

다양한 단면을 지닌 콘크리트 압축부재의 CFS 보강에 따른 거동해석

Analysis of the Behavior of Concrete Compressive Member with Various Cross-Sectional Shapes Strengthened by CFS

이 상 호^{*} 이 민 우^{**} 김 장 호^{***} 김 진 근^{****}
Sang-Ho Lee Min-Woo Lee Jang-Ho Kim Jin-Keun Kim

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop an analytic model which can describe the behavior of concrete compressive member strengthened by CFS(Carbon Fiber Sheet) with various cross-sectional shapes such as circular, square, and octagonal and various laminate angles.

The failure criterion of laminated CFS is based on Tsai-Wu failure criterion. The stress-strain model of confined concrete compressive member is based on an equation proposed by Mander. The effective lateral confining pressure is considered and modified according to various cross-sectional shapes. Octagonal cross-section shows the best results in the aspect of ductility, while circular does in compressive strengthening effects. In addition, [0/0/0/0] laminate in which the direction of fiber is parallel to the direction of principal stress shows the superior strength and ductility than other laminates. The analytic results show that strength and ductility of the analytic model depend on the cross-sectional shapes as well as the laminate angles.

1. 서론

현재 노후화된 콘크리트 구조물에 대한 보수·보강법에 관한 연구가 사회기반시설물의 안전성에 관한 논의와 함께 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구중의 하나로 유리섬유, 고분자복합재료, 특히 CFS(Carbon Fiber Sheets) 등과 같은 신소재를 사용하여 구조물을 보수·보강하는 연구들의 가시적인 성과들이 발표되고 있다. Sheikh와 Uzumeri(1980)는 띠철근에 의해 구속된 원형과 사각형 단면을 가진 콘크리트 기둥의 강도와 연성에 관한 연구를 하였으며, Hosotani *et al.*(1997)은 CFS로 구속된 원형과 사각형 단면의 콘크리트 기둥의 응력-변형률 관계에 대한 실험식을 제안하였다. CFS 보강효과에 관한 실험적인 연구가 주를 이루는 상황에서 최근에 CFS로 보강된 콘크리트 기둥의 응력-변형률 관계를 예측하는 해석 알고리즘이 제안되었다(Lee and Kim, 2001). 위의 연구들은 사각형 단면으로 보강된 콘크리트 기둥보다는 원형 단면으로 보강된 기둥이 보강효과면에서 월등함을 제시하였다. 하지만 사각형 단면은 원형으로 보수·보강하여 시공하는 데 있어 작업상의 난점이 많다. 이를 해결하기 위해 김장호 등(2002)은 CFS로 보강한 원형, 사각형, 팔각형 콘크리트 압축부재의 거동에 관한 실험적인 연구를 수행하여, 팔각형 단면을 가진 구속된 콘크리트 기둥이 사각형 단면에서 보수·보강하여 시공하기에 용이하며, 보강효과도 원형과 거의 유사한 효과를 보인다는 연구결과를 발표하였다.

* 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 부교수

** 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 석사과정

*** 정회원, 세종대학교 토목환경공학과 조교수

**** 정회원, 한국과학기술원(KAIST) 토목공학과 교수

본 연구는 CFS로 보강한 다양한 단면을 지닌 콘크리트 압축부재의 거동을 파악할 수 있는 해석적 모델을 도출하여, 팔각형 단면이 해석적인 측면에서 사각형 단면을 보수·보강하는 대체방안으로서 유용함을 보이고자 한다. 주요 해석 인자가 되는 원형, 사각형, 팔각형 단면형상들의 영향을 고려하기 위해서 Sheikh와 Uzumeri(1980)가 제안한 구속된 압축부재의 유효횡구속압 이론을 수정·적용하였으며, Hosotani *et al.*(1997)가 제안한 실험식과 김장호 등(2002)이 수행한 CFS로 구속된 팔각형 단면의 콘크리트 실험체의 응력-변형률 관계에 대한 실험 결과를 해석 모델에서 사용하였다.

2. CFS로 보강된 콘크리트 압축부재의 해석 이론 및 재원

2.1. CFS로 보강된 콘크리트 압축부재의 해석이론

본 연구에서 적층판의 거동 및 파괴해석을 위한 이론은 이상호와 허원석(1999), Lee와 Kim(2001)의 연구를 참고하였다. 적층판의 파괴해석을 위한 복합재료의 파괴기준으로는 대표적으로 Tsai-Hill 파괴기준과 Tsai-Wu 파괴기준이 있다. 각각의 파괴기준은 해석상 결과에는 큰 차이가 없으나, Tsai-Hill 파괴기준은 해석과정에서 인장강도와 압축강도를 구분할 수가 없고 Tsai-Wu 파괴기준은 인장강도와 압축강도를 구분할 수가 있으며 전산화가 편리하다는 장점이 있다. 본 연구에서는 Tsai-Wu 파괴기준을 적용하였다.

적층판의 파괴는 다층의 적층판에서 최초층이 파괴된 후 다른 층에도 반복되며 극한파괴는 모든 층이 파괴에 이를 때 발생한다. 손상된 층이 발생함에 따라 전체 적층판의 강도가 감소하게 되는데, 한계균열밀도의 발생시, 즉 한 층의 파괴가 일어난 경우에 적층판의 탄성계수는 초기값의 약 90% 정도로 감소하게 되어 모재파괴가 일어난 층의 탄성계수는 초기값의 25%로 감소한다. 이를 바탕으로 파괴된 층의 탄성계수 계산시 그 감소비를 0.25로 하여 적층판의 파괴해석을 수행하였다.

구속된 콘크리트의 응력-변형률 모델로 Mander *et al.*(1988)에 의해 제안된 해석 모델(MPP model)을 채택하였다. Mander *et al.*(1988)은 횡방향으로 구속된 콘크리트 거동에 적용할 수 있는 응력-변형률 모델을 제시하였다. 낮은 응력빈도나 단순하중인 경우 구속된 종방향 압축강도(f_c)는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_c = \frac{f_{cc}'xr}{r-1+x^r} \quad (2)$$

위 식의 계수들은 표 1에 정의되어 있다.

표 1에서, f_{cc}' 는 구속된 콘크리트의 압축강도, f_{co}' 는 구속되지 않은 콘크리트의 압축강도, ϵ_{cc} 는 구속된 콘크리트의 최대응력(f_{cc}')에서의 변형률, ϵ_{co} 는 구속되지 않은 콘크리트의 최대응력(f_{co}')에서의 변형률(0.002), E_c 는 콘크리트의 탄성계수, E_{sec} 는 구속된 콘크리트의 최대응력에서의 법선탄성계수(secant modulus)이다.

구속된 콘크리트의 압축강도 f_{cc}' 를 결정하기 위해서 여러 방향의 압축응력에 대해 특정한 최대강도면을 포함하는 적합모형을 사용하였다. 이 모형은 Williams와 Warnke(1975)에 의해 제안된 것으로 3축 실험으로 결정된 실험식이다. 같은 크기의 유효횡구속압(f_1')이 3축으로 가해지는 경우 구속된 콘크리트의 압축응력은 식 (3)과 같다.

표 1 f_c 의 계수

계 수	내 용
x	$\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}}$
r	$\epsilon_{co} \left[1 + 5 \left[\frac{f_{cc}'}{f_{co}'} - 1 \right] \right]$
ϵ_{cc}	$\frac{E_c}{E_c - E_{sec}}$
E_{sec}	$\frac{f_{cc}'}{\epsilon_{cc}}$

$$f_{c'} = f_{co} \left[-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f_i'}{f_{co'}} - 2 \frac{f_i'}{f_{co'}}} \right] \quad (3)$$

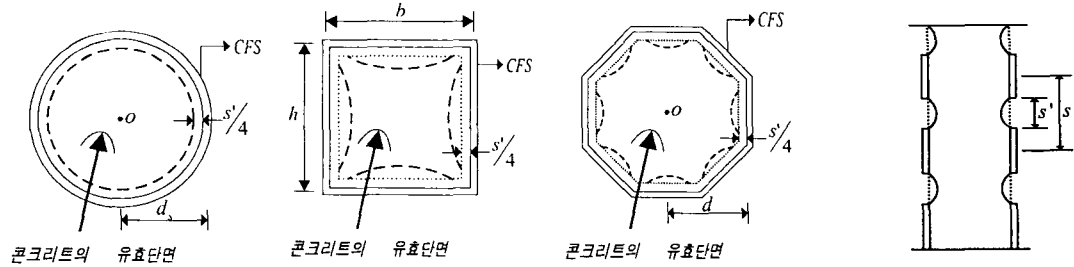
위 실험식은 횡방향보강에 의한 유효횡구속압이 요구되며, Sheikh와 Uzumeri(1980)는 구속된 원형과 사각형 콘크리트 단면의 유효횡구속압을 구하는 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 팔각형 단면의 유효횡구속압 산정을 위해서 새로운 유효구속압 산정식을 제안하였다. 그림 1에서는 각 단면에 따른 유효단면의 형상을, 그림 2에서는 콘크리트 부재의 축방향 단면을 도시하였다. Sheikh와 Uzumeri(1980)의 이론을 이용하여 CFS로 보강한 정팔각형 단면의 횡구속압을 도시하면 그림 3과 같다.

일반적인 유효횡구속압은 식 (4)와 같고, 식 (4)에서 필요한 원형과 사각형의 유효단면적과 구속압은 표 2와 같다. 횡구속된 팔각형 콘크리트 압축부재의 유효단면은 그림 1(c)와 같다. 그림 1(c)에 따른 정팔각형 단면의 유효단면적(k_c)과, 그림 3에서 작용하는 힘들의 평형방정식을 계산한 정팔각형 단면의 구속압(f_l)을 표 2와 같다.

$$f_i' = f_l k_c \quad (4)$$

표 2에서, n 은 arch action이 발생하는 2차곡선의 수, A 는 팔각형의 단면적, w_i 는 인접한 종방향 철근간의 거리 또는 모서리 사이의 거리, s' 은 CFS간의 수직간격, ρ_{cc} 는 철근비, s 는 CFS의 폭, f_m 는 CFS의 최대인장강도, A_w 는 CFS의 단면적이다.

구속된 콘크리트 압축부재의 파괴시 압축파괴변형률을 계산하기 위해서 실험식을 이용한 방법을 적용하였다. Hosotani *et al.*(1997)은 CFS로 보강된 콘크리트 공시체 실험을 통하여 응력-변형률 곡선을 도출하고, 그 결과를 바탕으로 식 (5) 및 식 (6)과 같이 원형과 사각형 단면의 구속된 콘크리트 압축부재의 응력-변형률 모형을 실험식으로 제안하였다.



(a) 원형 단면의 유효단면 (b) 사각형 단면의 유효단면 (c) 팔각형 단면의 유효단면
그림 1 다양한 형상의 콘크리트 부재의 유효단면

표 2 다양한 단면들의 유효단면적과 구속압

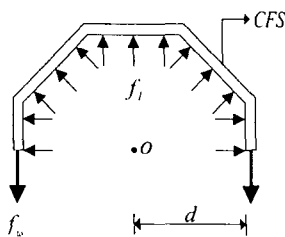


그림 3 CFS 보강에 의한 팔각형 단면의 횡구속압

인자 단면	유효단면적 (k_c)	구속압 (f_l)
원형	$\frac{(1 - \frac{s'}{2d})^2}{1 - \rho_{cc}}$	$\frac{2f_{ms}A_w}{2d_s s}$
사각형	$\frac{(1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i)^2}{6bh}) (1 - \frac{s'}{2h}) (1 - \frac{s'}{2b})}{1 - \rho_{cc}}$	$\frac{2f_{ms}A_w}{bs}$
팔각형	$\frac{(1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i)^2}{6A}) (1 - \frac{s'}{2d})^2}{1 - \rho_{cc}}$	$\frac{2f_{ms}A_w}{(1 + \sqrt{2})ds}$

$$\epsilon_{cu} = 0.00343 + 0.00939 \frac{\rho_{CF} \epsilon_{cu} E_{CF}}{f_{co}} \quad (\text{원형}) \quad (5)$$

$$\epsilon_{cu} = 0.00340 + 0.00802 \frac{\rho_{CF} \epsilon_{cu} E_{CF}}{f_{co}} \quad (\text{직사각형}) \quad (6)$$

여기서, E_{CF} 는 CFS의 축방향 탄성계수이며 ρ_{CF} 는 CFS의 체적비로 식 (7)과 같다.

$$\rho_{CF} = 4 \times N \times t_{CF} / d \quad (7)$$

여기서, t_{CF} 는 CFS의 두께, N 은 CFS의 적층수, d 는 원형 단면의 경우 직경(d_s), 사각형 단면의 경우에는 한변의 길이(b 또는 h)이다.

그러나 본 연구에서는 팔각형 단면을 가진 콘크리트 압축부재의 파괴 시 압축과피변형률을 구할 수 있는 해석적 연구 및 제안된 실험식이 현재 까지 발표된 바가 없으므로 김장호 등(2002)이 발표한 실험 결과를 사용하였다.

그림 4에서는 구속효과를 고려하여 CFS로 구속된 콘크리트 압축부재의 응력-변형을 관계를 해석하는 과정을 도시하였다.

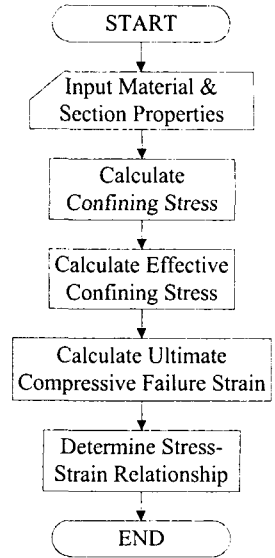


그림 4 Flowchart of Confinement Effect Analysis

2.2. CFS 및 콘크리트 압축부재의 실험 및 해석 재원

본 연구모델의 해석 결과와 비교하기 위해 사용한 실험 결과는 김장호 등(2002)이 수행한 실험치를 사용하였다. 사용된 콘크리트의 압축강도는 $300\text{kg}/\text{cm}^2$ 이며, CFS는 국내에서 시판되고 있는 SK-N300 제품을 사용하였으며, 에폭시 레진을 이용하여 콘크리트 압축부재의 전면을 보강하였다. 콘크리트 압축부재의 단면 재원은 그림 5와 같으며, 단면 형상에 따른 효과를 비교하기 위하여 각 단면이 동일 면적(78.50cm^2)으로 제작되었다. 또한 보강섬유방향에 따른 보강효과를 고려하기 위하여 무보강, [0/0/0/0], [90/90/90/90], [0/90/90/0]의 적층방식들을 비교하였다. 본 논문에서 적층각의 표시방법은 실험체의 수평방향을 0° 로 나타내는 절대좌표축을 이용하였다.

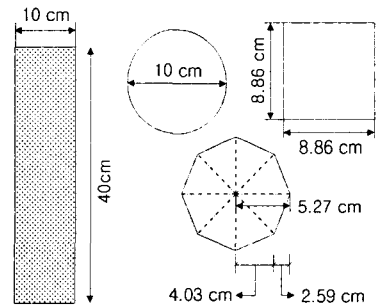


그림 5 실험체 및 각 단면의 재원

3. CFS로 구속된 콘크리트 압축부재의 보강효과 해석

우선 그림 6과 같이 동일 면적의 원형, 사각형, 팔각형 단면을 가진 무보강 압축부재에 관한 실험 결과와 해석 결과를 비교하여 본 모델의 타당성을 점검하였다. 그림 6을 살펴보면 무보강 실험체에서 각 단면의 실험 결과와 해석 결과는 잘 부합함을 알 수 있으며 각 단면들의 최대 압축강도는 원형, 팔각형, 사각형의 순서대로 나타난다. 이는 유효응력이 재하되는 유효면적의 크기에 비례한다. 또한, 팔각형 단면은 원형보다 압축강도는 약간 떨어지나 그에 비해 연성의 효과가 상당히 증가한다는 것을 알 수 있다. 따라서 무보강 압축부재의 경우에 건물의 안전성과 사고예방이라는 측면에서 팔각형 형상의 압축부재가 매우 유리할 수 있음을 알 수 있다. 그림 7에서는 적층방식을 [0/0/0/0]으로 압축부재를 보강한 실험 결과와 해석 결과를 비교하였다. 이 적층방식은 CFS의 수직방향에 대한 인장력을 극대화

하여 부재에 재하되는 압축응력을 효과적으로 상쇄하므로, 다른 적층방식과 비교하여 압축강도와 연성 효과 증대의 측면에서 매우 우수한 결과를 보여준다. 따라서, 실제 콘크리트 압축부재를 CFS로 보강하는 경우 널리 쓰일 수 있는 방식이다. 실험 결과와 해석 결과는 안전측에서 잘 부합하며, 해석 결과는 실험 결과와 비교하여 압축강도와 연성의 효과가 약 85~95%정도까지 나타난다. 특히, 팔각형 단면의 콘크리트 압축부재는 무보강의 경우와 같이 원형보다는 압축강도가 약간 떨어지나 연성의 효과가 매우 크게 나타난다. 따라서 현재 많은 콘크리트 구조물 기둥의 단면이 사각형임을 감안하면, 구조물 유지관리의 측면에서 기존의 사각형 단면을 원형 단면보다는 보수·보강이 용이한 팔각형 단면으로 시공하여 원형 단면보다 큰 연성의 효과와 비슷한 압축강도를 낼 수 있다는 큰 장점이 있다. 그림 8에서는 [90/90/90/90]의 적층방식을 이용한 실험 결과와 해석 결과를 도시하였다. 이 방식은 [0/0/0/0]의 적층방식과는 반대로 압축부재에 재하되는 압축응력을 CFS의 수직방향 인장력으로 상쇄하지 못하므로 압축강도와 연성효과의 증대라는 측면에서 일반적으로 불리한 적층방식이다. 따라서 그림 6의 무보강의 결과와 비교해도 압축강도의 증가나 연성의 효과가 크게 나타나지 않는다. 해석 결과는 [0/0/0/0]의 적층방식보다 상대적으로 잘 일치하는데, 압축강도가 상대적으로 작고 연성의 구간이 짧은 것과 관련이 있다. 그림 9는 [0/0/0/0]과 [90/90/90/90]의 적층방식의 중간 형태인 [0/90/90/0]의 적층방식에 대한 실험 결과와 해석 결과를 도시하였다. 실험 결과와 해석 결과 모두 [0/0,0/0]과 [90/90/90/90]의 적층방식의 중간 형태를 취하고 있다. [0/0/0/0]의 적층방식과 비교해서 큰 압축강도가 나타나지는 않지만, 원형 단면의 경우에는 연성의 효과가 두드러지게 나타난다. 이 적층방식은 특히

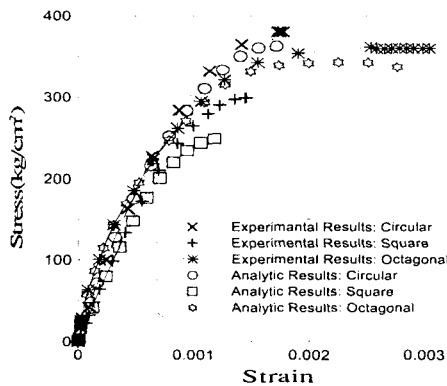


그림 6 무보강 응력-변형률 곡선

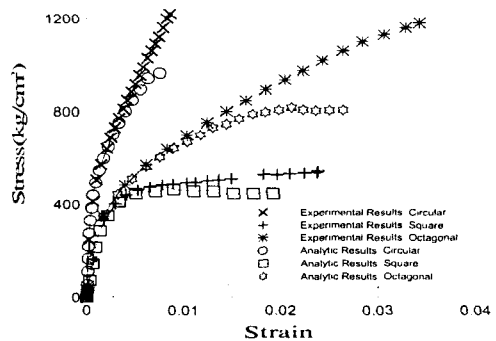


그림 7 [0/0/0/0] 응력-변형률 곡선

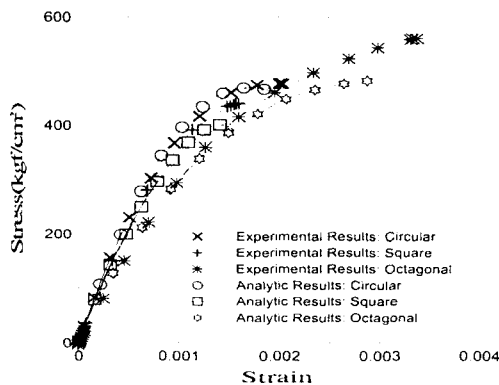


그림 8 [90/90/90/90] 응력-변형률 곡선

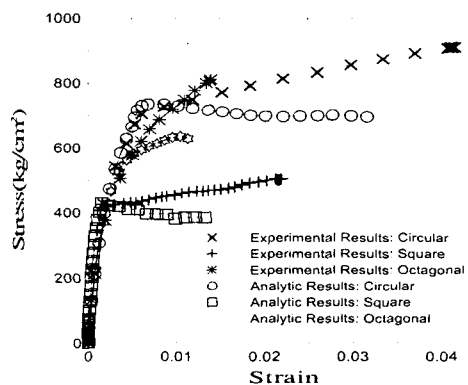


그림 9 [0/90/90/0] 응력-변형률 곡선

팔각형 단면이 다른 단면들과 비교하여 압축강도만이 아니라 연성 효과에서도 불리한 방식이므로, CFS로 보강한 팔각형 단면의 콘크리트 압축부재를 구조물에 사용할 때 원형, 사각형 단면과 비교하여 큰 효과를 기대할 수 없는 적층방식이다.

4. 결론

본 연구의 목적은 다양한 단면형상과 적층각에 따른 CFS로 보강한 콘크리트 압축부재의 보강효과를 산정하는 것이다. 연구과정을 통하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1. 본 연구의 해석 결과는 실험 결과와 잘 부합하며, 팔각형 단면의 유효횡구속압 산정을 위해서 본 연구에서 사용된 유효구속압 산정식의 타당성을 확인할 수 있었다.
2. 실험 결과와 해석 결과를 살펴보면 보강효과는 단면형상에 큰 영향을 받는데, 일반적으로 압축강도의 최대크기는 원형, 팔각형, 사각형의 순서대로 크며, 연성의 효과는 팔각형, 원형, 사각형의 순서대로 크게 나타난다.
3. CFS의 적층각에 따른 콘크리트 압축부재의 보강효과를 살펴보면, 기존 연구의 결과들과 잘 일치한다. 그러나 [0/90/90/0]의 적층방식은 다른 적층방식들과는 달리 팔각형 단면보다는 원형 단면에서 보다 큰 연성구간이 나타난다. 따라서 이 적층방식을 실제 구조물에 시공하는 경우에는 원형 단면을 사용하는 것이 유리함을 알 수 있다.
3. 팔각형 단면을 지닌 CFS로 보강한 콘크리트 압축부재는 원형 단면보다 압축강도는 약간 저하되나 연성의 효과가 크게 증가한다. 따라서 사각형 단면의 콘크리트 기둥을 원형 단면보다는 보수·보강하기에 용이한 팔각형 단면으로 시공하는 방안을 찾는다면, 기존의 사각형 단면을 가진 노후화된 콘크리트 압축부재의 안전성을 높이는 데 크게 기여할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Hosotani, M., Kawashima, K. and Hoshikuma, J. (1997), "A Study on Confinement Effect of Concrete Cylinders by Carbon Fiber Sheet", *Proceedings of the Third International Symposium, Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structure*, Vol. 1, pp. 209-216.
2. Lee, S. H. and Kim, H. J. (2001), "Analytical Algorithm Predicting Compressive Stress-Strain Relationship for Concrete Confined with Laminated Carbon Fiber Sheets", *Computational Structural Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 39-48.
3. Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R. (1988), "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826.
4. Sheikh, S. and Unumeri, S. M. (1980), "Strength and Ductility of Tied Concrete Columns", *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 106, No. 5, pp. 1079-1102.
5. Willams, S. A. and Warnke, E. P. (1976), "Constitutive Model for Triaxial Behavior of Concrete", *Proceedings of International Association for Bridge and Structural Engineering*, Vol. 19, pp. 1-30.
6. 김장호, 김진근, 김석호, 양종석 (2002), "단면형상과 적층각도의 변화에 따른 CFS 보강 콘크리트 압축부재의 역학적 거동 특성", *대한토목학회논문집*, 제 22 권, 제 2 호, pp. 347-354.
7. 이상호, 허원석 (1999), "적층성을 띤 CFS로 보강된 원형 콘크리트 기둥의 보강효과 해석", *한국콘크리트학회 논문집*, 제 11 권, 제 3 호, pp. 89-100.