

재료의 경년상태를 고려한 경수로형 격납건물의 극한내압능력 평가

Evaluation of Ultimate Pressure Capacity of Light Water Reactor Containment Considering Aging of Materials

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

Abstract

The prestressed concrete containment is one of the most important structures in nuclear power plants, which is required to prevent release of radioactive or hazardous effluents to the environment even in the case of a severe accident. Numerical analyses are carried out by using the ABAQUS finite element program to assess the ultimate pressure capacity of the Y prestressed concrete containment with light water reactor at design criteria condition and aging condition considering varied properties of time-dependant materials respectively. From the results, it is verified that the structural capacity of the Y prestressed concrete containment building under the present aging condition is still robust. In addition, the parameter studies for the reduction of the ultimate pressure capacity of containment building according to the degradation levels of the main structural materials are carried out. The results show that when the degradations of each materials are considered as individual and combined forms, the influence is large in the order of tendon, rebar and concrete degradation, and tendon-rebar, tendon-concrete and rebar-concrete degradation respectively.

keywords : Containment, Aging, Ultimate Pressure Capacity, ABAQUS, Parameter Studies

* 정회원, 한전전력연구원 원자력연구실 선임연구원

** 한전전력연구원 원자력연구실 책임연구원

*** 정회원, 충북대학교 토목공학과 교수

**** 충북대학교 토목공학과 대학원 석사과정

• 본 논문에 대한 토의를 2001년 6월 30일까지 학회도 보내 주시면 2001년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

격납건물은 원자력 발전소의 가장 중심이 되는 건물로서 방사능 누설을 방지하고 생물학적 방호기능을 담당하는 원자력 발전소의 안전을 위한 중요 구조물이다.

가압경수로형 격납건물은 건설재료와 구조적 보강방법에 따라 강제 격납건물, 철근 콘크리트 격납건물 및 프리스트레스 콘크리트(prestressed concrete, PSC) 격납건물로 분류할 수 있으며 국내의 경우 프리스트레스 콘크리트 격납건물이 주종을 이루고 있다.

격납구조물은 가동 중 발생 가능한 몇가지 가상 사고 시나리오 중에서 냉각재 상실사고(Loss of Coolant Accident, LOCA)나 수증기관 파단사고와 같은 중대 사고 발생시에도 방사능 누설 방지능력을 유지해야 하기 때문에 사용연수 증가에 따른 격납건물의 경년열화^{1, 2)}가 격납구조 기능상실에 직접적인 영향을 주어서는 안될 것이다. 따라서, 본 연구는 가동 중에 있는 국내 Y 원자력 발전소의 경수로형 PSC격납건물(이하 Y원전 PSC격납건물이라 칭함)을 대상으로 사용연수가 증가함에 따라 발생가능한 경년열화현상을 조사하고, 구조재료의 시간 종속적 특성을 고려하여 극한 내압해석을 수행함으로써 Y원전 격납건물이 보유한 경년상태(가동후 5년 경과시점)의 극한내압능력을 설계기준조건과 비교 평가하였다. 또한 PSC격납건물을 구성하고 있는 주요 구조재 즉, 콘크리트, 철근, 텐돈에 대한 기별 및 복합열화 현상이 PSC격납건물의 구조적 성능저하에 미치는 재료간 영향성을 정량적으로 평가하기 위해 열화에 따른 매개변수 연구를 수행하였다.

Y원전 PSC격납건물의 구조적 특성을 살펴보면 설계내압이 54psi이고 단면의 기하형상은 Fig. 1과 같고, 높이 147ft (44.8m), 내경 144ft (43.9m), 두께 4ft (1.2m)의 원통형 벽체와 반경 72ft (21.9m)와 두께 3ft-6inch (1.1m)의 반구형 돔으로 이루어진 프리스트레스 콘크리트 구조물로서 내면은 방사능 누설방지를 위하여 1/4inch의 스틸 라이너플레이트(steel liner plate)로 둘러싸여져 있다.

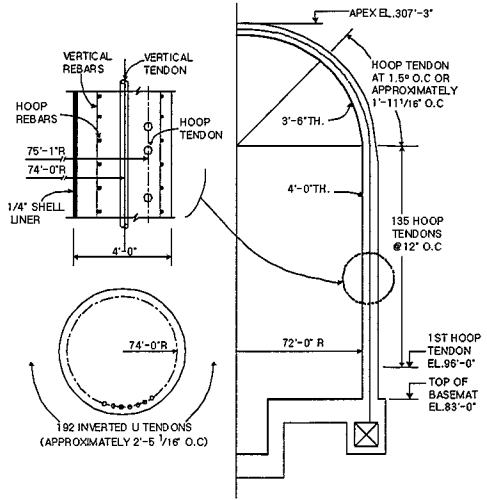


Fig. 1 Axisymmetry geometry of Y prestressed concrete containment

2. 격납건물 구조재의 경년상태 평가

2.1 외관 및 정밀검사

경년열화현상 조사는 현장조사와 정밀검사를 통해 이루어졌다. 현장조사 결과, 격납건물 외부벽체 및 돔의 콘크리트 표면부에는 극한내압능력 평가에 영향을 미칠 표면균열, 박리, 누수 등의 이상현상이 발견되지 않았다. 정밀검사 수행시 콘크리트 비파괴강도, 텐돈의 프리스트레스 손실 이외의 측정항목, 즉 코어 채취 등의 미소한 국부적 손상을 가해야 하는 항목에 대해서는 격납건물의 특성상 그리고 안전성 유지 측면에서 가능한 손상을 가하지 않기 위해 격납건물과 같은 환경하에 놓여있는 주변 안전성 관련 구조물을 대상으로 실시하였으며 이들의 결과를 바탕으로 Y원전 PSC격납건물을 구성하고 있는 구조재료의 현 경년상태를 정량적으로 평가하였다.

2.2 구조재의 경년상태 평가

2.2.1 콘크리트

Y원전 PSC격납건물 벽체 및 돔의 콘크리트 설계강

도는 재령 91일을 기준으로 5500psi(385kgf/cm²)이다. 그러나 5년이 경과된 현 시점에서 슈미트헤머를 이용한 비파괴 강도는 7600psi(535kgf/cm²)로 측정되어 설계강도보다 약 40%가 큰 압축강도를 나타내었다. 여기서, 경년상태의 탄성계수는 측정된 압축강도를 가지고 ACI-349³⁾의 계산식을 이용하였다.

$$E_c = 57,000\sqrt{f'_c} \text{ (psi)} \quad (1)$$

2.2.2 철근

경수로형 격납건물은 크게 역U자형 자오선방향 철근(meridional rebar)과 360°의 원환방향 철근(hoop rebar)이 복잡한 격자망을 이루면서 복철근 형태로 배치되어 있기 때문에 격납건물에 국부적인 손상을 가지지 않고 철근부식 상태를 정량적으로 측정하기는 현재의 비파괴검사 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 추정하였으며 분석 결과 철근의 부식을 유발할만한 조

건이 발견되지 않아 철근의 부식발생은 없는 것으로 판단하였다.

2.2.3 텐돈

Y원전 PSC격납건물의 포스트텐서닝 시스템은 96개의 역U자형 수직텐돈과 중심각 240°인 수평텐돈이 각각 벽체에 135개, 돔(dome)에 30개씩 위치하고 있다. 이들 텐돈의 대표적 경년열화 형태는 부식과 유효프리스트레스 손실을 들 수 있다. Y원전 격납건물의 경우 텐돈과 덕트 사이에 그리스가 채워져 있는 비부착형으로 부식의 가능성을 배제할 수 있기 때문에 유효프리스트레스 손실만을 고려하였다. 현 경년상태에 있어서 Y원전 PSC격납건물의 텐돈 유효프리스트레스 손실량은 인의 11개 텐돈에 대한 평균값을 사용하였으며, 추정방법은 앵커헤드가 지지판으로부터 이격되는 순간, 또는 지지판이 베어링 판(bearing plate)으로부터 이격되는 순간의 재크립력을 측정하여 정착력으로 환산하는 lift-off 방식으로 현 단계의 정착력을 측정하고 최초 정착력과의 차를 유효프리스트레스 손실량으로 하였다. 측정 결과 Y원전 격납건물의 유효프리스트레스 손실량은 5년 경과 후 평균 7.77%가 저하된 것으로 나타났다. 이 값은 경년상태의 격납건물 구조성능평가에서 모든 텐돈에 대해 일정하게 반영하였다.

Table 1 Material properties at design and aging conditions

	Conditions	
	Design	Aging
<i>Concrete (wall & dome)</i>		
Compressive strength		
f'_c (psi)	5,500	7,600
Young's modulus E_c (ksi)	4.700E3	4.970E3
Poisson's ratio ν_c	0.17	0.17
<i>Reinforcement bar (rebar)</i>		
Yield stress f_y (ksi)	60	
Young's modulus E_s (ksi)	29,000	
Poisson's ratio ν_s	0.3	
<i>Tendon</i>		
Ultimate strength f_{tu} (ksi)	270	
Young's modulus E_t (ksi)	28,000	
Poisson's ratio ν_t	0.3	
<i>Liner plate</i>		
Yield stress f_s (ksi)	32	
Young's modulus E_p (ksi)	29,000	
Poisson's ratio ν_p	0.3	

3. 극한내압능력평가

3.1 격납건물 구조해석 모델링

가동중인 Y원전 PSC격납건물의 설계기준조건과 경년상태의 극한내압능력을 평가하기 위해 범용구조해석 프로그램인 ABAQUS⁴⁾를 이용하였다. PSC격납건물에 대한 유한요소모델은 Fig. 2와 같이 2000개의 절점과 1987개의 축대칭 요소로 이상화하였다. 벽체 및 돔 그리고 바닥슬래브 내면에 설치된 라이너는 2절점 축대칭 셸요소(SAX1)를 사용하였고, 벽체, 돔과 바닥 슬래브 콘크리트는 4절점 축대칭 고체요소(CAX4R)를 사용하였다. 격납건물의 모든 철근과 텐돈은 등방성 rebar요소로 모델링하였다.

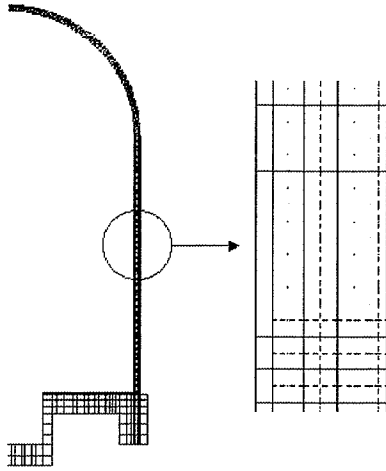


Fig. 2 Axisymmetric finite element model

3.2 구성방정식과 수학적 모델

3.2.1 콘크리트

콘크리트의 1축 압축 하에서의 콘크리트 비선형 거동은 상승부와 하강부의 거동이 대체로 잘 표현되고 있는 식(2)의 Saenz⁵⁾ 모델을 사용하였으며, 1축 인장 영역의 경우는 인장경화(tension stiffening) 모델을 사용하였다.

$$f_c = \frac{E_0 \epsilon}{1 + \left(\frac{E_0}{E_1} - 2 \right) \frac{\epsilon}{\epsilon_c} + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c} \right)^2} \quad (2)$$

여기서,

f_c : 일축 압축응력

E_0 : 초기 접선탄성계수 ($E_0 = 2 \frac{f'_c}{\epsilon_c}$)

E_1 : Secant 계수 ($E_1 = \frac{f'_c}{\epsilon_c}$)

f'_c : 최대압축강도

ϵ_c : f'_c 에서의 변형률 ($\epsilon_c = \frac{f'_c{}^{1/4}}{4000}$)

중대사고시 격납건물은 내압에 의해 막막(membrane) 거동을 하게 되고 이때의 파괴면을 정의하기 위한 콘크리트 2축 파괴기준은 Kupfer와 Gerstle(1973)⁶⁾ 이 그들의 시험결과를 기초로 개발한 2축 파괴기준의 수학적 모델을 적용하였다.

3.2.2 철근

일반적으로 순수 철근(bare bar)에 비해 콘크리트 속에 매립된 매립 철근(embed bar)의 인장거동은 약간 다르게 나타난다. 따라서 본 연구는 Hsu⁷⁾에 의해 순수 철근과 매립 철근의 응력-변형률 관계로부터 제시된 bilinear 형태의 응력-변형률 선도(Fig. 3의 점선)를 사용하였고, 항복기준은 식(3)의 Von-Mises 기준을 사용하였다.

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_y) = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} - \sigma_1 \sigma_2 - \sigma_y = 0 \quad (3)$$

여기서, σ_1, σ_2 는 1축 방향과 2축 방향의 주응력 이고 σ_y 는 항복응력이다.

3.2.3 텐돈

텐돈의 응력-변형률 관계는 Ramberg-Osgood 보틀⁷⁾을 사용하였다. Ramberg-Osgood 모델은 Fig. 4와 같이 $0.7 f_{pu}$ 를 기점으로 직선 구간과 비선형 구간으로 나누어 bilinear 형태로 정의하였다.

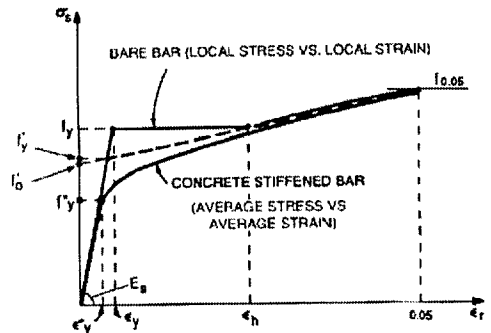


Fig. 3 Embed bar model

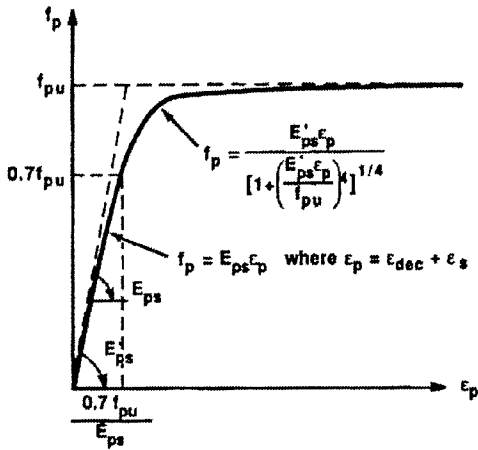


Fig. 4 Stress-strain relationship of prestressing strands embedded in concrete

여기서, f_{pu} 는 텐돈의 극한강도이고, f_p 는 텐돈의 응력, E'_{ps} 는 Ramberg-Osgood 곡선에서 영(zero) 응력일 때의 접선탄성계수, 그리고 ϵ_p 는 철근의 변형률(ϵ_s)과 콘크리트 갑압(decompression)시 텐돈 변형률($\epsilon_{dec} \approx 0.005$)과의 합이다.

3.3 극한내압해석

통상 PSC 원자로 격납건물의 극한내압능력은 내부 압력에 의해 텐돈 1% 변형률이 발생하는 내압의 크기로 표현한다. 본 연구는 가동중인 PSC 원자로 격납건물을 대상으로 앞에서 제시한 재료모델을 사용하여 중대사고시 발생할 수 있는 내부 온도와 압력상승 중 상대적으로 그 영향이 미소한 온도 영향은 배제하고 순수 내압만을 고려하여 비선형 유한요소해석을 수행함으로써 대상 격납건물의 설계조건시와 경년상태시의 극한내압능력을 평가하였다.

해석에 적용된 하중은 식(4)와 같다. 여기서 프리스트레스력은 참고문헌³⁾에 기초하여 외부하중으로 환산하여 적용시켰다.

$$1.0D + 1.0F + 1.0P_a \quad (4)$$

여기서, D 는 격납건물 자중인 고정하중이고, F 는 텐돈에 의한 프리스트레스력이며, P_a 는 내부압력이다.

3.4 해석결과

Y원전 PSC 원자로 격납건물을 대상으로 설계조건과 현재 가동중이며 5년이 경과된 시점 즉 재료 성질의 경년변화를 고려한 경년상태의 구조성능평가가 비선형 극한내압해석을 통해 이루어졌다. Table 2에 해석결과를 제시하였으며, 여기서 알 수 있듯이 Y원전 격납건물에 대한 경년상태의 극한내압능력은 텐돈의 1% 변형률 발생시점을 기준으로 할 때 설계조건에 비해 불과 1psi (0.6%) 정도 작게 나타났다. 이는 텐돈의 응력손실로 인한 프리스트레스력 저하가 주된 원인이라고 볼 수 있다. 반면에 콘크리트의 광통균열 발생 내압은 벽체 중앙 부위에서 8 psi (7.6%) 정도 증가한 것으로 나타났는데 그 원인은 Y원전 격납건물의 5년 경과시점에서의 콘크리트 강도가 설계기준강도에 비해 상당히 큰 값을 나타냈기 때문이다. 결과적으로 가동중인 Y원전 격납건물의 5년이 경과된 경년상태의 구조성능은 설계조건과 비교할 때 사용성 측면에선 보다 우위에 있고 소성영역의 거동측면에선 미소한 차이만을 보이고 있어 전체적으로 매우 양호한 상태임을 확인하였다.

Table 2 Summary of nonlinear finite element analysis results (D : Design condition, A : Aging condition, E : Elastic)

Materials	Wall-Basemat Junction		Mid-Height Wall		Dome	
	D	A	D	A	D	A
Concrete Cracks	110.2	130.4	104.2	112.2	119.2	138.4
Liner Yielding	162.1	163.4	120.2	126.4	E	E
Outer Rebar Yielding	E	E	147.2	146.2	E	E
Inner-Rebar Yielding	E	E	146.2	145.2	E	E
Tendon Yielding	E	E	159.2	158.2	E	E

(unit : psi)

전반적인 거동양상을 살펴볼 때 중대사고시 발생하는 내압의 증가에 의해 제일 먼저 벽체 중앙 부위에서 콘크리트 관통균열이 발생하고 이어 벽체와 기초의 연결부에서 그리고 돔의 순으로 발생하며, 방사능 누설 방지역할을 담당하는 라이너의 항복 역시 벽체 중앙 부위에서 최초로 발생하고 다음으로 벽체와 기초 연결부로 이어지게 됨을 알 수 있다. 이때 돔 부분의 라이너는 텐돈 항복시 까지 탄성한도 내에 머물게 되는데 이는 콘크리트 균열 이후 변위가 벽체 중앙 부위에 집중되기 때문이다.

라이너는 항복 이후에도 텐돈 항복시 까지 충분한 연성구간을 가지게 되므로 텐돈 항복 이후 찢어짐이 발생할 때까지 방사능 누설방지 기능을 담당하게 된다.

Table 3 Combination of material degradations

Materials	Notation	Degradation (%)		
		Concrete (C)	Rebar (S)	Tendon (T)
Concrete & Rebar	COSOT0*	0	0	0
	COS5T0		5	
	COS10T0		10	
	C5SOT0	5	0	0
	C5S5T0		5	
	C5S10T0		10	
	C1OSOT0	10	0	0
	C1OS5T0		5	
C1OS10T0	10			
Concrete & Tendon	COSOT5	0	0	5
	COSOT10			10
	C5SOT0	5	0	0
	C5SOT5			5
	C5SOT10			10
	C1OSOT0	10	0	0
	C1OSOT5			5
	C1OSOT10			10
Rebar & Tendon	COSOT5	0	0	5
	COSOT10			10
	COS5T0	0	5	0
	COS5T5			5
	COS5T10			10
	COS10T0	0	10	0
	COS10T5			5
	COS10T10			10

* Design condition

다. 철근의 경우 외측철근이 내측철근 보다 앞서 항복하는 양상을 보였고 벽체 중앙부를 제외한 다른 부위에서는 탄성한도 내에 머무는 것으로 나타났다. 이러한 거동양상으로부터 경수로형 Y원전 격납건물의 중대사고시 내압 증가에 따른 구조적 취약부위는 벽체 중앙부가 뒀을 단적으로 유추할 수 있다. 따라서 구조 성능 유지 차원에서 격납건물의 벽체 중앙부는 다른 어느 부위보다 중요시 해야할 유지관리 대상이라 할 수 있다.

4. 열화에 따른 매개변수 연구

PSC격납건물의 구조성능을 저하시키는 대표적인 열화요인으로는 구조 주재료인 콘크리트, 철근, 텐돈의 경년열화를 들 수 있다. 이들 경년열화가 PSC격납건물의 구조성능 저하를 유발시킨다는 측면에선 크게 다를 바가 없으나 이들이 미치는 영향력의 크기는 다소 다를 수 있다. 따라서, 본 연구는 경수로형 Y원전 격납건물의 유지관리 및 안전성 향상 차원에서 Table 3과 같이 구조재료의 개별열화(음영 처리된 항목들) 및 복합열화에 따른 매개변수 연구를 통해 격납건물의 구조성능을 평가하였다. 이를 통해 유지관리시 열화에 대해 보다 큰 가중치를 부여해야 하는 재료의 선정과 우선순위를 제안하였다.

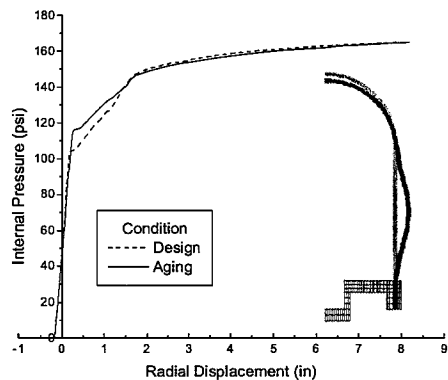


Fig. 5 Internal pressure-radial displacement relationship at mid-height wall

4.1 재료 개별열화

재료별 가상열화정도를 0%(설계조건), 5%, 10%로 변화시키면서 비선형 극한내압해석을 수행하였다. 해석을 위한 열화반영은 단순히 재료의 강성만을 저하시키는 것으로 고려하였으며, 이 때 대상 재료 이외의 재료들은 설계조건을 그대로 유지시켰다. 재료 개별열화를 고려한 극한내압해석 결과를 Fig. 6~Fig. 8에 내압 증가에 따른 재료의 항복단계와 벽체 중앙부에서의 반경방향 최대변위와의 관계로 도시하였다. 여기서, 개별 열화로 인한 극한내압능력 저하에 가장 크게 영향을 주는 재료는 텐돈이고 다음으로 철근과 콘크리트 순임을 명확히 알 수 있다. 철근의 경우 철근 열화가 텐돈 1% 변형률 시점의 변위 증가에 다소 크게 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 텐돈의 경우는 대부분의 영역에서 변위 증가를 발생시키면서 텐돈 1% 변형률 시점에서의 변형률이 상대적으로 크게 나타남을 보였다. 이들 결과는 PSC적납건물의 열화관리가 텐돈 열화, 철근 열화, 콘크리트 열화 순으로 가중치를 두어 이루어져야 함을 암시한다고 할 수 있다.

4.2 재료 복합열화

경년열화 현상은 어느 한 재료에 치중하기보다는 구성재료간에 동시적으로 발생하거나 아니면 다소간의 정도 차이를 나타내면서 복합형태로 발생하는 것이 상례이다. 콘크리트, 철근, 텐돈 중 두 가지 재료의 열화가 복합되어 발생할 경우에 대해 열화정도에 따른 극한내압능력 저하 정도를 평가하였다. 열화정도와 열화 반영 방법은 앞의 개별열화 고려시와 동일하게 설정하였다. 복합열화를 고려한 극한내압해석 결과를 Fig. 9~Fig. 11에 제시하였으며, 여기서 복합열화로 인한 극한내압능력 저하 정도가 철근과 텐돈 복합열화, 콘크리트와 텐돈 복합열화, 그리고 콘크리트와 철근 복합열화 순으로 크게 나타남을 알 수 있다. 특별히 철근과 텐돈 복합열화의 경우는 철근 5%열화와 텐돈 5%열화의 복합열화 이후부터 변위 증가가 다소 급격해지는 경향을 보이고 있어 철근과 텐돈의 복합열화에 가중치를 두어 열화관리가 이루어져야함을 알 수 있다.

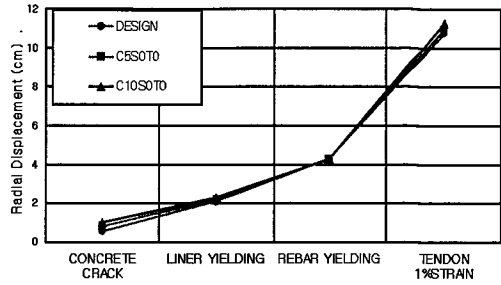


Fig. 6 Radial displacement by concrete degradation

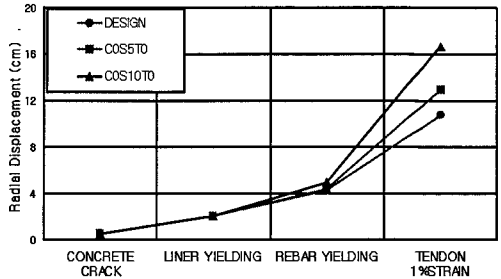


Fig. 7 Radial displacement by rebar degradation

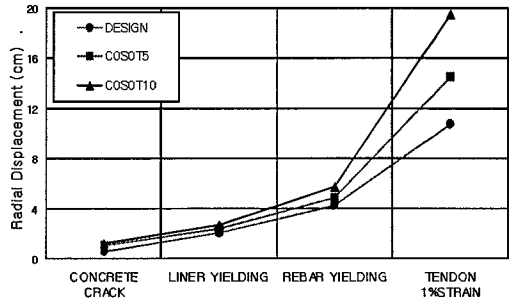


Fig. 8 Radial displacement by tendon degradation

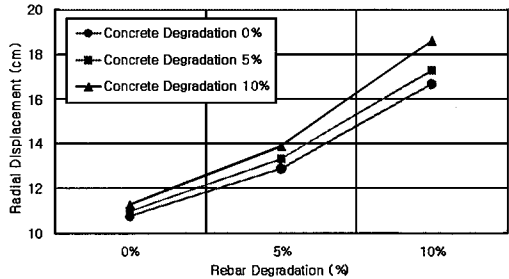


Fig. 9 Combination of concrete and rebar degradation

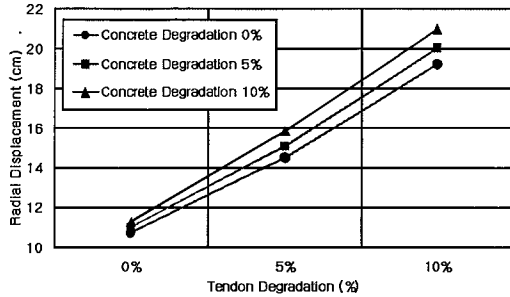


Fig. 10 Combination of concrete and tendon degradation

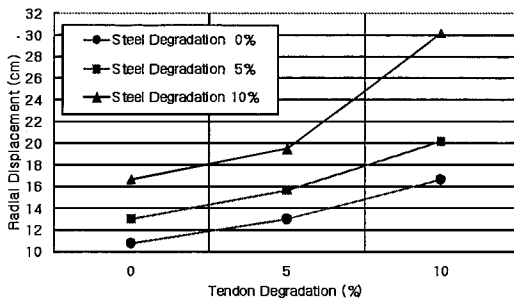


Fig. 11 Combination of rebar and tendon degradation

5. 결 론

국내 가동중인 Y원전의 경수로형 PSC적납건물을 대상으로 구조 주재료의 경년상태를 고려한 극한내압 능력 평가가 이루어졌고, 재료의 개별열화 및 복합열화에 따른 메개변수 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 현재 가동중인 Y원전 PSC적납건물의 경년상태(5년 경과)의 극한내압능력은 설계조건과 비교할 때 매우 양호한 상태를 유지하고 있음을 검증하였다.
- 2) 내압 증가에 따른 PSC적납건물의 비선형 거동으로부터 구조적 취약부위가 벽체 높이의 중앙부위에서 나타남을 보였다.
- 3) 구조 주재료의 열화에 따른 메개변수 연구 결과, 재료 열화로 인한 구조성능저하 정도의 크기를 기준으로 할 때 가동중 열화판단의 우선순위는 재료 개별열화의 경우 텐돈, 철근, 콘크리트 순으로 나

타났고, 재료 복합열화의 경우는 철근과 텐돈, 콘크리트와 텐돈, 콘크리트와 철근 순으로 나타났다.

- 4) 차후 Y원전 PSC적납건물 사용년수의 지속적인 증가를 고려할 때 본 연구는 적납건물 가동중 검사에 있어서 재료의 증장기 경년상태를 고려한 극한내압능력 평가까지도 가능토록 하는 기틀을 마련하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력중장기 연구개발사업의 지원 하에 이루어진 것으로 이에 감사드립니다

참 고 문 헌

1. Naus, D. J., Oland, C. B., "Aging management of containment structures in nuclear power plants", *Nuclear Engineering & Design*, Vol.166, pp.367~379, 1996.
2. Shah, V. N., Hookhan, C. J., "Long-term aging light water reactor concrete containment", *Nuclear Engineering & Design*, Vol.185, pp51~81, 1998.
3. ACI, "Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures (ACI-97)", PART 4, Chap. 8.5, 1997.
4. Hibbit, H. D. et al., "ABAQUS User's Manual", HKS, Inc., 1998.
5. Kabaila, A. and Saenz, L. P., "Equation for the Stress Strain Curve of Concrete", *ACI Journal, Proceeding*, Vol. 61, No.3, pp. 1227~1239, 1964.
6. Kufer, H. B. and Gerstle, K. H., "Behavior of Concrete under Biaxial Stresses", *Journal of Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 99, pp. 853, 1973.
7. Hsu, T. T. C., "Unified Theory of Reinforced Concrete" CRC Press, 1993.
8. 한국전력공사, "원자로 건물 구조해석기술에 관한 연구", KRC-90H-J01, 1992.

(접수일자 : 2000년 11월 23일)