

미시적 재료모형을 사용한 원전 격납건물의 비선형 응력해석

A nonlinear stress analysis of nuclear containment building using microscopic material model

이상진* 김현아** 서정문***

Lee, Sang Jin · Kim, Hyuna · Seo, Jeong Moon

ABSTRACT

Nonlinear stress analysis of nuclear containment building is carried out using microscopic concrete material model. The present study mainly focuses on the evaluation of the ultimate pressure capacity of idealized containment building in nuclear power plant. For this purpose, an eight-node degenerated shell element is adopted and an imaginary opening in the apex of containment building is allowed in FE model. From numerical analysis, the adopted concrete material model performs well and has a good agreement with the result obtained by using ABAQUS. Finally, we propose the present study as a benchmark test for nonlinear stress analysis of containment buildings.

1. 서론

원자력 발전소의 격납건물은 내부기기와 시스템을 보호하고 외부로 방사선 물질이 누출되지 않게 하는 차폐기능을 담당한다. 따라서 다양한 조건에 따른 격납건물의 구조적 저항성능을 분석하고 평가하는 것은 매우 중요하며 격납건물 내부의 압력이 설계압력보다 높은 경우에 대한 구조적 성능 평가는 필수적이다. 이러한 맥락에서 다양한 콘크리트 재료모형을 이용하여 지금까지 건설되었거나 건설중인 격납건물의 구조건전성 평가하는 극내압해석을 실시하여 왔다. 이때 극내압해석에 사용되는 재료모델은 격납건물의 부분요소나 격납건물의 축소모델의 실험을 통해서 구해진 결과와 비교함으로써 그 실효성을 검증하고 있다. 특히 격납건물의 부분요소에 대한 실험은 격납건물 전체거동해석에 사용될 재료모델의 성능을 분석하는데 매우 효율적으로 이용되어 왔다.

본 연구의 주목적은 도입된 미시적 재료모델⁽¹⁾을 이용하여 원전 격납건물의 비선형 응력해석을 하고 해석결과를 통하여 도입된 재료모델의 성능을 분석하고 정리하여 그 결과를 벤치마크 검사로 제시하고자 한다. 비선형 응력해석에는 한국 표준형 원자로 격납건물의 제원을 이용하였으며 그 결과를 범용해석프로그램 ABAQUS⁽²⁾를 사용하여 구한 해와 비교하였다.

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

** 정회원, 한국원자력연구소 석사후연수생 · 공학석사

*** 정회원, 한국원자력연구소 책임기술원 · 공학박사

2. 격납건물의 제원 및 이상화된 모델

격납건물은 기초슬래브를 제외하면 상부의 돔과 하부의 실린더벽체로 이루어진 셸 구조물이다. 격납건물의 형상은 그림1(a)에 도시된 바와 같으며 벽체와 돔은 라이너(Liner), 철근 그리고 프리스트레 강력이 가해지는 텐돈층으로 구성되어 있고 3개의 주요 가용 개구부가 있다. 격납건물의 벽체 단면은 일반적으로 격납건물의 내부로부터 6mm의 강판으로 된 라이너 그리고 원환방향과 자오선의 양방향으로 철근, 텐돈, 철근이 순서대로 배치되어 있다. 본 연구에서는 그림1(a)에 도시된 격납건물을 그림1(b)와 같이 이상화하여 해석에 이용하고자 한다. 이상화된 FE모델을 완성하기 위하여 원전에서 사용되는 재료적 성질을 그대로 사용하였고 원전 격납건물에 존재하는 장비운반구, 비상출입구, 개인출

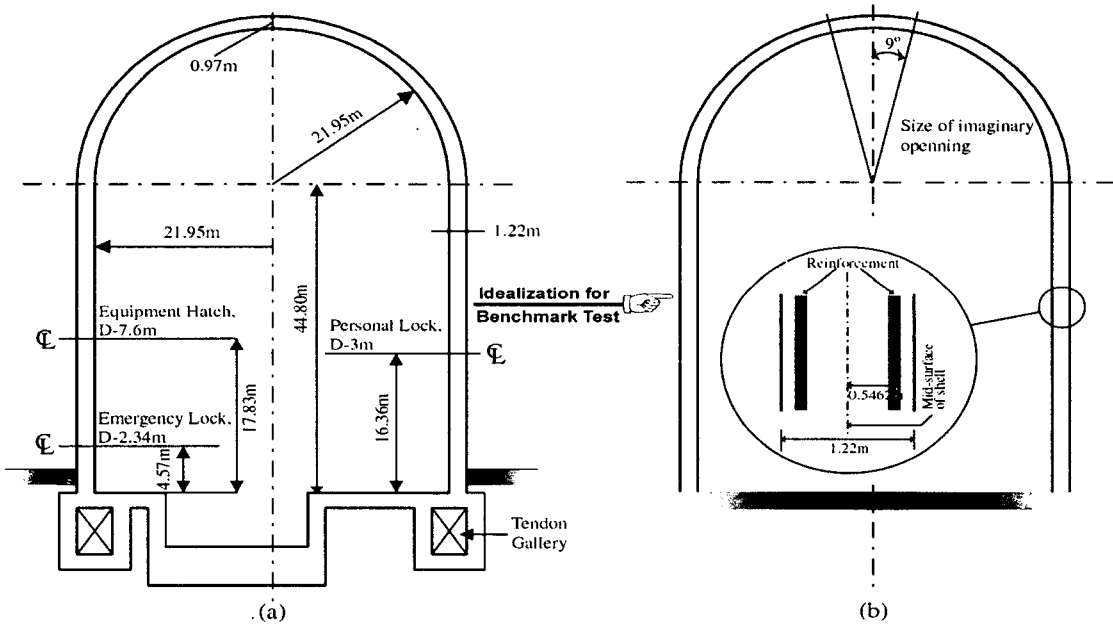


그림 1 격납건물의 형상

입구를 생략하여 셸이 축대칭 구조물로 작용하게 하였다. 또한 셸요소를 사용하여 이산화물을 효율적으로 하기 위하여 격납건물의 정점부분에 가상의 개구부를 도입하였다. 도입된 가상개구부의 크기는 참고문헌⁽³⁾에서 조사된 바를 바탕으로 하였다. 참고로 참고문헌⁽³⁾에서는 가상개구부를 도입하여 격납건물을 해석할 경우 그 크기가 돔둘레의 1/10이하일 것을 권장하고 있다. 그리고 격납건물에 사용된 라이너는 구조재로서의 역할을 담당하지 않기 때문에 본 연구에서 사용한 모델에서는 제외시켰다.

3. 미시적 재료 모델을 사용한 셸 유한요소

본 연구에서는 격납건물 벽체의 요소의 해석을 위해 Maekawa등에 의해서 제시된 미시적인 재료모델을 도입하였다. 이 모델에 대한 개념은 참고문헌^(1,4)에 자세히 설명되어 있어 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 그림2와 같이 도시할 수 있다.

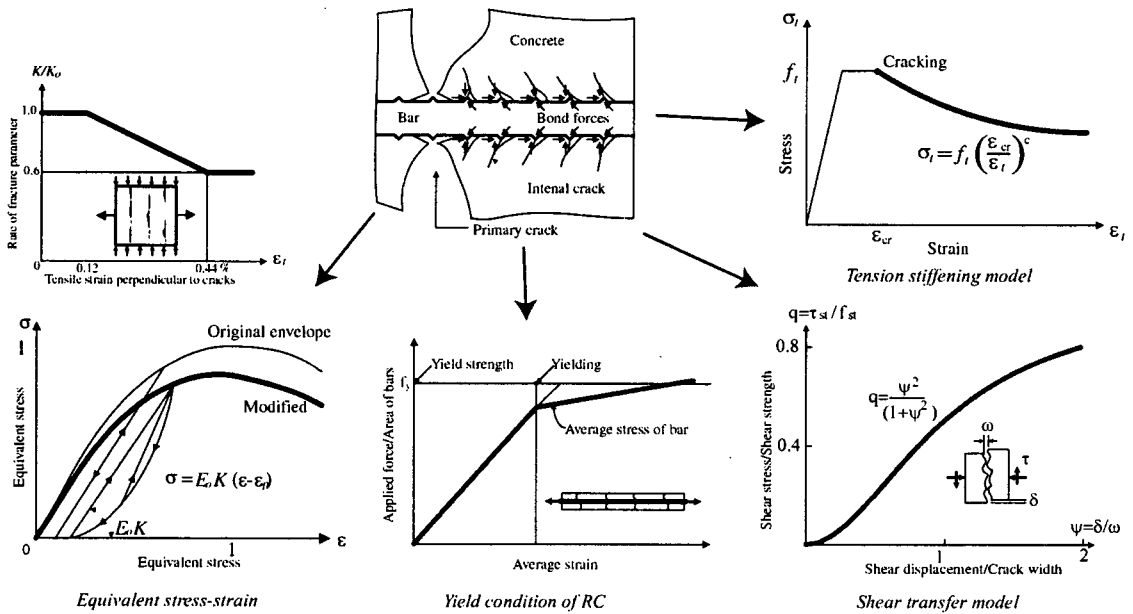


그림 2 미시적 재료모델의 개념도

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 콘크리트 모델등으로 콘크리트의 재료적 거동을 표현하게 된다. 또한 균열발생을 측정하는 균열기준은 압축-인장영역에 대해서는 Niwa⁽⁵⁾가 제안한 응력포락선을 도입하였고 인장-인장의 영역에서는 Aoygi-Yamada⁽⁶⁾가 제안한 응력포락선을 사용하였다. 도입된 미시적인 모델은 응력이 균열기준의 값에 도달하고 주변형도값 또한 한계변형도값에 이르면 균열이 발생한 것으로 간주한다. 한편으로 균열면에서 철근이 항복하면 철근의 다른 부분이 항복하지 않았더라도 철근의 평균응력과 평균변형도는 탄성의 영역을 벗어난다. 이때 철근의 평균응력은 그림2에서 보는 바와 같이 자연히 항복강도보다 낮아지게 된다. 따라서 철근 콘크리트의 항복은 부재의 인장강성이 전체적으로 감소될 때나 균열면에서 철근의 응력이 항복강도에 도달했을 때로 정의된다.

도입한 미시적 모델은 표준 퇴화셀요소에 적용되었으며 층개념^(4,7)을 도입하여 철근을 셀요소 임의의 층에 존재할 수 있게 하였다. 이때 응력은 각층의 층층에서 계산하였고 계산된 응력은 각 층의 두께별로 그 응력이 일정하다고 가정하였다. 퇴화셀요소의 강성행렬은 전체좌표계와 절점좌표계를 사용하여 병진변위와 회전변위의 항을 나누어 다루었으며 셀의 평형방정식을 바탕으로 표준의 비선형방정식을 유도하였다. 비선형방정식⁽⁴⁾은 수치적방법으로 해결하기 위해서 비선형방정식을 선형화⁽⁷⁾한 뒤 Newton-Raphson법을 사용하여 풀었다.

4. 수치해석 및 고찰

제2절에서 이상화한 격납건물의 1/4을 유한요소해석을 위하여 8절점 퇴화 쉘 요소 60개를 사용하여 그림 3(a)에 도시된 바와 같이 이산화 하였다. 격납건물에 작용하는 하중은 자중, 텐돈의 프리스트레스력, 그리고 격납 건물의 내부에서 작용하는 압력으로 나누어진다. 자중을 계산하기 위한 콘크리트의 밀도는 $\rho=0.0025 \text{ kg/cm}^3$ 이며 프리스트레스력은 외압으로 환산하여 격납건물의 외벽에 $q_e=5.414 \text{ kg/cm}^2$ 의 분포하중으로 작용하게 하였다. 유한요소해석시 하중은 자중을 먼저 가한 뒤 프리스트레스력에 해당하는 외부압력을 작용시켰고 마지막으로 내부압력을 $q_i=0.5 \text{ kg/cm}^2$ 씩 단계별로 증가시켰다. 해석에 사용한 콘크리트의 압축강도는 $f'_c=38 \text{ Mpa}$ 이며 포와송비는 $\nu=0.17$ 을 사용하였다. 철근의 탄성계수, 포와송비 그리고 항복강도는 각각 $E=200000 \text{ Mpa}$, $\nu=0.2$, $f_y=4218 \text{ kg/cm}^2$ 을 사용하였다. 철근은 쉘의 중층에서 격납건물의 안쪽과 바깥쪽으로 0.5462 m인 지점에 대칭으로 배치되어 있는 것으로 가정하였으며 원환과 자오선방향으로 같은 철근비($\rho_s=0.02$)를 가지고 있다고 가정하였다. 해석결과는 격납건물벽체 부분에서 발생하는 최대변위값을 상용프로그램인 ABAQUS의 해석 결과와 비교하여 그림3에 도시하였다. ABAQUS를 이용한 유한요소해석을 위해서 전체 2414개의 4절점 축대칭

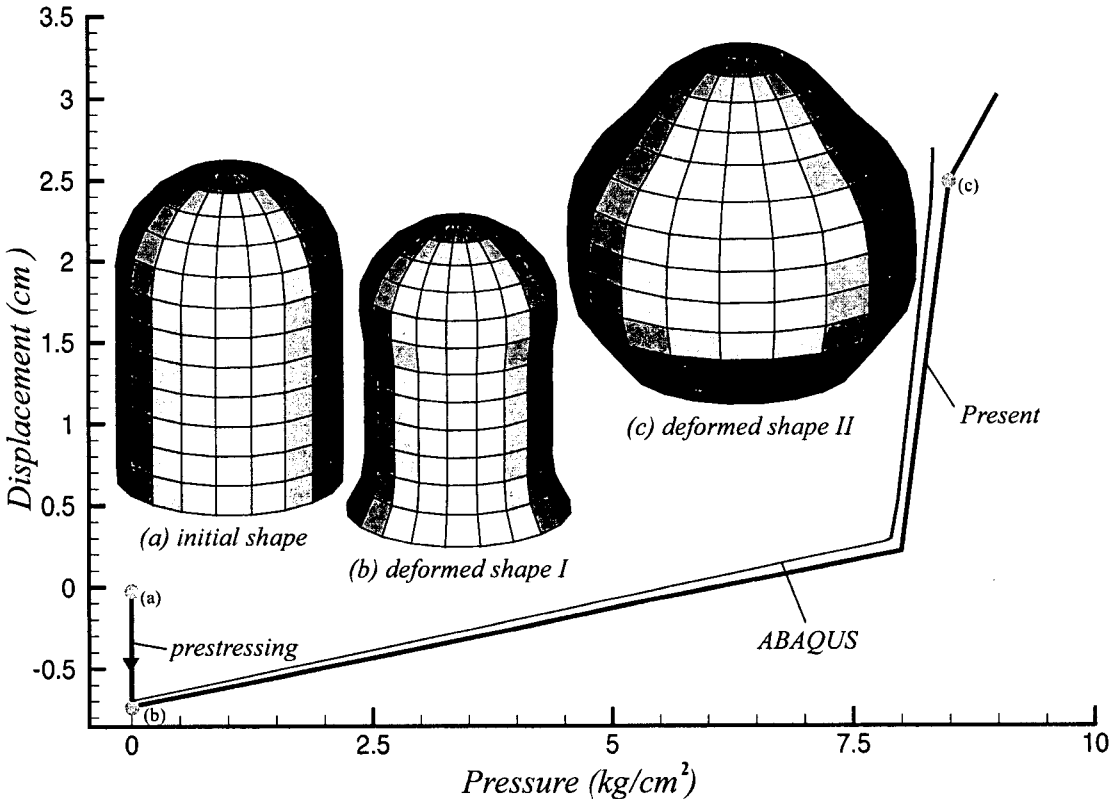


그림 3 격납건물의 초기형상과 변형정도

고체요소 그리고 402개의 2절점 축대칭 쉘요소를 사용하였다. 이때 사용한 재료모델은 참고문헌⁽⁸⁾에 사용한 것과 동일 것을 사용하였다. 최대변위값은 유한요소의 수가 상이하여 본 연구의 통해 구해진 해는 지면으로부터 격납 건물 벽체의 25.60 m지점에서 측정하였으며 ABAQUS의 해는 26.26 m지점에서 측정하였다. 본 연구를 통해서도

출된 결과는 적은 수의 유한요소를 사용하였으나 ABAQUS의 해와 비교적 잘 일치함을 그림 3으로부터 알 수 있다. 자중과 프리스트레스력을 받을 경우 격납건물은 그림3(b)에서 도시된 바와 같이 종모양으로 수축하였으며 이때 최대 변위는 0.673cm이었다. 수축된 격납건물은 내압의 증가로 초기형상을 찾아가는데 내압이 $q_i=6.0 \text{ kg/cm}^2$ 이 되면 초기형상을 되찾았고 내압이 계속 증가하여 $q_i=8.5 \text{ kg/cm}^2$ 에 이르면 최대변위가 2.492 cm에 도달하였다. 참고로 ABAQUS를 사용하여 구한 해의 경우 자중과 프리스트레스력으로 수축한 격납건물의 최대변위는 0.683 cm이었고 최대내압에 도달했을 때의 최대변위는 2.66 cm이었다. 수축된 격납건물의 형상은 그림 3(b)에 도시된 바와 같이 돔의 정점부가 다소 하강하였으나 최대내압에 이르렀을 경우 그림3(c)에 도시된 바와 같이 격납건물은 전체적으로 부풀었으며 정점부분 또한 상승하였다.

5. 결론

본 연구에서는 미시적 재료모델을 사용하여 이상화된 격납건물의 비선형 응력해석을 수행하였다. 본 연구를 통하여 도출된 해석결과는 격납건물에 사용되는 재료모델을 검증하기 위한 벤치마크 검사로 제시하였다. 해석 결과로부터 도입된 재료모델은 내압을 받는 격납건물의 비선형 거동을 비교적 정확히 파악하였다. 그러나 콘크리트의 재료의 거동을 보다 정확히 파악하고 분석하기 위해서는 보다 광범위한 벤치마크 검사를 고안해야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었으며 연구 수행 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. ABAQUS/Standard User's manual (Ver. 5.8), Hibbitt, Karlsson & Sorensen, INC, 1998
3. 이상진, 이홍표, 서정문, 격납건물 FE모델의 정점개구부 유무에 따른 동적 특성분석, 대한토목학회 추계학술발표회, (발간예정), 2000
4. 이상진, 서정문, 철근콘크리트 구조물의 비선형 해석 (Part I: Shell finite element formulation), 한국원자력연구소, 기술보고서 TR-1631/00, 2000
5. 二羽淳一郎, 鐵筋コンクリート 板要素の力學的性狀, 土木工學科, 東京大學修士論文, 1980
6. Aoyagi, Y. and Yamada, K., Strangth and deformation characteristics of RC shell elements subjected to in-plane forces, *Concrete library international JSCE*, No.4, pp.129-160, 1984
7. S.J. Lee and W. KanukNuchulchai, A nine-node assumed strain finite element for large deformation analysis of laminated shells, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 42, 777-798, 1998
8. 김현아, 배인환, 최인길, 원전격납건물의 프리스트레스 손실에 따른 거동영향평가, 한국원자력학회 춘계학술발표회, 2000