2004 춘계학술발표회 논문집 한국원자력학회

인장강성효과를 고려한 원전 격납건물의 비선형 유한요소해석

Nonlinear FE Analysis of the Containment Building considering Tension Stiffening Effect

이홍표, 전영선 한국원자력연구소 대전광역시 유성구 덕진동 150

신재철

충남대학교 대전광역시 유성구 궁동 220

요 약

본 논문에서는 프리스트레스 콘크리트 격납건물 해석에서 콘크리트와 철근의 부착으로 인해 발생되는 인장강성(tension stiffening)현상이 격납건물의 비선형거동에 미치는 영향 을 분석하였다. 인장강성모델은 콘크리트의 평균응력-변형률 개념을 적용한 지수함수형 태로 가정하였고 인장강성지수값은 c=0.05, 0.2, 0.4와 0.6을 사용하였다. 콘크리트의 파괴 기준은 Drucker-Prager 항복기준을 사용하였고 철근과 텐돈은 압축과 인장에 동일하게 거동하는 것으로 가정하였다. 본 연구에서 비선형 유한요소해석에 사용된 격납건물은 SNL에서 실험한 프리스트레스 콘크리트 1/4 축소모델이고 인장강성지수값 c=0.2 일 때 실험과 유사한 결과를 도출하였다.

Abstract

The present study mainly focuses on the nonlinear behaviour of the 1/4 scale prestressed concrete containment vessel(PCCV) considering tension stiffening effect which resulted from bond effect between concrete and steel. Tension stiffening model is assumed exponential form based on the relationship between the average stress and the average strain of concrete. Tension stiffening parameters are used c=0.05, 0.2, 0.4 and 0.6. Concrete failure criteria for the FE analysis is adapted Drucker-Prager

yield function. The stress-strain curves for steel and tendon are assumed to be identical in tension and compression. The nonlinear FE analysis is employed to 1/4 scale PCCV tested by SNL. The analysis results have a good agreement with experimental results when the tension stiffening parameter is c=0.2.

1. 서론

원전 격납건물의 극한내압능력과 구조적인 파괴거동을 예측하기 위한 연구가 실험적방 법과 해석적방법이 병행되어 꾸준하게 진행되고 있다. 실험적인 방법으로 격납건물의 건 설에 사용된 순수콘크리트의 재료특성¹⁾과 철근콘크리트의 재료특성²⁾을 이해하기 위한 실 험이 국내에서 수행된 바 있고 철근콘크리트에 라이너의 영향을 고려한 실험³⁾이 진행 중 에 있다. 이 실험을 바탕으로 한 격납건물 전용해석 프로그램(NUCAS)⁴⁾의 개발 등과 같 은 일련의 연구가 진행되고 있으며 재료모델에 대한 검증을 일부 완료 하였다. 이러한 연 구는 단순히 격납건물의 극한내압능력을 예측할 뿐만 아니라 구조적인 파괴모드에 대한 전체적인 이해를 증진시킨다는 점에서 매우 고무적인 연구이다. 그러나 이 실험들은 격납 건물에서 가장 취약하다고 예측되는 벽체중간부위에 대한 패널을 제작한 부재단계의 실 험이기 때문에 전체적인 거동을 예측하기에는 미흡하다. 한편 국외의 경우 부재단계실험 은 물론이고 격납건물에 대한 축소모델실험⁵⁾을 수행하여 격납건물의 파괴거동 뿐만 아니 라 해석기술개발에 대한 벤치마킹으로 제공하고 있다.

순수콘크리트는 인장력에 저항할 수 없으나 철근콘크리트는 철근과 콘크리트의 부착으 로 인해 콘크리트에 균열이 생겨도 인장력에 어느 정도 저항할 수 있다. 이러한 현상을 인장강성효과(tension stiffening effect)라 하고 철근콘크리트 구조물의 해석에서 중요하 게 다루어지고 있다. 또한 격납건물 해석에서 인장강성효과는 중요한 변수로 인식되고 있 으나 인장강성효과가 격납건물의 비선형해석에 미치는 영향을 분석한 연구는 미흡한 상 태이다.

이러한 맥락에서 본 논문에서는 격납건물의 비선형해석시 적합한 인장강성모델을 도출 하기 위해 상용프로그램 ABAQUS⁶⁾를 이용하여 비선형해석을 수행하였고 추후 완료 예 정인 격납건물 전용해석 프로그램(NUCAS)의 검증을 위한 벤치마킹으로 제공하고자 한 다. 해석에 사용된 대상 격납건물은 최근에 SNL에서 수행한 1/4 축소모델⁵⁾을 이용하였 다.

2. 축소모델 실험개요

일본의 NUPEC과 미국의 NRC에서 공동연구 프로그램으로 수행한 프리스트레스 콘크 리트 격납건물(Prestressed Concrete Containment Vessel, PCCV) 1/4 축소모델 실험은 일본의 OHI 3호기⁷⁾를 대상으로 한 것으로 원통형벽체에 반구형 돔을 갖는 형상이며 장 비운반구와 작업자출입구 같은 대개부구가 있고 180° 간격으로 두 개의 부벽(buttress)을 가지고 있다. 대상 격납건물의 형상과 완성된 PCCV의 전경을 각각 그림 1과 2에 도시하 였다.

격납건물에 사용된 주요 구조재료는 콘크리트, 철근, 텐돈 그리고 라이너플레이트이며 이는 유한요소해석에서 필수적으로 고려해야 할 재료들이다. 각 구조재료에 대한 물성치 를 표 1에 나타내었다.

재료	콘크리트		재료	처그	테도	
항목	기초	벽체, 돔	항목	一つし	엔근	다이디
압축강도(MPa)	41.68	48.84	탄성계수(MPa)	1.5E5	2.2E5	2.3E5
인장강도(MPa)	3.37	3.45	항복응력(MPa)	467.8	1347.2	382.7
탄성계수(MPa)	27,950	26,970	극한응력(MPa)	654.8	1924.5	497.85
포아송 비	0.18		극한변형률	-	3.3%	_

표 1 구조재료의 재료특성값







그림 2 완성된 격납건물의 전경

축소모델 실험은 다음과 같이 총 4단계로 실시되었고 각 단계별 내압은 질소가스를 주 입하였다.

가. 계통기능시험(System Functionality Test, SFT)

격납건물에 설치된 계측장비, 데이터 측정기 및 가압장치의 기능을 측정하고 격 납건물 내부의 막음질(sealing) 특히, 개구부 주위의 막음질 상태를 조사하기 위해 설계내압(0.4MPa)의 1/2를 가하여 실시한다. 나. 구조건전성시험(Structural Integrity Test, SIT)과 종합누설률시험(Integrated Leak Rate Test, ILRT) SIT와 ILRT는 연속적으로 수행되며 축소모델과 실제 격납건물의 탄성특성과 누 설거동을 비교하기 위해 각각 1.125Pd와 0.9Pd까지 압력을 가하여 수행한다.

다. 한계상태시험(Limit State Test, LST) LST는 축소모델 실험에서 제일 중요한 것으로서 격납건물의 기능적인 파괴를 유 도하기 위해 실시된다. 실험결과 기능적인 파괴는 국부적인 라이너의 찢김과 콘크 리트의 균열에 의해 발생하는 것으로 나타났다. 이때 철근이나 텐돈의 파괴는 발생 하지 않았다.

라. 구조적파괴모드시험(Structural Failure Mode Test, SFMT)

PCCV의 구조적인 파괴를 유도하기 위해 수행된다. LST 후에 격납건물 내부에 막음질을 하고 전체 체적의 97%까지 물을 주입하고 나머지 부분에 가스를 주입하여 완전하게 구조적인 파괴가 발생할 때 까지 수행한다. SFMT의 실험단면과 실험 후 격납건물의 파괴형상을 각각 그림 3과 4에 도시하였다.



그림 3 SFMT의 개요



그림 4 PCCV의 파괴형상

3. 재료모델

3.1 콘크리트

콘크리트의 압축영역에서 파괴조건은 다음과 같은 Drucker-Prager 항복기준⁸⁰을 적용 하였다.

$$F = t - p \bullet \tan\beta - d = 0 \tag{1}$$

여기서, $t = \frac{1}{2}q\left[1 + \frac{1}{K} - \left(1 - \frac{1}{K}\right)\left(\frac{r}{q}\right)^3\right]$ 이고, $\beta(\theta, f_i)$ 는 재료의 마찰각으로 파괴면의 경사를 나타낸다. 그리고 d는 재료의 점착력이며 $K(\theta, f_i)$ 는 3축압축응력상태에 대한 3축인장응력 비를 나타낸다.

K=1이고 t=q이면 3축압축응력과 인장응력이 같은 형태이므로 von Mises 파괴기준 과 동일하게 된다. 따라서 파괴면이 볼록한 형상을 유지하기 위해서는 0.778 ≤ K ≤ 1.0 범위에 있어야 한다. K의 값에 따른 파괴면의 형상을 그림 5에 도시하였고 본 논문에서 는 마찰각과 팽창각의 값을 각각 71.56°와 56.97°로 하였다. 또한 일축압축응력-변형률관 계는 최대압축강도의 85%의 응력에서 비선형거동을 시작하고 정점을 지난 후 경화영역에서 압축강도의 30%에 도달할 때 압쇄파괴가 발생하는 것으로 가정하였다(그림 6참조).



그림 5 Drucker-Prager 항복면

그림 6 콘크리트의 응력-변형률관계

3.2 철근

철근은 축력에만 저항하는 일차원 응력-변형률관계를 압축과 인장영역에서 동일하게 적용하였다. 콘크리트내의 철근은 철근의 항복강도, 철근의 부착성질, 콘크리트의 강도, 철근비, 균열과 철근 사이의 각도 그리고 철근과 콘크리트의 탄성계수비 등에 의해서 영 향을 받게 된다. 콘크리트에 균열이 발생하면 균열면에서 응력집중현상이 발생하므로 다 른 부분의 철근이 항복하지 않더라도 균열면의 철근이 먼저 항복하게 된다. 따라서 콘크 리트내의 철근은 그림 7에 도시한 바와 같이 순수 철근만의 항복응력값보다 낮아지게 된 다.

본 연구에서는 이러한 현상을 모사하기 위해 Hsu⁹⁾가 제시한 모델을 도입하였고 식 (2) 와 같이 철근의 항복응력값을 계산하여 탄소성 응력-변형률관계로 가정하였다.

$$\frac{\overline{f_y}}{f_y} = 1 - \frac{4}{\rho} \left(\frac{f_{cr}}{f_y} \right)^{1.5} \tag{2}$$

여기서 f_u 와 f_u 는 각각 콘크리트내의 철근 항복응력과 순수 철근만의 항복응력값이다. 그 리고 ρ 는 철근비이고 f_{cr} 은 콘크리트의 균열발생시 응력값이다.





3.3 텐돈과 라이너플레이트

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

3.4 인장강성효과

군열이 발생한 콘크리트는 이방성물질이고 응력-변형률관계는 균열면에 직각인 방향으 로 이방성을 갖는다. 따라서 응력-변형률관계는 균열에 수직한 방향과 수평한 방향 그리 고 전단방향에 대해 각각 수정되어야 한다. 순수콘크리트는 인장력을 부담할 수 없으나 철근콘크리트에서는 콘크리트와 철근의 부착효과로 인해 콘크리트에 균열이 발생하여도 일정한 양의 인장력에 저항할 수 있다. 이러한 부착효과로 인해 철근콘크리트의 강성이 철근만의 강성보다 높게 된다(그림 8 참조).

이러한 현상은 철근의 강성을 변화시키는 방법과 균열이 발생하면 콘크리트가 인장력 을 부담하게 하는 방법으로 모사할 수 있다. 전자의 경우 철근 재료축에 대한 균열은 방 향이 변해도 강성은 바뀌지 않기 때문에 2차원 문제에 적용하기 어렵고 후자의 경우는 국부부착응력과 국부 슬립에 의한 방법, 철근의 최대응력과 평균변형률에 의한 방법 그리 고 콘크리트의 평균응력과 평균변형률에 의한 방법으로 분류할 수 있다.

균열이 발생한 콘크리트에서 균열의 간격, 철근의 방향과 철근비에 대한 관계를 고려하 지 않고 모델화하면 매우 유용하다. 이러한 관점에서 그림 9에 도시한 바와 같이 콘크리 트의 평균응력-변형률개념을 적용하여 균열 후 콘크리트의 응력감소를 식 (3)과 같이 가 정하였다.

$$\sigma_t = f_t \cdot \left(\frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_t}\right)^c \tag{3}$$

여기서 ϵ_t 는 균열발생 후 전체변형률값이고 ϵ_{cr} 은 균열이 발생한 시점에서의 변형률값으 로서 $\epsilon_{cr} = f_t/E_c$ 로 구한다. E_c 는 콘크리트의 탄성계수이다. 그리고 c는 인장강성지수이며 그림 10에 도시한 바와 같이 c=0.05, 0.2, 0.4, 0.6의 값을 사용하였다. 참고로 평균응력-변 형률관계를 적용한 인장강성모델에서 패널 해석시 용접금속망의 경우 c=0.2, 이형철근일 경우 c=0.4 그리고 원형철근일 경우 c=0.6의 값이 적당하다³⁾.



4. 수치해석

인장강성효과를 고려한 PCCV의 비선형해석을 위해 2차원 축대칭모델을 이용하여 전 체 격납건물을 이산화 하였다. 본 연구에서는 개구부나 부벽과 같이 비정형성에 의한 거 동보다는 인장강성모델에 따른 거동이 주안점이기 때문에 2차원 축대칭해석을 수행하였 다. 2차원 축대칭모델은 개구부나 부벽의 영향을 고려할 수 없기 때문에 이들로부터 영향 을 받지 않는 자유장(free-field)을 가정하여 모델링하는데 이 자유장은 그림 1의 단면에 서 방위각 135° 영역이다. 이 영역에서 2차원 해석을 위한 유한요소망을 그림 11에 도시 하였다.

격납건물의 벽체와 돔에서 두께방향으로 다층개념을 도입하여 7개의 콘크리트 층과 2 개의 텐돈 층, 1개의 라이너 층 그리고 내외측에 각각 2개의 철근 층을 생성하였다. 콘크 리트는 2차원 평면축대칭요소(CAX4) 768개로 이산화 하였고 4개의 가우스적분점에서 최 대주응력값이 인장강도값을 초과하면 주응력방향에 수직한 방향으로 각각 균열이 발생하 는 것으로 가정하였다. 철근과 텐돈은 모요소 내부의 임의의 위치에 이산화 시킬 수 있는 분산모델을 이용하였다. 그리고 텐돈은 콘크리트와 완전부착된 것으로 가정하여 슬립에 의한 영향은 고려하지 않았다. 라이너플레이트는 2절점 막요소 203개를 사용하여 이산화 하였고 모요소의 절점과 절점에 연결된다. 경계조건은 전체적으로 축대칭을 이루고 기초 매트의 하단부에 스프링요소를 달아서 기초매트의 들림(uplift)을 고려하였다. 비선형해석 알고리즘은 *Riks 방법을 이용하여 균열발생 후 불안정한 해의 수렴성을 높였다.

2차원 축대칭 유한요소해석 결과를 벽체중간과 스프링라인 그리고 돔의 정점에서 하중 -변위관계를 그림 12~14에 도시하였다. 초기균열은 설계내압(0.4MPa)보다 다소 높은 0.59MPa에서 발생하였다. 균열발생 후 비선형구간에서 인장강성지수에 따른 영향은 매우 민감하게 나타났다. 인장강성지수가 c=0.6인 경우 콘크리트 균열로 인해 해의 불안정성이 증가하여 내압이 0.96MPa에서 해석이 종료되었다. 이 내압단계에서는 콘크리트에 균열이 발생하였지만 철근이나 텐돈 그리고 라이너의 항복이나 파괴가 발생하지 않았다. 인장강 성지수 c=0.4인 경우 0.6보다 좀 더 높은 1.26MPa의 내압상태까지 해석이 되었으나 이때 에도 철근이나 텐돈 그리고 라이너의 파괴는 발생하지 않았다. 반면에 인장강성지수 c=0.2와 0.05인 경우에는 텐돈이 파괴되는 내압상태까지 안정적으로 해석이 되었다. 인장 강성지수값이 작을수록 동일한 하중에서 변위발생량이 작은데 이는 인장강성지수값이 작 을수록 콘크리트와 철근의 부착력이 증가되어 균열면에서 콘크리트가 인장력에 더 많이 저항할 수 있기 때문이다. 그림 12~14에 도시한 것처럼 인장강성지수에 따른 격납건물 의 전체적인 거동은 인장강성지수 c=0.2 일 때 실험결과와 가장 유사한 결과를 보이고 있다. 다만 돔의 정점에서 수직방향에 대한 변위는 실험결과에 비해 큰 처짐이 발생하였 는데 이는 유한요소해석시 텐돈을 분산모델로 이산화 하였기 때문이다. 즉 분산모델에 의 한 텐돈 배치는 모든 텐돈이 돔의 정점을 지나기 때문에 등가의 텐돈 단면적으로 환산해 야 한다. 이러한 과정에서 실제 텐돈량에 비해 과대평가나 과소평가가 될 수 있다. 이러 한 문제점은 3차원해석에서 삽입요소(embedded element)를 이용하여 실제 텐돈배치와 동일한 FE망을 구축하면 제거할 수 있다¹⁰⁾.

인장강성지수값이 c=0.2 일 때 철근의 항복은 1.036MPa에서 발생하였고 텐돈의 3% 변 형률은 1.5MPa에서 발생하였다. 일반적으로 격납건물의 구조적인 파괴는 텐돈의 3% 변 형률이 발생하였을 때로 가정한다. 구조적인 파괴가 발생한 경우 실험에 의한 극한내압은 1.452MPa이고 해석에 의한 극한내압값은 1.5MPa로서 실험과 매우 유사한 극한내압값을 도출하였다. 이는 설계내압(0.4MPa)보다 3.75배의 여유도를 갖게 된다. 또한 격납건물의 전체적인 거동은 개구부나 부벽을 고려하지 않은 2차원 축대칭해석으로 예측 가능함을 알 수 있었다.



그림 13 스프링라인에서 수평방향의 하중-변위선도

그림 14 돔의 정점에서 수직방향의 하중-변위선도

5. 결론

본 연구에서는 인장강성효과를 고려하여 프리스트레스 콘크리트 1/4 축소모델에 대한 2차원 축대칭 비선형 유한요소해석을 수행하였고 그 결과를 실험결과와 비교·분석 하였 다. 인장강성모델은 평균응력-변형률개념을 적용한 지수함수를 사용하였고 인장강성지수 c=0.05, 0.2, 0.4와 0.6을 사용하였다. 해석결과 인장강성효과는 콘크리트 균열발생 후 격 납건물의 전체적인 거동과 극한내압예측에 민감한 영향을 끼쳤다. 인장강성지수가 0.2보 다 큰 0.4와 0.6의 경우 극한내압 뿐만 아니라 철근이나 텐돈의 항복을 적절하게 예측할 수 없었다. c=0.2 일 경우 실험과 가장 유사한 결과를 도출하였다.

따라서 본 연구의 결과는 추후 개발 완료예정인 격납건물 전용해석프로그램 NUCAS의 인장강성모델에 대한 검증벤치마크로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- 1. 이상근, 조명석, 송영철, 콘크리트 이축 응력시험, 한국전력연구원, '01전력연-단182, 2001.
- 2. 김남식, 조남소, 구은숙, 조재열, 프리스트레스 콘크리트 격납건물 부재실험, 한국원자 력연구소 위탁연구보고서, KAERI/CM-493/2001, 2001.
- 조남소, 김남식, 전영선, "라이너를 고려한 원전 격납건물 벽체의 인장파괴거동," 한국 원자력학회 2004 춘계학술발표회 논문집, 2004.
- 4. 이상진, 이홍표, 서정문, 철근콘크리트 격납건물의 비선형해석을 위한 유한요소해석프 로그램 NUCAS, 한국원자력연구소, KAERI/TR-2076/2002, 2002.
- 5. Hessheimer, M. *et al.*, Posttest Analysis of the NUPEC/NRC 1:4 Scale Prestressed Concrete Containment Vessel Model, NUREG/CR-6809, 2003.
- 6. ABAQUS, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Ver. 6.3, 2002.
- 7. Sandia National Laboratories, PCCV Round Robin Analysis, 1997.
- 8. Drucker, D.C. and Prager, W., "A more fundamental approach to plastic stress-strain relation," "*Proc. Natl. Cong. Inst. Appl. Mech.*, pp. 487-491, 1951.
- 9. Hsu, T.T.C. and Belarbi, A., "Constitutive laws of concrete in tension and reinforcing bars stiffened by concrete," *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 4, pp. 465–474, 1994.
- 10. 이홍표, 전영선, 최인길, 서정문, 프리스트레스 콘크리트 격납건물 1/4 축소모델의 비 선형해석에 대한 연구, 한국원자력연구소, KAERI/TR-2740/2004, 2004.