

프리스트레스 콘크리트 원전 격납건물의 비선형 유한요소해석에 관한 연구

A Study on the Nonlinear Finite Element Analysis of Prestressed Concrete Containment Vessel

이 홍 표* · 전 영 선** · 송 영 철***

Lee, Hong-Pyo · Choun, Young-Sun · Song, Young-Chul

ABSTRACT

A nonlinear finite element analysis is carried out to predict the ultimate internal pressure and failure mechanism of a 1/4 scale prestressed concrete containment vessel(PCCV) model using the commercial code ABAQUS. Therefore, this paper is mainly focused to compare the influence of concrete material model, tension stiffening parameter, uplift phenomenon and basemat. From the analysis results, nonlinear behavior of the PCCV showed a substantially different aspects in accordance with the nonlinear material model for the concrete as well as tension stiffening parameter. The boundary conditions beneath the basemat are considered to be a fixed condition and a nonlinear spring element to compare the influence of the uplift. The finite element analysis is considered with and without a basemat to find out the influence of the basemat itself. From the analysis results, the nonlinear behavior of the PCCV is entirely similar for the two cases.

1. 서 론

원전 격납건물은 사고 발생시 방사능 물질의 외부 유출을 차폐하는 최후의 방벽역할을 한다. 따라서 격납건물의 구조적 안전성능을 검증하는 일은 필수적이며 이를 위한 격납건물의 성능평가방법을 개발하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 국내의 경우 원전 격납건물의 건설에 사용된 철근콘크리트 재료특성을 이해하기 위한 부재단계의 재료실험(김남식 등, 2001)과 이를 바탕으로 한 수치해석모델의 개발(이상진 등, 2002) 등과 같은 일련의 연구가 진행되고 있다. 외국의 경우 격납건물의 부재단계 실험은 물론이고 축소모델 실험을 수행하여 격납건물의 기능적인 파괴와 구조적인 파괴거동을 분석하고자 하였다. 이러한 연구는 단순히 격납건물의 구조물의 극한능력을 예측하려는 연구활동을 지양할 뿐만 아니라 구조물의 파괴모드에 대한 전체적인 이해를 증

* 정회원 · 한전 전력연구원 · 연구원 E-mail: hplee@kepri.re.kr

** 정회원 · 한국원자력연구소 · 책임기술원 E-mail: sunchun@kaeri.re.kr

*** 한전 전력연구원 · 수석연구원 E-mail: ycsong@kepri.re.kr

진시키고 유한요소 해석기술개발을 발전시킨다는 점에서 매우 고무적이다.

최근에는 일본의 NUPEC과 미국의 NRC에서 공동연구로서 프리스트레스 콘크리트 격납건물 1/4 축소모델의 극한내압능력과 파괴거동을 예측하기 위한 실험(SNL, 2003)을 수행 한 바가 있다. 이 실험은 현재까지 제작된 실험 모델 중에서 격납건물의 실물 크기에 가장 근접한 모델로서 격납건물의 내압능력과 파괴모드를 규명할 뿐만 아니라 해석기술개발의 벤치마킹으로 사용될 수 있기 때문에 그 의미는 매우 크다.

이러한 맥락에서 본 연구에서는 격납건물의 극한내압능력과 파괴모드 예측을 위한 관련기술 확보를 위해 상용프로그램 ABAQUS(2002)를 이용하여 1/4 축소모델에 대한 비선형 유한요소해석을 수행하였고 유한요소해석 시 고려해야 할 매개변수를 도출하였다. 격납건물의 비선형 유한요소해석은 일반적으로 2차원 축대칭요소를 이용하여 전체적인 거동을 분석한 다음 개구부와 부벽을 고려한 3차원 해석을 수행한다. 그러므로 본 연구에서는 2차원 축대칭해석을 통해 격납건물의 거동에 민감하게 영향을 미치는 콘크리트 재료모델과 인장강성모델(tension stiffening model), 들림효과(uplift effect)에 대한 민감도 해석을 수행하였다. 이때 사용된 콘크리트 재료모델은 Drucker-Prager 모델, Chen-Chen 모델, Damaged Plasticity 모델과 Menetrey-Willam 모델이다. 이 연구에서 도출한 비선형 유한요소해석결과를 실험결과와 비교 분석하였다.

2. 1/4 축소모델 실험

2.1 형상 및 제원

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 전형적인 가압경수로형원자로(PWR)이다. 장비운반구와 작업자출입구의 대개구부가 있으며 180° 간격으로 두 개의 부벽이 있다. 완성된 PCCV의 전경과 형상 및 제원을 각각 그림 1과 2에 도시하였다.

2.2 재료물성치

각 구조재료의 물성치는 실험기관인 SNL에서 제공한 Material Package를 바탕으로 하였다.

콘크리트는 PCCV를 건설하기 전에 공시체를 제작하여 표준양생과 현장양생으로 재령 13주에서 기본물성실험을 하였다. 이 논문에서는 콘크리트의 물성치를 현장양생으로 측정된 값을 사용하였고 표 1에 나타내었다.

표 2 콘크리트 재료물성치

	Basemat	Wall & Dome
Compressive strength (MPa)	41.68	48.84
Tensile strength (MPa)	3.37	3.45
Elastic modulus (MPa)	27,950	26,970
Poisson's ratio	0.18	0.18
Density (ton/m ³)	2.21	2.19

PCCV에 사용된 철근(rebar)은 D6, D10, D13, D16, D19, D22를 다양하게 사용하였다. 철근은 종류에 따라 각각 3개씩 인장실험을 하여 평균값으로 물성치를 결정하였다. 표 2에는 주철근으로 사용된 D10에서 D22의 물성치를 평균하여 나타내었다.

표 3 강재의 재료물성치

	Rebar	Tendon	Liner
Elastic Modulus (MPa)	1.5E5	2.2E5	2.3E5
Yield stress (MPa)	467.8	0.7 f_u	382.7
Ultimate stress (MPa)	654.8	1924.5	497.85

텐던은 7개의 와이어로 된 스트랜드가 3개씩 합쳐져 하나의 텐던을 구성하며 단면적은 3.393cm²이다. 텐던의 응력-변형률관계는 6개의 샘플에 대해 실험하여 그 평균값을 취하였고 표 2에 보였다. 텐던의 탄성한계값은 정확히 제시되지 않았기 때문에 극한응력의 70%까지 탄성거동하는 것으로 가정하였다.

격납건물 벽체 내부에 1.6mm 두께로 설치된 라이너플레이트는 원환방향과 자오선방향으로 각각 3개의 샘플에 대해 강도 실험이 수행되었다.

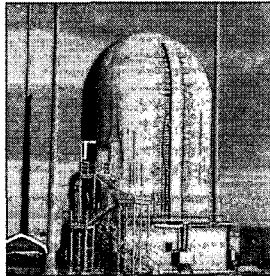


그림 1 완성된 PCCV 축소모델

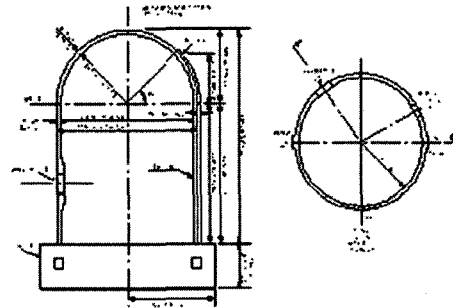


그림 2 PCCV 축소모델의 형상 및 제원

2.3 내압실험

PCCV의 내압실험은 내부에 질소가스를 주입하여 시스템 기능실험, 구조적 안전성과 누설률 테스트, 한계상태실험 그리고 구조적 파괴모드실험으로 총 4단계로 구성된다.

한계상태실험(Limit State Test, LST)은 PCCV 축소모델의 제일 중요한 실험으로서 격납건물에 설계내압을 초과하는 압력이 발생할 경우 격납건물의 구조적거동을 측정하기 위해 실시된다. 주입된 질소가스의 누설률이 100%에 도달하면 주입되는 양과 배출되는 양이 동일하게 되므로 더 이상의 실험은 불가능해진다. 이 때의 내압은 3.3Pd 이다.

PCCV의 기능적인 파괴가 LST 후에 발생하였지만 구조적인 파괴거동 규명을 위해 구조적 파괴모드실험 (Structural Failure Mode Test, SFMT)를 추가적으로 수행하였다. SFMT를 위해 LST 실험 후 손상된 라이너를 제거하고 탄성재료로 내부를 코팅하여 방수처리 하였다. SFMT 실험은 격납건물 내부 체적의 97%까지 물을 채우고 돔의 정점에서 공기를 주입하여 격납건물이 완전 파괴될 때까지 빠르게 진행된다. 이와 같이 물을 채워 실험하면 여러 가지 장점이 있지만 물로 채워진 부분에서 정수압을 받게 되므로 등분포하중을 작용시킬 수 없다는 단점이 있다. 내부압력이 1.29MPa에서 음향장치로부터 텐던이 파단되는 소리가 나타났고 격납건물의 최종적인 구조적 파괴는 3.63Pd에서 벽체중간부분(AZ, 6°)에서 수직방향으로 찢어지면서 발생하였다.

3. 유한요소모델

유한요소법에 의한 격납건물의 극한내압해석은 일반적으로 2차원 축대칭요소를 이용하여 전체적인 거동을 분석하고 대개구부와 부벽의 영향을 고려한 3차원 해석을 한다. 본 논문에서는 2차원 축대칭요소를 이용하여 격납건물의 거동에 영향을 미치는 콘크리트 재료모델, 인장강성모델, 기초매트의 들림(uplift)현상 그리고 기초매트 하단부의 경계조건에 대한 해석을 수행하였다.

2차원 축대칭모델은 개구부나 부벽의 영향을 고려할 수 없기 때문에 이들로부터 영향을 받지 않는 자유장(free-field)을 가정하여 모델화 한다. 이 가정된 자유장은 그림 2의 단면에서 135° 영역이고 이 영역에서 생성한 유한요소망을 그림 3에 도시하였다.

격납건물의 벽체와 돔은 두께방향으로 3개의 요소로 분할하였고 다층개념을 도입하여 7개의 콘크리트층과 2개의 텐던 층, 1개의 라이너 층 그리고 내외측에 2개의 철근 층으로 분할하였다. 콘크리트는 2차원 평면요소(CAX4) 768개로 이산화 하였고 4개의 가우스 적분점에서 주응력이 인장강도값을 초과하면 주응력에 수직인 방향으로 균열이 발생하는 것으로 가정하였다.

철근과 텐던은 분산모델로 구현하였고 텐던은 콘크리트에 완전부착된 것으로 가정하여 길이 변화에 따른 텐던의 긴장력과 슬립에 의한 영향은 고려하지 않았다. 격납건물의 맨 안쪽에 설치된 라이너는 2절점 막요소 203개를 사용하여 이산화 하였고 콘크리트 요소의 절점과 절점에 연결된다. 경계조건은 전체적으로 내부 중심축을 중심으로 축대칭을 이루고 기초매트 하단부에 수직방향의 자유도를 갖는 스프링요소를 사용하여 들림을 고려하였다.

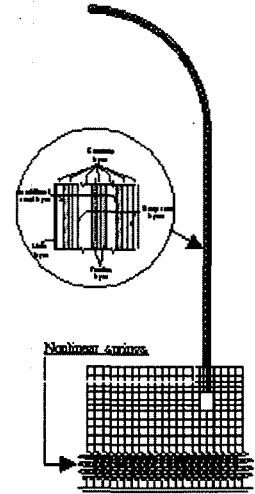


그림 3 2차원 축대칭 모델

4. 유한요소해석을 위한 재료모델

4.1 콘크리트

PCCV의 비선형 유한요소해석을 위한 콘크리트 재료모델은 상용프로그램 ABAQUS에서 사용가능하며 격납건물 해석에 주로 이용되고 있는 Chen-Chen 모델, Drucker-Prager 모델, Damaged Plasticity 모델 그리고 Menetrey-Willam 모델이다. 해석에 사용된 콘크리트 재료특성값이 동일하더라도 파괴기준에 따라 극한 내압능력과 파괴거동에 대한 예측이 상이 할 수 있기 때문에 콘크리트 파괴기준에 따른 격납건물의 거동을 비교 분석하였다. 각 파괴기준에 대한 콘크리트의 압축-응력변형률관계는 그림 4에 도시한 바와 같이 최대 압축강도의 85% 응력까지 탄성거동을 하고 이 시점을 넘어서 비선형거동을 하는 것으로 가정하였다. 또한 경화영역에서 최대압축강도의 30%에서 압쇄파괴가 발생하는 것으로 하였다.

4.2 강재

철근은 축력에만 저항하는 일차원 응력-변형률관계를 압축과 인장영역에서 동일하게 적용하였다. 콘크리트 내의 철근의 철근의 항복강도, 철근의 부착성질, 콘크리트의 강도, 철근비, 균열과 철근 사이의 각도 그리고 철근과 콘크리트의 탄성계수비 등에 의해 영향을 받게 된다. 콘크리트에 균열이 발생하면 균열면에서 응력집중현상이 발생하므로 다른 부분의 철근이 항복하지 않아도 균열면의 철근이 먼저 항복하게 된다. 따라서 콘크리트 내의 철근은 그림 4에 도시한 바와 같이 순수 철근만의 항복응력값보다 낮아지게 된다. 본 논문에서는 이러한 현상을 모사하기 위해 Hsu(1994)가 제시한 모델을 도입하였고 식 (1)과 같이 항복응력값을 계산하여 탄소성 응력-변형률관계로 가정하였다.

$$\frac{\bar{f}_y}{f_y} = 1 - \frac{A}{\rho} \left(\frac{f_c}{f_y} \right)^{1.5} \quad (1)$$

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

텐던과 라이너는 재료실험으로부터 제시된 응력-변형률관계를 그대로 이용하였다. 텐던은 극한강도의 70%에 도달하면 비선형거동을 시작하고 3% 변형률이 발생하면 파괴되는 것으로 가정하였다. 그리고 라이너는 von-Mises 파괴기준을 적용하여 압축과 인장에 동일한 응력-변형률관계를 갖는 탄소성재료로 가정하였다.

4.3 인장강성모델

순수콘크리트는 인장력에 저항할 수 없으나 철근콘크리트에서는 콘크리트와 철근의 부착력에 의해 콘크리트에 균열이 발생한 후에도 어느 정도의 인장력에 견딜 수 있다. 이러한 현상을 인장강성(tension stiffening)이라고 하고 철근의 강성을 변화시키는 방법과 균열이 발생하면 콘크리트가 인장력을 부담하게 하는 방법으로 모사할 수 있다. 본 논문에서는 후자의 방법으로 그림 4와 같이 지수함수형태의 인장강성모델을 사용하였다.

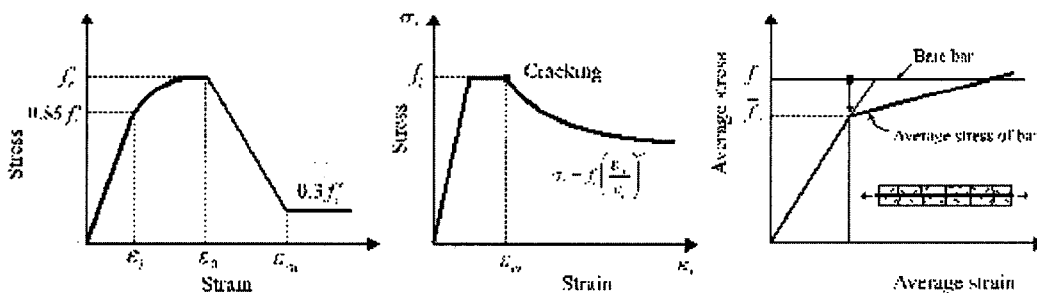


그림 4 재료모델: (좌) 콘크리트모델 (중) 인장강성모델 (우) 철근모델

5. 유한요소 해석결과

5.1 콘크리트 재료모델에 따른 영향

콘크리트 재료모델에 따른 영향을 분석하기 위해 각 재료모델별 해석결과를 격납건물에서 가장 취약한 부분인 벽체중간부위에서 원환 방향에 대한 변위를 그림 5에 도시하였다. 탄성구간에서 거동은 모든 해석결과에서 동일하였고 균열발생시점도 거의 비슷하게 나타났다. 균열발생후 급격한 비선형성을 보이고 있으며 모든 재료모델에서 파괴시까지 유사한 거동예측을 보이고 있다. 다만 Chen-Chen 모델은 균열이 생기면 수렴성이 급격하게 떨어지면서 철근 항복전에 해석이 종료되어 최종적인 파괴까지는 예측할 수 없었다.

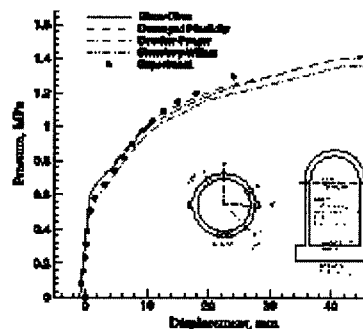


그림 5 콘크리트 재료모델에 따른 벽체 중간부위에서의 하중-변위선도

5.2 인장강성 파라미터에 따른 영향

콘크리트와 철근의 부착효과는 인장강성효과로 모사할 수 있고 이 논문에서 사용한 인장강성효과는 인장강

성지수로 그 크기를 조절할 수 있다. 인장강성지수값은 $c=0.05, 0.2, 0.4$ 와 0.6 으로 하였고 c 값이 작을수록 인장강성효과가 커진다. 각각의 콘크리트 모델에 따른 해석결과를 그림 6에 나타내었다. 각 모델별 해석결과와 공통점은 인장강성효과가 클수록 동일 하중에서 변위가 더 작게 나타났고 최종해석단계는 인장강성지수가 클수록 더 큰 내압까지 해석되었다. 그러나 하중-변위선도의 경향은 유사한 경로를 나타내었다. Drucker-Prager 모델과 손상소성모델은 인장강성지수 $c=0.05$ 일 때 실험결과와 유사한 하중-변위관계를 나타냈었다. 인장강성지수에 따른 영향을 분석한 결과 인장강성지수는 격납건물의 하중-변위선도에 큰 영향을 주고 있으며 2차원 축대칭모델에 가장 적절한 결과를 보인 콘크리트 재료모델은 Drucker-Prager와 손상소성모델이었다.

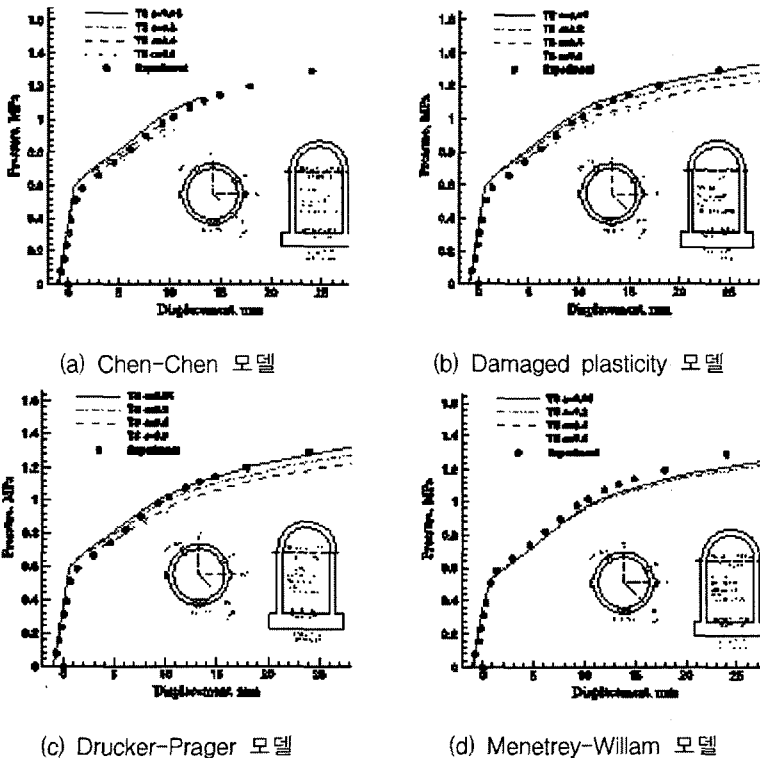


그림 6 인장강성지수에 따른 벽체 중간에서 수평방향의 하중-변위관계

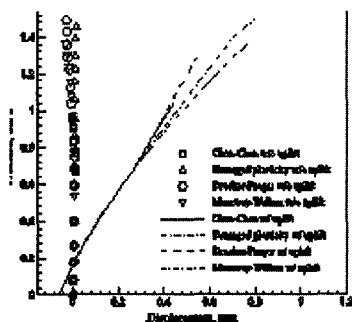
5.3 들림에 의한 영향

격납건물은 단단한 암반기초위에 설치되므로 침하현상은 없지만 높은 내부압력으로 기초매트가 들리는 현상 (uplift)이 발생할 수 있다. 유한요소해석에 의해 격납건물의 극한내압 해석시 기초매트의 하단부 경계조건은 모든 자유도에 대해 고정으로 하거나 스프링요소를 설치하여 수직방향에 대한 변위를 고려하는 방법이 있다. 이 방법들을 해석모델에 적용하여 해석한 결과를 들림에 가장 많은 영향을 받을 수 있는 위치를 선정하여 그림 7에 도시하였다. 이때 콘크리트 재료모델은 앞의 결과에서 보듯이 비선형해석이 비교적 잘 수행되는 Drucker-Prager 모델과 손상소성모델을 사용하였고 인장강성지수는 $c=0.2$ 의 값을 사용하였다.

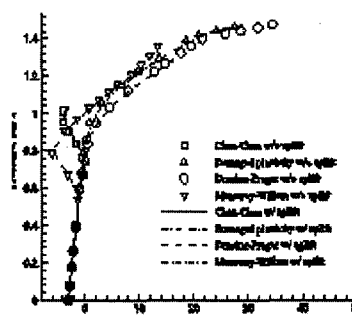
해석결과 기초매트의 상단부에서 수직방향의 변위는 들림효과를 고려하지 않을 경우 자중과 프리스트레스력의 한 치점이 전혀 발생하지 않았고 내압이 증가함에 따라서 변위의 변화가 거의 없었다. 반면에 들림현상을 고

러한 경우는 비선형스프링의 영향으로 자중과 프리스트레스력에 의한 약간의 수직처짐이 발생하였고 내압이 증가함에 따라서 최고 0.8mm까지의 수직변위가 발생하였다.

돔의 정점에서 수직방향의 변위를 나타낸 그림 7(b)의 해석결과는 들림효과를 고려해도 고려하지 않은 경우와 아주 유사한 하중-변위관계를 보여주고 있다. 비록 기초매트의 상단부분에서 수직방향의 변위가 발생했다라도 들림효과는 격납건물의 전체적인 거동에 큰 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다.



(a) 기초매트 상단부에서 수직변위

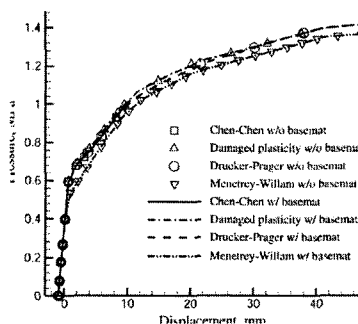


(b) 돔의 정점에서 수직변위

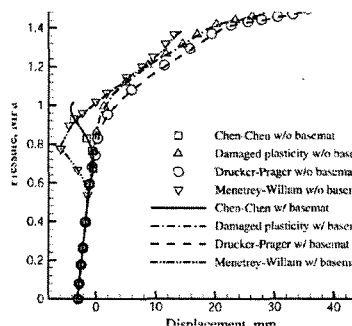
그림 7 들림의 영향에 의한 기초매트상단부와 돔의 정점에서 하중-변위관계

5.4 기초매트의 영향

격납건물의 벽체와 기초매트의 접합부분에서 굽힘과 전단에 의한 파괴와 텐던갤러리의 전단파괴는 기초매트에서 발생할 수 있는 파괴메카니즘이다. 만약 이들의 영향을 고려하지 않아도 된다면 유한요소해석시 유한요소망을 구축하기 매우 용이하다. 또한 자유도수가 현저히 줄어들기 때문에 비선형해석시간도 크게 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 따라서 기초매트를 제외한 원통형 벽체와 반구형 돔을 모델링하여 해석한 결과와 기초매트를 포함하여 격납건물 전체를 해석할 결과 중에서 변형이 가장 큰 벽체중간부분과 돔의 정점부분에서 하중-변위관계를 비교하여 그림 8에 도시하였다.



(a) 벽체중간에서 수평변위



(b) 돔의 정점에서 수직변위

그림 8 기초매트 영향에 벽체중간과 돔의 정점에서 하중-변위관계

해석한 Drucker-Prager 모델과 손상소성모델은 기초매트에 의해 벽체중간의 수평변위와 돔의 정점부에서 수

직방향 변위의 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 기초매트의 질량이 워낙 크기 때문에 벽체와 돔 부분에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 판단된다. 따라서 벽체와 기초매트의 굽힘-전단파괴나 텐던갤러리의 전단파괴에 대한 현상을 제외하고 벽체와 돔의 전체적인 거동을 알고자 할 때는 기초매트를 제외한 비선형해석결과도 타당함을 알 수 있다.

6. 결 론

이 논문에서는 원전 격납건물 1/4 축소모델의 극한거동을 예측하기 위해 상용프로그램인 ABAQUS를 이용하여 재료모델과 기하학적특성을 고려하여 2차원 축대칭 유한요소해석을 수행하였다. 콘크리트 재료모델에 따른 해석결과는 전반적으로 비슷한 비선형거동을 나타내고 있지만 Chen-Chen 모델은 철근 항복전에 해석이 종료되어 극한거동을 예측할 수 없었다. 재료모델 뿐만 아니라 인장강성지수도 격납건물의 비선형거동에 큰 영향을 준다. 따라서 적절한 인장강성지수값을 사용해야 해석결과의 신뢰성을 높일 수 있다. 반면에 들림현상을 고려하기 위해 기초매트 하단부의 경계조건을 고정으로 하지 않아도 전체적인 거동에는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 또한 격납건물의 벽체와 기초매트의 접합부분에서 굽힘과 전단에 의한 파괴와 텐던갤러리의 전단파괴를 고려하지 않고 벽체와 돔의 전체적인 거동을 알고자 할 때는 기초매트를 제외한 비선형해석결과도 타당함을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- 김남식, 조남소, 구은숙, 조계열 (2001) 프리스트레스 콘크리트 격납건물 부재실험, 한국원자력연구소 위탁 연구보고서, KAERI/CM-493/2001, 2001, p.177.
- 이상진, 이홍표, 서정문 (2002) 철근콘크리트 격납건물의 비선형해석을 위한 유한요소해석프로그램 NUCAS, 한국원자력연구소, KAERI/TR-2076/02, p.122.
- ABAQUS (2003) Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. Ver. 6.3.
- Hsu, T.T.C and Belarbi, C (1994) Constitutive laws of concrete in tension and reinforcing bars stiffened by concrete, *ACI Structural Journal*, 91(4), pp. 465~474.
- Sandia National Laboratories (2003) Overpressurization test of a 1:4 scale prestressed concrete containment vessel model, NUREG/CR-6810, 2003.