

CFS 보강 콘크리트 기둥의 보강효과 산정을 위한 해석적 연구

Numerical Study for the Estimation of Strengthening Effect of Concrete Column Strengthened with CFS

이 상 호^{*} 허 원 석^{**} 박 재 우^{***}
Lee, Sang Ho Heo, Won Suk Park, Jae Woo

ABSTRACT

The objectives of this study are to estimate the strengthening effect of concrete column strengthened with CFS and to provide basic guideline for the strengthening design with laminated composite materials.

Analytical stress-strain model of laminated CFS is presented based on laminate theory. This model has been implemented in the algorithm of evaluating confinement effect of CFS. From results of the algorithm, stress-strain relationship of confined concrete is obtained. Using this stress-strain relationship, section analyses of circular and rectangular concrete columns strengthened with CFS are carried out, and load-moment interaction and load-ductility curves of the columns are obtained. To evaluate the strengthening effects of CFS, parametric study is also conducted for the angle of ply, thickness of CFS, shape of section, and reinforcement ratio. Based on this investigation, design recommendations and basic guidelines for the strengthening design with CFS are proposed.

1. 서론

최근 들어서 종래의 보강공법의 단점과 한계성을 극복할 수 있는 CFS(Carbon Fiber Sheets)등의 고분자복합재료를 사용한 보강공법에 대한 연구가 활발히 수행되고 있으며 많은 실험적 성과들이 발표되고 있다. 그러나, 고분자복합재료의 주된 특성 중의 하나인 적층성을 반영하여 보강방법에 따른 CFS의 보강효과를 파악하고자 하는 노력은 부족한 실정이며, 또한 CFS로 보강된 콘크리트 기둥의 보강효과가 보강방법이나 단면형상, 보강량, 철근비 등에 따라서 어떠한 변화 추이를 보이는지에 관한 연구성과도 미흡한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 CFS 적층판으로 보강된 콘크리트 기둥의 보강효과를 산정할 수 있는 해석적 모형을 제시하고 제시된 해석모형을 사용하여 보강방향, 보강량, 그리고 피보강 기둥의 철근비에 대한 매개변수연구를 수행하여 각 경우에 대한 보강효과를 산정하였다.

* 정희원, 연세대학교 토목공학과 조교수

** (주)동일기술공사 구조부 사원

*** 연세대학교 토목공학과 대학원 석사과정

2. CFS 보강 콘크리트의 응력-변형률 거동 해석

2.1 CFS 적층판의 거동 해석

복합재료 적층판에서는 각 층마다 적층각이 다르므로 응력-변형률 관계 또한 각각 다르다. 그러나 각 층의 변형률과 중간층의 변형률, 층간 거리 그리고 곡률의 기하학적 관계를 이용하게 되면 적층판 전체의 하중-변형률 관계를 하나의 식으로 표현할 수 있다. 이러한 원리를 이용하여 복합재료 적층판 전체에 걸리는 힘은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} & A_{xs} \\ A_{yx} & A_{yy} & A_{ys} \\ A_{sx} & A_{sy} & A_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_s^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xs} \\ B_{yx} & B_{yy} & B_{ys} \\ B_{sx} & B_{sy} & B_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \chi_x \\ \chi_y \\ \chi_s \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서, N_{ij} 는 적층판 단위길이당 가해지는 힘, M_{ij} 는 적층판 단위길이당 가해지는 모멘트, ϵ_{ij}^0 은 중간면에서의 변형률, χ_{ij} 는 곡률이며 A_{ij} 는 인장강성도, B_{ij} 는 연계강성도, C_{ij} 는 굴곡강성도이다.

적층판의 파괴거동을 해석하기 위해서는 먼저 단일층의 파괴를 예측하고 층의 파괴에 따른 전체적인 파손누적을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 단일층의 파괴를 예측하기 위한 파괴기준으로 복합재료분야에서 널리 사용되는 다음과 같은 Tsai-Hill 파손기준을 사용하였다.

$$\frac{\sigma_1^2}{F_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{F_2^2} + \frac{\tau_6^2}{F_6^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{F_1^2} = 1 \quad (2)$$

여기서, F_1 은 1방향 강도(σ_1 이 양수이면 인장강도, 음수이면 압축강도임), F_2 는 2방향 인장강도, F_6 은 전단강도이다.

파손누적의 고려를 위해서 본 연구에서는 강도 감소비의 개념을 도입하였다. 손상된 층이 발생함에 따라 전체 적층판의 강도가 감소하게 되는데 실험결과 한계 균열 밀도의 발생시, 즉 한 층의 파괴가 일어난 경우에 적층판의 탄성계수는 초기값의 약 90%정도로 감소하게 되며 모재파괴가 일어난 층의 탄성계수는 초기값의 25%로 감소한다. 균열의 간격이나 크기 등을 측정하여 그 값을 바탕으로 강도 감소비를 추정하는 방법이 있으나 실제로 균열을 계측하기가 어렵기 때문에 본 연구에서는 실험결과를 토대로 강도 감소비를 0.25로 가정하였다^[1].

2.2 CFS로 구속된 콘크리트의 응력-변형률 거동 해석

본 연구에서는 구속된 원형 및 사각형 콘크리트의 응력-변형률 관계를 구하기 위하여 Mander 등^[2]이 제안한 방법을 채택하였으며, 구속된 콘크리트 압축부재의 파괴시 최종변형률(ϵ_{cu})을 계산하기 위하여는 Mander 등에 의해 제시된 에너지 평형에 의한 방법의 단점을 보완하기 위하여 Hosotani 등^[3]에 의해서 제안된 실험식을 검용하여 사용하였다. Hosotani 등은 CFS로 보강된 콘크리트 공시체를 이용하여 압축강도실험을 수행하고 그 결과를 바탕으로 구속된 콘크리트 압축부재의 응력-변형률 모형을 실험식으로 제안하였는데 제안된 실험식은 다음과 같다.

$$\epsilon_{cu} = 0.00343 + 0.00939 \frac{\rho_{CF}\epsilon_{us}E_{CF}}{f_{co}} \quad (\text{원형단면}) \quad (3)$$

$$\epsilon_{cu} = 0.00340 + 0.00802 \frac{\rho_{CF}\epsilon_{us}E_{CF}}{f_{co}} \quad (\text{직사각형단면}) \quad (4)$$

여기서, E_{CF} 는 CFS의 축방향 탄성계수이며 ρ_{CF} 는 CFS의 체적비이다.

본 연구에서는 2.1에서 언급된 이론을 바탕으로 적층판의 응력-변형률 관계를 각 적층방식에 따라 계산할 수 있는 알고리즘과 구속된 콘크리트의 응력-변형률 거동을 해석할 수 있는 알고리즘을 개발하고, 그 알고리즘들을 콘크리트 기둥의 단면해석 알고리즘에 적용시켜 CFS 적층판으로 보강된 콘크리트 기둥의 응력-변형률 거동을 해석할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 개발된 해석모형의 정확성 검증을 위해서 실험치와의 비교 연구를 수행한 결과 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있었다^[4].

3. 각 영향변수에 대한 CFS 보강 콘크리트 기둥의 보강효과 분석

본 연구에서 개발된 보강해석 알고리즘을 이용하여 여러 영향변수에 대한 CFS 보강 콘크리트 기둥의 보강효과 분석을 수행하였다. 이 때 보강재의 적층방향, 보강재의 보강량, 종방향 철근량 등을 매개변수로 선정하여 각 변수의 변화에 따른 원형 및 사각형 콘크리트 기둥의 P-M 상관도와 P- ϕ 곡선을 도출하였으며 그 결과를 바탕으로 보강효과를 분석하였다. 본 연구에서 보강효과 해석을 위해 사용한 CFS는 중탄성 CFS 재료인 IM6/SC1081이다.

해석대상이 된 원형 콘크리트 기둥과 사각형 콘크리트 기둥의 단면은 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. 단면형상에 따른 보강효과의 차이를 분석하기 위해서 원형과 사각형기둥의 단면적과 철근량 (464.64cm^2)은 모두 동일하게 설정하였으며, 콘크리트 압축강도는 210kg/cm^2 , 철근의 인장강도는 2800kg/cm^2 를 사용하였다.

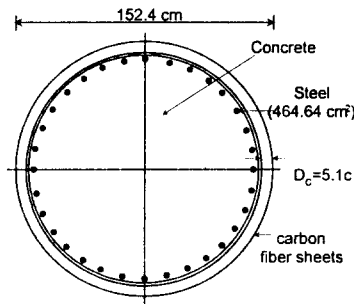


Fig. 1 Cross section of circular column

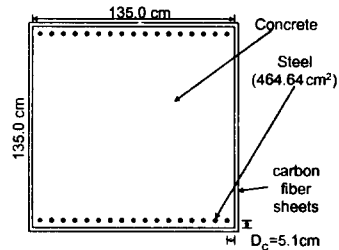


Fig. 2 Cross section of rectangular column

3.1 적층방식에 따른 보강효과의 분석

적층방식에 따른 보강효과를 분석하기 위하여 본 연구에서는 $[0]_s$, $[90]_s$, $[0/90]_s$, $[0/45/90]_s$ 의 4가지 적층방식을 사용하였으며 보강두께를 0.15cm로 동일하게 한 경우 각 적층방식에 따른 P-M 상관도와 P- ϕ 곡선을 도출하고 그 결과를 분석하여 보강효과를 해석하였다. Fig. 3은 각 적층방식에 따른 P-M 상관도와 P- ϕ 곡선을 나타낸다. 각 적층방식에 대한 압축보강효과와 휨보강효과, 그리고 연성보강효과를 분석하기 위해서 무보강시와 보강시의 중심축 극한하중값과 순수 모멘트 값, 그리고 최대 곡률값을 비교하고 각 증가율에 따른 적층방식별 보강효과를 계산하였다. 원형기둥의 경우, 압축보강효과는 $[0]_s$, $[0/90]_s$, $[0/45/90]_s$, $[90]_s$ 적층방식의 순으로 우수하게 나타났다. 휨보강효과의 우수성은 $[0/90]_s$, $[90]_s$, $[0/45/90]_s$, $[0]_s$ 적층방식의 순이었으며, 연성보강효과는 $[0]_s$ 적층방식으로 보강한 경우 가장 우수하고, $[90]_s$ 적층방식으로 보강한 경우에는 가장 효과가 감소하였다. $[0/90]_s$ 와 $[0/45/90]_s$ 적층방

식의 경우에는 $[0]_s$ 와 $[90]_s$ 의 중간정도의 보강효과를 보이면서 서로 엇비슷한 효과를 보임을 알 수 있었다. 사각형 기둥의 경우, 적층방식에 따른 보강효과의 경향은 원형 기둥 보강시와 같은 순임을 알 수 있었다. 그러나 같은 보강량인 경우, 압축보강효과는 원형 기둥 보강시에 비해 약 50%정도 감소된 보강효과를 보였으나 휨보강효과의 경우에는 그 반대의 현상을 보였다. 연성보강효과는 $[0]_s$ 적층방식으로 보강한 경우에만 보강효과가 있었으며 나머지 적층방식으로 보강한 경우에는 연성이 무보강시에 비해 감소되는 경향을 보였다.

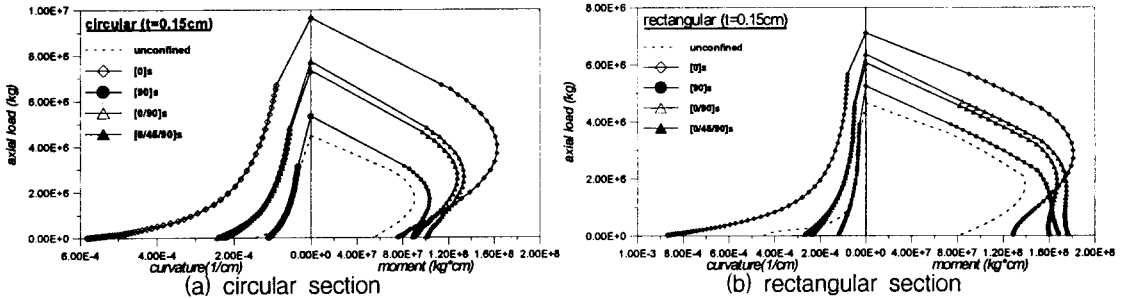


Fig. 3 P-M- ϕ curve of the column for four different lamination types

3.2 보강량에 따른 보강효과의 분석

보강량에 따른 보강효과의 분석을 위해서 CFS의 보강두께를 0.05, 0.15, 0.30cm로 증가시키면서 보강된 기둥의 P-M 상관도와 P- ϕ 곡선을 도출하고, 보강량에 대한 압축보강효과와 휨보강효과, 그리고 연성보강효과를 분석하기 위해서 무보강시와 보강시의 중심축 극한하중값과 순수 모멘트, 그리고 최대 곡률값을 비교하고 보강량에 따른 보강두께별 보강효과의 차이를 Fig. 4-5에 도시하였다. 원형 기둥을 보강한 경우, 압축보강효과는 $[0]_s$, $[0/90]_s$, $[0/45/90]_s$, $[90]_s$ 적층방식의 순으로 나타났으며 보강량이 커짐에 따라 보강효율은 조금씩 감소되는 것을 알 수 있었다. 휨보강효과는 보강두께가 얇은 경우에 $[90]_s$, $[0/90]_s$, $[0/45/90]_s$, $[0]_s$ 적층방식의 순이었으며 두께가 두꺼워지면 $[0/90]_s$ 와 $[0/45/90]_s$ 적층방식이 $[90]_s$ 적층방식으로 보강한 경우보다 보강효과가 우수해졌다. $[90]_s$ 적층방식으로 보강한 경우에는 보강량이 늘어날수록 연성보강효과가 감소하는 효과를 보였다. 사각형 기둥의 경우, $[0/90]_s$ 적층방식은 보강두께가 증가함에 따라 압축보강효과가 $[0]_s$ 때의 보강효과와 거의 같은 수준으로 수렴함을 알 수 있었다. 휨보강효과는 두께가 얇은 경우에 $[90]_s$, $[0/90]_s$, $[0/45/90]_s$, $[0]_s$ 의 순이었으며 두께가 증가하면서 $[0/90]_s$ 와 $[0/45/90]_s$ 가 $[90]_s$ 에 비해서 우수해짐을 보였다. 연성보강효과는 원형단면의 경우와 비슷한 경향을 보였다.

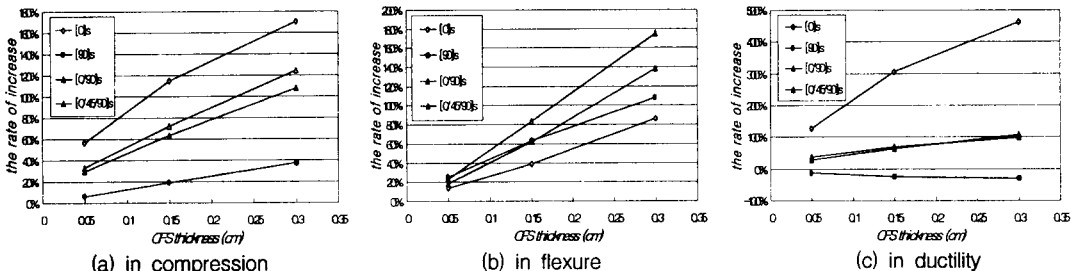


Fig. 4 Strengthening effects of circular column for 3-different thicknesses of carbon fiber sheets

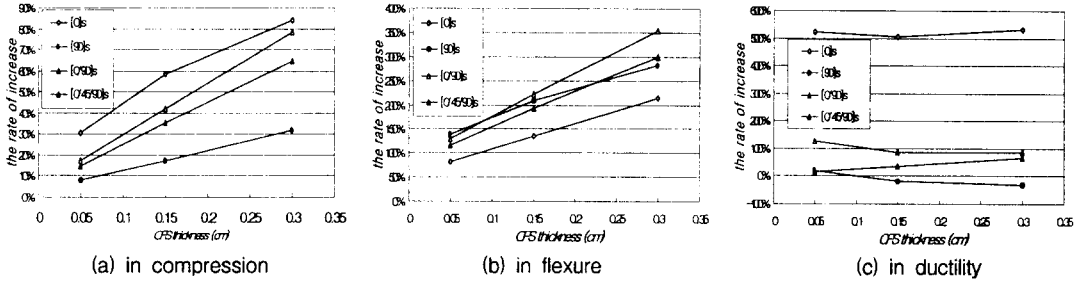


Fig. 5 Strengthening effects of rectangular column for 3-different thicknesses of carbon fiber sheets

3.3 피보강 기둥의 철근비에 따른 보강효과의 분석

피보강 기둥의 철근비에 따른 보강효과의 변화추이를 분석하기 위해 철근비를 1%, 3%, 5%, 7%로 증가시키면서 각각의 경우에 대한 P-M 상관도와 P- ϕ 곡선을 도출하고 그 결과를 분석하여 Fig. 6-7에 도시하였다.

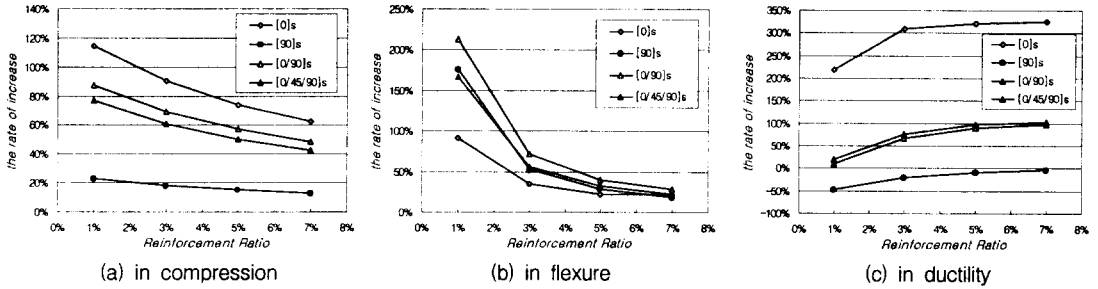


Fig. 6 Strengthening effects of circular column for 4-different reinforcement ratios

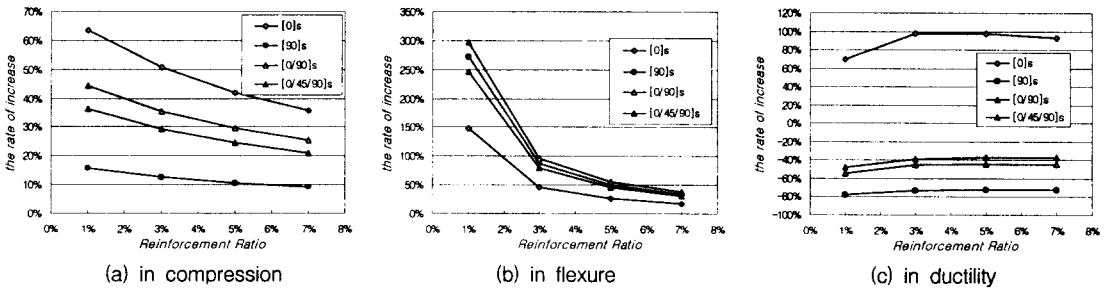


Fig. 7 Strengthening effects of rectangular column for 4-different reinforcement ratios

원형 단면의 경우, 피보강 기둥의 철근비가 높을수록 압축보강효과는 떨어지고 있음을 알 수 있다. 휨보강효과의 경우 철근비가 증가함에 따라서 급격하게 보강효과가 떨어지며 철근비가 7%정도까지 증가하게 되면 적층방식에 관계없이 약 20%정도의 보강효과를 보였다. 철근비가 큰 기둥일수록 연성 보강효과가 우수하였으며 5%이상의 철근비를 가지는 기둥의 경우 각 적층방식에 따라 일정한 값으로 보강효과가 수렴하는 경향을 보였다. [90]_s 적층방식으로 보강한 경우에는 연성이 무보강시에 비해서 감소되는 경향을 보였으나 철근비가 큰 기둥을 보강한 경우에는 연성저하율이 낮게 나타났다. 사각형

단면 보강의 경우, 압축보강과 휨보강효과는 원형 콘크리트 기둥의 보강시와 동일한 경향을 보였으며 5%이상의 철근비를 가진 기둥에서는 [0]_s 적층방식을 제외한 나머지 적층방식으로 보강한 경우 모두 약 30% 정도의 휨보강효과를 보였다. 연성보강의 경우, 철근비가 큰 기둥일수록 보강효과가 조금씩 커지긴 하나 원형 보강시만큼 큰 차이를 보이지는 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 적층성을 띤 CFS로 보강된 원형 및 사각형 콘크리트 기둥의 보강효과 산정을 위한 해석모형을 개발하고 각 영향변수에 따라 다양한 단면해석을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 보강재의 적층각에 따라 콘크리트 기둥의 P-M 상관도와 P- ϕ 곡선을 도출하여 분석한 결과 보강 효과에 큰 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 압축 및 연성보강효과는 [0]_s 적층방식이, 휨보강효과는 [0/90]_s 적층방식이 가장 우수하였다.
- 2) 사각형 단면을 보강하는 경우 원형에 비해 압축보강효과는 1/2정도 작게 나타났으나 휨보강효과는 약 2배정도 크게 나타났다. 연성보강효과는 원형보강시에 비해 작게 나타났다.
- 3) 휨보강의 경우 보강량이 커지면 [0/90]_s와 [0/45/90]_s적층방식의 보강효과가 크게 나타났으며, 연성보강의 경우에는 [0]_s이외의 다른 적층방식은 보강량의 증가에 관계없이 보강효과가 거의 없었다.
- 4) 피보강 기둥의 철근비가 큰 경우 압축보강효과와 휨보강효과는 감소하였으며 연성보강효과는 아주 작은 폭으로 증가하였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통기술 연구개발사업의 연구비 지원으로 이루어졌으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

1. Daniel, I. M. and Ishai, O., Engineering Mechanics of Composite Material, Oxford University Press (1994).
2. Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, 114(8), pp.1804-1826 (1988).
3. Hosotani, M., Kawashima, K. and Hoshikuma, J., "A Stress-Strain Model for Concrete Cylinders Confined by Carbon Fiber Sheets", 日本 土木學會 論文集, 39(592), pp.37-52 (1998).
4. 이상호, 허원석, 김준휘, "CFS 보강 원형 콘크리트 기둥의 P-M 상관도", 한국콘크리트학회 가을학술발표회, pp.621-626 (1998).