

# 비선형 유한요소해석을 이용한 PC 기둥-H 형강보의 구조거동 분석

## Evaluation of Structural Behavior of Precast-Concrete Column and H-Beam using Non-linear Finite Element Analysis

박 정 심 <sup>1)</sup>      박 순 규 <sup>2)</sup>  
Park, Jeong-sim      Park, Soon-kyu

### ABSTRACT

Nonlinear finite element analysis is conducted to predict the structural behavior of precast concrete column and steel beam connected by using bolted connections. The Nonlinear FEM program is based on the modified compression field theory which has good accuracy in the concrete structures. The link element is properly used to model the discontinuity between precast concrete column and steel beam. Predictions from the proposed model are compared with experimental results and it is concluded that structural behaviors of the composite structures, such as strength capacity, crack pattern and failure mode, can be predicted quite successfully.

### 1. 서론

PCS(Precast-Concrete Column and Steel Beam)구조는 철골과 철근콘크리트라는 이질 구조재료로 구성되어 있는 합성구조시스템이다. 이러한 합성구조에서는 구성 부품 및 재료간의 응력전달이 전체 구조물의 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구진은 PCS 구조시스템의 내진성능 분석을 위해 실험 크기의 시험체에 대하여 CST(Cyclic Seismic Test)를 실시한 바 있다. 실험 결과에 의하면 보-기둥 접합부에서 전단파괴 모드가 발생하며 초기 강성이 부족한 것으로 분석되었다. 이러한 실험 결과의 원인을 규명하기 위하여 단조가력에 의한 비선형 해석을 실시하여 파괴형태와 변형특성, 강도성능을 분석하고자 하였다. 비선형 해석 결과를 이용하여 PC기둥, 철골보, 패널존, 단부평판 및 볼트의 초기 강성에 대한 기여도를 시험체와 비교, 분석하여 부족한 점을 개선하고 아울러 파괴모드를 조절하여 바람직한 거동을 예측하고자 하였다.

### 2. 해석

#### 2.1 프로그램

해석에 사용된 프로그램은 수정압축장 이론(Modified Compression Field Theory, MCFT)에 근간한 비선형 유한요소프로그램(Vecchio)<sup>(2)</sup>으로 철근콘크리트 평면응력 요소, 트러스 요소, 링크 요소와 접촉 요소로 이루어져 있다. 링크 요소와 접촉 요소는 콘크리트와 철근사이의 부착을 표현하기 위하여 사용

- 1) 정회원, 울산대 건축대학 석사과정
- 2) 정회원, 울산대 건축대학 교수, 공학박사

된다. 철근콘크리트 평면응력 요소는 콘크리트와 보강 철근으로 구성되어 있는 MCFT를 이용한 요소이다. 이 요소를 표현하는 데는 콘크리트의 성질뿐만 아니라 균열간격, 요소 면적에 대한 철근 보강비 등이 중요한 모델 변수로 작용한다. 트러스 요소는 철근의 성질과 함께 철근과 콘크리트의 부착위치 및 부착강도를 이용하여 모델의 특성을 표현하도록 되어있다.

## 2.2 해석 모델

PCS 시스템은 PC기둥과 철골보가 단부평판과 관통형 볼트에 의해 접합된 합성구조이다.(그림 2)

PC기둥은 콘크리트, 주근 및 띠근으로 이루어진다. PC기둥은 철근콘크리트 MCFT 평면응력요소와 트러스 요소를 이용하여 모델링하였다. PC기둥의 주근은 트러스요소로 모델링하였고 x방향의 띠근은 철근콘크리트 평면응력요소의 보강철근으로 표현하였다. 평면과 수직인 z방향으로 보강된 철근의 효과는 구속콘크리트에 대한 Mander<sup>(3)</sup>의 제안식을 이용하였다.

H형강 철골보는 트러스 요소를 이용하여 모델링하였다. H형강보의 상·하부 플랜지는 같은 면적을 갖는 트러스요소로, 웨브는 대각선 방향으로 같은 면적을 갖는 트러스요소로 표현하였다. 단부평판도 같은 휨 강성을 갖는 트러스요소로 모델링하였다.

관통형 볼트는 PC기둥과 비부착으로 단부평판을 통해 양측의 철골보의 휨모멘트를 전달하고 마찰력에 의해 철골보의 전단력에 저항한다. 단부평판과 콘크리트 기둥면에서의 수직방향 미끄러움을 방지하고, PC기둥과 단부평판 사이의 Gap에 의한 영향을 고려하기 위하여 볼트와 단부평판이 만나는 지점 이외에서는 비부착이 된 것으로 모델링하였다.

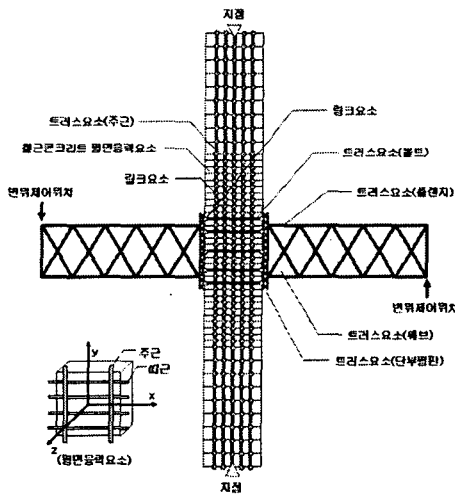


그림 1. 해석모델

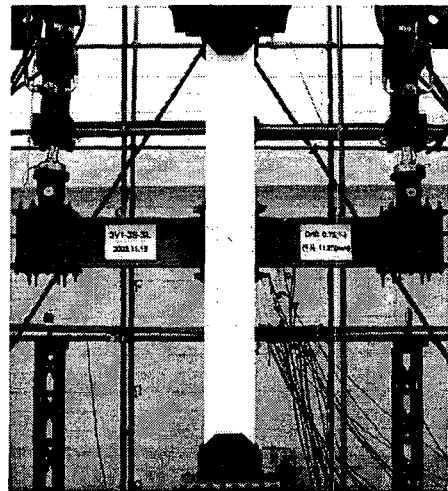


그림 2. 시험체 사진

표 1. 콘크리트의 성질

종류	압축강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	$\epsilon_0$ ( $\times 10^{-3}$ )	철근비 (x방향)
무철근	29.8	1.80	30024	2.00	0.000
띠근 100	29.8	1.80	30024	8.74	0.412
띠근 50	29.8	1.80	30024	13.35	0.524

- \*  $\epsilon_0$  : 최대 압축강도 도달 시 변형률
- \*  $E_{sh}$  : 응력경화영역에서의 탄성계수
- \*  $\epsilon_{sh}$  : 응력경화 시작점의 변형률

표 2. 강재의 성질

종류	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	$E_{sh}$ (MPa)	$\epsilon_{sh}$ ( $\times 10^{-3}$ )
주근	430.5	656.8	196000	906	2.20
띠근	664.3	800.9	196000	932	3.40
플랜지	346.3	487.8	196000	477	1.77
웨브	413.4	531.2	196000	398	2.11
단부평판	339.7	509.3	196000	545	1.74
볼트	1343.6	1412.4	196000	521	6.86

해석에 사용된 재료의 성질은 실험 결과와 동일한 것을 사용하였다. 콘크리트의 압축강도는 표 1에 서와 같이 29.8MPa이고, 철판과 철근의 항복, 인장강도는 표 2와 같다.

비선형 해석을 위한 가력은 실험과 같이 보의 양 끝단에 서로 반대방향으로 변위제어로 단조 가력 하였다.(그림 1) 변위는 Drift 7.0%(105.0mm)까지 가해졌고 해석은 0.5mm간격으로 총 211단계에 대하여 실시하였다.

### 3. 해석결과

#### 3-1. 균열

그림 3은 Drift 1.0%(15mm), 3.5%(52.5mm), Drift 7.0%(105mm)에서의 CST실험과 비선형 해석에 의한 균열양상을 나타낸다. 해석에 의한 균열은 가는 선은 2mm 이내의 균열을, 굵은 선은 2mm 이상의 균열을 나타낸다. 해석에 의한 균열은 실험에 의한 값보다 작게 평가되었다. 반복하중으로 인한 편칭 등의 영향을 단조가력 비선형 해석에서 고려하지 못한 것이 그 원인인 것으로 추측된다. 그러나 비선형 해석 결과가 실험에서 관측된 접합부 패널존에서의 사인장 균열을 상당한 정도 비슷하게 보여 주고 있다.

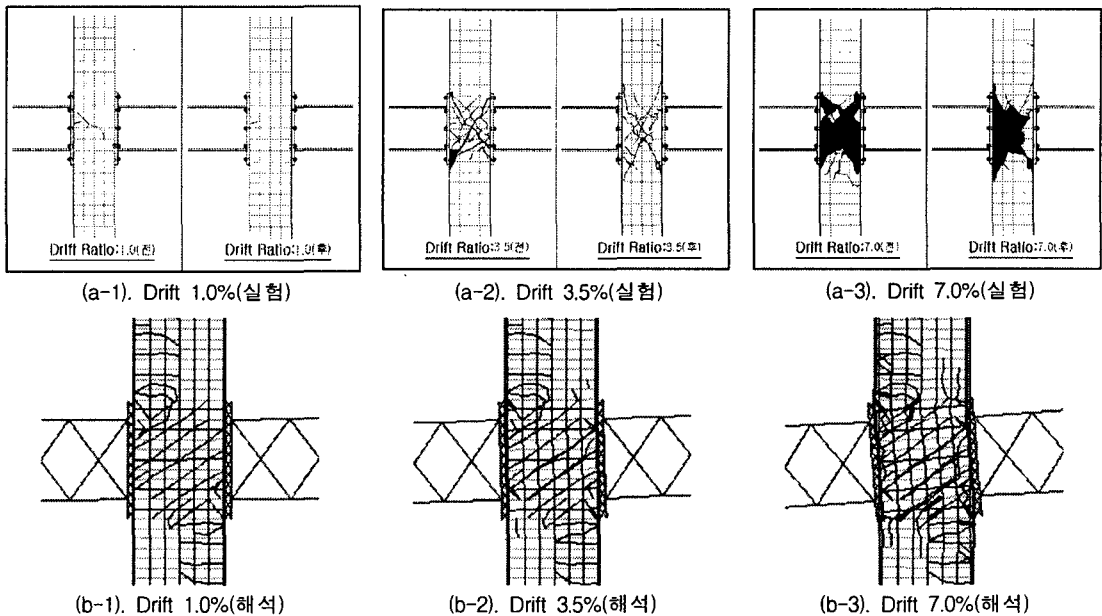


그림 3. 실험과 해석에 의한 균열양상

#### 3-2. 하중-변위 곡선

그림 4는 CST에서의 PCS 시험체의 하중-변위 관계로부터 구한 등가의 단조가력 하중-변위 곡선 과 비선형 해석에 의한 하중-변위 곡선 그래프를 나타낸다. 해석에 의한 최대하중은 실험결과와 거의 유사한 값을 가지는 것으로 강도예측에 상당히 정확성을 가짐을 알 수 있다. 하지만, 해석결과의 초기 강성이 실험결과에 비해 크게 나타나는 등 초기의 변위 예측에 있어서는 오차가 발생하였다. 이는 실험에서는 반복하중을 해석에서는 단조하중을 사용하여 하중 가력 상태가 상이함에 따른 오차와 시험 체의 접합부 사이의 Gap에 의한 추가적인 변위 등에 의한 것으로 추측된다.

#### 3-3. 초기 강성 분석

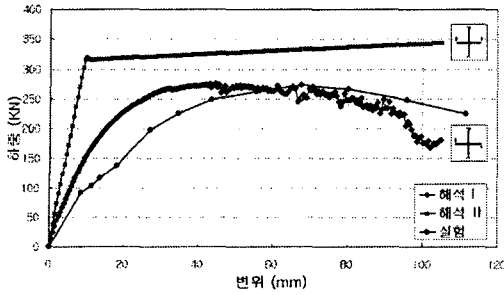


그림 4. 해석과 실험에 의한 하중-변위 곡선

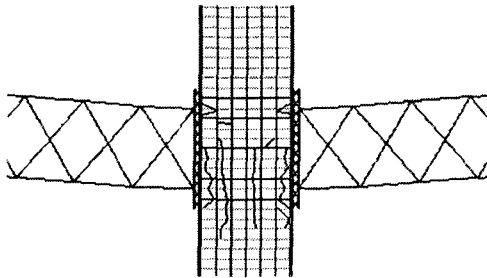


그림 5. 대칭해석에 의한 균열양상(Drift 0.4%)

표 3. 초기강성 기여도

구성부재	비대칭해석		대칭해석	
	변위 (mm)	기여도 (%)	변위 (mm)	기여도 (%)
PC기둥	3.56	23.77	0.03	0.58
철골보	4.37	29.12	4.50	74.96
패널존	5.84	38.95	0.39	6.36
단부평판	0.86	5.72	0.30	5.05
볼트	0.37	2.44	0.78	13.05
합계	15.0	100	6.0	100

성을 분석한 결과에 의하면 비대칭 반복하중 실험결과에 의해 접합부의 강성을 평가할 때는 실제보다 과대평가될 수 있음을 밝힐 수 있었다.

추후 콘크리트 강도, 콘크리트 기둥 내부 충전 여부, 철골보의 RBS(Reduced Beam Section) 크기, 전단배근간격 등 실험변수 효과는 사용된 방법을 통해 해석할 수 있으리라 기대된다. 실험결과를 비교, 분석하여 PCS 시스템의 내진성능을 개선하는 데 활용하고자 한다.

#### 참고문헌

1. 조은영(2003), PC 기둥-H형강보의 볼트접합부에 관한 실험적 연구, 석사학위 논문, 울산대학교 건축학과
2. Vecchio, F., J.(2000), "Disturbed Stress Field Model for Reinforced Concrete : Formulation", ASCE J. of Struct. Engrg., 126(9), 1071-1077
3. T. Paulay, M. J. N. Priestley, "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings"

개발된 시스템이 충분한 Rigidity를 보유하고 있는가를 평가하기 위하여 실험 결과와 직접 비교할 수 있는 비대칭 가력에 의한 해석과 아울러 대칭하중에 대해서도 해석된 결과를 바탕으로 비교, 분석하였다. 철골보의 공칭 설계강도에 해당되는 변위에 대한 PCS 시스템 구성 부재에 대한 변위 기여도를 분석하였다. 철골보의 공칭 설계강도에 해당되는 가력하중은 약 200KN인데 해석 결과에 의하면 비대칭 하중에 대해서는 Drift 1.0%(변위 15mm), 대칭 하중에 대해서는 Drift 0.4%(변위 6mm)일 때에 해당된다. 비대칭 하중에 의해서는 접합부의 Drift에 대한 기여도가 47.11%(변위 7.07mm)이고 대칭하중에 의해서는 기여도가 24.46%(변위 1.47mm)인 것으로 분석되었다. 분석 결과에 의하면 대칭하중에 의한 접합부의 변위 기여도가 비대칭에 비해 상당히 작은 것으로 나타났다. 이는 반복하중에 의하여 실험을 실시한 결과로부터 접합부의 강성을 평가할 때는 실제보다 과대평가될 수 있음을 의미한다.

#### 4. 결론

합성구조인 PCS 시험체를 MCFT 모델을 사용한 비선형 유한요소해석에 의해 해석한 결과, 실제 파괴하중에 아주 근접한 강도를 평가하였을 뿐만 아니라 파괴모드 또한 비교적 근접하게 예측하는 것으로 나타났다. 하지만 변위 예측에 있어서는 단조가력 비선형 해석에 의해 반복하중 시험결과를 예측한다는 점과 합성부재 접합부를 구성하는 요소들의 모델링에 관련된 요인으로 인하여 어느 정도의 오차가 수반되는 것으로 분석되었다. 그러나 PCS 시험체의 초기강