

# 구조재료 변수 상관관계를 고려한 격납건물의 내압취약도 평가

## Assessment of Internal Pressure Fragility of Containment Buildings considering the Correlation of Structural Material Variables

함 대 기\* · 김 정 한\*\* · 최 인 길\*\*\* · 이 홍 표\*\*\*\*

Hahm, Daegi · Kim, Jung Han · Choi, In-Kil · Lee, Hong-Pyo

### 요 약

격납건물의 내압취약도 평가를 위하여 격납건물 구조재료 변수 각각의 재료특성 시험 결과를 분석하여 현재상태 중앙값 및 변동계수 값을 추정하였다. 추정된 값은 최근의 가동중 검사 결과와 큰 차이를 보이지는 않는 것으로 나타났다. 또한 추출된 구조재료 변수들의 재조합을 통해 상관성을 배제시키는 방법을 적용함으로써, 변수 간의 상관성이 격납건물 취약도 평가에 미치는 영향을 기존의 방법과 대비하여 분석하였다. 본 예제의 경우에는 의도치 않은 변수간 상관성에 의해 2%가량 내압성능이 작게 평가되는 결과가 발생하는 것으로 나타났다. 일반적인 문제의 경우 구조재료 변수의 특성과 추출된 변수의 임의성에 의해 영향이 증폭될 수 있기 때문에, 보다 합리적인 내압취약도 평가를 위해서는 상관관계 영향을 고려하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

**keywords** : 격납건물, 불확실성, 확률변수 간 상관성, 내압취약도

### 1. 서 론

최근 일본에서 발생한 후쿠시마 원전 중대사고 사건에서 보듯이 원전 격납건물은 방사능 물질의 유출을 방지하는 최종 차폐막으로서의 역할을 담당하기 때문에, 극한 내압의 상태에서도 구조적 안전성을 유지할 수 있는가의 여부를 평가하는 것이 대단히 중요하다. 최근에는 구조적 안전성을 평가하는 데에 있어서 다양한 불확실성 요인들을 고려한 확률론적 안전성 평가의 수행이 요구되고 있다. 특히 월성 1호기 격납건물과 같이 사용 년수가 긴 구조물의 정확한 확률론적 안전성 평가가 위해서는 격납건물의 다양한 불확실성 인자들에 대한 분석을 통해 현재 상태에 대한 합리적인 평가가 선행되어야 한다. 따라서 이 연구에서는 격납건물에 있어서 내압 거동의 주요 지배인자임과 동시에 큰 불확실성을 내포하고 있는 텐던 긴장력과 콘크리트의 압축 강도 특성에 대하여 각각의 재료특성 시험 결과를 분석하여 현재상태의 중앙값과 변동계수 값을 추정하였다.

한편, 2개 이상의 불확실성 변수를 가지는 구조계의 확률론적 안전성 평가를 위한 수치모델을 추출(sampling)할 때에는 의도치 않은 상관성(unexpected correlation)의 효과로 인하여 왜곡된 결과값을 도출할 가능성이 있다. 즉, 서로 독립적인 두 개의 구조계의 강성을 표현하는 불확실성 변수는 그림 1에 나타난 바와 같이 원형에 가까운 결합확률밀도함수 분포를 가지는 것이 일반적이다. 그러나 불확실성 변수의 추출 개수가 적을 때에는 두 변수 간의 의도치 않은 양 또는 음의 상관성이 발생하여 왜곡된 결합확률밀도함수 형

\* 한국원자력연구원 선임연구원 [dhahm@kaeri.re.kr](mailto:dhahm@kaeri.re.kr)

\*\* 한국원자력연구원 고급전문인력 [jhankim@kaeri.re.kr](mailto:jhankim@kaeri.re.kr)

\*\*\* 한국원자력연구원 책임연구원 [cik@kaeri.re.kr](mailto:cik@kaeri.re.kr)

\*\*\*\* 한국전력공사 전력연구원 선임연구원 [hplee@kepri.re.kr](mailto:hplee@kepri.re.kr)

상을 가지게 될 가능성이 존재하게 된다. 이 때에는 그림에서 보듯이 응답의 확률밀도함수가 왜곡되게 됨에 따라 과과확률과 취약도 평가 결과에서 불합리한 결과가 도출될 가능성이 있다. 특히 추출 횟수가 적을수록 이러한 임의의 상관성이 발생하게 될 가능성이 더욱 높아지기 때문에, 보다 합리적인 안전성 평가를 위해서는 의도치 않은 상관성을 배제하는 과정이 필요하다고 할 수 있다. 이 연구에서는 추출된 설계인자들의 재배치(rearrange)를 통해 상관성이 배제된 추출 변수의 조합을 사용함으로써, 기존의 방법과 비교하여 변수 간의 상관성이 격납건물 취약도 평가에 미치는 영향을 분석하였다.

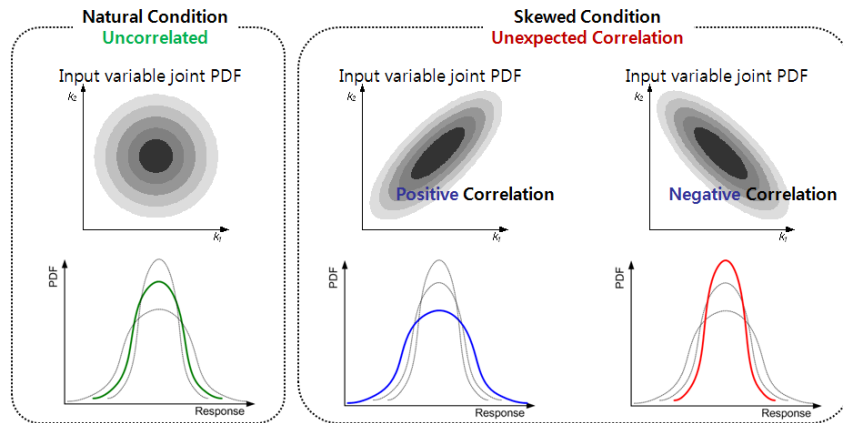


그림 1. 의도치 않은 상관성에 의한 응답 확률밀도함수의 왜곡 현상 개념도

## 2. 격납건물 구조재료 변수의 불확실성 특성 분석

격납건물의 내압거동을 모사하는 데에 있어서 중요한 구조재료 변수 중 하나는 콘크리트의 압축강도를 들 수 있다(함대기 등, 2010). 기존의 연구에서는 현재 상태에서의 콘크리트 압축강도를 추정하기 위하여 가장 최근에 이루어진 가동중 검사 자료 상의 코어 채취를 통한 직접압축강도 측정값을 사용한 바 있다(KAERI, 2010). 이 방법은 월성 1호기 원전과 같이 원전 격납건물과 동시에 타설된 콘크리트 시편을 얻기가 극히 어려운 상황에서 가장 합리적인 대안이라고 할 수 있으나, 채취된 시편의 개수가 매우 적기 때문에(3개) 중앙값과 변동계수 값을 이로부터 직접적으로 유추하는 데에는 약간의 어려움이 있는 것도 사실이다. 따라서 이 연구에서는 월성 1호기와 같은 비율의 초기긴장력이 도입된 콘크리트 빔 시편에 대하여 25회의 슈미트해머(Schmidt hammer) 시험을 실시하고, 이 자료로부터 일본 건축학회에서 제안된 식을 이용하여 압축강도의 중앙값과 변동계수 값을 도출하였다. 그 결과 중앙값은  $384.7\text{kgf/cm}^2$ , 변동계수 값은 0.033으로 나타났다. 이는 설계기준강도  $356.6\text{kgf/cm}^2$ 에 비하여 약 20% 가량 큰 값이다. 변동계수 값에서는 기존 코어채취에 의한 결과가 0.165인데 비추어 현저히 작은 값을 보이는 것으로 나타났는데(표 1), 이는 금번의 슈미트해머 시험 기법이 보다 균질한 시편을 대상으로 하여 다수의 시험이 수행됨으로 인해 발생한 결과인 것으로 판단된다.

한편, 격납건물의 내압 거동은 주로 인장거동을 보이기 때문에 텐던의 프리스트레싱력(prestressing force) 또한 격납건물의 주요 구조재료 변수로 꼽을 수 있다(함대기 등, 2010). 기존 연구에서는 현재상태의 텐던 긴장력 값을 얻기 위하여 최근의 가동중 검사 결과 값을 이용하였으나, 최근의 분석 결과에서는 20년 이상의 시간이 경과된 격납건물의 경우에는, 시간 축을 로그축으로 한 그래프에서 5년 이후의 긴장력 측정치들을 선형 회귀분석함으로써 현재 및 미래 상태의 긴장력 값을 유추하는 것이 바람직한 것으로 보고되었다(Anderson, 2005). 따라서 이 연구에서는 국내에서 부착식 텐던이 사용된 모든 격납건물의 가동중 검사 결과를 이용하여 현재 상태에서의 텐던 긴장력 중앙값을 도출하였다. 그 결과는 그림 2에 나타난 바와 같이 초기 긴장력 대비 현재 상태 긴장력 비 0.809, 대수정규 변동계수( $\beta$ ) 값은 0.025이다.

표 1. 콘크리트 압축강도 시험 결과

시험 방법	$A_m$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\beta$
코어 채취	371.0	0.165
가동중 검사 (Schmidt Hammer)	534.0	0.090
콘크리트 빔 시험 (Schmidt Hammer)	384.7	0.033

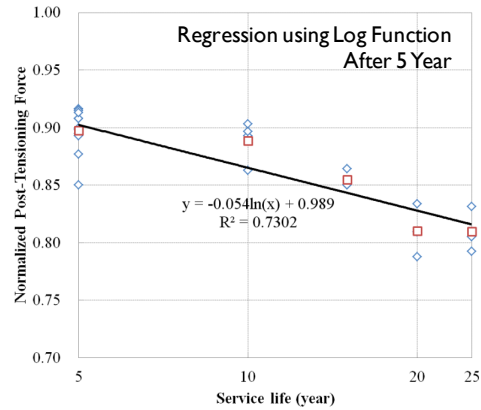


그림 2. 현재 상태의 텐던 긴장력 회귀분석 결과 그래프

### 3. 구조재료 변수의 추출 및 상관성 분석

앞서 기술한 바와 같이 두 구조재료 변수, 즉 콘크리트 압축강도와 텐던의 긴장력을 각각의 확률분포 특성을 이용하여 추출한 결과는 그림 3과 같다. 두 변수 모두 목표하려는 대수정규분포 형상을 잘 따르고 있음을 알 수 있다. 그러나 실제 내압취약도 평가를 위한 수치해석을 위해서는 두 변수의 조합이 필요하게 되는데, 여기서는 상관성을 고려하지 않은 임의 상태의 경우와 두 변수의 재조합을 통해 의도치 않은 상관성을 배제한 두 가지의 경우를 비교하도록 한다. 그림 4(a) 및 (b)는 각각의 경우에 대한 결합확률밀도함수를 평면상에 도시한 결과이다. 그림 1에서 보인 결합확률밀도함수의 왜곡현상이 그림 4(a)에서 약하게 발생하여 양의 기울기 측으로 추출된 변수가 집중되는 것(밝은 색)을 볼 수 있으며, 이러한 현상이 그림 4(b)에서는 해소되어 중앙부를 중심으로 전반적으로 고르게 분포하게 된 것을 알 수 있다. 결과적으로 이 차이는 극한내압 취약도 평가에 영향을 미치게 될 것으로 유추해볼 수 있다.

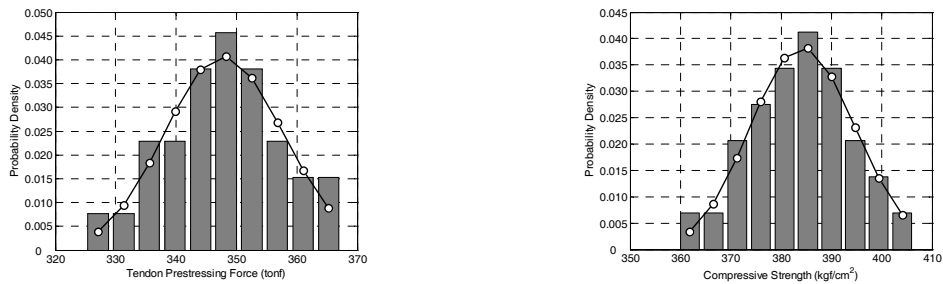
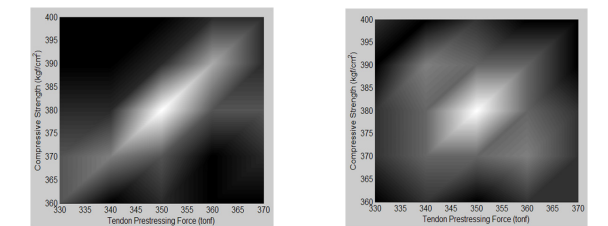


그림 3. 추출된 각 구조재료 변수의 확률밀도함수



(a) 상관성 고려 않은 경우 (b) 상관성 영향 배제 경우  
그림 4. 추출된 구조재료 변수 조합의 결합확률밀도

#### 4. 극한내압 취약도 평가결과 분석

극한내압 해석 모델 및 취약도 평가를 위한 방법론은 기존(함대기 등, 2010)의 수치해석을 통한 취약도 해석 기법과 동일한 모델 및 방법을 적용하였다. 해석 결과 내압 하중에 대하여 상대적으로 취약한 부위 중 하나인 벽체 중단부 부위에서 콘크리트의 균열이 발생하여 방사능 물질 누출이 발생할 사건(leak)의 평균(mean) 취약도 곡선은 그림 5와 같다. 그림에서 볼 때, 상관성을 고려하지 않은 경우(Original) 벽체 중단부에서의 내압성능 중앙값은 약 51.2psi 가량으로서 설계 내압에 비하여 약 3배 큰 값을 보였다. 상관성을 고려하여 그 영향을 제거한 경우(Rearranged)에는 내압성능 중앙값이 약 52.3psi로 약 2% 가량, HCLPF값이 33.5psi로 약 7%가량 각각 증가하는 것으로 나타났다(표 2).

표 2. 구조재료 변수 간 상관성 고려 여부에 따른 내압취약도 중앙값 및 HCLPF

평가 방법	중앙값 (psi)	HCLPF (psi)
상관성 영향 미고려 (Original)	51.2	31.1
상관성 효과 배제 (Rearranged)	52.3	33.5

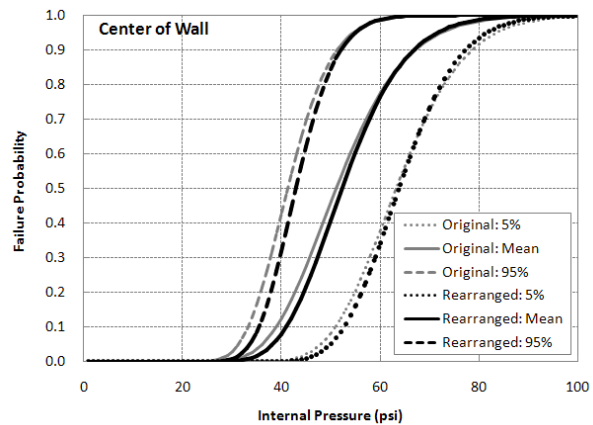


그림 5. 구조재료 변수 간 상관성 고려 여부에 따른 격납건물의 내압취약도 평가 결과

#### 5. 결론

이 연구에서는 보다 합리적인 격납건물 내압취약도 평가를 위하여 텐던 긴장력과 콘크리트 압축강도 각각의 불확실성 특성을 분석하여 현재상태의 중앙값과 변동계수 값을 도출하였다. 도출된 값은 최근의 가동중 검사 결과와 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 추출된 구조재료 변수들의 재배치를 통해 상관성이 배제된 추출 변수의 조합을 사용함으로써, 기존의 방법과 비교하여 변수 간 상관성이 내압취약도 평가에 미치는 영향을 분석하였다. 본 예제의 경우, 의도치 않은 상관성에 의해 내압성능 중앙값과 HCLPF값이 각각 2%, 7% 가량 과소평가되는 것으로 나타났다. 일반적인 문제의 경우 구조 변수의 특성과 추출의 임의성에 의해 영향이 증가할 수 있기 때문에, 보다 개선된 취약도 평가를 위해서는 이러한 영향을 고려하는 것이 바람직할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 지식경제부의 원전기술 혁신사업으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- KAERI (2010) 부착식 텐던 격납건물의 확률론적 내압성능 평가, KAERI/TR-4197/2010, 한국원자력연구원
- 함대기, 최인길, 이홍표 (2010) 비선형 유한요소 해석을 이용한 CANDU형 격납건물의 내압취약도 평가, 한국전산구조공학회 논문집, 23, pp.445-452..
- P.Anderson (2005) Thirty years of Measured Prestress at Swedish Nuclear Reactor Containments, *Nuclear Engineering and Design*, 235, pp.2323-2336.