

# 탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트 구조물의 휨성능에 대한 이론 및 실험적 연구

## Theoretical and Experimental Investigations on the Flexural Behavior of RC members Strengthened with Carbon Fiber Sheets

장득훈\* 김영갑\* 도재문\* 박현정\*\* 조백순\*\*\* 박대효\*\*\*\*  
Jang, Deuk Hoon Kim, Young Khab Do, Jae Moon Park, Hyun Jung Cho, Baik Soon Park, Tae Hyo

### ABSTRACT

The flexural behavior of a strengthened beam that is a reinforced concrete beam with externally bonded carbon fiber sheets, is theoretically and experimentally investigated. A rectangular beam having a width of 20cm, depth of 30cm, and effective depth of 25cm is chosen. In order to have a variety of beams analyzed, three reinforcement ratios are chosen for the analysis: 1)  $\frac{1}{2} \rho_{max}$ , which is the most suitable reinforcement ratio for deflection consideration and the highest reinforcement ratio for practical designing beams as well; 2)  $\rho_{min}$ , which is the lowest reinforcement ratio for design purposes; and 3) the reinforcement ratio halfway from 1) and 2). Carbon fiber sheets with width of 15cm are externally bonded at the bottom fiber of the beam. The effect of the amount of carbon fiber sheets varying from 1 to 4 plies on the flexural capacity of the strengthened beam are also examined.

Yield loads, ultimate loads, and flexural rigidities of the strengthened beam from the experimental results are composed with theoretical ones.

### 1. 서론

현재 국내에서는 철근콘크리트 구조물의 유지 및 관리측면에서는 안전점검 및 정밀안전진단을 통해 많은 연구가 수행되고 있는 반면 구조물의 내력을 향상시키는 보강설계 및 보강 공법에 대해서는 일정한 기준이 없는 상태이다. 국내에서는 보강에 필수적인 접착제나 보강재료의 선택이 보강 업체 또는 설계자의 경험에 의해 이루어지고 있다. 소요 휨강도에 대한 보강량 또한 명확하게 제시되어 있지 않아 구조 설계자의 경험적인 판단에만 의존하고 있는 실정이다.

선진국에서는 현재까지 기존의 연구를 바탕으로, 가장 적절한 보강재로 알려진 탄소섬유시트를 이용한 공법의 적용을 위한 정적실험 및 동적 실험을 포함하여 휨, 전단, 부착 등에 대한 수많은 실험을 행하고 있다. 그래서 그 공법의 특성을 규명함으로써 시공법과 설계법을 표준화 하는 반면, 아직까지 국내에서는 이렇다 할만한 보강 기준이 제시되어 있지 않은 실정이다.

따라서 본 연구는 실험을 통하여 보강보의 휨 거동을 고찰하고, 이론적으로 보강보의 휨강도를 산정하여 실험값과 비교·규명하고자 한다. 최종적으로 탄소섬유시트의 보강설계를 위한 자료를 제공하는데 그 목적을 두고 있다.

\*정회원, 인제대학교 토목공학과 석사과정  
\*\*정회원, 부산대학교 생산기술연구소 특별연구원  
\*\*\*정회원, 인제대학교 토목공학과 조교수  
\*\*\*\*정회원, 한양대학교 토목공학과 조교수

## 2. 실험계획

### 2.1 실험체 계획

다양한 철근콘크리트 보에 대한 휨해석 적용을 위하여 다음과 같은 3가지 인장철근비를 선택하였다.

- ①  $1/2\rho_{max}$ 에 해당되는 철근비로서 연성, 처짐 및 경제성을 고려할 때 가장 적당한 철근비이며, 일반적으로 설계시 적용되는 가장 높은 철근비 : 철근 D19 2본( $A_s=5.73\text{cm}^2$ )사용
- ②  $\rho_{min}$ 에 가까운 철근비로서 설계시 적용되는 가장 낮은 철근비 : 철근 D13 2본( $A_s=3.97\text{cm}^2$ )사용
- ③ ①과 ②의 중간 값인 철근비 : 철근 D16 2본 ( $A_s=2.53\text{cm}^2$ )사용

또한 보의 하부에 설계두께 0.11mm(중량  $200\text{gf/m}^2$ )인 탄소섬유시트를 폭 15cm로 보강하였으며, 보강량에 대한 휨성능을 고찰하기 위하여 보강접수는 현실적으로 가장 많이 시공하는 1~4겹까지 선택하였다.

실험체의 단면은  $200\times 300\text{mm}$ 인 단면에 길이가 2,400mm의 장방형 철근콘크리트 보를 제작하였다. 유효깊이  $d$ 는 250mm로 하였다. 실험체의 전단파괴를 방지하기 위하여 전단보강 철근 D10을 100mm간격으로 순수 휨구간을 제외하고 배근하였다. 순지간은 2,200mm로 하였으며, 실제 재하상태와 근접한 하중을 주기 위해 실험체 중앙에서 좌우로 250mm씩 총 길이 500mm의 순수 휨구간을 두었다. 그림 1에 실험체의 단면 및 형상을 나타내었다.

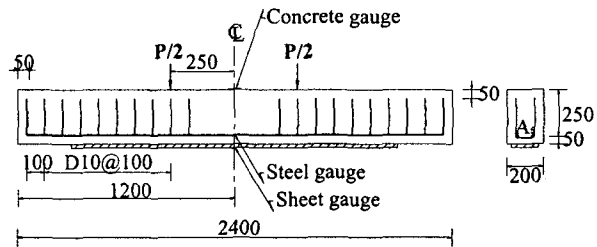


그림 4 실험체의 형상 및 크기 (단위:mm)

### 2.2 가력 및 측정방법

50tonf 용량의 액츄에이터(actuator)를 사용하여 네 점 휨실험을 실시하였다. 실험보의 양쪽단부에서 각각 100mm 떨어진 곳에 강제 로울러를 설치하여 실험보를 지지하였다. 강제 로울러는 수평방향 변위와 회전에 대한 구속이 없도록 제작하였다. 특별히 제작된 철제 가력보( $150\text{mm}\times 150\text{mm}\times 1,400\text{mm}$ )를 액츄에이터에 볼트와 너트를 연결하여 하중을 가력하였다. 또한 하중을 균등하게 분포시키기 위하여 철제 가력보와 실험보 사이에 고무판(길이 250mm, 폭 20mm, 두께 2mm)을 사용하였다.

가력방법은 사진 1에 나타난 바와 같이, 액츄에이터를 이용하여 변위제어방식(displacement control)으로 1.0mm/min의 속도로 가력하였으며, 탄소섬유시트가 파단되면 가력을 중지하였다. 작용하중은 액츄에이터에 부착된 하중계(load cell)에 의해 측정되었으며, 작용하중에 대한 처짐은 보의 중앙부에 설치된 변위계(LVDT)를 사용하여 측정하였다. 인장철근의 변형률을 파악하기 위하여 콘크리트 타설전에 미리 철근 중앙부에 철근용 변형률 게이지(strain gauge, 길이 5mm)를 부착하였다. 압축측 콘크리트 변형률을 측정하기 위하여 가력하기전에 콘크리트용 변형률 게이지(길이 60mm)를 실험보 상단 중앙부에 부착하였다. 보강된 탄소섬유시트의 변형률은 탄소섬유시트 밀면 중앙부에 실험보 길이 방향으로 변형률 게이지(길이 5mm)를 부착하여 측정하였다. 하중, 처짐 및 각각의 변형률은 데이터로거(data logger)에 저장한 후 컴퓨터로 처리하였다.



사진 1 실험체의 가력장치 및 설치상황

### 3. 탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트 보의 휨해석

직사각형 철근콘크리트 보에 탄소섬유시트가 인장측에 보강된 경우의 휨모멘트는 보강보를 구성하는 재료들의 역학적인 메커니즘(mechanism)에 의해 결정된다. 따라서 보강보의 휨해석시 각 구성재료들의 응력 상태에 따라 다음과 같이 3구간으로 나누어 보강보의 휨성능을 해석하였다.

구간 I : 보강보에 균열이 전혀 없는 구간으로

보강보를 구성하는 재료들은 탄성 거동한다. (탄성구간)

구간 II : 보강보의 인장 측에서의 균열로 콘크리트는 대부분의 인장능력을 상실하였으나, 철근과 보강재인 탄소섬유시트는 탄성구간 내에 있으므로 탄성거동을 한다. (균열구간)

구간 III: 보강보가 항복에 도달한 이후의 구간이며, 보강보의 항복은 인장철근의 항복에 의해 지배된다. 철근의 변형을 경화를 무시하면 철근의 응력은 항복강도  $f_y$ 로 일정하나, 탄소섬유시트는 파단에 이를 때까지 탄성거동을 한다. (항복이후구간)

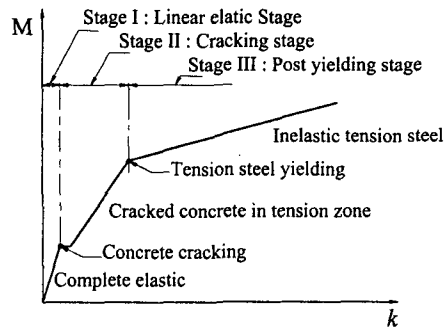


그림 2 이상화된 보강보의 휨모멘트-곡률(moment-curvature)선도

보강보의 휨모멘트-곡률(moment-curvature,  $M-k$ ) 형태는 사용된 인장철근비와 보강량에 따라 다소 차이가 있으나, 일반적으로 과소 철근비가 사용된 보강보의  $M-k$  선도는 파괴에 도달될 때까지 그림 2에 나타난 바와 같이 이상화된 세 구간으로 나타낼 수 있다.

보강보의 휨해석은 힘의 평형조건과 변형을 적합조건을 만족시켜야 한다. 탄소섬유시트와 콘크리트 인장면 사이의 부착은 완전하다고 가정하고, 부착을 위해 사용된 접착제의 효과는 무시한다. 철근의 지름과 탄소섬유시트의 두께는 보의 깊이와 비교할 때 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 철근과 탄소섬유시트 전 단면에서 발생하는 응력은 각 재료 도심축의 응력들과 같은 크기의 응력들이 작용된다고 보았다. 또한 탄소섬유시트의 위치는 보의 밑바닥에 위치하는 것으로 가정한다.

#### 3.1 구성요소의 모델

응력 증가 부분과 감소부분이 만나는 점이 연속적이고, 응력 감소 부분도 곡선으로 표현된 Shah의 모델식을 이용하여 콘크리트의 압축력을 산정하였다. Shah의 모델식은 식 (1)로 표현이 되며, 콘크리트의 압축력( $f_{ck} = 210 \sim 420 \text{ kgf/cm}^2$ )에 따른 응력-변형을 관계도는 그림 3에 나타내었다.

$$f_c = \begin{cases} 0 & : \epsilon \leq 0 \\ f_{ck} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^A \right] & : 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_0 \\ f_{ck} e^{-k(\epsilon - \epsilon_0)^{1.15}} & : \epsilon \geq \epsilon_0 \end{cases} \quad (1)$$

여기서,  $\epsilon_0 = 1.467 \times 10^{-6} f_{ck} + 0.00195$

$$A = \frac{E_c \epsilon_0}{f_{ck}}$$

$$k = 2.429 f_{ck}$$

콘크리트의 압축력  $C_c$ 를 산정하기 위하여 압축력  $C_c$ 의 크기에 관계되는  $\alpha$ 와 압축력  $C_c$ 의 작용위치와 관계되는  $\beta$ 를 산정하여야 한다.

콘크리트의 인장성능은 인장강도에 도달할 때

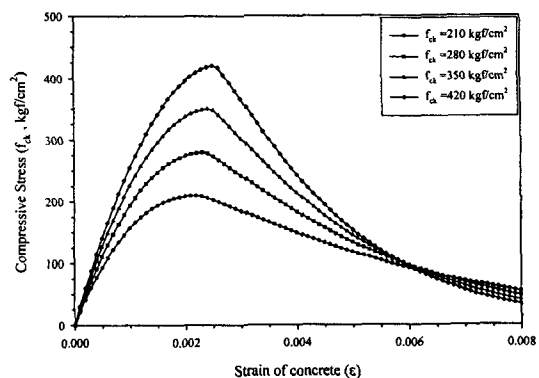


그림 3 Shah의 모델식을 이용한 콘크리트 압축응력-변형을 관계도

까지 직선인 응력-변형률 선도를 사용하였으며, 인장강도 도달 후 응력감소 구간의 콘크리트 인장성능은 무시하였다. 철근의 응력은 변형률이 항복변형률  $\epsilon_y$ 에 도달하기 전까지는 변형률  $\epsilon_s$ 에 탄성계수  $E_s$ 를 곱한 값으로 탄성적이며, 철근의 변형률이 항복변형률 이상일 경우에는 철근의 변형률에 관계없이 항복응력  $f_y$ 로 가정하였다. 탄소섬유시트의 인장응력-변형률은 파괴에 도달할 때까지 탄성적인 응력-변형률 선도를 사용하였다.

### 3.2 보강보의 휨모멘트 산정

보강보의 휨강도  $M_n$ 을 산정하기 위하여 압축력  $C_c$ , 철근의 인장력  $T_s$ , 탄소섬유시트의 인장력  $T_{cfs}$  크기는 식 (2)~식 (4)와 같다.

$$C_c = \alpha f_{ck} bc \quad (2)$$

$$\begin{aligned} T_s &= A_s f_s = A_s E_s \epsilon_s & \epsilon_s < \epsilon_y \\ T_s &= A_s f_y & \epsilon_s \geq \epsilon_y \end{aligned} \quad (3)$$

$$T_{cfs} = A_{cfs} \cdot E_{cfs} \cdot \epsilon_{cfs} \quad (4)$$

#### 3.2.1 구간 I

이 구간은 콘크리트의 인장축이 균열전의 상태로 모든 구성재료들이 탄성거동을 하는 구간으로

$$\alpha f_{ck} bc^2 + (A_s E_s \epsilon_c + A_{cfs} E_{cfs} \epsilon_c) c - (A_s E_s d \epsilon_c + A_{cfs} E_{cfs} h \epsilon_c) = 0 \quad (5)$$

근의 공식을 이용하여 구간 I의 중립축 거리  $c$ 를 산정하면 된다.

#### 3.2.2 구간 II

이 구간은 콘크리트 인장축은 균열이 발생했지만, 인장철근과 탄소섬유시트는 탄성거동을 하는 구간이다. 구간 II에서는 철근의 인장력에서 철근 변형률이 항복 변형률보다 적은 경우( $\epsilon_s < \epsilon_y$ )로

$$\alpha f_{ck} bc^2 + (A_s E_s \epsilon_c + A_{cfs} E_{cfs} \epsilon_c) c - (A_s E_s d \epsilon_c + A_{cfs} E_{cfs} h \epsilon_c) = 0 \quad (6)$$

근의 공식을 이용하여 구간 II의 중립축 거리  $c$ 를 산정하면 된다.

#### 3.2.3 구간 III

이 구간은 인장철근은 항복하였지만, 보강된 탄소섬유시트는 탄성거동을 하는 구간이다. 구간 III에서는 철근의 변형률이 항복변형률보다 같거나 큰 경우( $\epsilon_s \geq \epsilon_y$ )로

$$\alpha f_{ck} bc^2 + (A_{cfs} E_{cfs} \epsilon_c - A_s f_y) c - (A_{cfs} E_{cfs} h \epsilon_c) = 0 \quad (7)$$

근의 공식을 이용하여 구간 III의 중립축 거리  $c$ 를 산정하면 된다.

따라서 탄소섬유시트로 보강된 보의 휨강도  $M_n$ 은 콘크리트 압축력  $C_c$ 의 작용점에 대하여 모멘트를 취하면 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$M_n = T_s (d - \beta c) + T_{cfs} (h - \beta c) \quad (8)$$

## 4. 보강보 실험 결과 및 고찰

### 4.1 하중-처짐 관계

탄소섬유시트로 보강된 콘크리트 보의 내력특성을 평가하기 위하여 실험중 측정된 보강보의 하중-처짐 관계를 고찰하였다. 탄소섬유시트로 보강된 보의 하중-처짐 곡선을 인장철근비에 따라 그림 4~그림 6에 나타내었다. 하중-처짐 곡선을 비교하면 확연한 휨거동의 차이를 나타낸다. 인장철근비에 대한 보강효과를 보면 D13인 경우의 항복하중의 증가비는 64%~95%로 나타나, D16의 경우의 항복하중 증가비 24%~40%, D19인 경우의 항복하중 증가비 12%~26%보다 훨씬 높게 나타났다. 즉 인장철근

비가 낮을수록 보강효과는 더욱 높게 나타남을 알 수 있었다.

인장철근비에 대한 최대하중에 대한 보강효과 또한 무보강보에 비하여 D13인 경우의 최대하중 증가비가 35%~149%로 나타나, D16인 경우의 최대하중 증가비 43%~73%, D19인 경우의 최대하중 증가비 14%~45% 보다 훨씬 높게 나타나, 외부하중에 대한 사용성과 안정성에 대한 효과를 입증하였다.

균열구간(구간 II)의 휨강성은 D13인 경우 증가비가 51%~103%로 나타나, D16인 경우의 증가비 7%~50%, D19인 경우의 증가비 17%~54%보다 훨씬 높게 나타나, 보강량이 많을수록, 인장철근비가 낮을수록 휨강성은 증가하여, 균열구간에서 보강재에 의한 우수한 휨강성 증진 효과가 있는 것으로 나타났다. 항복이후구간(구간 III)의 초기 휨강성도 마찬가지로 D13인 경우 증가비가 178%~800%로 나타나, D16인 경우의 증가비 170%~656%, D19인 경우의 증가비 196%~582%로 나타나 이 구간에서 보강재에 의한 휨강성 보강 효과는 더욱 우수한 것으로 판명되었다. 탄소섬유시트로 보강된 보강보의 하중 및 휨강성과 무보강보의 하중 및 휨강성에 대한 증가비를 표 1에서 보여주고 있다.

표 1 보강보 하중 및 휨강성과 무보강보 하중 및 휨강성의 비교 (실험체별 평균값)

실험체명	항복하중			최대하중		
	하중 증가비	휨강성 (tonf/mm)	휨강성 증가비	하중 증가비	휨강성 (tonf/mm)	휨강성 증가비
D13-P0	-	0.8868	-	-	0.0601	-
D13-P1	1.64	1.3415	1.51	1.35	0.1669	2.78
D13-P2	1.75	1.5374	1.73	1.68	0.3563	5.93
D13-P3	1.83	1.6947	1.91	2.15	0.4972	8.27
D13-P4	1.95	1.8025	2.03	2.49	0.5406	9.00
D16-P0	-	1.4454	-	-	0.0747	-
D16-P1	1.24	1.5405	1.07	1.43	0.2014	2.70
D16-P2	1.28	1.7115	1.18	1.52	0.4441	5.95
D16-P3	1.40	2.1709	1.50	1.73	0.5644	7.56
D19-P0	-	1.8043	-	-	0.0979	-
D19-P1	1.12	2.1164	1.17	1.14	0.2901	2.96
D19-P2	1.17	2.1656	1.20	1.23	0.4135	4.22
D19-P3	1.18	2.3886	1.32	1.29	0.5372	5.49
D19-P4	1.26	2.7717	1.54	1.45	0.6672	6.82

#### 4.2 항복하중 및 최대하중

인장철근비에 대한 항복하중과 최대하중에 대한 실험값, 해석값 그리고 실험값과 해석값의 비를 각 보강접수에 대하여 표 2에 정리하였다. 콘크리트 압축강도 재료시험과 탄소섬유시트 인장강도 시험 결과와 휨실험 결과 탄소섬유시트의 변형률을 해석값에 적용시켜 비선형해석을 수행하여, 항복하중과 최대하중을 얻어내었다.

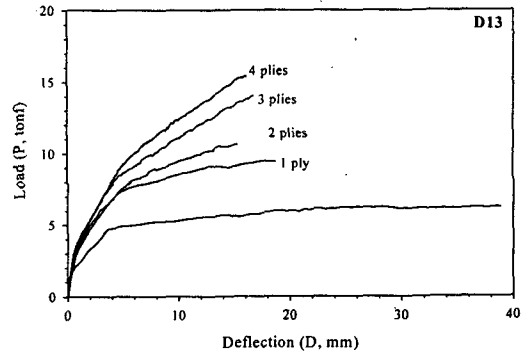


그림 4 보강량에 따른 하중-처짐 곡선 (D13)

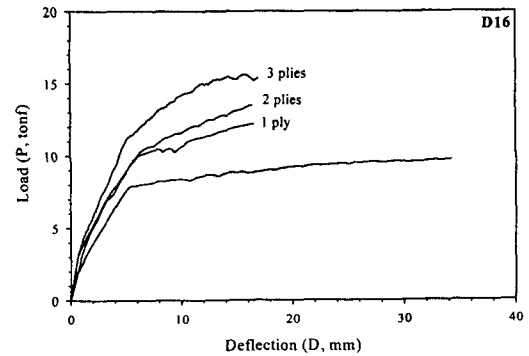


그림 5 보강량에 따른 하중-처짐 곡선 (D16)

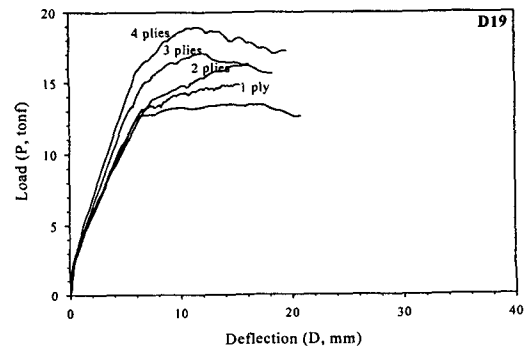


그림 6 보강량에 따른 하중-처짐 곡선 (D19)

항복하중에 대한 실험값과 해석값의 비에 대한 평균값은 1.127, 최대하중은 1.068으로 나타나, 실험값이 해석값보다 크게 산정되었음을 알 수 있다. 최대하중에 대해서는 D13인 경우는 1.075, D16인 경우는 1.091, D19의 경우는 1.038로 나타나 수용한계 내에 있는 것으로 결론지을 수 있다.

표 2 항복하중 및 최대하중의 실험값과 해석값 비교

인장철근비	보강접수	항복하중(tonf)			최대하중(tonf)		
		실험값(1)	해석값(2)	(1)/(2)	실험값(1)	해석값(2)	(1)/(2)
D13	0	4.80	5.11	0.939	6.27	5.35	1.172
	1	7.88	6.56	1.201	9.44	9.28	1.017
	2	8.38	7.09	1.181	10.56	11.13	0.949
	3	8.46	7.34	1.152	13.76	12.04	1.143
	4	9.29	7.74	1.200	15.52	14.17	1.095
D16	0	8.07	7.81	1.033	9.02	8.20	1.100
	1	10.20	8.47	1.204	11.98	10.93	1.096
	2	10.42	9.12	1.142	13.84	12.51	1.106
	3	11.46	9.76	1.174	15.54	14.62	1.063
D19	0	11.95	10.98	1.088	13.17	11.47	1.148
	1	13.36	11.63	1.148	15.04	14.06	1.070
	2	13.95	12.26	1.138	16.18	15.58	1.039
	3	14.09	12.93	1.090	17.02	17.48	0.974
	4	14.79	13.56	1.091	18.40	19.21	0.958

### 5. 결론

본 연구에서는 탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트 보의 휨성능을 고찰하고, 휨강도의 해석 방법을 제시함으로써, 보강 설계시 직접 적용할 수 있도록 하기 위한 것이다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 탄소섬유시트 보강보의 하중-처짐 관계는 대체적으로 탄성구간, 균열구간, 항복이후구간의 3구간으로 구분할 수 있다. 각 구간에서 하중-처짐 곡선 형태는 직선으로 간주할 수 있다. 특히 항복이후구간에서 보강재의 휨성능 향상이 우수한 것으로 나타나, 무보강보의 휨거동과 보강보의 휨거동은 확연한 차이를 나타내었다.
- (2) 무보강보의 항복하중과 최대하중에 대하여, 탄소섬유시트로 보강된 보강보의 항복하중 및 최대하중의 보강효과는 인장철근비가 낮을수록, 보강접수가 많을수록 보강효과는 더욱 높게 나타남을 알 수 있었다.
- (3) 항복하중 및 최대하중에서는 항복하중에 대한 실험값과 해석값의 비에 대한 평균값은 1.127, 최대하중은 1.068으로 나타나, 실험값이 해석값보다 크게 산정되었음을 알 수 있다. 최대하중에 대해서는 D13인 경우는 1.075, D16인 경우는 1.091, D19의 경우는 1.038로 나타나 수용한계 내에 있는 것으로 나타나 타당성이 있는 것으로 결론지을 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. 심종성, 배인환 “ 강판 및 탄소섬유로 보강된 철근콘크리트 보에 대한 해석적 연구” 콘크리트학회지, 제 9권, 6호, 1997.12, pp.129~137.
2. 한만엽, 송병표 “ 보강재의 변형 부착에 따른 보의 구조적 거동” 콘크리트학회지, 제 10권, 3호, 1998.6, pp.197~208.
3. Surendra P. Shah, Apostolos Fafitis, and Richard Arnold, “Cyclic Loading of Spirally Reinforced Concrete”, Journal of Structural Engineering, Vol. 109, No. 7, 1983.7, pp. 1695~1710.
4. Alfarabi Sharif, G. J. Al-Sulaimani, I. A. Basunbul, M. H. Balush, and B. N. Ghaleb “Strengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Plates” ACI Structural Journal, 1994.3-4, pp.160~168.
5. C. Allen Ross, David M. Jerome, Joseph W. Tedesco and Mary L. Hughes “Strengthening of Reinforced Beams with Externally Bonded Composite Laminates” ACI Structural Journal, 1999.3-4, pp.212~220.
6. Mahmoud T. EI-Milhilmy and Joseph W. Tedesco “Deflection of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Plates” ACI Structural Journal, 2000.9-10, pp.679~688.