

구조적 손상을 입은 R.C보의 휨보강 효과

Flexural Strengthening Effect on R.C Beam with Structural Damage

김 성 용*

한 덕 전**

신 창 훈***

Kim, Sung-Yong

Han, Duck-Jeon

Shin, Chang-Hoon

Abstract

The Rehabilitation and repair of structurally deteriorated, reinforced concrete structures will be highly demanded in the near future. The purpose of this study is to investigate whether damaged beams that crack and deflection are developed by bending moment are restored to the former state. In conclusion, when specimens strengthened with Steel Plate, CFS(Carbon Fiber Sheet) and CFRP-Grid(Carbon Fiber Reinforced Plastic-Grid) are compared with standard specimen, flexural capacity is increased and ductility and energy absorption capacity are similar with undamaged specimen. Therefore Steel Plate, CFS(Carbon Fiber Sheet) and CFRP-Grid(Carbon Fiber Reinforced Plastic-Grid) have highly efficiency as material of flexural strengthening.

요 지

최근에 구조적인 손상을 입은 철근콘크리트 구조물은 내구성과 내력 향상을 위해 보수·보강이 필요하게 되었다. 본 연구에서는 철근콘크리트 보가 휨에 의해서 손상되었을 경우 손상이전의 상태로 내력복원을 할 수 있는지를 규명하고자 한다. 실험결과 기준실험체와 강판·탄소섬유시트·격자탄소섬유판으로 보강한 실험체를 비교할 때, 휨내력은 상승하였고, 연성도와 에너지흡수능력도 기준실험체에 비해 큰 차이를 보이지 않아 보강재인 강판·탄소섬유시트·격자탄소섬유판(복합재)은 R.C보의 휨보강재로 매우 우수한 성능을 보유하고 있다고 판단된다.

Keywords : Steel plate, Carbon fiber sheet, Carbon fiber reinforced plastic-grid, Damaged degree, Ductility, Energy absorption capacity

* 정회원, 동국대 대학원 건축공학과, 박사과정

** 정회원, 서일대 건축과, 교수, 공학박사

*** 정회원, 서일대 건축과, 교수, 공학박사

E-mail : yongheeryu@hanmail.net 019-648-3231

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2004년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

철근 콘크리트 구조물은 자연환경의 변화, 인위적인 물리작용, 시간의 경과와 같은 원인으로 인해 구조물의 취약부에 노화 및 손상이 발생된다. 이와 같은 요인들에 의해 구조적인 손상을 입은 철근콘크리트 구조물은 내구성과 내력 향상을 위해 보수·보강이 필요하게 된다.

본 연구에서는 철근콘크리트 보가 휨에 의해서 손상되었을 때 보가 내력복원을 할 수 있도록 보강재인 강관, 탄소섬유시트, 격자탄소섬유판으로 보수·보강한 후, 기존 실험체와 보강실험체를 비교·분석하여 내력복원을 위한 정량적인 휨내력 및 연성능력을 규명하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구에서의 실험변수는 보강재의 종류, 구조적인 손상도 그리고 강관보강 시 앵커볼트 고정유무 및 접착제의 종류로 나눌 수 있다. 이런 실험변수들을 고려해 실험체를 분류하면 Table 1과 같다.

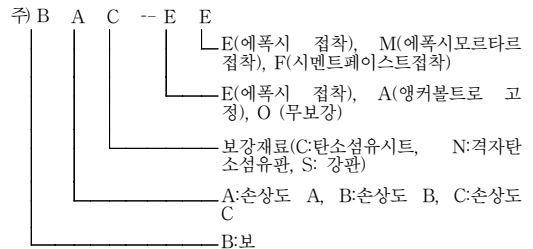
손상도는 기준실험체를 파괴 시까지 가력하여 기준 실험체의 인장주근이 항복했을 때의 변위와 손상정도를 기준으로 구분하였다. 손상도 A는 항복하중의 75% 가력된 경우로 변위 $\delta_A = 7.07\text{mm}$ 이며, 손상도 B는 항복하중까지 가력된 경우로 변위 $\delta_B = \delta_y$ 이다. 그리고 손상도 C는 항복하중의 105% 가력했을 때로 변위 $\delta_C = 14.5\text{mm}$ 이다.

실험체의 크기는 $150 \times 240 \times 2800\text{mm}$ 이며, 순 경간은 $2,500\text{mm}$ 로 하였다. 철근배근은 복철근보로 하여 인장철근은 3-D13, 압축철근은 2-D10을 사용하였다. 그리고 전단파괴를 방지하기 위해서 D10철근을 100mm 간격으로 전단배근 하였다.

탄소섬유시트 보강실험체는 탄소섬유시트 섬유방향에 재축방향과 평행하게 접착시킨 후, 보강실험체의 단부 박리와 전단 파괴를 방지하기 위해 재축에 직각

Table 1 실험체의 분류

실험체명	보수 및 접착방법	손상도	보강재료
B00-00	-	-	기준실험체
BAS-AE	AE	A	강관
BAC-EE	EE	A	탄소섬유시트
BAN-AM	AM	A	격자탄소섬유판
BBS-AE	AE	B	강관
BBS-OE	OE	B	강관
BBS-AF	AF	B	강관
BBC-EE	EE	B	탄소섬유시트
BBN-AM	AM	B	격자탄소섬유판
BCS-AE	AE	C	강관
BCC-EE	EE	C	탄소섬유시트
BCN-AM	AM	C	격자탄소섬유판



방향으로 탄소섬유시트를 보강하였다. 격자탄소섬유판 보강실험체는 Γ 자형의 격자모양으로 형성된 격자탄소섬유판을 보에 끼어 넣고, 앵커볼트로 고정 후 에폭시 모르타르로 1cm 미장하였다. 강관 보강실험체는 2mm 강관을 사용하였고, 강관은 실험체 형상에 맞춰 Γ 자형으로 절곡 제작하였다. 그리고 앵커볼트 사용유무, 주입공법의 분류에 따라 강관을 접착 보강하였다.

각 보강실험체의 보강재는 실험체의 형상에 맞춰 보춤의 180mm 까지 Γ 자형으로 보강하였으며, 보강재 부착길이는 $2,200\text{mm}$ 이다. Fig. 1~3은 각 보강실험체의 보강 형상을 나타낸 것이다.

2.2 가력 및 측정방법

실험체는 단순지지된 지점위에 설치하고, 하중 재하는 가력 프레임에서 실시하였다. 휨 파괴를 유도하기 위해 보 중앙에서 250mm 떨어진 곳에 철재롤러를 사용하여 2점 재하 하였다. 재하방법은 예상하중의 $1/3$ 까지 하중조절방식으로 이후부터는 변위조절방식

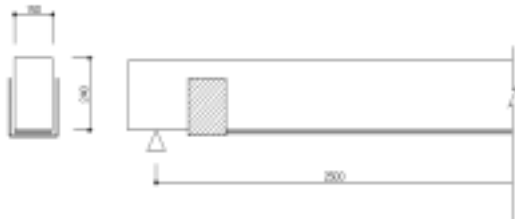


Fig. 1 탄소섬유시트 보강실험체의 보강 형상

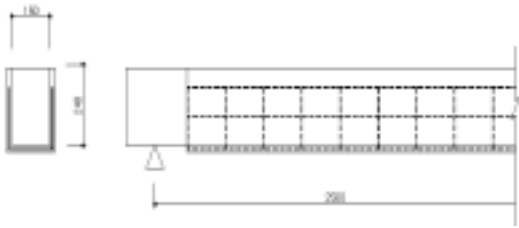


Fig. 2 격자탄소섬유판 보강실험체의 보강 형상

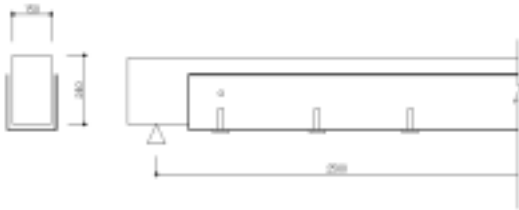


Fig. 3 강판 보강실험체의 보강 형상

으로 가력하였다. 재하량은 유압잭 하부면에 로드 셀을 설치하여 매 재하시마다 측정하였다.

각 실험체의 처짐과 철근의 변형률은 지간 중앙과 하중 가력점의 하단부에 변위계와 지간중앙의 인장철근과 압축철근에 스트레인 게이지(125Ω)를 부착하여 Data Logger(TDS 602A)로 측정하였다. Fig. 4는 실험체의 가력 시스템을 나타낸 것이다.

3. 휨거동의 이론식

휨거동의 이론식은 극한강도 설계법에 기초한 단순화된 해석방법을 사용하여 보강된 보의 항복하중과 최대하중을 산정하고자 한다.¹⁾

휨보강 이론에서 보 부재 각 부분의 변형률은 중립축에 대해 선형 비례한다(보강재는 콘크리트에 완전

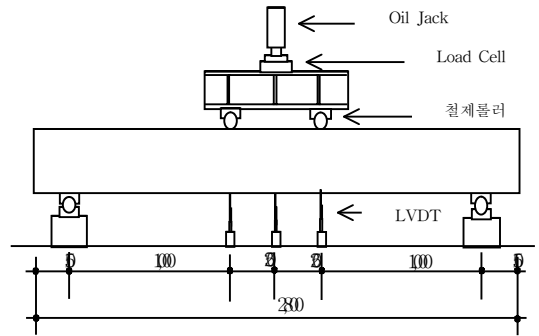


Fig. 6 실험체의 가력시스템

접착되는 것으로 가정한다). 압축콘크리트와 인장철근은 각각 Hognestad의 모델식과 완전탄소성인 인장철근을 사용하였다.⁴⁾ 그리고 이론식의 유도는 통합설계법에 의한 콘크리트 구조설계기준의 휨이론 기본가정과 사전가력으로 인한 잔류응력의 영향을 무시하고, 탄소섬유시트와 격자탄소섬유판은 완전탄성거동하는 것으로 가정하였다.

엄밀해식은 Fig. 5의 변형률과 응력 관계를 이용하여 구하는데, 보 부재의 내부 저항 모멘트 M_{int} 는 보 중심에 대한 모든 내력 모멘트를 구해 더하면 산출할 수 있으며, 다음 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 M_{int} = & af_{ck}bc\left(\frac{h}{2} - \gamma c\right) \\
 & + \sum_{i=1}^n f_{si}A_{si}\left(\frac{h}{2} - d_i\right) \\
 & + f_{pl}A_{pl}\left(\frac{h}{2} - d_{pl}\right)
 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, a 는 매개변수, f_{ck} 는 콘크리트에 도달된 최대 응력, b 는 보의 폭, h 는 보의 전체 층, γc 는 도심의 위치, f_{si} 는 인장 또는 압축철근에 작용하는 응력, A_{si} 는 인장 또는 압축철근의 단면적, d_i 는 압축 연단부에서 압축 철근 또는 인장 철근 중심까지의 거리, f_{pl} 은 보강재에 작용하는 응력, A_{pl} 은 보강재의 단면적, d_{pl} 은 압축연단부에서 보강재의 중심까지의 거리이다.

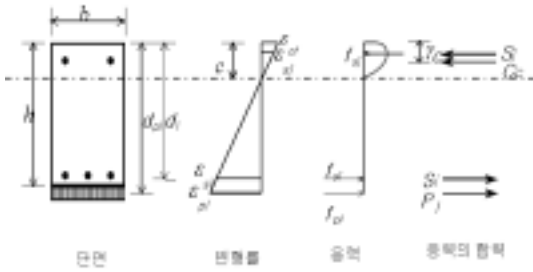


Fig. 5 1면 보강 콘크리트 단면의 내력관계

본 연구에서는 엄밀해석에 의하여 인장철근이 항복할 때의 모멘트를 항복모멘트로 간주하고, 압축 콘크리트 연단부의 변형률이 $\epsilon=0.003$ 또는 보강재의 변형률이 파단변형률에 도달할 때의 모멘트를 최대모멘트로 간주하여, 각각 항복하중과 최대하중을 산정하였다.⁴⁾

4. 실험결과 및 분석

4.1 재료의 특성

본 실험에 사용된 재료들의 기계적 성질은 Table 2~6과 같다.

Table 2 콘크리트의 재료 특성

설계 기준강도 (kgf/cm ²)	W/C (%)	슬럼프 (cm)	평균 압축강도 (kgf/cm ²)	탄성계수 (kgf/cm ²)
210	53	15	217	1.4×10 ⁵

Table 3 철근의 재료 특성

철근 종류	항복강도 (kgf/cm ²)	인장강도 (kgf/cm ²)	탄성계수 (kgf/cm ²)	
SD40	D10	4300	5200	2.12×10 ⁶
	D13	4200	5500	2.14×10 ⁶

Table 4 강판의 기계적 특성

강판 종류	강판두께 (mm)	항복강도 (kgf/cm ²)	인장강도 (kgf/cm ²)	탄성계수 (kgf/cm ²)
SS400	2	3220	4210	2.16×10 ⁶

Table 5 탄소섬유쉬트의 재료적 성질

품번	섬유 종류	섬유 중량 (g/m ²)	설계 두께 (mm)	인장 강도 (kgf/cm ²)	인장 탄성율 (kgf/cm ²)
FTS-C1-20	고강도 카본	200	0.111	35500	2.35×10 ⁶

Table 6 격자탄소섬유판의 재료적 성질

근번	섬유 종류	근단면적 (mm ²)	인장내력 (tf)	인장강도 (kgf/cm ²)	인장탄성율 (kgf/cm ²)
CR4	고강도용	26.4	3.70	14000	1.00×10 ⁶

4.2 보강실험체의 실험결과

Table 7은 기준실험체와 보강 실험체의 실험결과를 나타낸 것이다. 본 연구에서 실험체의 항복하중은 인장철근에 부착된 스트레인게이지로부터 측정된 철근의 항복으로 정하였고, 항복하중의 변위를 항복 변위로 정하였다. Fig. 6~8은 손상도별 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다.

앵커링 후 에폭시로 접착한 강판 보강한 실험체들은 기준실험체와 비교할 때, 손상도 A(BAS-AE)는 기준 실험체에 비해 항복하중이 1.39배, 최대하중이 1.36배 증가하였다. 손상도 B(BBS-AE)는 항복하중이 1.22배, 최대하중이 1.21배 증가하였다. 그리고 손상도 C(BCS-AE)는 항복하중이 1.11배, 최대하중이 1.19배 증가하여 손상도가 클수록 항복하중과 최대하중이 감소하였다. 그러나 그 차이는 그리 크지 않았다.

시멘트페이스트 접착공법을 사용한 실험체(BBS-AF)는 같은 손상도의 에폭시 접착공법을 사용한 실험체(BBS-AE)에 비해 항복하중이 33%, 최대하중이 36% 감소하였다. 이는 시멘트 페이스트의 접착력이 에폭시 수지에 비해 약하여 강판이 조기에 박리되기 때문으로 판단된다. 앵커링 유무에 따른 실험체의 내력비교에서는 앵커링 하지 않은 실험체(BBS-OE)와 앵커링한 실험체(BBS-AE)의 항복하중과 최대하중이 1%이하의 차이를 보여 거의 같은 결과를 나타내었다.

Table 7 보강실험체의 실험결과

실험체명	항복하중(tf)		처짐 (mm)	비교 (1)/(2)	최대하중(tf)		처짐 (mm)	비교 (3)/(4)	파괴성상
	실험값	엄밀해값 ¹⁾			실험값	엄밀해값 ²⁾			
	(1)	(2)			(3)	(4)			
B00-00*	5.90	5.60	10.43	1.05	6.60	6.20	25.00	1.06	휨인장파괴
BAS-AE	14.12	12.09	12.44	1.17	14.62	13.66	16.92	1.07	휨압축파괴
BBS-AE	13.07	12.09	11.07	1.08	14.57	13.66	15.32	1.07	휨압축파괴
BBS-OE	13.02	12.09	11.87	1.08	14.48	13.66	14.58	1.06	보강재박리
BBS-AF	8.70	12.09	11.10	0.72	9.35	13.66	19.56	0.66	보강재박리
BCS-AE	12.47	12.09	11.02	1.03	14.44	13.66	15.21	1.06	휨압축파괴
BAC-EE	7.12	6.05	10.41	1.18	9.70	8.05	34.06	1.20	보강재파단
BBC-EE	7.20	6.05	9.90	1.19	9.85	8.05	25.74	1.20	휨인장파괴
BCC-EE	7.37	6.05	9.65	1.22	8.30	8.05	19.88	1.03	보강재파단
BAN-AM	7.25	7.10	11.10	1.02	10.50	10.00	39.22	1.05	휨인장파괴
BBN-AM	7.45	7.10	11.07	1.05	10.37	10.00	30.86	1.04	휨인장파괴
BCN-AM	7.52	7.10	10.74	1.06	9.70	10.00	25.62	0.97	휨인장파괴

주) 1) 식(1)에서 인장철근이 항복할 때의 모멘트를 항복모멘트로 가정하여 항복하중을 산정.

2) 식(1)에서 콘크리트 연단부 변형률이 0.003에 도달하거나 보강재가 파단할 때를 최대하중으로 산정.

* B00-00는 기준실험체

그러나 앵커볼트를 설치하지 않은 실험체는 강판 박리 후 하중이 급격하게 감소되었다. 따라서 변형능력을 확보하기 위한 방안으로 앵커볼트의 설치는 필요하다고 판단된다.

탄소섬유시트 보강 실험체의 항복하중은 기준 실험체의 항복하중에 비해 손상도 A(BAC-EE)는 1.21배, 손상도 B(BBC-EE)는 1.22배, 손상도 C(BCC-EE)는 1.25배 증가하였고, 최대하중은 손상도 A는 1.47배, 손상도 B는 1.46배, 손상도 C는 1.26배 증가하였다. 이로부터 손상도에 관계없이 균열 상태에서 보강한 보강실험체가 기준실험체에 비해 항복하중과 최대하중이 모두 증가함을 알 수 있다. 그리고 손상도에 관계없이 비슷한 내력상승률을 보였다.

격자탄소섬유판 보강 실험체의 항복하중은 기준실험체에 비해 손상도 A (BAN-AM)는 1.23배, 손상도 B (BBN-AM)는 1.26배, 손상도 C (BCN-AM)는 1.27배 증가하였고, 최대하중은 손상도 A는 1.58배, 손상도 B는 1.57배, 손상도 C는 1.47배 증가하였다. 따라서 탄소섬유시트 보강실험체와 마찬가지로 손상도에 관계없이 균열 상태에서 보강한 보강실험체가 기준실험체에 비해 항복하중과 최대하중이 모두 증가함을

알 수 있다. 그리고 손상도에 관계 없이 비슷한 내력상승률을 보였다.

본 논문의 중국파괴 성상은 압축측 콘크리트의 파괴나 인장철근 및 보강재의 파단 또는 박리로 인하여 더 이상 하중이 증가하지 않을 때로 정의하였다. 실험결과 각 실험체는 Table 7과 같은 파괴성상을 보였다. 기준실험체는 인장철근의 항복에 의한 전형적인 휨인장파괴가 발생되었다. 보강실험체는 크게 세 가지의 파괴양상이 나타났다. 보강재 박리는 초기균열 발생, 강판의 항복, 인장철근의 항복, 보강재의 박리 순으로 파괴성상을 보이는 경우로 시멘트페이스트 칩착공법을 사용한 강판 보강실험체(BBS-AF)와 앵커볼트를 설치하지 않는 강판 보강실험체(BBS-OE)가 이 경우에 해당한다.

보강재 파단은 초기균열 발생, 인장철근의 항복, 보강재의 파단, 실험체의 파괴순으로 파괴성상을 보이는 경우로 탄소섬유시트 보강실험체(BAC-EE, BCC-EE)에서 발생하였다.

휨파괴는 초기균열 발생, 인장철근의 항복, 콘크리트 휨파괴, 실험체의 파괴 순으로 파괴성상을 보이는 경우에 해당된다.

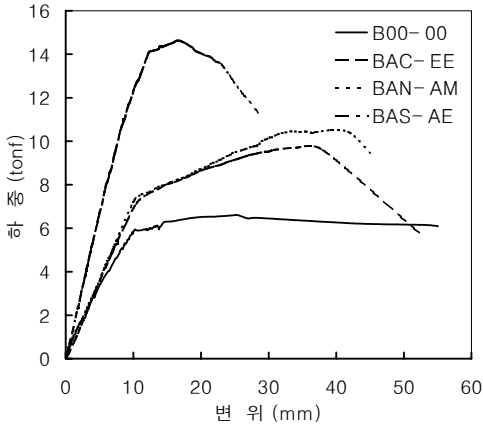


Fig. 6 손상도 A 실험체의 하중-변위 관계

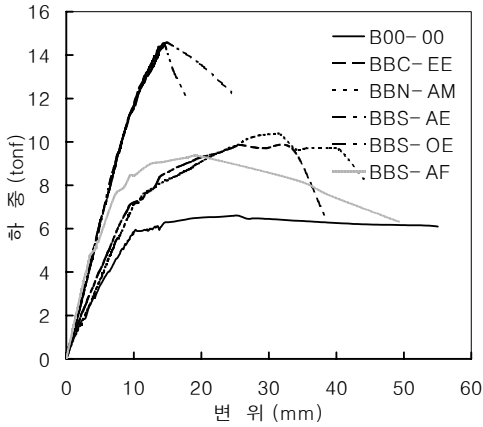


Fig. 7 손상도 B 실험체의 하중-변위 관계

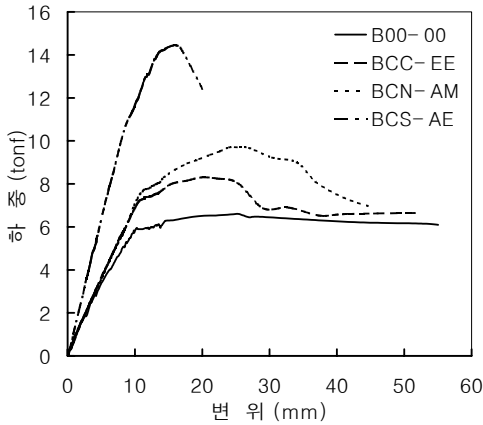


Fig. 8 손상도 C 실험체의 하중-변위 관계

4.3 실험값과 엄밀해값 및 강도설계 결과 값의 비교

실험값과 엄밀해값을 비교하면, 강판보강 실험체는 전반적으로 엄밀해값이 실험값에 비해 적은 값으로 나타났는데 이는 강판을 ㄷ자형으로 절곡하여 코너부 강성의 증가로 인하여 실험값이 증가된 것으로 판단된다.

BBS-AF 실험체는 엄밀해값보다 실험값이 낮게 나타났다는데, 이는 엄밀해값의 산정에서 강판과 콘크리트 보가 완전 일체 거동한다고 가정하였지만, 실제 실험에서 시멘트 페이스트의 부착력이 조기에 파괴되어 강판과 콘크리트 보가 완전 일체거동을 하지 않았기 때문으로 판단된다. 탄소섬유시트 보강 실험체와 격자탄소섬유시트 보강 실험체는 실험값이 엄밀해값보다 대부분 큰 값을 보였다.

Fig. 9와 Fig. 10은 각각 보강재료별로 실험값과 엄밀해값의 항복하중과 최대하중을 나타낸 것이다. Table 8과 Table 9는 각각 실험값과 엄밀해값의 비를 항복하중과 최대하중에 대하여 통계 처리하여 나타낸 것이다. 항복하중에 대하여 보강실험체 전체를 통계 처리하면, 실험값/엄밀해값의 평균은 1.172, 표준편차는 0.136, 변동계수가 0.127로 실험결과와 비교적 잘 일치하였다. 최대하중에 대하여 보강실험체 전부를 통계 처리하면, 실험값/엄밀해값이 평균 1.041, 표준편차가 0.040, 변동계수가 0.134로 실험값과 비교적 잘 일치하였다.

Table 8 항복하중의 실험값과 엄밀해값 비교

구 분	실험값/엄밀해값		
	평 균	표준편차	변동계수
강판보강	1.015	0.173	0.170
탄소섬유보강	1.195	0.021	0.018
격자탄소섬유판	1.043	0.020	0.020

Table 9 최대하중의 실험값과 엄밀해값 비교

구 분	실험값/엄밀해값		
	평 균	표준편차	변동계수
강판보강	0.988	0.170	0.172
탄소섬유보강	1.153	0.106	0.092
격자탄소섬유판	1.019	0.043	0.042

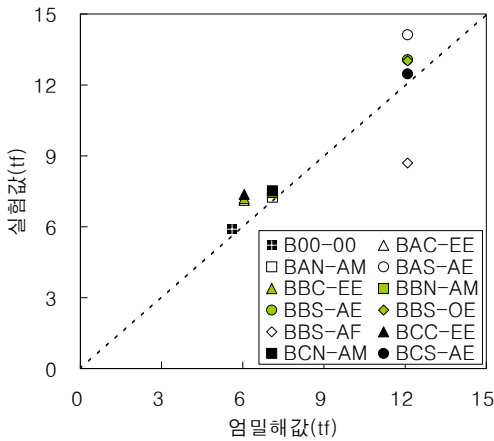


Fig. 9 항복하중의 실험값과 엄밀해값 비교

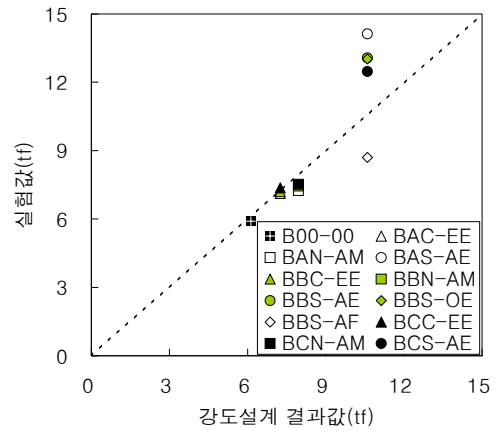


Fig. 11 항복하중의 실험값과 강도설계 결과값 비교

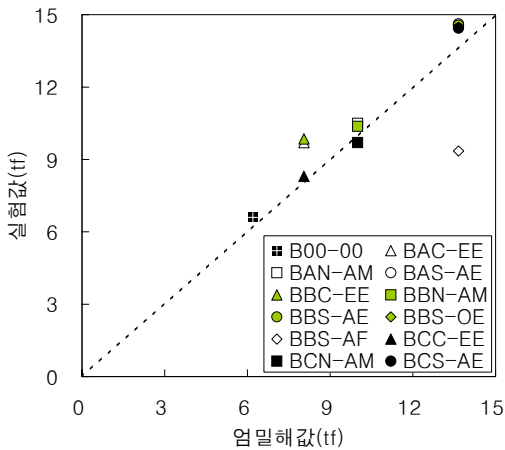


Fig. 10 최대하중의 실험값과 엄밀해값 비교

탄소섬유시트의 설계용 인장강도는 비교적 이상적인 시험조건에서도 그 편차가 10~20% 정도로 크게 나타나고 있으며, 이러한 영향은 시험편 제작시의 주변 조건 및 제작과정의 오차에 기인한다고 할 수 있다. 특히 실제구조물에 대한 보강공사 시에는 탄소섬유시트의 적층으로 인한 결함요인의 증가 및 국부적인 응력집중 등으로 인하여 인장강도의 감소현상이 발생되는 것으로 보고 있다. 따라서 강도감소에 대한 안전율을 확보하기 위해 다양한 형태의 부분감소계수가 제안되고 있다.^{1),3)}

Table 10 항복하중의 실험값과 강도설계 결과값 비교

구 분	실험값/강도설계 결과값		
	평 균	표준편차	변동계수
강판보강	1.158	0.197	0.170
탄소섬유보강	0.997	0.018	0.018
격자탄소섬유판	0.932	0.018	0.019

Fig. 11은 각 보강실험체 항복하중의 실험값과 MIDAS /SET을 이용하여 산정한 강도설계 결과값을 나타낸 것이다. 강도설계 결과값 산정시 강판보강 실험체는 부분감소계수를 적용하지 않고 산정하였으며, 탄소섬유시트 보강실험체와 격자탄소섬유판 보강실험체는 대한건축학회에서 제시하고 있는 0.7의 부분감소계수를 적용하여 산정하였다. 강판 보강실험체의 강도설계 결과값은 10.60tf, 탄소섬유시트 보강실험체는 7.25tf, 격자탄소섬유판 보강실험체는 7.95tf로 나타났다. 대한건축학회에서 제시하고 있는 강판 보강실험체의 항복내력은 실험값과 본 논문에서 제시한 엄밀해값보다 적은 값을 보이며, 탄소섬유시트와 격자탄소섬유판 보강실험체의 항복내력은 더 큰 값을 보인다. 이는 탄소섬유시트와 격자탄소섬유판 보강실험체는 설계강도를 보강재 인장과괴강도의 70%로 산정함으로써 보강재의 영향을 과대평가한 것으로 판단된다.

Fig. 12와 Fig. 13은 보강실험체의 보강재에 부분 감소계수를 적용하여 실험값/강도설계 결과값을 나타 낸 것이다. 보강재의 부분감소계수를 적용하지 않고 보강재의 인장강도를 그대로 적용한 경우, 탄소섬유시 트 보강실험체의 실험값/강도설계 결과값 비는 0.94~0.97, 격자탄소섬유판 보강실험체의 실험값/강도 설계 결과값 비는 0.85~0.88로 실험값을 과대평가하 게 된다. 이로 미루어 보강재의 인장강도가 충분히 발 휘 하지 못하는 것을 알 수 있었다. 실험값/강도설계 계산값이 일치하는 부분감소계수는 탄소섬유시트 보강 실험체는 0.6~0.8이고, 격자탄소섬유판 보강실험체 는 0.35~0.44로 나타났다.

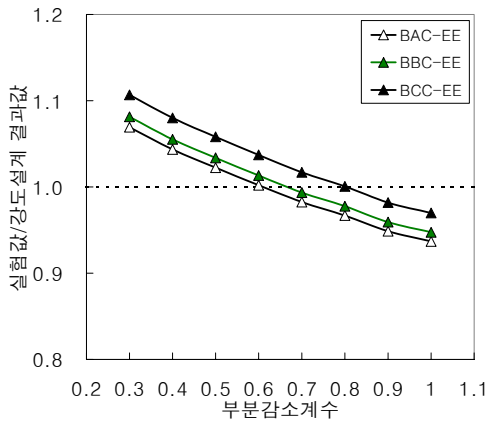


Fig. 12 탄소섬유시트의 부분감소계수

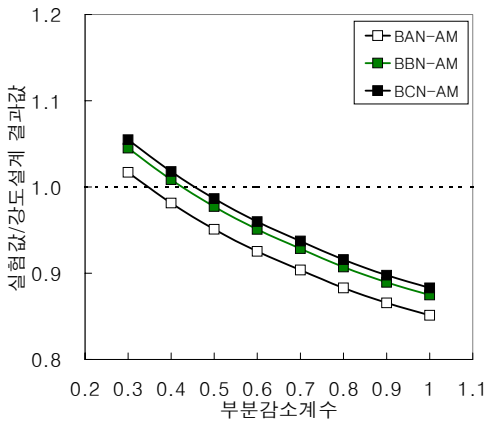


Fig. 13 격자탄소섬유판의 부분감소계수

4.4 보강실험체의 처짐 특성

보강실험체의 처짐을 기준실험체의 처짐과 비교하 면, 항복처짐은 기준실험체의 -7~14%로 거의 유사 한 결과를 보였으나, 최대처짐은 손상도, 보강재 종류, 접착재의 부착방법에 따라 큰 차이를 보였다. 손상도 별 최대처짐은 Fig. 14의 보강실험체의 변위 특성에서 격자탄소섬유판, 탄소섬유시트, 강관의 순으로 큰 값을 보였다. 탄소섬유시트와 격자탄소섬유판은 기준 실험체에 비해 대부분 큰 처짐을 나타낸 반면, 강관은 기준실험체와 비교했을 때, 상당히 적은 처짐을 보여 주었는데 이는 보강강관에 의한 인장부 강성의 증가로 인해 실험체의 인장철근 항복 직후 콘크리트가 압축과 괴 되었기 때문이다.

탄소섬유시트와 격자탄소섬유판은 손상도가 클수록 처짐이 작은 것으로 나타나, 손상도에 관계없이 거의 일정한 내력상승율을 보이는 내력비교와는 차이를 보 인다. 반면에 에폭시 접착방법을 사용한 강관 보강실험체는 거의 일정한 처짐을 보였고, 시멘트페이스 접착공법을 사용한 실험체(BBS-AF)는 기준실험체와 비교했을 때, 3.1% 감소한 값을 보여 다른 강관 보강 실험체의 처짐보다 큰 처짐을 보였다. 이는 시멘트페 이스트에 부착된 강관이 조기에 슬립됨으로서 휨과괴 가 발생되기 전 보강강관과 인장철근의 변형이 상당량 발생되었기 때문으로 판단된다. 그리고 앵커링 유무에 따른 강관 보강 실험체의 처짐 비교에서, 앵커링하지 않은 실험체 (BBS-OE)와 앵커링한 실험체 (BBS-AE)의 최대하중 이전의 처짐은 5% 내외의 차이를 보여

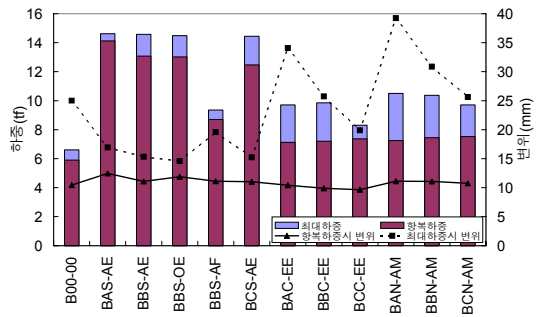


Fig. 14 보강실험체의 변위 특성

거의 같은 결과를 보였으나, 최대하중 이후의 처짐판계에서 큰 차이를 보인다. 앵커볼트를 설치하지 않은 실험체(BBS-OE)는 강관의 박리와 동시에 하중이 급격히 감소되어 상당히 취성적인 경향을 보였다. 따라서 보강재의 박리파괴가 발생 시 급격한 하중감소를 방지하기 위해 앵커볼트의 설치가 필요하다고 판단된다.

4.5 보강재의 보강효과

구조부재의 변형능력이 크다는 것은 외력에 대한 에너지 흡수능력이 크다는 것을 의미한다. 부재의 변형능력은 하중-변위 곡선에서 변위변형능력과 면적변형능력으로 구분한다. 변위변형능력은 연성도로 간주할 수 있고, 면적변형능력은 에너지 흡수능력으로 간주할 수 있다.

연성도(μ)의 평가는 보의 최대하중(P_{max})시의 최대처짐(δ_{max})을 보의 항복하중(P_y)시의 항복처짐(δ_y)으로 나누어 평가하였고, 이는 식 (2)와 같이 정의된다.²⁾

$$\mu = \frac{\delta_{max}}{\delta_y} \quad (2)$$

보강재의 보강효과를 검토하기 위하여 보강실험체의 내력비 P_{max}/P_{stmax} (보강 실험체의 최대하중/기준실험체의 최대하중)와 연성비 μ/μ_{st} (보강실험체의 연성도/기준실험체의 연성도)를 Fig. 15과 같이 나타내었다. Fig. 15에서 강관보강실험체는 모두 내력은 회복하지만 연성비는 휨압축파괴에 의하여 기준실험체에 미치지 못함을 알 수 있다. 강관 보강실험체는 손상도에 따른 연성도의 차이가 1% 이내로 거의 일정한 값을 갖으며, 앵커볼트 설치유무에 따른 연성도 비교에서도 6%의 차이를 보여 앵커볼트 설치유무도 연성도에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그러나 접착제종류에 따른 강관 보강실험체의 연성도 비교에서는 시멘트페이스트 접착공법을 사용한 실험체(BBS-AF)가 에폭시접착공법을 사용한 실험체(BBS-AE)에 비해 20% 정도 큰 값을 보여주었다. 이는 강관이 조기

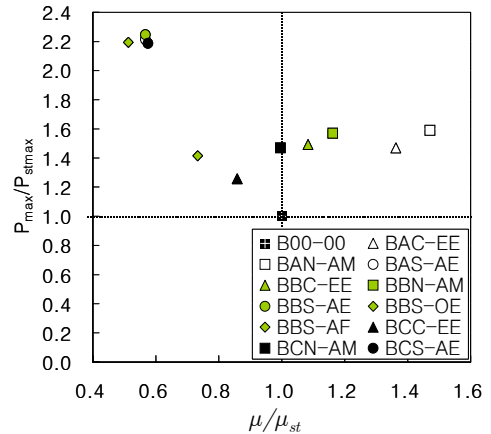


Fig. 15 내력비-연성비 비교

에 슬립됨으로서 내력이 상승하지 못한 반면, 실험체가 파괴되기 전에 인장철근과 철판이 항복되어 충분한 변형이 발생되었기 때문으로 판단된다.

탄소섬유시트, 격자탄소섬유판 보강실험체는 모두 내력은 회복되었지만, 연성비는 손상도 A, B인 탄소섬유시트, 격자탄소섬유판 보강실험체만 기준실험체의 연성도를 상회함을 알 수 있다. 강관 보강실험체는 모두 손상도와 무관하게 기준실험체의 연성도보다 적은 값을 갖는 것으로 나타났다.

면적변형능력인 에너지 흡수능력은 실험체의 하중-변위 곡선을 이용한 면적법에 의해 평가하였다. 내력비 P_{max}/P_{stmax} (보강실험체의 최대하중/기준실험체의 최대하중)와 에너지흡수능력비 E/E_{st} (보강실험체의 에너지흡수능력/기준실험체의 에너지흡수능력)을 Fig. 16에 나타내었다. Fig. 16에서 내력비-에너지흡수능력비도 전체적으로 내력비-연성비와 비슷한 양상을 보인다.

탄소섬유시트와 격자탄소섬유판 보강실험체는 손상도 C를 제외하고 충분한 변위와 높은 내력 상승으로 에너지흡수능력이 기준실험체에 비해 상승하였으며, 손상도가 클수록 에너지흡수능력은 더 적은 값을 갖는다. 하지만 강관보강실험체는 내력비-연성비처럼 기준실험체에 비해 크게 감소되지 않았다. 이는 연성도는 크지 않지만 대신 높은 내력상승율로 인하여 에너지흡수능력이 증가된 것으로 판단된다.

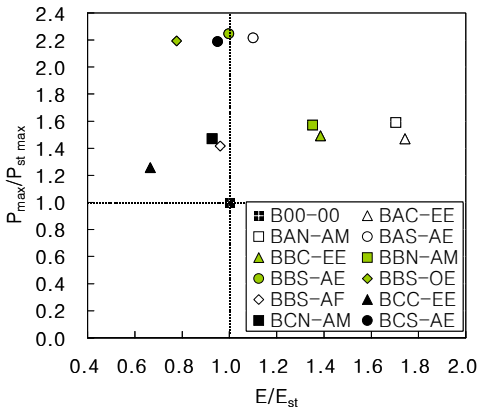


Fig. 16 내력비-에너지흡수능력비 비교

반면에 앵커볼트를 설치하지 않은 실험체(BBS-OE)는 최대하중 후 급격한 하중감소로 인하여 다른 실험체에 비해 적은 에너지흡수능력을 갖았다. 이로 미루어 손상도정도가 항복하중이하(손상도 A, B)이며, 보강재는 탄소섬유시트 또는 격자탄소섬유판으로 보강한 경우에만 내력 및 연성능력이 기준실험체를 초과하는 보강효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

손상정도가 항복하중을 초과하는 경우(손상도 C)에는 내력은 회복되지만, 연성도, 에너지흡수능력이 기준실험체보다 적은 값을 가지므로, 변형능력은 사전가력으로 인한 콘크리트의 큰 균열, 철근의 잔류응력 영향과 압축철근의 좌굴 등으로 인하여 손상이전의 상태를 회복하지 못함을 알 수 있다.

5. 결론

휨에 의해 구조적인 손상을 받은 R.C보가 보수·보강에 의해서 손상 이전의 상태로 내력보원 능력을 평가하기 위해 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 구조적인 손상을 받은 R.C보 실험체를 강판·탄소섬유시트·격자탄소섬유판으로 보수·보강한 경우, 기준실험체에 비해 항복하중은 1.2~1.3배 증가되었으며, 최대하중은 1.26~2.35배 증가되었다. 따라서 손상정도에 관계없이 보강재를 사용하여 보

수·보강한 경우 항복값 및 최대내력값은 모두 증가되었다.

- 2) 강판 보강실험체의 앵커볼트 설치 유무에 따른 휨내력값(BBS-AE, BBS-OE)은 거의 같은 값을 보여 앵커볼트 설치 유무는 내력값에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있었다. 그러나 앵커볼트를 설치하지 않은 보강실험체는 보강재의 박리 후 급격히 하중이 감소되어 취성적인 경향을 나타내므로 이를 방지하기 위해 앵커볼트의 설치가 꼭 필요하다고 사료된다.
- 3) 강판 보강실험체의 변형능력인 연성도는 휨압축과 꺾에 의하여 손상정도에 관계없이 기준실험체의 연성도값에 비해 절반정도 값을 보이고, 에너지 흡수 능력은 거의 같은 값을 가짐을 알 수 있었다.
- 4) 탄소섬유시트·격자탄소섬유판 보강실험체의 변형능력은 기준실험체와 비교할 때 손상정도가 항복하중 이내에서는 연성도가 증가되었으나 손상정도가 항복하중을 초과하는 경우에는 감소함을 알 수 있었다. 에너지 흡수 능력은 손상정도가 심할수록 낮은 에너지 흡수 능력을 가짐을 알 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 2002년도 서일대학 학술연구비에 의해 연구되었음

참고문헌

1. “통합설계법에 의한 콘크리트 구조설계기준”, 대한건축학회, 2000.
2. 이현호, 구은숙, 이리형, “탄소섬유시트로 휨보강된 RC보의 거동에 관한 실험적고찰”, 대한건축학회논문집, 14권6호, 1998. 6. pp77-84.
3. 최기선 외 4, “RC부재의 휨보강 설계용 탄소섬유시트 복합체의 부분감소계수”, 대한건축학회 학술발표논문집, 제22권 제2호, 2002.10, pp173~176.
4. Wei An, “RC Beam Strengthened with FRP Plates I, II”, Journal of structural engineering, ASCE, 116(2), pp.3417~3455.

(접수일자 : 2003년 8월 19일)