



## 격자형 탄소섬유로 보강한 R/C보의 보강효과

조병완<sup>1)\*</sup> · 태기호<sup>1)</sup> · 권오혁<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 한양대학교 토목공학과

(2002년 8월 21일 원고접수, 2003년 5월 16일 심사완료)

### Reinforcement Effect of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Grid-type Carbon Fiber Plastics

Byung-Wan Jo<sup>1)\*</sup>, Ghi-Ho Tae<sup>1)</sup>, and Oh-Hyuk Kwon<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

(Received August 21, 2002, Accepted May 16, 2003)

#### ABSTRACT

Flexural characteristics of the R.C beams strengthened with newly-developed grid-type carbon fiber plastics(CFRP-GRIDS) were investigated. The tests were conducted under the four-points load to the failure to investigate the strengthening effects of CFRP-GRIDS on the beams. Results showed that initial cracks appeared in the boundary layers of fibers embedded in the newly-placed mortar concrete slowly progressed to the direction of supports and showed fracture of fiber plastics and brittle failure of concrete in compression in sequence after the yielding of steel reinforcement. Accordingly, the appropriate area of Grid-type carbon-fiber plastics in the strengthening design of deteriorated RC structures should be limited and given based on the ultimate strength design method to avoid the brittle failure of concrete structures.

**Keywords :** carbon grid fiber, strengthening effect, separation failure, anchor bolt effect, strengthening design

#### 1. 서 론

건설구조물의 보수·보강은 설계목적에 적합한 안전성과 구조물의 내구년환을 증대시키기 위한 것으로 국내실정에 맞는, 경제적인 보수, 보강재료의 선택과 공법개발이 요구된다. 콘크리트 구조물의 보강공법에는 강판접착공법, 프리스트레싱공법, 단면의 증가공법, 부재의 증설공법 등이 있다. 이 중 구조물의 보강 기법중 하나인 강판접착공법은 에폭시를 사용하여 손상된 구조물의 표면에 강판을 접착시키거나 앵커볼트로 고정시킴으로써 강성을 증대시키는 공법이다.

그러나 강판은 자중이 크고, 앵커볼트를 위한 천공, 강판부식으로 성능이 저하되는 문제점이 있다. 이러한 이유로 최근에는 강판에 비해 자중이 상대적으로 작고 시공성이 좋으며, 재료자체의 인장강도가 강판에 비해 우수한 탄소섬유시트를 유용하게 사용하고 있다.<sup>1)</sup>

한편, 잔교식부두와 같은 항만구조물에서는 선박의 충돌 하중이나 집안력 및 견인력으로 인한 장기적인 내력손실로 인하여 Girder부의 철근노출과 콘크리트가 탈락되는 현상이 발생하고 있다.

탄소섬유나 강판보강시 염분과 해수의 침투로 강판이나 섬유강도의 강도가 떨어지는 문제점이 보고되고 있는 반면<sup>2)</sup> 격자형 탄소섬유 보강재는 내방식성이 우수하고, 가벼워 일본에서는 항만구조물의 보강 뿐 만 아니라 철근대체 재료나 프리스트레스트 콘크리트의 긴장재로서의 연구가 진행되고 있는 실정이다.<sup>4)</sup>

따라서 본 연구에서는 잔교식 부두의 Girder부에 내력손실로 인한 철근뒹개 탈락한 경우를 고려하여 격자형 탄소섬유를 이용한 철근콘크리트보의 보강효과를 검증하였으며, 격자형 탄소섬유보강공법과 등가의 철근추가 보강공법으로 제작한 보강 시험체에 대하여 정적 휨과괴 실험을 실시함으로써 격자형 탄소섬유보강공법의 현장 적용 가능성을 검토하였다. 아울러 탄소격자섬유보강 시험체의 휨특성 효과를 분석함으로써 탄소격자섬유를 이용한 철근콘크리트보의 보강설계 기초자료를 제시하고자 하였다.

\* Corresponding author

Tel : 02-2290-0327 Fax : 02-2292-0321

E-mail : civilianho@hanmail.net

## 2. 실험계획

### 2.1 사용재료의 물성

본 실험에 사용된 콘크리트, 철근, 격자형 연속섬유, 보수재료 및 에폭시의 물성은 재료실험을 통하여 구하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다.

격자형 연속섬유 보강재의 경우 탄소섬유를 수지로 성형하여 시공성, 현장구조물의 형태, 편의성 및 강성을 고려한 제품으로 현재 일본에서 쓰이고 있는 N사 제품을 사용하였으며, 그 형상은 Fig. 1과 같다.

**Table 1** Properties of Materials

(a) Concrete material

Material properties of cement			
Cement (kgf/cm <sup>2</sup> )	Water (kgf/cm <sup>2</sup> )	Sand (kgf/cm <sup>2</sup> )	Gravel (kgf/cm <sup>2</sup> )
345/395/485	189	997/951/872	749/748/744
Admixture (kgf/cm <sup>2</sup> )	W/C (%)	S/A(%)	
1.86/2.13/2.61	50.9/44.5/36.3	54/53/51(%)	

(b) Steel deformed Bar of D16, 22

Type	$f_y$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$f_t$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$E_s$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	
Steel	D16	5,180	7,160	$2.03 \times 10^6$
	D22	4,720	6,230	$2.04 \times 10^6$

(c) CFRP-grids (NEFMAC<sup>3)</sup>)

Type	Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	$f_t$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$E_{cfpr}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	Area (cm <sup>2</sup> )
C6	1.42	12,000	1,000,000	0.175

(d) Epoxy resin

Epoxy	$f_t$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$f'_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$f_r$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$E_e$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
EPX-3W	$200 \geq$	$700 \geq$	$400 \geq$	$1,000 \geq$

(e) Concrete and repaired material

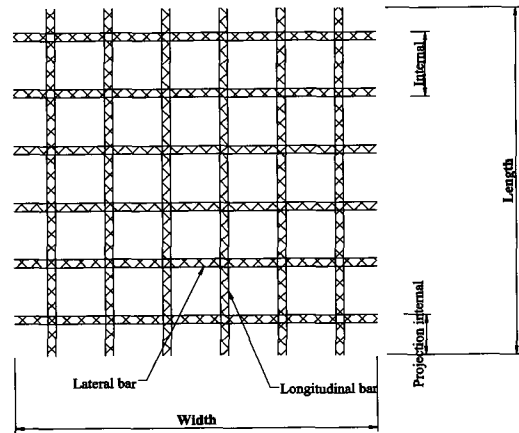
Property	$f'_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$f_t$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$E$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	Ultimate strain
Concrete	242	33.6	$2.33 \times 10^5$	0.003
	295	40.9	$2.57 \times 10^5$	
	367	51.0	$2.87 \times 10^5$	
Polymer	580	100	$1.31 \times 10^6$	0.0004

### 2.2 시험체 설계 및 제작

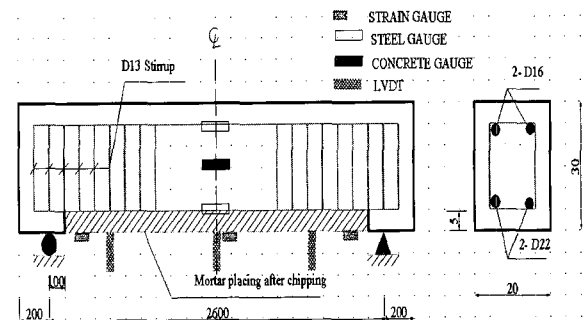
철근콘크리트보 시험체는 단면치수 20×30 cm, 인장철근 2D-22, 압축철근 2D-16, 순지간 길이 2.6 m, 총길이 3.0 m로 Fig.2와 같이 강도설계법에 근거하였다.<sup>5)</sup> 손상된 시험체의 경우, 보수부위에 Air breaker를 이용하여 인장철근 부위까지 쪼아낸 후 모르타르와 물을 재료에 맞는 중량비로 섞어 보수재료를 준비하였다. 보수단면을 Primer(액상 수지:물 = 1:3)로 충분히 도포한 다음 준비한 보수재료를 손상부위에 타설하였다. 보강한 시험체의 경우, 무보강 시험체를 기준으로  $p_{max}$  이하로 보강하였고 보강길이는 순지간(L)에 대하여 0.6L, 0.8L, L의 비율로 보강하였다. 사용한 보강재와 콘크리트와의 부착을 위하여 보의 밑면에 15 cm 간격으로 양쪽에 지름 1 cm, 길이 10 cm의 구멍을 뚫어 에폭시계 접착제로 채운 후 앵커볼트로 고정하였다.

### 2.3 실험변수

탄소격자섬유를 이용한 철근콘크리트보의 보강효과를 분석하기 위하여 보강길이, 보강재의 양을 변수로 하여 시



**Fig. 1** CFRP-grids



**Fig. 2** Beam specimen

험체를 제작하였으며, 보강시험체는 손상된 단면을 가정하여 철근회복두께 5cm의 결손부위를 발생시키고 이 부분에 보수재료를 타설한 후에 보강방법, 보강길이를 달리하여 제작하였다. (Table 2)

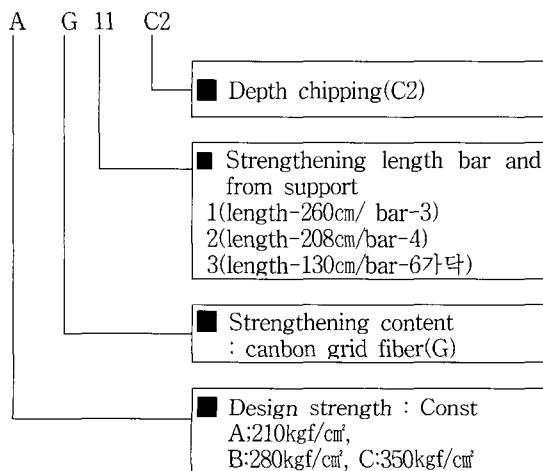
#### 2.4 측정방법

시험체의 휨내력평가를 위한 하중재하는 100 ton 용량의

Table 2 Types of beam specimens

Specimen	Specified strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Strengthening material	Strength-ening Length(L)	Strengthening plastics (bar)
A-CON	210	Pilot	-	-
A-G11-C1		Grid fiber	L	3
A-G11-C2		Grid fiber	L	3
A-G12-C2		Grid fiber	L	4
A-G13-C2		Grid fiber	L	6
A-G21-C2		Grid fiber	0.8L	3
A-G31-C2		Grid fiber	0.6L	3
A-S14-C2		Steel	L	D13
B-CON	280	Pilot	-	-
B-G11-C1		Grid fiber	L	3
B-G11-C2		Grid fiber	L	3
B-G13-C2		Grid fiber	L	6
B-S14-C2		Steel	L	D13
B-S15-C2		Steel	L	D16
C-CON	350	Pilot	-	-
C-G11-C1		Grid fiber	L	3
C-G11-C2		Grid fiber	L	3
C-G12-C2		Grid fiber	L	4
C-G13-C2		Grid fiber	L	6
C-S14-C2		Steel	L	D13
C-S15-C2		Steel	L	D16

Note) C1 : chipping depths 3 cm, C2 : chipping depths 5 cm



만능시험기를 이용하여 4점 휨 재하방법이 적용되었다. 인장철근의 항복여부를 판단하기 위하여 중앙부에 철근 게이지를 주철근에 2개씩 타설전에 설치하였으며, 보강재의 변형을 측정하기 위하여 각각의 보강재에 철근 게이지를 설치하였다. 하중 재하방법은 초기에 0.5 ton 간격으로 재하하였으며 최대하중 근처에서는 시간부의 처짐이 약 2 mm가 되도록 변위제어방식(변위증가속도가 일정하게 되는 제어)으로 가력하여 철근과 보강재의 변형률, 부재의 처짐을 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 영향분석

#### 3.1 보강재에 따른 RC보의 파괴양상

무보강 시험체의 경우 전형적인 휨 파괴의 양상으로 콘크리트 설계강도에 따라 3.0~3.6 ton에서 초기균열이 발생하였으며 재하하중이 증가함에 따라 하중가력점 방향으로 균열폭이 확대되었다. 이에 반해 보수후 보강한 시험체의 경우 전단시간에서 발생한 균열이 고강도인 보수재의 영향에 의해 계면파괴균열로 진전하는 것을 볼 수 있다. (Fig.3) 탄소격자섬유 보강시험체의 경우, 초기균열은 보강길이에 따라 약간씩 차이를 보였으나, 전시간 까지 보강한 시험체를 제외한 0.5L 및 0.8L로 보강한 시험체에서 Fig. 4와 같이 초기균열이 강도와 의 차이에 따라 3.5~5.4 ton으로 보수재와의 계면에서 지점부로 진전되는 휨 박리파괴가 발생하였으며, 균열양상이 격자간격인 5cm간격으로 거의 일정하게 나타났다.

탄소격자 섬유로 보강한 시험체의 파괴양상은 크게 3가지로서 나타나는데 보수재료의 고강도화로 보 중앙부에서 발생한 콘크리트와 보수계면에서의 균열이 지점부로 진행되어 파괴되는 계면박리파괴, 시간중앙에서 철근항복 후 격자와 연결된 앵커볼트의 항복으로 인한 탄소격자섬유파괴, 그리고 격자섬유 항복 후 콘크리트 압축파괴로 나타났다. 그리고 보의 초기균열하중, 항복하중, 연성지수, 보강효과, 파괴모드를 Table 3 에 나타내었다.

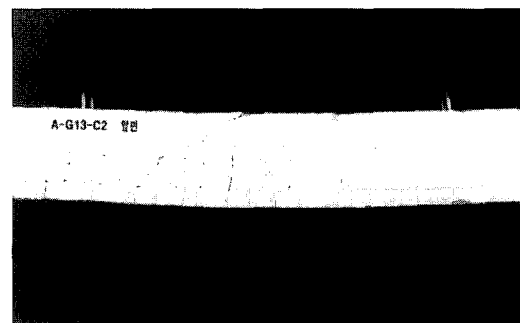


Fig. 3 Failure of strengthened specimen

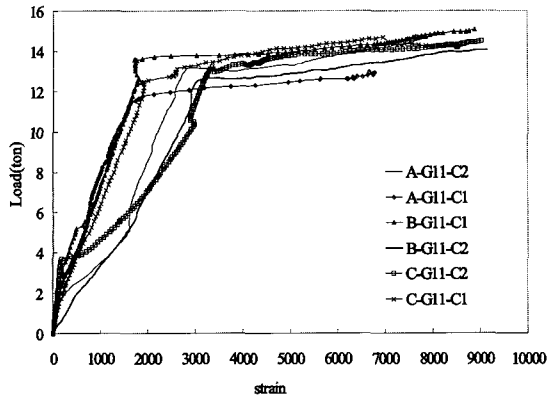


Fig. 4 Load-strain curves by chipping

### 3.2 보강방법에 대한 영향

강판이나 탄소섬유쉬트의 경우 단부에서 일어나는 rip-off 파괴를 방지하기 위해서 U형이나 폐합하는 방법, 또는 앵커를 추가하는 방법을 이용하여 보강연구가 수행되고 있다. 그러나 그 파괴형태가 보강단부 측면이 전단

에 의해 찢어지면서 U형 보강재가 단부보강 효과를 충분히 발휘하지 못하는 것으로 보고되고 있다<sup>6,7)</sup>. 따라서, 본 실험에서는 격자섬유의 특성상 철근과의 일체성을 확보시킬 수 있는 점을 고려하여 쪼아내기 깊이를 변수로 하여 철근덮개 깊이까지 쪼아낸 5cm와 일부만 쪼아낸 3cm를 비교함으로써 그 특성 및 파괴형태를 고찰하였으며, 격자섬유대신 등가철근으로 추가보강 함으로써 그 내력 및 효과를 비교 고찰하였다. 그 결과 Fig. 4에 보여진 바와 같이 손상된 보의 철근깊이 5cm까지 면처리 후 철근과 일체 보강한 시험체의 격자섬유의 항복변형률은  $\epsilon_{gs} = 0.003$ ,  $f_{gy} = 3000 \text{ kg/cm}^2$  이며, 3cm까지 쪼아낸 후 보강한 시험체의 항복변형률은  $\epsilon_{gs} = 0.002$ ,  $f_{gy} = 2000 \text{ kg/cm}^2$ 로 나타났다. 이것은 철근과의 일체성 확보로 인한 휨 변형의 차이로 생각된다. 또한 5cm까지 쪼아낸 후 보강한 경우에는 (A-C2, B-C2, C-C2) 4 ton 근처에서 초기균열이 발생한 후 3cm까지 쪼아낸 경우보다 연성이 증가함에 따라, 변형률의 기울기가 감소하지만, 파괴하중은 두경우 모두 14 ton 근처에서 발생하였다. 따라서 보강시 철근면까지 쪼아내기 한 후 철근과의 정착을 통해 합성거동을 확보하는 것이 연성파괴를 유도하며 보강성능을 향상시키는 것으로 생각된다. (Fig.4)

Table 3 Experiment results

Specimen	Initial crack loads (ton)	Yielding loads (ton)	$\frac{P_u}{P_y}$	Failure loads (ton)	Strengthening effect (%)	Failure mode
A-const.	3.0	11.73	1.02	12.10	0	Flexural failure
A-G11-C1	3.3	12.20	1.16	14.20	17.4	Flexural failure
A-G11-C2	3.6	12.86	1.13	14.50	19.8	Debonding
A-G12-C2	4.0	13.64	1.17	16.00	32.2	Debonding
A-G13-C2	5.2	16.35	1.07	17.50	44.6	Debonding
A-G21-C2	4.3	13.02	1.15	15.04	24.3	Debonding
A-G31-C2	4.8	16.35	1.13	18.50	52.9	Debonding
A-S14-C2	4.5	15.83	1.04	16.50	36.4	Flexural failure
B-const	3.3	11.97	1.11	13.30	0	Flexural failure
B-G11-C1	4.0	12.55	1.09	13.70	3.0	Flexural failure
B-G11-C2	5.0	12.95	1.24	16.08	20.9	Debonding
B-G13-C2	5.4	13.20	1.33	17.50	31.2	Debonding
B-S14-C2	4.5	13.65	1.27	17.30	30.1	Flexural failure
B-S15-C2	5.2	17.50	1.12	19.67	47.9	Flexural failure
C-const.	3.6	13.02	1.04	13.60	0	Flexural failure
C-G11-C1	4.8	13.21	1.22	16.10	18.4	Flexural failure
C-G11-C2	5.2	13.55	1.26	17.05	25.4	Debonding
C-G12-C2	5.4	14.05	1.27	17.87	31.4	Debonding
C-G13-C2	5.5	15.06	1.23	18.50	36.0	Debonding
C-S14-C2	5.0	16.82	1.09	18.30	34.6	Flexural failure
C-S15-C2	5.5	18.20	1.09	19.80	45.6	Flexural failure

### 3.3 하중-변위관계

무보강 시험체의 경우 12 ton까지는 일정한 기울기를 보이고 12 ton을 넘어서 2차파괴로 인하여 급격한 처짐이 증가하는 것으로 나타났다.

일반적으로 탄소섬유시트나 강판의 경우 철근이 항복한 이후 일정한 처짐의 증가와 함께 급격히 감소하는, 즉 보강재가 파단 또는 벗겨지는 결과가 보고되고 있다. 그러나 본 연구의 실험결과 Fig. 5에 의하면 보강길이에 무관하게 거의 모든 시험편이 철근이 항복한 이후 일정한 처짐 증가와 함께 보강재가 파단되는 양상은 피하였고 충분한 연성거동을 보인 후에 보강재가 파단되는 것으로 나타났다. 이것은 보강재로 자체는 전형적인 취성재료이지만 철근과의 일체성 확보로 인한 효과로 생각되며 구조물 보강시 어려움이 있긴 하지만 일체성 여부를 고려할 필요가 있다고 생각된다.

### 3.4 보강에 따른 지점부의 영향

기존의 연구결과는 강판이나 탄소섬유 시트로 보강하는 경우 지점부의 rip-off 파괴가 나타나는 것으로 보고되고 있다.<sup>7)</sup> Fig. 6 에서와 같이 탄소격자섬유의 경우 철근과의

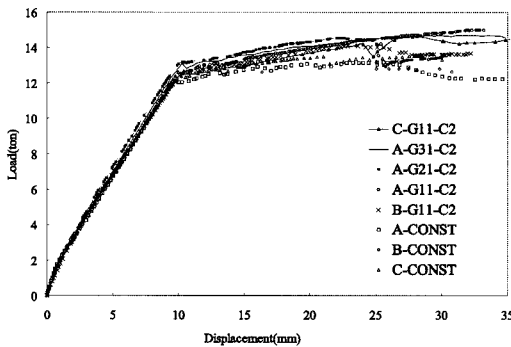


Fig. 5 Load-displacement curves

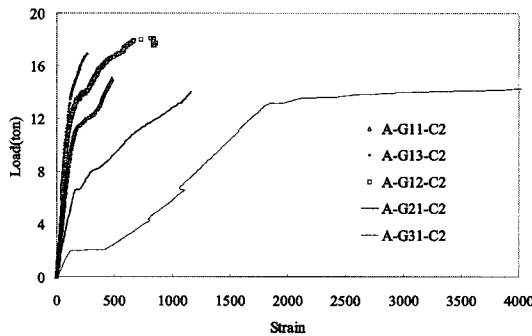


Fig. 6 Load-strain curves bearing of strengthening length

일체성 확보로 인한 앵커볼트와 에폭시의 효과로 인하여 rip-off 파괴를 피할 수 있었으나 보수재료와 콘크리트와의 강도차이로 인한 계면박리파괴가 나타났다.

또한 보강재의 량에 따라서도 낮은 변형률에서 하중 증가 후 취성파괴되는 급격한 차이를 보였으며, 철근항복 후 극한하중상태에서 보강재의 파단으로 파괴되었다. 보강길이를 0.6L로 보강한 경우 철근의 변형률 곡선과 유사한 거동을 보여 보강효과는 없는 것으로 나타났다.(Table 3)

### 3.5 철근추가보강에 따른 영향

격자형 탄소섬유로 인한 보강과 등가의 철근으로 환산한 경우의 보강을 비교하여 노후되고 내식성이 요구되는 구조물에 보강시 그 효과 및 영향을 비교한 결과, 다음 Fig. 7과 같이 설계기준강도별격자형 탄소섬유보강이 미소하지만 우수한 것으로 나타났다. 본 연구에서 사용된 격자형 탄소섬유는 3 bar가 일체로 된 보강재로서 각각의 bar를 횡방향으로 잡아주는 격자형으로 되어 있다. 따라서, 부재의 휨 변형 시 인장철근의 항복 후 격자형 섬유가 힘을 분담함으로써 구조물의 파괴하중이 크게 나타난 것으로 생각되어진다. 또한, 사용된 격자의 길이방향 1 bar 단면적은 0.175 cm<sup>2</sup>으로써 강성이 철근의 단면적이 D6인 것과 비교적 가깝다고 보고되고 있으므로 격자형 탄소섬유에 의한 30~40%의 보강효과는 철근을 추가적으로 보강한 시험체의 경우(Table 3 참조)와 비교해 볼 때 상대적으로 만족할 만한 것이라 생각된다.

### 3.6 보강에 따른 연성평가

격자형 탄소섬유는 재료자체의 연성이 부족하므로 실제 사용성에 문제점이 나타날 수 있다. 본 연구에서는 제작된 시험체별로 기존의 연성지수 산정식과 A.E. Naaman과 S.M. Jeong이 제안한 파괴시 에너지 개념을 이용한 연성

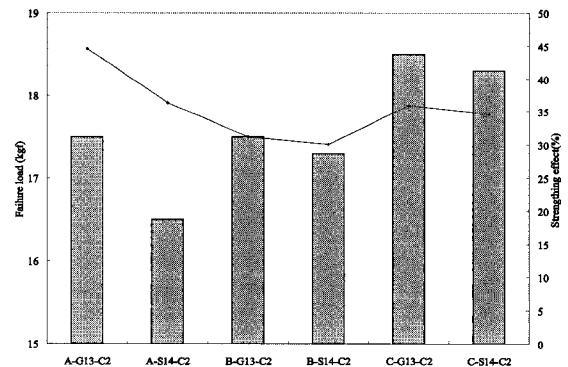


Fig. 7 Comparison between steel bar and grid fiber strengthening

지수 산정식을 이용하여 각 시험체의 연성지수를 평가하였다.<sup>8)</sup>

기존의 연성지수 산출식은 비탄성변형이 일어나면서 흡수되는 비탄성 에너지를 전혀 고려하지 못하고 있기 때문에 보강된 보의 경우 많은 처짐이 발생하여야 만 요구되는 연성을 확보할 수 있다고 가정하여 왔다. 그러나 많은 처짐을 허용할 경우 그에 상응하는 만큼의 탄성에너지가 구조물에 저장되게 되고 구조물 파괴시, 탄성에너지가 발산되어 구조물에 손상이 발생된다. 따라서 보강된 보의 경우 이러한 비탄성 에너지가 고려되는 연성지수 산정식은 다음 식 (3.1)과 같이 하중-처짐을 통해 산정되어진다.

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} = \frac{1}{2} \left( \frac{E_{tot}}{E_{el}} + 1 \right) \quad (3.1)$$

여기서,  $E_{tot}$  = 하중-처짐 곡선의 면적에 의해 계산되는 총 에너지이고,  $E_{el}$  = 탄성에너지이다.

기존의 연성지수 산정식의 경우 단순히 철근항복시 처짐과 파괴시 처짐으로 평가되지만 에너지방법에 의한 계산은 항복 후 구조물에 저장되는 에너지로 비교되므로 효과적인 연성지수 산정이 가능하다. 그 결과 Fig. 7에 나타났듯이, 기존의 연성지수와 비교하여 서로 상반된 결과를 보임에

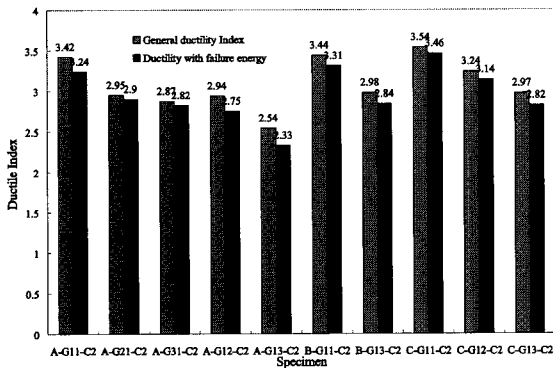


Fig.8 Ductility index by the two methods

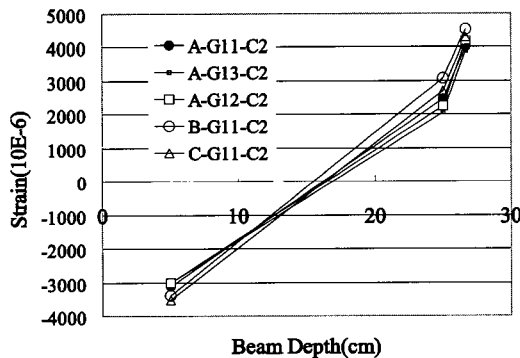


Fig. 9 Strain curves to the specimen depth

따라 파괴시 소비되는 탄성에너지를 고려한 연성지수 산정법으로 평가하는 것이 실험결과와 일치하는 것으로 나타났다으며, 계산된 연성지수 값의 경우, 보의 보강비가 클수록 연성지수 값이 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, 보강량을 늘려 내력을 향상시킬 수는 있지만 연성이 저하되므로 적절한 보강량의 제한이 필요할 것으로 생각된다.

#### 4. 탄소격자섬유량의 제한

##### 4.1 개요

보강된 부재가 보강효과를 발휘하기 위해서는 먼저 적절히 보강설계가 되어 있어야하며 외부나 내부에 보강된 격자섬유의 변형, 볼트의 탈락등을 방지할수 있는 방법을 선택하여야 한다. 실험결과 격자섬유로 보강된 단면은 사용철근비 및 보강재량, 보강길이에 영향을 받으므로 압축부위의 콘크리트가 철근이나 보강재보다 먼저 취성파괴되지 않도록 주어진 철근이나 격자섬유 보강에 대한 보강량을 제한할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 철근콘크리트 강도설계법을 적용하여 탄소격자섬유의 적정사용량을 제안하고자 한다.

##### 4.1 최대보강비 산정

탄소격자섬유의 경우 강판과는 달리 변형을 경화현상을 거치지 않고 극한변형률에 도달 할 때까지 탄성적인 취성 거동을 하는 섬유쉬트와 같다고 할 수 있으나 격자섬유의 경우, 재료가 가지는 특성상 콘크리트 속에 매립되어 철근과의 일체성을 확보할 수 있는 것으로 평가되고 있다. 이러한 취성거동을 하는 격자섬유로 보강된 단면의 설계시 안전에 대한 고려가 필요하며, 보강단면의 파괴를 결정짓는 주철근 및 탄소격자섬유 보강재의 량을 결정해야 한다. 따라서 본 논문에서는 실험에서 얻은 자료를 근거로 하여 항복변형률을 조사하여 Table 4에 나타내었으며, 이때 변형률의 관계가 Hooke의 법칙이 성립하는 것으로 나타났다.(Fig 8 참조)

변형률의 적합조건은 일반적으로 다음과 같은 식으로 평가되어 질 수 있으며, 격자섬유의 변형률 값에 대하여 안전율을 도입하여 부재의 설계에 반영할 수 있다고 말할 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E} [(1 - \nu^2)f_x - \nu(1 + \nu)f_y] \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E} [(1 - \nu^2)f_y - \nu(1 + \nu)f_x] \\ \gamma_{xy} &= \frac{2(1 + \nu)}{E} \gamma_{xy} \end{aligned} \quad (4.1)$$

따라서 철근이 항복한 후 하중증가와 함께 탄소격자섬유가 파괴되는 것으로 가정하여 탄소격자섬유의 파단과 동시에 콘크리트가 극한변형률에 도달되는 평형상태를 가정함으로써, 다음과 같은 제약조건을 얻을 수 있다.<sup>8,9)</sup>

Fig. 10 에서  $P_b$  를 유도하기 위한 조건은 다음과 같다.

$$C_1 = T_s$$

$$0.85 f_{ck} a b = \sigma_y A_s$$

양변에  $bd f_y$  로 나누면

$$\frac{0.85 f_{ck} k_1 c_b}{d f_y} = \frac{A_s}{bd} \quad (4.2)$$

여기서 중립축 위치는 변형률 선도로부터 다음과 같다.

$$C_b = \frac{0.003}{(0.003 + \epsilon_{cgf})} h_p \quad (4.3)$$

위의  $C_b$  값을 식 (4.2)에 대입하면 탄소격자섬유로 보강된 단면의 평형철근비를 얻을 수 있다.

Table 4 Yield strains of specimens (unit :  $\mu$ )

Type specimen	Concrete	Steel	CFRP-Grid
A-G11-C2	-3120	2470	2512
A-G21-C2	-3012	2074	2721
A-G31-C2	-3000	2250	2371
A-G12-C2	-3620	2004	3237
9A-G13-C2	-3373	1974	2741
B-G11-C2	-3385	2051	3121
B-G13-C2	-3672	2143	2405
C-G11-C2	-3507	1987	3156
C-G12-C2	-3571	2097	2813
C-G13-C2	-3895	2104	2565

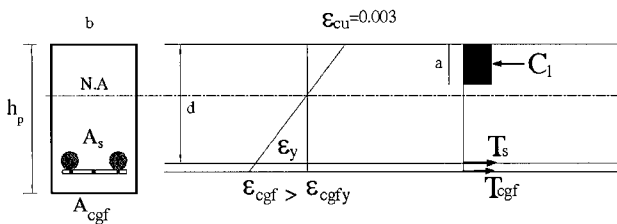


Fig.10 Balanced section of specimen strengthened with CFRP-grids

$$p_b = \frac{A_s}{bd} = \frac{0.85 f_{ck} k_1}{d f_y} \frac{0.003}{(0.003 + \epsilon_{cgf})} h_p \quad (4.4)$$

여기서  $k_1$  값은 설계강도에 대하여 각각 정해지는 상수이다. 그러므로 보강단면의 최대철근비는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_{max} = 0.75 P_b$$

또한 탄소격자섬유의 평형보강비( $P_b \cdot cgf$ )도 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$C_1 = T_{cgf}$$

$$0.85 f_{ck} a b = f_{cgf} A_{cgf}$$

여기서,

$f_{cgf} = E_{cgf} \epsilon_{cgf}$  이고, 양변에  $bd f_{cgf}$  로 나누어 주면

$$\frac{A_{cgf}}{bd} = \frac{0.85 f_{ck} a}{d f_{cgf}} = p_b \cdot cgf \quad (4.5)$$

여기서 앞에서 구한  $C_b$  값을 위 식에 대입하면 다음과 같이 탄소격자섬유의 평형 보강비를 얻게 된다.

$$P_b \cdot cgf = \frac{0.003}{(0.003 + \epsilon_{cgf})} h_p \frac{0.85 f_{ck} k_1}{d f_{cgf}} \quad (4.6)$$

휨 실험결과 탄소격자섬유의 최대변형률이 1.2%~1.43%이며<sup>10,11)</sup>, 순수인장 실험시 파단변형률은 1.5%~1.7%로 약 80~84%의 분포를 보이고 있다. 이 값의 평균값을 위의 식 4.5에  $\epsilon_{cgf}$  대신 0.82  $\epsilon_{cgf}$  를 대입하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$C_b = \frac{0.00255}{(0.003 + 0.82 \epsilon_{cgf})} \frac{f_{ck} k_1}{f_{cgf}} \quad (4.7)$$

$$p_{cgf} = \frac{0.00255}{(0.00246 + 0.6724 \epsilon_{cgf})} \frac{h_p}{f_{cgf} d} \quad (4.8)$$

보강보가 충분한 안전을 확보하기 위하여 보강단면의 최대보강비  $P_{max}$ 는 강도설계법의 개념에 따라 다음과 같이 제한되어야 할 것이다.

$$P_{max \cdot cgf} = 0.75 P_b \cdot cgf \quad (4.9)$$

## 4.2 적용단면 고찰

본 논문에서 실험한 보강단면의 파괴형태를 검증하기 위해 앞에서 계산한 식으로 계산을 수행하였으며 그 결과

는 다음과 같다.

계산된 단면에 대한 설계조건은

$$f_{ck} = 350\text{kg/cm}^2$$

$$f_y = 4000\text{kg/cm}^2$$

$$f_{cgf} = 12000\text{kg/cm}^2$$

$$E_s = 2.04 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$$

$$\varepsilon_{cgf} = 1.2\%$$

이다. 먼저 제안된 식에 의한 평형 및 최대 주철근비를 계산하면

$$p_b = \frac{0.003 \times 0.85 \times 350 \times 0.85}{0.003 + 0.82 \times 0.012} \frac{26.7}{25} = 0.01577$$

$$p_{\max} = 0.75p_b = 0.75 \times 0.01577 = 0.01183$$

$$p_s = \frac{7.742}{20 \times 25} = 0.0155$$

다음으로 제안된 식에 의해 탄소격자섬유의 경우 평형 및 최대철근비를 계산하면

$$p_{b \cdot cgf} = \frac{0.003 \times 0.85 \times 350 \times 0.85}{(0.003 + 0.82 \times 0.012)(0.82 \times 12000)} \times \frac{26.7}{25} = 0.00641$$

$$p_{\max \cdot cgf} = 0.75p_{b \cdot cgf} = 0.00481$$

$$p_{cgf} = \frac{0.175 \times 3}{20 \times 25} = 0.00105$$

$$\therefore 0.00105 \text{ (3가닥)} < 0.00481 (P_{\max})$$

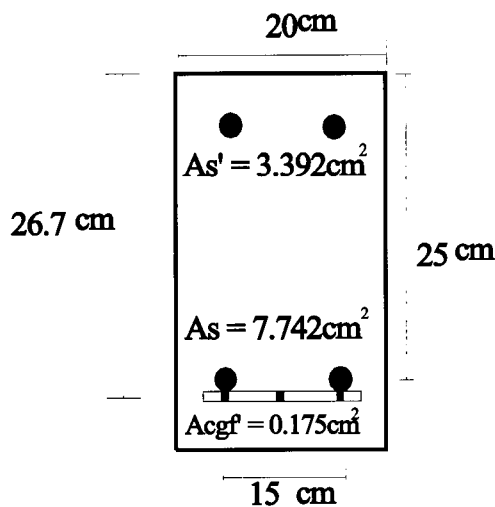


Fig. 11 Dimensions of section

계산된 탄소격자섬유 보강단면의 파괴 모드를 고찰하면 Thanasis 등이 제안한 파괴모드<sup>11)</sup> 이론에서 철근이 항복하고 탄소격자섬유의 파괴로 부재가 파괴되는 영역과 잘 일치한다. 또한 보강된 시험체의 실험결과와 같은 양상을 보여준다.

## 5. 결 론

본 연구는 폴리머 시멘트계 보수재료를 사용하여 보수한 후 CFRP-Grid로 보강된 RC보의 보강성능을 실험적 방법을 통하여 고찰하였으며, 보강방법, 철근대용여부 등의 영향을 실험적으로 고찰하고 보강설계를 검토하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 쪼아내기 깊이에 따른 변형율의 차이로 구조물의 내력을 손상시키지 않는 범위 내에서 탄소격자섬유로 보강을 할 경우, 인장철근 부분까지 쪼아내기(chipping)를 실시한 후 보강을 해주는 것이 보강효과증진의 측면에서 반드시 필요한 것으로 생각되어진다.
- 2) 보수후 탄소격자로 보강된 보의 휨 실험결과 주된 파괴형태는 휨에 의한 철근항복 후 보강재의 취성 박리 파괴로 나타났으며, 탄소격자섬유의 파괴모드는 보강 길이나 설계강도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 따라서 취성파괴를 피하기 위해서는 일정간격(20 cm)의 앵커볼트를 섬유와 콘크리트에 연결하거나, 철근과의 정착이 필요한 것으로 나타났다.
- 3) 탄소격자섬유로 보강한 철근콘크리트 보의 경우 각 변수별로 20~30% 정도의 보강효과를 보였다. 기대보다는 다소 작았지만 보강으로 인하여 주철근 항복 후 강성이 향상되었음을 알수 있었다. 그러나 탄소격자섬유의 경우 등가의 철근보강방법과 상대적으로 비교해 볼 때 20~30%의 보강효과는 만족스러운 것으로 생각된다.
- 4) 기존에 제안된 탄소섬유시트 보강단면에 대한 최대보강비 및 파괴모드에 대해 탄소격자섬유를 적용한 결과 만족할 만한 결론을 얻었으며 탄소격자섬유의 계산결과와 실험결과와도 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 탄소격자섬유를 이용하여 RC구조물을 보강설계 할 때는 보강후 콘크리트의 압축파괴에 따른 취성파괴를 방지하기 위하여 보강재량을 적절한 범위내에서 제한하는 것이 필요한 것으로 생각된다.

## 참고문헌

1. 한국도로공사, “노후콘크리트 부재의 보수 및 보강기법에 대한 실험적연구”, 1993년도 연구보고서.
2. 한만엽, 홍영균, 황의승, “보수·보강재료 및 공법개발 연구”, 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제6권, 제1호, 1997, 5. pp.592-597.



3. 조병완, “탄소 및 아라미드섬유를 이용한 철근콘크리트 깊은보의 전단보강에 관한 실험적 연구”, 한국해양 공학회 논문집 13권 3호, 1999, 8. pp.56-64.
4. 신현목, 문제길, 변동균, “철근콘크리트”, 1996. 동명사.
5. 신영수, 홍기섭, 최완철, 홍영균, “탄소섬유시트로 밀면 보강된 철근콘크리트보의 구조적 거동”, 대한토목학회 논문집, 11권 8호, 1995.
6. 배인환, “강판 및 탄소섬유로 보강된 철근콘크리트 보의 휨해석 및 설계기법 연구”, 한양대학교 공학박사학위논문, 1998. 6.
7. A.E. Naaman and S.M. Jeong.(1995), “Structural Ductility of Concrete Beams Prestressed with FRP Tendons,” Non-Metallic Reinforcement for Concrete Structures, *Proceedings of the 2nd International Rilem Symposium*, London, pp.379-386.
8. Editorial Committee, “*Design Guideline for FRP-Reinforced Concrete Construction*,” Continuous Fiber Reinforced Concrete, Gihodo, July 1995.
9. Sugita, M., “*NEFMAC-Grid Type Reinforcement*,” Fiber-Reinforced-Plastic(FRP) Structures for Concrete Structures: Properties and Applications, A. Nanni(Ed), Elsevier, 1993, Amsterdam, pp.355~385.
10. Kobayashi, Rahman, “*Crack Width Prediction for NEFMAC-Reinforced Flexural Members*,” Architectural Institute of Japan, Vol 2, Oct, 1997, pp.447-454.
11. Thanasis, M., Nanni, A., “Flexural Behavior and Design of Concrete Using FRP Rods,” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 11, Nov. 1993, pp.3.

## 요 약

인장강도와 내방식성이 우수하고 콘크리트 구조물속에서 철근과의 정착성이 양호하여 콘크리트 구조물의 새로운 보강재로 사용되고 있는 탄소격자섬유의 보강효과를 검증하기 위하여 탄소격자섬유보강공법으로 보강한 철근콘크리트 보 시험체를 제작하여 정적 휨 파괴실험을 통해 보강효과 및 휨 파괴특성을 분석하였다. 강판이나 탄소섬유 압착공법에서 나타나는 계면박리(탈락)파괴 보다는 보수 몰탈의 고강도화로 휨균열의 진전에 의해 콘크리트 속에서 철근에 정착된 격자섬유 층에서의 균열이 지점부로 진행되어 파괴되는 내부 계면박리와 지간중앙에서 철근 항복후 격자와 연결된 앵커볼트의 항복으로 인한 탄소격자섬유 파괴, 그리고 격자섬유 항복후 취성적인 콘크리트 압축파괴 양상이 나타났다. 실험결과를 근거로 최소보강재량이 제시되었으며, 강도설계법을 근거로 격자섬유로 보강시 필요한 설계법이 제안되었다.

**핵심용어 :** 탄소격자섬유, 보강효과, 박리파괴, 앵커볼트효과, 보강설계