

비선형 유한요소해석을 이용한 CANDU형 격납건물의 내압취약도 평가

Assessment of the Internal Pressure Fragility of the CANDU Type Containment Buildings using Nonlinear Finite Element Analysis

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

요 지

CANDU형 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 유한요소해석 모델을 적용하기에 적합한 효율적인 취약도 평가기법을 개발하였다. 월성 1호기 격납건물에 대한 물성치를 사용하였다. 개발된 새로운 취약도 평가기법을 도입하여 각각의 파괴모드에 대한 취약도 평가를 수행하였으며, 파괴모드 별, 신뢰도 수준별 취약도 곡선을 도출하였다. 벽체 중단부가 극한내압발생으로 인한 방사능물질 누출에 가장 취약한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 비선형 유한요소해석, CANDU형 원전 격납건물, 내압하중, 취약도 곡선.

Abstract

In this paper an assessment of the internal pressure fragility of the CANDU type containment buildings is performed. The uncertainties of the performance of the containment buildings, material properties and tendon characteristics are referred from the in-service reports of Wolsung Unit 1. The containment buildings are modeled as a three-dimensional finite elements with considering the major opening and penetrations. A new method to evaluate the probabilistic fragility of the massive structural system is developed. The fragility curves of the target containment building are presented with respect to the failure modes and reliability levels. The center of wall is revealed as the most weak structural component of the containment building in the sense of the rupture and catastrophic rupture failure modes.

Keywords : nonlinear finite element analysis, CANDU containment, internal pressure load, fragility curve

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 원전 구조물은 긴 사용 연수에도 신뢰도 높은 안전성을 확보할 수 있도록 종합적이고 체계적인 수명관리 대책을 수립할 것을 요구하고 있으며, 이에 따라 중대사고 발생으로 인한 내압하중에 대하여 확률론적 안전성을 정량적으로 평가할 수 있는 취약도 곡선이 도출되어야 할 필요가 있다. 특히, 누설(Leak)과 대형파손(Rupture) 파괴모드에 대한 취약도곡선은 격납건물을 통한 방사능물질 누출의 안전성을 확률적으로 평가하는 Level 2 PSA(Probabilistic Safety Assessment)의 주요한 입력자료로 사용되기 때문에 그 중요

† 책임저자, 정회원 · 한국원자력연구원 선임연구원
Tel: 042-868-2276 ; Fax: 042-868-8256
E-mail: dhahm@keari.re.kr

* 한국원자력연구원 책임연구원

** 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2010년 10월 30일까지 본 학회에 보내주 시면 2010년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

성과 활용도가 매우 높다고 할 수 있다.

기존의 격납건물에 대한 안전성 평가 연구는 주로 비선형 해석 모델의 개발과 응답 평가의 정확성 향상에 그 초점이 맞추어져 왔다(이홍표 등, 2006; 2007; 김선훈, 2010). 취약도 해석 연구는 재료 특성만을 고려하여 수계산에 의존하는 방법이 주로 사용되어져 왔으며, 축대칭 모델을 사용하여 격납건물의 내압 거동을 파악하고 취약부에 대한 2차원 해석을 통해 파괴확률을 추정하는 기법이 개발되기도 하였다(Petti 등, 2008). 최근에는 APR1400 격납건물을 대상으로 3차원 해석을 통해 파괴거동을 파악하고 최대 취약부위에 대한 상세 해석을 거쳐 파괴확률을 추정하고 취약도 곡선을 도출하는 연구가 진행되었다(문일환 등, 2009). 그러나 이러한 연구들에서는 격납건물을 통한 방사능물질 누출의 주요 파괴모드라고 할 수 있는 누설(Leak), 대형파손(Rupture), 초대형파손(Catastrophic rupture) 등을 모두 고려하지는 못하거나, 각각의 파괴모드를 단순화하여 정의하고 있다. 또한 기존 연구들은 모두 PWR(Pressurized Water Reactor)형 격납건물을 대상으로 하고 있으나, CANDU(CANada Deuterium Uranium)형 격납건물은 금속성라이너의 존재 유무, 격납건물 형태의 상이함 등으로 인하여 PWR형 격납건물과는 현저히 다른 극한내압거동 및 파괴 양상을 보이는 것으로 알려져 있다. 따라서 기존 연구 결과를 CANDU형 격납건물의 파괴모드/한계상태 정의, 취약도 경향 파악/분석 등에 그대로 적용하기에는 어려움이 있다. 뿐만 아니라 기존 연구에서는 격납건물에 사용 중인 재료의 물리적 성질에 따른 확률적 특성을 직접적으로 반영하지 않고 있으며, 기존의 임의성/불확실성 변수값을 그대로 차용함으로써 격납건물 고유의 취약도 평가를 통한 확률론적 안전성 분석을 이루어 내었다고 보기에는 부족한 점이 있다고 할 수 있다.

이 연구에서는 대상 격납건물인 CANDU형 원전 격납건물을 3차원 유한요소모델을 이용하여 모델링하고, 가동중검사 결과를 통해 얻어진 재료 중앙값을 적용하여 극한내압 해석을 수행함으로써, 대상 원전의 현재 재료 특성값 및 불확실성 특성을 반영한, 합리적인 안전성 평가를 가능하게 하였다. 또한 기존 CANDU형 격납건물을 토대로 한 실험적/해석적 연구 결과를 토대로 하여 파괴모드와 그에 따른 한계상태를 정의하였다. CANDU형 격납건물의 경우 벽체 중단부 뿐만 아니라 돔상단부, 임시출입구 등 취약성이 예상되는 구조부들이 다수 존재한다. 따라서 이 부분의 개별적인 취약도 곡선 외에도 전체 격납건물의 취약도를 종합적으로 고려할 수 있는 취약부위 중첩(combined) 취약도 곡선의 도출이 필요하다. 따라서 이 연구에서는 파괴가 예측되는 격납건물의 다양한 취약부위에 대하여 각각의 취약도 곡선을 도출하고, 전체 취약부위에 대한 취약도곡선을 중첩(combine)함으로써, 대형파손(Rupture)

및 초대형파손(Catastrophic rupture) 등 각각 파괴모드에 대한 신뢰도 수준별 종합적 취약도 곡선을 도출하였다.

2. CANDU형 격납건물의 모델링

2.1 구조재료 모델링

2.1.1 콘크리트 모델링

이 연구에서는 유한요소법에 의한 철근콘크리트 구조물의 비선형 해석 시 접근방법으로서, ABAQUS 프로그램에서 제공하는 콘크리트 균열 모델 중 손상소성모델(Damaged Plasticity Model, SIMULIA, 2008)을 사용하여 콘크리트의 구성모델을 정의하였다. 이 모델은 반복하중이나 동적하중을 받는 콘크리트 구조물의 해석이 가능하도록 작성되었다. 사용된 모델에서 다축응력 상태를 정의하기 위한 항복조건, 항복면 그리고 흐름법칙(flow rule) 등을 정의하는데 필요한 변수들은 다음과 같다.

- Dilation angle = 36.0
- Flow potential eccentricity = 0.1
- b_0/c_0 , the ratio of initial equibiaxial compressive yield stress to initial uniaxial compressive yield stress = 1.16
- K_c , ratio of the second stress invariant on the tensile meridian = 0.67
- Viscosity parameter = 0.0

균열이 발생한 콘크리트를 모델링하기 위한 방법으로는 분산균열모델(smearred crack model)을 사용하였다. 분산균열 모델에서의 인장축 연화영역은 널리 사용되고 있는 모델인 Maekawa 등(2003)에 의해 제안된 모델을 사용하여 인장축 연화영역을 정의하였다. 해석에 사용된 계수는 $c=0.4$ 이다. 압축축 콘크리트의 거동은 콘크리트의 응력이 $0.4f'_c$ 에 도달할 때까지는 탄성거동을 한다고 가정하였으며, 이후 압축강도에 도달할 때까지 나타나는 포물선 형태의 곡선은 5개의 직선으로 구분하여 모사하였다.

2.2 철근 및 텐던 모델링

분산균열모델에서 콘크리트의 균열은 국부적으로 집중되지 않고, 콘크리트요소 내의 적분영역에 고르게 분포된 변형률로 이상화된다. 콘크리트의 균열이 고르게 분포된 변형률로 모사될 경우 변형률 적합조건에 의거하여 해당 영역에서 매

표 1 월성 원전 격납건물의 텐던 물성치 비교

텐던 극한 인장강도	1,757MPa
Wire 직경	7.00mm
Wire 개수(벽체, 수평)	85개
텐던 개수(벽체, 수평)	69개
텐던 극한 인장력(벽체, 수평)	5,762kN
텐던 설계 인장력(벽체, 수평)	2,881kN

입철근의 변형률 또한 고르게 분포하는 것으로 가정된다. 그러나 실제 매설철근의 변형률 분포는 균열부에서 크고, 균열 사이에서는 콘크리트가 인장증강효과로 인해 어느 정도 응력을 부담하게 되므로 균열부에서의 변형률 보다 작은 값을 갖는다. 이 연구에서는 이와 같은 변형률 분포를 분산균열모델에 적용시키기 위해 Belarbi 등(1994)이 제안한 모델을 사용하여 매입철근의 평균응력-변형률 관계를 정의하여 철근의 항복에 따른 구조물의 거동을 보다 효과적으로 고려하였다.

텐던의 응력-변형률 관계는 일반 철근과 달리 뚜렷한 항복 응력을 나타내지 않는 특징이 있다. 이런 형태의 곡선은 주요점을 기준으로 구간별 선형으로 모델링하는 것이 바람직하다. 이 때 비례탄성한계, 항복점, 파괴점 등 재료의 특성을 나타내는 점을 구간을 나누는 주요점에 포함시킬 필요가 있다. 본 연구에서는 3개의 직선을 사용하여 텐던의 응력-변형률 곡선을 정의하였다. 한편, 격납건물의 내압 거동 및 성능은 텐던에 가해지는 긴장력과 밀접한 관계를 가지게 된다. 이 연구에서는 국내 CANDU형 원전 구조물 중 월성 1호기의 텐던 긴장력 특성을 사용하였으며, 그 내용은 표 1에 정리되어 있다.

2.3 격납건물 모델링

CANDU형 격납건물은 원통형 벽체, 하부돔 및 상부돔, 그

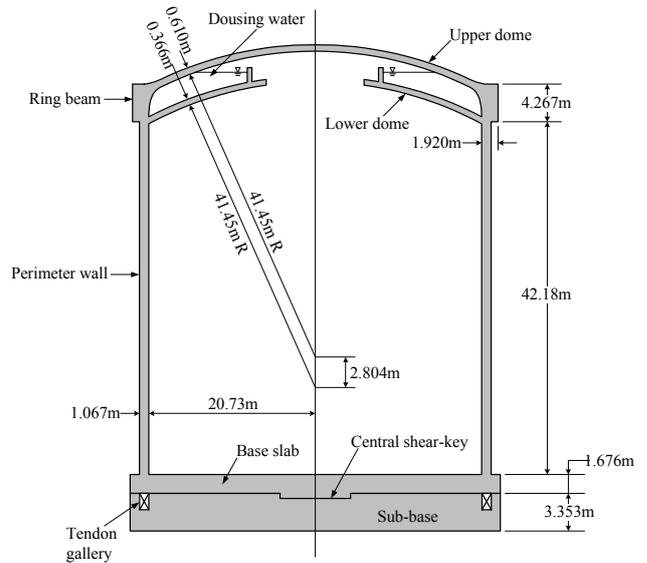
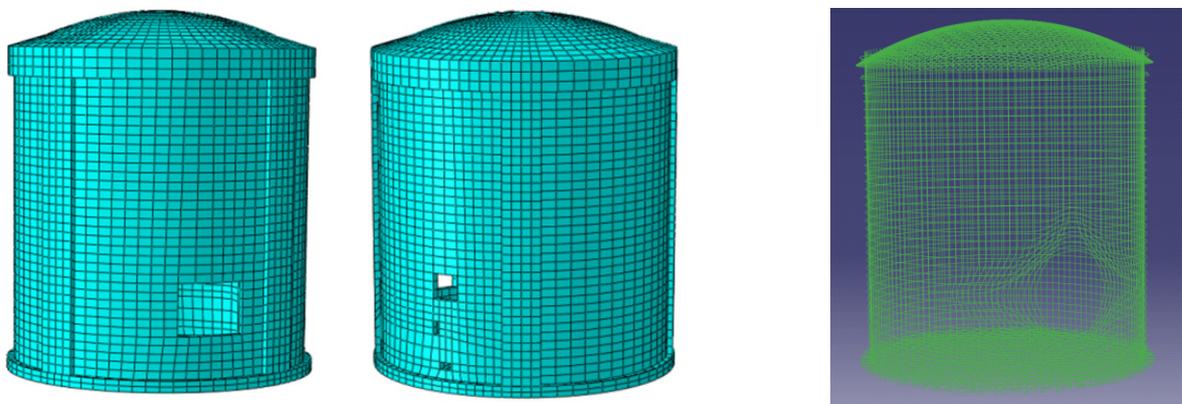


그림 1 CANDU형 격납건물의 제원

리고 기초슬라브로 구성되어 있다. 프리스트레스트 콘크리트 구조물로 벽체에는 원환 긴장재와 수직 긴장재, 상부돔에는 곡선형 긴장재, 기초슬라브에는 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 임시관통부(Temporary opening), 장비출납구(Equipment airlock, 4.26m×3.96m), 격납건물 통로(Personal airlock, 0.91m×2.13m) 및 사용 후 핵연료 이송구(2.13m×0.91m) 등의 대규모 관통부(Penetration) 이외에도 매우 많은 개수의 전기관통부(Electrical penetration, 48개), 기계적 관통부(Mechanical penetration, 88개)들이 존재한다. 이 연구에서는 텐던의 배치에 영향을 줌으로써 전체



(a) 임시관통부, 장비출납구, 격납건물 통로, 핵연료이송구를 포함한 철근 콘크리트 벽체의 유한요소 모델링

(b) 텐던 모델링

그림 2 월성 1호기 철근 콘크리트 격납건물 유한요소 모델

적인 내압 거동에 영향을 줄 것으로 예측되는 4개의 대규모 관통부를 모델링하였다. 전체적인 격납건물의 제원은 그림 1에 나타난 바와 같으며, 벽체 및 관통부의 유한요소 모델과 텐던의 모델링 형상은 그림 2와 같다.

3. 구조재료 불확실성 인자 선정 및 중앙값 추정

격납건물에 사용되는 구조재료 중, 콘크리트의 압축강도와 텐던의 긴장력을 변동성을 가지는 확률변수로서 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 37.8MPa, 압축강도의 평균(μ_{fc})과 표준편차(σ_{fc})로부터 식(1)로 정의되는 대수표준편차 β 는 약 0.165로 나타났다.

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

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 432.2tonf로 측정되었으나, 검사 시점은 재령 이후 약 10,000일 이상이 경과하여 콘크리트의 크리이프(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 349.91tonf, β 값 0.025를 적용하였다.

4. 격납건물의 파괴모드 및 한계상태 정의

격납건물의 내압하중에 대한 취약도 평가를 위해서는 내압하중의 작용으로 인한 파괴모드 및 그에 대한 한계상태의 정의가 선행되어야 한다. 격납건물의 내압하중에 대한 파괴모드는 일반적으로 leak, rupture, catastrophic rupture 등으로 구분되어지며, 각각의 파괴모드에 대한 기능적 파괴(func-

tional failure)는 다음과 같이 정의될 수 있다(NUREG-1150, 1990),

- Leak: 더 이상의 압력 증가가 이루어지지 않는 규모의 열림(opening) 발생, opening 규모 < 0.028m²
- Rupture: 격납건물의 급격한 감압(2시간 이내)이 이루어지는 규모의 열림(opening) 발생, opening 규모 0.028~0.047m²

• Catastrophic rupture: 격납건물 주 구조요소의 파괴
격납건물의 기능적 파괴모드 및 파괴에 대한 정의가 비교적 명확하게 정의되어있는 데 반하여, 유한요소해석을 통하여 기능적 파괴 여부를 판별하기 위한 구조적 한계상태의 경우에는 아직 명확한 정의가 이루어져 있지 않은 상황이다. 따라서 다양한 실험 결과의 분석을 통하여 가능한 한 유사한 조건의 격납건물에 대한 파괴모드와 한계상태를 차용하는 것이 바람직하다. 내압하중에 대한 격납건물의 거동 특성을 파악하고 파괴모드 및 한계상태를 파악하기 위한 실험적 연구 결과는 많은 수의 연구자들에 의하여 보고된 바 있으나(Kulak 등, 1985; Clauss 등, 1987; Dameron 등, 2000; Hessheimer 등, 2003) 대부분 PWR형 원전 격납건물에 대한 사례이며, CANDU형 격납건물에 대해서는 그 연구 결과가 현저히 부족한 것이 사실이다. 이 연구에서는 대표적인 CANDU형 원전이라 할 수 있는 Gentilly-2 원전을 대상으로 하여 수행된 기존의 실험적/해석적 연구 결과를 토대로 하여 leak, rupture 및 catastrophic rupture에 대한 파괴모드와 한계상태를 정의하였다.

캐나다 AECL(Atomic Energy of Canada Limited)에서는 AECL PSA 그룹의 요청으로 Gentilly-2 원전 격납건물의 모든 관통부에 대한 내압성능을 평가한 바 있다. 이 결과에 의하면, 수 많은 관통부 중 오직 장비출납구, 격납건물 통로 등에 위치한 에어락(airlock)의 팽창성 밀봉재(inflatable seal)만이 격납건물 벽체의 초기 관통균열 발생 내압(0.331 MPa)보다 작은 내압성능(0.262MPa)을 가지는 것으로 보고되었다(AECL, 2007). 따라서 초기 관통균열의 발생 이전에 airlock을 통한 방사능 물질의 누설이 예측 가능함을 유추할 수 있다.

한편, 월성 원전의 확정론적 극한내압성능 평가를 위한 설계보고서(design report)에 의하면, CANDU형 원전 격납건물의 극한내압 상태를 초기 관통균열의 발생시점으로 정의하고 있다(CANATOM, 1995). 이는 PWR형 원전 격납건물이 강재 라이너에 의하여 추가적으로 내압에 저항하는 성능을 보유하고 있는데 반하여, CANDU형 격납건물의 경우 비금속성 라이너만이 설치되어, 격납건물 콘크리트 벽체의 균열이 직접적으로 방사능 물질의 급속한 누출로 이어질 가능성을 내포하고 있기 때문이라 할 수 있다.

CANDU형 원전에 대한 최종적인 파괴모드 평가 실험은 1975~1980년 기간에 AECB(Atomic Energy Control Board of Canada)와 University of Alberta에 의하여 공동으로 이루어진 1/12 축소모형 실험을 꼽을 수 있다. 이 실험 결과에서는 CANDU형 원전 격납건물의 최종적인 파괴도 PWR형 격납건물과 유사하게 원환방향 텐던의 파단에 의하여 발생하였음이 보고되었다(Murray 등, 1979; Murray, 1979).

이상의 CANDU형 원전 격납건물에 대한 해석적/실험적 연구 결과를 토대로 하여 파괴모드 및 한계상태를 도출하였다. Leak 파괴모드는 airlock의 inflatable seal을 통한 누출로 정의될 수 있으며, 한계상태는 실험 결과와 동일하게 내압하중 0.262MPa로 정의할 수 있다. Leak 파괴모드의 한계상태가 내압하중으로 주어짐에 따라 이에 대한 취약도 곡선 도출에는 격납건물의 비선형 유한요소해석이 불필요하게 된다. 따라서 이 연구에서는 leak 파괴모드에 대한 취약도 곡선 도출은 논외로 하기로 한다. Rupture 파괴모드는 극한내압성능 평가 결과를 토대로 하여 격납건물의 벽체에 관통균열이 발생하는 것으로 정의하였으며, 관통균열의 발생에 대한 한계상태는 벽체 외측 콘크리트의 인장 변형률로 정의하였다. 마지막으로 Catastrophic rupture 파괴모드는 텐던의 파단이 발생하는 것으로 정의하였으며, 한계상태는 해석 기법 상의 과대평가 가능성과 실험 결과 등을 반영하여 텐던 인장 강도의 90% 값으로 정의하였다(Petti 등, 2008; Dameron 등, 2000; Hessheimer 등, 2003).

5. 극한내압 취약도 평가기법 및 취약도 평가결과 분석

기존의 취약도 평가기법에서는 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 유한요소해석 수행(30회)
- ③ 응답 분포 산출
- ④ 내압 수준별 파괴확률 추정
- ⑤ 취약도 곡선 도출
- ⑥ 신뢰도 수준별 취약도 곡선 도출/HCLPF 산출

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

이제, 제안하는 취약도 평가기법을 적용하기 위하여, 먼저 격납건물의 극한내압해석을 수행하고, 격납건물의 응답 분석을 통하여 상대적으로 내압하중에 대하여 취약한 부위를 도출하였다. 극한내압해석 결과, 내압하중에 대하여 상대적으로 취약한 부위는 벽체 중단부, 임시출납구 상단부, 돔 중단부로 나타났다(그림 3). 그림 3에서 Location #1~5는 각각 벽체 중앙부, 임시출입구 상단부, 돔 상단부, 장비출입구 상단부, 사용후 핵연료 이송부를 나타낸다.

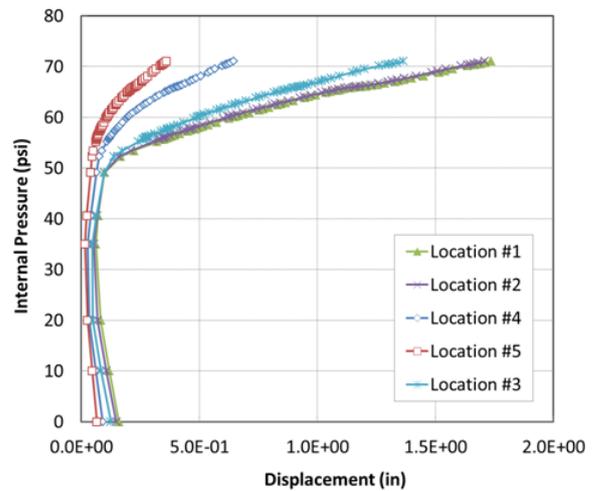


그림 3 격납건물 취약 예상 부위 응답 비교

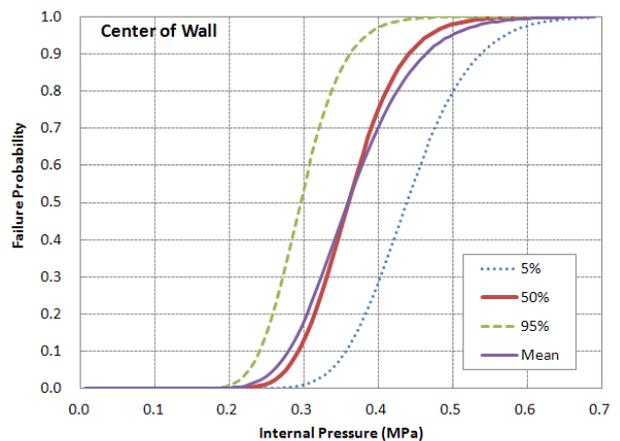


그림 4 벽체 중단부에서의 rupture 취약도 곡선

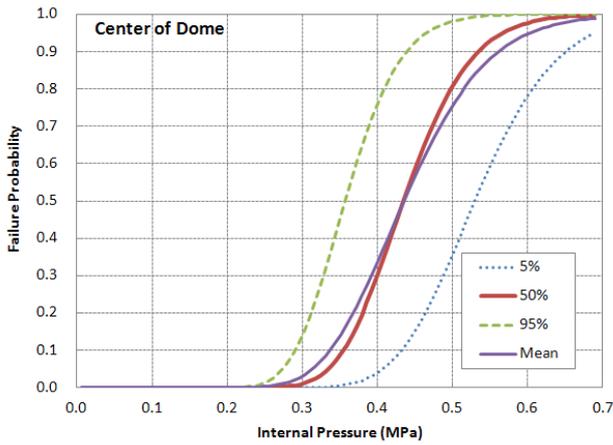


그림 5 돔 중앙부에서의 rupture 취약도 곡선

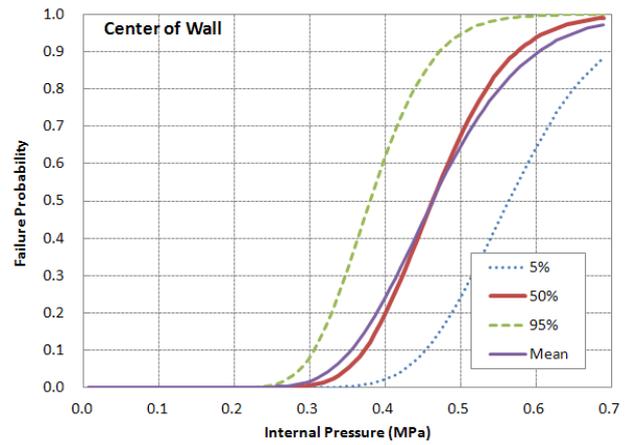


그림 8 벽체 중앙부에서의 catastrophic rupture 취약도 곡선

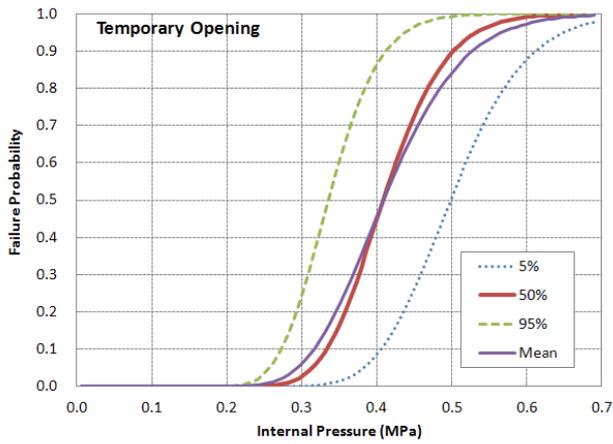


그림 6 임시출입구 상단부에서의 rupture 취약도 곡선

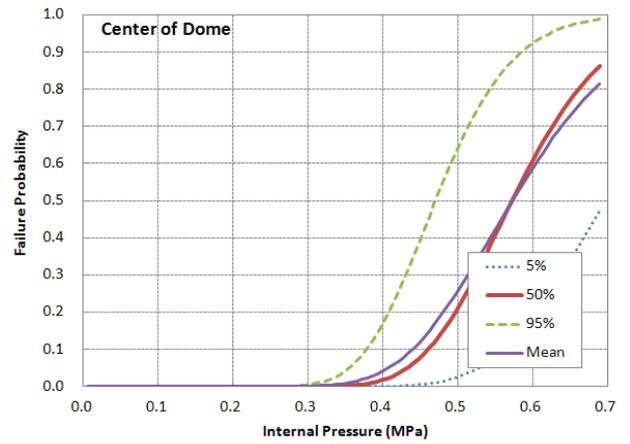


그림 9 돔 중앙부에서의 catastrophic rupture 취약도 곡선

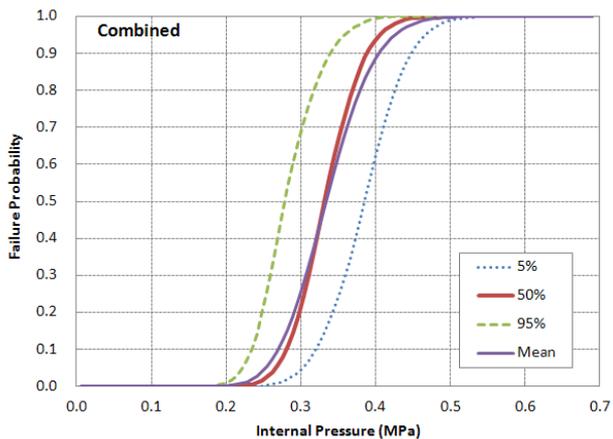


그림 7 신뢰도 수준별 rupture 중첩 취약도 곡선

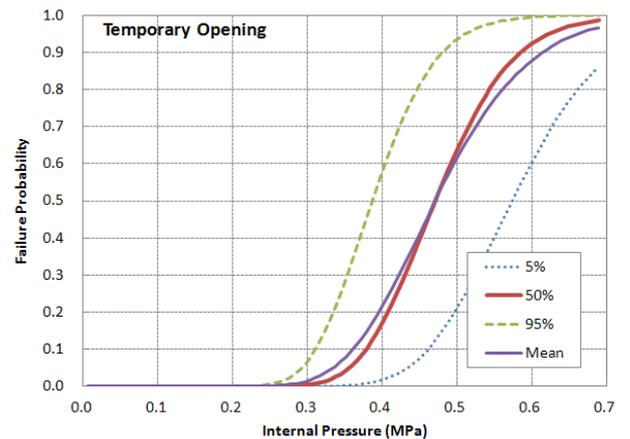


그림 10 임시출입구 상단부에서의 catastrophic rupture 취약도 곡선

이로부터 재료 및 텐던 불확실성 특성을 반영하여 30개의 입력 샘플을 생성하고, 각각에 대한 내압해석을 수행하여 응답 분포를 도출하고 각 내압수준 별 파괴확률을 추정함으로써 취약도 곡선을 도출하였다. 각 부위에서 콘크리트의 관통

균열이 발생하여 방사능 물질 누출이 발생할 사건(rupture)의 5%, 50%, 및 95% 취약도 곡선은 그림 4~6에 나타난 바와 같다. 그림에서 볼 때, 벽체 중단부가 가장 내압 하중에 대하여 취약한 성능을 가지는 것을 알 수 있으며, 중앙값은

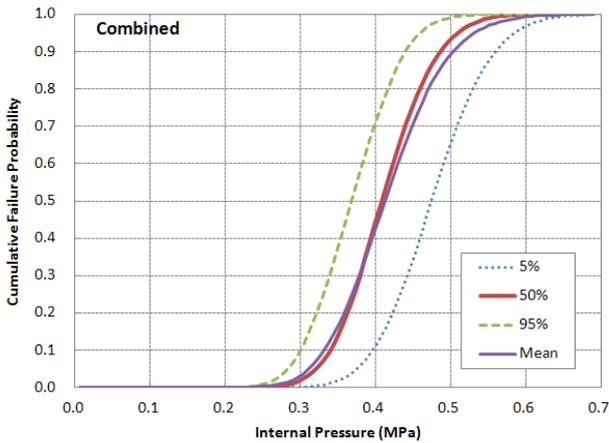


그림 11 신뢰도 수준 별 catastrophic rupture 중첩 취약도 곡선

약 0.359MPa 가량으로 나타났으며, 임시출입구 상단부가 0.409, 상부 돔 중앙부가 0.435MPa의 중앙값을 각각 가짐으로서, 순서대로 내압하중에 대하여 취약한 것으로 나타났다. 그림 7은 각각의 rupture 사건을 합집합으로 간주하여 각 취약도 곡선의 50% 곡선을 중첩(merge)함으로써 전체적인 격납건물 구조계의 rupture 사건에 대한 취약도 곡선을 신뢰도 수준에 따라 도출한 결과이다. 벽체 중단부가 가장 취약하므로 그림 4의 50% 신뢰도 곡선에 근사하게 전체적인 취약도 곡선이 형성되고 있음을 알 수 있다.

마지막으로, 각 부위에서 텐던의 파단이 발생하여 구조계의 최종적 파괴가 일어날 사건(catastrophic rupture)의 5%, 50%, 및 95% 취약도 곡선은 그림 8~10에 나타난 바와 같다. 그림에서 볼 때, 벽체 중단부가 가장 내압 하중에 대하여 취약한 성능을 가지는 것을 알 수 있으며, 중앙값은 약 0.463MPa 가량으로 나타났으며, 임시출입구 상단부도 0.471MPa의 중앙값을 가지는 것으로 나타나, 벽체 중단부 못지 않게 파괴의 가능성이 높은 것을 볼 수 있었다. 상부 돔 중앙부가 0.573MPa의 중앙값을 가짐으로서 내압하중에 대한 catastrophic rupture 파괴모드의 발생 가능성은 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 그림 11은 각각의 catastrophic rupture 사건을 합집합으로 간주하여 각 취약도 곡선의 50% 곡선을 중첩(merge)함으로써 전체적인 격납건물 구조계의 catastrophic rupture 사건에 대한 취약도 곡선을 신뢰도 수준별로 도출한 결과이다. 벽체 중단부 임시출입구 상단부가 가장 취약하여, 최종적인 취약도 곡선은 약 0.402 MPa의 중앙값을 가지며, 이 때의 고신뢰도저파괴확률값(HCLPF, High Confidence Low Failure Probability, 95% 신뢰도 5% 파괴확률)은 약 0.255MPa인 것으로 나타났다. 이는 해석 대상이 된 월성 1호기의 설계 내압성능 0.124MPa의 약 2배를 상회하는 값이다.

6. 결 론

CANDU형 원전 격납건물에 대하여 비선형 유한요소해석을 통하여 확률론적 취약도 평가를 수행할 수 있는 기법을 개발하고, 이를 적용하여 각 파괴모드 별, 신뢰도 수준 별 취약도 곡선을 도출하였다. 취약도 해석에는 개구부를 고려한 비선형 3차원 유한요소모델을 이용하였다. 파괴모드는 CANDU형 원전을 대상으로 하여 수행된 실험적/해석적 연구결과를 토대로 하여 leak, rupture 및 catastrophic rupture에 해당하는 파괴모드를 정의하였으며, 각각에 대한 한계상태도 정의하였다. 개발된 취약도 평가방법은 대형 구조계를 대상으로 하여 재료특성별 불확실성 모델을 반영할 수 있는 효율적인 취약도 평가기법이다. 파괴가 예측되는 격납건물의 다양한 취약부위에 대한 손상곡선을 도출하였으며, 각 위치 별 취약도 곡선을 중첩한 종합적인 취약도 곡선과 신뢰도 수준 별 취약도 곡선도 도출하였다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 원전기술 혁신사업으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김선훈 (2010) 원자로 격납건물의 3차원 구조해석 시스템, 한국전산구조공학회 논문집, 23(2), pp.235~243.
- 문일환, 안성문, 김태영 (2009) 원자로건물의 확률론적 극한 내압 평가, 대한토목학회 정기학술대회.
- 이홍표, 전영선 (2006) 철근콘크리트 격납건물의 비선형 해석을 위한 셸 유한요소, 한국전산구조공학회 논문집, 19(1), pp.93~103.
- 이홍표, 전영선, 이상진 (2007) 한국형 원전 격납건물의 비선형 해석에 관한 연구, 한국전산구조공학회 논문집, 20(3), pp.353~364.
- 한국수력원자력(주) 월성원자력본부 (2008) 월성원자력 1호기 25년차 원자로건물 포스트텐서닝계통 가동중검사 최종 보고서.
- AECL (2007) Assessment of the Pressure Capacity of Containment Penetrations and Airlock Seals. Rev. 0, 66RF-03612-ASD-002, Atomic Energy of Canada Limited, May.
- Belarbi, A., Hsu T.T.C. (1994) Constitutive Laws of Concrete in Tension and Reinforcing Bars Stiffened by Concrete, *ACI Structural Journal*, 91(4), pp.465~473.

- CANATOM** (1995) Reactor Building Containment Structure Ultimate Pressure Capacity, Design Report.
- Clauss, D.B., Horschel, D.S., Blejwas, T.E.** (1987) Insights into the Behavior of LWR Steel Containment Buildings During Severe Accidents. Nuclear Engineering and Design, 100, pp.189~204.
- Dameron, R.A., Zhang, L., Rashid, Y.R., Vargas, M.S.** (2000) Pretest Analysis of a 1:4-Scale Prestressed Concrete Containment Vessel Model, NUREG/CR-6685, SAND2000-2093, ANATECH Corporation, San Diego, CA and Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, October.
- Hessheimer, M.F., Klamerus, E.W., Rightley, G.S., Lambert, L.D., Dameron, R.A.** (2003) Overpressurization Test of a 1:4-Scale Prestressed Concrete Containment Vessel Model. NUREG/CR-6810, Sandia National Laboratories, Albuquerque NM. March.
- Khoury, G.A.** (1992) Compressive Strength of Concrete at High Temperatures: a Reassessment, Magazine of Concrete Research, 44(161), pp.291~309.
- Kulak, R.F., Hsieh, B.J., Ash, J.E., Kennedy, J.M., McLennan, G.A., Pan, Y.C.** (1985) Structural Response of Large Penetrations and Closures for Containment Vessels Subjected to Loadings Beyond Design Basis. NUREG/CR-4064(SAND84-7177).
- Maekawa, K., Pimanmas, A., Okamura, H.** (2003) Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, London, UK.
- Murray, D.W.** (1979) A Review of Explosive Characteristics of Prestressed Secondary Containments Near the Ultimate Load, Nuclear Engineering and Design.
- Murray, D.W., Chitnuyanondh L., Wong, C.** (1979) Modelling and Predicting Behavior of Prestressed Concrete Secondary Containment Structures Using BOSOR5. Transactions of the 5th SMiRT, Paper 5315, Berlin, August.
- Petti, J.P., Spencer, B.W., Graves, H.L.** (2008) Risk-Informed Assessment of Degraded Containment Vessels, Nuclear Engineering and Design, 238, pp.2038~2047.
- SIMULIA** (2008) ABAQUS/Standard 6.8-1 - User's Manual, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., RI, USA.
- 논문접수일 2010년 7월 13일
 - 논문심사일 2010년 7월 13일
 - 게재확정일 2010년 7월 23일