CFS 보강 원형 콘크리트 기둥의 P-M 상관도

P-M Interaction Curve of the Circular Concrete Column Strengthened with CFS

이 상 호* 허 원 석** 김 준 휘***

Lee, Sang-Ho Heo, Won-Suk Kim, Jun-Hwi

ABSTRACT

In this study, the analytic model of concrete column strengthened with CFS(carbon fiber sheets) for obtaining P-M interaction is presented. Firstly, an algorithm to evaluate accurate behavior of CFS is presented using laminate theory. Stress-strain model of CFS is presented based on the results of this algorithm. Secondly, an algorithm to evaluate stress-strain relationship of concrete column confined with CFS is presented. In order to evaluate the reliability of these algorithms, the results of analysis are compared with experimental data. Lastly, section analysis is performed by using constitutive equations of materials. As a result, P-M interaction curve of the column strengthened is obtained and the strengthening effects of CFS are analyzed.

1. 서론

기존 콘크리트 구조물의 보강방법 중 경제적이고 우수한 것의 하나로서 고분자 복합재료, 특히 CFS(Carbon Fiber Sheet)에 의한 보강방법이 있다. 최근 CFS로 보강된 구조물의 거동에 관한 실험연구가 많이 이루어져 왔으나, CFS로 콘크리트 기둥을 보강하는 경우의 보강효과를 해석하는 연구는 내진보강연구를 제외하고는 거의 이루어지고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 CFS로 보강된 콘크리트 기둥의 보강효과를 해석하는 하나의 방법으로서 보강된 기둥의 P-M 상관도를 도출하였다. 연구대상이 된 기둥은 원형 단면을 가진 단주이며, 띠철근의 영향과 Pre-loading은 고려치 않았다. 먼저 적층이론을 적용하여 적층판의 거동을 파악하고 구속이론에 도입시켜 각 구성재료들의 구성방정식을 정립하였다. 이를 바탕으로 단면해석을 실시하여 P-M 상관도를 도출하는 해석모형을 구성하였다. 최종단계로서 철근이 들어 있는 원형 콘크리트 기둥의 P-M 상관도를 도출하여 압축보강효과를 해석하였다.

* 정회원, 연세대학교 토목공학과 조교수

** 연세대학교 토목공학과 대학원 석사과정

*** 두산엔지니어링 도로설계팀 사원

2. CFS 적층판의 거동해석

2.1 적층판의 강도-변형률 관계

하중을 받는 복합재료 적층판의 변위나 변형률은 단일층 복합재료와 달리 각 층 사이의 상호작용으로 인하여 변위나 변형률이 복잡한 형태로 나타나게 된다. 각 층을 평면응력상태로 가정하고 2 차원으로 모형화한 후 강도와 변형률과의 관계식을 나타내면 식(1)과 같다.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x{}^0 \\ \varepsilon_y{}^0 \\ \gamma_{xy}{}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_x \\ x_y \\ x_{xy} \end{Bmatrix} \tag{1}$$

여기서, N_{ij}는 적층판 단위길이당 가해지는 힘, A_{ij}는 인장강성도, B_{ij}는 연계강성도이며 ε^0는 중간층의 변형률, x는 곡률이다.

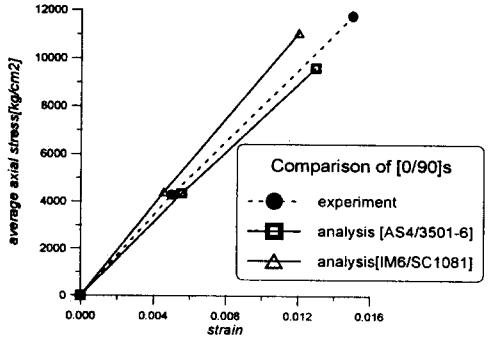
2.2 Tsai-Hill 파손기준을 이용한 적층판의 응력-변형률 관계 해석

파손과 파손과정에 관해 제안된 많은 예측이론들이 있으나 본 연구에서는 복합재료의 파손기준으로서 가장 널리 쓰이는 Tsai-Hill failure theory 를 기초로 복합재료적층판의 최초층 파괴거동을 파악하였다. Tsai-Hill 의 파괴기준은 식(2)로 나타낼 수 있다.

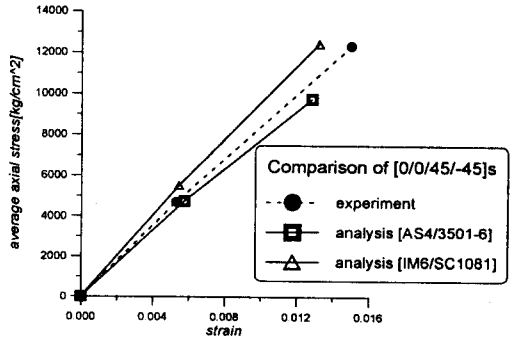
$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{22}}{Y}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{11}}{X}\right)\left(\frac{\sigma_{22}}{Y}\right) + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 = 1 \tag{2}$$

여기서 X 는 적층판의 축방향 인장강도, Y 는 횡방향 인장강도, S 는 전단강도이다.

최초층의 파괴거동을 해석할 수 있게 되면 적층판의 파손누적을 고려하여 극한파괴까지의 거동을 해석할 수 있다. 여기서 감소된 축방향탄성계수를 구하는 것이 중요하다.



(a) $[0/90]_S$ 적층판의 응력-변형률 관계



(b) $[0_2/45/-45]_S$ 적층판의 응력-변형률 관계

그림 1 $[0/90]_S$와 $[0_2/45/-45]_S$적층판에 대한 실험치와 해석치의 비교

실험결과들의 분석으로부터 적층판의 탄성계수는 최초층 파괴이후 초기값의 90%로 감소하며 손상된 층에서의 탄성계수는 초기값의 25%정도로 감소함을 알 수 있다.

본 연구에서는 이러한 파손누적과정에서 발생하는 미시적 강도저하현상을 반영하기 위하여 손상된 층의 강도감소계수를 0.25 로 가정하였다. 연구된 해석방법의 검증을 위하여 해석치와 실험치의 비교연구를 수행하였다. 본 연구에서 검증대상이 된 적층판은 Daniel 등이 수행한 실험[1]에서 이용된 것으로서 탄소/에폭시 복합재료로서 AS4/3501-6 과 IM6/SC1081 의 두가지 재료이며, 적층방식은 $[0/90]_S$ 와 $[0_2/45/-45]_S$ 이다. 그림 1 에서 실험치와 해석치의 비교를 하였다.

3. CFS 로 보강된 콘크리트의 기둥의 횡구속압 이론

3.1 해석모형

보강된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 파악하기 위해서 Mander[2]와 Saadatmanesh 등[3]에 의하여 제안된 해석모형을 기반으로 새로운 보강 해석 알고리즘에 관한 연구를 수행하였다. 낮은 응력빈도나 단순하중의 경우 CFS 로 횡구속된 콘크리트의 응력(f_c)-변형률(ε_c)모형은 다음 식과 같이 정의된다.

$$f_c = \frac{f_{cc}' xr}{r-1+x^r} \tag{3}$$

$$x = \varepsilon_c/\varepsilon_{cc}\ , \quad \varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}\left[1+5\left[\frac{f_{cc}'}{f_{co}'}-1\right]\right], \quad r = \frac{E_c}{E_c - E_{\sec}}\ , \quad E_{se} = f_{cc}'/\varepsilon_{cc} \tag{4}$$

여기서, f_{cc}'는 구속된 콘크리트의 최대압축강도, f_{co}'는 무보강 콘크리트의 최대압축강도, ε_{cc}는 구속된 콘크리트의 최대응력에서의 변형률, ε_{co}는 구속되지 않은 콘크리트의 최대응력에서의 변형률(0.002), E_c는 무보강콘크리트의 탄성계수, $E_{\sec}$는 구속된 콘크리트의 법선탄성계수(secant modulus)이다.

Mander 에 의해서 제안된 이론[2]을 사용하게 되면 실제의 종국변형률에 비해 경우에 따라서 최대 50%까지 작게 평가되었기 때문에 구속된 콘크리트 기둥의 파괴시 압축변형률인 ε_{cu}를 계산하기 위해서 본 연구에서는 Hosotani 등이 제안한 실험식[4]을 사용하였다. 제안된 종국변형률의 실험식은 다음과 같다.

$$\varepsilon_{cu} = 0.00383 + 0.1014\left(\frac{\rho_{CF} f_{CF}}{f_{co}'}\right)^{3/4}\left(\frac{f_{CF}}{E_{CF}}\right)^{1/2} \tag{5}$$

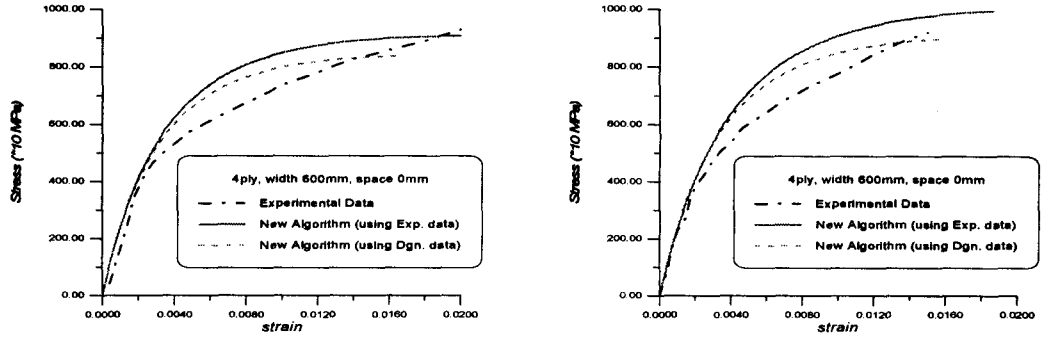
여기서, ρ_{CF}는 CFS 의 체적비, f_{CF}는 CFS 의 인장강도, E_{CF}는 CFS 의 탄성계수이다.

이것으로 기둥의 일반적인 파괴 및 CFS 파괴단계까지의 하중-변위 전체과정에 대한 걸쳐 구속된 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 완전히 결정할 수 있다.

3.2 해석모형의 검증

3.1 절에서 연구된 구속된 콘크리트 해석모형의 검증을 위하여 실험연구와 해석치의 비교연구를 수행하였다. 본 연구의 해석알고리즘은 종방향 주철근을 포함한 단주의 횡보강 구속효과를 해석하도록

연구되었으나 실제로 주철근이 포함된 경우의 보강실험자료가 없는 관계로 철근이 포함되지 않은 무근 공시체에 대한 응력-변형률 실험치를 대상으로 비교연구를 수행하였다. 이를 위하여 Hosotani 등이 수행한 실험[4]을 비교대상으로하여 그 실험시편의 제원에 맞는 계수값들을 본 연구의 해석알고리즘에 입력하였다. 이로부터 계산된 해석치와 실제 실험치의 결과를 비교하였다. 보강 CFS는 일반강도와 고탄성의 두가지를 적용하였으며, 대상공시체는 콘크리트 압축강도가 30Mpa인 지름 200mm, 높이 600mm의 원형 공시체이다. 그림 2는 보강 CFS 4겹으로 간격없이 보강한 공시체의 경우에 대하여 해석치와 실험치를 비교한 결과이다. CFS의 물성치는 실험값과 공칭값의 두가지를 모두 해석에 적용하였는데 공칭값을 사용하여 해석한 경우의 콘크리트의 응력-변형률 곡선이 실험치와 더 잘 일치함을 알 수 있었다.



a) 일반 CFS를 사용한 경우 b) 고탄성 CFS를 사용한 경우

그림 2 CFS로 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계 해석치와 실험치의 비교

연구된 알고리즘을 이용하여 각 적층각에 따라서 해석을 수행하였더니 그림 3과 같은 결과가 나왔다. 대상 공시체는 검증에 이용되었던 것과 동일하며, 보강적층판의 적층각만 바꾸면서 해석을 수행하였다. $[0]_s$으로 보강한 경우에 가장 우수한 응력-변형률 곡선을 보였으며, $[90]_s$을 제외한 나머지 적층판의 경우에는 비슷한 거동을 보였다.

4. CFS로 보강된 원형 콘크리트 기둥의 P-M 상관도

4.1 P-M 상관도 해석방법

CFS로 보강된 원형 단주의 보강효과를 해석하기 위하여 세 가지 단계가 필요하다. 첫째, 앞 절에서 제시된 적층판해석 알고리즘을 이용하여 CFS의 응력-변형률 관계를 정립하고, 둘째, 보강재가 원형 단주의 횡구속압에 미치는 영향을 해석하며, 마지막으로 이전 단계에서 결정된 재료들의 응력-변형률 곡선을 단면해석에 적용하여 P-M 상관도를 도출할 수 있다. P-M 상관도 해석에서 콘크리트의 압축응력 분포는 비선형 분포를 사용하였다.

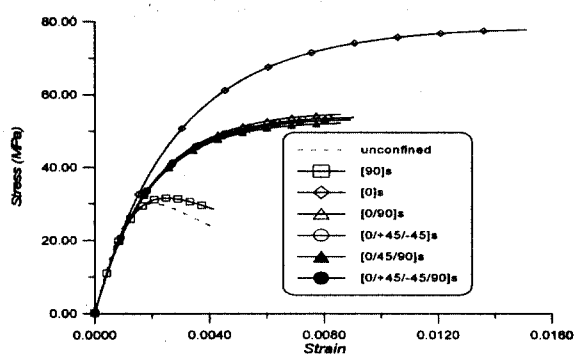


그림 3 보강 적층판의 적층각에 따른 콘크리트의 응력-변형률 관계

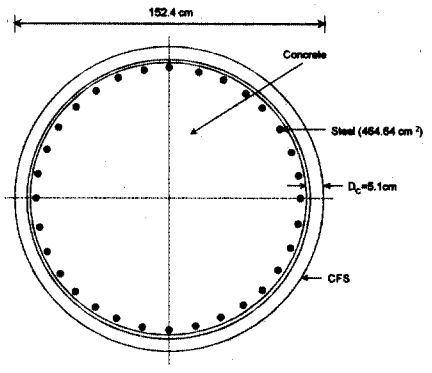


그림 4 해석에 사용된 원형 콘크리트 단면

4.2 해석결과

본 해석에 사용된 원형 콘크리트 기둥의 단면도는 그림 4와 같다. 보강효과를 뚜렷하게 나타내기 위해서 보강재의 간격은 0으로 하였다. 또한 띠철근에 의한 횡구속효과는 무시하였으며 대상기둥은 단주이다. 콘크리트의 압축강도는 210 kg/cm², 철근의 인장강도는 2,800 kg/cm², 탄성계수는 2,040,000 kg/cm², 주근의 개수는 32 개이다. 그림 5는 $[0]_S$ 적층판을 사용한 경우 및 $[90]_S$ 적층판, $[0/90]_S$ 적층판, $[0/45/90]_S$ 적층판을 사용한 경우에 대하여 보강재 두께를 각각 0.05cm, 0.15cm, 0.30cm로 바꾸어 가며 도출한 에제 단면의 P-M 상관도이다. $[0]_S$ 적층방식으로 보강한 경우는 압축보강효과가 크게 나왔으며, $[90]_S$ 적층방식으로 보강한 경우에는 다른 적층방식으로 보강한 경우에 비해 보강효과가 작았으나 압축보강효과가 낮음에 반해 휨보강효과가 크게 나타났다. $[0/90]_S$ 적층방식으로 보강한 기둥은 압축보강과 휨보강효과가 균형있게 나타났으며, $[0/45/90]_S$ 적층방식으로 보강한 경우에도 역시 휨보강과 압축보강이 비슷하게 이루어졌으나 $[0/90]_S$ 적층방식으로 보강한 경우에 비해 보강효과가 낮았다.

기둥의 P-M 상관도는 압축파괴를 기준으로 파괴면을 계산한 것이지만 CFS로 보강된 기둥을 다룬 본 예제의 경우에는 $[0]_S$ 적층방식으로 보강한 경우, 압축파괴가 일어나기 이전에 인장부에서 CFS의 파괴가 발생하므로 인장파괴가 발생하는 보강 기둥의 P-M 상관도 도출시에는 파괴기준을 달리할 필요가 있음을 알았다.

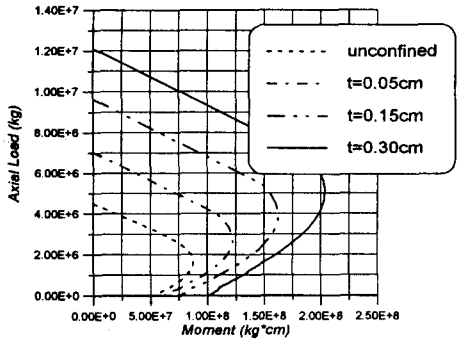
5. 결론

적층방식이 다른 CFS로 보강된 원형 콘크리트 기둥의 P-M 상관도를 도출하는 연구의 수행 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

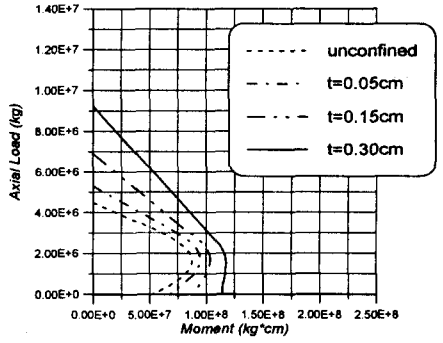
1) 적층판 해석알고리즘의 검증을 위하여 수행된 $[0/90]_S$와 $[0_2/45/-45]_S$ 적층판에 대한 실험치와 해석치의 비교연구 결과, 해석치가 실험치와 근접한 거동을 보였으며 이로 보아 해석알고리즘의 타당성이 검증되었다.
2) 해석된 적층판의 거동을 구속효과 해석이론에 적용하여 CFS 적층판으로 구속된 콘크리트의 응력-변

형률 곡선을 도출하였으며 검증을 위한 실험치와의 비교 결과 실험치와 매우 근접한 거동을 보였다.

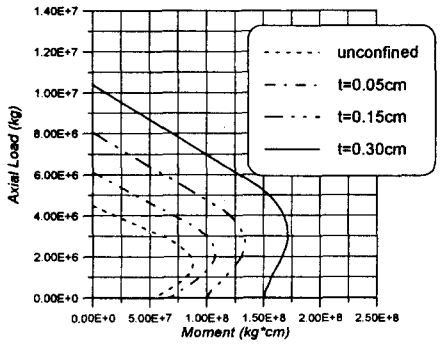
3) 각 적층방식에 따라 보강된 원형 콘크리트 기둥의 P-M 상관도를 도출하였으며, 그 결과 $[0]_s$ 방식으로 보강한 경우에 압축보강효과가 가장 우수하였으며 $[90]_s$ 방식으로 보강된 경우에는 전반적으로 보강효과가 낮음이 드러났다. $[0/90]_s$ 와 $[0/45/90]_s$ 방식으로 보강된 경우에는 압축과 휨에 대해 균형있는 보강이 되었으나 보강효과의 크기에 있어서 $[0/90]_s$ 방식으로 보강하는 것이 효과적이었다.



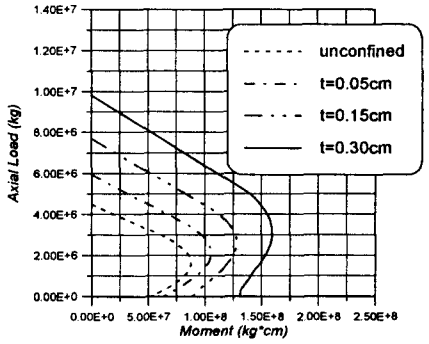
(a) $[0]_s$ 로 보강된 경우



(b) $[90]_s$ 로 보강된 경우



(c) $[0/90]_s$ 로 보강된 경우



(d) $[0/45/90]_s$ 로 보강된 경우

그림 5 적층각이 다른 CFS 로 보강된 원형 콘크리트 기둥의 P-M 상관도

참고문헌

1. Daniel, M. I. and Ishai, O. (1994), Engineering Mechanics of Composite Materials, Oxford University Press.
2. Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R. (1988), "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, 114(8), pp. 1804-1826.
3. Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R. and Li, M. W. (1994), "Strength and Ductility of Concrete Columns Externally Reinforced with Fiber Composite Straps", ACI Structural Journal, 91(4), pp. 434-447.
4. Hosotani, M., Kawashima, K. and Hoshikuma, J. (1998), "A Stress-Strain Model for Concrete Cylinders Confined by Carbon Fiber Sheets", 土木學會 論文集, 39(592), pp. 37-52.