

월성 원자력발전소 격납건물의 극한내압평가

Evaluation of Ultimate Pressure Capacity of Wolsong Containment Structure

곽효경* 김재홍** 김선훈*** 정연석****
Kwak, Hyo-Gyoung Kim, Jae Hong Kim, Sun-Hoon Chung, Yun-Suk

ABSTRACT

Nuclear containment structure is the last barrier for being secure from any nuclear power plant accident. Even though the safety requirements of nuclear power plant have been focused on removing accidental situations, nuclear containment structure must reserve the sufficient resisting capacity to any accident because it works as the last barrier. The acceptable nuclear containment structure makes possible to limit the effect of internal accidents and to avoid radioactive release. In this study, to conduct the numerical analysis for the structural safety of a containment structure, loss of coolant accident (LOCA) is considered as the basic accidental load, and Wolsong containment structure is considered as a target structure. The CANDU containment structure, such as Wolsong containment structure, is a prestressed concrete shell structure which has dome and is reinforced with bonded tendons. The evaluation of ultimate pressure capacity was conducted by nonlinear analysis of a prestressed concrete containment structure.

1. 서론

원자로 격납건물(reactor containment structure)은 냉각재 유실사고(LOCA: loss of coolant accident) 등 내부사고 시 주변 주민의 생명과 재산에 막대한 피해를 초래할 수 있는 방사능 물질의 외부 누출을 방지하기 위한 차폐기능을 수행하도록 설계된다. 따라서, 원자로 격납건물은 일반 구조물에서 요구되는 안전성 이상을 필요로 한다. 특히, 별도의 격납건물이 설계되지 않았던 구소련의 1986년 체르노빌(Chernobyl) 원자력발전소 사고 참사와 격납건물로 인해 참사를 막을 수 있었던 1979년 미국의 TMI(Three Mile Island) 원자력 발전소 사고 이후 내부사고에 대한 격납건물의 차폐기능 및 극한내압해석이 더욱 중요 시 되고 있다⁽¹⁾.

원자로 격납건물은 원통형 벽체와 바닥의 기초 슬래브 그리고 상부 덮개인 돔으로 구성되는 셸구조를 채택하고 있다. 최근 원자로의 설계내압이 증가함에 따라 철근콘크리트 구조에 비해 내압에 대한 저항이 증대된 프리스트레스트 콘크리트 구조로 건설되고 있다⁽²⁾. 현재 국내에서는 가압경수로(PWR: pressurized water reactor)와 가압중수로(CANDU: Canada deuterium uranium)를 사용하고 있으며, 각 노형에 적합한 원자로 격납건물이 건설되어 있다.

* 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 부교수
** 발표자 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정
*** 영동대학교 토목환경공학과 교수
**** 한국원자력안전기술원 책임연구원

원자로 격납건물의 극한내압해석은 수치해석적 방법과 실험해석적 방법이 병행하여 수행되고, 정립된 해석적 방법을 바탕으로 궁극적으로 실제 원자로 격납건물의 극한내압능력을 예측할 수 있다. 실제 원자로 격납건물의 축소모델을 대상으로 내압에 대한 저항 능력을 평가하는 실험은 대상 시험체의 규모 때문에 주로 국제공동연구로 수행되었다. 최근의 대표적인 실험으로는 캐나다 Gentilly-2 원자력발전소의 1/14 축소모델⁽³⁾, 영국 Sizewell-B 원자력발전소의 1/10 축소모델⁽⁴⁾, 일본 Ohi-3 원자력발전소의 1/4 축소모델⁽⁵⁾ 등이 있다. 수치해석적 방법으로는 유한요소해석(finite element analysis)을 주로 사용하여 원자로 격납건물과 같은 콘크리트 구조물의 파괴거동을 예측할 수 있다.

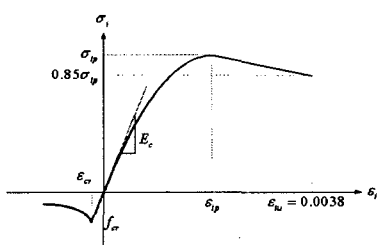
실 구조물인 월성 원자력발전소 격납건물의 극한내압평가는 실험해석적 방법은 불가능하므로, 정립된 수치해석적 방법을 바탕으로 수행할 수 있다. 정철현 등⁽⁶⁾은 축대칭 유한요소 모델로 원자로 격납건물의 재료 비선형 해석을 수행하여 극한내압을 평가한 바 있다. 이 논문에서는 링빔(ring beam)과 버트레스(buttruss)의 영향을 고려할 수 있고, 긴장재의 위치에 따른 프리스트레싱(prestraining) 효과를 반영할 수 있는 3차원 유한요소 모델을 적용하였다. 구성된 유한요소 모델에 대해서 상용 유한요소해석 프로그램인 DIANA⁽⁷⁾를 이용하여 재료비선형 해석을 수행하였고, 각 부재 별 재료의 거동을 확인함으로써 원자로 격납건물의 극한내압을 평가할 수 있다.

2. 재료성질

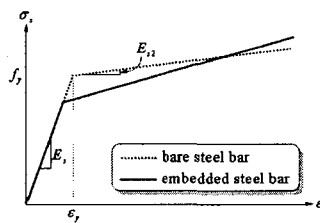
이 논문에서는 균열선단의 국부적인 거동보다는 구조물 전체 거동에 관심이 있으므로 분산균열모델(smearred crack model)을 사용하여 콘크리트의 재료 비선형성을 고려하였다. 이에 따라 콘크리트의 강도포락선은 압축영역에서 Drucker-Prager 파괴면으로, 인장영역과 인장-압축영역에서는 Rankine 파괴면으로 표현하였다. 이를 수학적으로 구체화하는 구성 방정식은 직교이방성모델(orthotropic model)을 채택하여 콘크리트의 파괴모드를 지배하는 인장영역에 인장증강효과(tension stiffening effect)를 고려한 Maekawa 등⁽⁸⁾에 의해 제안된 모델식을 사용하였다.

철근의 경우 콘크리트와의 상호거동을 분산균열모델에 표현하기 위해 Belarbi 등⁽⁹⁾의 매설철근(embedded bar)에 대한 제안식을 적용하였다.

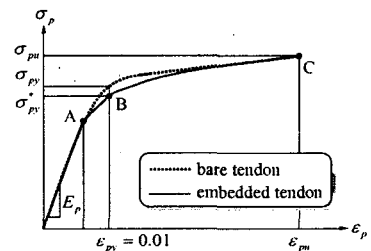
긴장재 또한, 그라우팅제와의 상호거동을 고려할 수 있는 콕쇼 경 등⁽¹⁰⁾의 매설긴장재(embedded tendon)에 대한 제안식을 적용하였다.



(a) 콘크리트의 응력-변형률 관계



(b) 철근의 응력-변형률 관계



(c) 긴장재의 응력-변형률 관계

그림 1 재료의 구성관계

3. 유한요소 모델링

3.1. 격납건물의 형상

현재 월성원자력 발전소에서 사용되고 있는 가압중수로형(CANDU) 격납건물의 경우 부착된 긴장재를 사용하여 부분구형 돔으로 설계된다. CANDU형 격납건물은 원통형 벽체(wall)와 상부 덮개인 돔(dome), 그리고 바닥의 기초(base)로 구성된다⁽ⁱⁱ⁾. 또한 벽체는 원환(hoop)방향 긴장재를 정착시키기 위한 버트레스(buttress)와 벽체의 수직(meridional)방향 긴장재와 돔의 긴장재를 정착시키기 위한 링빔(ring beam)이 존재한다(그림 2 참조).

벽체에는 단면적이 54.3cm^2 인 124개의 수직방향 긴장재와 단면적이 36.5cm^2 인 129개의 180° 원환방향 긴장재와 18개의 90° 원환방향 긴장재가 배치되고, 링빔에도 추가적으로 단면적이 36.5cm^2 인 8개의 긴장재가 배치되어 있다. 180° 원환방향 긴장재는 반원을 둘러 마주보는 부벽에 정착이 되고, 수직방향 긴장재는 기초와 원형보에 정착되어 있다. 그리고 돔에는 단면적이 36.5cm^2 인 141개의 긴장재가 120° 의 각을 이루며 세 그룹으로 배치되고 원형보에 정착되어 있다. 또한, 기초슬래브에 단면적이 54.3cm^2 인 126개의 긴장재가 돔과 마찬가지로 세 그룹으로 배치되어 있다. 이때 벽체의 수직방향 긴장재와 기초슬래브의 긴장재는 7154kN 으로 프리스트레싱 하였고, 벽체의 원환방향, 링빔, 상부돔의 긴장재는 5586kN 으로 프리스트레싱하였다. 긴장 후 시멘트 그라우팅(cement grouting)하여 부착된 긴장재로 시공되어, 수치해석시 마찰손실 및 정착슬립등을 기본적으로 고려하였다.

3.2 유한요소 모델링

프리스트레스트 콘크리트 원자로 격납건물의 내압하중에 대한 전반적인 거동 및 극한내압능력 평가를 위해 3차원 유한요소로 모델링하였다. 일반적으로 내부압력을 받는 격납건물은 막응력(membrane stress)이 지배적인 거동을 보이게 되므로 Mindlin 이론에 근거한 감절점 쉘요소(degenerated shell element)로, 기초부분은 고체요소(solid element)로 모델링하였다. 또한, 장비출입구(E/H)와 인원출입구(A/L) 등의 개구부는 급작스런 국부파괴를 방지하기 위해 부분 보강되어 있으므로, 격납건물의 전체적인 구조거동에 영향을 끼치지 않는 것으로 판단되어, 해석모델에 포함시키지 않았다.

격납건물의 유한요소 모델링 시, 벽체와 돔의 하부에는 1380개의 8절점 사각형 적층셀요소를, 돔의 상부는 125개의 6절점 삼각형 적층셀요소를 사용하였고, 버트레스과 링빔 그리고 기초는 20절점 육면체 솔리드요소 2024개를 사용하였다.

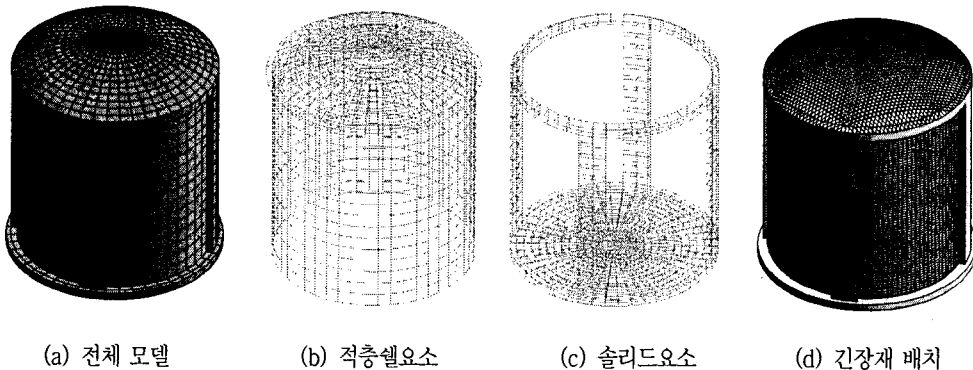


그림 2 월성 원자력발전소 격납건물의 유한요소 모델

그림 2에서 철근과 콘크리트를 표현하는 적층셀 요소는 8개의 층(layer)을 갖도록 모델링하였다. 철근은 긴장재를 기준으로 격납건물의 내측부와 외측부에 각각 원환방향과 수직방향으로 배근되므로 격자형태로 분포하는 철근을 하나의 등가 층으로 하여 내측 철근 층(inner steel layer)과 외측 철근 층(outer steel layer)으로 모델링하였다. 두 철근 층은 피복 콘크리트 층 안쪽에 위치하도록 하였으며, 내측 철근 층과 외측 철근 층 사이 콘크리트는 4개의 층으로 나누어 해석의 정확도를 확보하였고, 이 부분으로 긴장재가 관통하게 된다.

구성된 유한요소모델의 재료특성 및 구조특성은 도면에 근거하여 표 1과 같이 산정하였다. 이때 돔 부분의 철근비는 돔의 중심에서 벽체 반경의 절반 위치를 기준으로, 벽체의 철근비는 가운데 높이를 기준으로 산정하였다.

표 1 1/14 PCCM의 재료특성 및 구조특성

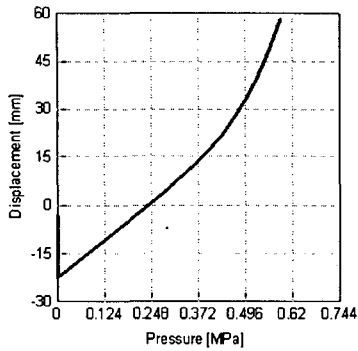
Properties	Upper Dome	Lower Dome	Wall	Base
Geometry	61cm Shell $\rho_{s,in}=1.25\%$ $\rho_{s,out}=1.25\%$	38cm Shell $\rho_{s,in}=0.553\%$ $\rho_{s,out}=0.553\%$	107cm Shell $\rho_{s,in}=0.189\%$ $\rho_{s,out}=0.189\%$	Solid
Concrete	$f'_c=35\text{MPa}$			
Re-bar	$f_y=400\text{MPa}$			
Tendon	37 or 55 ½ in. seven-wire strand with $f_{pu}=1862\text{MPa}$			

월성 원자력발전소 격납건물은 비교적 단단한 기초에 설치되어 있으므로 경계조건은 기초 바닥면의 모든 변위방향 자유도를 고정시켰다. 또한 벽체와 기초는 별다른 고정없이 긴장재와 철근을 이용하여 접합되어 약간의 회전변형을 허용하는 부분힌지 접합으로 이루어진다. 유한요소 모델에서도 회전자유도가 있는 셀 요소와 회전자유도가 없는 솔리드가 만나는 부분에서 자유도 차이로 인해 강절접합 또는 힌지접합을 선택할 수 있다. 부분힌지 접합은 힌지접합을 선택한 접합부에 긴장재를 통과시킴으로써 모사할 수 있다. 긴장재의 초기 포스트텐서닝 과정을 모사하기 위해 자중, 긴장력, 내압을 단계적으로 재하시켜 해석하였는데, 자중이 재하될 때는 구조물에 긴장재가 존재하지 않고, 긴장력을 가할 때는 긴장재와 콘크리트가 서로 독립적인 구조거동을 하므로 긴장재의 강성이 콘크리트 요소의 강성에 더해지지 않은 상태에서 하중이 재하되도록 하였다. 이때 긴장력에 대한 손실은 상대적으로 큰 마찰손실과 정착손실을 이룬식 $\Delta f_{anc}=E_p \Delta L/L$, $\Delta f_f=f_t(1-e^{-(kL+\mu a)})$ 에 따라 고려하였다. 그라우팅 후 구조물이 내압을 받을 때는 긴장재와 콘크리트가 일체 거동을 하므로 긴장재의 강성을 고려한 프리스트레스트 콘크리트 요소로 해석을 할 수 있다.

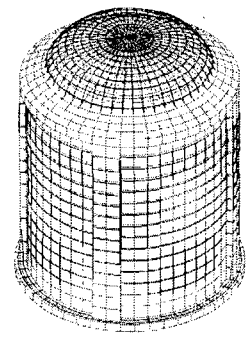
4. 해석결과

4.1 비선형해석 결과

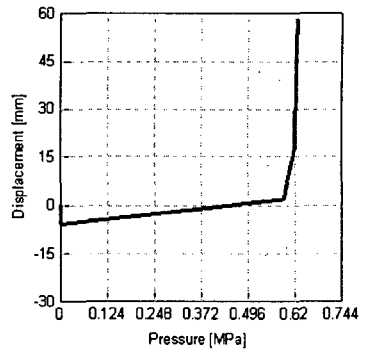
비선형 해석을 위해서는 전통적인 해석방법인 복합법(combined incremental-tangential method: Regular Newton-Raphson iteration)을 사용하였다. 구성된 원자로 격납건물의 유한요소 모델에 내부압력을 설계내압(0.124MPa)의 6배까지 증가시키면서 비선형해석을 수행하였다. 먼저, 원자로 격납건물의 구조거동 특성을 확인하기 위하여 설계내압보다 3배정도 큰 내압을 받을 때 변위형상과 구조거동을 대표할 수 있는 돔의 정상부와 벽체의 중앙부에서의 변위를 그림 3에 도시하였다.



(a) 돔 정상부에서 내압-변위 관계



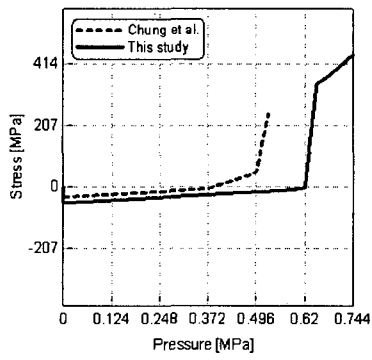
(b) 변형도



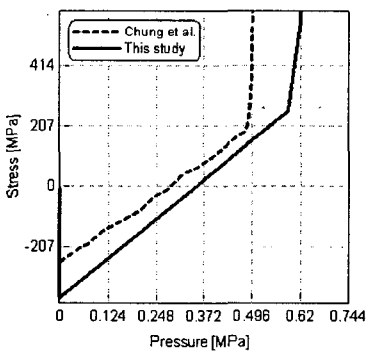
(c) 벽체 중앙부에서 내압-변위 관계

그림 3 월성 원자력발전소 격납건물의 변형도

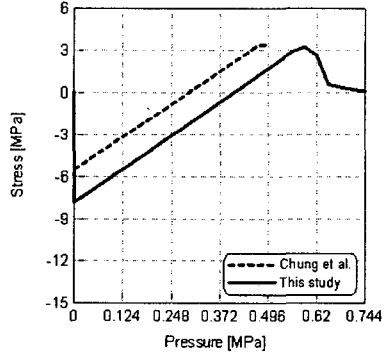
극한내압평가에 앞서 해석결과와 신뢰서를 확인하기 위해 정철현 등⁽⁶⁾이 수행한 축대칭요소를 이용한 극한내압해석 결과와 비교하였다. 축대칭 모델은 구조해석 프로그램인 ADINA에서 제공되는 유한요소를 사용하였고, 기초슬래브와 상부돔에 포함된 긴장재를 모델하기 위해 반경에 따른 실제 긴장재량의 변화와 정착하중의 방향을 고려 근사하였다.



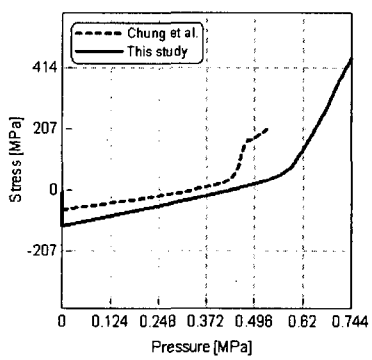
(a) 벽체: 하단 자오선-내측철근



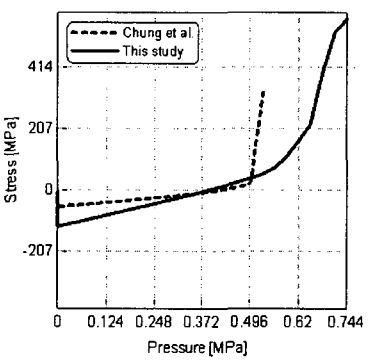
(b) 벽체: 높이 11m 원환-외측철근



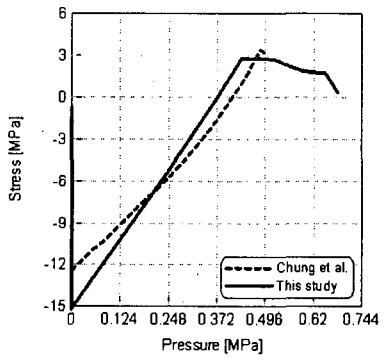
(c) 벽체: 높이 11m 원환-외측콘크리트



(a) 상부돔: 반경 12m 자오선-외측철근



(b) 상부돔: 반경 12m 원환-외측철근



(c) 상부돔: 반경 12m 원환-외측콘크리트

그림 4 격납건물의 구조거동 비교

벽체부분의 거동을 보면, 3차원모델의 결과가 축대칭모델의 결과보다 구조물의 강성이 더 크게 산정됨을 알 수 있다. 이는 버트레스의 영향이 고려된 결과로 판단된다. 상부동을 보면, 두 모델의 결과가 비교적 비슷한 경향을 나타내고 있다.

4.2 극한내압평가

실구조물인 관계로, 비록 실험치와 직접적인 비교는 불가능하지만, 다른 연구자의 연구결과가 비교하여 볼 때 비선형해석이 일관성있게 수행되었다고 판단된다. 따라서 이를 바탕으로 월성 원자력발전소 격납건물의 극한내압평가를 수행하여 구조물의 안전성을 평가하고자 한다.

격납건물의 극한내압은 구성된 각 재료의 비선형거동을 바탕으로 정의할 수 있다. 내압이 증가함에 따라, 제일 먼저 콘크리트의 균열이 발생하고 다음으로 철근의 항복, 긴장재의 항복으로 비선형거동이 발생한다. 콘크리트의 경우, 표 2와 같이 균열에 대한 평가로 극한내압평가를 수행할 수 있다. 이때, 균열발생확인은 콘크리트 요소의 인장응력이 콘크리트 재료의 인장강도보다 크게 발생하였음을 의미하고, 균열발생가능은 인장응력이 인장강도의 절반 수준이지만 콘크리트의 비균질성 때문에 균열이 발생할 수도 있음을 의미한다. 철근의 경우, 주로 설계내압의 4배, 즉 0.496MPa까지는 철근의 항복이 발생하지 않음을 확인하였다. 특히, 설계내압의 5배 작용 시 상부동의 내측철근에서 원환방향과 자오선방향으로, 벽체의 원환방향으로 내측철근과 외측철근에서 항복이 발생하였다. 마지막으로, 긴장재는 설계내압의 5배(0.620MPa) 작용 시 까지 항복 변형률이라 할 수 있는 0.01을 넘지 않고 전반적으로 탄성거동을 보여준다고 판단된다.

표 2 격납건물의 콘크리트에 대한 극한내압평가

내압	상태	위치	콘크리트의 거동	평가
0	긴장력 도입	전체	탄성거동	
0.124MPa (18psi)	설계내압	전체	탄성거동	
0.248MPa (36psi)	설계내압의 2 배	상부동	링빔과 접합부주변 내측면에 균열발생	균열발생확인
		벽체	벽체 하부 외측면에 인장응력 증가	균열발생가능
0.372MPa (54psi)	설계내압의 3 배	상부동	내측면에 발생한 균열이 단면내부중앙까지 침투	관통균열가능
		벽체	벽체 하부 외측면에 균열발생	균열발생확인
0.496MPa (72psi)	설계내압의 4 배	상부동	내측면에 발생한 균열이 단면내부중앙까지 침투	관통균열가능
			상부동 중앙부 외측면에 균열발생	균열발생확인
		벽체	외측면에 발생한 균열이 단면내부중앙까지 침투	관통균열가능
			벽체 상부 외측면에 인장응력 증가	균열발생가능
0.620MPa (90psi)	설계내압의 5 배	상부동	모든 층에 균열발생	관통균열확인
		벽체	모든 층에 균열발생	관통균열확인

5. 결론

이 논문에서는 월성 원자력발전소 격납건물의 극한내압평가를 수행하였다. 극한내압평가를 위해서, 구조물의 파괴거동을 모사할 수 있도록 상용 유한요소해석 프로그램인 DIANA8.1을 이용하여 구조물의 비선형해석을 수행하였다. 대규모의 실 구조물을 모델링하기 위해서 분산균열모델을 사용하여 콘크리트의 비선형거동을 모사하였고, 철근과 긴장재의 항복거동을 고려하였다. 이와 같이 구성된 모델의 신뢰성 확인을 위하여 다른 연구자의 축대칭모델과 비교하여 이를 검증하였다.

비선형해석 결과를 바탕으로 월성 원자력발전소 격납건물의 극한내압평가를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 콘크리트는 격납건물의 설계내압 2배(0.248MPa) 작용 시 균열이 발생하기 시작하여, 설계내압 5배(0.620MPa)에서 관통균열로 진전 구조계가 파괴된다.
- (2) 철근은 설계내압 4배(0.496MPa) 작용 시까지는 탄성거동을 보이나, 설계내압 5배(0.620MPa)에서 재료의 항복이 발생하기 시작한다.
- (3) 긴장재는 설계내압 5배(0.620MPa) 작용 시 긴장재의 변형률이 긴장재의 항복 변형률이라 할 수 있는 0.01을 넘어서기 시작한다.

이를 종합하면, 월성 원자력발전소 격납건물은 콘크리트, 철근, 긴장재 순으로 재료의 역학적 저항능력이 발현되어 긴장재의 항복 이후 내압에 대한 저항이 현저히 감소하는 파괴거동을 보임을 확인할 수 있다. 따라서, 월성 원자력발전소 격납건물의 극한내압은 긴장재의 항복상태라 할 수 있는 설계내압 5배(0.620MPa)로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국원자력안전기술원(KINS)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 지원에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. Amin, M., Eberhardt, A. C., and Erler, B. A., "Design considerations for concrete containments under severe accident loads," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 145, 1993, pp. 331-338.
2. FIB Task Group, *Nuclear Containments*, International Federation for Structural Concrete (*fib*), 2001.
3. Rizkalla, S. H., Simmonds, S. H., and MacGregor, J. G., "Prestressed Concrete Containment Model", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 4, 1984, pp. 730-743.
4. Twidale, D. and Crowder, R., "Sizewell 'B' - a one tenth scale containment model test for the UK PWR programme," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 125, 1991, pp. 85-93.
5. Hessheimer, M. F., Pace, D. W., Klamerus, E. W., Matsumoto, T., and Costello, J. F., "Instrumentation and Testing of a Prestressed Concrete Containment Vessel Model," *Transactions of the 14th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT 14)*, Lyon, France, 1997, H03-4, pp. 97-103.
6. 정철현, 장성욱, 조경태, 박철림, "재료-비선형 모델을 이용한 CANDU형 원자력발전소 격납구조물의 극한내압능력 평가", *대한토목학회논문집*, 제16권, 제I-2호, 1996, pp. 305-316.
7. De Witte, F. C., and Kikstra, W. P., *DIANA-8.1 User's Manual - Element Library, Material Library, Analysis Procedures*, TNO Building and Construction Research, 2002.
8. Maekawa, K., Pimanmas, A., and Okamura, H., *Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete*, Spon Press, 2003.
9. Belarbi, A., and Hsu, T. T. C., "Constitutive Laws of Concrete in Tension and Reinforcing Bars Stiffened by Concrete," *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 4, 1994, pp. 465-474.
10. 박효경, 김재홍, 김도연, "PSC 구조물의 유한요소해석을 위한 긴장재 모델 개발", *대한토목학회논문집*, 제25권, 제1A호, 2005, pp. 153-161.
11. Canatom Inc., *Wolsong Nuclear Power Plant: Design Description for Reactor Building Containment Structure*, 8634-21000-0001-00-DE-A, 1993.