

적층판으로 보강된 철근콘크리트보에 대한 해석적 연구

Analytical Study of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Fiber Reinforced Plastic Laminates

채 승 훈* 강 주 원**
Chae, Seoung-hun Kang, Joo Won

ABSTRACT

This paper deals with the flexural strengthening of reinforced concrete beams by means of thin fiber reinforced plastic(FRP) laminas. This study focuses on modeling of structural of concrete bonded FRP laminate in flexural bending members. Used computational equation is derived by relation of stress and strain.

The section analysis is based on experimental observations of a linear strain distribution in the cross section until failure, and a multi-linear moment-deflection curve that is divided into four regions, each terminated by a similarly numbered point. The load-deflection relationship in each region is assumed to be linear.

The present model is validated to compare with the experiment of 4-point bending tests of R/C rectangular beams strengthened with CFRP laminates, and has well predicted the moment-displacement relationships of members.

keywords : FRP laminate, flexural strength, classical theory, failure theory

1. 서론

철근콘크리트 구조물은 설계나 시공상의 결함, 노후화, 사용환경의 변화, 부적절한 유지관리 등의 요인으로 내력이 감소되고, 내력이 감소된 구조물은 사용성이나 안전성에 심각한 문제점을 발생시킨다. 구조물의 내력을 확보하기 위한 방법으로는 강판접착공법, 프리스트레싱 공법, FRP(Fiber Reinforced Plastic)부착공법 등이 사용되고 있으나 최근에는 내부식성, 고인장강도, 경량성등의 장점을 가지는 FRP부착공법이 주로 사용하고 있다. FRP부착공법은 FRP 쉬트로 보강하는 방법과 FRP판으로 보강하는 방법으로 나눌 수 있다. 이중 FRP판으로 보강

하는 방법은 섬유방향을 1방향으로 부착하는 방법과 적층판(Laminate Plate)으로 보강하는 방법으로 구분된다.

FRP로 구조물을 보강한 경우 그 거동과 관련된 많은 실험과 이론적 연구가 진행되어왔다. 그러나 FRP 적층판으로 보강된 구조물에 대한 연구는 기존의 쉬트(sheet)류나 판(Plate)로 보강한 거동과는 차이가 있는 것으로 알려져 있기 때문에 이에 대한 해석적 고찰이 필요하다고 하겠다.

본 연구에서의 목적은 FPR 적층판의 적층각에 따른 보강 효과에 대해 해석적으로 고찰하려고 한다. 적층판은 Kirchhoff의 가정에 의한 고전평판이론에 근거하여 적층판을 모델링하였다. 단면해석에서는 Bernoulli-Navier의 가정을 사용하여 해석하였다. 단면해석의 타당성 검토를 위해서 M.A Shahawy(1995)에 의해 실험된 휨 보강 시험체중 3개 층으로 보강된 부재에 대한 단면

* 영남대학교 대학원 석사과정

** 영남대학교 건축학부 교수

해석을 수행하였다. 또 [30, 0, -30], [45, 0, -45], [60, 0, -60]의 적층판으로 보강된 보의 보강효과에 대해서 고려하였다.

2. FRP 적층판

2.1 FRP 복합재료 판의 구성요소

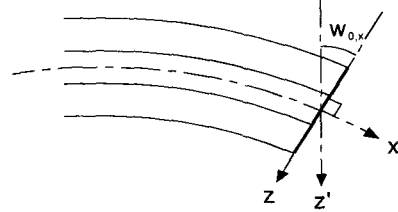
적층판은 연약한 기지체(matrix) 재료에 삽입된 상대적으로 큰 강성과 강도를 발휘하는 섬유(fiber) 보강재료로 구성된 FRP판들을 조합하여 구성된 판으로서 단일판과는 달리 판의 요구되는 성능에 따라서 섬유의 방향을 다양하게 배열할 수 있는 장점이 있다.

2.2 고전 적층평판이론 (Classical Laminated Plate Theory / CLPT)

고전 적층평판이론은 Kirchhoff의 가정에 의한 접근의 확장이라 할 수 있다. 따라서 적층평판의 두께 방향으로의 변위(displacements)와 변형도(strains) 혹은 응력(stresses)의 변화에 대하여 가정하는 것이다. 이러한 가정의 가장 단순한 형태로는 두께방향의 변위가 선형으로 변화하는 것으로 가정한 고전 적층평판이론(classical laminated plate theory) 및 1차 전단변형이론(First-order shear deformation theory 혹은 Mindlin plate theory)이 있다. 변위나 응력의 가정을 근거로 한 적층평판의 해석은 이론의 적용이 간단하고 각 항이 가지는 의미를 잘 파악할 수 있다는 장점이 있다. 변형 전 및 CLPT에 의해 변형된 적층 평판은 그림 4, 5와 같다. 가장 간단한 고전 적층평판이론에 의한 두께방향으로의 변위계는 식(1)과 같다.

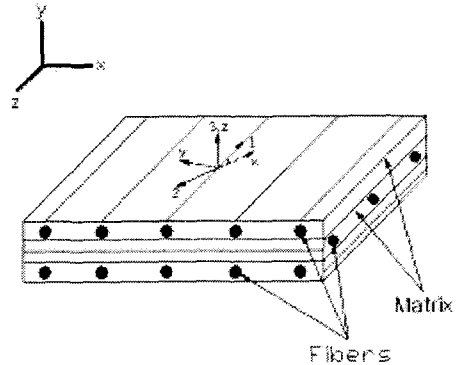
$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= u_0(x, y) - \frac{\partial w}{\partial x} z \\ v(x, y, z) &= v_0(x, y) - \frac{\partial w}{\partial y} z \\ w(x, y, z) &= w_0(x, y) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 u, v, w 는 각각 x, y, z 축의 변위이며 u_0, v_0, w_0 는 각각 중립 면에 대한 면내 및 면외 처짐이며 $\frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial w}{\partial y}$ 는 중립 면에 대한 각(slope) 변화이다. 식(1)에 의한 변위계는 중립 면에 수직인 직선은 변형 후에도 수직을 유지한다는 Kirchhoff의 가



<그림 3> CLPT에 의해 변형된 적층평판

정을 따름으로 두께방향의 전단 및 수직응력에 대한 효과는 무시된다.



<그림 4> 적층판

matrix에 삽입된 일 방향의 섬유로 구성된 각 층의 개별 판을 섬유 방향에 수직인 등방성의 재료이다.

그림()과 같은 적층판의 섬유 방향이 국부좌표계 (1,2,3) 상에 평행이고 2, 3방향에 수직이라고 하면 이 국부좌표계에서의 면내 응력-변형을 관계는 다음의 식과 같다.

$$\begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{21}}{E_{22}} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서, E_{11} 은 섬유방향의 탄성계수, E_{22} 는 섬유방향에 수직한 방향의 탄성계수, ν_{ij} 포아송의 비, 그리고 G_{12} 는 면내전단계수이다.

응력벡터를 $\mathcal{A}(\sigma) = \mathcal{A}(\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12})^T$, 변형률벡터를 $\mathcal{A}(\epsilon) = \mathcal{A}(\epsilon_1, \epsilon_2, \tau_{12})^T$ 라 하고 위의 식을 확장하면 응력은 다음과 같다.

$$\mathcal{A}(\sigma) = [Q']\mathcal{A}(\epsilon) \quad (3)$$

$$[Q] = \begin{bmatrix} \frac{E_{11}}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{12}E_{22}}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{21}E_{11}}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_{22}}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \quad (4)$$

요소의 전체좌표계(x,y,z)에 대한 응력벡터는 다음과 같다.

$$\mathcal{A}(\sigma) = [Q]\mathcal{A}(\epsilon) \quad (5)$$

$$\mathcal{A}(\sigma) = \mathcal{A}(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})^T \mathcal{A}(\epsilon) = \mathcal{A}(\epsilon_x, \epsilon_y, \tau_{xy})^T \quad (6)$$

여기서, $[Q] = [T]^T [Q'] [T]$ 이고 T는 이차텐서의 좌표변환행렬로 다음과 같다

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & \sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -\sin\theta\cos\theta \\ -2\sin\theta\cos\theta & 2\sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

판에서 응력-변형률의 관계는 힘과 모멘트를 나타낼 수 있다. 보강재의 경우 그 두께가 비교적 작으므로 면내 특성만 고려할 경우 휨거동은 무시할 수 있다. (고전 적층판이론에서 z에 대한 항을 무시)

2.3 적층판의 파손이론

섬유강회 복합재료는 등방성 물질이 아니고 항복현상도 잘 나타내지 않고 다른 금속이나 등방성 재료에 사용되는 파손이론을 적용하기 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 다음과 같은 Tsai-Wu의 이론을 적

용하였다.

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{11}\tau_{12}^2 = 1 \quad (8)$$

$$F_1 = \frac{1}{X^t} + \frac{1}{X^c}$$

$$F_2 = \frac{1}{Y^t} + \frac{1}{Y^c}, \quad F_{22} = -\frac{1}{Y^t Y^c}, \quad F_{66} = \frac{1}{S^2}$$

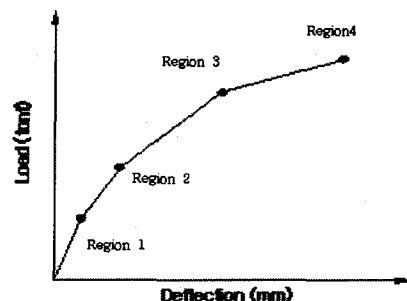
여기서 X^t, X^c 는 일방향 플라이의 섬유길이 방향의 인장강도와 압축강도이고, Y^t, Y^c 는 일방향 플라이의 섬유길이에 수직한 방향의 인장강도와 압축강도이고, S는 플라이의 전단강도이다.

3. 단면 해석방법

3.1 해석을 위한 기본가정

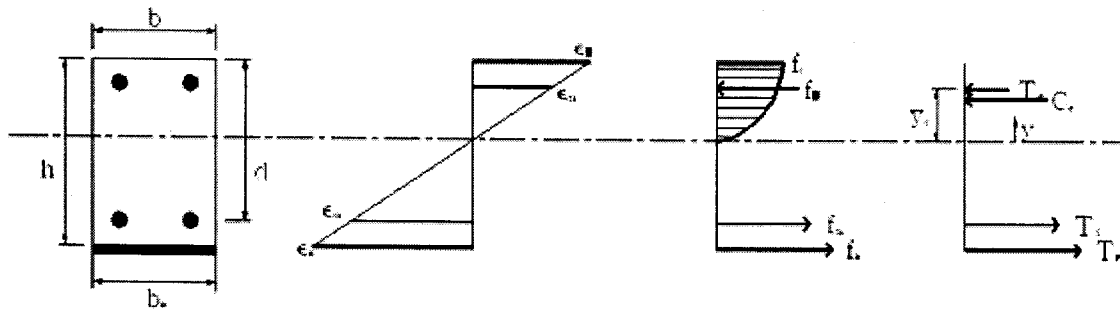
본 연구에서 제안된 모델은 다음과 같은 기본 가정을 토대로 수행하였다.

- ①보의 단면은 변형 후에도 평면을 유지한다.
 - ②보에 발생하는 전단응력은 무시한다.
 - ③철근과 콘크리트사이의 국부적 미끄러짐은 무시한다.
 - ④FRP 적층판은 변위는 보의 길이방향만 있는 것으로 한다.
 - ⑤보강재와 콘크리트는 일체거동을 한다.
- 기존의 실험자료를 분석하면 힘-변위 그래프는 4부분으로 나눌 수 있다.



<그림 5> 단면 해석을 위한 가정

첫 번째 구간은 콘크리트가 인장력을 발휘하는 부분으로 이 부분은 콘크리트 하부가 인장항복을 하



<그림 6> 단면해석의 평형방정식

여 crack이 발행할 때까지 구간이다. 두 번째 구간은 철근이 항복강도에 도달할 때까지이며 이 구간에서는 콘크리트의 인장력이 중립축에서 콘크리트 최대인장변형률까지 존재한다고 가정하였다. 세 번째 구간은 콘크리트가 항복강도에 도달할 때까지이며 이 구간에서 철근은 비탄성 거동을 한다고 가정하였다.

네 번째 구간은 적층판이 파괴될 때까지이며 적층판의 파손은 앞에서 설명한 Tsai-Wu의 방법으로 확인한다.

3.2 해석방법

각 구간에 대해서 변형률 적합법과 평형방정식을 토대로 다음과 같은 해석방법을 사용하여 단면해석을 수행하였다.

- step1. 변형일치 방법을 사용하여 각각의 변위를 구하였다.
- step2. 단면에 작용하는 힘을 계산하였다.
- step3. 힘의 평형을 사용하여 단면내의 작용하는 힘과 휨모멘트를 계산하였다.
- step4. 중립축, 하중, 곡률 및 처짐을 계산

4. 단면해석

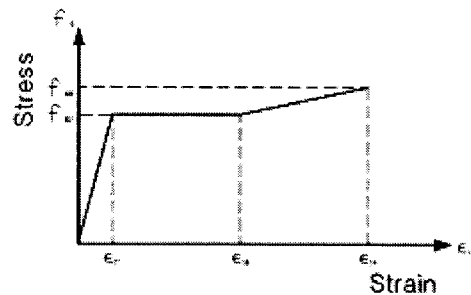
4.1 재료의 구성모델

철근의 구성모델은 변형-응력관계가 다음 그림(5)과 같은 Tri-linear로 가정하였다. 여기서 σ_{sy} 는 철

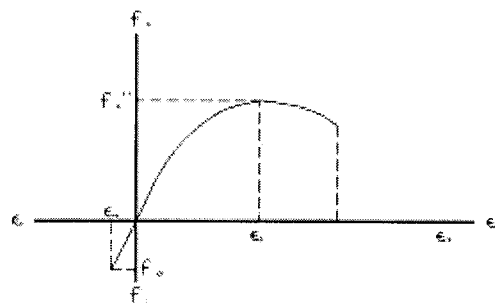
근의 항복강도이며 이때의 변형률 ϵ_{sy} 를 항복변형률이라고 한다.

σ_{su} 는 철근의 극한강도를 나타내며 이때 변형률을 ϵ_{su} 로 나타낸다.

콘크리트의 구성모델로는 Hongnestad의 압축 모델을 사용하였으며 인장모델은 인장력이 압축력에 20%라고 가정하였다.

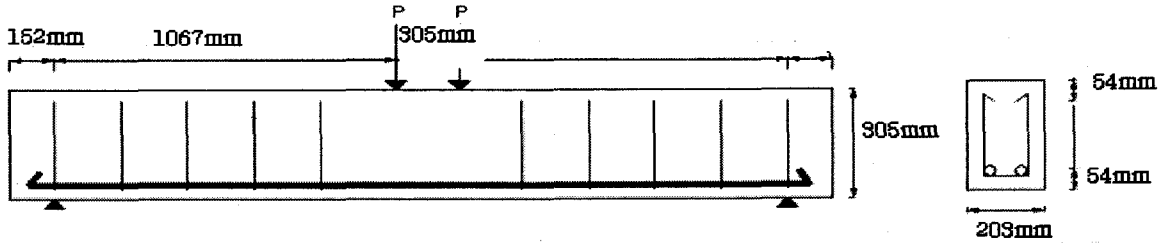


<그림 7> 철근의 모델



<그림 8> 콘크리트의 모델

그림(6)에서, f_c 는 콘크리트 압축시험에서의 압축강도이며 E_c 는 콘크리트의 탄성계수로 $E_c = 4700\sqrt{f_c} MPa$ 과 같다. 콘크리트의 압축항복 변형률 ϵ'_c 은 0.002이고 최대변형률 ϵ_{cu} 은 0.003이다. 또 f_{cr} 은 콘크리트의 인장강도를 압축강도의 20%이



<그림 9> 단면해석 시험체

며 이때의 변형률을 최대인장변형률 ϵ_{cr} 이라 한다.

4.2 단면해석에

본 연구에서는 Shahawy에 의해서 1995년에 수행된 실험결과를 가지고 적층각에 따른 효과를 설명하려고 한다.

실험에 사용된 실험체는 그림(7)와 같으며 인장철근은 D13 압축철근은 D3을 사용하였다.

실험에 사용될 콘크리트와 철근의 재료계수는 표(1)과 같다.

<표 1> 콘크리트와 철근의 재료계수

	압축강도	인장강도	탄성계수
Concrete	41.37MPa	8.274MPa	30.23GPa
Steel	468.8MPa	468.8MPa	199.99GPa

FRP의 재료 계수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 X^t &= 2758 \text{MPa} & X^c &= -2758 \text{MPa} \\
 Y^t &= 53 \text{MPa} & Y^c &= -206 \text{MPa} & S &= 93 \text{MPa} \\
 E_{11} &= 141.3 \text{GPa} & E_{22} &= 14.5 \text{GPa} & G_{12} &= 5.86 \text{GPa} \\
 \nu_{12} &= \nu_{21} & &= 0.21
 \end{aligned}$$

4.3 단면해석결과 및 비교분석

단면 해석의 타당성을 검토하기 위해서 적층각이 0°인 3층으로 구성된 적층판의 실험값을 가정한 4개의 구간으로 나누고, 각 구간에서 최대값에 대해서 모멘트와 처짐을 비교해보았다.

첫 번째 구간(크랙이 발생하는 지점)에서 모멘트는

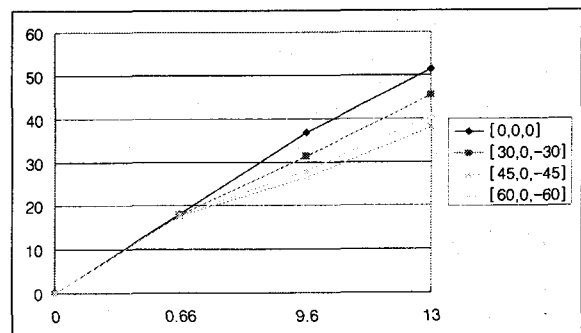
실험에서 15.08 KN-m, 단면해석에서는 18.07 KN-m으로 실험치와 비교했을 때 20% 오차가 발생하였다. 이는 콘크리트의 인장력을 선형으로 가정함으로써 발생하는 오차라 생각된다.

두 번째 구간에서 단면해석에 의한 처짐은 9mm이고 모멘트는 36.85 KN-m로 나타났다. 실험값은 처짐 9mm에서 모멘트는 40.5 KN-m으로 나타났다.

세 번째 구간에서 단면해석에 의한 처짐은 13.48mm이고 모멘트는 51.48 KN-m로 나타났으며 실험값은 50 KN-m으로 나타났다.

네 번째 구간에서는 콘크리트의 압괴와 FRP의 분열과 탈락 등의 작용으로 인해서 실험값은 최대 모멘트가 60 KN-m가 발생한 반면 단면해석에서는 90.23 KN-m으로 나타났다.

위의 결과들로 볼 때 1~3 구간에서는 10~20%내의 오차가 발생한 것을 알 수 있었으며 4구간에서는 단면해석 값에 도달하기 전에 파괴됨을 알 수 있었다. 그러므로, 1~3구간에 대해서 신뢰성이 있다고 판단하고 적층각이 있는 보강재에 대한 비교값으로 설정하였다.



<그림 11> 적층각에 따른 보강효과

첫 번째 구간에서는 적층각이 0°일 때 모멘트는 18.07 KN-m이고 30°일 때는 17.86 KN-m, 45°일

때는 17.72 KN-m, 60°일 때는 17.66 KN-m으로 차이가 없다.

두 번째 구간에서는 적층각이 0°일 때의 모멘트는 36.85 KN-m이고, 30°일 때 31.54 KN-m, 45° 28.07 KN-m, 60°일 때는 26.43 KN-m으로 적층각이 크기가 커짐에 따라서 모멘트가 감소하는 것을 알 수 있다.

세 번째 구간에서의 모멘트는 51.48 KN-m, 45.48 KN-m, 40.65 KN-m, 38 KN-m으로 두 번째 구간과 같이 적층각이 커짐에 따라서 모멘트가 감소하는 것으로 나타났다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 FRP 적층판으로 보강된 보를 변형을 적합법과 평형방정식을 사용하여 단면해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다

- 1) 본 연구에서는 FRP 적층판으로 휨 보강한 RC 보의 단면해석 모델을 제시하였다.
- 2) 단면해석결과 1,2,3구간에서 비교적 신뢰성이 있는 값을 얻을 수 있었다.
- 2) 단면해석결과를 비교 분석한 결과 적층각에 따른 보강효과는 적층각이 클수록 보강 효과가 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 적층각에 따라서 강성이 큰 FRP fiber가 직접적으로 받는 힘이 줄어들기 때문에 이런 결과가 발생한 것으로 사료된다.

본 연구의 결과 단면에서 최대모멘트 이전에 발생 가능한 파괴에 대한 사항이 더 고려되어야 될 것 같다. 그리고 좀 더 정밀한 해석을 위해서 단면 해석뿐만 아니라 수치해석과 FRP 적층판의 휨강성을 고려한 유한요소 해석을 수행하여야 할 것 같다.

공법 개발”, 건설교통부, pp.79~91, 1998

2. 이대길, 정광섭, 최진호, “복합재료 역학 및 제조 기술”, 시그마프레스, pp.107~127, 1998
3. 조창근, 김영상, 배수호, 김환석, “다축응력상태의 구성관계에 기초한 FRP 콘크리트 부재의 충분할 단면 해석모델”, KCI Journal. Vol. 14, No. 6, 892~899, 2002
4. 신동주, “탄소섬유보강판으로 보강한 철근콘크리트 보의 하중-처짐 응답예측”, 충남대학교 대학원 석사학위논문, pp. 6~25, 2001
5. Ritchie, P.A, Tomas, D.A., Lu L-W. and Connly, G.M. "External reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastics", ACI Struct J, Vol. 88, No. 4 pp. 490~500, 1991
6. Shahawy, M.A, Arockiasamy, M., Beitelman, T. and Sowrirajan, R. "Reinforced concrete rectangular beams strengthened with CFRP laminates", Composite Part B: Eng Vol. 27 No. 3-4 pp. 225~233, 1996
7. Taheri, F., Shahin, K. and Widiarsa, I., "On the parameters influencing the performance of reinforced concrete beams strengthened with FRP plates", Composite structure, Vol. 58, pp.217~226, 2002

참고 문헌

1. 한양대학교, 쌍용엔지니어링(주), “프리믹스형 보수재료를 적용한 R/C 구조물의 보수 및 섬유보강