

탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트 기둥의 해석적 평가

Analytical Evaluation of Reinforced Concrete Columns Reinforced with Carbon Fiber Reinforced Polymers

신 인 호* 하 성 진**
Shin, In-Ho Ha Seongjin

Abstract

The need for seismic reinforcement is increasing as the damage to structures caused by earthquakes increases. Among the methods of seismic reinforcement, the method of using carbon fiber sheets has recently been widely used. Accordingly, the experiment was conducted in this study by setting the material properties and adhesion area of the carbon fiber sheet as variables, and the effect of each variable on the reinforced concrete pillar was identified. In this study, it is necessary to measure the destructive behavior, stress, displacement, and strain of reinforced concrete columns due to seismic load, and analyze the performance of materials and efficient reinforcement methods. By determining, we model seven column structures using three types of carbon fiber sheets through ABAQUS and conduct finite element analysis.

키워드 : 탄소섬유시트, 철근콘크리트 기둥, 내진보강, 유한요소해석

Keywords : Carbon Fiber Reinforced Polymer, Reinforced Concrete Columns, Seismic Reinforcement, Finite Element Analysis

1. 서 론

전 세계적으로 지속적인 증가 추세를 보이는 지진으로 인해 우리나라 또한 막대한 피해를 받고 있다. 2016년 경주지진과 2017년에 발생한 포항지진 등을 통해 이제는 우리나라도 지진 피해에 따른 안전국가라 할 수 없는 상황이다. 하지만 현재 지어진 건축물을 기준으로 전체 건축물 중 약 80 %가 내진설계가 반영되지 않아, 내진 보강의 필요성이 대두된다. 철근콘크리트 기둥 내진 보강공법으로 주로 단면증설법과 강판보강법이 사용되었으나, 이는 시공성이 낮고, 구조체의 중량 증가 및 작업 공간, 단면의 일체성 확보 어려움 등 단점이 있다. 그에 반해 탄소섬유시트(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) 공법은 높은 보강 효과와 탁월한 내구성으로 고강도, 고탄성의 탄소섬유가 1방향으로 배열되어 강판접착과 같은 내하력 향상이 가능하며, 비중이 철의 1/6인 경량성을 가지므로, 시공 후 구조물의 무게증가가 거의 없다. 또한, 편리한 시공

성으로 중장비가 불필요하며, 구조물의 복잡한 형태에도 부드럽게 대응할 수 있고, 뛰어난 내부식성, 방수성을 가진다. 하지만 비교적 최근에 개발된 탄소섬유시트 보강공법은 타 공법에 비해 연구자료가 부족한 실정이다.

Mi so Bak (2021)의 연구에서는 탄소섬유시트를 활용하여 콘크리트 구조물을 보강하는 경우 보강 면적과 콘크리트의 강도 관계성을 파악을 목적으로 둔다. 실험 결과, 최초 변형 발생 시점의 강도는 탄소섬유시트의 보강 면적과 관계없이 모든 시험체가 일정한 지점에서 변형이 시작되며, 인장강도는 보강 면적에 비례하여 증가하였다.

Sang ho Han (2003)의 연구는 탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트 부재에 있어, 탄소섬유시트와 콘크리트 사이의 부착 특성은 그 부재의 내력과 파괴양상에 큰 영향을 미친다고 보고하였다. 탄소섬유시트와 콘크리트 사이를 완전부착으로 가정한 방법과 부착-미끄럼 모델로 고려한 두 가지 방법을 제시하고, 유한요소해석을 통해 하중-변위, 하중-철근의 변형도 관계, 탄소섬유시트의 응력 분포 및 파괴거동의 결과를 도출하였다.

Do hyeong Kim (2016)는 초고분자량 폴리에틸렌 섬유(UHMWPE)로 보강된 보의 보강 성능을 연구하였다. 기존 탄소섬유시트와 UHMWPE로 보강된 실험체를 정적가력실험을 통해 비교 분석하여 기존의 보강법보다 강도 및 연성능력에서 우수한 성능을 가진다고 제시하였다.

따라서 본 연구에서는 탄소섬유시트의 종류와 부착면

* 전 한국교통대학교 건축학과 연구원

** 한국교통대학교 건축공학과 부교수, 공학박사

(Corresponding author : Department of Architectural Engineering, Korea National University of Transportation, sjha@ut.ac.kr)

2025년 국립한국교통대학교 글로벌대학30사업의 지원을 받아 수행하였음

적에 대한 기존연구를 고찰하고, 탄소섬유시트 종류에 따른 물리적 성질을 비교한다. 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS CAE를 통해 기둥 구조체를 모델링한다. 무보강 구조체와 표준 탄소섬유시트 (Std CFRP, 이하 Std), 고탄성 탄소섬유시트 (HMCF CFRP, 이하 HMCF)를 부착한 보강 구조체에 반복하중 작용 시 철근콘크리트 기둥의 변형을 비교를 통하여 탄소섬유시트 종류별 성능을 분석한다. 이때 보강된 구조체의 경우, 탄소섬유시트를 기둥 옆면 전체에 부착하는 전면부착, 중앙부 일부구간을 비부착하는 부분비부착 보강방법으로 나누어, 부착면적 또한 변수로 둔다. 본 연구는 탄소섬유시트의 종류 및 부착면적에 따른 최적의 효과를 낼 수 있는 보강방법 도출을 위한 해석적 평가를 진행한다.

2. ABAQUS CAE 프로그램의 소개 및 모델링

2.1 해석 프로그램 소개

구조해석에서 사용되는 유한요소 해석은 유한개의 요소로 분할하여 구조 및 물리적 시스템의 행동을 모델링하고 예측하기 위한 수치해석을 말한다. 철근콘크리트 기둥과 탄소섬유시트의 부착 및 지진하중의 반복하중을 해석적으로 평가하기 위하여 ABAQUS CAE 프로그램을 사용할 수 있다. 본 연구에서 사용하는 ABAQUS CAE 프로그램은 구조물을 유한요소로 나누고 재료의 특성, 하중, 경계조건, 응력, 변형, 온도 분포 등을 시뮬레이션 하여 결과를 얻고 3D로 시각화 할 수 있는 유한요소 해석 프로그램이다.

2.2 대상 모델링

반복하중에 의한 탄소섬유시트의 내진성능을 평가하기 위해 ABAQUS CAE에서 모델링한 철근콘크리트 기둥은 Fig. 1과 같다. 무보강 철근콘크리트 기둥을 300 mm×300 mm×2000 mm 이며, 주근은 4-D20, 스티럽은 D6 피복두께 40 mm를 공제한 260 mm×260 mm, 간격 100 mm로 21개 배치하였다. 전면부착을 하는 탄소섬유시트는 기둥과 동일한 크기이며, 부분비부착에 사용되는 탄소섬유시트는 300 mm×300 mm×500 mm으로 중앙부 구간을 비부착하고, 두께는 0.146 mm로 통일하였다. 또한 모든 모델링 구조체는 Fig. 2와 같이, Yue et al. (2019) 지진과 프로토콜을 사용하여 동일한 지진하중을 입력하였다.

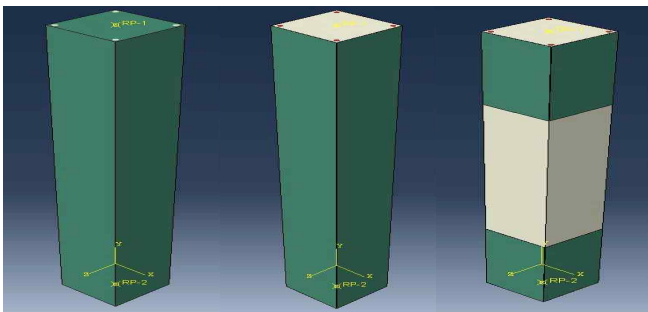


Figure 1. ABAQUS 모델링 형상

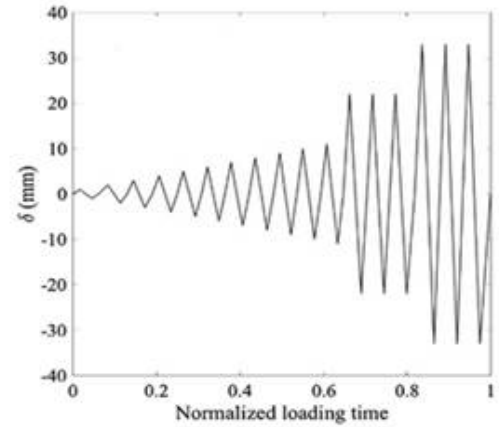


Figure 2. 지진하중 프로토콜

2.3 변수 선정

본 연구에서는 보강재 탄소섬유시트의 종류에 따른 물성치와 무보강 기둥 구조체 (Unreinforced test Specimen, US), 보강섬유 전면부착 (Reinforcement fiber attached to the Front, RF), 부분비부착 (Partial non-attachment of Reinforcement Fiber, RFP)으로 부착면적을 다르게 하여 변수를 선정하였다. 모델링에 사용되는 탄소섬유시트의 물성치는 Table 1과 같으며, 변수에 따른 5개의 시험체 종류는 Table 2에 정리하였다.

모든 시험체의 밑면은 Encaster로 고정하고 윗면은 지진하중을 받았을 때의 변형을 확인하기 위해 자유단으로 설정하였다. Fig. 1에 나타나는 RP1과 RP2의 응력-변위 관계, 최대하중, 변형률 등을 시간 증분 최소 1E-25, 최대 10초로 나누어 진행하였다.

Table 1. 탄소섬유시트 물성치

	Std CF	HMCF CF
탄성계수 (MPa)	135000	175000
전단계수 (MPa)	5000	5000
포아송비	0.3	0.3

Table 2. 시험체 종류

	US	SRF	SRFP	HRF	HRFP
부착면적	-	F	P	F	P
섬유종류	-	Std		HMCF	

*F : 전면부착, P : 부분비부착

3. 해석결과 및 분석

본 절에서는 앞서 모델링한 시험체에 대하여 해석결과를 도출한다. 이때 해석 진행 중 지진파의 로딩타임이 길어짐에 따라 오류가 발생하였다. 따라서 최대하중에서의 극한변형률을 비교분석을 위해 이력곡선의 데이터가 최대하중 도달 후 하중값이 떨어지는 것을 확인하면서, 각 시험체에 따라 증분시간을 조절하며 진행하였다.

3.1 섬유보강시트 종류에 따른 결과 비교

반복가력 해석결과는 Fig. 3에 나타나며, 섬유보강시트 종류에 따라 US는 변위가 31.5mm일 때, 41496.2N, SRF는 31.4104mm일 때, 41639.7N, HRF는 30.5162mm일 때, 42229.9N의 최대하중을 갖는 것으로 나타났다.

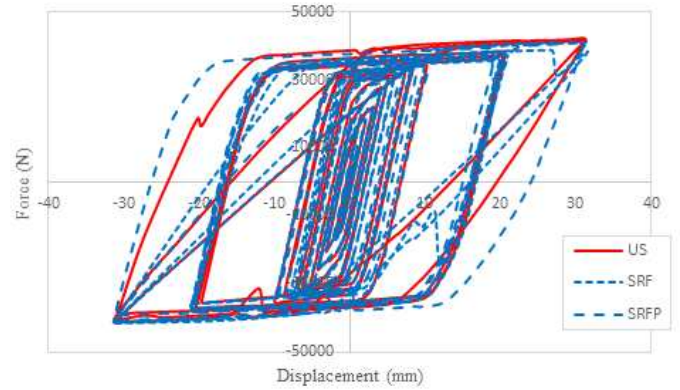
또한 US는 변형률이 1.575%, SRF 1.571%, HRF는 1.526%로 나타나며, 고탄성 섬유시트로 보강된 해석체가 가장 작게 나타났다. 고탄성 탄소섬유 시트의 경우 같은 하중이 가해졌을 때, 무보강 해석체보다 낮은 변형률을 보인다. 이는 같은 변위를 발생시키기 위해 보강한 해석체는 더 높은 하중을 필요로 한다고 볼 수 있다. 높은 하중이 적용되어도 변위를 최소화해야 하는 내진보강의 기준에서 볼 때, 이는 타당한 보강법이라고 해석적으로 평가할 수 있다. 해석 결과는 Table 4에 정리하였다.

Table 4. 해석결과

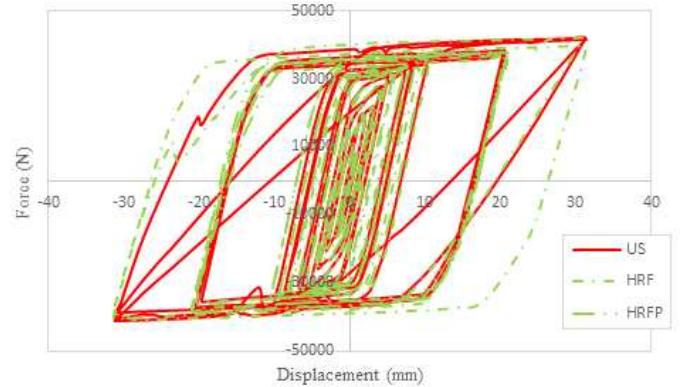
	US	SRF	HRF	SRFP	HRFP
최대하중 (N)	41496.2	41639.7	42229.9	41247.3	38876.9
변위 (mm)	31.5	31.41	30.516	31.22	20.999
변형률 (%)	1.575	1.571	1.526	1.561	1.051

3.2 섬유보강시트 부착면적에 따른 결과 비교

부착 면적에 따른 반복가력 해석결과는 Fig. 4.5에 나타나며 변형률을 비교해본 결과, 부분비부착 모델인 SRFP와 HRFP는 각각 변위가 31.2203mm와 20.9993mm일 때, 최대하중 41247.3N, 38876.9N으로 변형이 발생하였다. 따라서, SRFP의 변형률은 1.561 %, HRFP는 1.051 %로 나타난다. HRFP는 해석 진행 중 증분의 에러가 발생함에 따라 더 이상 해석이 진행되지 않고, 25초에서 해석이 정지된 것을 확인하였다. 탄소섬유시트를 전면부착하여 보강한 SRF와 HRF는 부분비부착하여 보강한 SRFP, HRFP와 0.014 %, 0.475 %의 변형률 차이를 보인다.



(a) 표준 탄소섬유시트의 부착면적에 따른 결과 비교



(b) 고탄성 탄소섬유시트의 부착면적에 따른 결과 비교

Figure 4. 섬유보강시트 종류별 부착면적에 따른 해석결과 비교

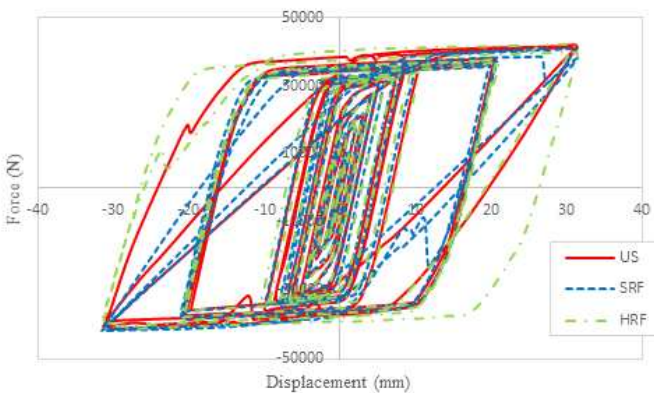


Figure 3. 섬유보강시트 종류에 따른 해석결과 비교

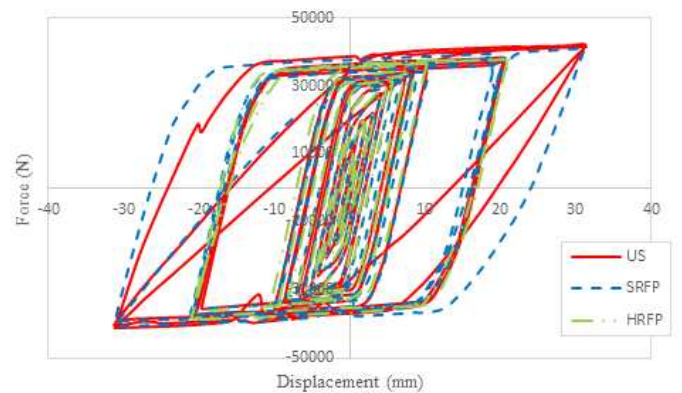


Figure 5. 섬유보강시트 종류에 따른 부분비부착 해석결과 비교

4. 결론

현재 우리나라는 1인 가구가 증가함에 따라 다세대 주택의 건축물이 많이 생겨나고 있는 추세이다. 하지만 다세대 주택의 1층은 대부분 지진에 취약한 필로티로 구성되어 있어 기둥 파괴 등의 피해가 발생하며 내진안전성에 문제가 제기되고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트 기둥을 유한요소해석을 통하여 탄소섬유시트 종류의 물성치와 부착면적에 따른 내진성을 비교 분석하였다. 연구를 통해 분석한 결론은 다음과 같다.

1) 최대하중이 발생하였을 때의 변위 확인 결과 US에 가해지는 하중이 SRF와 HRF에 비해 가장 작았지만 3개의 모델링 중에서 변형이 가장 크게 나타난다. 무보강과 보강 구조체의 변형의 차이는 미세하지만 탄소섬유시트는 같은 변형을 발생시키기 위해 더 높은 하중을 필요로 한다고 볼 수 있으므로 변위를 최소화해야 하는 내진보강 기준으로 타당한 보강법인 것을 확인할 수 있다.

2) 탄소섬유시트 종류별 변위의 해석 결과 US와 SRF보다 더 높은 하중을 받았지만 HRF가 가장 적은 변형을 보인다. 따라서 고탄성 탄소섬유시트가 내진보강 성능에 더 효율적이라고 판단할 수 있다.

3) 부착면적에 따른 변위 확인 중 HRFP는 해석 진행중 증분의 오류로 인해 25초 이후로 진행이 불가함에 따라 SRF와 SRFP의 비교를 진행하였다. SRFP의 최대하중의 변위는 41247.3N에 변형 31.22mm이므로 SRF의 비슷한 데이터 하중 41442.9N의 확인 결과 31.078mm의 변형이 확인된다. 비교결과 전면보강법의 내진성능평가가 우수한 것을 도출할 수 있다.

본 연구는 탄소섬유 시트를 활용하여 철근콘크리트 기둥을 보강하는 경우 보강 면적과 탄소섬유 재료별 물성치가 내진보강에 미치는 영향을 파악하기 위하여 해석을 진행하였다. 해석결과를 통하여 탄소섬유시트가 철근콘크리트 무보강 기둥과 보강 기둥의 변형률 차이, 보강재로서의 적합성을 확인할 수 있었다. 하지만 탄소섬유시트의 보강 성능의 차이는 미세하게 나타났으므로 두께 및 겹수, 재료별 경제성 등을 고려하여 추가 검토가 필요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. 박미소, 조승호, 하정수, &노영숙. (2021). 콘크리트 강도와 탄소섬유 부착면적에 따른 보강 효과에 관한 실험적 연구. 한국콘크리트학회 학술대회 논문집 , 33 (2), 149-150.
2. 송성휘. (2020). 탄소섬유 시트로 보강된 RC 기둥의 내진 성능에 관한 해석적 연구 (Doctoral dissertation, 한양대학교).

3. 이용택, 이정희, 황황순, 송성용, 나정민, &이리형. (2002). 탄소섬유시트에 의한 RC 보의 휨 보강효과에 관한 유한요소 해석 (FEM Analysis on RC Beam Retrofitted with Carbon Fiber Sheet). 대한건축학회 학술발표대회 논문집-구조계 , 22 (2), 123-126.
4. Michał, S., &Andrzej, W. (2015). Calibration of the CDP model parameters in Abaqus. World Congr Adv Struct Eng Mech (ASEM 15), Incheon Korea .
5. 박미소, &노영숙. (2022). 콘크리트 강도에 따른 탄소섬유시트의 보강효과에 관한 실험적 연구. 한국산학기술학회 논문지 , 23 (4), 474-482.
6. LTD, P. C. (2009). Mechanical Properties of Carbon Fibre Composite Materials: Fibre/Epoxy resin (120 C Cure).
7. 신영수, 홍기섭, 홍영균, &최완철. (1996). 탄소섬유시트로 횡 보강된 사각형 단면의 콘크리트 압축강도 특성 (Compressive Strength of Concrete Cube Confined with Carbon Fiber Sheets). 대한건축학회 논문집 , 12 (12), 197-202.
8. 오명호, 김도균, &김한수. (2004). 탄소섬유시트의 비부착이 보강 부재의 휨내력에 미치는 영향에 관한 실험실 연구. 대한건축학회 논문집-구조계 , 20 (1), 41-50.
9. 한상호, &강성수. (2003). 탄소섬유시트로 보강된 RC 보의 파괴거동에 관한 유한요소해석. 대한토목학회 학술대회 , 1689-1694.
10. 김도형, 김승직, 장준호, &권영태. (2016). 초고분자량 폴리에틸렌 섬유 시트로 보강된 RC 보의 거동에 관한 실험적 평가. 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 859-860.
11. Yue, J., Qian, J., &Beskos, D. E. (2019). Seismic damage performance levels for concrete encased steel columns using acoustic emission tests and finite element analysis. Engineering Structures , 189 , 471-483.