% 이상으로 일반적인 사용 값 범위에서 주로 이루어졌다.

본 연구에서는 UHPCC를 사용하고 낮은 철근비로 보강된 RC보를 포함한 휨내력 평가를 통해 기존의 섬유보강 콘크리트 보의 휨강도 예측식과의 일치 여부를 파악하고, 섬유보강 콘크리트에서 섬유 보강을 통한 보강철근의 대체효과를 정량적으로 평가하고자 하였다.

2. ACI 544 위원회의 접근법 고찰

강섬유 보강 철근 콘크리트 보의 휨강도를 예측하기 위한 이론식은 여러 연구자들에 의해 제안되었으며, 일반적으로 강섬유 보강 콘크리트가 부담하는 인장저항력을 어떤 형태로 반영하느냐에 따라 약간씩 다른 형태를 가지고 있다. 대부분의 제안식은 ACI 강도설계법과 유사한 형태를 가지며 섬유보강 콘크리트에서 강섬유의 가교 역할로 발생하는 인장저항력을 추가적으로 반영하여 나타내었다.

ACI 544 위원회(1988)는 Henager and Doherty (1976)이 제안한 강섬유 보강 철근 콘크리트의 휨강도 예측식을 채택하고 있다. 이 식에서의 기본적인 개념은 Fig. 1과 같으며, 휨강도 식은 다음과 같다.

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + \sigma_t b (h - e) \left(\frac{h}{2} + \frac{e}{2} - \frac{a}{2} \right) \quad (1)$$

여기서, 강섬유 보강 콘크리트의 인장응력, σ_t 는 $0.00772(l_f/d_f)\rho_f F_{bc}$ (MPa)이고, F_{bc} 는 섬유의 부착효율을 나타내는 부착계수로서 섬유의 특성에 따라 1.0에서 1.2의 값을 가진다. l_f 는 섬유의 길이, d_f 는 섬유의 직경, ρ_f 는 강섬유의 부피비, A_s 는 인장철근의 단면적을 나타내며, f_y 는 철근의 항복강도를 의미한다.

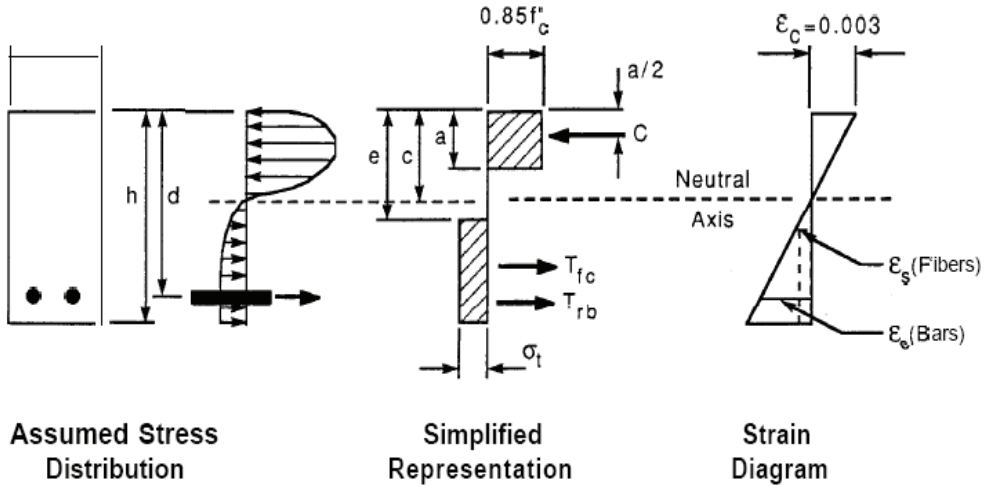


Fig. 1 철근이 보강된 섬유보강 콘크리트의 휨모멘트 계산(Henager and Doherty, 1976)

압축 연단으로부터 인장 응력블럭의 상부면까지의 거리, e 는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$e = [\epsilon_s(\text{fiber}) + 0.003]c/0.003 \quad (2)$$

여기서, $\epsilon_s(\text{fiber})$ 는 강섬유의 인발부착강도(τ_f)에서의 강섬유의 인장응력(σ_f)를 강섬유의 탄성계수로 나눈 값이다. c 는 압축연단에서 중립축까지의 거리를 나타내며, $a = \beta_1 c$ 의 관계가 성립하며 β_1 의 값은 30MPa에서 100MPa의 범위에서 0.85에서 0.65까지 변한다. 강섬유의 인장응력(σ_f)는 다음과 같은 식으로 나타내어진다.

$$\sigma_f = 2\tau_f \left(\frac{l_f}{d_f} \right) \leq \sigma_{fy} \quad (3)$$

여기서, σ_{fy} 는 섬유의 항복강도이다.

식(2)에서는 압축 연단에서의 극한변형률을 0.003으로 고려하고 있다. 하지만 다른 여러 연구자들의 연구결과를 살펴보면 이 값을 더 크게 보고 있다. Williamson(1973)과 Pearlman(1979)는 섬유보강

콘크리트의 경우 0.0033을 적용하는 것이 보다 현실적이라고 언급하였으며, Swamy and Al-Ta'an (1981)은 0.0035를 제안하였다. Hansoun and Sahebjam(1985)는 소성현지에 관한 연구를 통해 1%의 강섬유가 혼입된 경우는 0.0035를, 1%이상 3%까지 사용한 경우는 0.004를 사용할 것을 제안하였다.

일반적으로 강섬유 보강 콘크리트에서 휨강도가 크게 향상되는 원인은 균열에 대한 강섬유의 인발저항력 때문이다. 식(1)은 물시멘트비가 약 0.45인 보통강도의 강섬유 보강 모르타르 또는 콘크리트에 대한 실험을 근거로 한 것이며, σ_t 를 $0.00772(l_f/d_f)\rho_f F_{bc}$ 로 정의한 식도 평균적으로 2.3 MPa의 인발부착강도를 근거로 하고 있다. 강섬유의 인발부착강도는 콘크리트의 강도가 높을수록 더 큰 값을 가진다. 따라서 고강도 콘크리트일수록 더 큰 값의 인장강도를 사용하여야 하며, Al-Ta'an and Al-Feel(1990)은 넓은 범위의 물시멘트비, 골재크기, 섬유의 형상 등을 고려한 실험결과를 바탕으로 평균적인 강섬유의 부착강도를 4.15 MPa로 제안하였다. 또한 Imam et al(1993)은 고강도 섬유보강 콘크리트에 대한 섬유 인발강도 및 인장강도 실험을 통해 σ_t 에 대해 $2.0(l_f/d_f)\rho_f F_{bc}$ 를 적용하는 것이 타당하다고 보고하고 있다.

3. 실험계획

3.1 배합설계

본 연구에서 고려한 UHPCC의 매트릭스는 마이크로 균열이나 공극과 같은 결함을 최소화하여 조직이 매우 치밀하게 구성되는 특징이 있으며, 이를 위해 미세입자들을 일정 범위 내에서 입도분포를 가지도록 구성하였다. 본 실험에 사용한 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트이며, 반응성 분체로 실리카폼을 사용하였다. 골재는 0.5mm이하의 모래를 사용하였으며, 굵은 골재는 사용하지 않았다. 여기서, 잔골재는 밀도 2.62 g/cm³, SiO₂ 93%정도의 특성을 나타내었다.

낮은 물결합재비의 부배합에 대해 소요의 작업성을 확보하기 위해 고성능 감수제를 사용하였으며, 고흥성분 30%, 밀도 1.06 g/cm³의 폴리칼본산계의 고성능 감수제를 사용하였다. 또한 UHPCC에서 사용되는 충전재(filler)는 구성입자 평균입경이 10 μm 정도이고 SiO₂ 98% 이상, 밀도 2.60 g/cm³의 재료를 사용하였다. 인성을 향상시키기 위해 사용되는 강섬유는 밀도 7.5kg/cm³, 항복강도 2,500 MPa, 직경 0.2mm, 길이 13mm의 고탄성용 강섬유를 사용하였다. Table 1은 UHPCC의 배합비를 주요 구성재료에 대해 중량비로 나타낸 것이다.

3.2 실험체 제작

UHPCC의 휨강도 평가를 위하여 Fig. 2와 같이 전단 스테리움을 사용하지 않고 인장철근만을 사용하여

Table 1 시멘트 복합체의 기본 배합표(중량비)

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

높이 250mm, 폭 125mm이고, 길이는 2400mm의 단면을 갖는 직사각형 보 실험체 7개를 제작하였으며, 실험변수로는 섬유혼입률과 인장철근비를 고려하였다. 각각의 실험변수 값은 Table 2에서 보는 바와 같으며, 섬유혼입률은 부피비로 각각 1%, 2%, 3%에 대해 고려하였고, 철근비 0.07ρ_b(0.52%), 0.12ρ_b(0.92%), 0.18ρ_b(1.44%), 0.50ρ_b(4.22%) 및 0.75ρ_b(5.53%)에 대해 고려하였다. 실험체는 타설 후 익일에 탈형하여 자체 제작한 증기양생기에 투입하여 90±2℃의 온도로 3일간 양생을 실시하고 이후 실험재령 시까지 20℃ 습윤양생을 실시하였다.

강도실험용 공시체는 ∅100×200mm 원주형 공시체와 100×100×400mm 횡인장 공시체로 제작하였으며, 보 실험체와 마찬가지로 제작 1일 후 몰드를 탈형하였으며 90±2℃의 온도에서 3일 동안 증기양생을 실시한 후 재령 14일에서 압축강도와 횡인장강도를 측정하였다.

3.3 실험방법

보 실험은 500kN 용량의 액추에이터를 사용하여 실시하였으며, 재하방법은 1.0mm/min의 속도로 변위제어 방식으로 재하하였다. 작용하중에 대한 처짐을 측정하기 위하여 보의 중앙부에 변위계(LVDT)를 설치하였으며 철근과 콘크리트의 변형률은 각각 매립된

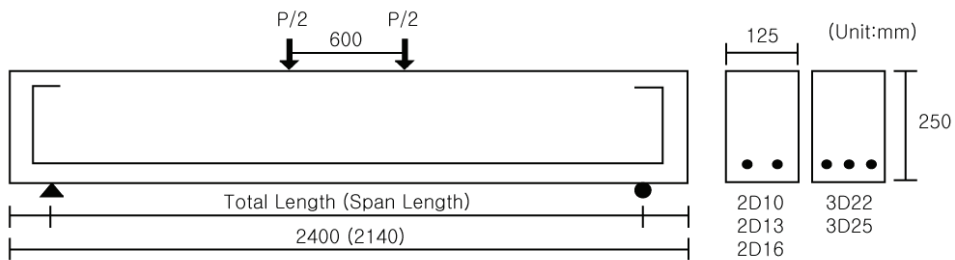


Fig. 2 실험체의 형상과 치수

철근 변형률 게이지와 시험체 측면에 높이에 따라 부착한 콘크리트 변형률 게이지를 통해 측정하였다.

4. 실험결과

Table 3은 본 연구에서 사용된 UHPCC의 압축강도 및 휨인장강도 측정 결과를 섬유혼입률에 따라 나타낸 것이다. UHPCC는 섬유혼입률이 증가함에 따라 압축강도 및 휨인장강도가 모두 증가하는 것으로 나타났으며, 압축강도의 증가율이 극히 미미한데 반해 휨인장강도는 섬유혼입률이 증가함에 따라 크게 향상되

는 것으로 나타났다. 한편 섬유혼입률이 증가할수록 압축강도 및 휨인장강도의 표준편차가 증가하는 것으로 나타났는데 이것은 섬유혼입률이 증가함에 따라 응력작용 면에서의 강섬유량의 편차가 증가하였기 때문으로 판단된다. Table 4는 본 연구에서 사용한 이형철근의 인장실험 결과를 나타낸 것이다.

Table 5는 UHPCC를 사용한 RC보의 휨실험 결과를 나타낸 것이다. 초기균열이 발생하는 시점, 철근이 항복하는 시점, 그리고 최대 휨모멘트에 대한 하중 및 처짐을 나타내었으며, 취성과파괴 여부의 정량적 평가를 위해 연성지수(ductility index)를 사용하였다.

Table 2 실험체의 분류와 실험변수 값

구 분	섬유혼입률(V_f , Vol.%)	보강철근		
		단면적(mm^2)	ρ_b 에 대한 비율	철근비(%)
SR7F1	1%	142.6	0.07 ρ_b	0.52
SR7F2	2%	142.6	0.07 ρ_b	0.52
SR7F3	3%	142.6	0.07 ρ_b	0.52
SR12F2	2%	253.4	0.12 ρ_b	0.92
SR18F2	2%	397.2	0.18 ρ_b	1.44
SR50F2	2%	1161.3	0.50 ρ_b	4.22
SR75F2	2%	1520.1	0.75 ρ_b	5.53

Table 3 UHPCC의 압축 및 휨인장실험 결과

섬유혼입률(V_f , %)	압축강도(MPa)			휨인장강도(MPa)		
	실험값	평균값	표준편차	실험값	평균값	표준편차
1	137.1	144.2	5.19	25.7	28.8	2.33
	149.3			30.7		
	146.3			28.4		
	144.1			30.5		
2	137.3	146.3	7.04	36.9	32.8	3.01
	154.5			30.5		
	146.4			33.3		
	147.0			30.6		
3	145.5	152.4	8.52	39.3	39.6	3.28
	164.8			43.5		
	146.9			40.1		
	150.4			35.5		

Table 4 이형철근의 인장실험 결과

사용철근	공칭지름(mm)	공칭단면적(mm^2)	항복강도(MPa)	인장강도(MPa)	탄성계수(GPa)
D10	9.53	71.3	501	631	211
D13	12.7	126.7	412	583	193
D16	15.9	198.6	473	654	204
D22	22.2	387.1	486	627	210
D25	25.4	506.7	538	634	215

Table 5 실험체의 균열하중 및 최대하중 결과

구 분	first cracking		steel yielding		ultimate state		ductility Index
	Load(kN)	Deflection(mm)	Load(kN)	Deflection(mm)	Load(kN)	Deflection(mm)	
SR7F1	25.4	0.93	42.8	2.90	56.6	5.82	> 9.14
SR7F2	33.9	1.52	56.7	3.99	68.4	6.35	6.02
SR7F3	52.7	1.86	89.7	4.84	97.6	6.53	2.27
SR12F2	31.0	0.85	81.9	8.12	84.0	14.92	> 3.20
SR18F2	28.5	0.99	117.1	10.69	130.7	29.05	> 5.43
SR50F2	50.2	1.98	291.7	10.92	316.4	42.13	> 8.97
SR75F2	56.4	1.83	392.4	15.49	422.9	41.85	-

전반적인 실험체의 파괴양상은 일반적인 휨파괴의 진행과 마찬가지로 초기균열 발생 이후 어느 정도의 하중까지는 처짐의 증가에 따라 균열의 개수가 증가하고, 이후에는 하중이 증가함에 따라 다수균열 중 특정 균열의 균열폭이 증가하는 한편 나머지 균열들은 균열폭이 일정한 상태로 파괴에 이르는 양상을 보였다.

섬유혼입률에 따른 휨거동을 살펴보면 Table 5에서 알 수 있는 바와 같이 섬유의 혼입률이 증가할수록 최초 균열발생 하중이 증가하고 그 때의 처짐량도 크게 나타났으며 최대하중 또한 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 단위체적당 섬유혼입량이 많을수록 매트릭스와 섬유사이의 상호결속(Interlocking)의 효과와 균열면에서 단위면적당 많은 수의 섬유가 버팀역할을 하여 인장저항력이 증가하였기 때문으로 판단된다. 반면 최고하중 이후의 하강부에서는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 혼입률이 증가할수록 연화구간의 기울기가 더 크게

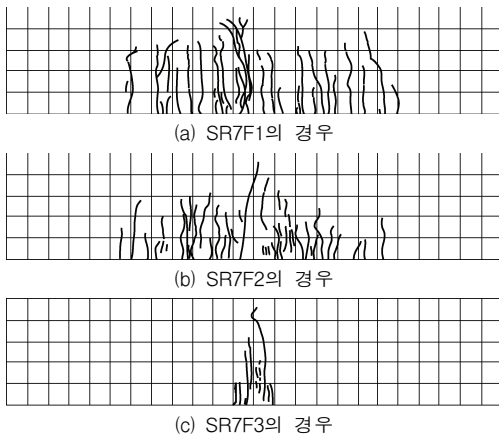


Fig. 3 섬유혼입률에 따른 파괴 균열 형상

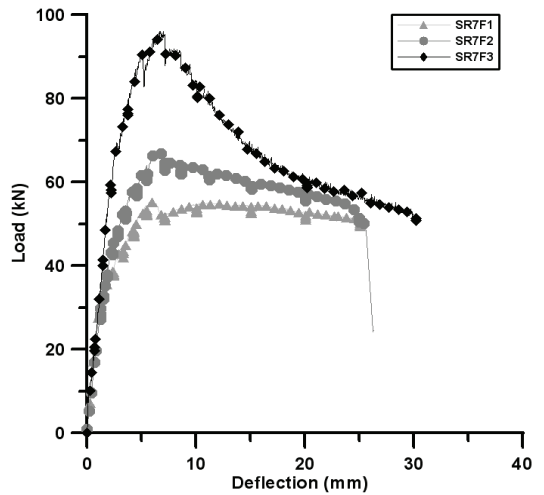


Fig. 4 섬유혼입률에 따른 하중-처짐 결과

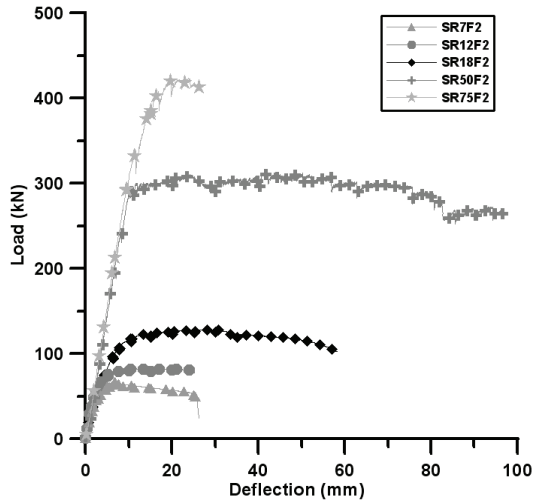


Fig. 5 철근비에 따른 하중-처짐 결과

Table 6 휨모멘트의 실험값과 해석값의 비교

Variable		M_{exp}	M_{ACI318}	M_{ACI544}	M_{Imam}	$\frac{M_{exp}}{M_{ACI318}}$	$\frac{M_{exp}}{M_{ACI544}}$	$\frac{M_{exp}}{M_{Imam}}$	$\frac{(M_{exp}-M_{ACI318})}{M_{ACI318}}, \%$
Steel fiber Vol. %	SR7F1	21.783	15.557	17.448	20.382	1.400	1.248	1.069	40.0
	SR7F2	26.358	15.559	19.302	25.098	1.694	1.366	1.050	69.4
	SR7F3	37.717	15.566	21.167	29.739	2.423	1.782	1.268	142.3
Reinforcement ratio	SR7F2	26.358	15.559	19.302	25.098	1.694	1.366	1.050	69.4
	SR12F2	32.342	22.617	26.292	31.969	1.430	1.230	1.012	43.0
	SR18F2	50.329	40.195	43.697	49.060	1.252	1.152	1.026	25.2
	SR50F2	122.946	113.899	116.560	120.343	1.079	1.054	1.022	7.9
	SR75F2	166.470	158.362	160.501	162.969	1.051	1.037	1.021	5.1

나타남을 알 수 있다. 최대하중 이후 하중의 감소가 빠르게 일어나는 것은 취성과파괴를 의미하는 것으로, 취성과파괴의 여부는 연성지수를 통해 평가할 수 있다. 본 연구에서 연성지수는 철근이 항복할 때의 처짐에 대한 최대하중 이후 연화구간에서 최대하중의 80%에 대응하는 처짐의 비로서 정의되었으며, 취성과파괴를 방지하기 위한 최소연성지수는 일반적으로 4 이상이어야 하는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁴⁾ Table 5에서의 연성지수 계산결과를 보면, 섬유혼입률이 1%일 때는 측정범위 내에서 최대하중의 80% 이하로 내려가지 않았으며, 측정 최대변위에 대한 연성지수가 9.14로 나타났다. 그리고 2%에 대한 연성지수는 6.02로 충분한 연성을 보였지만, 3%에서는 2.27로 기준값에 미치지 못함을 알 수 있다. Fig. 3은 섬유혼입률에 따른 파괴 균열 형상을 나타낸 것이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 섬유혼입률이 증가할수록 형성된 균열의 수가 적고 균열이 좁은 부분에 집중되어 있음을 알 수 있다. 특히 SR7F3의 경우에는 단지 몇 개의 균열만이 생성되어 파괴에 도달하였다. 이와 같은 균열형상은 연성지수와 밀접한 관련성이 있는 것으로 섬유혼입률이 클수록 적은 수의 균열에 의해 에너지가 소산됨으로써 보다 취성적 거동을 보이는 것이다. 섬유혼입률 변화에 따른 휨거동 결과를 살펴보면 UHPCC를 사용한 RC보에서 0.52%의 철근비에 대해 연성확보를 위해서는 섬유혼입률을 2% 내외로 제한할 필요가 있으며, 또한 저보강된 RC보에서는 섬유의 혼입률이 증가할수록 취성 거동을 보이는 경향이 있으므로 이러한 경우 연성 확보 차원에서 섬유혼입률을 감소시키고 철근비를 조

금 크게 하여 동일 휨내력을 확보하는 것이 타당할 것으로 판단된다. Fig. 5는 주철근비에 따른 하중-처짐 관계 결과를 나타낸 것이다. 주철근비의 영향을 살펴보면 모든 실험체가 연성거동을 보였으며, 철근비가 증가할수록 균열하중과 최대하중이 모두 증가하였다. 저보강 RC보 시험체인 SR7F2, SR12F2 및 SR18F2에 대해서도 충분한 연성거동을 보이는 것으로 나타났다. SR12F2의 경우에는 처짐량의 측정이 26mm 정도 밖에 이루어지지 않아 측정된 최대처짐량을 기준으로 연성지수를 계산할 경우, 3.20의 작은 값을 나타냈지만, Fig. 5의 하중-처짐 관계 그래프를 통해 유추할 때 충분히 연성거동을 예상할 수 있다. SR75F2의 경우에는 철근의 피복두께가 다소 부족하여 철근항복 이후 충분한 연성거동을 나타내지 않고 UHPCC와 철근의 계면에서의 파괴가 발생하였지만 철근이 항복점에 도달한 이후에 파괴가 발생하여 휨강도를 파악하는데 무리가 없을 것으로 판단하였다.

5. 결과분석

5.1 휨강도 예측식 분석

Table 6은 각각의 시험체에 대한 실험값과 해석값을 비교하여 나타낸 것이고, Fig. 6와 Fig. 7은 각각 섬유혼입률과 주철근비를 달리하였을 경우에 대해 해석값에 대한 실험값의 비를 나타낸 것이다. 해석값은 섬유보강 콘크리트의 인장강도를 전혀 고려하지 않은 휨강도 식인 ACI 318-02 식에 의한 결과와 일반강도

섬유보강 콘크리트 범위 내에서 사용하는 ACI 544의 식, 그리고 압축강도 약 110MPa의 고강도 콘크리트에 대한 실험을 바탕으로 수정 제안된 Imam et al(1995)의 휨강도 식에 의한 결과를 적용하였다. Imam et al(1995)의 제안식은 ACI 544식과 동일한 형태를 가지지만, σ_t 에 대해 $0.00772(l_f/d_f)\rho_f F_{be}$ 대신 $2.0(l_f/d_f)\rho_f F_{be}$ 를 적용한다.

Fig. 6를 살펴보면, 모든 섬유혼입물에 대해 ACI 318-02 식에 의한 결과는 실험값과 40%에서 140%까지의 차이를 보였으며, ACI 544 식에 의한 결과는 약 25%에서 80% 정도의 차이를 보인 반면, Imam et al(1995)의 식을 사용한 경우에는 섬유혼입률이 1%인 경우와 2% 경우에는 아주 잘 일치하였으며, 3%에 대해서는 약 27% 정도의 차이를 나타내었다. 또한 섬유혼입률이 증가함에 따라 해석값과 실험값의 차이가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 섬유혼입률이 증가함에 따라 섬유보강 콘크리트의 인장강도가 증가하기 때문에 콘크리트의 인장강도를 고려하지 않은 ACI 318-02 식에 비해서는 그 효과만큼 증가되어 나타났으며, ACI 544에서는 섬유혼입률

에 따른 인장강도의 증가효과를 과소평가하고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 철근비에 따른 결과를 비교하여 나타낸 것으로, ACI 318-02의 휨강도 식은 SR50F2와 SR75F2를 제외한 나머지 경우에 대해 모두 약 25%에서 70%까지 휨강도를 과소평가하는 것으로 나타났다. 또한 ACI 544 식은 ACI 318-02 식에 비해 보다 양호한 결과를 보이지만 SR7F2, SR12F2 및 SR18F2에 대해 약 15%에서 37% 범위의 차이를 나타내었다. 반면 Imam et al(1995)의 식을 적용한 경우에는 모든 철근비 범위에서 실험값과 거의 일치하게 나타났다. 이와 같은 결과는 100MPa 이상의 고강도 섬유보강 콘크리트에서 압축거동 변화에 따른 상부 압축력의 작용점 위치 변화가 저항모멘트에 미치는 영향이 아주 작으며, UHPCC에서 섬유와 매트릭스 사이의 평균 부착강도가 Imam et al(1995)에서 고려한 평균적인 강섬유 부착강도 4.15MPa와 큰 차이가 없기 때문에 판단된다. Naaman(2003)의 연구에 따르면 압축강도가 매우 큰 섬유보강 콘크리트의 경우, 보의 높이에 대한 압축연단으로부터 중립축까지의 거리의 비가 0에 가까워지기 때문에 섬유보강 콘크리트의 압축응력블럭의 형태가 휨내력에 미치는 영향은 거의 없다고 언급하고 있다.

따라서 110MPa 고강도 콘크리트에 대한 실험을 바탕으로 제안된 Imam et al(1995)의 식은 본 연구에서 다루고 있는 압축강도 150MPa 이상의 UHPCC에도 적용이 가능한 것으로 판단된다.

5.2 섬유보강에 따른 철근대체 효과

본 연구에서는 실험결과를 근거로 강섬유 보강된 UHPCC에서 직선형 강섬유 보강을 통한 휨내력 증가 효과를 평가하여 철근대체 효과를 정량적으로 분석하고자 하였다. Fig. 8은 섬유혼입률(Fiber volume fraction, V_f)과 보강효과(Reinforcing Effect, E_R)의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 E_R 은 콘크리트의 인장응력을 반영하지 않는 ACI 318-02식을 기준으로 한 휨강도의 증가효과를 의미하며 Table 6의 $(M_{exp-MACI318})/MACI318$ 를 나타낸다. 일반적으로 섬유

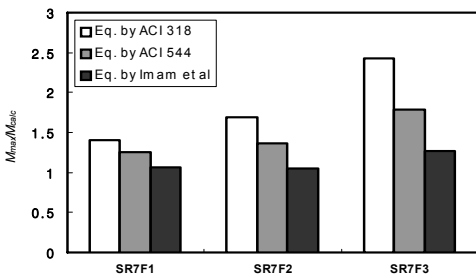


Fig. 6 섬유혼입률에 따른 실험값과 해석값의 비교

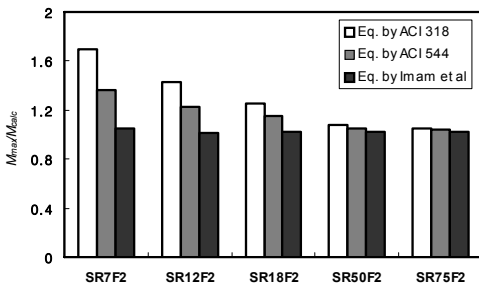


Fig. 7 철근비에 따른 실험값과 해석값의 비교

보강 콘크리트의 압축 및 인장강도 등의 역학적 특성은 $(l_f/d_f) V_f$ 에 선형적으로 비례하는 것으로 알려져 있다(Naaman(1972), Fanella et al(1985)). 여기서, l_f 는 섬유 길이, d_f 는 섬유의 직경을 나타낸다. 이러한 관계를 이용하여 섬유혼입률에 따른 보강효과에 대해 선형 회귀분석을 하면 Fig. 8에서 보는 바와 같이 $E_R = 43.26 V_f$ 의 관계식을 얻을 수 있다. Fig. 9는 철근비(ρ/ρ_b)와 보강효과와의 관계를 나타낸 것으로 SR75F2 및 SR50F2에서는 보강효과가 각각 5.1%, 7.9%로 크지 않지만, SR18F2, SR12F2 및 SR7F2에서는 보강효과가 25.2%에서 69.4%까지 아주 크게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig 9에서 보는 바와 같이 철근비에 따른 보강효과는 ρ/ρ_b 에 대해 역

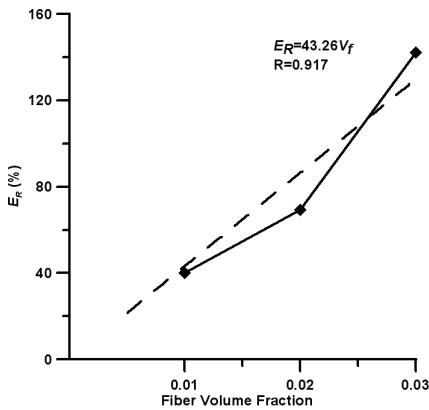


Fig. 8 섬유혼입률에 따른 보강효과

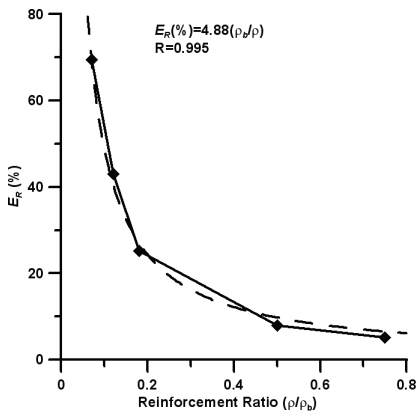


Fig. 9 철근비에 따른 섬유보강 효과

비례관계를 나타내었으며, ρ_b/ρ 에 대한 선형함수로, $E_R(\%) = 4.88(\rho_b/\rho)$ 의 관계를 얻을 수 있다. $E_R(\%)$ 가 $(l_f/d_f) V_f$ 와 ρ/ρ_b 에 대해 각각 선형적 관계를 가지므로 $E_R(\%)$ 는 두 변수의 곱의 형태에 대해 선형적 관계를 가짐을 알 수 있다. 따라서 섬유혼입률과 철근비를 변수로 한 휨강도의 보강효과는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$E_R(\%) = 3.25 \left(\frac{l_f}{d_f} V_f \right) \left(\frac{\rho_b}{\rho} \right) \quad (4)$$

예를 들어 보강효과 69%의 의미는 동일한 압축강도를 가진 섬유보강 콘크리트와 일반 콘크리트를 통해 비교할 때, 일반 콘크리트 보가 섬유보강 콘크리트 보의 휨강도와 동일한 휨대력을 가지기 위해서는 섬유보강 콘크리트에서 사용한 인장철근의 69%를 더 사용해야 한다는 것을 의미한다. 따라서 UHPCC는 저보강된 철근 보에서 인장철근을 일정 부분 대체할 수 있는 훌륭한 수단이 될 수 있음을 알 수 있다. 그러나 낮은 철근비에서는 섬유혼입률이 증가함에 따라 UHPCC 보가 취성적인 파괴거동을 보일 수 있으므로 반드시 이를 고려하여 충분한 연성을 확보할 수 있도록 강섬유의 사용 혼입률에 제한을 두거나, 섬유혼입률을 고려한 최소철근비 규정이 있어야 할 것이다.

6. 결론

본 연구에서는 UHPCC를 사용한 철근보강 보에 대한 휨강도 평가 및 인장철근 대체 효과를 파악하고자 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) ACI 544 위원회에서 제시하는 섬유보강 콘크리트를 사용한 철근보강 보의 휨강도 예측식은 압축강도 150MPa 이상의 UHPCC에 대해서는 잘 일치하지 않으며, 특히 철근비 1.5% 이하의 저보강 철근보에 대해서는 약 25%에서 70%정도로 과소 평가하는 것으로 나타났다.
- 2) 110MPa 이하의 섬유보강 콘크리트에 대한 실험을 바탕으로 제안된 Imam et al(1995)의 식은 UHPCC에 대해서도 아주 잘 일치하는 것으로 나

타났으며, UHPCC의 휨강도 산정에 적용이 가능한 것으로 판단된다.

- 3) 섬유혼입률에 따른 보의 휨거동은 섬유혼입률이 작을수록 휨균열이 많이 발생하고 연화구간에서 연성거동을 하는 것으로 나타났으며, 섬유혼입률 3%에 대해서는 휨균열의 수가 매우 적으며, 연화구간의 기울기가 상대적으로 큰 것으로 나타났다.
- 4) 섬유보강 콘크리트를 사용함으로써 얻을 수 있는 보의 휨내력 증가 효과를 실험을 통해 정량적으로 평가하였으며, 이를 통해 강섬유의 특성과 철근비를 고려한 철근대체 효과 평가식을 제안하였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 '콘크리트코리아 연구단'에서 주관하여 시행한 2006년도 건설핵심기술 연구개발사업 「05-CCT-D11, 고성능·다기능 콘크리트의 개발 및 활용기술」 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Heneger, C. H., and Doherty, T. J., "Analysis of reinforced fibrous concrete beams", *Journal of structural engineering*, ASCE, Vol. 102, No. 1, 1976, pp. 178-188.
2. Craig, R. J., "Flexural Behavior and Design of Reinforced Fibrous Concrete Members", *Fiber Reinforced Concrete Properties and Application*, SP 105-28, American Concrete Institute, 1987, pp. 517-563.
3. Imam, M., Vandewalle, L., and Mortelmans, F., "Shear-moment Analysis of Reinforced High Strength Concrete Beams Containing Steel Fibers", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 22, 1995, pp. 462-470.
4. Williamson, G. R., "Compression Characteristics and Structural Beam Design Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete", Technical Report No. M-62, U. S. Army Construction Engineering research Laboratory, Champaign, 1973.
5. Pearlman, S. L., "Flexural Performance of

Reinforced Steel Fiber Concrete Beams", MS thesis, Carnegie-Mellon University, 1979.

6. Swamy, R. N., and Al-Ta'an, S. A., "Deformation and Ultimate Strength in Flexure of Reinforced Concrete Beams Made with Steel Fiber Concrete", *ACI Journal*, Vol. 78, No. 5, 1981, pp. 395-405.
7. Hansoun, M. N., and Sahebjam, K., "Plastic Hinge in Two-span Reinforced Concrete Beams Containing Steel Fibers", *Canadian Society for Civil Engineering*, 1985, pp. 119-139.
8. Al-Ta'an, S. A., and Al-Feel, J. R., "Evaluation of Shear Strength of Fiber-reinforced Concrete Beams", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 12, No. 2, 1990, pp. 87-94.
9. Imam, M., Vandewalle, L., and Mortelmans, F., "Proportioning and Properties of Very High Strength Concrete with and without Steel Fibers", *Proceedings of International Conference "Concrete 2000"*, 1993, pp. 1693-1705.
10. ACI Committee 544, "Design Considerations for steel fiber reinforced concrete", ACI 544.4R-88, American Concrete Institute, Detroit, 1988.
11. ACI Committee 318, "Building code requirements for reinforced concrete with commentary (ACI 318-02)", American Concrete Institute, 2002.
12. Naaman, A. E., "Statistical Theory of Strength for Fiber Reinforced Concrete", Doctorial Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1972, pp. 196.
13. Fanella, D. A., and Naaman, A. E., "Stress-strain properties of Fiber Reinforced Mortar in Compression", *ACI Journal*, Vol. 82, No. 4, 1985, pp. 475-483.
14. Shin, S. W., Ghosh, S. K., and Moreno, J., "Flexural ductility of ultra-high-strength concrete members", *ACI structural journal*, Vol. 86, No. 4, 1989, pp. 394-400.
15. Naaman, A. E., "Strain hardening and deflection hardening fiber reinforced cement composites", *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites(HPFRCC4)*, pp. 95-113.

(접수일자 : 2008년 2월 26일)

(심사완료일자 : 2008년 6월 2일)