

고인성 섬유보강 시멘트 복합체의 휨인성 성능 및 평가

Performance and Evaluation of Flexural Toughness Indices for HPFRCCs

한 병 찬* 양 일 승* 박 완 신** 전에스더*** 김 선 우*** 윤 현 도****
Han, Byung Chan Yang, Il-Seung Park, Wan Shin Jeon, Esther Kim, Sun Woo Yun, Hyun Do

ABSTRACT

The primary role of fibers in High performance fiber reinforced cement composites(HPFRCCs) is to improve the toughness, or energy absorption capacity, of the composite material. However, there is still no general agreement as to how this toughness should be characterized, or how it might be used in the design of structures containing HPFRCCs. In this paper, therefore, we focus on test techniques for measuring flexural toughness. For mechanical properties, HPFRCCs can be tested in the same way as fiber reinforced concrete(FRC). Both the significance and the limitations of somewhat different national and industrial standards of FRC are discussed. For flexural toughness, with depend on the presence of fibers, new test methods was developed and verified. We also suggest evaluation method of tensile toughness indices using the moment curvature relationship in flexural tests.

1. 서 론

고인성 시멘트 복합재료(High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, 이하 HPFRCCs)내의 섬유는 기본적으로 시멘트 매트릭스 내에서 재료의 인성, 에너지흡수능력을 증가시킨다. 그러나 지금까지 이러한 인성 특성을 정량화 하는 일반적인 시험기법이 정립되어 있지 못한 것이 사실이다. 기존의 연구를 분석해 보면, 많은 연구자들에 의해 보, 평판, 압축 및 인장 공시체등과 같은 형태에 대한 인성 평가시험기법이 개발되어 왔으나, 연구 결과는 HPFRCCs에 대한 각각의 인성지수가 시험 방법에 의해 다르게 평가되고 있는 것을 볼 수 있다. 국내의 경우에도, HPFRCCs에 대한 관심과 연구가 활발해진 최근 까지도, 재료의 인성을 평가하는 시험기법은 기존의 섬유보강 콘크리트(Fiber Reinforced Concrete, 이하 FRC)에 대한 시험기법을 준용하고 있는 것이 사실이다. 그러나 HPFRCCs가 FRC와 같이 섬유를 혼입한 시멘트 복합재료라 할지라도 그 혼입량이 매우 크다. 또한, 재료는 유사 변형경화(Pseudo strain hardening) 및 균열분산(Multiple crack)과 같은 다른 재료특성을 보이게 되며, 이러한 특성을 설계에 반영하기 위해서는, 인성지수에 대한 새로운 평가기법이 재정립되어야 할 필요가 있다.

그러므로 본 연구는 HPFRCCs의 휨인성지수를 정량적으로 평가하기 위한 기법을 제안하는 것을 목적으로 하였다. 또한 휨시험을 통하여 HPFRCCs의 가장 큰 장점인 고인성 특성을 보다 간단하게 평가할 수 있는 기법을 제시하고 이를 검증하였다. 이를 위하여 기존의 FRC 휨인성지수 평가에 대한 각국의 시험기법을 분석하여 보다 정량적인 시험기법을 도출하였다. 또한 휨시험시 모멘트-곡률관계 추출을 통하여 직접 인장에 대한 인성을 평가할 수 있는 방안을 제시하였다. 검증을 위한 시험은 제 변수별 HPFRCCs 시험체를 제작하여 휨시험 및 직접인장시험을 실시하였으며 그 결과를 보고하였다.

2. FRC에 대한 각국의 휨인성 평가

대부분의 고인성 시멘트 복합재료에 대한 인성평가 시험은 휨시험에 의한 수행되고 있으며 이러한 이유는 대부분의 고인성 시멘트 복합재료가 휨부재에 이용되고 있기 때문이다. 일반적인 휨시험 평가는 4점 휨시험(2점 하중)으로 이루어지기 때문에 파괴는 순수 휨응력을 구역에서 발생하게 된다. 각국에 대한 휨인성 평가방법을 분석하여 표 1에 나타내었다. 표로부터 ASTM C1018은 그림 1과 같이 국내규준에서 준용하고 있으나 초기 균열시점의 판정이 모호하고 시험체의 기하학적 형태 및 치수에 영향을 받는 것으로 보고되고

* 충남대학교 건축공학과, 공박, 연구원

** 충남대학교 건축공학과, 박사과정

*** 충남대학교 건축공학과, 석사과정

**** 충남대학교 건축공학과, 공박, 교수

본 연구는 건설교통부 2003년 건설핵심기술연구개발사업(과제번호 03산학연 A10-01)의 지원에 의한 연구의 일부임

있다¹⁾²⁾, 그림 2와 같은 JCI 표준 시험방법의 큰 장점은 하중-처짐 곡선의 초기균열에 관한 정의가 필요치 않다는 것이다. 그러나 시험체로부터 측정된 이 값은 시험체의 크기와 특정 부위의 처짐량에 의존하게 되며, ASTM C1018의 연성지수 보다는 좋은 것으로 평가되지만 역시 섬유 혼입량의 차이를 정확하게 구별하는 데는 한계가 있는 것으로 판단된다. 이에 비하여 독일규준은 초기 균열강도의 평가에 관하여 그림 3과 같이 규정하고 있는 특징이 있다. 이상의 각국에 대한 FRC 휨인성 평가 시험방법을 분석해 보면 HPFRCCs와 같이 유사 변형 경화 거동 특성을 보이는 재료에 대하여 휨인성 평가로 준용되는 경우, 초기 균열강도에 관한 명확한 규정이 필요한 바, 독일 규준에서 제시하고 있는 0.05mm Offset 기법을 사용하는 것이 보다 정량적인 평가를 가능케 할 것으로 판단되었다.

표 1 FRC의 휨인성 평가에 대한 각국의 시험방법 비교

규준	국가	휨인성의 평가	규준의 제 특성
ASTM C1018 ³⁾	미국	초기균열 발생 시점까지의 하중-처짐으로 둘러싸인 면적에 대한 이후 곡선 내 면적의 비율	· 국내 표준시험방법(KS F2566)에 준용된 기법 · 초기균열(first-crack)의 평가가 모호
JCI 표준 SF-4	일본	하중-처짐 곡선에 있어서 중앙부 보의 처짐이 지점간 거리의 1/150 부분	· 상대적으로 오차(즉 외부 변형)에 영향을 거의 받지 않음 · 섬유 혼입량의 차이를 정확하게 구별하는 데는 한계
NBN B15-238 ⁴⁾	벨기에	초기 균열하중 F_n 을 경간길이 n 으로 나눈 시점에서의 하중 F_n 으로 결정(F_n/F_c)	· JCI-SF4와 유사 · 초기 균열강도는 비선형으로 진행되는 점으로 결정
CUR Aanbeveling 35 ⁵⁾	네델란드	등가 휨강도 $F_c = (D_b/\delta_b)(2/bd^2)N/mm^2$	· 벨기에 기준과 동일한 시험체 및 시험기준을 채용 · F_c 값은 사실 벨기에 규준에서의 F_{150} 과 같은 값
AFNOR P18-409	프랑스	연성은 $\delta_y = F_y/F_0$	· 연성계산은 $y=0.7mm, 1.4mm, \text{ 그리고 } 2.8mm$ 로서 $l/600, l/300, \text{ 그리고 } l/150$
독일 규준 ⁶⁾	독일	에너지 흡수능력은 $P(\delta_y + l/2000)/2$ 로 계산	· 초기 균열에 관한 정의는 0.05 또는 0.1mm에서의 처짐을 Offset 한 것으로 산정

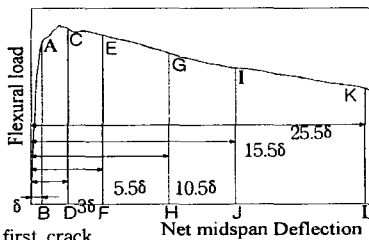


그림 1. ASTM C1018에서의 인성에 관한 변수의 정의

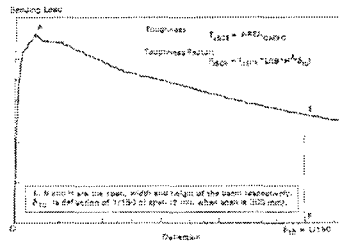


그림 2. JCI에서의 인성계수 정의

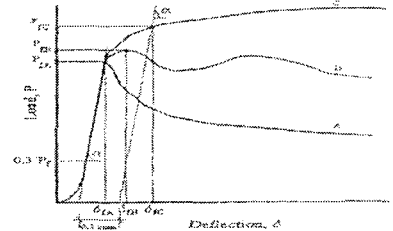


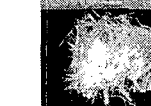


그림 3. 독일규준에서의 초기 균열 정의

표 2. 실험체 일람

Series	Specimen	$V_f^{(1)}$ (vol.%)			Total	W/B wt.%	FA/B wt.%	S/M ⁽²⁾ vol.%	섬유의 형상
		Micro SC	Macro PE	Macro PVA					
Single	SC1	1.0	-	-	1.0	45	-	40	 Macro Fiber : Steel Cord(5연선), 250 μ m Micro Fiber :
	PE1.3	-	1.3	-	1.3				
	PVA1.0	-	-	1.0	1.0				
Hybrid SC+PE	SC1+PE0.25	1.0	0.25	-	1.25				
	SC1+PE0.5	1.0	0.50	-	1.5				
	SC1+PE0.75	1.0	0.75	-	1.75				
	SC1+PE1.0	1.0	1.00	-	2.00				
Hybrid SC+PVA	SC1+PVA0.25	1.0	-	0.25	1.25				
	SC1+PVA0.5	1.0	-	0.50	1.50				
	SC1+PVA0.75	1.0	-	0.75	1.75				
	SC1+PVA1.0	1.0	-	1.00	2.00				
	SC1+PVA1.3	1.0	-	1.30	2.30				
	SC1+PVA1.7	1.0	-	1.70	2.70				
	SC1+PVA2.0	1.0	-	2.00	3.00				
					 PE Fiber, 12 μ m  PVA Fiber, 3912 μ m				

1) 모르터 총 용적에 대한 섬유의 체적 혼입율 (V_f) 2) 모르터 총 용적에 대한 잔골재의 용적 대체율 3) 평가항목 : 휨시험, 직접인장시험

3. 실험

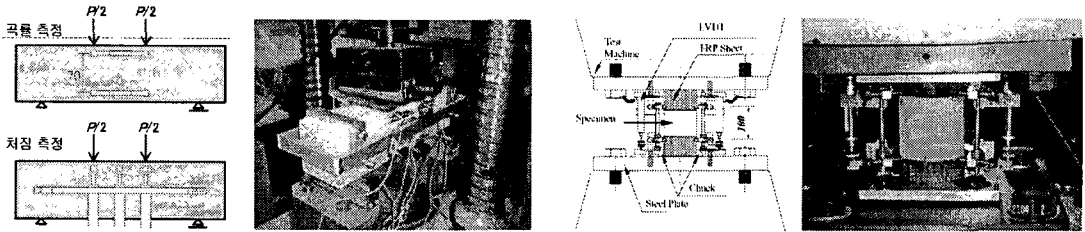
3.1 시험체

보다 합리적인 휨인성 평가 기법을 도입하고 휨시험을 통한 인장 인성 평가기법을 제안하기 위하여 HPFRCCs에 대한 실험을 계획하였으며 실험체 일람은 표 2와 같다. 실험변수는 크게 단일섬유를 사용한

경우와 Macro 섬유와 Micro 섬유를 하이브리드하였으며 Macro 섬유로는 5연선 꼬인 강섬유^{*)}를, Micro 섬유로는 고장력 PE섬유 및 오일링 처리한 PVA섬유를 선정하였다.

3.2 휨 및 직접인장 시험

그림 4는 각각 휨시험 및 직접 인장시험에 대한 측정 장치 및 시험전경을 나타낸 것이다. 휨시험의 경우는 그림 2(a)와 같이 전면에 곡률 측정을 위하여 PI 게이지를 압축측, 인장측에 부착하였으며 표점거리는 50mm, 측정깊이는 70mm로 하였다. 또한 중앙부 및 가력점에서의 처짐을 측정하였다. 직접인장시험 기법은 그림 4(c)와 같이 원형공시체 상하부를 유리섬유 슈트로 보강한 후 인장 지그를 이용하여 인장력을 가하는 방법을 이용하였다.



(a) 휨시험 상세 (b) 휨시험 전경 (c) 직접인장 시험 상세 (d) 직접인장 시험 전경

그림 4. 휨시험 및 직접인장 시험 장치 및 측정장치 전경

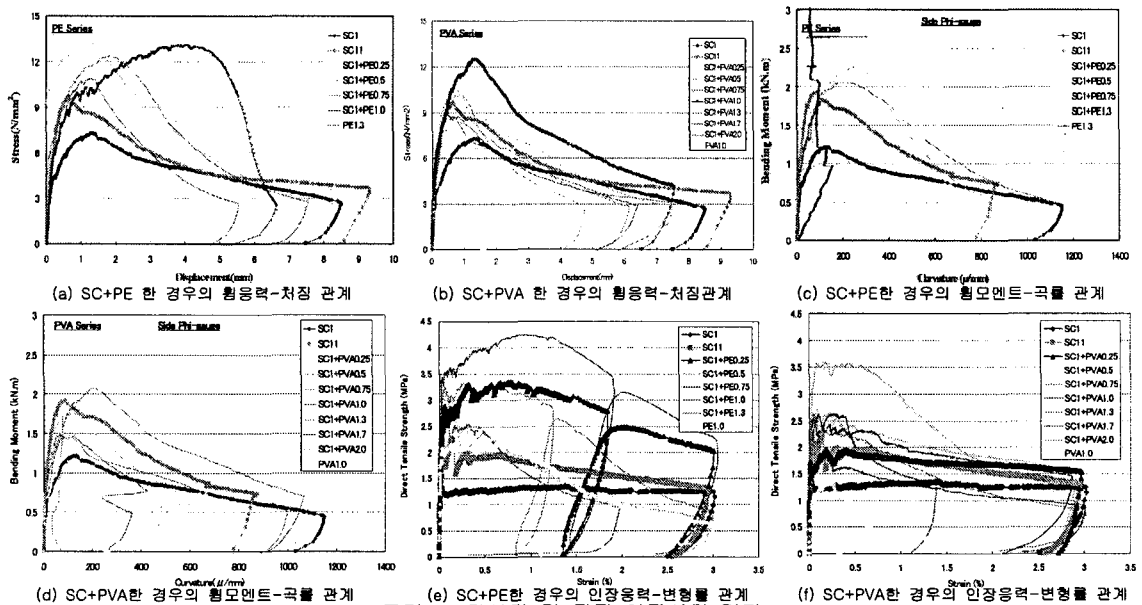
4. 실험 결과 및 분석

4.1 전반적인 휨 및 인장거동특성

휨시험을 통한 하중-처짐 관계 및 모멘트-곡률관계, 그리고 직접인장시험을 통한 인장강도-변형률 관계를 그림 5(a)~(d)에 나타내었다. 시험체에 대한 전반적인 휨 및 인장거동을 살펴보면 다음과 같다. 본 실험에서 설정한 HPFRCCs는 휨시험 및 인장시험에서 변형경화 및 다수균열 특성을 보였다. 또한 단일섬유를 사용한 시험체에 비하여 Macro 섬유 및 Micro 섬유를 Hybrid 한 경우가 휨인성(2-4%) 및 인장인성(1-1.5%)이 향상되는 것으로 나타났으며, 섬유의 혼입률이 증가할수록 인성은 증가하는 것을 알 수 있었다.

4.2 휨인성의 평가기법 제안

휨인성의 평가 결과를 표 3에 정리하였다. 표로부터 초기균열강도의 결정은 육안, 모멘트-곡률 분포상의 비선형 초기점, 그리고 최대 휨강도(M)의 $0.3M$ 시 시크트 기울기에 대한 0.05mm Offset 3종류로 하였다.



(a) SC+PE한 경우의 휨응력-처짐 관계 (b) SC+PVA한 경우의 휨응력-처짐관계 (c) SC+PE한 경우의 휨모멘트-곡률 관계 (d) SC+PVA한 경우의 휨모멘트-곡률 관계 (e) SC+PE한 경우의 인장응력-변형률 관계 (f) SC+PVA한 경우의 인장응력-변형률 관계

표 3. 실험결과 일람

Specimen	초기균열강도						최대휨강도	직접인장시험 ⁴⁾		인성지수 ⁵⁾
	Visual ¹⁾		Nonlinear Point ²⁾		Offset ³⁾			P_t	δ_t	
	P_{ini}	δ_{ini}	P_{ini}	δ_{ini}	P_{ini}	δ_{ini}				
SC1	13.01	0.132	11.64	0.114	12.38	0.121	1.22	1.595	0.038	60.07
PE1.3	18.04	0.166	15.16	0.142	17.94	0.152	2.09	2.287	0.303	57.27
PVA1.0	13.02	0.121	11.43	0.104	12.48	0.110	1.26	1.360	0.120	14.47
SC1+PE0.25	23.15	0.151	19.01	0.136	21.81	0.144	0.72	3.353	0.791	41.89
SC1+PE0.5	22.07	0.133	16.75	0.108	19.57	0.124	2.25	3.055	0.119	70.53
SC1+PE0.75	22.01	0.154	19.44	0.132	21.92	0.142	2.03	2.585	0.094	33.38
SC1+PE1.0	16.80	0.129	13.99	0.127	17.72	0.132	1.82	4.249	0.939	55.42
SC1+PVA0.25	12.01	0.129	12.89	0.116	11.91	0.126	1.14	1.957	0.002	63.59
SC1+PVA0.5	16.77	0.124	16.76	0.126	18.29	0.138	1.49	2.719	0.084	53.67
SC1+PVA0.75	18.88	0.153	16.62	0.134	19.67	0.156	1.47	2.564	0.050	32.94
SC1+PVA1.0	19.02	0.109	17.70	0.098	19.36	0.116	2.08	1.935	0.165	64.25
SC1+PVA1.3	16.69	0.152	15.66	0.134	17.96	0.154	1.72	2.630	0.046	41.06
SC1+PVA1.7	18.55	0.162	16.46	0.140	19.58	0.149	1.49	2.639	0.267	31.39
SC1+PVA2.0	23.11	0.173	19.29	0.138	21.71	0.156	1.76	3.610	0.175	28.63

1) 육안으로 확인

2) 모멘트-곡률관계시 비선형성이 시작되는 점

3) 최대휨강도의 30%점과 원점을 잇는 Secant 기울기에 대한 0.05% Offset

4) 원주형 직접 인장강도 시험에 의한 인장강도 및 최대 인장변형

5) $I_{50} = \text{AREA}_{25.5\delta} / \text{AREA}_{\delta_{ini}}$

또한 휨인성의 평가는 ASTM C1018 중 I_{50} 로 하였다. 표로부터 Offset 법을 적용하여 초기 균열강도를 결정할 경우가 혼입물에 따른 인성의 증가분을 가장 적절하게 평가하고 있음을 알 수 있다.

고인성 섬유보강 시멘트 복합체의 인장시험의 경우는 공시체의 크기, 형상, 단부조건 뿐만 아니라 섬유보강 시멘트계 재료 특유의 문제로서, 섬유배향의 문제, 섬유길이 등이 하중-변형도 곡선에 큰 영향을 미친다. 따라서, 인장성능평가의 기준이 되는 시험법으로서 간단하고, 동일한 결과를 얻을 수 있는 방법을 모색하고 있으면 그 대안으로서 휨시험으로 평가하는 방법을 모색하고자 한다.

5. 결 론

고인성 섬유보강 시멘트 복합체의 휨인성 성능 및 평가에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) HPRCCs의 휨인성 평가에 있어 초기균열강도의 결정은 최대 휨강도(M)의 $0.3M$ 과 원점을 이은 시컨트 기울기를 0.05mm 오프셋(Offset)하여 평가하는 것이 적절할 것으로 판단된다.
- (2) 현재로서는 직접인장시험은 실험체의 형상, 섬유유 크기, 실험방법 등의 따라 큰 영향을 받기때문에 휨시험을 통한 모멘트-곡률관계를 환산하여 얻은 인장성능으로 직접인장시험의 인장성능을 적절하게 평가할 수 있는 방법을 차후의 연구에서 제안하고자 한다. 이를 통하여 보다 간편하고 안정적인 HPRCCs의 인장성능 평가가 가능할 것으로 판단된다.

Reference

- 1) Chen, L., Mindess, S. and Morgan, D.R., "Specimen Geometry and Toughness of Steel Fibre Reinforced Concrete", ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 6, No.4, 1994, pp 529-541
- 2) Mindess, S., Shen, L. and Morgan, D.R., " Determination of the First Crack Strength and Flexural Toughness of Steel Fibre Reinforced Concrete", Journal of Advanced Cement Based Materials, Vol. 1, No. 5, 1994, pp. 201-208
- 3) ASTM C1018-92, "Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strngth of Fibre-Reinforced Concrete(Using Beam with Third-Point Loading)", ASTM Annual Book of Standard, Vol. 04.02, ASTM, Philadelphia, PA, 1992, pp. 510-516
- 4) Norme Belge NBN B15-238, "Essais des bétons renforcé de fibres-Essai de flexion sur éprouvettes prismatiques", Institute Belge de Normalisation (IBN) 1040 Brussels, Belgium, 1992, p. 9
- 5) CUR Aanveling 35, "Bepalig van de Buigtreksterkte, de Buigtaaiheid de Equivalente Buigtreksterkte van Staalvezelbeton", Civieltechnisch Centrum Vitvoering research en Regelgeving, 2800 AK Danda, The Netherlands, 1994, 12pp
- 6) DEB, "Grundlagen zur Bemessung von Industriefußböden aus Stahlfaserbeton", Deutschen Beton-vereins, 1991, pp. 258-272