

# 철근콘크리트 벽체의 휨거동에 관한 비선형 유한요소해석

## A Nonlinear Finite Element Analysis to Study the Flexural Behavior of Reinforced Concrete Walls

한민기<sup>\*</sup>      박완신<sup>\*\*</sup>      한병찬<sup>\*\*\*</sup>      황선경<sup>\*\*\*\*</sup>      최창식<sup>\*\*\*\*\*</sup>      윤현도<sup>\*\*\*\*\*</sup>  
Han, Min Ki   Park, Wan Shin   Han, Byung Chan   Hwang, Sun Kyoung   Choi, Chang Sik   Yun, Hyun Do

### ABSTRACT

The finite element method(FEM) models were developed for the reinforced concrete flexural walls and analysed under constant axial and monotonic lateral load using ABAQUS. The major objective of the present study is to determine if the ABAQUS finite element program can be used to accurately model the post-cracked mode of failure in plastic regions of walls, and, if so, to develop practical failure criteria in the plastic range of the material response. The research comprises constitutive models to represent behavior of the materials that compose a wall on the basis of experimental data, development of techniques that are appropriate for analysis of reinforced concrete structures, verification, and calibration of the global model for reinforced concrete walls of increasing complexity. Results from the analyses of these FEM models offers significant insight into the flexural behavior of benchmark data.

### 1. 서론

철근콘크리트 구조물을 구성하고 있는 부재 중 벽체는 기둥과 보의 경계부재 및 벽판으로 구성되는 복합부재로서 축력 및 횡력을 경험하며, 미끄러짐과 같은 상호 인자들에 의해 다축응력을 받기 때문에 그 응력 전단 및 변형 기구를 예측하는 것은 매우 어렵기 때문에 대부분 실험 연구에 의존하였다.

유한요소해석(Finite Element Analysis, 이하 FEA)기법은 다양한 부재묘사, 하중조건, 가력방법과 경계조건 및 변수설정 등이 많은 공간, 시간 및 인력을 필요로 하는 실험기법보다 제약이 적으며, 결과에 대한 비교분석에 있어서도 이력단계, 국부 부위에서의 응력 분포특성, 최대내력 등을 분석하거나 최대강도 이후의 비선형 거동 연구에 그 효용성이 높다고 할 수 있다. 특히, 현재 선행된 실험적 연구를 통해 많은 실험자료가 축적되어 해석기법의 유효성에 대한 다양한 조건에서의 검증이 가능케 되었

\* 정회원, 충남대학교 대학원, 석사과정

\*\* 정회원, 충남대학교 대학원, 박사과정

\*\*\* 정회원, 충남대학교 연구원, 공학박사

\*\*\*\* 정회원, 우송대학교 강의전담, 공학박사

\*\*\*\*\* 정회원, 대진대학교 건축공학과 교수, 공학박사

\*\*\*\*\* 정회원, 충남대학교 건축학부 교수, 공학박사

으며, 신뢰성 있는 해석기법의 구축 및 적용을 통하여 전술한 실험적 연구의 한계를 극복할 것으로 기대된다.

그러므로 본 연구에서는 범용 비선형 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS 6.3<sup>1)</sup>을 이용하여 축력비를 주변수로 벽체에 대한 비선형 해석을 수행하고 이를 실험 자료를 통해 검증함으로써 이러한 부재의 해석기법을 구축하는데 기초 자료를 제시하는 한편, 실험 결과 값과 분석하여 비교·검토함으로써 제안된 해석기법의 타당성을 검증하고자 한다.

## 2. 재료의 구성모델

### 2.1. 콘크리트의 비구속 1축 응력-변형률 관계

콘크리트 1축 압축상태에서의 응력-변형률 관계는 Hognestad<sup>2)</sup>(1951)가 제안한 모델을 사용하였으며 식 (1)과 같다.

$$0 < \varepsilon < \varepsilon'_0, \quad \frac{\sigma}{\sigma_{cu}} = 2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon'_0} \left( 1 - \frac{\varepsilon}{2\varepsilon'_0} \right)$$

$$\varepsilon'_0 < \varepsilon < \varepsilon_{cu}, \quad \frac{\sigma}{\sigma_{cu}} = 1 - 0.15 \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon'_0}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon'_0} \right) \quad (1)$$

여기서  $\sigma_{cu}$ 는 최대 압축응력,  $\varepsilon'_0$ 는 최대 압축응력시 변형률,  $\varepsilon_{cu}$ 는 극한변형률을 나타낸다. 이는 콘크리트의 응력-변형률 관계를 포물선으로 가정한 것이다.

### 2.2. 콘크리트 구속 모델

시험체의 기둥의 스티럽에 의한 보강효과는 Saatcioglu와 Razvi<sup>3)</sup>(1992)가 제안한 구속모델을 사용하여 비등가구속압과 동일한 효과를 나타내는 등가구속압 산정에 기반을 두고 있으며 구속 콘크리트에 대한 강도 산정식은 식(2)와 같다.

$$f_{cc} = f_{co} + k_1 f_{le} \quad (2)$$

$$f_{le} = k_2 f_l \quad f_l = \frac{\sum A_s f_y \sin \alpha}{s \cdot b_c}$$

$$k_1 = 6.7 (f_{le})^{-0.17} \quad k_2 = 0.26 \sqrt{\left( \frac{b_c}{s} \right) \left( \frac{b_c}{s_1} \right) \left( \frac{1}{f_l} \right)} \leq 1.0$$

또한 구속된 콘크리트의 변형률은 식(3) 같다.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{01} (1 + 5K) \quad K = \frac{k_1 f_{le}}{f_{co}} \quad (3)$$

### 2.3. 콘크리트의 파괴 기준과 균열

콘크리트 응력요소가 다축응력 상태에 놓일 경우 콘크리트의 응답은 파괴 기준면을 이용한 탄소성 이론에 의해 정의되고, 압축파괴 기준면은 식(4)와 같이 표현된다.

$$f_c = q - \sqrt{3} a_0 p - \sqrt{3} r_c = 0 \quad (4)$$

여기서 p는 유효 응력이고 q는 Mises 등가편차응력,  $a_0$ 는 각각 식(5)와 식(6)과 같다.

$$p = -1/3 \text{trace}(\sigma), \quad q = \sqrt{\frac{3}{2}} S : S \quad (5)$$

$$a_0 = \sqrt{3} \frac{1 - r_{bc}^\sigma}{1 - 2r_{bc}^\sigma} \quad (6)$$

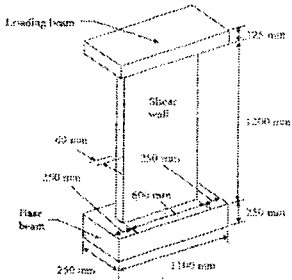


그림 1. 시험체 형상

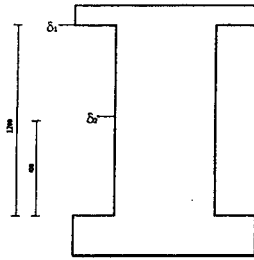


그림 2. 변형게이지 위치

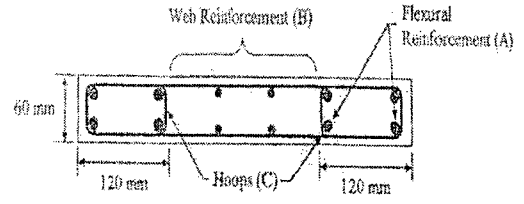


그림 3. 배근 상황

그리고  $\tau_c$ 는 경화 매개변수,  $S = \sigma + pI$ 로서 편차응력성분,  $r_{bc}^0$ 는 1축 압축강도( $\sigma_{uc}$ )에 대한 2축 압축강도의 비이다.

### 3. 선정 시험체

#### 3.1. 개요

본 연구에서는 철근콘크리트 벽체의 휨거동에 대한 해석기법을 구축하기 위해 기존의 실험된 시험체를 선정하였다. 선정된 시험체는 직방형 단면의 반복재하된 Pilakoutas<sup>4)</sup>의 형상비 2인 휨이 지배적인 벽체이다. 그림 1은 시험체의 형상이고 그림 2는 변형게이지 위치이며, 그림 3은 배근 상황이다. 시험체의 단면은 최대 휨초과 모멘트에 상응하는 전단내력을 보유하도록 수평 보강근으로 보강되었으며, 표 1은 선정대상 시험체 일람표이다.

#### 3.2. 이상화

해석대상 철근콘크리트 벽체는 2차원 셀 요소를 사용하여 모델링하였다. 프로그램은 범용 비선형 프로그램인 ABAQUS/Standard 6.3를 사용하였고, 요소는 4절점의 평면응력 요소(CPS4R)를 선택하였으며, 경계조건은 지점을 회전단으로 지정하였다. 주근과 콘크리트의 부착상태에 대한 모델링에 있어서는 완전부착으로 가정하여 REBAR 요소를 콘크리트의 셀 요소 내에 분산 분포시켜 모델링을 하였다.

### 4. 해석결과와 실험결과의 비교·분석

표 2는 유한요소해석에 의한 극한내력, 최대변위, 초기강성 및 에너지 소산능력에 대한 해석결과를 나타낸 것이다. 표에서 나타난 바와 같이 SW 4와 SW6의  $\delta_1$ 의 경우 극한내력, 최대변위, 초기강성, 에너지소산능력은 각각 103.818~103.990kN, 23.379~23.384mm, 19.815~20.853kN/mm, 2065.446~2103.334kN·mm로 극한내력 0.79~2.81%, 최대변위 5.57~7.01%, 초기강성 9.37~22.81%, 에너지소산능력 8.30~8.81%의 오차를 보였다.

SW 4와 SW6의  $\delta_2$ 의 경우 극한내력, 최대변위, 초기강성, 에너지소산능력은 각각 103.818~103.990kN, 10.139~10.155mm, 57.584~59.998kN/mm, 914.076~917.398kN·mm로 극한내력 0.79~2.81%, 최대변위 27.98~60.17%, 초기강성 23.02~54.84%, 에너지소산능력 33.40~96.64%의 오차를 보였다.

표 1. 시험체 일람표

시험체	콘크리트 압축강도 (N/mm <sup>2</sup> )	최대하중 (kN)	철근 상세			
			A	B		C
				수평철근	수직철근	
SW4	36.9	103	4-12mm bars	6mm bars @ 240mm	2-6mm bars	6mm bars @ 120mm
SW6	38.6	107	4-12mm bars	4mm bars @ 120mm	2-6mm bars	4mm bars @ 120mm

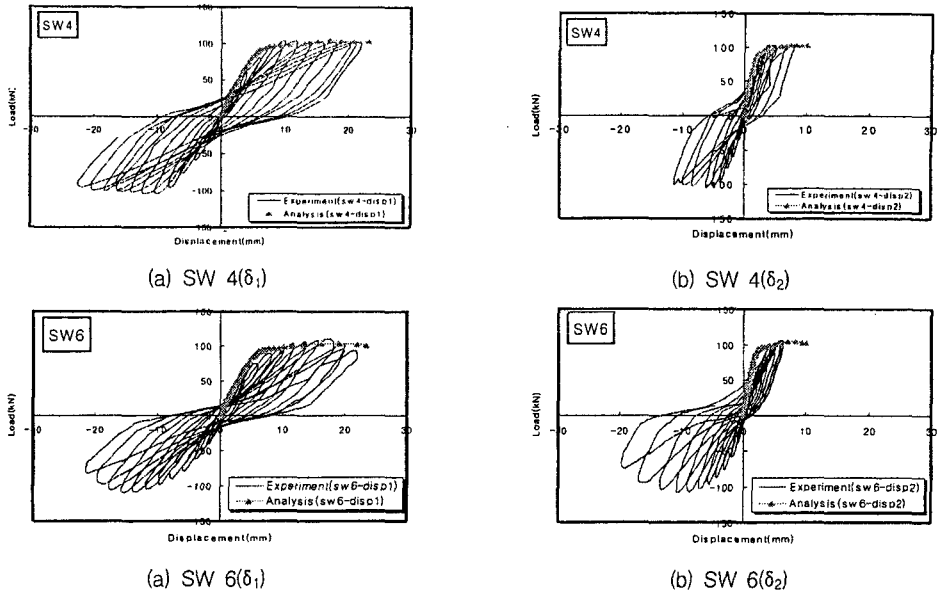


그림 4. 해석결과와 실험결과의 비교

그림 4는 해석결과와 실험결과의 하중-변위 곡선을 비교하였으며, 가는 실선은 실험값이고 굵은 점선은 해석값을 나타낸 것으로  $\delta_1$ 와  $\delta_2$ 를 비교하였을 때  $\delta_1$ 는 하중-변위 곡선이 거의 유사하게 거동함을 알 수 있으나,  $\delta_2$ 의 경우 실험값보다 초기탄성구간에서의 기울기와 변위가 큼을 알 수 있다.

### 5. 결론

본 철근콘크리트 벽체의 휨거동에 관한 비선형 유한요소해석에 관한 연구에서 다음과 같은 결론 및 향후 연구방향을 얻었다.

1. SW 4와 SW6의  $\delta_1$ 의 경우 극한내력 0.79~2.81%, 최대변위 5.57~7.01%, 초기강성 9.37~22.81%, 에너지소산능력 8.30~8.81%의 오차를 보여 비교적 정확하게 해석되었음을 알 수 있다.
2. SW 4와 SW6의  $\delta_2$ 의 경우 극한내력 0.79~2.81%, 최대변위 27.98~60.17%, 초기강성 23.02~54.84%, 에너지소산능력 33.40~96.64%의 오차를 보여 부정확하였다. 이에 대해 추후 보다 정밀한 해석기법의 구축이 추가되어야 하며, 반복하중을 받는 벽체에 대한 해석연구가 필요하다고 판단되었다.

### 참고문헌

1. ABAQUS Theory Manual, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.
2. Hognestad E., A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members, Bulletin No. 399, Engineering Experiment Station, University of Illinois, Urbana, Illinois, v.49, No.22, November, 1951.
3. Murai Saatioglu and Salim R. Razvi. Strength and Ductility of Confined Concrete. Journal of Structural Engineering, v.118, no 6, p.1590~1607, 1992.
4. Pilakoutas, Kypros. "Earthquake Resistant Design of Reinforced Concrete Walls" Ph.D.Thesis, University of London, 1990

표 2. 시험체별 해석결과

시험체	해석결과	극한내력			최대변위			초기강성			에너지소산능력		
		실험값 (kN)	해석값 (kN)	오차 (%)	실험값 (mm)	해석값 (mm)	오차 (%)	실험값 (kN/mm)	해석값 (kN/mm)	오차 (%)	실험값 (kN·mm)	해석값 (kN·mm)	오차 (%)
SW4	δ1	103	103.818	0.79	22.150	23.384	5.57	16.134	19.815	22.81	1898.199	2065.446	8.81
	δ2	103	103.818	0.79	7.935	10.155	27.98	46.807	57.584	23.02	685.198	914.076	33.40
SW6	δ1	107	103.990	2.81	21.848	23.379	7.01	19.067	20.853	9.37	1942.080	2103.334	8.30
	δ2	107	103.990	2.81	6.330	10.139	60.17	38.748	59.998	54.84	466.528	917.398	96.64