

프리스트레스 콘크리트 격납건물 1/4 축소모델의 비탄성응력해석

Inelastic Stress Analysis of 1/4 Scale Prestressed Concrete Containment Vessel Model

이홍표* · 전영선** · 신재철***

Lee, Hong-Pyo · Choun, Young-Sun · Shin, Jae-Chul

ABSTRACT

The present study mainly focuses on the inelastic stress analysis of the 1/4 scale prestressed concrete containment vessel model(PCCV) under internal pressure and evaluates not only failure mode but also ultimate pressure capacity of the PCCV. Inelastic analysis is carried out 2D axisymmetric FE model and 3D FE model using four concrete material models which are Drucker-Prager Model, Chen-Chen Model, Damaged Plasticity Model and Menetrey-Willam Model. The uplift phenomenon of the basemat is considered in the 2D axisymmetric FE models. It is found from the 2D axisymmetric analysis results that both of Drucker-Prager model and Damaged Plasticity Model have a good performance and the uplift of the basemat is too small to influence on the global behavior of the PCCV. The FE analysis results on the ultimate pressure and failure mode have a good agreement with experimental results.

1. 서론

원자로 격납건물은 유사시 방사능 물질의 외부 유출을 막는 최후의 방벽이다. 따라서 격납건물의 구조적 성능을 검증하는 일은 필수적이며 이를 위하여 격납건물의 성능평가방법을 개발하기 위한 연구가 국내외에서 활발하게 진행되고 있다. 국내의 경우 원전 격납건물의 건설에 사용된 철근콘크리트 재료특성을 이해하기 위한 재료실험⁽¹⁾ 그리고 이를 바탕으로 한 수치해석모델의 개발⁽²⁾ 등과 같은 일련의 연구가 진행되었다. 국외의 경우 격납건물의 부재단계 실험은 물론이고 축소모델 실험^{(3),(4)}을 수행하여 기능적인 파괴와 구조적인 파괴거동을 분석하였다. 이러한 연구는 단순히 구조물의 극한성능을 결정하려는 연구 활동을 지양할 뿐만 아니라 구조물의 파괴모드에 대한 전체적인 이해를 증진시킨다는 점에서 매우 고무적이다.

최근에는 일본의 NUPEC과 미국의 NRC에서 공동연구로서 프리스트레스 콘크리트 격납건물 1/4 축소모델의 극한내압능력과 파괴거동을 예측하기 위한 실험⁽⁵⁾을 수행 한 바가 있다. 이 실험은 현재까지 제작된 실험모델 중에서 격납건물의 실물크기에 가장 근접한 모델에 대해 격납건물의 내압능력과 파괴모드를 규명할 뿐만 아니라 해석기술개발의 벤치마킹으로 사용될 수 있으므로 그 의의는 매우 크다.

* 정회원 · 한국원자력연구소 · 박사수료후연수생 · 공학석사 · 042-868-2276 (hplee@kaeri.re.kr)

** 정회원 · 한국원자력연구소 · 책임기술원 · 공학박사

*** 정회원 · 충남대학교 · 교수 · 공학박사

이러한 맥락에서 본 연구에서는 극한내압에 대한 격납건물의 성능을 검증하기 위한 관련기술 확보를 위해 사용프로그램 ABAQUS를 이용하여 1/4 축소모델에 대해 유한요소법으로 비탄성응력해석을 하였다. 본 논문은 해석결과를 실험과 비교 분석하여 격납건물의 해석방법과 절차를 확립하고 해석기술개발의 벤치마킹으로 제공하는데 그 목적이 있다. 유한요소해석은 2차원 축대칭요소와 3차원 고체요소를 이용한 해석으로 나누어 실시하였다. 2차원 축대칭해석에서는 콘크리트 재료모델에 따른 격납건물의 전체적인 거동을 분석하였다. 이때 사용한 콘크리트 재료모델은 격납건물 해석에 주로 사용되며 ABAQUS 6.3⁽⁶⁾에서 이용 가능한 것으로 Drucker-Prager 모델, Chen-Chen 모델, 손상소성모델 그리고 Menetrey-Willam 모델 등이다. 또한 기초매트의 하단부 경계조건에 따른 영향과 기초매트로 인한 들림(uplift)의 영향을 분석하였다. 이러한 2차원해석을 바탕으로 장비운반구와 작업자출입구 같은 대개부와 부벽(buttress)를 고려한 3차원해석을 수행하여 실험 결과 및 Round Robin Analysis⁽⁷⁾에 참가한 기관들의 해석결과와 비교 분석하였다.

2. 축소모델 실험분석

일본의 NUPEC과 미국의 NRC에서 공동연구 프로그램으로 수행한 프리스트레스 콘크리트 격납건물 (Prestressed Concrete Containment Vessel, PCCV) 1/4 축소모델 실험은 일본의 OHI 3호기를 대상으로 한 것으로 원통형벽체에 반구형 돔을 갖는 형상이며 장비운반구와 작업자출입구 같은 대개구부가 있고 180° 간격으로 두 개의 부벽(buttress)을 가지고 있다. 대상 격납건물의 형상을 그림 1에 도시하였다.

격납건물 축소모델은 전체적으로 1/4 크기로 제작되었으나 벽체 하단부와 기초매트의 접합부에서 굽힘모멘트에 의한 영향을 분석하기 위해 기초매트는 실물 크기로 제작되었다. 또한 두 개의 대개구부를 포함한 모든 관통부는 실구조물로부터 크기 조정이 되었으며 가압 시 내부압력이 유출되지 않도록 밀폐되었다.

PCCV에 사용된 구조재료로는 콘크리트, 철근, 텐돈 그리고 라이너플레이트 등이다. 격납건물의 벽체와 돔의 두께가 1/4로 줄었기 때문에 축소모델을 제작할 때 콘크리트의 최대골재크기를 10mm로 제한하였다. 철근은 수직과 수평방향으로 내외측에 2개의 층에 각각 배근하였고 모든 철근비가 그대로 유지되었다. 이때 철근은 2mm에서 16mm 지름을 사용하였다. 텐돈은 실구조의 형태를 그대로 유지하였다. 90개의 역 U형 텐돈과 108개의 수평텐돈이 사용되었다. 역 U형 텐돈은 기초매트의 텐돈궤리에서 장착되었고 수평텐돈은 360° 간격으로 부벽에 장착되었다. 개개의 텐돈은 7개의 와이어로 이루어진 스트랜드가 3개씩 합쳐져 있고 텐돈 하나의 단면적은 3.393cm² 이다. 라이너플레이트는 실제 두께와 동일하게 1.6mm를 사용하였다. 실구조에서 라이너의 앵커는 벽체와 돔의 자오선방향으로 T형을 사용하였으나 축소모델에서는 원통형벽체에서 축소된 T형 앵커를 사용하였고 돔에서 스티드형태의 T형 앵커를 사용하였다.

3. 유한요소모델

격납건물 해석은 2차원 축대칭해석으로 전체적인 거동을 분석한 다음 3차원해석을 수행하는 것이 일반적인 방법이다. 따라서 본 연구에서는 2차원 축대칭해석을 하여 격납건물의 거동에 민감하게 영향을 끼치는 콘크리트 재료모델과 기초매트하단부의 경계조건에 따른 영향을 도출하였고 그 결과를 바탕으로 개구부와 부벽을 고려한 3차원해석을 수행하였다.

3.1 2차원 축대칭모델

2차원 축대칭모델은 개구부나 부벽의 영향을 고려할 수 없기 때문에 이들로부터 영향을 받지 않는 자유장(free-field)을 가정하여 모델링하는데 이 자유장은 그림 1의 단면에서 방위각 135° 영역이다. 이 영역에서 2차원 해석을 위한 유한요소망을 그림 2에 도시하였다.

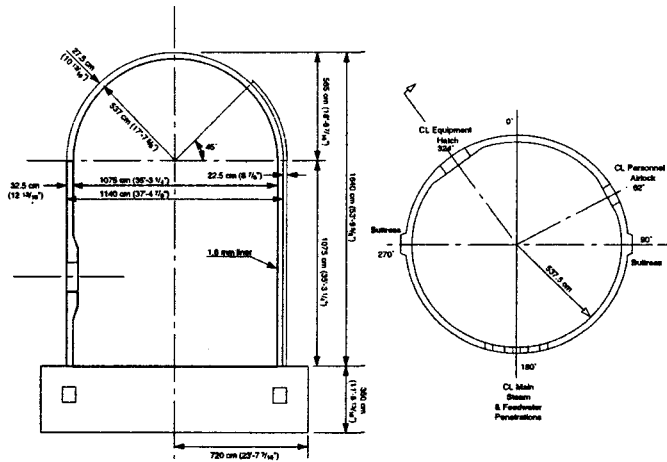


그림 1 격납건물의 형상 및 단면

격납건물의 벽체와 돔에서 두께방향으로 다층개념을 도입하여 7개의 콘크리트 층과 2개의 텐돈 층, 1개의 라이너 층 그리고 내외측에 2개의 철근 층을 각각 생성하였다. 콘크리트는 2차원 평면요소(CAX4) 768개로 이산화 하였고 4개의 가우스 적분점에서 최대주응력값이 인장강도값을 초과하면 수직과 수평방향으로 각각 균열이 발생하는 것으로 가정하였다.

격납건물 해석시 철근과 텐돈은 이산모델(discrete model)과 분산모델(smearred model)로 이산화 할 수 있다. 이산모델은 절점과 절점으로 철근과 텐돈이 연결되므로 유한요소망을 구축하는 데 제약이 많은 반면에 분산모델은 요소내부의 임의의 위치에 철근과 텐돈을 이산화 할 수 있으므로 이산모델에 비해 2차원 해석시 유한요소망을 구축하기 쉽다. 따라서 철근과 텐돈은 ABAQUS의 subelement를 이용하여 분산모델로 구현하였다. 이때 subelement로 텐돈을 모사했기 때문에 콘크리트와 텐돈은 완전부착된 것으로 가정하여 텐돈의 슬립에 의한 영향은 고려하지 못한다.

격납건물 내부에 설치된 라이너플레이트는 2절점 막요소(membrane element) 203개를 사용하여 이산화 하였고 콘크리트 모델링에 사용된 평면요소의 절점과 절점에 연결된다.

격납건물은 단단한 암반기초위에 건설되기 때문에 침하에 의한 영향은 고려하지 않으나 높은 내압이 작용할 때에 기초매트의 들림현상(uplift)이 발생 할 수 있다. 이러한 들림현상은 유한요소해석시 기초매트의 경계조건을 고정된 것으로 가정하면 발생하지 않기 때문에 기초하단부의 경계조건을 수직방향의 자유도만 갖는 스프링요소를 사용하여 들림의 영향을 분석하였다.

3.2 3차원 모델

3차원 모델은 개구부와 부벽 그리고 개구부 주위의 보강된 변단면을 고려하였다. 3차원 해석에 사용된 유한요소망을 그림 3에 도시하였다.

콘크리트는 8절점 고체요소(C3D8) 6,992개로 이산화 하였고 절점수는 10,721개 이다. 벽체와 돔의 두께방향으로 2개의 요소로 분할하였고 기초매트와 벽체의 접합부는 *Tie 옵션을 사용하여 같은 절점으로 공유하도록 하였다.

철근과 텐돈은 ABAQUS Ver. 6.3에서 제공된 삽입요소(embedded element)를 이용하였다(그림 4 참조). 삽입요소는 모요소에서 생성된 절점에 구애받지 않고 임의의 위치에서 요소를 생성할 수 있기 때문에 실제 텐돈 배치와 유사하게 모델링 할 수 있는 장점이 있다. 철근도 이와 같은 형태로 격납건물 벽체의 내측과

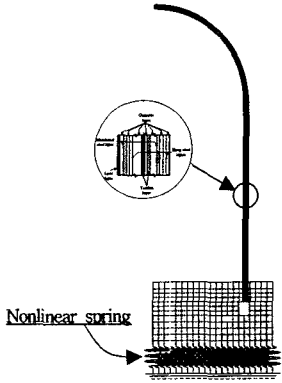


그림 2 2차원 축대칭 FE 모델

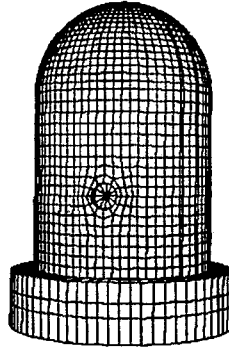


그림 3 3차원 FE 모델

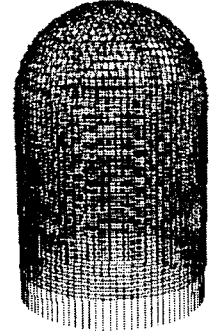


그림 4 3차원 탠돈 모델

외측에 이산화 하였고 기초매트에 대해서도 실제 배근형태를 그대로 유지하였다. 그리고 라이너플레이트는 4절점 면내요소(M3D4) 3,100개로 이산화 하였다. 라이너 요소는 2차원해석과 동일하게 모요소의 절점과 절점에 연결된다.

4. 유한요소해석을 위한 재료모델

4.1 콘크리트

본 연구에서 사용한 콘크리트 재료모델은 격납건물 해석에 주로 사용되고 있는 Chen-Chen 모델, Drucker-Prager 모델, 손상소성모델(damaged plasticity model) 그리고 Menetrey-William 모델이다. 동일한 재료특성값을 사용한 해석일지라도 콘크리트 재료모델에 따른 영향이 크기 때문에 각 모델의 수렴성과 비선형거동에 미치는 영향을 분석하였다. 각 재료모델에 대한 콘크리트의 압축응력-변형률관계는 그림 5에 도시한 바와 같이 최대압축강도의 85%의 응력에서 비선형거동을 보이며 정점을 지난 후 경화영역에서 압축강도의 30%에 도달할 때 압쇄파괴가 발생하는 것으로 가정하였다.

4.2 철근

철근은 축력에만 저항하는 일차원 응력-변형률 관계를 압축과 인장영역에서 동일하게 적용하였다. 콘크리트내의 철근은 철근의 항복강도, 철근의 부착성질, 콘크리트의 강도, 철근비, 균열과 철근 사이의 각도 그리고 철근과 콘크리트의 탄성계수비 등에 의해서 영향을 받게 된다. 콘크리트에 균열이 발생하면 균열면에서 응력집중현상이 발생하므로 다른 부분의 철근이 항복하지 않더라도 균열면의 철근이 먼저 항복하게 된다. 따라서 콘크리트내의 철근은 그림 6에 도시한 바와 같이 순수 철근만의 항복응력값보다 낮아지게 된다.

본 연구에서는 이러한 현상을 모사하기 위해 Hsu⁽⁸⁾가 제시한 모델을 도입하고 식 (1)과 같이 철근의 항복응력값을 계산하여 탄소성 응력-변형률관계로 가정하였다.

$$\frac{\bar{f}_y}{f_y} = 1 - 4 \left(\frac{f_{cr}}{f_y} \right)^{1.5} \quad (1)$$

여기서 \bar{f}_y 와 f_y 는 각각 콘크리트내의 철근 항복응력과 순수 철근만의 항복응력값이다. 그리고 ρ 는 철근비이고 f_{cr} 은 콘크리트의 균열발생시 응력값이다.

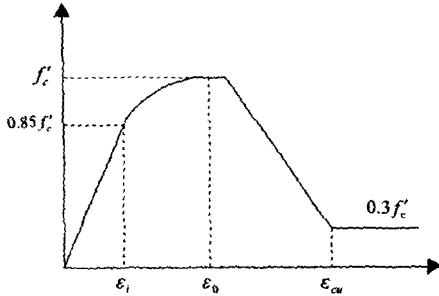


그림 5 콘크리트의 응력-변형률관계

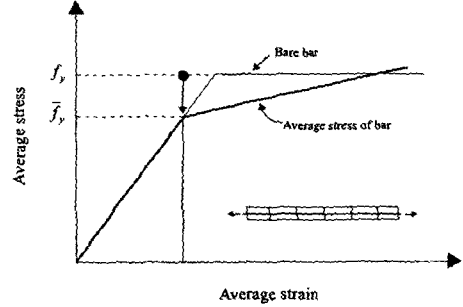


그림 6 철근의 평균응력-변형률관계

4.3 텐돈과 라이너플레이트

텐돈은 극한강도의 70%에 도달하면 비선형거동을 시작하고 3% 변형률이 발생하면 파괴되는 것으로 가정하였다. 라이너플레이트는 von-Mises 파괴기준을 적용하여 압축과 인장에 동일한 응력-변형률관계를 갖는 탄소성재료로 가정하였다.

4.4 인장강성모델

순수콘크리트는 인장력에 저항할 수 없으나 철근콘크리트에서는 콘크리트와 철근의 부착력에 의해 콘크리트에 균열이 발생한 후에도 어느 정도의 인장력을 견딜 수 있다. 이러한 부착효과는 철근의 강성을 변화시키는 방법과 균열이 발생하면 콘크리트가 인장력을 부담하게 하는 방법으로 모사할 수 있는데 본 연구에서는 후자의 방법을 도입하여 그림 7에 도시한 바와 같이 균형 후 콘크리트의 응력감소를 식 (2)와 같이 정의 하였다.

$$\sigma_t = f_t \cdot \left(\frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_t} \right)^c \quad (2)$$

여기서 ϵ_t 는 균열발생 후 전체변형률값이고 ϵ_{cr} 은 균열이 발생한 시점에서의 변형률값으로서 $\epsilon_{cr} = f_t/E_c$ 로 구한다. E_c 는 콘크리트의 탄성계수이다. 그리고 c 는 인장강성지수이며 그림 8에 도시한 바와 같이 $c=0.2$ 의 값을 사용하였다.

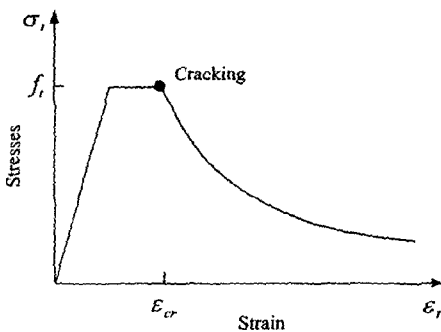


그림 7 인장강성모델

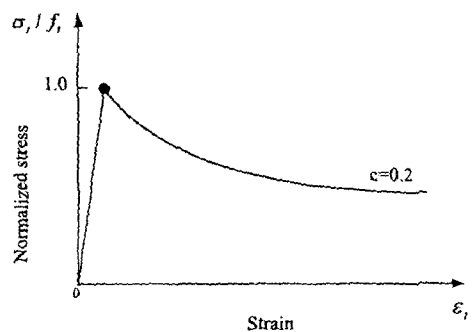


그림 8 인장강성지수

5. 유한요소해석결과

2차원 축대칭 해석을 통하여 콘크리트 재료모델의 영향을 분석하기 위해 격납건물에서 가장 취약한 부분인 벽체 중간부위에서 수평방향에 대한 하중-변위관계와 들림의 영향을 분석하기 위해 기초매트 상단부와 돔의 정점에서 수직방향에 대한 하중-변위관계를 각각 그림 9과 10에 도시하였다.

격납건물의 자중과 프리스트레스력에 의한 초기 변위는 콘크리트 모델에 관계없이 동일하게 발생하였고 콘크리트의 초기균열발생 시점은 Menetrey-Willam 모델이 0.54MPa(78.2psig)에서 발생하였고 나머지 세 모델은 0.59MPa(86.2psig)에서 동일하게 발생하였다. 콘크리트 균열발생 후 비선형구간에서 거동은 손상소성모델과 Drucker-Prager 모델이 실험결과와 유사하게 나타났고 Menetrey-Willam 모델의 경우 실험결과에 비해 변위 발생이 다소 크게 나타났다. Chen-Chen 모델은 콘크리트에 균열이 발생하면 해의 불안정성이 다른 모델이 비해 심하게 발생하여 내압이 138psig에 도달했을 때 해가 발산하였다. 이때의 내압에서는 콘크리트에 균열은 발생하지만 철근, 텐돈 그리고 라이너플레이트의 항복은 일어나지 않는다. 그림 9에 도시한 실험결과는 격납건물의 한계상태 실험(Limit State Test, LST)으로 라이너에 찢김이 발생하여 주입되는 가스량보다 누출되는 가스량이 많게 되면 더 이상의 실험이 불가능하게 된다. 이때의 내압이 1.295MPa(187psig) 이다. LST에서는 철근과 텐돈의 파괴는 없는 것으로 나타났다. 유한요소해석에서 Drucker-Prager 모델과 손상소성모델은 LST 압력상태까지 실험결과와 유사한 결과를 보이고 있으며 이 압력보다 높은 상태까지 결과를 보여주고 있다. 격납건물의 구조적인 파괴를 텐돈의 3% 변형률이라고 가정할 때 유한요소해석결과는 1.5MPa(217psig)에서 텐돈의 3% 변형률이 발생하였다. 이는 설계내압(0.4MPa)보다 약 3.75배 정도 여유가 있다. 네 가지 콘크리트 모델에 따른 유한요소해석결과는 Drucker-Prager 모델과 손상소성모델이 가장 좋은 결과를 도출하였다.

들림에 의한 영향은 Drucker-Prager와 손상소성모델을 이용하여 기초매트 상단부와 돔의 정점에서 수직방향에 대한 변위를 그림 10에 도시하였다. 두 모델에서 공통적으로 들림현상을 고려한 경우나 그렇지 않은 경우에 거의동일한 결과를 보이고 있다. 이는 격납건물 기초매트 하단부의 경계조건을 고정된 것으로 가정하여 해석하여도 격납건물의 전체적인 거동에는 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 따라서 FE mesh와 계산시간을 줄이고자 할 때 기초매트에 스프링요소를 고려하지 않아도 될 것으로 생각된다.

2차원 축대칭 해석결과를 바탕으로 3차원 해석에서는 콘크리트 파괴기준으로 손상소성모델을 이용하였고 기초매트의 하단부에 고정된 경계조건을 도입하였다. 2차원 해석에서 Drucker-Prager 모델과 손상소성모델이 좋은 결과를 보였지만 3차원 예비해석에서 손상소성모델이 Drucker-Prager 모델보다 더 좋은 결과를 보였기 때문에 손상소성모델을 사용하였다. 그러나 본 논문에는 그 결과를 보이지 않았다. 철근과 텐돈은 삽입모델을 이용하여 실제 배치와 유사하게 구현하였다. 본 연구에서 해석한 3차원결과와 Round Robin Analysis에 참가한 다른 기관의 해석결과중에서 벽체와 기초매트의 접합부, 벽체 중간부분, 스프링라인 그리고 돔의 정점에 대한 결과를 그림 11에서 14에 도시하였다.

모든 해석결과가 실험결과와 유사한 결과를 보이고 있다. 자중과 프리스트레스력에 의한 초기 변위는 실험결과보다 다소 작은 값을 보이지만 균열발생시점과 비선형구간에서 거동은 매우 유사하게 나타나고 있다. 다만 돔의 정점에서 수직방향에 대한 변위는 실험결과보다 다소 큰 값을 보이지만 경향은 아주 유사하게 나타내고 있다.

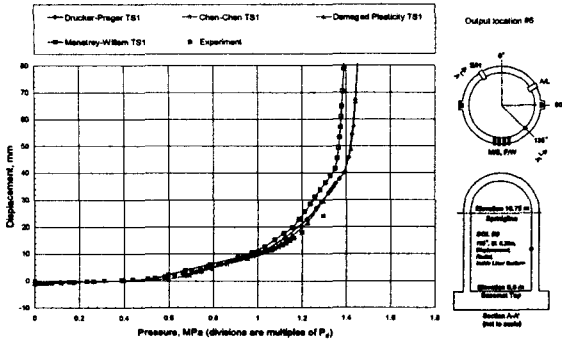


그림 9 콘크리트 모델에 따른 하중-변위선도

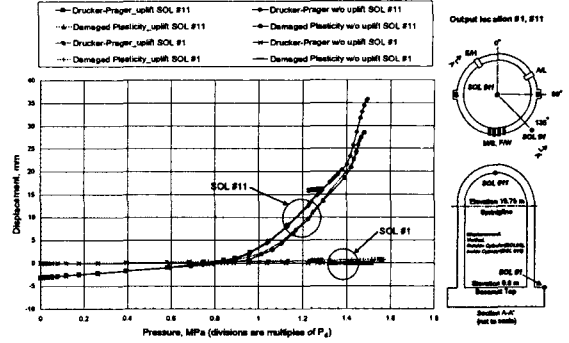


그림 10 들림에 의한 영향 하중-변위선도

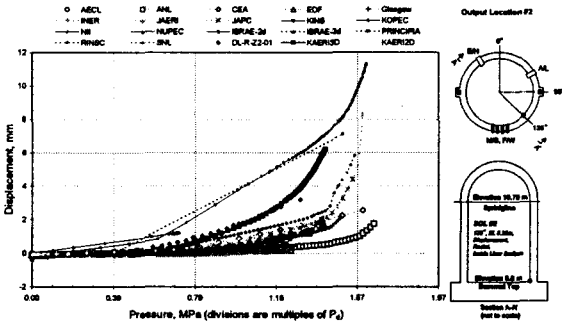


그림 11 벽체하단에서 수평변위

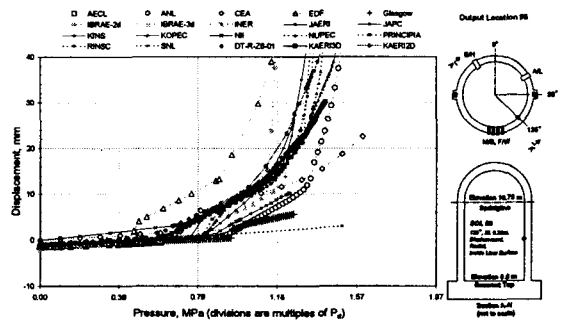


그림 12 벽체중간에서 수평변위

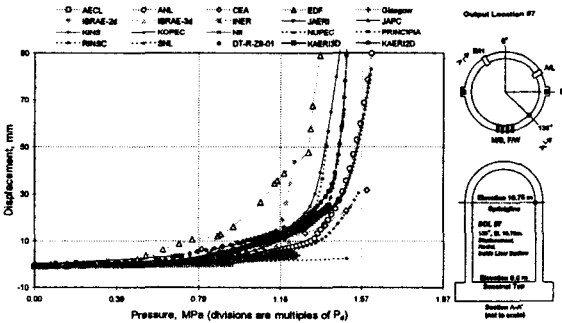


그림 13 스프링라인에서 수평변위

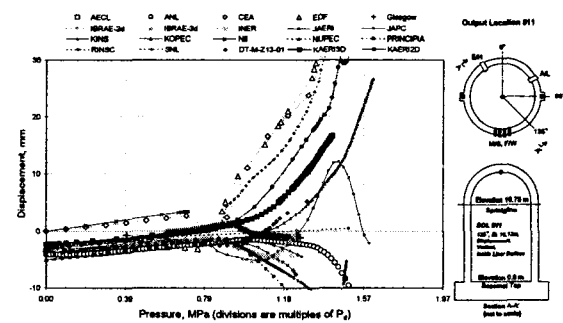


그림 14 돔의 정점에서 수직변위

6. 결론

본 연구에서는 프리스트레스 콘크리트 격납건물 1/4 축소모델에 대해 2차원 축대칭 해석과 3차원 비탄성응력해석을 수행하였다. 2차원 축대칭해석을 통하여 콘크리트 파괴기준에 Drucker-Prager 모델과 손상소성모델을 사용했을 경우에 좋은 결과를 도출하였고 들림에 의한 영향은 격납건물의 전체적인 거동에 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 그리고 격납건물의 구조적인 파괴를 텐톤의 3% 변형률이라 가정하면 본 연구

에서 해석한 격납건물은 설계내압보다 최대 3.75배 정도 큰 극한내압능력을 갖는다. 2차원 해석결과를 토대로 개구부와 부벽을 고려한 3차원해석에서도 격납건물의 중요위치에서 실험결과와 유사한 하중-변위관계를 도출하였다. 따라서 본 연구를 통하여 격납건물과 같은 대형구조물에서도 유한요소법을 이용한 비탄성응력 해석에서 극한내압능력과 파괴거동을 잘 예측할 수 있었다. 그리고 본 연구에서 획득한 해석결과는 격납건물의 해석기술개발의 좋은 벤치마킹으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. 김남식, 조남소, 구은숙, 조재열, 프리스트레스 콘크리트 격납건물 부재실험, 한국원자력연구소 위탁연구보고서, KAERI/CM-493/2001, 2001.
2. 이상진, 이흥표, 서정문, 철근콘크리트 격납건물의 비선형해석을 위한 유한요소해석프로그램 NUCAS, 한국원자력연구소, KAERI/TR-2076/02, 2002.
3. D.B. Clauss, "Round robin pretest analysis of a 1:6 scale reinforced concrete containment model subject to static internal pressurization," Sandia National Laboratories, SAND87-0891, NUREG/CR-4913, 1987.
4. R.A. Dameron, Y.R. Rashid, and M.F. Sullaway, "Prestet prediction analysis and posttest correlation of the Sizewell-B 1:10 scale prestressed concrete containment model test," Sandia National Laboratories, SAND90-7117, NUREG/CR-5671, 1998.
5. Sandia National Laboratories, PCCV round robin analysis, 1997.
6. ABAQUS, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. Ver. 6.3, 2002.
7. M.F. Hessheimer, "Pretest round robin analysis of a prestressed concrete vessel model," NUREG/CR-6678, Sandia National Labs, Albuquerque, 2000.
8. T.T.C. Hsu and A. Belarbi, "Constitutive laws of concrete in tension and reinforcing bars stiffened by concrete", *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 4, pp. 465-474, 1994.