

단면형과 적층각의 변화에 따른 CFS보강 콘크리트 공시체의 압축거동

Compressive Behavior of CFS Strengthened Concrete Specimens with Various Cross-Sectional Shapes and Laminate Angles

김 석 호* 김 장 호** 이 성 태*** 이 상 호**** 김 진 근*****
Kim, Seok Ho Kim, Jang Ho Yi, Seong Tae Lee, Sang Ho Kim, Jin Keun

ABSTRACT

The repairing technique of surface wrapping concrete structural members using fiber composite sheet have been widely used. The research efforts have been limited to studying relative strength increase of repaired concrete structures rather than ductility improvement based on composite material effect and the interface effect between composite and concrete. The compression tests of CFS(carbon fiber sheet) reinforced concrete specimens with various cross-sectional shapes and laminate angles have been performed. FEM algorithm considering various parameters will be performed based on the obtained data. The results will be discussed in detail.

1. 서론

현대에 들어서는 사회의 발전과 인구의 증가에 따라 사회기반시설물의 안전성에 대한 관심이 날로 고조되고 있다. 시공불량, 환경의 변화, 유지관리의 소홀 등으로 사용성과 안전성이 노후화된 콘크리트 구조물의 보수·보강 공법에 대해서는 CFS, 아라미드섬유 및 유리섬유 등과 같은 신소재의 개발과 함께 많은 연구가 진행되어왔다. 그러나 이를 콘크리트 구조물에 적용함에 있어서 CFS와 콘크리트부재의 거동과 파괴메커니즘에 대한 연구는 활발히 진행중이나 fiber 방향, 복합재료 matrix와 fiber의 파괴메커니즘 등과 같은 복합재료의 효과는 고려하지 않고 단지 강도증가에 주안점을 둔 연구들이 많이 진행되어오고 있다.

Popovics(1973)가 구축된 콘크리트의 응력-변형률 관계에 대한 연구를 수치적으로 수행한 이후, Mander(1988),

- * 정회원, 세종대학교 토목환경공학과 석사과정
- ** 정회원, 세종대학교 토목환경공학과 조교수
- *** 정회원, 한국전력기술(주) 토목건축기술처 차장
- **** 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수
- ***** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

Daniel과 Ishai(1994), Hosotani(1997), Saadatmanesh(1998), 등 많은 학자들의 연구가 있었다. 그러나 CFS로 보강한 콘크리트 복합재료 영향을 고려한 연구는 아직도 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 압축 및 휨압축부재에서의 보강으로 인한 3축응력파괴를 파악하고자 세장비가 1:4인 공시체를 적층각의 변화와 다양한 단면형을 변수로 실험함으로써 CFS로 보강한 콘크리트 복합재료의 거동을 파악하고자 하였다. 또한 fiber 방향에 따른 적층각과 단면형, matrix 강도, 복합재와 콘크리트 사이의 응력, lamina와 lamina 경계면 등과 같은 변수들을 고려하여 보강효과를 산정할 수 있는 해석알고리즘개발의 기초연구가 수행되었다. 추후 연구 개발될 해석기법은 본 실험을 통해 얻은 자료와 비교·분석하여 CFS로 보강된 콘크리트의 거동과 파괴메커니즘을 보다 정확히 규명할 수 있을 것으로 기대된다.

2. CFS로 보강된 콘크리트 압축부재의 파괴실험

2.1. 실험개요

본 실험은 고분자복합재료로 황보강된 콘크리트 부재의 압축성능을 정확히 평가하는 것이 그 목적이며, CFS의 적층각, 적층두께, 공시체의 단면형상 등을 실험변수로 선택했다. 변위제어법(Displacement control 0.003mm/sec)을 사용하여 공시체가 peak point에 도달하기까지의 거동변화와 파괴양상을 파악하였으며, CFS로 보강된 콘크리트 압축부재의 응력-변형률 관계를 실험적으로 도출하였다. 아울러 실험을 통해 얻은 자료를 비교·분석할 수 있는 여러 변수를 고려한 해석알고리즘을 개발함으로써 보다 명확한 파괴메커니즘을 파악하고자 한다.

2.2. 공시체 제작

본 실험에 사용된 콘크리트는 국내에서 시판되는 1종 보통 포틀랜드 시멘트이며, 설계기준강도는 300kgf/cm²로 설계하였다. 굵은골재는 최대치수가 19mm인 것을 사용하였고, 공시체는 상온에서 28일 동안 수중양생하였다. 공시체의 수는 무보강 공시체 3개와 CFS로 보강한 공시체([0/0/0/0] 3개, [90/90/90/90] 3개, [0/45/-45/90] 3개, [0/90/90/0] 3개)를 15개씩 4번에 걸쳐 총 60개를 제작하였다.

표 1 콘크리트 배합표

설계강도 [kgf/cm ²]	물/시멘트비 [%]	단위수량 [kgf/m ³]	단위시멘트량 [kgf/m ³]	잔골재율 [%]	골재의절대용적 [m ³]	단위잔골재량 [kgf]	단위굵은골재량 [kgf]	공기량 [%]
300	54	185	342	42	0.687	727	1012	3

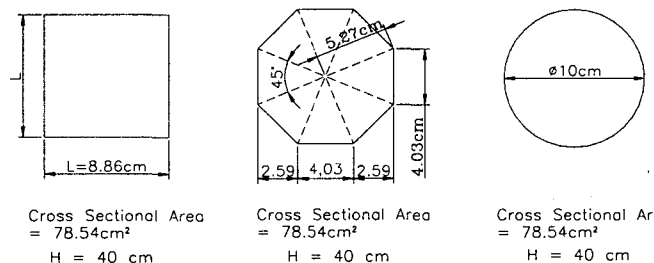


그림 3 공시체의 단면형상과 치수 (사각형, 팔각형, 원형)

단면의 변화에 따른 공시체의 파괴거동을 알기 위해 이 실험의 변수인 공시체의 단면형은 사각형, 팔각형, 원형으로 제작하였다. 공시체의 응력을 산출하는데 있어서 공시체에 가하는 하중을 동일하게 하기 위해 사각형, 팔각형 단면의 치수는 원형공시체와 동일한 단면적을 갖도록 설계하였다(그림 1). CFS는 국내에서 시판되는 SK-N300 제품을 사용하였으며 epoxy를 사용하여 콘크리트 표면을 다양한 적층방식으로 적층하였다. 적층방식은 각각의 ply에 대한 fiber 방향의 효과를 알기 위해 [0/0/0/0], [90/90/90/90], [0/45/-45/90], [0/90/90/0]를 채택하여 제작했다(그림 2). 보강작업 시 주의사항은 수지의 경화반응이 충분히 진행되어야 설계강도를 발휘할 수 있으므로 최소 1주일의 양생기간이 필요하다는 것이다.

표 2 CFS(Carbon Fiber Sheet)의 재료성질

성 질	단 위	SK-N300
축방향탄성계수(E_1)	kgf/cm ²	2.35×10^6
횡방향탄성계수(E_2)	kgf/cm ²	8.06×10^4
전단강도(G_{12})	kgf/cm ²	3.98×10^4
최대 푸아송 비(ν_{12})	-	0.31
축방향인장강도(F_{1t})	kgf/cm ²	4.5×10^4
횡방향인장강도(F_{2t})	kgf/cm ²	306.12
전단강도(F_6)	kgf/cm ²	10000
극한축방향인장변형률(ϵ_{1t}^u)	-	1.9
극한횡방향인장변형률(ϵ_{2t}^u)	-	0.8
축방향압축강도(F_{1c})	kgf/cm ²	1.5×10^4
횡방향압축강도(F_{2c})	kgf/cm ²	0.7×10^3

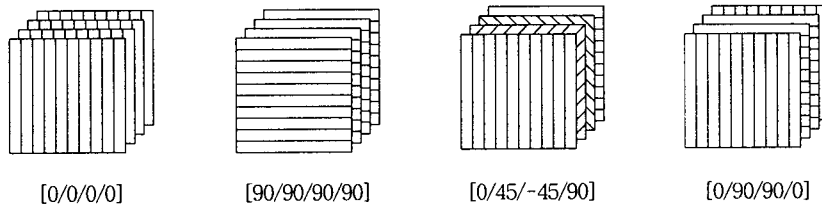


그림 2 CFS의 적층방식

표 3 Steel tie의 재원

재료	수량	치수	주의사항
Stainless steel	사각형, 팔각형, 원형 (총 3 set 제작)	단면: (cm) 2.5/1.0/10/1.0/2.5 높이: (cm) 2.5	보강 공시체의 경우, CFS보강 두께를 고려하여 제작해야 함



그림 3 CFS보강 공시체의 실험장면



그림 4 무보강 공시체의 실험장면

이 실험의 공시체는 세장비가 1:4인 비교적 긴 공시체이므로 표면 그라인딩 작업시 세심한 주의를 기

올려야 한다. 재하실험시 공시체가 편심을 받는 것을 방지하기 위하여 공시체 상·하단면 사이의 수평성과 공시체 상·하단면과 높이 사이의 수직성을 유지해야 한다.

보강재는 콘크리트와 일체화되었다 해도 압축실험 시 양단에서는 섬유가 노출된 부위에서 shear brush failure가 일어나게 되고, 이것은 복합재료에 의한 순수한 보강효과를 도출하는데 오차를 발생시키는 요인이 된다. 따라서 이러한 shear brush failure를 방지하기 위하여 본 실험에서는 steel tie로 공시체의 양 끝단을 감쌌다. Steel tie의 재원은 표 3과 같으며 실험장면은 그림 3과 4에 나타나 있다.

3. 실험결과와 거동분석

CFS로 보강한 콘크리트 압축부재의 파괴실험 결과는 다음과 같다.

- (1) [0/0/0/0]로 보강한 공시체는 보강재가 둘레 전체에 걸쳐 압축방향으로 여러 갈래로 찢어지는 형상을 보였다. 이것은 보강재의 수평방향이 수직방향보다 인장하중에 약하기 때문이다. [90/90/90/90]로 보강한 공시체는 긴 소성구간을 나타내다 갑작스럽게 파괴되는 양상을 보이는데 이것은 fiber가 항복하여 끊어지기 때문인 것으로 판단되며 파괴이후 연성의 증가는 기대할 수 없었다. 이것은 과대철근보와 같은 양상이다. [0/45/-45/90]의 경우 [0/90/90/0]로 보강한 공시체보다 낮은 응력에서 파괴되는데 이것은 콘크리트 압축부재가 $\pm 45^\circ$ 로 전단파의 형상을 띄며 파괴되려는 경향 때문에 섬유방향의 직각방향으로 보강재가 파괴된 것으로 판단된다. 한편 이 경우 [0/90/90/0]보다도 보강효과를 더 기대할 수 없다고 판단된다.

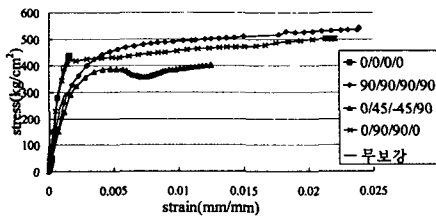


그림 5 응력-변형률 곡선(사각형공시체)

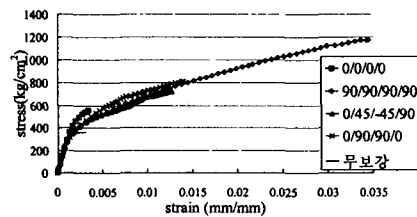


그림 6 응력-변형률 곡선(팔각형공시체)

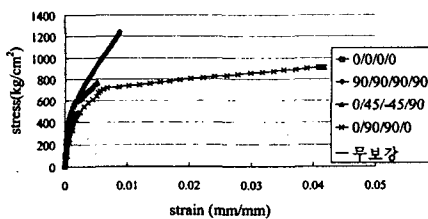


그림 7 응력-변형률 곡선(원형공시체)

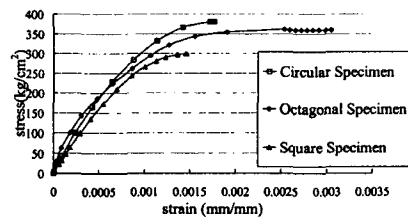


그림 8 응력-변형률 곡선(무보강공시체)

- (2) [0/0/0/0], [0/45/-45/90]로 보강된 사각형과 팔각형 공시체와 무보강 공시체는 변형률이 0.002에 못 미쳐서 파괴되는 형상을 보였다. 이것은 각 단면의 모서리부분에서 응력집중현상이 일어나 조기 파괴현상을 일으킨 것으로 판단된다. 팔각형보다는 사각형 공시체에서 이러한 현상이 뚜렷하였으며 이 경우 모서리 부분의 국부파괴에 의한 좌굴현상도 발생하여 이상적인 파괴거동을 일으키지 못하였다.
- (3) 원형 공시체의 경우 응력집중현상이 사각형, 팔각형 공시체 보다 적고 응력을 고루 분산하기 때문에 예상한 결과와 유사한 결과를 보였다. [0/45/-45/90], [0/90/90/0]로 보강한 공시체들은 국부적으로

로 찢어지는 형상을 보였으며 CFS를 물고 떨어져 나가는 rip-off 현상은 발견되지 않았다. [90/90/90/90]로 보강한 것을 제외하고 대부분의 공시체는 일반적으로 보강두께가 두껍기 때문에 보강재가 공시체와 박리되는 현상을 일으키지는 않았다.

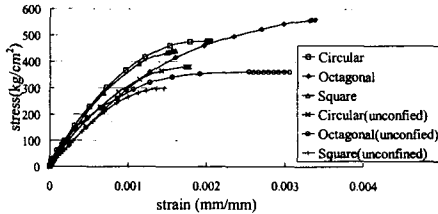


그림 9 응력-변형률 곡선(0/0/0/0)

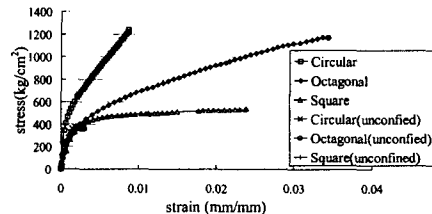


그림 10 응력-변형률 곡선(90/90/90/90)

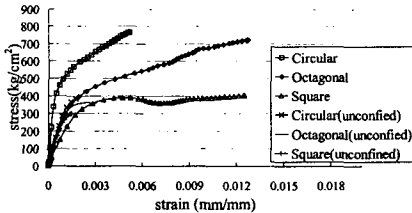


그림 11 응력-변형률 곡선(0/45/-45/90)

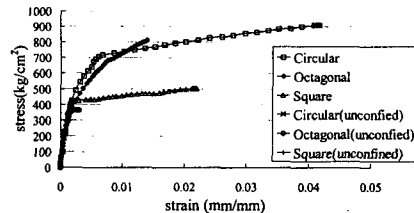


그림 12 응력-변형률 곡선(0/90/90/0)

4. 복합재료 적층판의 해석알고리즘

본 연구에서는 수치적으로 보강적층판의 파괴강도를 산정할 수 있는 알고리즘과 보강효과해석을 위한 알고리즘을 개발하였으며, 기존의 콘크리트 구속모델들에 개발된 알고리즘을 접목하여 보강부재의 응력-변형률 관계를 도출할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 또한 이러한 연구결과를 바탕으로 유한요소해석방법에 입각한 보강콘크리트부재의 거동해석 알고리즘을 개발 중에 있다. 본 장에서는 기본적인 해석 알고리즘에 대해 소개한다.

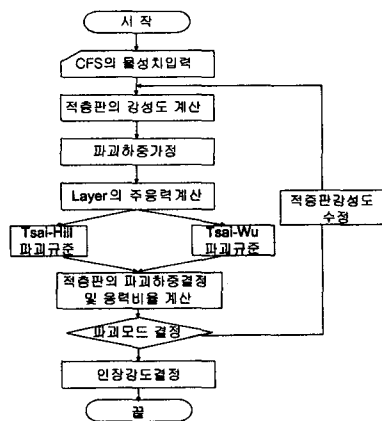


그림 13 적층판의 파괴해석 흐름도

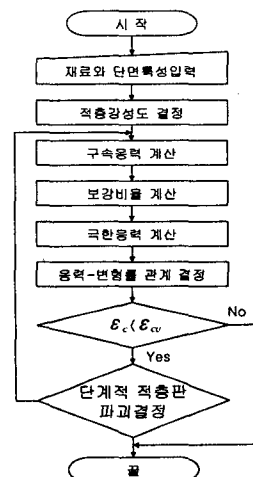


그림 14 구속효과해석 알고리즘 흐름도

(1) 적층판의 파괴기준

적층판의 파괴거동을 해석하기 위해서는 먼저 단일층의 파괴를 예측하고 각 층의 파괴에 따른 전체적인 파손누적을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 단일층의 파괴를 예측하기 위하여 Tsai-Hill과 Tsai-Wu의 두 가지 파괴기준을 사용하였다. 그림 13은 적층판의 파괴해석과정을 보여주고 있다.

(2) 복합재료로 구속된 콘크리트의 응력-변형률을 해석할 수 있는 알고리즘의 개발

복합재료로 확보강된 콘크리트 부재의 응력-변형률에 대한 모델의 실험적 또는 이론적인 제안식에 보강 각도와 대칭·비대칭성 등의 적층방식에 따른 효과 및 적층판의 파괴이론을 접목시켜 적층방식에 따른 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 해석할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 본 연구에서는 Mander 등(1988), Hosotani 등(1997), 등에 의해 제안된 구속된 콘크리트의 응력-변형률 모델들을 연구의 대상으로 하였다. 그림 14는 구속효과 해석 알고리즘의 순서도를 나타내고 있다.

5. 결론

본 논문에서 단면형과 적층각의 변화를 준 CFS보강 콘크리트의 실험에 의해 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 변위제어방식을 채택하여 CFS로 보강된 콘크리트 압축부재의 거동을 파악하였다.
- (2) Fiber의 적층방향이 콘크리트의 구속효과에 매우 중요한 역할을 하는 것으로 판단되었다.
- (3) 압축을 받는 부재의 단면형은 부재단면 전체에 응력을 고루 분산시킬 수 있는 원형, 팔각형, 사각형의 순서로 보강효과가 우수한 것으로 판단된다.
- (4) 본 연구에서 개발된 해석알고리즘을 바탕으로 다양한 변수를 고려할 수 있는 보강부재의 FEM해석알고리즘이 개발될 경우 보수·보강분야의 발전에 크게 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국원자력연구소(KAERI)의 원자력 안전성 향상 기술개발 위탁연구과제 연구비지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Popovics, S., "Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curves for Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 3, No. 5, 1973 pp. 582-599.
2. Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 8, 1988, pp. 1804-1826.
3. Daniel, I. M. and Ishai, O., "Engineering Mechanics of Composite Materials", Oxford University Press, Boston, 1994.
4. Hosotani, M., Kawashima, K. and Hoshikuma, J., "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, 1997, pp. 209-216.
5. 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, Vol. 95, No. 3, 1998, pp. 343-352.