

# 재료의 경년상태를 고려한 PSC격납건물의 극한내압능력 평가

## Evaluation of Ultimate Pressure Capacity of Prestressed Concrete Containment Building Considering Aging of Materials

이 상 근\*      송 영 철\*\*      권 용 길\*\*\*      한 상 훈\*\*\*\*  
Lee, Sang Kuen      Song, Young Chui      Kwon, Yong Gil      Han, Sang Hoon

### ABSTRACT

The purpose of this study is to predict long-term structural safety on the Yonggwang Unit 3 prestressed concrete containment building. The aging-related degradations of its main structural materials are investigated and the effects of the property variation of time-dependent materials on the structural behavior of containment building are also assessed through the analysis on the ultimate pressure capacity. The nonlinear finite element analyses for both the design criteria condition and the present aging condition are conducted to assess the present structural capacity of the containment building. As a result, it is verified that the structural capacity of the Yonggwang Unit 3 containment building under the present aging condition is judged to be still rugged. In addition, the sensitivity of the ultimate pressure capacity of containment building according to the degradation levels of the structural materials are assessed. Finally, it is showed that the sensitivity levels are in the order of the tendon, rebar and concrete in case of individual material degradations, and the tendon-rebar, tendon-concrete and rebar-concrete in case of coupled material degradations.

### 1. 서 론

격납건물은 원자력 발전소의 가장 중심이 되는 건물로서 방사능 누설을 방지하고 생물학적 방호기능을 담당하는 원자력 발전소의 안전을 위한 중요한 구조물이다. 가압경수로형 격납건물은 건설재료와 구조적 보강방법에 따라 강재 격납건물, 철근 콘크리트 격납건물 및 프리스트레스 콘크리트 격납건물로 분류할 수 있으며 국내의 경우 프리스트레스 콘크리트 격납건물이 주종을 이루고 있다. 일반적으로

\* 정회원, 한전 전력연구원 원자력 연구실 선임연구원

\*\* 정회원, 한전 전력연구원 원자력 연구실 책임연구원

\*\*\* 충북대학교 토목공학과 대학원 석사과정

\*\*\*\* 정회원, 충북대학교 토목공학과 교수

원자력발전소의 프리스트레스 콘크리트 격납건물은 엄격한 시공관리 및 품질관리에 의해 시공됨으로 구조물의 완성 단계에서는 콘크리트를 비롯한 구성 구조재료의 품질을 확보할 수 있다. 그러나, 콘크리트 구조물은 재료자체의 건조수축이나 주변 환경변화 등에 의해 미세균열의 발생과 이로 인한 외기 및 수분의 침입 등과 같은 극히 자연적인 열화요인에 의해서도 사용기간이 경과함에 따라 열화현상이 발생할 수 있으며, 철근의 부식과 텐돈의 프리스트레스 손실 등 경년열화현상은 프리스트레스 콘크리트 구조물에서 피할 수 없는 자연현상으로 받아들여지고 있다. 따라서, 체계적으로 확립된 유지관리 절차에 따라 구조물에 대한 점검을 주기적으로 실시하고 점검결과로부터 열화도 작성과 함께 열화요인을 분석하고 이에 상응하는 적절한 조치를 취하고 있다. 동시에 현재의 열화현상이 구조물의 구조적 성능저하를 유발시킬 수 있는 가능성을 배제할 수 없기 때문에 사전에 조사 분석된 열화자료를 바탕으로 구조영향평가를 통한 구조적 성능점검이 수반되어야 할 것이다. 특별히 격납구조물은 기동 중 발생할 수 있는 여러 가지 사고 중에서 냉각재 상실사고(LOCA)나 주중기관 파단사고(MSLB)와 같은 중대 재해 발생시 격납구조물의 열화가 격납구조 기능상실에 직접적인 영향을 주어서는 안될 것이다.

따라서, 본 연구는 기동 중에 있는 국내 원자력 발전소의 영광 3호기 PSC격납건물을 대상으로 사용년수가 증가함에 따라 발생가능한 경년열화현상을 조사하고, 구조재료의 시간 종속성 특성을 고려하여 극한내압해석을 수행함으로써 영광3호기 격납건물이 보유한 현재 상태의 극한내압능력을 설계기준 상태와 비교 평가하였다. 또한 PSC격납건물을 구성하고 있는 주요 구조재 즉, 콘크리트, 철근, 텐돈에 대한 개별 및 복합열화 현상이 PSC격납건물의 구조적 건전성에 어느 정도의 영향을 미치는지 극한내압 해석을 통해 민감도를 분석하였다.

## 2. 격납건물 구조재의 경년상태 평가

### 2.1 외관 및 정밀검사

기동중인 국내 원전 영광3호기 PSC콘크리트 격납건물을 대상으로 사용년수가 증가함에 따라 구조재료의 시간 의존적 특성변화를 고려한 구조성능평가를 위해 준공 후 약 5년이 경과된 현 시점에서 격납건물을 구성하고 있는 구조재료의 경년상태를 파악코자 본 연구는 격납건물 및 주변에 놓여있는 안전성관련 구조물들에 대한 경년열화현상을 조사하였다. 경년열화현상 조사는 현장조사와 정밀검사를 통해 이루어졌다. 현장조사 결과, 격납건물 외부벽체 및 돔의 콘크리트 표면부에는 ASME<sup>1)</sup>에서 정하는 허용균열폭(0.25mm) 이하의 미세 균열이 간헐적으로 관찰되었으나 이는 초기 수화열 및 건조수축에 의한 재료적인 균열로 격납건물의 매시브한 구조적 특성상 영향을 미칠 수 없는 정도에 지나지 않으므로 격납건물의 구조해석에 고려하지 않았다. 정밀검사 수행시 콘크리트 비파괴강도, 텐돈의 프리스트레스 손실 이외의 측정항목, 즉 코아 채취 등의 미소한 국부적 손상을 가해야 하는 항목에 대해서는 격납건물의 특성상 그리고 안전성 유지 측면에서 가능한한 손상을 가하지 않기 위해 격납건물과 같은 환경하에 놓여있는 주변 안전성 관련 구조물을 대상으로 실시하였으며 이들의 결과를 바탕으로 영광3호기 격납건물을 구성하고 있는 구조재료의 현 경년상태를 다음과 같이 평가하였다.

### 2.2 구조재의 경년상태 평가

#### 2.2.1 콘크리트

영광3호기 PSC격납건물 벽체 및 돔의 콘크리트 설계기준강도는 재령 91일을 기준으로  $385\text{kgf/cm}^2$

(5500psi) 이다. 그러나 5년이 경과된 현 시점에서 비파괴 강도는  $535\text{kgf/cm}^2$ 로 측정되어 설계기준강도보다 약 40% 큰 압축강도 값을 나타내었다. 격납건물에 대한 현 시점에서의 탄성계수는 ACI-349에 제시된 압축강도로부터의 탄성계수 산정식을 이용하여 추정된  $3.494 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 의 값을 적용하였다.

### 2.2.2 철근

격납건물에 국부적인 손상을 가하지 않고 철근부식 상태를 정량적으로 측정하기는 현재의 비파괴 검사 기술로는 불가능하다. 따라서, 본 연구는 격납건물과 같은 환경하에 놓여 있는 주변 안전성 관련 구조물 즉, 보조건물, 핵연료취급건물, 기기냉각수건물, 1차 해수냉각수 취수구조물을 대상으로 채취된 시료의 정밀검사 및 성분분석을 통하여 콘크리트의 현 상태로부터 철근부식 가능성 여부를 간접적으로 판단하였다. 채취시료에 함유된 염화물량과 중성화깊이를 측정하였고, 성분분석을 위해 X-선 회절 분석과 중량변화-시차열분석(TG-DTA, Thermo Gravimetric-Differential Thermal Analysis)이 수행되었다. 정밀검사 및 성분분석 결과 철근의 부식을 유발할만한 조건이 전혀 발견되지 않았으며, 따라서 현 경년상태에서 격납건물의 철근은 부식이 전혀 없는 건전한 상태를 유지하고 있는 것으로 판단하였다.

### 2.2.3 텐돈

텐돈의 대표적 경년열화 형태는 부식과 응력손실을 들 수 있다. 이중 부식의 가능성은 영광3호기 PSC격납건물의 포스트텐션닝시스템의 특성상 배제할 수 있기 때문에 응력손실만을 고려하였다. 현 경년상태에 있어서 영광3호기 PSC격납건물의 텐돈 응력손실량은 포스트텐션닝 시스템 5년차 가동중 점검 결과에서 얻은 응력손실량의 평균값을 사용하였다. 여기서, 11개 텐돈에 대해 실시한 5년차 유효인장력 측정에서 초기 긴장력 상태에 비해 평균 7.77%의 응력이 손실되었음을 확인하였으며 본 연구는 이 값을 격납건물의 현 경년상태 구조해석에 적용하였다.

## 3. 설계기준 및 경년상태의 극한내압능력 평가

### 3.1 구조해석 모델

가동중인 국내 원전 영광3호기 PSC격납건물의 설계기준상태와 경년상태(5년)의 극한내압능력을 평가하기 위해 범용구조해석 프로그램인 ABAQUS<sup>3)</sup>를 이용하였다. PSC격납건물에 대한 유한요소모델은 그림1과 같이 1759개의 절점과 2051개의 축대칭 요소로 구성하였다. 벽체, 돔 그리고 바닥슬래브에 설치된 라이너는 2절점 축대칭 쉘요소(SAX1)를 사용하였고, 벽체, 돔과 바닥슬래브 콘크리트는 4절점 고체요소(CAX4R)를 사용하였으며, 자오선 방향의 라이너 앵커는 빔요소(B21)를 사용하였다. 격납건물의 모든 철근과 텐돈은 등방성 rebar요소로 모델링하였으며, 도입된 프리스트레스력은 외부하중으로 환산하여 작용시켰다.

콘크리트의 비선형성은 인장강도와 압축강도가 서로 다르면서 압력에 의한 항복기준의 모사가 가능하고 소성흐름 potential을 갖는 Menetrey-Willam모델<sup>4)</sup>을 이용하였다. 라이너와 철근 및 텐돈의 경우 공히 Von-Mises 항복기준을 사용하였다.

### 3.2 구조해석 결과 비교

영광3호기 격납건물의 설계기준상태와 현 경년상태의 극한내압능력 평가를 위한 대표 입력자료를 표 1에 제시하였다. 구조해석 결과, 벽체 중간부위에서 콘크리트의 최초 관통균열은 설계기준상태에서는 69.159psig 현 경년상태에서는 71.0psig에서 발생하였다. 이것은 현 경년상태의 콘크리트 강도가 설계상태에 비해 40% 큰 값을 나타내는 것에 기인한다. 그러나 텐돈의 항복시점은 설계기준상태의 극한내압이 167.2psig, 현 경년상태의 극한 내압이 166.0psig로 약 1.2psig정도 감소한 것으로 나타났으며, 그 원인은 텐돈의 프리스트레스력 손실에 있다. 극한내압해석 결과를 그림 2와 3에 제시하였으며, 그림에서 알 수 있듯이 격납건물의 현 경년상태의 극한내압능력은 설계기준상태와 비교할 때 설계기준상태와 거의 동일한 정도의 매우 양호한 상태임을 알 수 있다. 단, 본 연구의 결과는 중대사고시의 내압만을 고려한 것이고, 현 경년상태의 입력자료 역시 간접적인 방법에 의해 산출한 것이기 때문에 영광3호기 격납건물의 실제 구조성능과는 다소간 차이가 있을 수 있다.

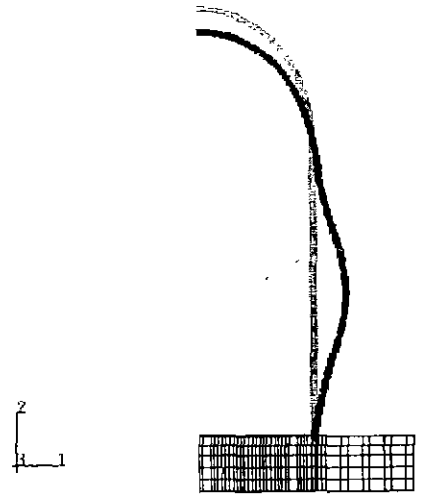


그림 1. PSC격납건물 2차원 축대칭 유한요소 모델 및 변형형상

표 1. 설계기준상태와 현 경년상태의 대표 입력자료

조건		설계기준상태 (kgf/cm <sup>2</sup> )	현 경년상태(5년) (kgf/cm <sup>2</sup> )	재료 경년상태 적용 근거
콘크리트	$f'_c$	385 (5,500psig)	535 (7600psi)	콘크리트 비파괴 강도 적용
	$E_c$	$2.972 \times 10^9$	$3.494 \times 10^9$	ACI-349 : $E_c = 57,000 \sqrt{f'_c}$ (psig)
철근	$f_y$	4,200	좌 동	염화물 측정, 중성화 깊이, 성분분석 결과 현 시점에서 철근 부식은 없는 것으로 결정
	$E_s$	$2.04 \times 10^9$		
텐돈 프리스트레스력		유효프리스트레스력	평균 7.77% 저하	“영광3호기 격납건물 포스트 텐서닝시스템 5년차 가동중 점검(1999)” 결과 적용
구조해석시 적용하중		$1.0D + 1.0F + 1.0P_a$	좌 동	$D$ : 격납건물 자중 $F$ : 프리스트레스력 $P_a$ : 중대사고시 내압

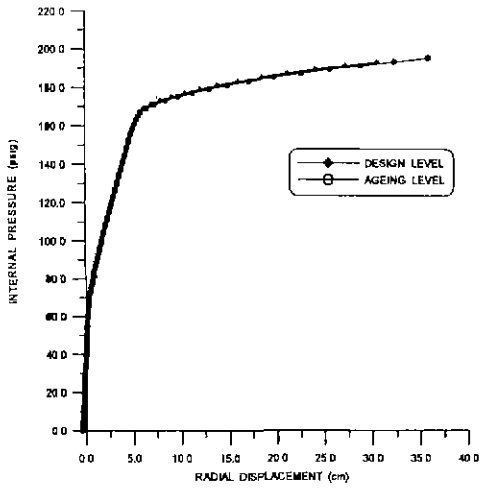


그림 2. 내압-반경방향변위 관계 그래프

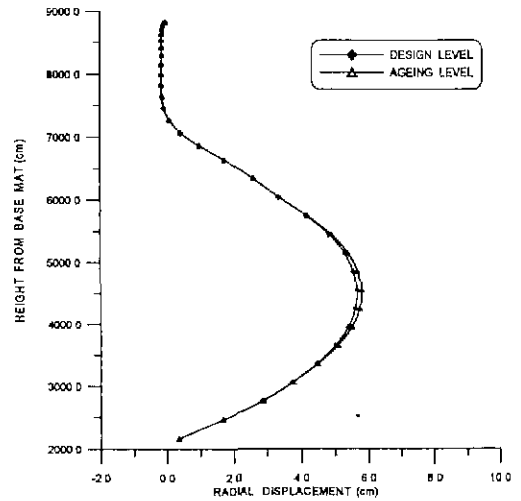


그림 3. 높이에 따른 반경방향 변위 그래프

#### 4. 열화를 고려한 PSC격납건물 구조성능 민감도 분석

##### 4.1 재료별 열화정도에 따른 민감도 분석

PSC격납건물의 주요 구조재인 콘크리트, 철근, 텐돈의 열화가 격납건물의 구조성능에 미치는 영향을 평가하기 위해 재료별 열화정도를 0%, 10%, 20%로 변화시키면서 극한 내압해석을 수행하였다. 열화는 재료의 강성저하만을 고려하였으며, 열화 정도가 증가함에 따라 미치는 영향력은 텐돈 열화, 철근 열화, 콘크리트 열화순으로 나타났다.

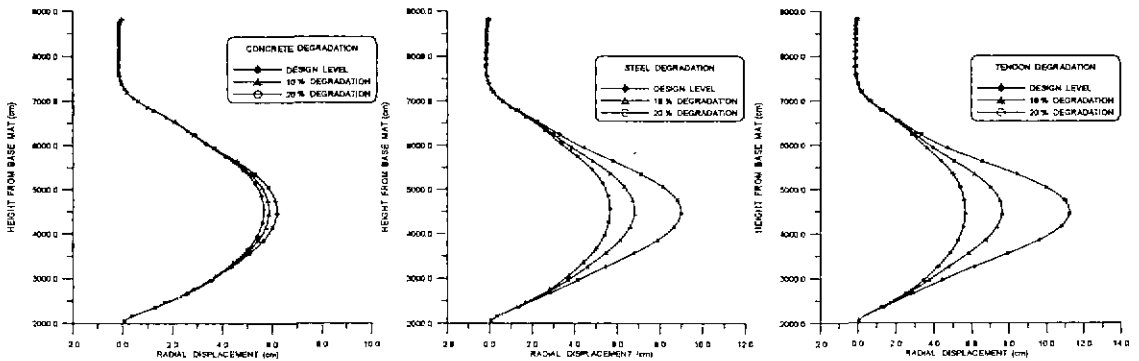


그림 4. 재료별 열화정도에 따른 반경방향변위 그래프 ( $P_a=167.16\text{psig}$ )

##### 4.2 재료간 열화조합에 따른 민감도 분석

격납건물의 주요 구조재료중 임의 두가지 재료의 열화가 조합되었을 때 격납건물에 미치는 구조

적 영향과 재료간의 서로 다른 열화정도와 열화정도의 변화에 따라 나타나는 구조성능 저하상태를 분석하였다. 구조재료간 가능 열화 조합들에서 격납건물 극한내압능력의 저하에 영향을 미치는 우선 순위는 철근과 텐돈 열화조합, 콘크리트와 텐돈 열화조합, 콘크리트와 철근 열화 조합의 순으로 나타났다.

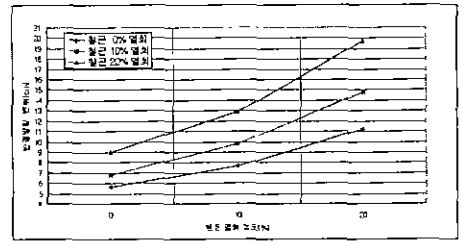


그림 5. 철근-텐돈 열화조합시 반경방향변위

## 5. 결 론

본 연구는 한국형 표준원전의 시초인 영광3호기 PSC격납건물을 대상으로 현 경년상태에 있어서 시간 의존적 재료 특성을 고려한 구조성능평가를 수행하였으며, 추가적으로 재료별 열화와 재료간 열화조합이 격납건물에 미치는 영향을 민감도 분석을 통하여 수행하였다. 영광3호기 PSC격납건물은 가동 후 5년이 경과된 현 경년상태에서 극한내압능력이 설계기준조건하의 극한내압능력과 거의 동일한 정도의 결과를 나타내어 구조적으로 만족할 만한 안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 재료별 열화정도와 재료간 열화조합에 따른 구조성능 민감도 분석결과 격납건물의 구조성능에 영향을 미치는 재료별 열화의 우선순위는 텐돈, 철근, 콘크리트 순으로 나타났고, 재료간 열화조합의 경우 텐돈과 철근, 텐돈과 콘크리트, 철근과 콘크리트열화 조합 순으로 나타났다.

## 참 고 문 헌

1. ASME, "Section III : Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, Division 2 : Code for Concrete Reactor Vessels and Containments", 1995.
2. 한국전력공사, 영광원자력 3호기 원자로 격납건물 포스트텐서닝시스템 5년차 가동중점검, 1999.
3. Hibbit, H. D. et al., " ABAQUS User's Manual ", HKS, Inc., 1998.
4. Menetrey, Ph. and Willam, K. J.; Triaxial Failure Criterion for Concrete and Its Generalization, ACI Structural Journal, Vol. 92, No. 3, pp. 311-318, 1995.