



## 이질 보강근 및 섬유와 함께 보강된 FRP 보강근 보강 고강도 콘크리트 보의 휨 거동

양준모<sup>1)</sup> · 신현오<sup>1)</sup> · 민경환<sup>1)</sup> · 윤영수<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>고려대학교 건축사회환경공학부

## Flexural Behavior of FRP Bar Reinforced HSC Beams with Different Types of Reinforcing Bar and Fiber

Jun-Mo Yang,<sup>1)</sup> Hyun-Oh Shin,<sup>2)</sup> Kyung-Hwan Min,<sup>1)</sup> and Young-Soo Yoon<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

**ABSTRACT** Ten high-strength concrete beam specimens, which have various combinations of different types of flexural reinforcement and short fibers were constructed and tested. Six beams were reinforced with two layers of steel, CFRP, and GFRP bar combinations. The other four beams were reinforced with two layers of single type CFRP and GFRP bars, with steel and synthetic short fibers. An investigation was performed on the influence of the parameters on the load-carrying capacity, post cracking stiffness, cracking pattern, deflection behavior, and ductility. The low post cracking stiffness, large deflection, deep crack propagation, large crack width, and low ductility of FRP bar-reinforced beams were controlled and improved by positioning steel bars in the inner layer of the FRP bar layer. In addition, the addition of fibers increased the first-cracking load, ultimate flexural strength, and ductility as well as the deep propagating cracks were controlled in the FRP bar-reinforced concrete beams. The increased ultimate concrete strain of fiber-reinforced concrete should be determined and considered when FRP bar-reinforced concrete members with fibers are designed.

**Keywords :** fiber reinforced polymer bar, fiber, stiffness, crack, ductility

### 1. 서 론

최근 콘크리트 구조물의 보강재로 사용되는 철근의 대체재로 FRP(fiber reinforced polymer) 보강근을 사용하려는 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있다. 이는 비부식성을 가진 FRP 보강근이 철근의 부식 문제를 해결해 줄 수 있기 때문이다. FRP 보강근은 비부식성이라는 특징 이외에 강도 대비 중량비가 상당히 작고, 비전도성이라는 장점 역시 가지고 있다. 이러한 FRP 보강근을 콘크리트 구조물에 활용하기 위해 몇몇 나라에서는 FRP 보강근 보강 콘크리트 구조물의 해석, 설계 및 시공에 대한 가이드라인을 제시하고 있다.<sup>1-3)</sup> 그러나, FRP 보강근은 철근과 물리·역학적 특성에서 큰 차이를 보이고 있어 콘크리트 구조물에 FRP 보강근을 적용하는 데에는 상당한 주의가 필요하다.<sup>4)</sup>

FRP 보강근의 탄성계수는 철근의 탄성계수보다 작다. CFRP(carbon FRP) 보강근의 경우가 약 120~150 GPa의

탄성계수를 가지고 있어 철근의 경우와 가장 작은 차이가 나고, AFRP(aramid FRP) 보강근과 GFRP(glass FRP) 보강근의 경우는 탄성계수가 약 35~50 GPa로서 철근의 탄성계수 200 GPa과 4배 이상의 매우 큰 차이를 보인다. 이러한 FRP 보강근의 작은 탄성계수로 인해 FRP 보강근 보강 보는 동일 보강근 비를 가지는 철근 보강 콘크리트 보 보다 더 큰 처짐 및 균열폭을 가지게 되고, 이 큰 처짐 및 균열폭은 사용 한계 상태에 대해 반드시 검토되어야만 한다.

철근은 항복강도 이후에 비탄성적으로 거동하는 반면 FRP 보강근은 파괴 시까지 완전 탄성 거동을 보이고 취성적으로 파괴되기 때문에 FRP 보강근 보강 콘크리트 보에서는 철근 보강 보와 같은 연성 파괴는 나타나지 않는다. 이러한 FRP 보강근 보강 보의 취성 파괴를 방지하기 위해 콘크리트의 압축 파괴가 FRP 보강근의 파단에 의한 파괴 이전에 선행되도록 설계(over-reinforced beam, 과대 보강근 보)하는 방법이 선호되고 있다. 물론 이러한 설계 방법은 철근콘크리트 보의 설계에서는 콘크리트의 취성 파괴를 방지하기 위해 피하도록 하고 있다. 비록 FRP 보강근의 파단에 의한 파괴 보다는 콘크리트의 압축에 의한 파괴가 조금 덜 취성적인 파괴이지만, 콘크

\*Corresponding author E-mail: ysoon@korea.ac.kr

Received November 23, 2010, Revised January 17, 2011,

Accepted April 8, 2011

©2011 by Korea Concrete Institute

리트 그 자체가 취성 재료이고, 고강도 콘크리트는 훨씬 더 취성적이기 때문에, FRP 보강근 보강 고강도 콘크리트 보는 철근 보강 보 보다 연성이 매우 작아 이에 대한 사전 검토가 필요하다. 또한, FRP 보강근 보강 콘크리트 구조물에 대한 몇몇 나라의 가이드라인에서도 단일 종류의 FRP 보강근이 한 열로만 배근된 경우로 그 가이드라인의 활용을 제한하고 있기 때문에 이질의 보강근이 여러 열로 배근된 경우에 대해서는 보다 많은 연구 자료가 필요하다.<sup>1)</sup>

이에 이 연구에서는 이질 보강근이 여러 열로 보강된 보에 대한 거동을 살펴보고, 또한 FRP 보강근 보강 보의 큰 변형 및 낮은 연성 문제에 대한 해결 방안을 모색하기 위해 총 10개의 고강도 콘크리트 보에 대한 실험을 수행하고 균열 후 강성, 처짐, 균열 양상, 연성 등에 대한 거동을 살펴보았다.

## 2. 실험

### 2.1 실험체 상세 및 실험체 세팅

Fig. 1 및 Table 1에 나타난 바와 같이 휨 보강근의 종류, 배열 조합 및 섬유 혼입을 변수로 하는 총 10개의 실험체를 제작하고 실험을 수행하였다. 모든 실험체는 2,300 mm 길이와 230 × 250 mm의 단면적으로 구성되어 있고, 외측 보강근 깊이( $d_1$ ) 206 mm와 내측 보강근 깊이( $d_2$ ) 162 mm를 가지고 철근, GFRP 보강근, CFRP 보강근의 조합으로 2단으로 배열되었다. 섬유 보강 콘크리트가 사용된 부재는 1.0% 부피비의 강섬유 및 2.0% 부피비의 합성섬유가 혼입되었다. 실험체 명에 나타난 첫 문

Table 1 Details of test specimens

Specimen	$E_{r1}$ (GPa)	$E_{r2}$ (GPa)	$A_{r1}$ (mm <sup>2</sup> )	$A_{r2}$ (mm <sup>2</sup> )	$A_r E_r$ (MN)	Type of fiber	$v_f$ (%)
SS	200.0	200.0	485	485	194.0	-	0.0
CC	146.2	146.2	128	128	37.4	-	0.0
CC-SN	146.2	146.2	128	128	37.4	Synthetic	2.0
CC-ST	146.2	146.2	128	128	37.4	Steel	1.0
GG	48.1	48.1	381	381	36.7	-	0.0
GG-SN	48.1	48.1	381	381	36.7	Synthetic	2.0
GG-ST	48.1	48.1	381	381	36.7	Steel	1.0
CS	146.2	200.0	128	485	115.7	-	0.0
GS	48.1	200.0	381	485	115.3	-	0.0
GC	48.1	146.2	381	128	37.0	-	0.0

Where,  $E_{r1}, E_{r2}$  = modulus of elasticity of outer layer and inner layer reinforcements, respectively;  $A_{r1}, A_{r2}$  = area of outer layer and inner layer flexural reinforcements, respectively;  $v_f$  = percentage by volume of fibers; and  $r$  = reinforcing bars

자는 외측 보강근의 종류를, 두 번째 문자는 내측 보강근의 종류를 나타낸 것이고, (S: 철근, C: CFRP 보강근, G: GFRP 보강근) 대신부호(-) 다음 두 문자는 섬유의 종류를 나타낸 것이다(ST: 강섬유, SN: 합성섬유). 예를 들어, GC 실험체는 외측 휨 보강근이 GFRP 보강근으로, 내측 휨 보강근이 CFRP 보강근으로 사용된 부재이고, GG-SN 실험체는 내외측 모두 GFRP 보강근으로 보강되었고 합성섬유가 2.0% 혼입된 부재이다.

모든 FRP 보강근 보강보는 콘크리트의 압괴에 의해 파괴되도록 과대 보강보로 설계되었다. 모든 부재가 유사한 휨 강도를 가지도록 하기 위해 CFRP 보강근 배근

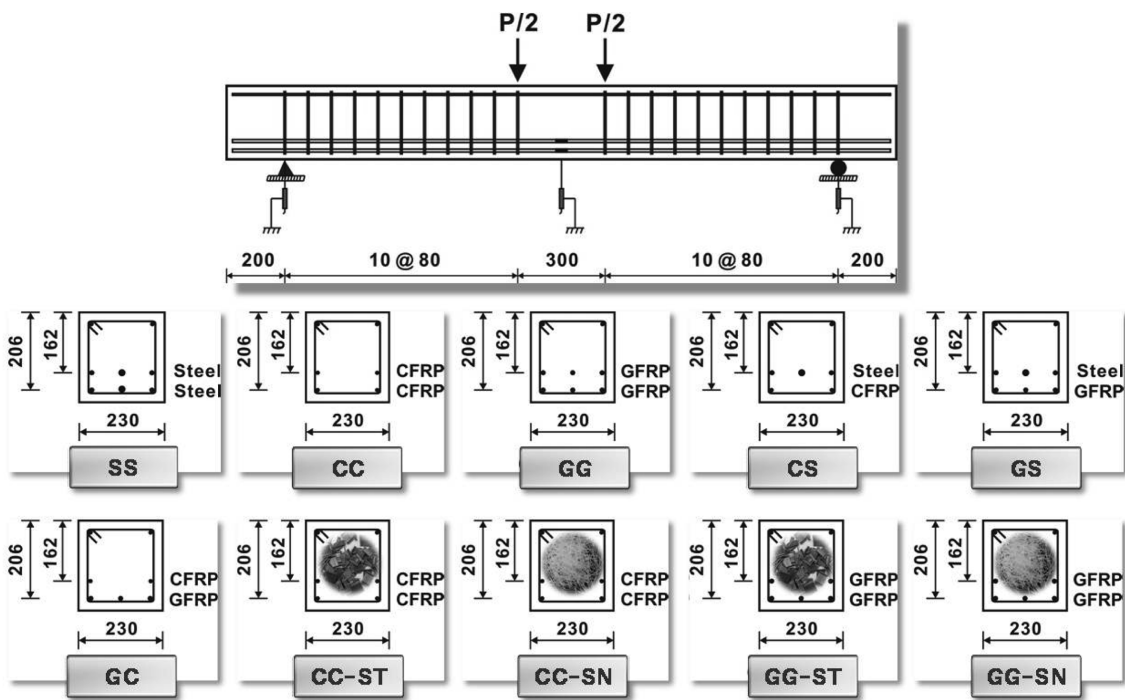


Fig. 1 Details of test specimens and test setup (all units in mm)

**Table 2** Properties of steel and synthetic fibers

Type of fiber	$l_f$ (mm)	Dimension	$l_f/d_f$	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Elastic modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Ultimate elongation (%)
Crimped synthetic fiber	40.0	1.4 × 0.7	35.8	0.91	46.3	470.5	15.3
Hooked steel fiber	30.0	φ 0.5	60.0	7.85	200.0	1195.5	0.6

Where,  $l_f$ = fiber length, and  $d_f$ = fiber diameter

열에는 두 개의 9 mm CFRP 보강근이, GFRP 보강근 배근 열에는 세 개의 13 mm GFRP 보강근이, 철근 배근 열에는 D10, D13, D19 철근이 하나씩 각각 배근되었고, 철근 배근 열에서 발생할 수 있는 작은 비틀림의 영향은 무시하였다. 압축 철근으로 D10 철근이 사용되었고, 전단 철근으로 D10 철근을 80 mm간격으로 배근하였다.

Fig. 1과 같이 모든 실험체는 500 kN 용량의 UTM (universal testing machine)을 이용하여 실험하였다. UTM 단조하중을 천천히 가함과 동시에 하중, 처짐, 변형률을 자동으로 측정하였고, 각 하중 단계에서의 균열 양상 및 균열 폭 역시 기록하였다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 중앙 처짐 및 지점 처짐을 LVDT(linear voltage differential transformer)를 설치하여 측정하였고, 모든 휨 보강근 중앙에 변형률 게이지를 부착하여 보강근의 변형을 측정하였다.

## 2.2 재료 특성

Table 3은 실험체에 사용된 일반 철근과 FRP 보강근의 물성을 정리한 것이다. 실험에 사용된 FRP 보강근 (Fig. 2)은 국내 D사에서 제작되었고, Table 3에 나타난 FRP 보강근의 물성치는 D사에서 제공한 동일 배치의 물성 자료를 이용하였다. GFRP 보강근은 E-glass 섬유 70%와 vinyl ester 레진 30%로, CFRP 보강근은 탄소 섬유 70%와 vinyl ester 레진 30%로 각각 구성되었다. 표면은 브레이딩 기술을 이용하여 리브를 주는 방식의 표면 처리 방법이 적용되었다.

실험에 사용된 절곡형 폴리올레핀계 구조용 합성섬유와 번들형 양단 hooked type 강섬유의 물성치를 Table 2에 정리하였고, 그 형상은 Fig. 3과 같다.

모든 실험체의 콘크리트는 100 × 200 mm 공시체로 표준 압축강도( $f_{cu}$ ), 쪼갠 인장강도( $f_{sp}$ ) 실험이 수행되었고, 3등분점 재하 실험을 통해 휨강도( $f_r$ )를 구하였다. Table 4에 실험체에 사용된 콘크리트 배합표 및 콘크리트의 물성을 나타내었다. ASTM C 1609<sup>5</sup>에서 정의하고 있는 L/600 처짐에서 잔류 강도( $f_{600}^D$ ), L/150 처짐에서 잔류

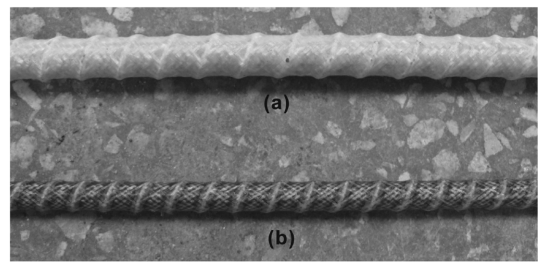
**Table 3** Properties of steel and FRP bars

Designation	Area (mm <sup>2</sup> )	$E_r$ (GPa)	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)
D10 Steel	71	200.0	477	594
D13 Steel	127	200.0	470	612
D19 Steel	287	200.0	469	598
9mm CFRP bar	64	146.2	N.A.	2130
13 mm GFRP bar	127	48.1	N.A.	941

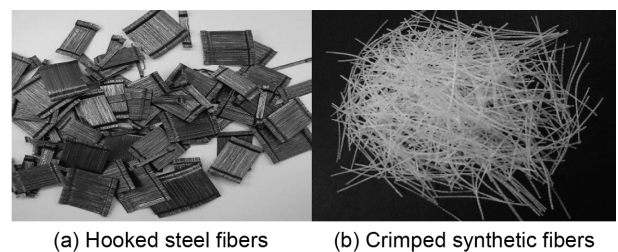
**Table 4** Mix proportion and properties of concrete

	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )						
	W	C	FA	SF	S	G	WRA
Plain concrete							13
SNFRC	160	545	109	73	574	875	15
SFRC							15
Concrete	$f_{cu}$ (MPa)	$f_{sp}$ (MPa)	$f_r$ (MPa)	$f_{600}^D$ (MPa)	$f_{150}^D$ (MPa)	$T_{150}^D$ (Nm)	
Plain concrete	75.9	5.62	7.21	-	-	-	
SNFRC	89.3	9.03	9.02	5.77	8.40	48.00	
SFRC	104.4	9.29	10.39	8.25	2.65	40.00	

Where, FA = fly ash contents, SF = silica fume contents, S = sand contents, G = gravel contents, and WRA = water reducing agent contents

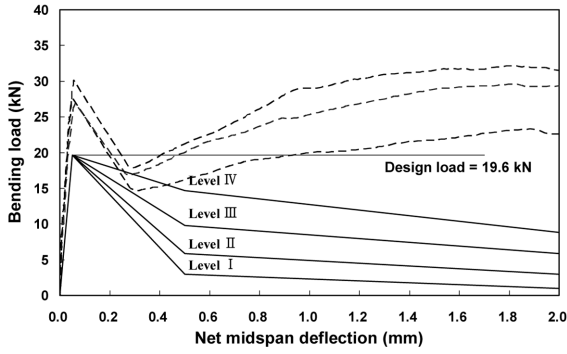


**Fig. 2** FRP bars used in this study: (a) 13 mm GFRP bar; (b) 9 mm CFRP bar

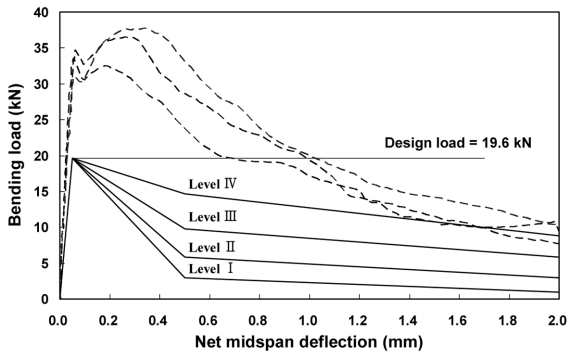


**Fig. 3** Fibers used in this study

강도( $f_{150}^D$ ), L/150 처짐에서의 인성( $T_{150}^D$ ) 역시 섬유 보강 콘크리트의 3등분점 재하 실험 결과를 이용하여 구하였고 Table 4에 나타내었다. 강섬유 보강 콘크리트는 합성섬유 보강 콘크리트 보다 첫 균열 강도가 더 크고 균열 후 하중 감소가 더 작았으나, L/150 처짐에서의 잔류 강도 및 인성은 더 작게 나타났다. 이는 합성섬유의 탄성계수가 강섬유의 탄성계수보다 훨씬 작고, 절곡형 합성섬유가 인장력을 받으며 일자로 펴지는 현상 때문인



(a) Synthetic fiber-reinforced concrete



(b) Steel fiber-reinforced concrete

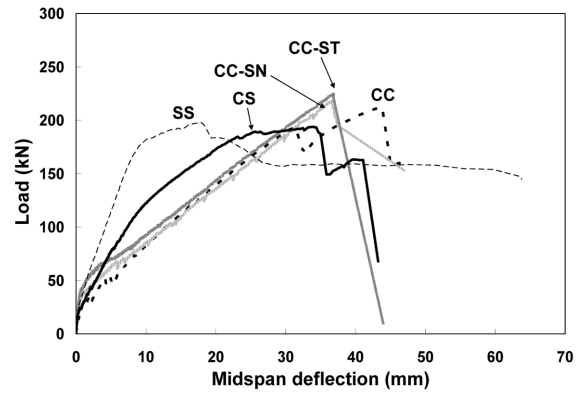
**Fig. 4** Load-deflection curve and flexural toughness performance level of the fiber-reinforced concrete

것으로 판단된다. Morgan 등<sup>6)</sup>이 제안한 인성 성능 등급 (toughness performance level)은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 강섬유 보강 콘크리트 및 합성섬유 보강 콘크리트 모두 level IV로 나타났다.

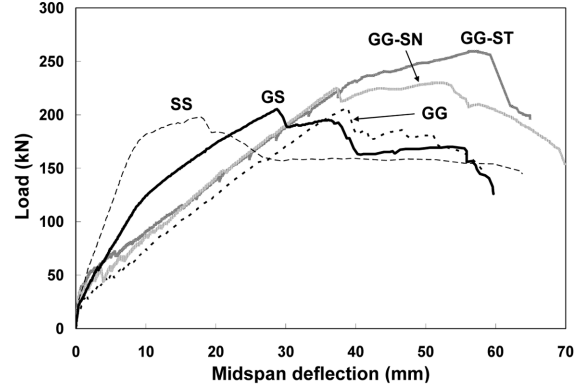
### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 하중-처짐 관계 및 파괴모드

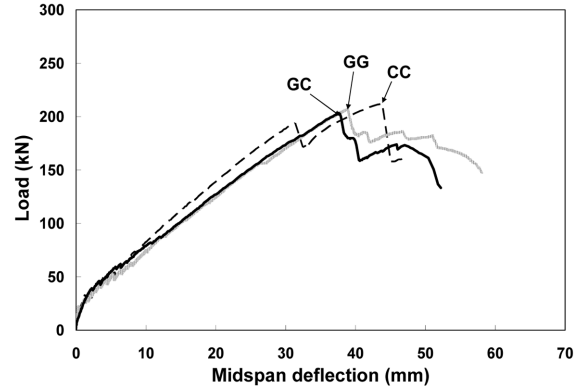
Fig. 5에 총 하중과 중앙 처짐과의 관계를 도시하였고, Table 5에 첫 휨균열 시, 극한하중 시의 하중 및 중앙 처짐을 정리하였다. 섬유를 혼입하지 않은 부재의 경우, 모든 실험체의 첫 휨균열은 거의 동일하게 나타났으나 철근이 배근된 실험체(SS, CS, GS)가 FRP 보강근으로만 배근된 실험체(CC, GG, GC) 보다 다소 높은 첫 균열 하중을 나타내었다. 섬유가 혼입된 부재는 섬유가 혼입되지 않은 부재보다 더 큰 균열 하중을 나타내었고, 특히 강섬유가 혼입된 CC-ST, GG-ST 부재는 CC, GG 부재보다 2배 더 큰 균열 하중을 나타내었다. 첫 균열 이후 모든 부재의 강성은 감소하였고, 각 부재는 휨 보강근의 조합 및 섬유의 영향으로 서로 다른 거동을 보이기 시작하였다. Table 1에 나타난 바와 같이 축방향 강성의 차이로 인해 FRP 보강근으로만 보강된 CC, GG GC 실험체의 균열 이후 강성이 SS보다 훨씬 더 작게 나타났다 ( $(n_p)_{SS} \approx 5(n_p)_{CC} \approx 5(n_p)_{GG}$ , 여기서  $n$ =보강근의 철근 대비 탄성계수비,  $\rho$ =보강근 비). 균열 이후 강성에 대한 섬유



(a) Specimens SS, CC, CS, CC-SN and CC-ST



(b) Specimens SS, GG, GS, GG-SN and GG-ST



(c) Specimens CC, GG, GC

**Fig. 5** Load versus midspan deflection responses

혼입의 영향은 거의 나타나지 않았다.

CS, GS 실험체의 경우, 내측에 배근된 철근의 영향으로 FRP 보강근으로만 배근된 실험체 보다 증가된 균열 이후 강성을 보였고 철근이 항복한 이후부터는 강성이 다시 감소하여 CC, GG 실험체 보다 다소 작은 강성을 보였다. 그러나 철근이 항복하기 이전의 높은 강성으로 인해 동일 하중에서의 중앙 처짐은 CS, GS 부재가 CC, GG보다 더 작게 나타났다. 이를 통해 FRP 보강근 내측에 철근을 배근함으로써 FRP 보강근 보강 보의 큰 처짐을 제어할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 처짐 제어를 위해 배근된 철근은 FRP 보강근 내측에 배근되고 큰 피복두께를 가짐으로써 부식으로부터 보호받을 수 있다.<sup>7)</sup>

섬유가 혼입되지 않은 부재의 경우, 극한 하중은 모든 부재가 거의 유사하게 나타났고, CC 부재를 제외한 모

**Table 5** Summary of test results

Specimen	$P_{cr}$ (kN)	$\Delta_{cr}$ (mm)	$P_u$ (kN)	$\Delta_u$ (mm)	Failure mode
SS	26	0.43	198	17.85	Compression
CC	21	0.68	212	42.82	Shear compression
CC-SN	27	0.52	218	36.59	FRP bar rupture
CC-ST	42	0.83	225	36.81	FRP bar rupture
GG	23	0.67	207	38.85	Compression
GG-SN	35	0.65	230	50.88	Compression
GG-ST	39	0.79	259	56.19	Compression
CS	25	0.61	194	34.03	Compression
GS	25	0.62	205	28.76	Compression
GC	22	0.71	203	37.61	Compression

든 부재가 콘크리트의 압축 파괴에 의해 파괴되었다. CC 부재는 Fig. 6(b)에 나타난 바와 같이 전단 지간에 발생된 수직 휨 균열이 하중이 점차 증가함에 따라 점차적으로 하중 재하점을 향하여 휘어지고 균열이 벌어지다가 이 경사 인장 균열 윗부분의 콘크리트가 하중 재하점 부근에서 압괴되면서 종국 파괴되는 전단-압축 파괴 모드를 보였다. 다른 문헌<sup>8-10)</sup>의 실험에서도 유사한 파괴 양상이 나타났는데, 이러한 파괴가 나타나는 이유는 FRP 보강근 보강 보의 휨 균열의 깊이가 너무 깊어 경사 균열각이 거의 수평에 가깝기 때문이다. Rashid 등<sup>8)</sup>은 이러한 파괴의 위험성을 지적하면서 전단-압축 파괴를 방지하기 위해 하중 재하점 부근의 전단 보강에 대한 규정을 보다 강화시킬 필요가 있다고 언급하였다.

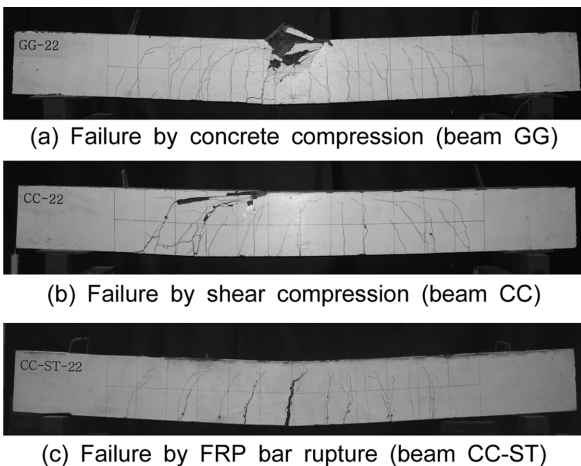
섬유가 혼입된 부재의 경우, CC 시리즈(CC-SN, CC-ST)와 GG 시리즈(GG-SN, GG-ST)의 파괴 양상이 서로 다르게 나타났다. CC-SN, CC-ST 실험체의 경우, CC 실험체와 유사한 거동을 보이다가 모든 부재가 과대 보강 보로 설계되고 콘크리트의 압괴에 의해 파괴되도록 계획되었음에도 불구하고 CFRP 보강근의 파단에 의해 종국 파괴되었다(Fig. 6(c)). 이는 섬유 보강 콘크리트의 증가된

극한 압축 변형률( $\epsilon_{cu}$ ) 때문인 것으로 판단된다. FRP 보강근의 변형률이 극한 인장 변형률에 도달하였을 때 콘크리트의 압축 변형률은 ACI 가이드라인<sup>11)</sup>에서 제시하고 있는 콘크리트의 극한 압축 변형률 0.003을 초과하였음에도 콘크리트의 압축 파괴가 나타나지 않았다. 최근 섬유 보강 콘크리트에 대한 연구에서 섬유 보강 콘크리트의 극한 압축 변형률은 0.0035 이상이라고 보고되고 있는데, 일반 철근으로 보강된 부재의 경우 철근의 항복 시점을 우선시하고 콘크리트의 압축 파괴 이전에 철근이 항복한다고 가정하고 설계하기 때문에 섬유 보강 콘크리트의 증가된 극한 압축 변형률이 설계 시 크게 고려되고 있지 않다. 그러나, FRP 보강근 보강 콘크리트 부재의 경우 FRP 보강근이 항복점을 가지지 않고 선형 탄성 거동을 보이기 때문에 부재의 파괴 양상을 예측하는데 있어 콘크리트의 극한 압축 변형률 값이 매우 중요한 역할을 한다. 따라서, 섬유가 혼입된 FRP 보강근 보강 콘크리트 부재의 갑작스런 FRP 보강근 파단에 의한 파괴를 방지하기 위해서는 정확한 섬유 보강 콘크리트의 극한 압축 변형률을 설계에 반영하는 것이 필요하다. CC-SN, CC-ST 실험체의 극한 하중은 CC 실험체보다 미소한 증가를 보였고, 이는 FRP 보강근의 파단 이전까지 증가한 콘크리트의 압축 변형률 때문이다.

GG-SN, GG-ST 실험체의 경우, CC-SN, CC-ST 실험체와는 달리 콘크리트의 압괴에 의해 종국 파괴되었다. 섬유 보강 콘크리트의 연화된 최대 하중 이후 거동으로 인해 파괴 시점에서 뚜렷한 비선형적인 연성 거동을 보였고, 섬유 보강 콘크리트의 증가된 극한 압축 변형률과 증가된 압축강도로 인해 극한 하중은 GG 실험체 보다 11%, 25% 각각 증가되었다(Fig. 5(b)). 철근콘크리트 부재와는 달리 FRP 보강근 보강 콘크리트 부재는 과대 보강근 보일 경우 콘크리트의 극한 압축 변형률의 증가에 따라 내하력 역시 증가하기 때문에 섬유가 혼입된 FRP 보강근 보강 콘크리트 부재의 내하력 증가에 섬유의 혼입이 큰 영향을 끼침을 알 수 있다. Alsayed와 Alhozaimy에 의해 수행된 GFRP 보강근 보강보의 실험에서는 부피 대비 1.0%의 강섬유 혼입을 통해 약 38%의 극한 모멘트 증가가 나타났다.<sup>12)</sup>

### 3.2 균열 양상

첫 균열 하중 이후 순수 휨 구간 내에 최대 주응력 방향의 수직 방향으로 휨 균열이 발생하였다. FRP 보강근으로만 보강된 부재들의 경우, 첫 휨 균열 발생하자 그 휨 균열은 압축 연단 부근까지 매우 깊숙이 진전하였다. Fig. 7은 모든 실험체의 사용 하중에서의 균열 양상을 도시하고 있다. FRP 보강근 보강 부재의 설계는 처짐과 균열의 지배를 주로 받는 것을 감안하여 사용 하중은 56 kN ( $0.33M_u$ )으로 가정하였다. Fig. 7에 보이는 바와 같이 사용 하중 하에서 SS 부재의 균열 깊이가 가장 얇게 나타났고, FRP 보강근으로만 보강된 CC, GG, GC 부재는 그



**Fig. 6** Modes of failure

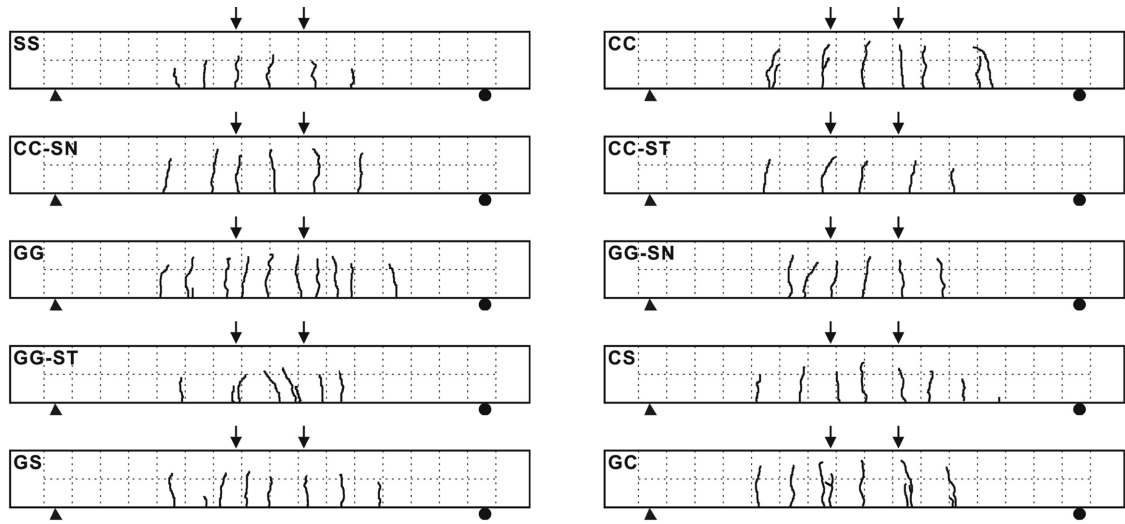


Fig. 7 Crack patterns at service load

균열 깊이가 매우 깊게 나타났다. FRP 보강근과 철근이 함께 보강된 CS, GS 부재는 내측에 배근된 철근의 영향으로 그 균열 깊이가 CC, GG 보다 얇게 나타났다, 섬유가 혼입된 CC-SN, CC-ST, GG-SN, GG-ST 부재는 섬유의 브리징 효과 및 인장응력 분담의 영향으로 CC, GG 보다 균열 깊이가 얇게 나타났다. 이를 통해 FRP 보강근 보강 보의 빠르고 깊은 균열의 진전을 제어할 수 있음을 알 수 있다. 합성 섬유가 보강된 CC-SN, GG-SN 부재의 균열 깊이에 대한 섬유 보강 효과는 강섬유가 보강된 CC-ST, GG-ST 부재보다 더 작게 나타났는데, 이는 물질 무늬의 절곡형 합성 섬유가 인장응력을 받으며 점차 일자로 퍼지는 영향 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 8은 하중과 최대 균열폭 관계를 도시한 것이다. FRP 보강근으로만 보강된 CC, GG, GC 실험체는 하중이 증가함에 따라 최대 균열폭이 매우 빠르게 커지는 것을 볼 수 있다. 그러나, GG 실험체의 경우는 80 kN 이후부터 최대 균열폭의 증가가 천천히 진행되고 추가적인 균열이 계속 발생되는 보다 훌륭한 균열 양상을 보였다. 이는 GG 부재가 CC, GC 부재 보다 인장 증강(tension stiffening) 효과가 뛰어나고 주 균열 부위에서 FRP 보강근이 받는

집중된 인장응력을 균열이 나지 않은 부위로 잘 분배하는 것을 나타낸다. CS, GS 부재의 경우, 내측에 배근된 철근이 빠른 균열폭의 증가를 크게 제어해주었다. GG 시리즈의 최대 균열폭 양상을 살펴보면, 120 kN 이전 하중까지는 GG-ST와 GG-SN 실험체의 최대 균열폭은 GG 실험체의 최대 균열폭보다 매우 작게 나타났다. 그러나 120 kN 이후 하중에서는 최대 균열폭의 차이가 크게 나타나지 않았다. CC 시리즈에서는 섬유 혼입을 통해 하중 초기에 첫 균열 시점을 늦춰주는 효과는 있었지만, 사용 하중 이후부터 균열폭을 제어해주는 효과는 거의 나타나지 않았고 CC 실험체와 CC-SN, CC-ST 실험체의 최대 균열폭 차이는 파괴 시까지 일정하게 유지되었다.

### 3.3 연성

FRP 보강근은 파괴시 까지 선형 탄성적인 거동을 보이기 때문에, Naaman과 Jeong<sup>13)</sup>이 비탄성 흡수 에너지와 탄성 저장 에너지와의 관계를 고려하여 제안한 다음 연성지수 식 (1)을 통해 모든 부재의 연성을 평가하여 Table 6에 정리하였다.

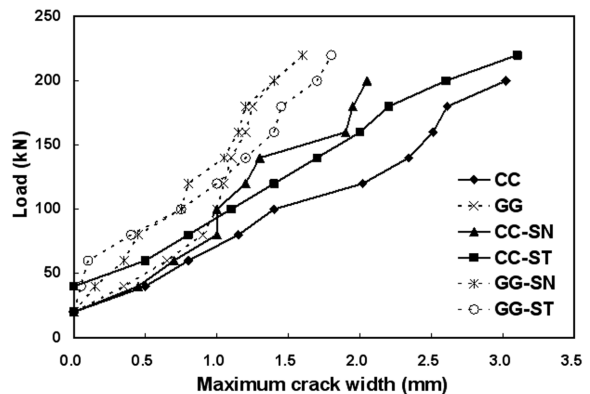
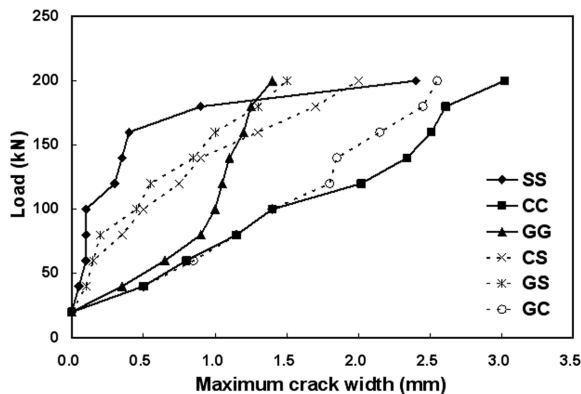


Fig. 8 Load versus maximum crack width

**Table 6** Ductility index

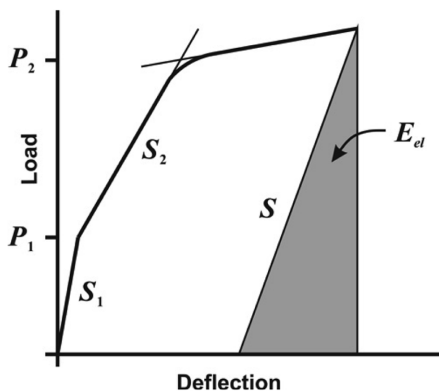
Specimen	$\mu_e$
SS	6.05
CC	1.84
CC-SN	1.64
CC-ST	1.84
GG	1.92
GG-SN	3.24
GG-ST	3.43
CS	3.25
GS	4.10
GC	1.74

$$\mu_e = \frac{1}{2} \left( \frac{E_{tot}}{E_{el}} + 1 \right) \quad (1)$$

여기서,  $\mu_e$  = 연성 지수,  $E_{tot}$  = 총 에너지,  $E_{el}$  = 탄성 에너지이다. 탄성 에너지 환산을 위해 필요한 탄성 거동의 기울기는 원칙적으로 하중 재하-제하(loading-unloading) 실험을 통해 구해야 하지만 이 연구에서는 하중-처짐 곡선의 두 직선을 가중 평균하는 다음 식 (2)를 통해 탄성 거동의 기울기를 구하였다(Fig. 9). 또한, 극한 하중의 80%로 하중이 감소된 지점을 파괴점으로 가정하였다.

$$S = \frac{P_1 S_1 + (P_2 - P_1) S_2}{P_2} \quad (2)$$

여기서,  $S$  = 두 초기 기울기,  $S_1$ ,  $S_2$ 의 평균 기울기이다. Table 6에 나타난 바와 같이, FRP 보강근으로만 보강된 CC, GG, GC 부재는 SS 보다 연성 지수가 3배 이상 작게 나타나 전형적인 FRP 보강근 보강 부재의 취성 거동을 보여주었다. CS, GS 부재는 철근의 영향으로 CC, GG 보다 연성 지수가 약 2배 정도 증가하였다. CC-SN, CC-ST 부재의 경우 FRP 보강근의 파단에 의해 부재가 취성적으로 파괴되었기 때문에 섬유 혼입을 통한 연성의 증가는 나타나지 않았지만, 콘크리트의 압축 파괴를 보



**Fig. 9** Ductility index based on the energy concept

인 GG-SN, GG-ST 부재는 GG 보다 연성 지수가 각각 70%, 80% 증가하였다. 이를 통해 FRP 보강근 내측의 철근 배근 및 섬유의 혼입을 통해 취성 거동을 보이는 FRP 보강근 보의 연성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

이질 보강근의 조합 및 섬유의 혼입을 변수로 한 FRP 보강근 보강 고강도 콘크리트 보의 구조 실험 결과를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 낮은 탄성 계수를 가지고 파괴시까지 선형 탄성 거동을 보이는 FRP 보강근의 특성 때문에 FRP 보강근 보강 보는 낮은 강성을 가지고 매우 큰 처짐을 나타내었고, 균열이 매우 빠르고 깊고 넓게 발생하였을 뿐만 아니라 취성적인 파괴 거동을 보였다.
- 2) FRP 보강근 내측에 철근을 처짐 및 균열 제어용으로 하이브리드 배근함으로써 FRP 보강근 보강 보의 낮은 강성, 큰 처짐, 낮은 연성, 깊은 균열 및 넓은 균열폭을 제어할 수 있었다.
- 3) 섬유의 혼입을 통해 FRP 보강근 보강 보의 빠르고 깊은 균열을 제어할 수 있고 연성을 증가시켜줄 수 있을 뿐만 아니라 내하력 역시 향상시킬 수 있었다.
- 4) 콘크리트의 압축 파괴에 의해 종국 파괴되도록 설계 되었음에도 불구하고 섬유 혼입된 CFRP 보강근 보강 보는 FRP 보강근의 파단에 의해 종국 파괴되었다. 이는 섬유 보강 콘크리트의 증가된 극한 압축 변형률 때문으로, 섬유 혼입된 FRP 보강근 보강 콘크리트 부재 설계 시 섬유 혼입에 의해 증가된 콘크리트의 극한 압축 변형률에 대한 고려가 필요하다.

#### 감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이다(No. 2007-0056796).

#### 참고문헌

1. American Concrete Institute (ACI), "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars," *ACI 440.1R-06*, Farmington Hills, MI, 2006, 44 pp.
2. Canadian Standards Association (CSA), "Design and Construction of Building Components with Fibre Reinforced Polymers," *CAN/CSA S806-02*, Rexdale, Ont., Canada, 2002, 206 pp.
3. Japan Society of Civil Engineers (JSCE), "Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials," Concrete Engineering Series 23, A. Machida ed., Tokyo, Japan, 1997, 325 pp.
4. 이주하, 양준모, 윤영수, "2방향 슬래브의 성능 향상을 위한 집중 배근된 FRP 바의 적용," 콘크리트학회 논문

- 집, 19권, 6호, 2007, pp. 727~734.
5. ASTM International, "Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)," *ASTM C1609-07*, West Conshohocken, PA, 2007, 9 pp.
  6. Morgan, D. R., Mindess, S., and Chen, L., "Testing and Specifying Toughness for Fiber Reinforced Concrete and Shotcrete," *Proc., 2nd Univ.-Industry Workshop on Fiber-Reinforced Concrete and Other Advanced Composites-Fiber-Reinforced Concrete-Modern Developments*, N. Banthia and S. Mindess, ed., Toronto, 1995, pp. 29~50.
  7. Aiello, M. A. and Ombres, L., "Structural Performances of Concrete Beams with Hybrid (Fiber-Reinforced Polymer-Steel) Reinforcements," *Journal of Composites for Construction*, Vol. 6, No. 2, 2002, pp. 133~140.
  8. Rashid, M. A., Mansur, M. A., and Paramasivam, P., "Behavior of Aramid Fiber-Reinforced Polymer Reinforced High Strength Concrete Beams under Bending," *Journal of Composites for Construction*, Vol. 9, No. 2, 2005, pp. 117~127.
  9. Rafi, M. M., Nadjai, A., and Ali, F., "Experimental Testing of Concrete Beams Reinforced with Carbon FRP Bars," *Journal of Composite Materials*, Vol. 41, No. 22, 2007, pp. 2657~2673.
  10. Theriault, M. and Benmokrane, B., "Effects of FRP Reinforcement Ratio and Concrete Strength on Flexural Behavior of Concrete Beams," *Journal of Composites for Construction*, Vol. 2, No. 1, 1998, pp. 17~16.
  11. American Concrete Institute (ACI), "Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete," *ACI 544.4R-88* (Reapproved 1999), Farmington Hills, MI, 1988, 18 pp.
  12. Alsayed, S. H. and Alhozaimy, A. M., "Ductility of Concrete Beams Reinforced with FRP Bars and Steel Fibers," *Journal of Composite Materials*, Vol. 33, No. 19, 1999, pp. 1792~1806.
  13. Naaman, A. E. and Jeong, S. M., "Structural Ductility of Concrete Beams Prestressed with FRP Tendons," *Proceedings of the Second International RILEM Symposium (FRPRCS-2): Non-Metallic (FRP) for Concrete Structures*, Ghent, Belgium, 1995, pp. 379~386.

**요 약** 이질 보강근의 조합 및 섬유 혼입을 변수로 한 10개의 고강도 콘크리트 보를 제작하고 구조 실험을 수행하고 균열 후 강성, 처짐, 균열 양상, 연성에 대한 거동을 살펴보았다. 6개 부재는 철근, CFRP 보강근, GFRP 보강근의 조합으로 2단 휨 배근되었고, 4개 부재는 CFRP 보강근 혹은 GFRP 보강근으로만 2단 배근되고 강섬유 및 합성 섬유를 혼입하였다. FRP 보강근 내측에 철근을 처짐 및 균열 제어용으로 하이브리드 배근함으로써 FRP 보강근 보강 보의 낮은 강성, 큰 처짐, 낮은 연성, 깊은 균열 및 넓은 균열폭을 제어할 수 있었다. 또한, 섬유의 혼입을 통해 FRP 보강근 보강 보의 빠르고 깊은 균열이 제어되고 연성 및 내하력이 향상되었다. 섬유 혼입된 FRP 보강근 보강 콘크리트 부재 설계 시 섬유 혼입에 의해 증가된 콘크리트의 극한 압축 변형률에 대한 고려가 필요함을 알 수 있었다.

**핵심용어** : FRP 보강근, 섬유, 강성, 균열, 연성