

적층성을 띤 CFS로 보강된 원형 콘크리트 기둥의 보강효과 해석

Strengthening Effect Analysis of Circular Concrete Column Strengthened with Laminated CFS



이상호*

Lee, Sang-Ho



허원석**

Heo, Won-Suk

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop an analytic model of the concrete column strengthened with laminated CFS, and to provide a basic guideline for the strengthening design by CFS considering orthotropic properties of laminate.

In this study, an analytical stress-strain model of laminated CFS is presented based on Tsai-Hill failure criterion. This model has been implemented in an algorithm which can evaluate the confinement effect of CFS. Through this algorithm, the stress-strain relationship of confined concrete is obtained and compared with experimental results of other studies. Using the constitutive relationships, section analyses of concrete column strengthened with CFS are done, and load-moment and load-curvature interaction curves are obtained. In addition, the strengthening effects of CFS according to various laminated angles are analyzed. Analytical results show that the strengthening effects of the strengthened concrete columns are significantly different in compression, flexure, and ductility according to the laminated ways. In compressive strengthening effects, $[90]_s$ laminate in which the direction of fiber is perpendicular to the direction of principal stress shows the superiority, where as in flexural strengthening effects, $[0/90]_s$ does. In the aspect of ductility, $[90]_s$ shows the best effect.

Keywords : concrete column, CFS, laminated angle, strengthening effect, Tsai-Hill failure criterion, confinement, stress-strain relationship, load-moment diagram, load-ductility diagram

* 정회원, 연세대학교 토목공학과 조교수

** 정회원, 연세대학교 토목공학과 대학원 석사과정

*본 논문에 대한 토의를 1999년 10월 30일까지 학회로 보내 주시면 1999년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 콘크리트 구조물의 보강에 관한 관심이 높아 지면서 이에 관련된 연구가 활발히 진행되고 있으며 고분자복합재료, 특히 CFS(Carbon Fiber Sheets)를 이용하는 보강방법에 관하여 많은 연구 성과를 보이고 있다.

CFS로 보강된 콘크리트 압축부재에 대한 연구동 향을 살펴보면, 국내의 경우 실험적인 연구가 대부분이며 최근 실험에 기초한 해석적 연구가 수행되어 그 성과들이 드러나고 있다⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾. 국외의 경우 Saadatmanesh 등⁽⁵⁾이 섬유복합재료(유리섬유 및 탄소섬유)를 이용하여 콘크리트 기둥을 보강했을 때 그 횡구속효과를 해석하는 해석적 연구를 수행하였 으며, Hosotani 등⁽⁶⁾은 CFS로 콘크리트 공시체를 구속시킨 후 압축강도 실험을 수행하고 그 결과를 분석하여 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 구 할 수 있는 실험식을 제시하였다. 그러나, 이러한 연구들은 일방향 ply만을 고려한 연구들로서 각기 다른 ply angle을 지닌 적층성을 고려하지 않는 연 구들이다. 최근 Malek과 Saadatmanesh⁽⁷⁾가 CFS로 전단보강된 보의 거동을 해석하는 연구에 적 층이론을 사용하였으나 기둥의 보강효과 해석시 적 층성을 고려한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 서로 다른 ply angle로 적 층성을 띤 CFS를 사용하여 원형 콘크리트 기둥을 보강한 경우 보강 CFS 적층판의 적층각 및 보강두께에 따라 보강효과가 어떻게 달라지는지를 규명하 기 위한 해석적 연구에 그 초점을 맞추어 연구를 수 행하였다.

2. 적층판의 거동 해석

2.1 적층판의 강성도

2.1.1 단일층 복합재료의 강성도

단일층 복합재료란 일방향으로 섬유(fiber)가 끊 어지지 않고 한 개의 층으로만 되어 있는 복합재료를 말한다. 단일층 복합재료는 직교이방성 재료이 며, 섬유와 기지재료의 물성값 차이로 인해 섬유방

향과 섬유직각방향의 강성 및 강도가 매우 다르다.

단일층 복합재료의 해석시에는 해석상의 편의를 위해서 2차원 평면응력 상태로 간주한다. 평면응력 상태로 가정시 직교이방성을 가진 복합재료 단일층 의 응력-변형률 관계는 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서, Q_{ij} 를 축약강성계수라 한다.

일방향 복합재료의 응력-변형률 관계를 구하려면 회전각에 의한 좌표변환 행렬이 필요하다. 적층판의 경우 각 층의 섬유방향이 하중방향과 일치하지 않기 때문에 좌표변환을 통해 일반좌표축에 대한 강성을 계산하여야 한다.

2.1.2 복합재료 적층판의 강성도

실제 구조재료로서의 응용에서는 여러 가지 방 향으로 하중을 버틸 수 있도록 방향이 서로 다른 일방 향 섬유 보강층들이 적층되어 사용되는 것이 일반적 이다. 적층판의 경우, 적층형태에 따라 두께방향으 로 균일성이 없어지고 직교이방성의 특성도 없어질 수 있다.

복합재료 적층판에서는 각 층마다 적층각이 다르므로, 강성도 또한 각각 다르다. 따라서 각 층의 응력을 중간면에서의 변형률과 곡률 및 층까지의 거 리의 함수로 표현할 수 있다면 적층판 전체의 응력- 변형률 관계를 매우 간편하게 나타낼 수 있을 것이 다. 식(2)는 복합재료 적층판에서 k번째 층의 응력- 변형률 관계를 표현한 것이다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_s^0 \end{Bmatrix} + z \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_s \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서, ϵ_{ij}^0 는 중간면에서의 변형률, κ_{ij} 는 곡률, z 는 적층판 중간면에서 k번째 층까지의 거리를 의미 한다.

이 관계를 이용하여 복합재료 적층판 전체에 걸리 는 힘을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

여기서, N_{ij} 는 적층판 단위길이당 가해지는 힘을 의미하며, 인장강성계수 A_{ij} 와 연계강성계수 B_{ij} 는 다음과 같이 정의된다.

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n Q_{ij}^k (h_k - h_{k-1}) \quad (4a)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n Q_{ij}^k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad (4b)$$

식(4)에서 h_k 는 중간면에서 k 번째 층까지의 거리를 의미한다.

중간면을 중심으로 기하학적으로나 재료의 물성값이 대칭이 되는 적층판을 대칭적층판이라고 하는데 이러한 대칭적층방식은 복합재료의 성형시 열변형에 의한 비틀림을 방지할 수 있고, 응력해석 및 구조설계에 간편하게 해석할 수 있는 장점 때문에 많이 사용된다. 본 연구에서 사용하는 적층성을 띤 CFS는 모두 대칭적층판으로 가정하였다. 이 경우 임의의 층에서의 강성도와 두께는 중간면에 대해서 대칭이 되므로 식(3)의 B_{ij} 는 모두 0이 된다.

2.2 적층판의 파괴해석

적층판의 역학적 거동을 알게 되면, 적층판을 이루는 여러 개의 단일층(ply) 중 최초로 파괴될 수 있는 층을 적절한 파괴기준을 적용하여 예측할 수 있다. 적층판의 최종파괴를 예측하기 위해서는 가장 취약한 상태에 놓여있는 층의 파괴에 이은 다른 층의 균열 발생에 의해 생기는 파손누적현상을 이해할 필요가 있다.

적층판의 파괴 및 파손과정에 관해서는 제안된 많은 예측이론들이 있는데 대부분의 파괴기준은 각 층에서의 응력 상태에서부터 파괴양상을 예측한다. 본 연구에서는 적층판의 파괴해석을 위하여 복합재료의 파괴기준으로서 가장 널리 사용되는 Tsai-Hill 파괴기준을 사용하였다. Tsai-Hill의 파괴기준은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\sigma_1^2}{F_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{F_2^2} + \frac{\tau_6^2}{F_6^2} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{F_1^2} = 1 \quad (5)$$

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

적층판에 작용하는 응력이 증가하게 되면 하중방향과 섬유방향의 각도가 90° 인 층의 모재에 가장 먼저 미세한 균열이 발생되게 된다. 균열이 발생함에 따라 균열이 발생된 층의 응력이 재분배되며 한계균열이 발생할 때까지 재분배가 계속된다. 재분배된 응력의 최대값이 층의 횡방향 강도와 같게 되면 이 시점에서는 작용응력이 증가하더라도 더 이상 그 층의 축응력은 증가하지 않는다. 최초층 파괴이후 이러한 과정이 다른 층에도 반복되며 극한파괴는 모든 층이 파괴에 이를 때 발생한다.

손상된 층이 발생함에 따라 전체 적층판의 강도가 감소하게 되는데 실험결과에 따르면 한계균열밀도의 발생시, 즉 한 층의 파괴가 일어난 경우에 적층판의 탄성계수는 초기값의 약 90%정도로 감소하게 되며 모재파괴가 일어난 층의 탄성계수는 초기값의 25%로 감소함을 알 수 있다^[8]. 본 연구에서는 이 실험결과를 바탕으로 파괴된 층의 탄성계수 계산시 그 감소비를 0.25로 가정하여 적층판의 파괴해석을 수행하였다.

2.3 적층판의 거동해석 모형

2.3.1 적층판의 응력-변형을 관계 해석 알고리즘

본 연구에서는 서로 다른 각도로 적층된 적층판의 응력-변형을 관계를 도출하기 위하여 Fig. 1과 같이 Tsai-Hill 파괴기준을 사용한 적층판 해석 알고리즘을 제안하였다.

2.3.2 해석치와 실험치의 비교·검증

앞 절에서 제시된 해석모형의 검증을 위하여 해석적으로 얻어진 적층판의 응력-변형을 곡선과 실험에서 얻어진 응력-변형을 곡선의 비교연구를 수행하였다. 대상이 된 복합재료는 중탄성 CFS인 IM6/SC 1081이며 그 물성치를 Table 1에 나타내었다. 실험

치는 Daniel과 Ishai⁽⁸⁾의 실험결과를 사용하였다.

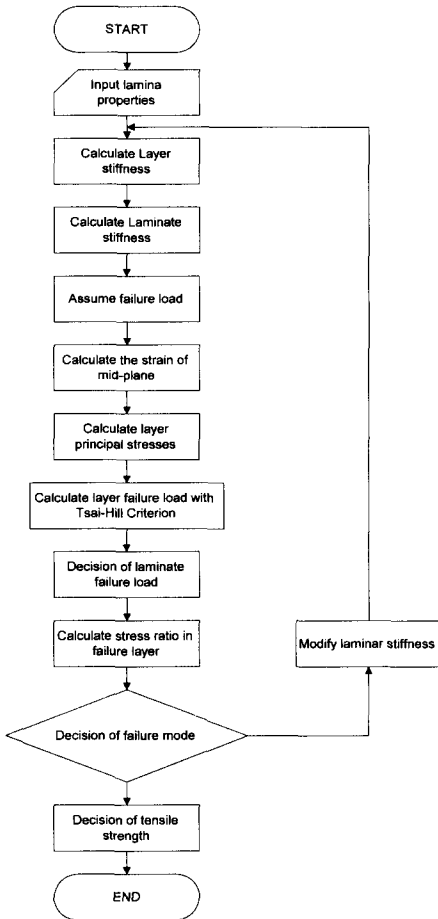


Fig. 1 Flowchart for the failure analysis of laminate

Table 1 Material properties of unidirectional CFS lamina

Material Property	Unit	IM6 /SC108
Fiber volume ratio	-	0.65
Density	G/cm ³	1.60
Longitudinal modulus	GPa	177
Transverse modulus	GPa	10.8
Shear modulus	GPa	7.6
Major Poisson's ratio	-	0.27
Minor Poisson's ratio	-	0.02
Longitudinal tensile strength	MPa	2,860
Transverse tensile strength	MPa	49
Shear strength	MPa	83
Ultimate longitudinal tensile strain	-	0.016
Ultimate transverse tensile strain	-	0.005

Table 1에서 제시된 중탄성 CFS로 이루어진 적층판 중 $[0/90]_s$, 적층방식과 $[90_2/\pm 45]_s$, 적층방식에 대해 이론적 해석을 수행하고 그 결과를 Daniel 등⁽⁸⁾에 의해 얻어진 실험결과와 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 보듯이 본 연구에서 제시한 적층이론 해석 알고리즘에 의한 해석결과가 실험치와 거의 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 실제로 laminate의 파괴에 따른 응력-변형률 관계를 정확히 예측하기 위해서는 본 연구에서 언급한 기계적 물성 이외에도 lamina의 온도, 습도, 접착제의 강도 등 여러 가지 요인을 고려한 보다 복잡한 해석 알고리즘을 사용하여야 하나 본 연구에서는 대표적인 기계적 물성만을 사용하였다.

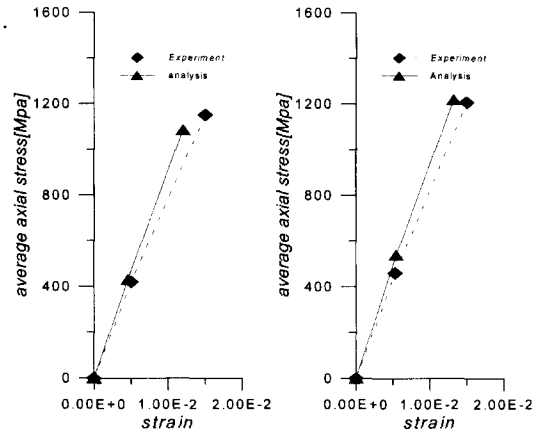


Fig. 2 Stress-strain curves of $[0/90]_s$ and $[90_2/\pm 45]_s$ laminates

3. CFS로 구속된 원형 콘크리트 압축부재의 응력-변형률 관계 해석

CFS로 콘크리트 기둥을 보강하는 대표적인 방법은 기둥 주위를 CFS로 감싸서 접착시키는 것이다. 그런 경우 CFS가 콘크리트를 횡구속하는 효과가 생겨 구속된 콘크리트가 횡보강되지 않은 콘크리트에 비해 압축저항능력이 커지게 된다. Mander 등⁽⁹⁾은 띠철근으로 구속된 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 해석할 수 있는 모형을 연구하였다. 그러나, 띠철근이 아닌 CFS로 감싼 경우의 구속효과에 대한 연구는 미흡하여 아직까지 검증된 해석모델이 제시

된 단계는 아니며 단지 Saadatmanesh 등⁽⁵⁾이 Mander의 모델을 CFS로 구속된 경우에 대하여 적용시킨 사례를 찾아볼 수 있을 뿐이다. 본 장에서는 기존의 이론을 고찰하고 그 문제점을 파악하여 CFS로 구속된 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 해석할 수 있는 알고리즘을 연구하였다.

3.1 CFS로 구속된 원형 콘크리트 압축부재의 응력-변형률 곡선식 결정

본 연구에서는 Mander 등⁽⁹⁾에 의해 제안된 해석모형을 구속된 콘크리트의 응력-변형률 모형으로 채택하였다.

Mander 등은 횡방향 구속된 콘크리트 기둥에 적용할 수 있는 응력-변형률 모형을 제시하였는데 제시된 응력-변형률 모형은 Popovics⁽¹⁰⁾가 제안한 콘크리트의 구성방정식에 기초한 것이다. 낮은 응력빈도나 단순하중인 경우 구속된 종방향 압축강도(f_c)는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_c = \frac{f_{cc}' x^r}{r - 1 + x^r} \quad (6)$$

여기서 각 변수들은 다음과 같다.

$$x = \epsilon_c / \epsilon_{cc} \quad (7)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[1 + 5 \left[\frac{f_{cc}'}{f_{co}'} - 1 \right] \right] \quad (8)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (9)$$

$$E_{sec} = \frac{f_{cc}'}{\epsilon_{cc}} \quad (10)$$

여기서, 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.

본 연구에서는 구속된 콘크리트의 최대압축강도를 구하기 위해서 Williams와 Warnke⁽¹¹⁾의 식을 사용하였으며, 콘크리트 단면의 유효횡구속압을 구하

기 위해서 Sheikh와 Uzumeri⁽¹²⁾에 의해 제안된 방법을 사용하였다.

위의 과정을 통해서 결정된 CFS로 구속된 원형 콘크리트 압축부재의 응력-변형률 곡선의 예를 Fig. 3에 도시하였다.

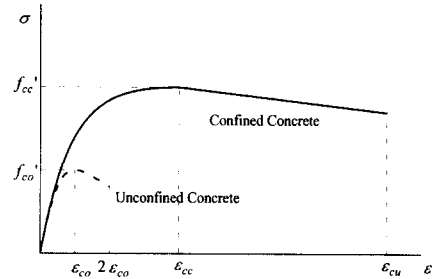


Fig. 3 Example of stress-strain curve of the concrete member confined with CFS

3.2 CFS로 구속된 콘크리트의 압축파괴변형률 결정

구속된 원형 콘크리트 압축부재의 파괴시 압축파괴변형률(ϵ_{cu})을 계산하기 위해 본 연구에서는 두 가지 접근방법을 시도하였다. 첫 번째 방법은 Scott 등⁽¹³⁾이 제안한 에너지 평형의 개념에 기본을 둔 접근방법이고 또 다른 한가지 방법은 Hosotani 등⁽⁶⁾이 제안한 실험식을 이용한 접근방법이다.

3.2.1 에너지 평형식을 이용한 의한 접근방법

이 접근법에서는 보강 CFS에 에너지가 어느 정도 저장되는가에 따라 콘크리트의 구속효과를 결정한다. 횡구속된 콘크리트와 구속되지 않은 콘크리트에서 각 응력-변형률 곡선의 면적은 파괴시 콘크리트의 단위부피당 변형에너지를 나타낸다는 것을 이용하면, CFS로 구속효과를 준 경우와 그렇지 않은 경우의 변형에너지의 차이는 다음과 같다.

$$\rho_{st} \int_0^{\epsilon_{cu}} f_{st} d\epsilon_{st} = \int_0^{\epsilon_{cu}} f_{cc} d\epsilon_{cc} + \rho_{cc} \int_0^{\epsilon_{cu}} f_{st} d\epsilon_{st} - \int_0^{\epsilon_{cu}} f_c d\epsilon_c \quad (11)$$

식(11)에서 좌측항은 CFS의 최대변형에너지를 의미하며, 우측의 첫 항은 횡구속된 콘크리트의 변형에너지, 둘째 항은 압축의 경우 종방향 철근의 항복

에너지, 마지막 항은 구속되지 않은 콘크리트의 변형에너지를 의미하는 것으로, ρ_{st} 는 CFS의 횡방향 보강비, f_{st} 와 ϵ_{st} 는 CFS의 응력과 변형률, ϵ_{ws} 는 CFS의 최종파괴변형률, f_{cc} 와 ϵ_{cc} 는 구속된 콘크리트의 응력과 변형률, f_{st} 은 종방향 주철근의 응력, 그리고 ϵ_{sp} 는 무보강 콘크리트의 파괴변형률이다. 식(11)을 ϵ_{cu} 에 대해서 풀게 되면 최종변형률을 얻을 수 있다.

3.2.2 실험식을 이용한 접근방법

Hosotani 등⁽⁶⁾은 CFS로 보강된 콘크리트 공시체 실험을 통하여 그 응력-변형률 곡선을 도출하고 그 결과를 바탕으로 구속된 콘크리트 압축부재의 응력-변형률 모형을 실험식으로 제안하였다. 제안된 실험식은 다음과 같다.

$$\epsilon_{cu} = 0.00343 + 0.00939 \frac{\rho_{CF} \epsilon_{ws} E_{CF}}{f_{co}} \quad (12)$$

여기서, E_{CF} 는 CFS의 축방향 탄성계수이며 ρ_{CF} 는 CFS의 체적비로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\rho_{CF} = 4 \times N \times t_{CF} / d \quad (13)$$

여기서, t_{CF} 는 CFS 1층의 두께, N 은 CFS의 적층개수, d 는 직경을 의미한다.

3.3 CFS로 구속된 원형 콘크리트 압축부재의 응력-변형률 해석알고리즘

3.1과 3.2절에서 제시된 해석이론을 바탕으로 구속된 원형 콘크리트 압축부재의 응력-변형률 관계를 해석하는 알고리즘을 개발하였으며 그 순서도를 Fig. 4에 나타내었다.

본 해석알고리즘은 종방향 주철근을 포함한 단주의 횡보강 구속효과를 해석할 수 있도록 연구되었으나 실제로 주철근이 포함된 경우의 보강실험자료가 없는 관계로 철근이 포함되지 않은 무근 공시체를 대상으로 CFS 보강방법에 따라 응력-변형률 관계를 도출한 실험자료를 바탕으로 비교·검증을 실시하였다.

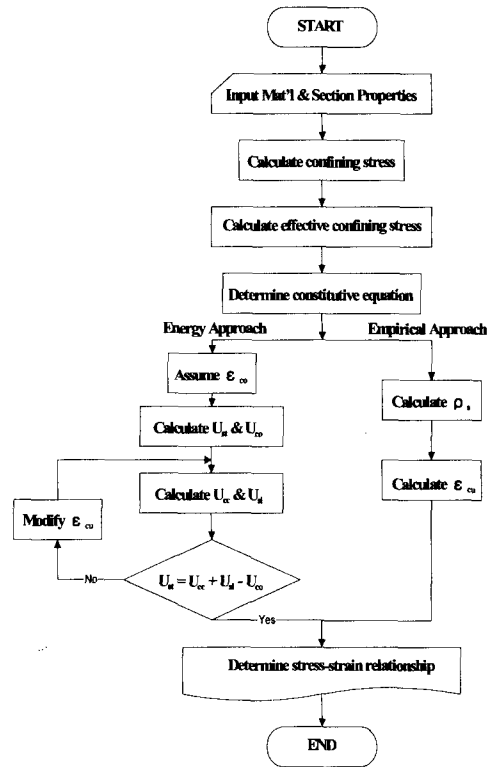


Fig. 4 Flowchart of confinement effect analysis algorithm

실험결과와 대상 공시체는 콘크리트 압축강도가 30 MPa인 지름 200mm, 높이 600mm의 원형 공시체이며 Fig. 5에는 비교연구대상 공시체의 대표적인 보강방법을, Table 2에는 보강시 사용된 CFS의 물성치를 나타내었다⁽⁶⁾.

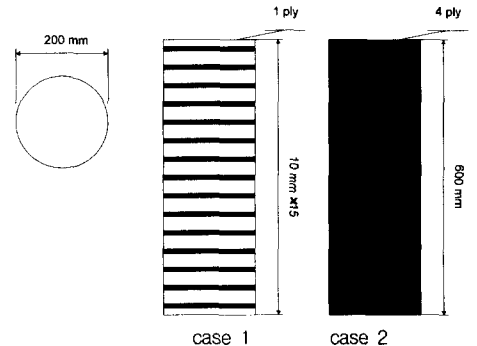
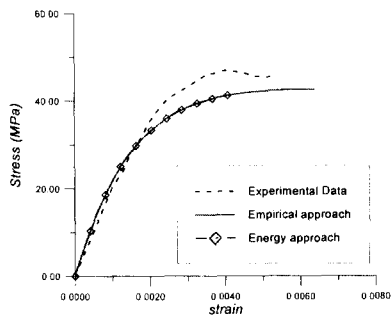


Fig. 5 Adhesion of CFS in Experiments

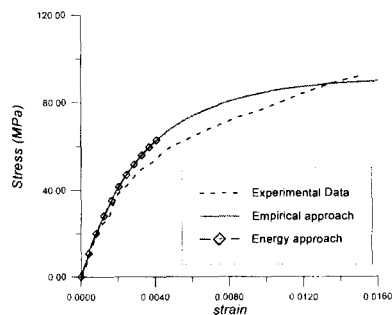
Table 2 Mechanical Properties of CFS used in Experiments

Properties		Value
Design Value	Thickness (mm)	0.163
	Tensile strength (MPa)	2,942
	Elastic modulus (MPa)	392,000
	Rupture strain	0.010
Measured Value	Thickness (mm)	0.169
	Tensile strength (MPa)	3,972
	Elastic modulus (MPa)	439,000
	Rupture strain	0.009

Fig. 6에는 대표적인 두 가지 보강방법에 따른 실험결과와 해석결과를 나타내었다. 그림에서 보듯이 에너지 접근방법에 의하여 횡구속된 콘크리트의 최종 파괴변형률을 계산하게 되면 해석된 연성보강효과가 실제 실험값에 비해 전반적으로 과소 평가되는 경향을 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 구속된 콘크리트의 응력-변형률 해석모형의 최종 파괴변형률 계산시 식(12)의 실험식을 사용한 Empirical approach 방법을 사용하였다.



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 6 Comparison of Stress-strain curves

4. CFS 적층판으로 보강된 콘크리트 기둥의 보강효과 해석

4.1 보강효과 해석 알고리즘

2장에서 연구된 CFS 적층판의 응력-변형률 해석 알고리즘과 3장에서 연구된 구속된 콘크리트 기둥의 응력-변형률 관계를 해석하는 알고리즘을 이용하면 CFS의 적층형태에 따른 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계식을 얻을 수 있다. 이 관계식을 이용하여 단면해석을 수행하게 되면 보강 CFS의 적층방식에 따른 콘크리트 기둥의 P-M 상관도와 P-ψ 곡선을 얻을 수 있다. 보강된 콘크리트 원형 단주의 보강효과를 해석적으로 산정해 보기 위하여 Fig. 7과 같은 보강효과 해석 알고리즘을 개발하였다.

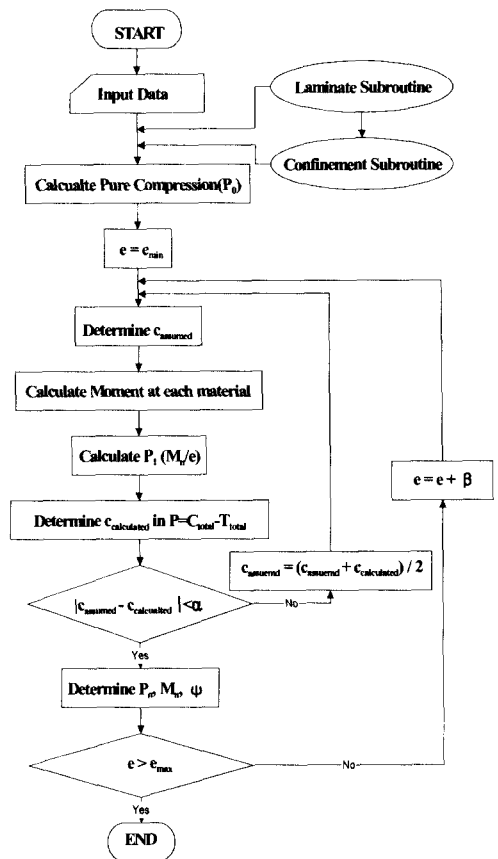


Fig. 7 Flowchart of section analysis algorithm for concrete column strengthened with laminated CFS

4.2 CFS 보강 원형 콘크리트 기둥의 응력-변형률 관계 해석

CFS 적층방식에 따른 원형 콘크리트 기둥의 보강효과를 해석적으로 산정해 보기 위하여 예제 기둥을 선정하고 보강방법에 따른 응력-변형률 관계를 해석적으로 도출하였다. 본 해석에 사용된 원형 단주의 제원을 Table 3에, 단면 형상을 Fig. 8에 나타내었다. 본 원형 단주의 보강재 물성값은 Table 1에서 제시된 물성값을 사용하였다.

먼저 압축력을 받는 원형 단주를 대상으로 보강 CFS의 적층방식에 따른 보강효과를 분석하기 위하여 실질적으로 사용될 수 있는 대표적인 4가지 적층방식 즉, 주응력 방향을 중심으로 fiber방향이 0° 를 이루는 적층방식인 $[0]_s$ 와 $[90]_s$, $[0/90]_s$, $[0/45/90]_s$ 에 따른 원형 콘크리트 기둥의 응력-변형률 곡선을 도출하여 Fig. 9에 나타내었다. 이때 보강 적층판의 두께는 0.15 cm로 고정하였다.

Table 3 Section details of the circular column

Items	Details
Diameter (cm)	152.4
Cover thickness (cm)	5.1
Area of tension steel (cm ²)	464.64
No. of steel bar	32
Tensile strength of steel bar (kg/cm ²)	2,800
Elastic modulus of steel bar (kg/cm ²)	2,040,000
Compressive strength of concrete (kg/cm ²)	210

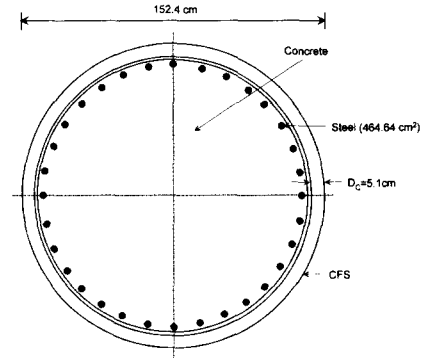


Fig. 8 Cross section and reinforcement of the circular column

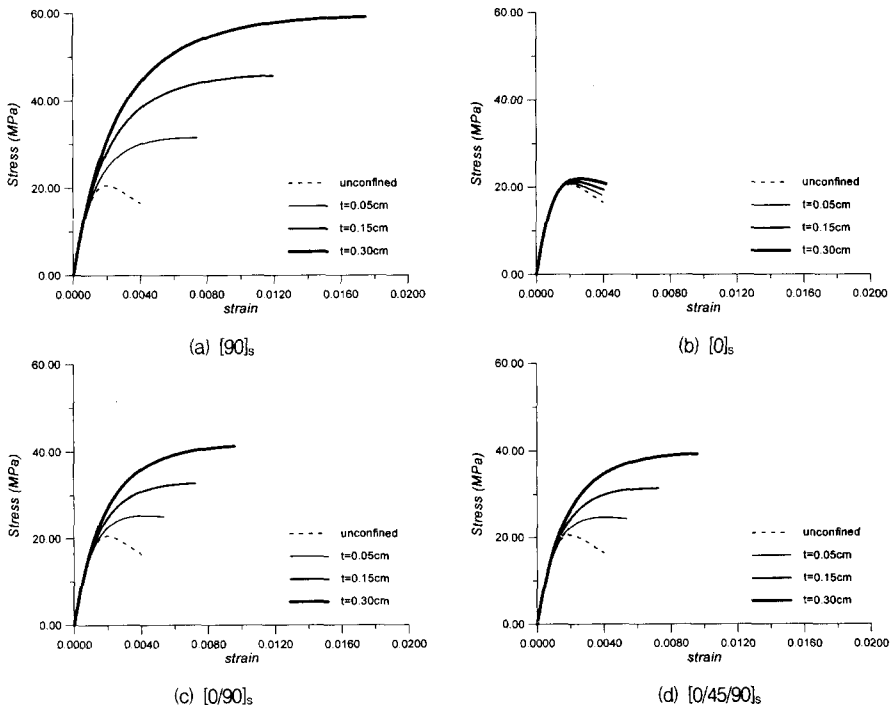


Fig. 10 Stress-strain curves of the circular concrete column according to strengthening thickness

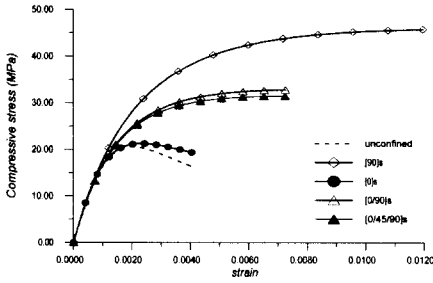


Fig. 9 Stress-strain curves of the strengthened circular concrete column according to different lamination angle

적층방식에 따른 응력-변형률 관계를 도출한 Fig. 9의 결과를 살펴보면, 압축력을 받는 원형 단주는 $[90]_s$ 적층방식으로 보강한 경우에 구속효과가 가장 우수하였으며, $[0]_s$ 적층방식으로 보강한 경우 구속효과가 가장 작게 나타남을 확인할 수 있었다. 나머지 $[0/90]_s$ 와 $[0/45/90]_s$ 적층방식으로 보강한 경우는 $[0/90]_s$ 가 다소 우수한 중간 정도의 구속효과를 보였다.

다음으로 각 적층방식에 대해 보강두께를 0.05,

0.15, 0.30 cm로 바꾸어 가며 콘크리트 기둥의 응력-변형률 곡선을 해석하여 보강두께의 증가에 따른 보강효과의 변화를 살펴보았다. Fig. 10의 결과는 Fig. 9에서도 암시한 바와 같이 보강방식이 적절치 못한 경우 보강재의 보강량 증가에 관계없이 보강효과를 기대할 수 없음을 확인시켜주며 (a), (c), (d)의 경우 보강량의 증가에 따른 보강효과의 증가는 선형적 관계에 미치지 못하는 점진적인 감소현상을 보임을 알 수 있다. 이는 참고문헌⁽³⁾의 실험적 결과와도 일치하는 내용이다. 보강두께에 따른 압축보강효과의 분석은 참고문헌⁽¹⁴⁾에 보다 자세히 언급되어 있다.

4.3 CFS 보강 원형 콘크리트 기둥의 P-M 상관도 및 P- ϕ 곡선 해석

콘크리트 기둥이 편심하중을 받는 경우에는 압축과 휨이 동시에 작용한다. 본 절에서는 CFS의 보강방식(적층방식)에 따라 압축력과 휨에 대해 보강

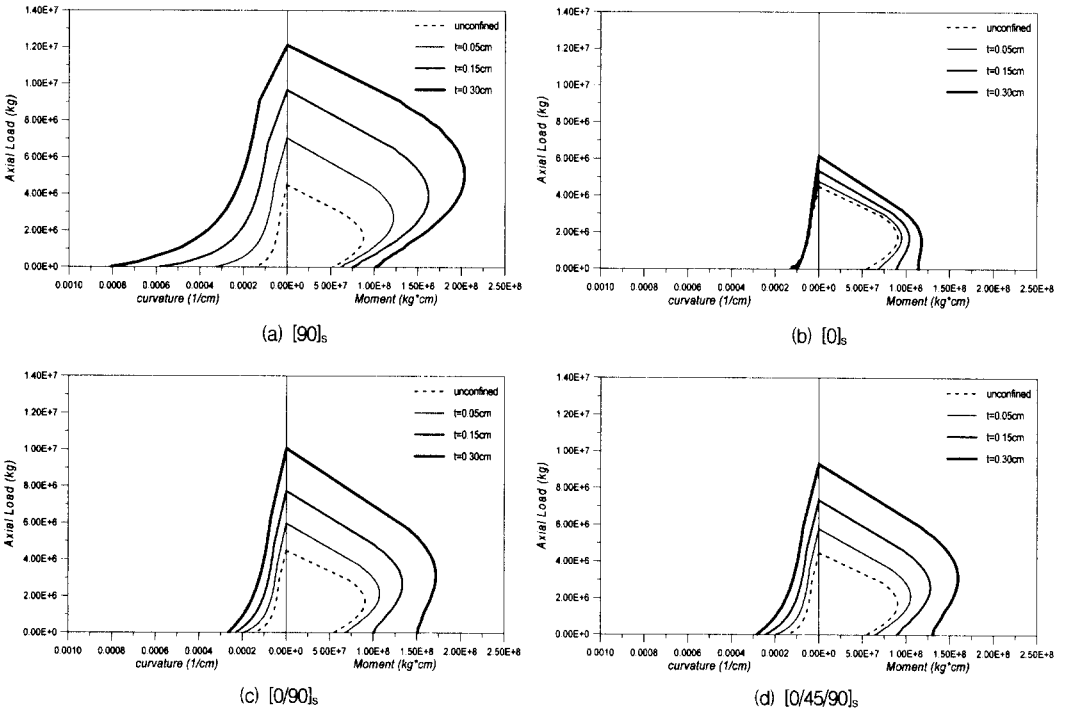


Fig. 11 P-M- ϕ curves of the strengthened circular concrete column

효과가 어떻게 달라지는지를 알아보기 위하여 4.2절에서 얻어진 구속된 콘크리트의 응력-변형률 곡선과 보강 CFS의 종방향 응력-변형률 관계를 사용하여 각 적층방식에 따른 콘크리트 기둥의 P-M 상관도와 P- ψ 곡선을 해석하였다. 보강두께를 0.05, 0.15, 0.30 cm로 변화시킨 경우 각 적층방식에 따라 얻어진 원형 콘크리트 기둥의 P-M 상관도와 P- ψ 곡선은 Fig. 11에 나타나 있다.

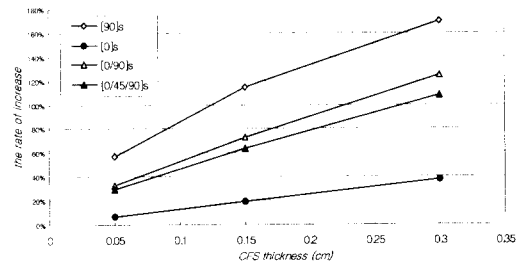
Fig. 11의 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 [90]_s 적층방식으로 보강한 경우, 압축보강효과와 연성보강효과가 우수하고 반면에 휩보강효과는 가장 낮음을 알 수 있었다. [0]_s 적층방식으로 보강한 경우에는 압축보강효과가 가장 작았으며 연성보강효과도 거의 없었다. 그러나 상대적으로 어느 정도의 휩보강효과를 가짐을 알 수 있었으며 저항 휩모멘트의 크기는 [0]_s 적층방식보다 다소 우수하였다. [0/90]_s 적층방식과 [0/45/90]_s 적층방식의 경우에는 [0]_s와 [90]_s 적층방식의 중간 정도 압축보강효과와 연성보강효과를 보였으며 휩보강효과는 가장 우수하였다.

각 적층방식에 대해서 보강효과의 차이를 확인하기 위해서 무보강시를 기준으로 하여 Fig. 12에 P₀, M₀, 곡률의 증가정도를 보강두께의 변화에 따라 나타내었다. 압축보강의 측면에서는 [90]_s, [0/90]_s, [0/45/90]_s, [0]_s 적층방식의 순으로 우수한 보강효과를 보임을 알 수 있었다. 휩보강의 측면에서는 [0/90]_s, [0/45/90]_s, [0]_s, [90]_s 적층방식의 순으로 우수한 보강효과를 보였으며 연성보강의 측면에서는 [90]_s, [0/45/90]_s와 [0/90]_s 적층방식의 순으로 우수한 효과를 보였다. [0]_s의 경우에는 철근이 보강되었을 때와 같은 거동을 함으로 인해 무보강시보다 보강시의 연성이 점차 감소하는 것을 알 수 있었다

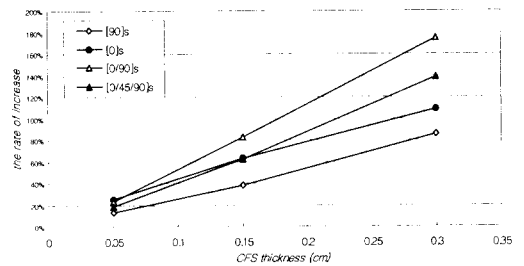
5. 결론

서로 다른 적층방식을 띤 CFS로 보강된 원형 콘크리트 기둥의 보강효과를 해석하기 위하여 Tsai-Hill 파괴기준을 이용한 적층판의 거동해석 알

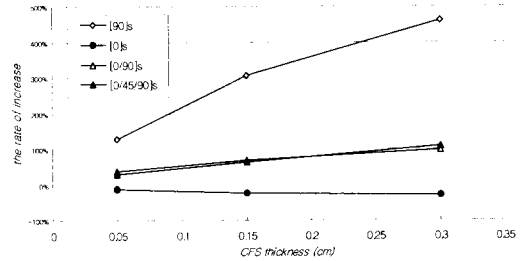
고리즘과 CFS로 횡구속된 콘크리트 압축부재의 응력-변형률 해석 알고리즘을 바탕으로 적층방식에 따른 보강효과를 산정할 수 있는 해석 알고리즘을 개



(a) P₀ increment



(b) M₀ increment



(c) ψ_{max} increment

Fig. 12 Comparison of the strengthening effects for 4 different strengthening ways

발하여 원형 콘크리트 기둥 문제에 적용해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 적층방식에 따른 구속된 콘크리트 압축부재의 응력-변형률 관계를 도출한 결과, [90]_s, [0/90]_s, [0/45/90]_s, [0]_s 적층방식의 순으로 횡구속효과를 나타내었다. [0]_s 적층방식의 경우 보강두께가 증가되어도 구속효과의 증진은 거의 없었다.
- 2) 적층방식에 따른 보강된 원형 단주의 P-M 상관도와 P- ψ 곡선을 해석적으로 도출해 본 결과

압축, 휨 및 연성에 대한 보강효과가 적층방식에 따라 크게 달라짐을 알 수 있었다. 즉, 압축보강시에는 $[90]_s$, $[0/90]_s$, $[0/45/90]_s$, $[0]_s$ 의 순으로, 휨보강시에는 $[0/90]_s$, $[0/45/90]_s$, $[0]_s$, $[90]_s$ 의 순으로, 연성보강시에는 $[90]_s$, $[0/45/90]_s$ 과 $[0/90]_s$, $[0]_s$ 의 순으로 보강효과를 나타내었다.

- 3) 향후 고분자복합재료를 사용한 보강시에는 적층방식에 따른 보강효과를 정확히 고려함으로써 부재의 휨, 전단, 압축에 대한 효율적인 보강설계가 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 1997년 건설교통기술 연구개발사업의 연구비 지원으로 이루어졌으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

1. 신영수, 홍영균, 홍기섭, 최완철, "탄소섬유쉬트르 황보강된 사각형 단면의 콘크리트 압축강도 특성", 대한건축학회지, 12(12), 1996, pp. 197-203.
2. 이승엽, 정성원, 황규표, 장성재, 음성우, 이수곤, "보강된 철근콘크리트 기둥의 구조거동에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 1997, pp. 665-672.
3. 이희경, 김성철, 유성훈, 김중구, 정란, "탄소섬유판으로 보강된 콘크리트 압축부재의 휨보강용력의 산정", 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 1998, pp. 593-600.
4. 정신욱, 류천, 김의성, 김화일, 김상섭, "탄소섬유로 황구속된 콘크리트의 강도 증진에 관한 연구", 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 1997, pp. 462-471.
5. Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R. and Li, M. W., "Strength and Ductility of Concrete Columns Externally Reinforced with Fiber Composite Straps", ACI Structural Journal, 91(4), 1994, pp. 434-447.

6. Hosotani, M., Kawashima, K. and Hoshikuma, J., "A Stress-Strain Model for Concrete Cylinders Confined by Carbon Fiber Sheets", Journal of Materials, Concrete Structures and Pavement, JSCE, 39(592), 1998, pp. 37-52(in Japanese).
7. Malek, A. M. and Saadatmanesh H., "Analytical Study of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Web-Bonded Fiber Reinforced Plastic Plates or Fabrics", ACI Structural Journal, 95(3), 1998, pp. 343-352.
8. Daniel, I. M. and Ishai, O., Engineering Mechanics of Composite Material, Oxford University Press, 1994.
9. Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, 114(8), 1988, pp. 1804-1826.
10. Popovics, S., "Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curves for Concrete" Cement and Concrete Research, 3(5), 1973, pp. 582-599
11. Willams, K. J. and Warnke, E. P., "Constitutive Model for Triaxial Behavior of Concrete", Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering, 19, 1975, pp. 1- 30.
12. Sheikh, S. A. and Uzumeri, S. M., "Strength and Ductility of Tied Concrete Columns", Journal of Structural Division, ASCE, 106(5), 1980, pp. 1079-1102.
13. Scott, B. D., Park, R. and Priestley, M. J. N., "Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and high Strain Rates", ACI Structural Journal, Proceedings 79(1), 1982, pp. 13-27.
14. 이상호, 김준휘, "적층성을 띤 탄소섬유쉬트르 보강된 콘크리트 원형 단주의 황구속압 효과 해석", 대한토목학회 학술발표회 논문집, 1998, pp. 211-214.

요 약

본 연구는 적층성을 띤 CFS로 보강된 콘크리트 기둥의 보강효과를 해석할 수 있는 모형을 개발하고 보강방식에 따른 보강효과를 분석하여 복합재료를 사용한 기둥의 보강 설계시 기준이 되는 기초자료를 제시 하는데 그 목적이 있다.

이를 위하여 본 연구에서는 Tsai-Hill 파괴기준을 이용하여 적층판의 거동을 해석할 수 있는 알고리즘을 개발하여 CFS 적층판의 적층방식별 응력-변형률 관계를 도출하였다. 또한 CFS로 횡구속된 콘크리트의 구성방정식을 해석하는 알고리즘을 개발하여 실험치와의 비교·분석을 통해 타당성을 검증하였다. 연구된 CFS 적층판의 응력-변형률 관계 해석 알고리즘과 CFS로 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계 해석 알고리즘을 바탕으로 적층방식을 고려한 CFS로 보강된 원형 콘크리트 기둥의 P-M 상관도와 P- ψ 곡선을 도출할 수 있는 알고리즘을 개발하고, 다양한 보강방식에 따른 보강효과를 분석하였다. 보강된 원형 콘크리트 기둥의 P-M 상관도와 P- ψ 곡선은 CFS의 적층방식에 따라 크게 달라짐을 알 수 있었으며, 압축, 휨 및 연성에 대한 보강효과도 보강방식에 따라 크게 달라짐을 확인할 수 있었다. 압축보강시에는 [90]_s, 휨보강시에는 [0/90]_s, 연성보강시에는 [90]_s 적층방식이 가장 우수한 보강효과를 보였다.

(접수일자 : 1999. 2. 2)