

## 미시적 재료모델을 사용한 원전 격납건물 벽체 요소의 구조거동 분석

### On the investigation of structural behaviour of nuclear containment building wall element using microscopic material model

이상진\* · 이홍표\*\* · 서정문\*\*\*

Lee, Sang-Jin · Lee, Hong-Pyo · Seo, Jeong-Moon

---

#### ABSTRACT

Nonlinear stress analysis of nuclear containment building wall element is carried out using microscopic material model. The present study mainly focuses on the finite element analysis of the nuclear containment building wall element under biaxial tensile stresses and it evaluates the performance of adopted microscopic material model in the membrane energy dominant situation. From the numerical analysis, the adopted material model performs well and has a good agreement with experiment result. Finally, the result of present study can be severed as a benchmark test when concrete material model is in need of evaluation.

---

#### 1. 서론

원자력 발전소의 격납건물은 내부기와 시스템을 보호하고 외부로 방사선 물질이 누출되지 않게 하는 차폐기능을 담당한다. 따라서 다양한 조건에 대한 격납건물의 구조적 저항성능을 분석하고 평가하는 것은 매우 중요하다. 특히 격납건물내부의 압력이 설계압력보다 높은 경우에 대한 구조적 성능 평가는 필수적이다. 이러한 격납건물의 극내압평가는 여러 가지의 절차를 통하여 이루어질 수 있으나 격납건물의 전체해석을 수행하기에 앞서 벽체와 같은 부분해석을 통하여 전체 해석에 사용될 재료모델의 성능을 평가하게 된다. 그리고 이러한 부분해석결과는 격납건물해석에 사용되어지는 재료모델에 대한 벤치마크검사로 매우 유용하게 사용되어 질 수 있다.

따라서 본 연구는 격납건물 해석프로그램의 개발을 위해 도입된 미시적 재료모델<sup>(1,2,3)</sup>을 원전 격납건물 벽체요소에 적용하여 벽체요소의 구조적 거동을 조사하였으며 궁극적으로 격납건물에 적용되는 콘크리트 재료모델을 평가하는 자료로 이용될 수 있게 하고자 한다. 본 연구에서는 미국

---

\* 정회원 · 한국원자력연구소 선임연구원 · 공학박사 · 042-868-2223 (sjlee@kaeri.re.kr)

\*\* 한국원자력연구소 · 충남대학교 박사(학연)과정 · 공학석사

\*\*\* 정회원 · 한국원자력연구소 책임기술원 · 공학박사

전력연구소 (Electric Power Research Institute)에서 주관한 격납건물 벽체요소의 실험결과<sup>(4)</sup>를 해석에 이용하였다.

## 2. 격납건물 벽체요소 실험

해석에 사용한 격납건물 벽체실험<sup>(4)</sup>은 콘크리트 격납건물의 성능을 평가하기 위해 사용되는 재료모델을 검증하기 위한 목적으로 실행되었으며 실험결과는 격납건물 벽체의 강도와 변형을 예측하기 위해 도입되는 재료모델을 평가하는데 유용하게 쓰일 수 있을 것이다. 실험체는 그림 1에 도시된 격납건물의 벽체 부분에 대한 구조적 거동을 평가하기 위하여 제작되었으며 이 부분은 격납건물이 내압을 받을 때 원환 방향과 자오선 방향으로 응력의 분포가 2:1인 지점이다.

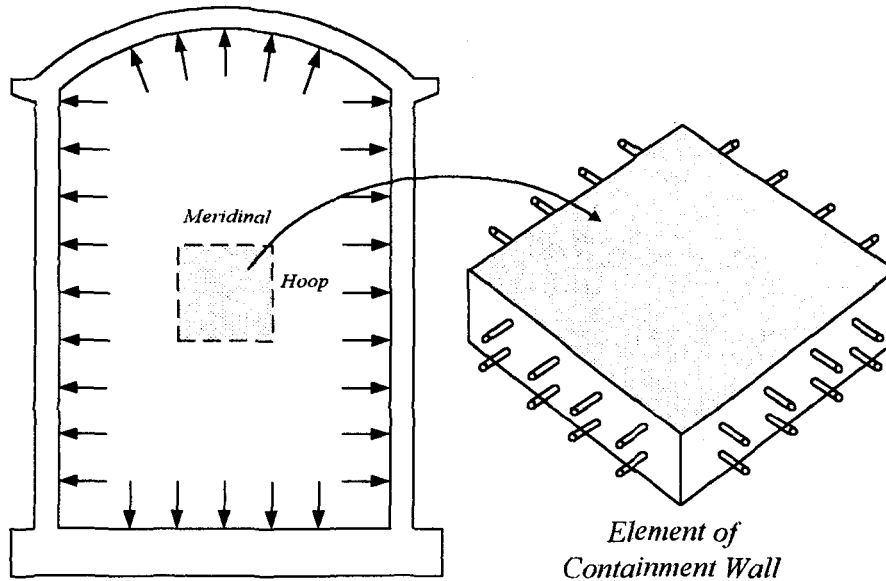


그림 1 격납건물의 벽체 요소

실험체는 격납건물에 실제로 사용된 재료를 이용하여 제작되었다. 실험체의 크기는  $60 \times 60 \times 24$ 인치 ( $1.524 \times 1.524 \times 0.6096m$ )이며 실험체의 두께는 실제 격납건물 벽체 두께의 절반으로 하였다. 실험체는 철근이 원환방향과 자오선방향으로 배근되었으며 시편에 사용된 모든 철근은 격납건물 건설에 사용하는 종류를 사용하였으며 원환방향으로는 철근 #18( $\phi$  2.257인치(57.33 mm))이 자오선방향으로는 철근 #14( $\phi$  1.693인치(43.0 mm))이 12인치(304.8mm) 간격으로 중층상하로 각각 4개씩 배치되었다. 따라서 실험체의 원환방향과 자오선방향의 철근비가 다르며 전체 철근콘크리트 단면적에 대한 철근면적의 비( $A_s/A_c$ )는 원환/자오선 방향으로 각각 0.022/0.013이다. 실험체에 사용된 철근의 재료적 성질은 다음과 같다. 철근 #18은 탄성계수 31800 psi(219.26 Mpa)이며 항복응력과 극한응력은 각각 67.9 ksi(468.17 Mpa), 93.1 ksi(641.92 Mpa)이다. 그리고 철근 #14는 탄성계수가 274000 psi(1889.23 Mpa)이며 항복응력과 극한응력이 각각 68.4 ksi(471.62 Mpa), 105.2 ksi(641.92 Mpa)이다. 콘크리트는 28일 압축강도 3000 psi(20.69 Mpa)를 가지게 배합 설계하였으며 공시체 시험으로부터 콘크리트 압축강도가 3585 psi(24.72 Mpa)를 나타냈으며 탄성계수는 3537

ksi(24387.6 Mpa)이다. 그리고 프와손 비는 0.2이다.

### 3. 미시적 재료 모델을 사용한 셀 유한요소

본 연구에서는 격납건물 벽체의 요소의 해석을 위해 Maekawa등에 의해서 제시된 미시적인 재료모델을 도입하였다. 이 모델에 대한 개념은 참고문헌<sup>(4)</sup>에 자세히 기술되어져 있으므로 본 절에서는 간략히 정리하여 기술하였다. 도입된 미시적 재료모델은 철근콘크리트 구조물의 거동을 철근과 콘크리트재료의 거동특성으로 나누어 표현하며 등가응력-등가변형도의 관계를 이용하여 다차원의 값으로 표현되는 응력과 변형도값을 일차원의 관계로 표현하였다. 본 연구에 도입된 재료모델의 개념은 그림 2와 같이 도시할 수 있다.

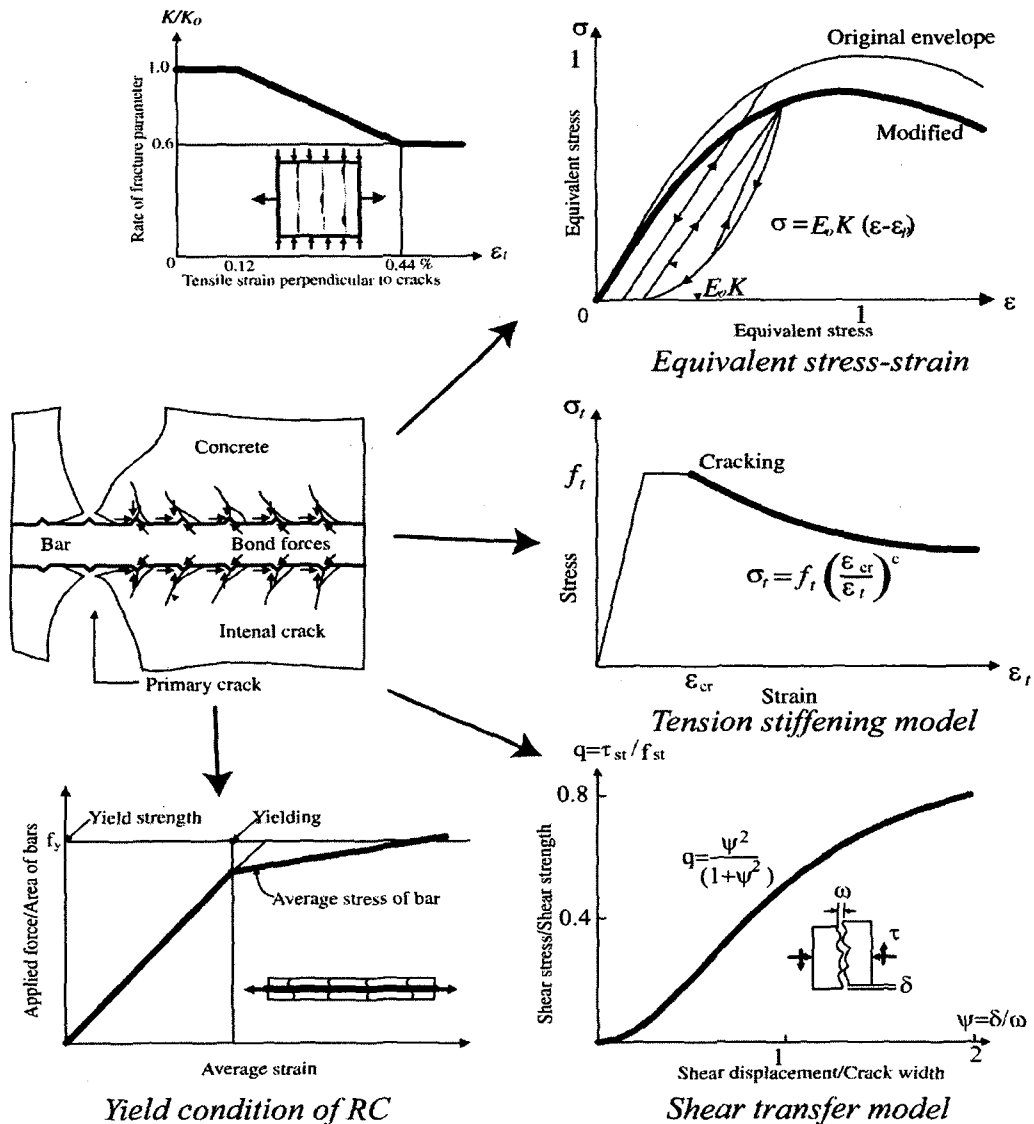


그림 2 미시적 재료모델의 개념도

콘크리트는 균열이 일어나는 시점을 기준으로 재료적 거동에 큰 변화가 생긴다. 따라서 도입된 모델은 그림 2에서 도시된 바와 같이 콘크리트의 재료특성을 적절히 표현하기 위하여 균열 전과 후에 나타나는 콘크리트의 거동을 표현할 수 있는 재료모델로 구성되어 있다. 도입된 재료모델은 등가응력-등가변형도의 관계를 이용하여 콘크리트의 응력과 변형도의 수준을 결정하고 콘크리트에 균열이 발생하면 부착응력을 고려하는 인장경화모델과 균열면의 전단전달메카니즘 그리고 고압축응력하에서 파괴매개변수를 수정한 압축응력하에서 균열된 콘크리트모델등으로 콘크리트의 재료적 거동을 표현하게 된다.

#### 4. 해석 및 고찰

도입한 미시적 재료모델을 이용하여 제 2절에 기술한 격납건물의 벽체요소를 해석하였다. 유한요소해석을 위하여 8절점 Serendipity 퇴화셀요소를 사용하였고 전체판넬을 4개의 요소로 이산화하였다. 유한요소해석시 비선형해법은 초기강성법을 사용하였으며 면내에너지를 표현하는 강성행렬을 형성하기 위하여 정상적분을 사용하였다. 하중은 시험시 가력시스템의 제한으로 인해 철근에 직접 가하였으나 유한요소해석시에는 사용된 유한요소의 특성을 고려하여 시험체의 내면에 선하중으로 원환방향과 자오선 방향 2:1의 비율로 가했다. 그리고 철근은 분산화기법을 사용하여 평균두께로 환산하여 모델링하였다. 판넬에 사용된 재료의 물성치는 제 2절에 기술하였고 형상은 그림 3에 그 결과와 함께 도시하였다.

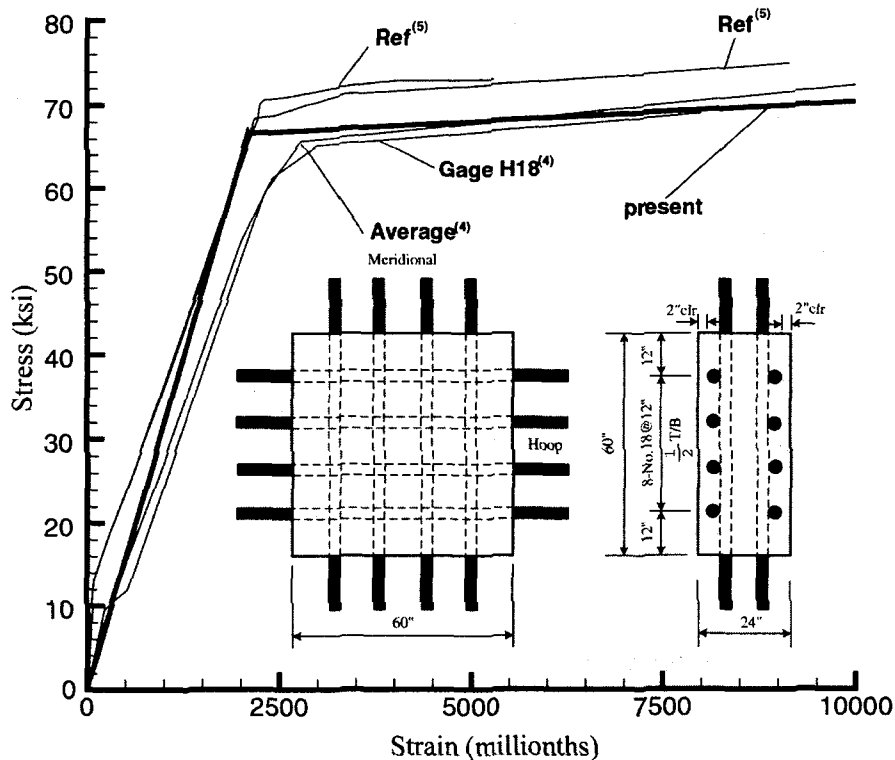


그림 3 벽체요소의 해석결과

해석결과는 실험으로부터 구해진 평균응력-평균변형도의 값과 상용프로그램 ABAQUS<sup>(6)</sup>를 사용하여 구해진 해석한 결과와 비교하여 그림 3에 도시하였다. 본 연구를 통하여 구해진 해석결과는 유한요소의 철근 층에서 계산된 응력-변형도값을 도시한 것이다. 해석을 통하여 실험체에 첫 번째 균열은 원환방향의 철근의 응력값이 9.23 ksi(63.64 Mpa)일때 발생하였고 63.13 ksi(435.28 Mpa)일때 철근이 항복하였다. 참고로 실험에서는 첫번째 균열은 원환철근의 평균응력이 9.9-11.8 ksi(68.26-81.36 Mpa)에서 발생하였으며 원환방향의 철근은 응력이 64.3 ksi(443.35 Mpa)에 도달하여 항복하였다. 철근이 항복한 뒤에도 벽체의 거동은 상용 프로그램 ABAQUS를 사용한 경우에 비해 그 거동이 실험결과와 가까웠다. 하지만 항복이전의 응력-변형도의 기울기는 실험결과와 다소 차이를 보였다.

## 5. 결론

미시적 재료모델을 도입하여 격납건물 벽체요소의 유한요소 해석을 수행한 뒤 거동을 분석하고 그 결과를 격납건물 벽체요소의 거동을 분석하는 재료모델을 평가하기 위한 벤치마크 검사로 제시하였다. 해석 결과로부터 도입된 재료모델은 면내력을 받는 격납건물벽체요소의 균열시점과 항복시점을 비교적 정확히 파악하였다. 그러나 콘크리트의 균열지점과 철근의 항복지점을 보다 정확히 파악하고 분석하기 위하여 호강법과 같은 해석알고리즘의 도입이 필요한 것으로 사료되어 이에 대한 연구를 향후에 추진하고자 한다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학기술부의 원자력 증장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었으며 연구수행 중 많은 도움을 주신 동경대학의 Prof. Maekawa, 성균관대학의 신현목교수께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 岡村 甫, 前川 宏一, 鐵筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991
2. 최정호, 프리스트레스 콘크리트 셸구조의 비선형 유한요소해석, 성균관대학교 대학원, 토목공학과, 박사학위논문, 1996
3. 이상진, 서정문, 철근콘크리트 구조물의 비선형 해석 (Part I: Shell finite element formulation), 한국원자력연구소, 기술보고서 TR-1631/00, 2000
4. J.T. Julien, D.M. Schultz and T.L. Weinmann, Concrete Containment Structural Element Tests, Volume 1 & 2, Construction Technology Laboratories, 1984
5. 김종윤, 배인환, 전영선, 서정문, 콘크리트 격납건물벽체 Panel부재의 비선형해석, 대한토목학회 가을학술 발표회, (발간예정) 2000
6. ABAQUS/Standard User's manual (Ver. 5.8), Hibbitt, Karlsson & Sorensen, INC, 1998