

FRP시트와 비좌굴가새를 적용한 저층 필로티 구조물의 보-기둥 연결부 거동 해석에 관한 연구

Analysis of Lateral Retrofitting Effect by FRP and BRB for Beam-column Element Joint of Low-Rise Piloti Buildings

김민숙¹⁾ · 윤소희²⁾ · 이영학³⁾ · 김희철⁴⁾

Kim, Min-Sook · Yoon, So-Hee · Lee, Young-Hak · Kim, Hee-Cheul

국문 요약 >> 본 연구는 반복 횡하중 하에서의 기둥부재와 보-기둥 연결부에 대한 구조 성능 확인을 위하여 기 수행된 실험을 토대로 해석모델을 수립하고 사용 프로그램의 유용성과 실용성을 평가하는 것을 목적으로 하였다. 기존 연구자들에 의해 제안된 콘크리트와 철근의 이력 모델을 비선형 해석 프로그램인 PERFORM3D에 적용하여 수행되었다. 결과로서, 반복 횡하중 하의 비보강 보-기둥 연결부재의 해석과 실험결과가 비교적 일치함을 확인하였다. 이로써 입증된 비보강 시험체의 해석 모델에 탄소와 아라미드 섬유시트 그리고 비좌굴가새를 추가 적용하여 실험결과와 비교·검증하여 내진 성능 보강의 해석모델을 수립하였다. 이는 기존 구조물에 대한 보강에 있어서, 해석을 통한 사전 성능 검토에 활용함으로써 시간과 물질적 측면에서의 경제성 도모에 기여할 것으로 예상된다.

주요어 섬유시트, 비좌굴가새, 반복 횡하중, 비선형 해석

ABSTRACT >> The experiment was carried out to investigate lateral retrofitting effects by FRP and BRB (Buckling-Restrained Brace) for beam-column elements. These results were utilized to establish an analytical model using commercial nonlinear analysis software, PERFORM3D. Concrete and steel analytical models previously proposed by several scholars were adopted for this analytical study. A proposed analysis model showed reasonable accuracy compared with the test results on the beam-column elements strengthened FRP sheets and BRB, as well as with the non-strengthened element subjected to lateral cyclic loadings. Subsequently, the proposed modeling technique for nonlinear analysis would be helpful for preliminary analyses for retrofitting structures, by enabling engineers to estimate the improved capacity of retrofitted structural elements before performing construction.

Key words FRP sheet, buckling-restrained brace, cyclic lateral load, nonlinear analysis

1. 서론

1.1 연구의 목적

2008년 5월 중국의 쓰촨성에서 발생한 리히터 규모 7.0의 지진은 세계 각국에 지진의 위협에 대한 경각심을 갖게 하는 계기가 되었다. 또한 2005년 이후, 남아시아 지역의 해일피해가 발생하는 등 아시아권 지진대의 활동이 활발해짐

에 따라 건설교통부는 기존의 내진설계 대상 건물을 6층 이상 만 평방미터에서 3층 이상 천 평방미터 이상으로 확대 시행하도록 하였다. 지진이 발생할 경우 1990년대 이전 비내진 상제로 지어진 기존의 건축물, 특히 주차시설의 어려움을 해결하기 위해 1층에 필로티 구조를 취하고 있는 기존 집합주택은 일반 건축물보다 에너지소산능력이 부족하기 때문에 예상하지 못한 피해가 유발될 수 있다. 이에 따라 내진에 저항하기 위한 내진성능 평가와 보강이 필요해진 실정이다. 이와 관련하여 최근 컴퓨터 해석을 통해 부재의 내진 성능을 평가설계하는 방법과 기술이 정착화 되어감에 따라 구조 부재의 거동을 예측할 수 있는 비선형 해석 프로그램이 개발되고 상용화되고 있다. 따라서 본 연구의 목적은 기 수행된 반복 횡 하중하의 구조물 성능 실험을 바탕으로 본

¹⁾ 경희대학교 건축공학과 대학원 박사과정

²⁾ 경희대학교 건축공학과 대학원 석사과정

³⁾ 정희원·경희대학교 건축공학과 조교수

(대표저자: leeyh@khu.ac.kr)

⁴⁾ 정희원·경희대학교 건축공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 2009년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2009. 2. 12 / 수정일 : 2009. 4. 6 / 게재확정일 : 2009. 4. 6)

실험과 동일한 조건의 해석적 모사가 가능한 비선형 해석 프로그램을 확보하여 해석 모델을 수립하고 이 프로그램에 대한 유용성과 실용성을 평가하는 데에 있다. 본 해석적 연구를 위해 사용된 프로그램은 PERFORM3D⁽¹⁾로써 정적/동적해석을 수행할 수 있는 연구 소프트웨어로 FEMA-356, FEMA-440 등의 기준을 기반으로 한다.

1.2 연구 방법 및 범위

본 연구는 비내진 보-기둥 부재의 시험체에 FRP시트와 비좌굴 가새를 각각 보강하여 횡력 저항 성능의 향상 정도를 조사한 실험을 바탕으로 하였다.⁽²⁾ 이 실험을 바탕으로 비선형 해석 프로그램을 통하여 보-기둥 접합부의 거동을 실험결과와의 비교·검증을 통해 해석모델을 수립하였고, 본 해석 프로그램의 유용성 및 실용성을 검토하였다. 이는 추후 다양한 조건의 해석적 적용이 가능하며 부재의 거동을 전체 구조물에 적용함으로써 구조물의 내진 성능의 설계 및 평가 지표로 활용할 수 있으리라 기대된다.

2. 보-기둥 연결부의 실험

2.1 보-기둥 연결재의 실험계획

본 실험에서는 서울 지역의 필로티 건물의 표본 조사를 통하여 실제 필로티 기둥의 1/2의 길이를 갖는 300mm × 400mm × 1500mm의 기둥과 400mm × 350mm × 2700mm의 보로 된 보강되지 않은 시험체의 크기를 선정하였다. 이에 각각 아라미드와 탄소섬유시트를 부착하고, 비좌굴 가새를 보강함으로써 총 5개의 실험체를 통해 보-기둥 연결재의 성능을 파악하였다.

2.2 실험에 사용된 재료의 특성

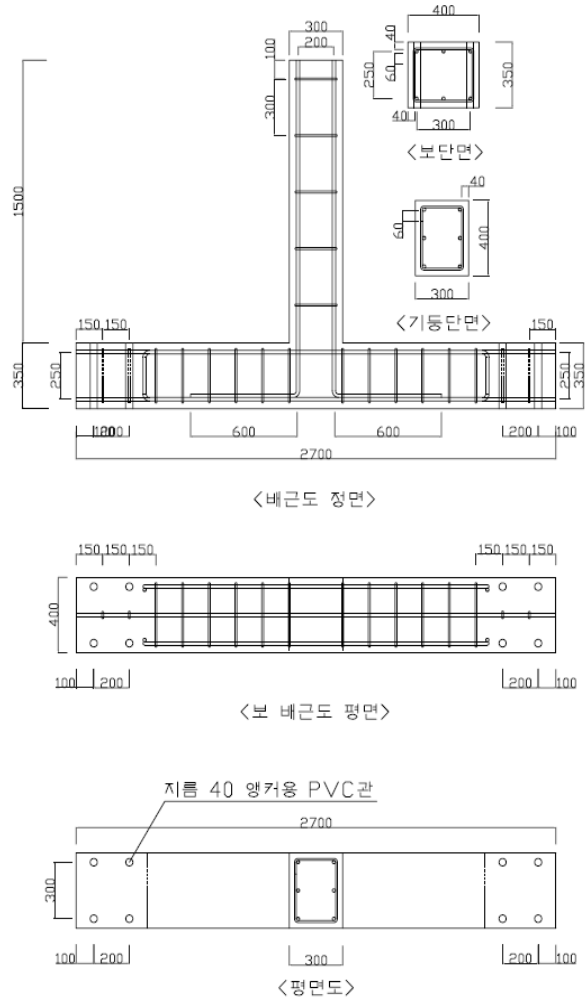
2.2.1 콘크리트와 철근

콘크리트는 KS F 2405 ‘콘크리트의 압축 강도 시험 방법’에 따라 Φ150mm × 300mm의 공시체를 총 8개 제작하

여 28일 기준으로 약 24MPa의 압축강도를 확인하였다. 기둥과 보의 주 철근은 인장강도 400MPa인 6-D19, 띠철근과 늑근은 400MPa, D10을 사용하였다.

2.2.2 FRP시트

본 연구에서 사용된 기둥의 FRP시트는 기둥의 길이방향을 기준으로 좌우 60°씩 탄소와 아라미드 섬유시트 2장을 Wrapping 공법으로 보강하였다. FRP에 대한 재료 특성은 표 3과 같다.



〈그림 1〉 콘크리트 비내진 상세 단면도 및 배근도

〈표 2〉 콘크리트 배합설계

굵은 골재(mm)	슬럼프(mm)	공칭강도(MPa)	시멘트 종류
25	120	24	보통

〈표 3〉 FRP의 특성

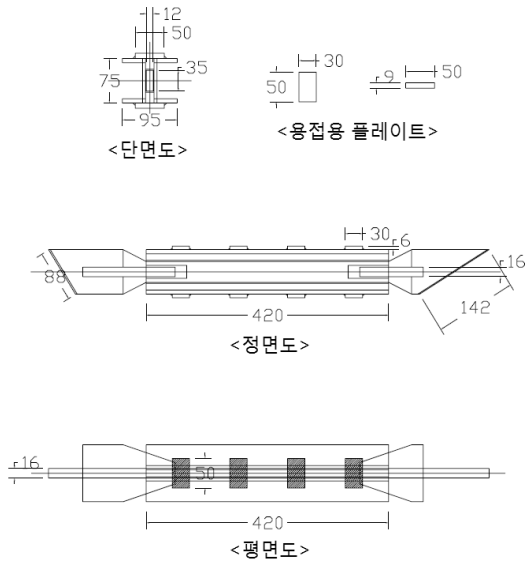
	탄성계수(MPa)	인장강도(MPa)	두께(mm)
CFRP	2.35×10 ⁵	3,550	0.167
AFRP	1.2×10 ⁵	2,880	0.194

〈표 1〉 실험체의 변수

보강 방법	섬유 종류	가새 유무	비 고
비보강	-	무	보강 4개 + 비보강 1개 = 총 5개
CFRP	탄소 섬유	무	
CFRP+BRB	탄소 섬유	유	
AFRP	아라미드 섬유	무	
AFRP+BRB	아라미드 섬유	유	

〈표 4〉 비좌굴 가새 상세 (단위: mm)

가새 실험체	중심 코어	외부 보강재	단부	외부 보강재 접합 방법
C35R75	35×12	ㄷ 75×40	75×16	8개의 플레이트 용접 용접 간격 : 100



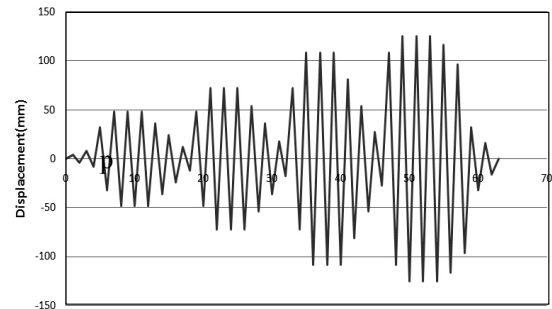
〈그림 2〉 가새의 설계 도면 (단위:mm)

2.2.3 비좌굴 가새

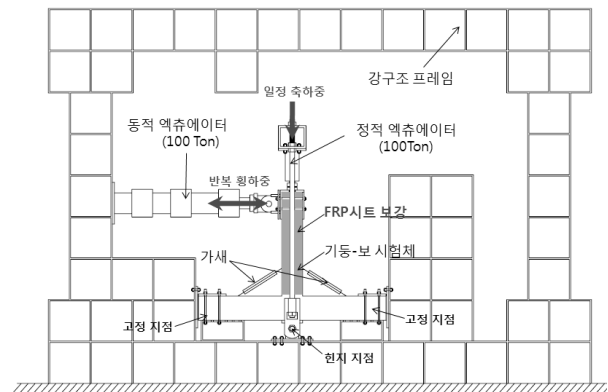
비좌굴 가새는 SS400의 재료를 사용하여 12mm × 35mm 크기의 중심코어 양면에 ㄷ형 채널 2개를 부착하여 중심코어의 좌굴을 방지하는 형태로 제작하였다.⁽³⁾ ㄷ형 채널은 플레이트를 사용하여 용접하였으며 코어부분이 순수하게 축력만을 받게 하여 코어의 성능을 극대화하기 위하여 코어 부분과 ㄷ형 채널 사이에 고무 시트를 부착하고 고무 시트의 표면에 윤활유를 도포하여 코어 철물과 채널이 하중 가력 시 별도로 거동하도록 설계하였다. 비좌굴 가새는 총 2개를 제작하여 탄소와 아라미드 섬유시트로 보강된 콘크리트 시험체의 좌우측에 각각 설치하였다.

2.3 실험방법

기둥은 수직하중과 수평하중의 영향이 동시에 작용하는 부재이므로 실험 수행 시에도 축하중과 횡하중을 동시에 재하 하였다. 그러나 본 연구의 목적이 보강방법에 따른 횡하중 저항 능력의 측정에 있으므로 지속수직하중은 상대적으로 작은 하중을 적용하였다. 횡하중은 1,000kN 용량의 동적 액추에이터를 강구조 프레임에 부착하여 재하 하였고, 축하중은 500kN 용량의 정적 액추에이터를 시험체 상부 철물에 부착하여 약 400kN 크기의 지속하중을 재하하였다.



〈그림 3〉 실험에 적용된 횡가력 Cycle

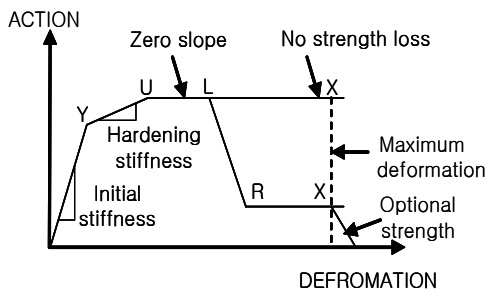


〈그림 4〉 실험장비 및 시험체 셋팅

횡하중은 변위제어방법에 의해 초당 2mm 속도의 반복하중으로 가력 하였다. 변위패턴은 48mm, 72mm, 108mm, 125mm의 비교구간을 적용하여 사이클별, 변위별 하중변화 및 강도 감소 등을 비교하였다.

2.4 실험결과 및 분석

비내진 상세로 설계된 보-기둥 연결부의 실험체를 실험한 결과 비보강의 경우 보에 인접한 기둥 양 측면에는 피복 콘크리트의 탈락으로 인하여 철근이 노출되었으며 강성, 강도, 에너지 소산능력 등의 측면에서 가장 작게 측정되었다. FRP로 보강된 시험체의 경우 비 보강 시험체보다 약 8%의 강도 증가를 보였고, CFRP와 AFRP의 각각의 재료 특성에 따른 차이는 나타나지 않았다. CFRP, AFRP와 비좌굴 가새가 각각 모두 보강된 시험체는 불규칙적인 균열과 함께 비좌굴 가새와 기둥의 접합부에서 시트의 감김 방향과 평행하게 FRP시트의 파단이 발생하였다. 또한 실험 수행 시 기둥의 좌우에 가새의 고정을 위해 삽입된 앵커의 뽑힘이 발생하였다. 비좌굴 가새가 보강된 시험체의 경우 비보강 실험체와 비교했을 때 90% 이상의 최대강도가 확보됨에 따라 실험체 중 가장 우수한 성능을 나타내었다.



〈그림 5〉 부재의 힘-변형 관계

3. 해석모델 수립

3.1 해석모델의 정의

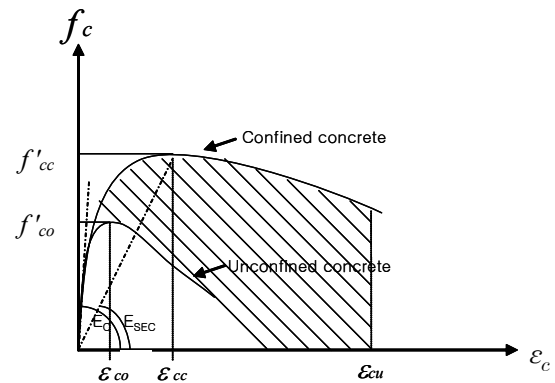
PERFORM3D를 사용한 본 해석 모델에서는 부재의 비선형성을 그림 5와 같이 정의한다. 이는 FEMA-356 등에서 제시된 구성요소에 대한 일반화된 관계로써 이를 통해 부재의 이력특성을 정의내린다. 이 그림에서 X축의 Y구간까지는 부재의 초기강성을 나타내는 기울기를 나타내며 Y점에서는 부재의 항복강도, Y에서 L 구간은 변형경화, L과 R 사이의 구간은 부재내력의 강도 저하를 나타낸다.

3.2 철근콘크리트의 비선형 재료모델

철근콘크리트는 연성거동하는 철근과 취성파괴를 하는 콘크리트의 복합재료이고, 반복하중 하의 부재는 콘크리트와 철근의 부착파괴와 슬립(Slip)이 발생하며 피복 콘크리트의 파쇄(Crushing)로 철근이 항복하고 좌굴하는 등 복잡한 비선형성을 나타내므로 각각의 재료에 따른 부재의 특성을 정확하게 분석하여 해석모델을 구축해야한다.

3.2.1 콘크리트

콘크리트는 압축응력과 인장응력에 도달함에 따라 파쇄(Crushing)현상과 균열(Cracking)현상이 발생하는 비등방성 재료이다. 특히 주기거동이 반복될 경우 콘크리트의 균열이 확장되고 압축 축의 콘크리트 파쇄는 주 철근의 좌굴을 일으키는 원인이 되기도 한다. 이러한 현상에 대한 보강법을 마련하기 위하여 현재 많은 연구자들에 의하여 취성파괴를 하는 콘크리트를 띠철근으로 구속시킴으로써 향상되는 압축강도와 연성에 대한 특성을 효과적으로 규명하기 위한 콘크리트의 응력-변형률의 관계를 제안한 다수의 모델이 있다.^{(4),(5)} 본 해석에서는 횡 방향 철근 및 구속철근의 양, 구속철근의 항복강도 및 배근형태 등을 고려하여 구속 콘크리



〈그림 6〉 Mander의 콘크리트 응력 변형률 곡선

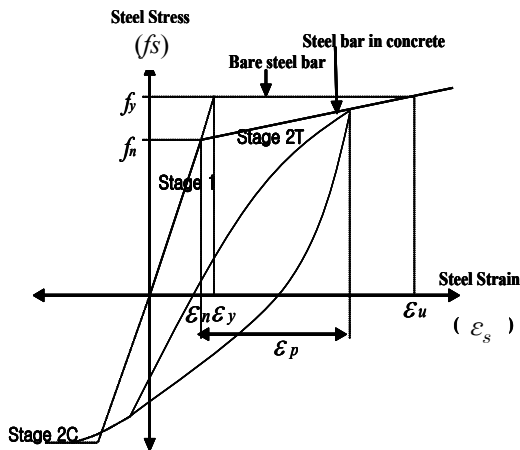
트의 유효압력을 계산한 Mander의 모델⁽⁶⁾을 사용하였으며 관련 모델은 아래의 그림에 제시하였다. 본 연구의 실험 모델은 기둥 부 띠철근의 경우 KBC규준으로 간격 300mm의 비내진 설계된 보-기둥 접합부의 실험체가 주 대상이므로 압축응력-압축 변형률의 비교 결과 띠철근으로 인한 현격한 콘크리트의 구속효과는 확인할 수 없었다.

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

여기서 $f'_{cc} = f'_{co} (-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_{co}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{co}}})$, $x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}}$, $r = \frac{E}{E_c - E_{sec}}$ 이며 ϵ_{cc} 는 최대 구속 변형률로써 $\epsilon_{co} [1 + 5(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1)]$ 이다. 또한 $E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}}$, $E_c = 5000 \sqrt{f'_{co}}$ 이다. 자세한 사항은 Mander et al.⁽⁶⁾의 논문에 상술되어 있다.

3.2.2 철근

콘크리트에 균열이 일어난 후 균열 면에서 콘크리트의 응력과 변형률은 0으로 감소하고 균열 사이의 중앙점에서 최대가 되며, 철근의 경우 균열면에서 응력과 변형률이 최대가 되고 균열의 사이의 중앙점에서 최소가 된다. 따라서 콘크리트 속에 묻힌 철근의 응력 변형률 관계는 균열 사이의 응력과 변형률의 평균값을 통해 얻을 수 있다.⁽⁷⁾ 이를 고려하여 본 해석모델은 단조하중 하의 Belarbi and Hsu⁽⁷⁾의 이선형 곡선을 통하여 반복하중을 받는 콘크리트 속에 묻힌 철근의 이력특성을 제안한 모델⁽⁸⁾을 근거로 하였다. 아래 그림 7에서 반복하중을 받는 콘크리트 속의 철근은 철근이 항복하기 전을 Stage 1, 인장 축의 항복이후의 거동을 Stage 2T, 압축 축의 항복이후 거동을 나타내는 Stage 2C로 나타내었다.



〈그림 7〉 반복하중을 받는 철근의 이력 특성 (Backbone Envelope curve)

$$\text{Stage 1} \quad f_s = E_s \varepsilon_s \quad (\varepsilon_s \leq \varepsilon_n) \quad (2)$$

$$\text{Stage 2T} \quad f_s = f_y \left[(0.91 - 2B) + (0.02 + 0.25B) \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_y} \right] \quad (\varepsilon_s > \varepsilon_n) \quad (3)$$

$$\text{Stage 2C} \quad f_s = -f_y \quad (f_s \leq -f_y) \quad (4)$$

f_s, ε_s 은 각각 변화하는 철근의 응력과 변형율을 나타낸 것이며, f_y, ε_y 은 철근의 항복응력과 변형율, E_s 는 철근의 탄성계수이다. $\varepsilon_n = \varepsilon_y (0.93 - 2B)$ 로 콘크리트 속 철근의 평균항복변형률이며, $B = (f_{cr}/f_y)^{1.5} / \rho$ 이다. 여기서 ρ 는 철근 비이며 $f_{cr} = 0.31 \sqrt{f_c}$ (MPa)로 콘크리트의 균열강도이다.

3.3 FRP 시트

ACI 440⁽⁹⁾ 는 콘크리트에 FRP시트 (Fiber Reinforced Polymer) 를 부착함으로써 1) 압축강도 (Axial Compression) 의 증가 2) 인장강도 (Tension Strengthening)의 증가와 이로 인한 3) 연성 (Ductility)의 확보 등 세 가지의 효과가 있다고 기술하였다. 본 실험체의 경우 FRP 시트를 보강함으로써 강도의 증가와 Sheikh⁽¹⁰⁾의 제안식에 따라 7.5 이상의 연성이 확보됨을 확인하였다. 본 해석을 함에 앞서 1) 압축강도 (Axial Compression) 증가에 초점을 두어 Lam&Teng 모델⁽¹¹⁾ 을 사용하여 $\Phi 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 의 공시체의 FRP 시트의 구속효과로 인한 압축강도의 계산 결과 비 구속콘크리트에 비해 약 17%의 증가를 보였다. 하지만 이를 사용하여 보강된 보-기둥 연결부의 반복하중 하의 비선형 해석을 수행한 결과 압축강도의 증가로 인한 연성확보에 비하여 최대하중(Force)의 증가는 매우 미미하였다. 이는 반복 횟 하중을 받는 부재는 압축축 보다 인장축의 변형율이 더 증가

하기 때문에 인장영역의 거동이 부재의 성능에 영향을 주는 주 원인이 되기 때문으로 판단된다.⁽¹²⁾ 이로써 횡 반복하중을 받는 FRP시트로 보강된 기둥의 해석 모델을 수립함에 있어 압축강도 증가만을 고려해서는 향상된 횡 저항 능력의 가시적인 효과를 기대할 수 없음을 확인하였다. 따라서, 압축강도 뿐 아니라 인장강도의 증가 역시 균열을 효과적으로 제어함으로써 부재의 성능 향상에 상당한 기여를 하는 것으로 판단되어 ACI 440을 참고로 FRP시트를 철근함량으로 환산함으로써 부재의 인장력을 강화시켰다.

기둥부재의 철근비는 아래의 식 (5)로 계산되며, 여기서 A_s 는 기둥 철근의 총 단면적, b 는 보 또는 기둥의 너비, d 는 보 또는 기둥의 춤이다.

$$\rho_s = \frac{A_s}{bd} \quad (5)$$

FRP시트의 보강함량은 철근비로 환산하여 주 철근 방향으로 입력하였다.⁽¹³⁾

$$A_f = n t_f w_f \quad (6)$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} + \frac{\rho_s}{\alpha} \quad (7)$$

여기서, ρ_f 는 콘크리트에 대한 FRP시트로 환산된 철근의 비이며, n 은 FRP시트의 보강 겹수, t_f 는 FRP시트의 두께, w_f 는 기둥 단면을 둘러싼 FRP시트의 길이이다. 다음의 식(8)은 철근과 FRP의 인장강도를 환산한 계수이다.

$$\alpha = \frac{f_f}{f_s} \quad (8)$$

이때 FRP시트의 보강 길이는 기둥 부재에서 변형이 가장 많이 일어나는 소성힌지 구역을 산출하여 적용하였다. 관련 식은 아래 식 (9)와 같다. 소성힌지 구역에 보강된 FRP시트의 높은 인장강도는 반복하중 하의 취약해진 기둥 부재를 효과적으로 구속함으로써 보-기둥 연결부의 휨/전단강도를 향상시키는 데 기여할 것으로 판단된다.

$$L_p = 0.5H \quad (9)$$

여기서, L_p 는 소성힌지 길이, H 는 단면 크기이다. 또한, FRP시트는 기둥 축을 중심으로 60°의 X자 형태로 보강되었는데, 이것에 대한 고려는 보, 기둥 방향으로 나누어 아래와 같이 계산되었다.

$$\rho_{f,x} = \rho_f \cos a \tag{10}$$

$$\rho_{f,y} = \rho_f \sin a \tag{11}$$

여기서, $\rho_{f,x}$ 는 x 방향(보방향)의 FRP의 환산 철근비이며, $\rho_{f,y}$ 은 FRP의 y 방향(기둥방향) 환산 철근비이다. a 는 FRP 시트를 감싼 각도(wrapping angle)이다.

3.4 비좌굴가새

비좌굴가새(Buckling Restrained Brace, BRB) 부재는 비좌굴가새, 탄성요소(Elastic Bar), 접합부(Stiff End Zone)가 하나의 복합적인 요소를 이룬다. 비좌굴가새 요소에는 실험체의 비좌굴가새에서 π 형 채널을 제외한 중심코어의 단면크기와 길이를 적용하였고, 탄성요소의 길이는 부재의 길이에서 비좌굴가새 요소와 접합부를 제한 길이로 사용하였으며 모멘트접합(Rigid)으로 가정하였다.

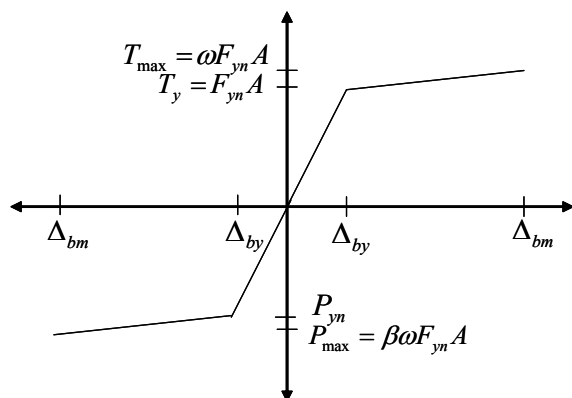
이상적인 이선형 힘-변위 이력특성은 아래의 그림 8과 같고, 이 이선형 곡선을 토대로 시험체의 축 하중과 변위값을 입력하였다. 그림 8에서 F_{yn} 은 공칭 항복 강도, A 는 중심 코어의 단면적, T_{max} 는 최대인장강도, R_{max} 는 최대압축강도이다. 여기서, F_y =공칭 항복 강도, A =중심코어의 단면적, T_{max} = 최대 인장 강도, P_{max} = 최대 압축강도 이다. 그리고 ω , β 는 각각 인장강도와 압축강도 조정계수를 의미하며 이에 대한 자세한 사항은 AISC⁽¹⁴⁾에 상술되어있다.

4. 해석

4.1 해석 모델링

해석을 위한 모델링의 방법은 다음과 같다.

- (1) 기둥, 보는 선재로 치환하였다.



〈그림 8〉 가새의 이상적인 이선형 힘-변위 곡선

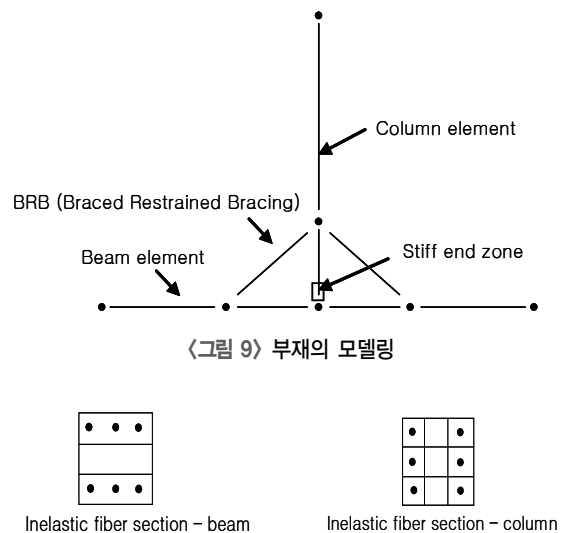
- (2) 기둥, 보 부재는 비탄성 섬유요소로 모델링하였다. 일반적인 보-기둥 접합부 해석의 경우 1) 접합부에 길이가 0인 소성힌지를 삽입하여 부재의 거동을 집중(Lumped Plasticity)시키는 방법과 2) 소성힌지 구역(Spread Plasticity)을 정하여 그 구역까지 변형이 일어나는 것을 제한하는 방법이 있다.⁽¹⁵⁾ 1), 2)와 같은 방법은 부재의 변형을 이상화시킨 방법으로써 간단하고 해석시간이 단축되는 장점이 있지만 반복 주기하중에 따른 부재의 거동 특성을 정확하게 묘사하는 데 한계가 따른다. 따라서 본 해석 모델에서는 비탄성 섬유 모델(Inelastic Fiber Section)의 잠재적인 소성부재를 사용하여 부재를 모델링함으로써 복합적으로 작용하는 재료의 내적 저항력으로 프로그램의 일반화된 설계 패턴에 따라⁽¹⁶⁾ 부재의 최대강도를 확인하였고, 이로 인한 부재의 이력특성을 기반으로 비탄성 거동을 묘사하였다.
- (3) 보-기둥 접합부는 부재강성의 10배로 가정하였다.

그림 9는 보-기둥부재의 모델링을 나타낸 것이며, 보와 기둥에 대한 상세 단면은 아래의 그림 10과 같다.

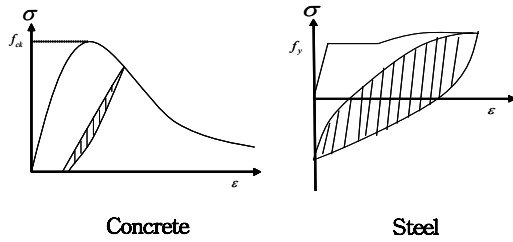
4.2 해석방법

4.2.1 강성 및 에너지소산능력의 평가

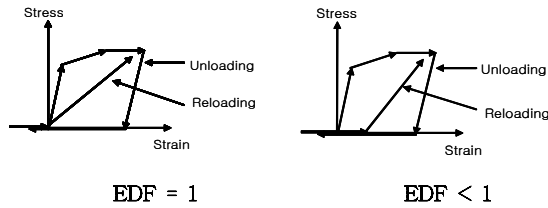
지진하중을 받는 철근 콘크리트 건물은 구조물에서 흡수된 에너지가 부재의 비탄성 변형을 통해 소산되어야 한다. 에너지소산능력은 내진설계 및 평가에 활용됨으로써 경제성을 도모할 수 있기 때문에 에너지 소산능력에 기초한 강성의 변화를 통해 강성저하와 편칭을 보다 정확하게 모델하



〈그림 10〉 기둥과 보의 단면 상세 모델링



〈그림 11〉 철근과 콘크리트의 에너지소산능력



〈그림 12〉 해석 프로그램의 강성 및 에너지소산능력의 평가

기 위한 기법이 필요하다. 엄태성 등⁽¹⁷⁾에 따르면 철근콘크리트 부재는 반복적인 주기거동을 할 경우 취성재료인 콘크리트는 소성재료인 철근에 비하여 매우 적은 에너지를 소산하므로 철근콘크리트 부재의 에너지 소산은 주로 철근의 이력거동에 의하여 나타난다. 따라서 실제 각 부재는 설계변수의 영향에 따라서 핀칭과 강성저하에 의해 매우 복잡한 주기 거동특성을 나타내지만, 이에 관계없이 철근의 변형률 이력을 이용하여 에너지소산능력을 정확하게 평가할 수 있다고 하였다.

이와 관련하여 본 해석 프로그램에서는 그림 12와 같이 제하(Unloading) 강성은 항상 부재의 초기 탄성 강성과 같다고 가정하고, 재재하(Reloading) 강성을 변화시켜 이력곡선의 면적을 계산함으로써 소산된 에너지를 나타낸다. 이는 복합적으로 반복하중하의 강성 저감에도 영향을 미친다. 아래 그림의 에너지 소산 계수 (Energy Dissipation Factor, EDF) 및 강성 저감에 대한 해석시의 입력값은 실험 결과의 거동 특성의 비교를 통해 시행-착오법(Trial and Error)의 과정을 거쳐 산정되었다. 이와 관련하여 최대변위에 대한 최대강도의 비로 계산되는 실험의 강성 값은 강성저감이 발생하지 않을 때를 1로 가정하여 이에 대한 면적과 주기 거동 이 진행됨에 따른 이력곡선의 면적의 비로 정의되는 해석의 수치와는 비교될 수 없으며 변위가 증가 할수록 작은 값을 갖는다.

4.2.2 시간 이력 해석

반복하중에 의한 해석을 수행하기 앞서 중력하중의 영향을 우선 수행하였다. 또한 일정 축력과 반복 주기하중을 받는 기둥 부재는 P- Δ 효과를 고려하였으며, 기둥의 길이에

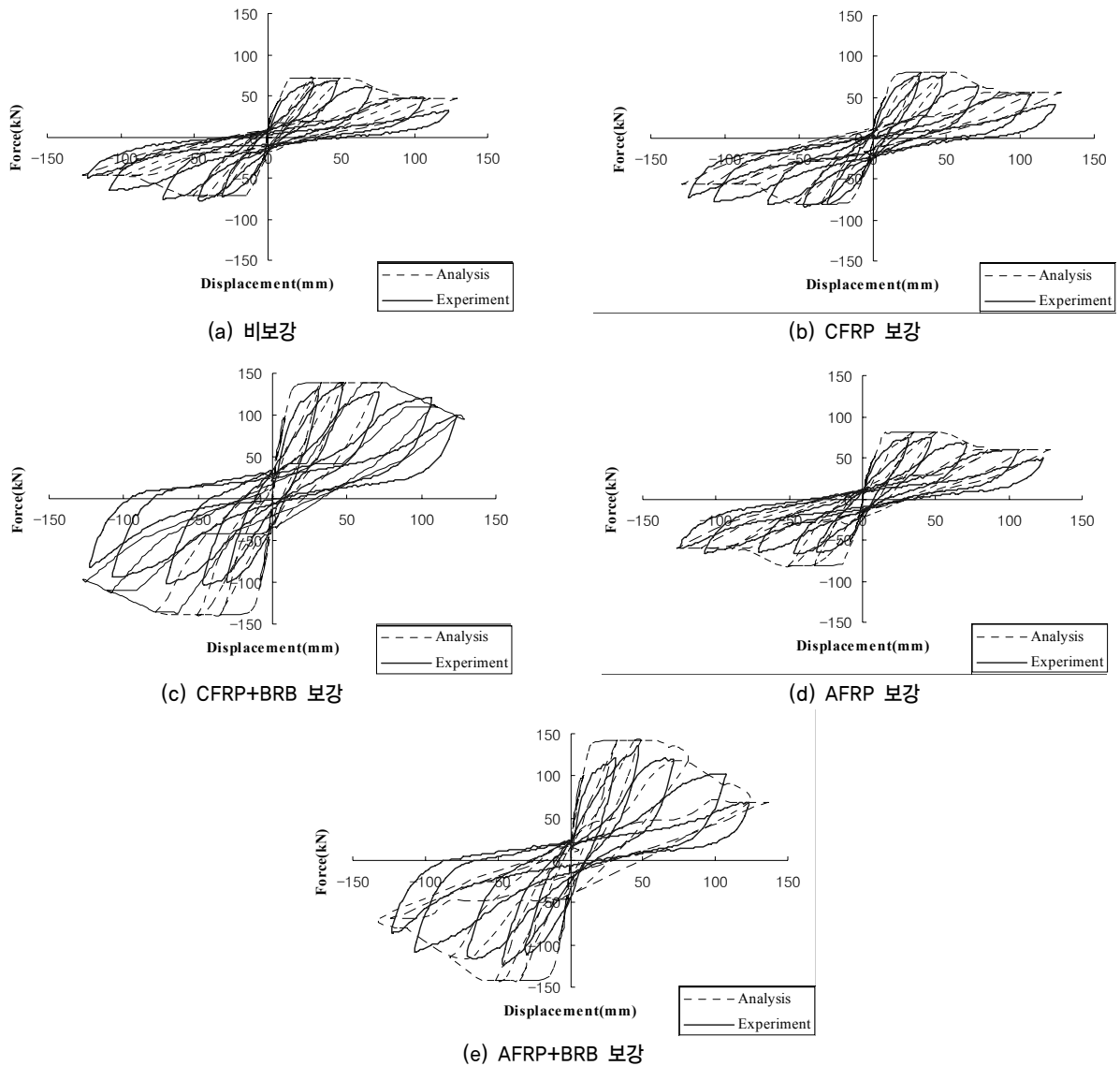
대한 변위의 비율(Drift Ratio(%)) 로 Newton-Rapson의 수치해석법을 이용하여 해석을 수행하였다.

4.3 해석/실험결과의 비교, 분석

- 1) 비선형 해석 프로그램을 통하여 얻어진 해석 값들과 실험값을 아래의 표 5와 그림 13에서 비교하였다. 비보강 시험체의 경우 최대강도가 약 5%의 오차율로 비교적 일치함을 확인하였다. 또한 강도와 강성, 에너지소산능력의 측면에서 비교적 정확하게 부재의 거동을 예측함으로써 콘크리트와 철근의 비선형 모델이 적용된 비보강 시험체에 대한 해석모델을 수립하였다.
- 2) FRP시트로 보강된 구속 콘크리트의 경우 실험값은 탄소와 아라미드의 재료에 따른 강도의 큰 차이는 보이지 않았다. 그러나 해석의 경우 콘크리트에 대한 FRP 체적비로의 환산시 CFRP시트보다 두꺼운 AFRP시트의 단면적을 수치로 계산하여 입력함으로써 미소한 차이가 발생하였다.
- 3) CFRP와 가새가 동시에 보강된 시험체의 경우 가새의 좌굴과 변형을 경화 현상이 일어나기 전 기둥과 가새의 접합부에서 앵커의 뽑힘 파괴가 일어남으로써 압축가새와 인장가새와의 불균형력으로 하중의 비대칭현상이 일어났다. 이러한 현상은 축력으로 에너지를 소산하는 가새의 성능을 일부 상실하게 될 뿐 아니라 콘크리트의 단면 결손으로 인한 강도 및 강성의 감소 영향을 내포하고 있다. 그러나 해석의 경우 이러한 예측이 불가능한 파괴 현상을 모사하는 데 한계가 있기 때문에 실험치보다 에너지 소산능력을 다소 높게 측정하고 있다. 또한 이 시험체의 경우 핀칭현상이 심하게 나타났으나 해석결과는 연성의 확보와 핀칭현상을 동시에 실험값과 유사하게 해석하는 데는 한계가 있었다. 그러나 이 시험체의 경우 비좌굴가새로 인한 소성 한지부가 이동 확산됨에 따라 보-기

〈표 5〉 실험결과와 해석결과의 비교

		최대강도 (kN)	125mm의 최대강도 (kN)	48mm의 강성 (kN/mm)
비보강	실험	68.6	32.0	0.163
	해석	71.4	47.0	0.149
CFRP	실험	74.2	40.0	0.183
	해석	80.1	55.8	0.167
CFRP +BRB	실험	131.6	100.2	0.356
	해석	138	109.3	0.288
AFRP	실험	75	49.4	0.156
	해석	82	55.9	0.170
AFRP+BRB	실험	135.8	69.0	0.278
	해석	141.0	70.1	0.294



〈그림 13〉 실험 해석 비교 그래프

동 접합부의 국부적 취성파괴가 방지됨으로써 비보강과 FRP시트만으로 보강된 시험체의 결과에 비해 좋은 에너지소산능력을 보이는 것으로 판단된다.

이로써 해석의 결과는 실험의 그래프와 전체적으로 일치함으로써 수립된 해석모델이 부재의 거동을 잘 예측하고 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 연구는 비선형 해석 프로그램을 사용한 내진 성능의 예측을 위해 FRP시트와 가새로 보강된 철근콘크리트 부재의 해석모델을 수립함으로써 해석 프로그램에 대한 실용성과 유용성을 확보하는 데 그 목적이 있다. 이를 확인하기 위해 기 수행된 비내진 반복 횡 하중 하에서의 기동부재와 보-

강 연결부에 대한 구조 성능 실험결과를 바탕으로 그 결과를 비교, 분석함으로써 해석모델을 수립하였다.

1. 비 보강 시험체의 경우 P- Δ 효과를 고려하여 실험과 비교적 일치하는 부재의 거동을 예측할 수 있었다.
2. 해석시 기동 부재의 변형이 집중되는 소성힌지 구역을 산정하여 FRP시트를 철근 함량으로 환산하여 보강함으로써 휨/전단파괴에 효과적으로 제어하는 실험과 비교적 일치하는 부재의 거동을 해석할 수 있었다.
3. 비좌굴 가새가 적용된 시험체의 경우 접합부 파괴를 예측함에 한계가 있기 때문에 실험결과와의 이력거동과 비교함에 있어 재하 및 제하 강성에 차이가 발생하고 에너지소산능력을 실험치보다 다소 높게 측정하고 있지만 비보강과 FRP시트만으로 보강된 시험체보다 우수한 에너지

소산능력을 해석할 수 있음을 확인하였다. 추후 콘크리트와 가새의 접합부 파손에 앞서 비좌굴가새가 지진에 대한 에너지를 상당 부분 소산시킬 수 있도록 비탄성 변형을 유도할 수 있는 비좌굴가새와 콘크리트의 접합방법에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

이로써 수립된 해석모델과 본 비선형 해석 프로그램을 통하여 추후 FRP시트와 비좌굴 가새의 재료 특성을 변수로 하여 다양한 결과를 예측할 수 있음을 확인하였다. 또한 실험과 해석을 통하여 확인된 부재의 거동을 전체 구조물에 적용하여 구조물의 내진 성능의 설계 및 평가 지표로 활용함으로써 경제성을 도모할 수 있으리라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 특정기초연구사업(R01-2007- 000-20765-0)과 국토해양부 연구개발사업의 연구비지원 (과제번호# 06 건설핵심B03)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Computer and Structures Inc: Berkeley, CA, "Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structures", 2006.
2. 유연종, "섬유시트와 비좌굴가새로 보강한 보-기둥 시험체의 성능평가를 위한 실험적 연구," 석사학위논문, 경희대학교, 2009, 42pp.
3. 이 진, 이기학, 정미루, "내진성능에 대한 채널형강으로 보강된 비좌굴 knee bracing system의 실험적 평가," 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 대한건축학회, 제28권, 1호, 2008, pp. 285-288.
4. Sheikh, S. A. and Uzumeri, S. M., "Strength and Ductility of Tied Concrete Columns," *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 106, No. 5, 1980, pp.1079-1102.
5. Kent, D. C. and Park, R., "Flexural members with confined concrete" *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 97, No. 7, 1971, pp. 1969-1990.
6. Mander, M., J., 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.
7. Belarbi, A., and Hsu, T. T. C., "Constitutive Laws of Concrete in Tension and Reinforcing Bars Stiffened By Concrete," *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 4, 1994, pp. 465-474.
8. Mansour M. and Hsu, T. T. C., "Cyclic Stress Strain Curves of Concrete and Steel Bars in Membrane Elements," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 127, No. 12, 2001, pp.1402-1411.
9. ACI Committe 440. 2R-02, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures" American Concrete Institute, 1999.
10. Sheikh, S. A. and Houry, S. S., "A Performance-Based Approach for the Design of Confining in Tie Columns," *ACI Structural Journal*, Vol. 94, 1997, pp.421-431.
11. Teng, J. G., and Chen, J. F., "FRP: Strengthened RC Structures, John Wiley and Sons, 2002, 266pp.
12. Walter, M. R., George, W., "Reinforced Concrete Beams under Repeated Loads," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 95, No. 6, 1969, pp.1189-1211.
13. 차지화, 이재홍, 이기학, "CFRP로 보강된 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 해석," 대한건축학회, 제22권, 9호, 2006, pp. 43-50.
14. AISC, "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings," Ch.16, 2005.
15. Filippou, F. C. and Issa, A., "Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Frames under Cyclic Load Reversals," *Earthquake Engineering Research Center College of Engineering*, Report No. UCB/EERC-99/12, University of California, Berkeley, 1998, 107pp.
16. Scott, M. H., Fenver, G. L., Mckenna, F., and Filippou, F. C., "Software Patterns for Nonlinear Beam-Column Models," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 34, No. 4, 2008, pp. 562-571.
17. 임태성, 박홍근, "에너지 소산능력에 기초한 철근콘크리트 부재의 이력모델," 한국지진공학회, 제8권, 5호, 2004, pp. 45-54.