

비선형 유한요소 해석을 이용한 월성1호기 격납건물의 내압취약도 평가

Assessment of the Internal Pressure Fragility of the Wolsung Unit 1 Containment Building using Nonlinear Finite Element Analysis

함 대 기* · 최 인 길** · 이 홍 표***
Hahm, Daegi · Choi, In-Kil · Lee, Hong-Pyo

요 약

월성 1호기 격납건물에 대하여 극한내압하중에 대한 확률론적 취약도 평가를 수행하였다. 격납건물 성능의 불확실성은 가동중 검사 결과를 통해 얻어진 재료 물성치 중앙값과 텐던 긴장력 중앙값을 적용하여 고려하였다. 격납건물은 개구부를 고려하여 3차원 유한요소로 모델링하였으며, 확률론적 취약도 평가를 위하여 대규모의 비선형 유한요소 해석 모델을 적용하기에 적합한 효율적인 취약도 평가 기법을 개발하였다. 월성 1호기 격납건물에 대한 취약도 평가 결과, 벽체 중단부가 극한내압발생으로 인한 방사능물질 누출에 가장 취약한 것으로 나타났으며, 중앙값 성능은 약 55psi, 고신뢰도 저과과 파괴확률값인 HCLPF(High Confidence Low Probability of Failure)는 약 29psi를 나타내었다.

keywords : 월성1호기, 격납건물, 유한요소해석, 극한내압취약도

1. 서 론

원전 격납건물은 원자로의 중대사고 발생 시 방사능 물질의 유출을 방지할 수 있는 최종 차폐막으로서의 역할을 담당하기 때문에, 극한 내압의 상태에서도 구조적 건전성을 유지할 수 있는가의 여부를 평가하는 것이 대단히 중요하다. 최근에는 구조계의 안전성을 평가하는 데에 있어서 기존의 확정론적인 방법에서 나아가 하중 및 구조계에 발생 가능한 불확실성 요인들을 고려하여 확률론적 안전성 평가를 병행하여 수행하는 것이 일반적이다. 특히 월성 1호기 격납건물과 같이 사용 년수가 긴 구조물은 종합적이고 체계적인 수명관리 대책 수립을 위하여 격납건물에 대한 확률론적 취약도를 재평가할 것이 요구되어지고 있다.

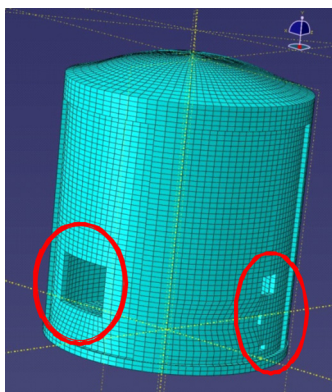
기존의 격납건물에 대한 취약도 해석은 구조계의 재료적 특성만을 고려하여 간략한 수계산에 의존하는 방법이 주로 사용되어져 왔으며, 2차원 축대칭 모델을 사용하여 전반적인 격납건물의 내압 거동을 파악하고 취약부위에 대한 상세 2차원 유한요소 해석을 통해 파괴확률을 추정하는 기법이 개발되기도 하였다(Petti 등, 2008). 또한 최근에는 APR1400 원자로 격납건물을 대상으로 3차원 유한요소 해석을 통해 파괴거동을 파악하고 최대 취약부위에 대한 상세 해석을 거쳐 파괴확률을 추정하고 취약도 곡선을 도출하는 연구가 진행되었다(문일환 등, 2009). 그러나 이러한 연구들에서는 격납건물에 사용 중인 재료의 물리적 성질에 따른 확률적 특성을 직접적으로 반영하지 않고 있으며, 기존의 임의성/불확실성 변수값을 그대로 차용함으로써 격납건물

* 한국원자력연구원 선임연구원 dhahm@kaeri.re.kr
** 한국원자력연구원 책임연구원 cik@kaeri.re.kr
*** 한국전력공사 전력연구원 선임연구원 hplee@kepri.re.kr

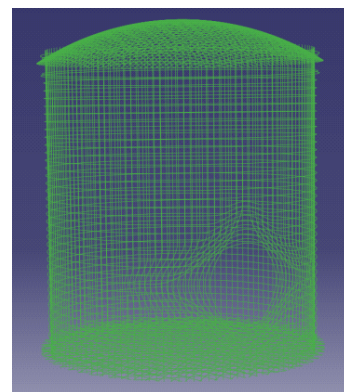
고유의 취약도 평가를 통한 확률론적 안전성 분석에 직접 적용하기에는 어려움이 있다고 할 수 있다. 이 연구에서는 대상 격납건물인 월성1호기 격납건물을 3차원 유한요소 모델을 이용하여 모델링하고, 가동중검사 결과를 통해 얻어진 재료 중앙값을 적용하여 극한내압 해석을 수행함으로써, 확률론적 취약도 평가를 수행하였다. 이러한 방법을 적용함에 따라 파괴가 예측되는 격납건물의 다양한 취약부위에 대한 손상곡선을 도출할 수 있게 되며, 월성 1호기의 현재 재료 특성값 및 불확실성 특성을 사용함으로써 기존의 방법에 비하여 합리적인 안전성 평가가 가능하게 된다.

2. 월성 1호기 격납건물의 모델링

월성 1호기 격납건물은 원통형 벽체, 하부돔 및 상부돔, 그리고 기초슬래브로 구성되어 있다. 프리스트레스트 콘크리트 구조물로 벽체에는 원환 긴장재와 수직 긴장재, 상부돔에는 곡선형 긴장재, 기초슬래브에는 수평 긴장재가 배치되어 있다. 그리고 수직 긴장재를 정착시키기 위한 링빔(ring beam)이 상부돔과 벽체의 접합부에 위치하고, 원환 긴장재를 정착시키기 위한 4개의 부벽(buttress)이 벽체의 중간에 위치한다. 벽면에는 입시관통부, 장비출납구, 격납건물 통로 및 사용 후 핵연료 이송구 등의 관통부들이 존재하며, 이 연구에서는 텐던의 배치에 영향을 줄 수 있는 4개의 주요 관통부를 모델링하였다. 전체적인 격납건물과 텐던의 모델링 형상은 그림 1에 나타난 바와 같다.



(a) 철근 콘크리트 벽체 및 관통부 모델링



(b) 텐던 모델링

그림 1. 월성 1호기 철근 콘크리트 격납건물 유한요소 모델

표 1. 월성 격납건물의 텐던 물성치 비교

구분	월성 1호기	월성 2/3/4호기
텐던 극한 인장강도	1,757MPa (255ksi)	1860MPa (270ksi)
Wire 직경	0.276 in	0.500 in
Wire 개수 (벽체, 수평)	85개	37개
텐던 개수 (〃)	69개	69개
텐던 극한 인장력 (〃)	5,762kN	6,790kN
텐던 설계 인장력 (〃)	2,881kN	4,753kN

월성1호기 격납건물의 모델링을 위해서는 격납건물의 제원 및 재료특성에 대한 조사가 선행되어야 한다. 월성1호기 격납건물은 14년 후 준공된 월성2/3/4호기 격납건물과 비교하여 전체적인 제원과 철근 및 콘크리트의 재료 특성에서는 큰 차이를 보이고 있지 않으나, 사고발생시 내압에 저항하는 주된 요소인 프리스트레싱 텐던의 특성에서는 표 1에 나타난 바와 현저히 작은 값을 가지고 있다. 이러한 결과를 통해 볼 때, 월성 1호기 격납건물은 특히 극한내압 성능에 대하여 보다 면밀한 안전성 평가가 요구됨을 유추해볼 수 있다.

3. 구조재료 불확실성 인자 선정 및 중앙값 추정

격납건물에 사용되는 구조재료 중, 콘크리트의 압축강도와 텐던의 긴장력을 변동성을 가지는 확률변수로 선정하였다. 이는 이 두 설계변수가 프리스트레스트 콘크리트 격납건물의 내압 저항 거동에 가장 큰 영향을 미치는 변수이며, 열화로 인한 성능 저하가 발생 가능하여 현재 상태에 대한 정확한 물성치 특성 파악이 필요할 뿐만 아니라, 확률적으로도 구조계 거동에 민감하게 작용할 수 있는 큰 변동성을 가지고 있기 때문이다. 격납건물의 확률적 특성을 평가하기 위한 자료로서는 25년차 월성 1호기 가동중 검사 보고서(2008)를 활용하였다. 이 연구에서는 압축강도 측정 방법 중 가장 높은 신뢰도를 가지는 코어채취를 통한 직접 강도시험 결과를 사용하였다. 시험 결과 압축강도 중앙값은 설계기준강도 35MPa보다 약 8% 큰 37.8 MPa, 압축강도의 평균(μ_{f_c})과 표준편차(σ_{f_c})로부터 식 (1)로 정의되는 대수표준편차 β 는 약 0.165로 나타났다.

$$\beta^2 = \ln(1 + (\sigma_{f_c} / \mu_{f_c})^2) \quad (1)$$

포스트텐서닝 계통에 대한 가동중 검사는 월성 1호기 건설 당시 제작된 시험용 테스트빔(test beam)을 이용하여 매 5년 단위로 수행되어 오고 있다. 초기 긴장 직후 긴장력은 432.2 tonf로 측정되었으나, 검사 시점은 재령 이후 약 10,000일 이상이 경과하여 콘크리트의 크리프(creep), 건조수축, 릴렉세이션(relaxation) 등에 의한 긴장력 손실이 이루어진 상태이다. 10년차 이후 측정되어져 온 긴장력 값과 이상적인 예측치를 비교하여 보면 20년차 이후에는 긴장력의 손실이 거의 이루어지지 않고 있는 것을 볼 수 있었다. 이로부터 이 연구에서는 25년차 측정값으로부터 중앙값과 β 값을 평가하여, 중앙값 349.91 tonf, β 값 0.025를 적용하였다.

4. 극한내압 취약도 평가 기법 및 취약도 평가결과 분석

기존의 취약도 평가 기법에서는 불확실성의 평가 방법에 있어서, 설계값을 토대로 하여 변동계수를 가정하는 방법만이 사용되어져 왔다. 이 연구에서는 대상 격납건물의 실제 물성치를 고려하여 이러한 문제점들을 해결하고, 대규모 구조계의 비선형 유한요소 구조해석을 적용하였을 때의 확률론적 안전성을 체계적/합리적으로 평가할 수 있는 취약도 평가 기법을 도출하였다. 그 절차는 간략하게 아래와 같이 요약할 수 있다.

- ① 불확실성 인자를 고려한 해석 모델 추출 (콘크리트 압축강도 및 텐던 긴장력)
- ② 비선형 유한요소 해석 수행 (30회)
- ③ 응답 분포 산출
- ④ 내압 수준 별 파괴확률 추정
- ⑤ 취약도 곡선 도출
- ⑥ 신뢰도 수준 별 취약도 곡선 도출 및 HCLPF 산출

불확실성을 고려한 해석을 위한 추출은 앞서 설명된 대로 콘크리트 압축강도와 텐던 유효긴장력의 대수표준편차값을 이용하여 수행하였다. 충분한 신뢰도를 가지는 응답의 확률분포를 추정하기 위하여 30회의 유한요소 해석을 수행하였으며, 내압 수준에 따라 구조계의 변형률 응답이 정해진 한계상태를 넘어서게 될 파괴확률을 응답 분포로부터 도출하였다. 이로부터 회귀분석을 통해 대수정규분포의 중앙값과 대수표준편차를 추정하고, 신뢰도 수준 별 취약도 곡선 및 HCLPF를 산출할 수 있다.

극한내압 해석 결과, 내압 하중에 대하여 상대적으로 취약한 부위는 벽체 중단부, 임시출납구 상단부, 돔 중단부로 나타났으며, 각각의 부위에서 콘크리트의 균열이 발생하여 방사능 물질 누출이 발생할 사건(leak)의 50% 취약도 곡선은 그림 2에 나타난 바와 같다. 그림에서 볼 때, 벽체 중단부가 가장 내압 하중에 대하여

취약한 성능을 가지는 것을 알 수 있으며, 중앙값은 약 55psi 가량으로서 설계 내압에 비하여 약 3배 큰 값을 보였다. 그림 3은 내압하중에 대하여 가장 취약한 것으로 나타난 벽체 중단부에 대하여 각 신뢰도 수준별 취약도 곡선을 나타내는 그래프이다. 95% 신뢰도 5% 파괴확률에 대한 HCLPF는 약 29 psi로 설계내압 대비 약 160% 큰 값을 가지는 것으로 나타났다.

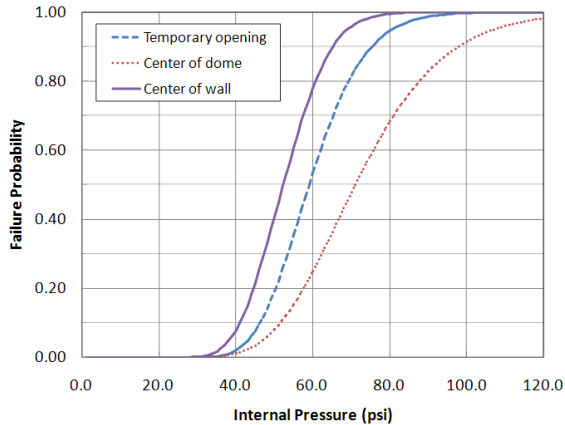


그림 2. Leak 사건에 대한 월성 1호기 격납건물의 주요 부위에서의 50% 취약도 곡선

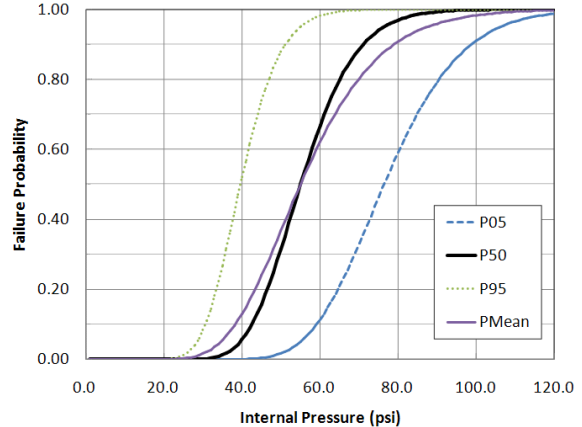


그림 3. 월성 1호기 격납건물 벽체 중단부에서의 Leak 사건에 대한 취약도 곡선

5. 결론

사용 년수가 설계 수명에 근접하고, 탠덤 관련 특성이 월성 2/3/4호기에 비하여 취약함으로써 극한내압성능에 대한 안전성 재평가가 요구되어지고 있는 월성 1호기 격납건물을 대상으로 하여 확률론적 취약도 평가를 수행하였다. 취약도 해석에는 비선형 3차원 유한요소 모델을 이용하였으며, 대형 구조계를 대상으로 하여 재료특성 별 불확실성 모델을 반영할 수 효율적인 취약도 평가기법을 개발하여 적용하였다. 파괴가 예측되는 격납건물의 다양한 취약부위에 대한 손상곡선을 도출하였으며, 그 결과 월성 1호기의 경우 벽체 중단부가 내압하중으로 인한 방사능 물질 누출 사고에 가장 취약한 것으로 나타났다. 이 부위에서의 50% 파괴확률 중앙값 성능은 55psi, HCLPF는 29psi로 설계 내압 대비 각각 약 3배, 1.6배 큰 값을 가지는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 원전기술 혁신사업으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 문일환, 안성문, 김태영 (2009) 원자로건물의 확률론적 극한내압 평가, **대한토목학회정기학술대회**
 한국수력원자력(주) 월성원자력본부 (2008) 월성원자력 1호기 25년차 원자로건물 포스트텐서닝계통 가동중
 검사 최종보고서
 Petti, JP, Spencer, BW, Graves, HL (2008) Risk-informed assessment of degraded containment vessels, *Nuclear Engineering and Design*, 238, pp. 2038~2047.