

---

# 강판 및 탄소섬유로 보강된 철근콘크리트보에 대한 해석적 연구

## Analytical Study on the Reinforced Concrete Beams Strengthened with Steel Plate and Carbon Fiber Composites



심종성\*

Sim, Jong Sung



배인환\*\*

Bae, In Hwan

---

### ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the flexural behavior characteristics of simply supported RC beams strengthened with steel plate or CF sheet under monotonically increasing loads. A nonlinear analysis program included a subroutine program which calculates debonding loads by stress concentrations in the adhesive layer is developed to predict the flexural behavior of strengthened beams. Stress-strain distribution considered tensile strain softening for concrete is assumed and bilinear elastic-plastic model for steel plate and rebar applied and perfect elastic model for CF sheet used. A force that causes to debond and rip off is evaluated by a improvement over Roberts's method. The program is proved by comparing analytical results with the test data and ADINA obtained for 8 beams. A reasonably close agreement between the experimental results and the prediction is obtained.

Keywords : flexural behavior, strengthening, steel plate, CF sheet, de bonding.

---

\* 정희원, 한양대학교 공학대학 토목, 환경공학과 교수  
\*\* 정희원, 한양대학교 공학대학 토목, 환경공학과 박사과정

• 본 논문에 대한 토의를 1998년 2월 30일까지 학회로 보내주  
시면 1998년 4월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

## 1. 서론

기존의 에폭시접착강판보강공법은 사용중인 구조물에 쉽게 적용 가능하며 구조물 치수의 변화가 적고 인장부 뿐만 아니라 압축력과 전단을 받는 부위에도 적용이 가능하다. 강판보강된 구조물에 영향을 주는 인자로는 정착시스템, 판면적과 두께, 보강길이 및 철근과 단면제원과의 관계 등이다<sup>1,3)</sup>. 단부의 정착시스템은 peeling force 또는 rip off에 효과적으로 저항하고, 판의 분리와 수직이동을 방지하며 판과 구조물사이의 역학적거동을 그대로 전달시키는 역할을 한다. 또한 판면적과 두께의 관계는 여러 연구자들에 따라 다르게 보고하고 있으나, Swamy 등의 실험결과에 따르면 연성과 휨파괴를 유도하기 위하여 강판 폭(b)과 두께(t)를  $b/t \geq 50$ 으로 제안하였다. 또한 연성과 휨파괴를 유도하기 위한 철근과 단면제원과의 관계는 중립축(x)과 유효깊이(d)를 인자로 하여  $x/d \leq 0.4$ 와 같이 제안하였다<sup>3,9)</sup>.

강판보강된 구조물의 파괴모드는 크게 휨파괴, 콘크리트압괴 그리고 강판 debonding에 의한 부재의 파괴(전단파괴)로 분류할 수 있다. 특히 강판의 debonding은 예측하지 못한 갑작스런 파괴를 유발하므로 이에대한 방지대책이 요구된다. Debonding은 접착제파단, 전단균열에 의한 강판박리(peeling-off), 그리고 단부응력집중에 의한 rip off 파괴의 3가지 형태로 나타난다<sup>4,8)</sup>. 접착제의 파단은 접착제와 보강재사이의 계면을 따라 발생한 균열의 진전으로 나타나며, 이와같은 계면균열은 특히 고탄성의 보강재를 사용한 경우에 잘 발생하며 그 원인으로는 불완전한 접착제도포, 콘크리트내의 휨균열, 콘크리트인장면의 부적절한 평활도, 그리고 피로하중에 기인한다. 접착제계면의 균열전파에 대한 문제는 선형탄성 파괴역학 (LEFM)을 적용한 컴플라이언스 (compliance method)법을 이용하여 구해질수 있다. 전단균열에 의한 강판박리(peeling-off)는 수직 및 수평 균열개구변위(crack opening)의 비가 보강재와 콘크리트 부착력의 임계치보다 클 때 발생된다. 또한 하중이 증가함에 따라 강판단부접착계면에서는 응력의 집중현상이 발생하며, 특히 부착계면내의 전단응력이 크게 발생된다. 높은 계면전단응력 및 수직응력으로 인해 강판단부(anchorage zone)에서

debonding 이 발생되며, 이때 debonding 되는 강판이 콘크리트피복두께(보강재와 주철근사이의 콘크리트층)를 끌고 떨어지는 파괴양상(rip off)을 보인다. 이에 대해서 Roberts, Deric 등 많은 연구자들이 이론적인 식을 제안하였다. 현재까지 debonding에 대한 이론적인 연구와 실험적인 검증이 이루어지고 있으나, 강판 debonding은 보강길이, 보강단면, 접착제두께, 콘크리트단면과 철근비 및 하중가력방법 등 여러 가지 요인에 의해 발생하므로 강판보강된 보의 역학적거동특성은 아직까지 명확하게 밝혀지지 않아 이에대한 연구가 요망된다.

또한 장기간 사용환경에 노출된 강판은 부식이 발생되어 다시 시공해야 하는 단점이 있으므로 최근에는 강판대신 내부식성, 내화학성 및 내피로성이 우수한 탄소섬유플라스틱(Carbon Fiber Reinforced Plastic : CFRP) 또는 탄소섬유 sheet를 적용하기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있으나, 완전탄성체로서 취성을 가지고 있는 탄소섬유보강재는 강판과는 달리 보다 복잡한 거동을 보이고 있으므로 이에 대한 연구가 요망된다.

따라서 본 논문의 목적은 단조증가하중을 받는 강판 및 탄소섬유 쉬트로 보강된 철근콘크리트 단순보의 역학적 거동특성을 규명하기 위한 것이다. 본 연구의 목적을 달성하기 위하여 단부응력해석이 고려된 비선형해석프로그램을 개발하였으며, 개발된 프로그램은 실험결과와 비교함으로써 검증하였다.

## 2. 응력-변형도 선도를 이용한 해석방법

### 2.1 적용된 재료모델

#### 2.1.1 콘크리트

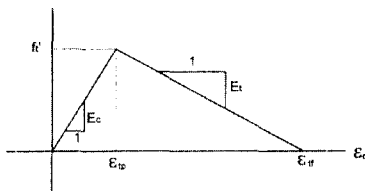
본 연구에서 적용된 콘크리트의 응력-변형율선도는 Fig. 1((a), (b))와 같다. 콘크리트의 인장응력-변형율관계는 일반적으로 균열발생전까지는 선형증가하나 균열이 발생한후에는 지수형태의 응력-변형율관계를 보인다. 본 연구에서는 Fig. 1(a)와 같이 Scanlon 및 Scordelis 등이 제안한 bilinear형태의 응력-변형율선도를 사용하였다. 인장변형율에 따른 응력의 변화는 3구간으로 다음과 같다<sup>7)</sup>.

$$\text{for } \epsilon_c \leq \epsilon_{c0} \quad f_c = E_c \epsilon_c$$

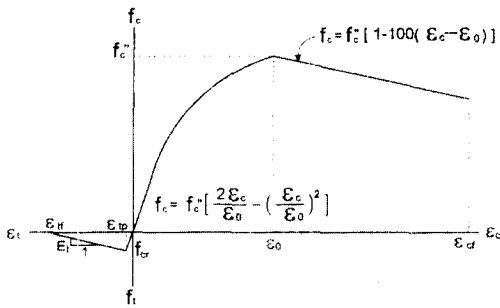
$$\begin{aligned} \text{for } \epsilon_r < \epsilon_s < \epsilon_{tu} \quad f_r &= f_r - (\epsilon_r - \epsilon_{tr})(-E_t) \quad (1) \\ \text{for } \epsilon_r > \epsilon_{tu} \quad f_r &= 0 \end{aligned}$$

여기서,  $E_t$ 는 tangent strain-softening modulus( $= \frac{-70 E_c}{57 + f_r}$ 이며, 단위는 psi이다.),  $f_r$ ,  $f_t$ 는 균열직각방향의 콘크리트 인장응력과 파괴계수,  $\epsilon_r$ ,  $\epsilon_{tr}$ 는 각각 콘크리트 일축변형률, 최대인장응력 및 인장응력이 0일 때의 변형률이다.

콘크리트 압축응력-변형률관계는 Fig. 1(b)과 같이 Kent 그리고 Park가 제안한 모델로서<sup>16)</sup>, 최대압축강도이후의 곡선은 실험시 제작된 10×20 cm 공시체에 대한 압축강도시험결과로부터 회귀분석을 통하여 결정되었다.



(a) Tension stiffening model



(b) Stress-strain relation

Fig. 1 Assumed uniaxial stress-strain relations for concrete

### 2.1.2 철근 및 보강재

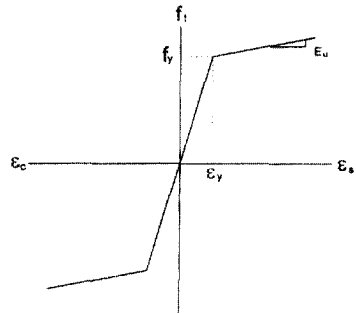
콘크리트 속의 철근의 평균응력과 평균변형률의 관계에서는 변형도의 증가에 따라서 항복응력이후에 응력이 증가하는 변형도 경화 영역이 바로 나타난다. 따라서 철근 및 강판의 응력-변형도관계는 변형도 경

화현상을 고려한 Shin의 철근모델을 사용하였다. 철근 및 강판의 평균응력과 평균변형률의 관계는 Fig. 2(a)와 같으며, 항복후의 평균응력은 다음식과 같다.

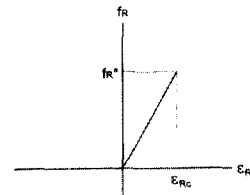
$$f_r = f_y + E_{sh}(\epsilon_r - \epsilon_y) \quad (2)$$

여기서,  $E_{sh}$ 는 콘크리트속에 있는 철근 및 강판의 변형도 경화율,  $f_y$ ,  $f_r$ 는 평균응력 및 평균항복응력, 그리고  $\epsilon_y$ ,  $\epsilon_r$ 는 평균변형률 및 평균항복변형률이다.

또한 탄소섬유 슈트보강재의 이상적인 응력-변형률관계는 Fig. 2(b)와 같이 완전탄성체로서 보강재 파괴시까지 선형증가하는 성질을 가지고 있다<sup>27)</sup>.



(a) Reinforcing bar and steel plate



(b) Carbon Fiber sheet

Fig. 2 Assumed stress-strain relations for reinforcing bar, steel plate, and CF sheet

## 2.2 단부응력해석이 고려된 균열단면 해석프로그램

### 2.2.1 균열단면해석

철근콘크리트보의 단면거동을 해석하기 위하여 일반적인 Bernoulli-Navier의 가정이 사용되었다. 즉 보의 단면은 휨변형 후에도 평면을 유지하며, 전단변

형은 무시한다. 그리고 균열사이의 국부적인 부착슬립은 무시한다. Fig. 3과 같은 복철근 직사각형단면에 대한 해석절차를 요약하면 다음과 같다.

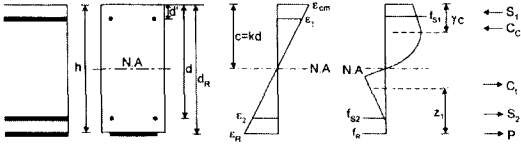


Fig. 3 Stree and strain distributions in the cross section of beams

철근 및 보강재에 작용하는 힘은  $S_j = f_{sj}A_{sj}$  ( $j=1,2$ ) 및  $P = f_{R}A_{R}$ 이며, 철근 및 보강재의 변형율은 변형율선도로부터 다음과 같다.

$$\epsilon_{sj} = \epsilon_{cm} \frac{c - d_j}{c} \quad (j = 1, 2)$$

$$\epsilon_R = \epsilon_{cm} \frac{c - d_R}{c} \quad (3)$$

여기서,  $\epsilon_{cm}$ 은 콘크리트압축단에서의 변형율,  $d_R$ 은 압축단에서 보강재 도심까지의 거리이다. 따라서 콘크리트의 압축력은 다음과 같다.

$$C_c = \alpha f_c bc \quad (4)$$

$$a = \frac{\int_0^{\epsilon_{cm}} f_c d\epsilon_c}{f_c \epsilon_{cm}} \quad (5)$$

여기서,  $c$ 는 중립축,  $a$ 는 등가사각형단면으로 환산된 평균압축응력을 위한 계수이다. 또한 이 압축력은 콘크리트압축연단에서  $\gamma c$ 만큼 떨어져 있다. 도심 계수(centroid factor)인  $\gamma$ 은 주어진 응력-변형도선도로부터 다음과 같이 계산된다.

$$r = 1 - \frac{\int_0^{\epsilon_{cm}} \epsilon_c f_c d\epsilon_c}{\epsilon_{cm} \int_0^{\epsilon_{cm}} f_c d\epsilon_c} \quad (6)$$

또한 유사한 방법으로 변형율 연화로 인한 콘크리트 인장력과 인장면에서부터의 거리는 다음과 같다<sup>[7]</sup>.

$$C_t = k_3 f_t b(h - c) \quad z_1 = k_4(h - c) \quad (7)$$

$$k_3 = \frac{\int_0^{\epsilon_{cm}} f_c d\epsilon_c}{f_t \epsilon_{tm}} \quad k_4 = 1 - \frac{\int_0^{\epsilon_{cm}} \epsilon_c f_c d\epsilon_c}{\epsilon_{tm} \int_0^{\epsilon_{cm}} f_c d\epsilon_c} \quad (8)$$

$$\text{여기서, } \epsilon_{tm} = \epsilon_{cm} \frac{(h - c)}{c}$$

따라서, 단면내의 힘 및 모멘트평형으로부터 단면력 및 모멘트는 다음 식과 같다.

$$N = \alpha f_c bc + \sum_{j=1}^2 f_{sj} A_{sj} + k_3 f_t b(h - c) = 0 \quad (9)$$

$$M = \alpha f_c bc \left( \frac{h}{2} - \gamma c \right) + \sum_{j=1}^2 f_{sj} A_{sj} \left( \frac{h}{2} - d_j \right) + k_3 f_t b(h - c) \left[ \frac{h}{2} - k_4(h - c) \right] \quad (10)$$

중립축위치  $c$ 는 rotating method를 이용하여 식 (9)를 만족할 때 구해진다. 단순보 중앙에 집중하중을 받을 경우  $L/2$ 에 대한 지간중앙처짐은 simpson's rule의 4항까지 계산된 수치해로서 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

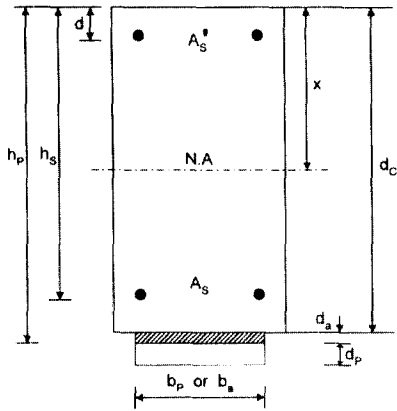
$$\delta = 2 \int_0^{L/2} \frac{x}{2} k(x) dx \approx \frac{L^2}{48} \left[ k\left(\frac{L}{8}\right) + k\left(\frac{L}{4}\right) + 3k\left(\frac{3L}{8}\right) + k\left(\frac{L}{2}\right) \right] \quad (11)$$

$$\text{여기서, } k = \frac{\epsilon_{cm}}{c}$$

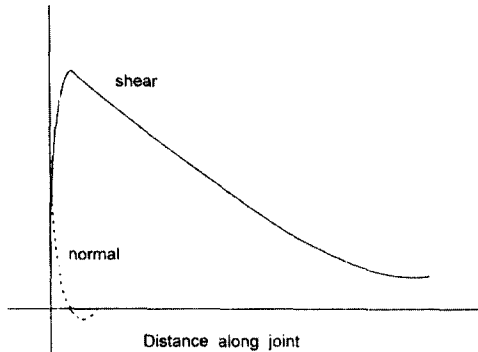
보강된 보의 단면해석을 위하여 변형율적합방법(strain compatibility method)이 사용되었으며, 모멘트-곡률관계, 하중-중앙점처짐관계 그리고 응력-변형율관계 등이 구해진다. 또한 단부해석시 단부에서 debonding이 발생할 경우 보강재가 하중을 전혀 부담하지 않는 것으로 가정하였다.

### 2.2.2 보강재 단부응력해석

본 논문에서는 강판 및 탄소섬유 쉬트로 보강된 부재의 보강재 단부파괴하중계산은 부재가 탄성거동한다는 가정으로 해석한 Roberts의 식을 수정하여 적용하였다. 해석은 2단계로 진행되었으며, 중첩의 원리를 적용함으로써 해를 구하였다<sup>[8]</sup>. Fig. 4는 보강보의 단면특성과 보강재단부접착면에서의 응력분포를 나타낸 것이다. 그림에서 단부근처 접착계면에서 최대전단응력이 발생하게 된다.



(a) Cross-section dimension



(b) Theoretical stresses in adhesive joint

Fig. 4 Cross-section dimensions and theoretical stresses in adhesive joints

보강재단부에서  $(d_c + d_p)/2$ 만큼 떨어진 위치에서 발생되는 최대전단응력( $\tau$ )과 수직응력( $\sigma$ )은 다음과 같다.

$$\tau = \left[ \frac{P}{2} + \left( \frac{k_s}{E_p b_p d_p} \right)^{1/2} \left( \frac{P}{2} \right) \left( \frac{d_p + d_c}{2} \right) \right] \quad (12)$$

$$\sigma = \tau d_p \left[ \frac{k_n}{4E_p I_p} \right]^{1/4} \quad (13)$$

식 (12)는 단면2차모멘트값에 따라 큰 영향을 받으며 따라서 단부과외하중에 상당한 영향을 미친다. Roberts는 식 (12)에서 본 연구에서 사용한  $I_n$  대신

I를 적용하여 실험결과들과의 차이를 보였다.

본 논문에서는 식 (12) 및 (13)으로부터 계산된 식 (14)의 최대주응력( $\sigma_{max}$ )이 모체콘크리트의 직접인장강도( $f_t$ ) 또는 콘크리트과외계수( $f_r$ )에 도달될 때 보강재가 debonding 되는 것으로 가정하여 보강재단부과외시 하중을 산출하였다.

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma}{2} + \sqrt{\frac{\sigma^2}{2} + \tau^2} \geq (f_t \text{ or } f_r) \quad (14)$$

### 2.2.3 비선형해석을 위한 알고리즘

본 연구에서 제안된 비선형해석기법을 적용하여 해를 구하기 위한 알고리즘은 다음과 같다.

- 1) 수정된 Robert식으로부터 박리하중계산( $P_{sep}$ )
- 2) 초기 콘크리트압축단의 변형율( $\epsilon_{cm}$ )가정
- 3) 도심(c)를 가정.
- 4) 콘크리트 인장변형율, 철근 및 보강재의 변형율 계산
- 5) 평균압축응력을 위한 계수( $\alpha, k_t$ ), 도심계수( $\gamma, k_s$ ) 계산
- 6) 콘크리트 인장 및 압축응력, 철근 및 보강재의 응력계산
- 7) 식 (9)를 만족시키는 도심(c) 출력(rootating method 적용)
- 8) 모멘트, 곡률, 하중 및 변위 출력
- 9) 만일 계산된 하중(P)이 박리하중( $P_{sep}$ )보다 크면 보강재의 변형율 및 응력을 무시하고 콘크리트압축단의 변형율( $\epsilon_{cm}$ )이 0.0035가 될 때까지 2)단계에서 9)단계를 반복한다.

## 3. 해석결과 및 고찰

### 3.1 보강된 철근콘크리트보

수치해석에 사용된 철근콘크리트보의 제원 및 가력방법은 Fig.5와 같다. 보강재료는 SS41 강판과 탄소섬유 슈트이며, 보강두께 및 보강길이 등을 실험변수로 선정하였으며, 실험변수에 따라 분류된 시험체를 요약하면 Table 1과 같다.

보강두께는 강판인 경우 2.3mm, 3.3mm 및 4.0mm 이며, 탄소섬유 슈트인 경우는 1 layer 및 2layers로서 최대보강재단면(4.0mm×130mm)과 인장철근단면(2D13)의 합이 콘크리트단면(15×22)

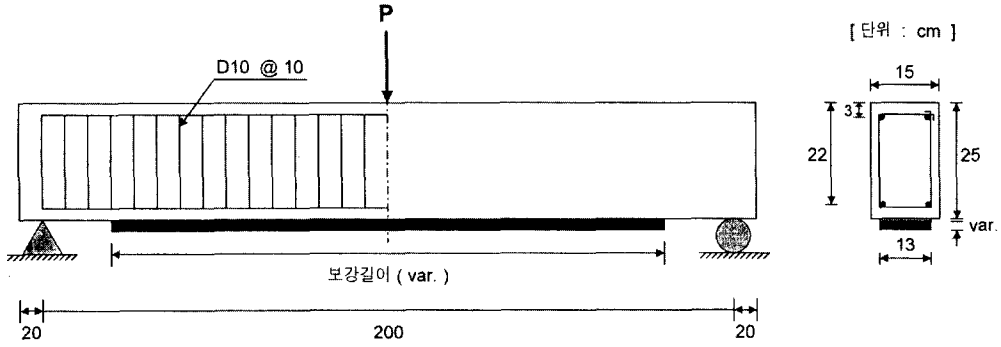


Fig. 5 Dimensions of the specimen and loading system

Table 1 The specimens by test parameters

실험변수	보 강 판		시험채명
	길이 (m)	두께 (mm)	
-	-	-	CONT
강판길이	0.8	2.3	S2·0.8
	1.5	2.3	S2·1.5
	1.9	2.3	S2·1.9
상판두께	1.5	3.3	S3·1.5
	1.5	4.0	S4·1.5
탄소섬유	1.5	0.11	FIBER·1pls
	1.5	0.22	FIBER·2pls

Table 2 Properties of reinforcing bar, steel plate and CF sheet (kg/cm<sup>2</sup>)

	종 류	항복강도	인장강도	탄성계수	비 고
철 근	D13	4650	6700	2.04×10 <sup>4</sup>	
강 판	SS41	2380	3400	1.8×10 <sup>4</sup>	
탄소섬유 sheet	FTS-C1-20	-	35500	2.35×10 <sup>4</sup>	ε = 1.5%

Table 3 Properties of Epoxy Adhesive(kg/cm<sup>2</sup>)

제품명	인장강도	압축강도	취 강 도	인장전단강도	탄성계수
EPX-3W	200 이상	700 이상	400 이상	150 이상	1000 이상

이 허용하는  $\rho_{max}$  이하로 계획되었다. 또한 보강효과에 영향을 주는 가장 큰 인자인 보강길이는 L, L/3 및 2L/3(L은 순지간 : 200cm)로 일정하게 하였다.

콘크리트의 평균압축강도는 211kg/cm<sup>2</sup>이며 철근, 강판 및 탄소섬유 슈트의 물성은 Table 2와 같으며, 보강재를 접착시키기 위하여 사용된 에폭시(EPX-3W)는 동계형으로서 그 물리적특성은 Table 3과 같다.

### 3.2 실험결과 비교 · 고찰

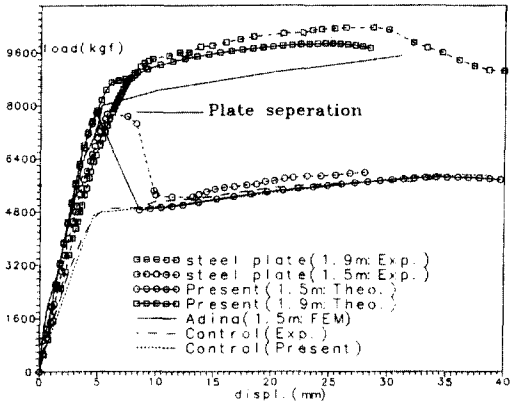
보강시험체의 파괴양상은 크게 2가지, 즉 휨파괴와 보강재단부 bonding failure 후 부재의 파괴로 나타났다. 강판보강의 경우 보강길이 L이하에서는 보강재단부파괴가 발생되었으며, 특히 L/3 보강인 경우는 기본시험체의 거동을 보여 보강효과가 전혀 없는 것으로 나타났다. 반면, 탄소섬유 슈트 보강인 경우는 보강두께 및 보강길이에 관계없이 철근이 항복되고 보강재가 파단된 후 부재가 파괴되는 이상적인 거동을 보여 강판보다 보강길이의 영향이 상대적

으로 적은 것으로 나타났다.

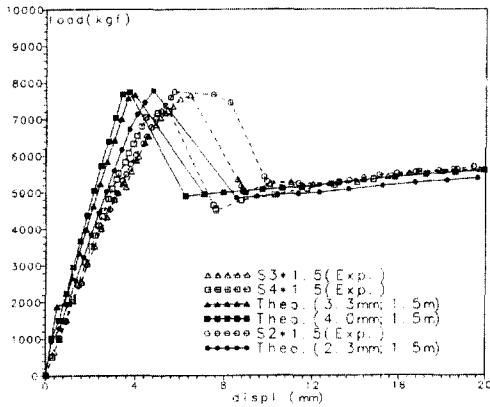
본 연구에서 개발된 프로그램의 적절성을 검증하기 위하여 실험결과와 비선형해석프로그램인 ADINA의 해석결과를 비교하였다. ADINA에 의한 보강시험체해석시 콘크리트는 2-D solid (6-node), 철근 및 보강재(강판, 탄소섬유 슈트)는 3-node truss요소로 모델링하였다. 이에 대한 결과를 요약하면 Table. 4와 같다. 보강시험체의 실험치에 대한 항복하중비 및 최대하중비는 개발된 프로그램이 잘

Table 4 Static strength of the specimen (ton)

실험 변수	시험채명	항복하중 (해석치/실험치)		최대하중 (해석치/실험치)			
		실험치	개발된 프로그램	실험치	개발된 프로그램		
무보강	CONT	4.8	4.7(0.98)	4.9(1.02)	5.4	5.4(1.0)	5.4(1.0)
	S2·0.8	-	-	-	5.1	5.4(1.06)	9.0(1.76)
	S2·1.5	-	-	-	7.7	7.8(1.02)	9.5(1.23)
강판 길이	S2·1.9	9.2	8.8(0.96)	8.0(0.87)	10.3	10.1(0.98)	9.5(0.92)
	S3·1.5	-	-	-	7.6	7.6(1.0)	-
	S4·1.5	-	-	-	7.3	7.7(1.05)	-
탄소 섬유	FIBER·1PLS	4.6	4.7(1.02)	5.4(1.17)	7.1	7.0(0.99)	7.5(1.06)
	FIBER·2PLS	4.9	5.0(1.02)	5.5(1.12)	8.6	8.9(1.03)	9.0(1.05)



(a) Length



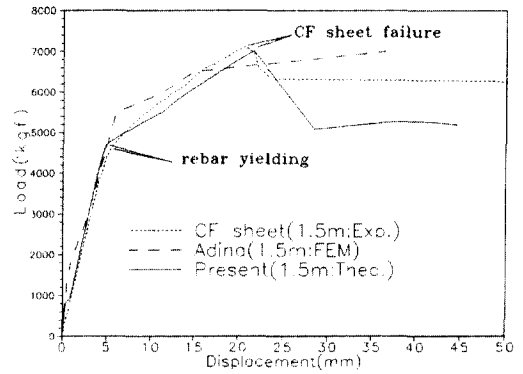
(b) Thickness

Fig. 6 Load and midspan deflection of the specimens strengthened with steel plate

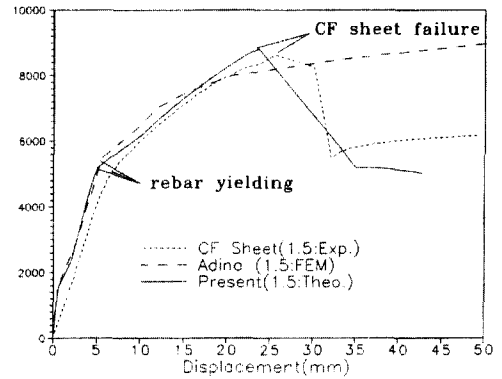
예측하고 있는 것으로 나타났다. 특히 부적절한 보강 길이로 인한 단부파괴이후의 거동에 대해 개발된 프로그램은 실험치와 거의 유사한 것으로 나타났다.

또한 강판의 보강길이 및 보강두께에 대한 하중-중앙점처짐은 Fig. 6(a) 및 Fig. 6(b)이며, 탄소섬유 슈트 1 및 2 layers 보강시험체의 하중-중앙점처짐은 Fig. 7(a) 및 Fig. 7(b) 과 같다.

강판의 경우, 보강길이에 따른 Fig. 6(a)의 하중-처짐으로부터, 개발된 프로그램은 실험결과와 잘 부합하는 것으로 나타났으며, 특히 1.5m보강시험체에서 철근이 항복하기 전에 강판의 debonding 으로 인한 부재의 파괴를 잘 예측하고 있는 것으로 나타났다. 또한 변수해석결과 보강재가 debonding 되지 않고 파괴시까지 완전한 휨거동을 갖기 위한 최소보



(a) 1 Layer



(b) 2 Layers

Fig. 7 Load and midspan deflection of the specimens strengthened with Cf sheet

강길이는 168cm로서 순지간의 84%이다. 보강보의 보강두께(Fig. 6(b))에 따른 거동의 차이는 크게 나타나지는 않았으며, 해석치의 강성이 실험치의 강성보다 다소 크게 나타났으나, 개발된 프로그램은 하중의 증가에 따른 보강재의 debonding 및 그 이후의 거동을 잘 예측하는 것으로 나타났다.

탄소섬유 슈트로 보강된 경우, 강판보강과는 달리 보강재의 debonding이 없이 인장철근이 항복한후 탄소섬유의 파단으로 파괴되는 이상적인 거동을 보였다. 1층 보강된 경우(Fig. 7(a)) 철근이 항복할 때까지의 강성, 철근항복점 및 항복후 탄소섬유의 파단에 대해서 실험결과와 해석결과가 상당히 유사한 것으로 나타났으나, 2층 보강의 경우는 해석결과가 다소 크게 나타났(Fig. 7 (b)), 특히 탄소섬유 슈트

1.5m로 보강된 보에서는 보강재의 debonding이 전혀 발생하지 않았다. 따라서 탄소섬유 슈트보강의 경우는 강판보강보다 보강길이에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

그리고 탄소섬유 슈트보강재료의 취성이 보강보의 연성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 Fig. 8과 같이 강판의 경우는 debonding 발생되지 않은 s2\*1.9 (전지간보강된 시험체)와 탄소섬유 슈트 1층 및 2층 보강된 보에 대해서 무차원화된  $\frac{M}{f_s b d^2}$  와  $\phi_d$  ( $\phi$ 는 곡률)의 관계를 나타내었다. 일반적으로 ultimate rotation ( $\phi_d$ )는 보강단면이 증가할수록 줄어든다. 강판의 연성비(ductility ratio ;  $\mu$ )는 4.6으로 나타났다. 탄소섬유 슈트 1층 및 2층으로 보강된 보의 연성비는 4.5로서 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 항복하중에 대한 최대하중의 비는 강판보다 탄소섬유 슈트가 크게 나타나 철근의 항복후에도 상당한 내력증가를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

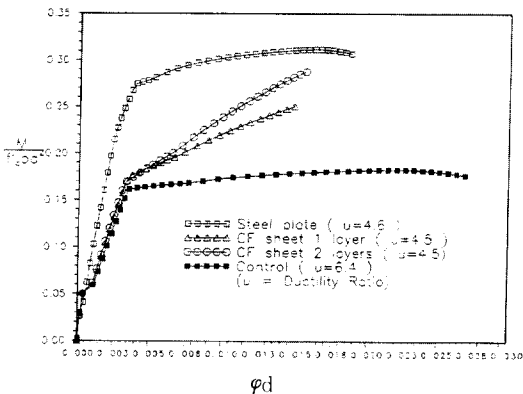


Fig. 8 M- $\phi$  curves for strengthening materials

#### 4. 결론

강판 및 탄소섬유 슈트로 보강된 보에 대한 역학적 거동특성에 대한 해석적 연구결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에서 개발된 단부해석이 고려된 비선형 해석프로그램은 강판 및 탄소섬유 슈트로 보강된 보의 실제거동을 잘 예측하는 것으로 나타났

으며, 실제구조물보강시에 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

2. 실험 및 해석결과, 보강길이가 강판보강보의 거동에 가장 큰 영향을 미치므로 강판보강시에는 단부해석을 고려한 적절한 보강길이 선정이 요구된다. 반면 탄소섬유 슈트의 경우, 보강길이의 영향은 강판보다 적은 것으로 나타났다.
3. 보강된 보는 파괴시까지 충분한 연성을 확보해야 하며, 보강보의 ductility 해석결과, 탄소섬유 슈트 1층 및 2층보강보의 연성지수는 강판의 연성지수와 거의 같은 것으로 나타나 재료의 취성에도 불구하고 철근의 항복후 적절한 안전여유를 주는 것으로 나타났다.

보강된 보의 거동은 하중형태, 즉 정적하중 또는 피로하중에 따라 크게 달라지게 된다. 특히 정적하중과 달리 탄소섬유 슈트 보강보가 피로하중을 받을 경우에는 접착계면에서 균열이 발생, 성장하여 보강재가 떨어져나가는 접착제계면균열전파에 의한 debonding이 발생하므로 이에 대한 연구가 필요하며, 철근량 및 보강재량에 따른 단면의 파괴기준에 대한 연구가 요망된다.

#### 참고문헌

1. 심중성, 배인환, 박성재, "손상된 R/C보의 보강후 피로거동에 관한 실험적 연구", 대한토목학회논문집, 제16권제1-2호, 1996. 3, pp.135-142
2. 최완철, "예복시접착 강판보강 철근콘크리트보의 역학적 거동에 관한 연구", 숭실대학교 생산기술연구소, 1994. 10
3. Jones.R. and Swamy.R.N., "Plate Separation and Anchorage of Reinforce Concrete Beams Strengthened by epoxy-bonded Steel Plates", Structural Engineer, Vol. 66, No. 5, 1988.
4. Meier.U. and Kaiser H., "Strengthening of Structures with CFRP Laminates", ASCE, January-Feb. 1991, pp.224-232
5. Roberts.T.M. and Haji-Kazemi.H., "Theoretical Study of the Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by externally bonded steel plates", Structural Engineering Group, Proc Instr Engrs, Part2, 1989, 87, pp. 251-260



6. Saadatmanesh.H. and Ehsani.M., "RC Beams Strengthened with GFRP plates - I, II", Journal of Structural Engineering, Vol. 117, No. 11, ASCE, pp. 3417-3455
7. Scordelis., Alexander C.,and Lin,C.S., "Nonlinear Analysis of RC Shells of General Form." Proceedings, ASCE, V.101,ST3, Mar. 1975, pp.523-538
8. Sharif.A., et al., "Strengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Plates" ACI Int'l Journal, V.91, NO.2, March-April 1994, pp.160-168
9. Swamy.R.N., Jones.R. and Charif.A., "The Effect of External Plate Reinforcement on the Strengthening of Structurally Damaged RC Beams", Structural Engineer, Vol. 67, No. 3, 1989 pp. 45-54

### 요 약

본 논문의 목적은 단조증가하중을 받는 강판 및 탄소섬유 sheet로 보강된 철근콘크리트 단순보의 역학적 거동특성을 규명하기 위한 것이다. 본 연구의 목적을 달성하기 위하여 단부응력해석이 고려된 비선형 해석프로그램을 개발하였으며, 적용된 재료비선형모델은 콘크리트인 경우 tensile strain softening 이 고려된 응력-변형률선도, 철근과 강판에 대해서는 bilinear 모델, 그리고 탄소섬유 sheet에 대해서는 완전탄성체의 모델이 적용되었다. Debonding에 대해서는 보강재 단부의 전단응력에 의한 콘크리트박리하중을 Roberts의 해석적 방법을 수정하여 계산하였다. 또한 개발된 프로그램은 실험결과 및 ADINA에 의한 해석결과와 비교하였으며 보강재료, 보강단면 등에 따른 거동을 잘 예측하는 것으로 나타났다.

(접수일자 : 1997. 9. 3)