

'99 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

재료특성저하를 고려한 프리스트레스 콘크리트 격납건물의 비선형거동
Nonlinear Behavior of a Prestressed Concrete Containment Building
with Material Degradation

전영선

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

이홍표

충남대학교
대전광역시 유성구 궁동 220

요 약

원전 격납건물은 운영 중에 각종 열화요인으로 인해 구성재료의 성능이 저하된다. 이러한 재료성능저하는 격납건물의 구조적 거동과 장기적인 안전성에 영향을 미친다. 그러므로 원전의 효율적인 운영을 위해서는 운영기간동안에 발생할 수 있는 모든 열화요인들을 규명하고 평가하는 것이 필요하며, 이러한 열화상태를 고려한 격납건물의 안전성 평가가 이루어져야 한다.

본 연구에서는 격납건물의 구성재료인 콘크리트, 철근 및 텐돈의 성능저하가 격납건물의 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 해석결과 콘크리트의 재료성능저하와 텐돈의 긴장력 이완이 철근의 열화에 비하여 격납건물의 거동에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Abstract

The constituent material of containment buildings will be degraded by various aging factors and environmental stressors during the operation of NPP. Degradation of the material affects the structural behavior and long-term safety of containment buildings. Therefore, identification and evaluation of the degradation factors and processes are necessary for the successful operation, and the degradation should be considered in safety assessment.

This study investigates the effect of the degradation of constituents, which are

concrete, reinforcing steel, and tendon, on the structural behavior of containment building. The results show that the degradation of concrete and the relaxation of tendon influence significantly as compared with the degradation of reinforcing steel.

1. 서론

원전 격납건물은 운영 중에 물리적, 화학적인 각종 환경인자들로 인해 침해를 받게 되어 주요 구조재료인 콘크리트, 철근, 텐돈 및 라이너의 초기 재료특성이 시간이 지남에 따라 저하되는 현상이 나타나게 된다. 이러한 성능저하와 관련하여 미국에서는 80년대 중반부터 NRC를 중심으로 원자력발전소의 주요 기기, 시스템 및 콘크리트 구조물에 대한 경년열화 연구계획을 수립하였으며 이들에 대한 수명관리 차원에서 지속적인 연구개발을 수행하고 있다[1]. 그러나 국내의 경우 각종 원인으로 인하여 균열, 부식 등의 열화현상이 발생되고 있으나[2] 아직까지는 큰 문제로 대두되고 있지 않고 있다. 최근 들어서 원전관련 기관에서는 재료의 열화에 대한 관심을 가지고 활발하게 연구를 수행 중에 있으며, 현재까지 열화관리를 위한 데이터베이스 시스템이 개발되어 있다[3]. 격납건물의 거동은 재료적 특성에 따라서 달라진다. 그러므로 재료의 경년열화 또는 성능저하 현상으로 인해 격납건물의 장기거동은 초기의 거동과 달라질 것이다. 본 논문에서는 구조재료의 열화가 격납건물의 전체적인 구조거동에 미치는 영향을 분석하였다. 내압에 대한 격납건물 콘크리트의 탄소성 거동 및 균열발생 양상을 해석함으로써 격납건물의 파괴양상에 미치는 재료적 특성저하의 영향을 검토하였다.

2 콘크리트 비선형 모델

본 논문에서 사용한 콘크리트의 비선형 모델은 Chen and Chen[4,5]에 의해서 제시된 탄소성 모델과 철근콘크리트 모델로서 각각 탄소성 거동과 균열발생 양상을 해석하는데 사용되었다.

2.1 탄소성 모델

그림 1은 주응력 공간에서 파괴면과 초기 불연속면을 보여준다. 파괴면을 first stress invariant I_1 과 second invariant of the deviatoric stress tensor J_2 에 따라 결정되는 것으로 가정하면 파괴함수는 다음과 같은 2차 방정식으로 나타낼 수 있다 [5].

$$f_u(\sigma_{ij}) = \frac{\kappa^2}{3} J_2 - \frac{\kappa^2}{36} I_1^2 \pm \frac{1}{12} I_1^2 + \frac{1}{3} A_u I_1 = \tau_u^2 \quad (1)$$

또한 초기 불연속면도 파괴면과 같은 형태를 갖는다고 하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$f_o(\sigma_{ij}) = \frac{\kappa^2}{3} J_2 - \frac{\kappa^2}{36} I_1^2 \pm \frac{1}{12} I_1^2 + \frac{1}{3} A_o I_1 = \tau_o^2 \quad (2)$$

여기서 $\kappa^2 = 3$ 일 때 2축 콘크리트 파괴 실험결과와 잘 일치한다. 파괴면과 초기의 항복면을 나타내는 재료상수 A_o , τ_o , A_u 및 τ_u 는 1축 압축·인장하중, 2축 압축 하중하에서의 극한강도(\bar{f}_c' , \bar{f}_t' , \bar{f}_{bc}')와 초기불연속강도(f_c , f_t , f_{bc})에 의해서 다음과 같이 표시된다.

- 압축-압축 영역 ($I_1 \leq 0$, $\sqrt{J_2} + I_1/\sqrt{3} \leq 0$)

$$\begin{aligned} \frac{A_o}{f_c'} &= \frac{\bar{f}_{bc}'^2 - \bar{f}_c'^2}{2\bar{f}_{bc}' - \bar{f}_c'} & \frac{A_u}{f_c'} &= \frac{\bar{f}_{bc}'^2 - 1}{2\bar{f}_{bc}' - 1} \\ \left(\frac{\tau_o}{f_c'}\right)^2 &= \frac{\bar{f}_c' \bar{f}_{bc}' (2\bar{f}_c' - \bar{f}_{bc}')}{3(2\bar{f}_{bc}' - \bar{f}_c')} & \left(\frac{\tau_u}{f_c'}\right)^2 &= \frac{\bar{f}_{bc}' (2 - \bar{f}_{bc}')}{3(2\bar{f}_{bc}' - 1)} \end{aligned} \quad (3)$$

- 인장-압축 또는 인장-인장 영역 ($I_1 \geq 0$, $\sqrt{J_2} + I_1/\sqrt{3} \geq 0$)

$$\begin{aligned} \frac{A_o}{f_c'} &= \frac{\bar{f}_c' - \bar{f}_t'}{2} & \frac{A_u}{f_c'} &= \frac{1 - \bar{f}_t'}{2} \\ \left(\frac{\tau_o}{f_c'}\right)^2 &= \frac{\bar{f}_c' \bar{f}_t'}{6} & \left(\frac{\tau_u}{f_c'}\right)^2 &= \frac{\bar{f}_t'}{6} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, bar는 f_c' 에 의해 무차원화된 값이다.

하중함수는 Chen[6]에 의해 제시된 다음의 식을 사용한다.

- 압축-압축 영역

$$F(\sigma_{ij}) = \frac{J_2 + (\beta/3)I_1}{1 - (\alpha/3)I_1} = \tau^2 \quad (5)$$

- 인장-압축 또는 인장-인장 영역

$$F(\sigma_{ij}) = \frac{J_2 - \frac{1}{6}I_1^2 + (\beta/3)I_1}{1 - (\alpha/3)I_1} = \tau^2 \quad (6)$$

여기서 α 와 β 는 $\tau = \tau_o$, $\tau = \tau_u$ 일 때 결정되는 상수로서, 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha = \frac{A_u - A_o}{\tau_u^2 - \tau_o^2}, \quad \beta = \frac{A_o \tau_u^2 - A_u \tau_o^2}{\tau_u^2 - \tau_o^2} \quad (7)$$

2.2 철근콘크리트 모델

철근콘크리트에서 균열은 각 인장 주응력(σ_j)이 파괴기준을 초과할 때 발생한다 [7]. 즉,

$$\sigma_i > f_t' - (f_t' / f_c') (\min [0, \sigma_j, \sigma_k]) \quad (8)$$

여기서 f_t' 와 f_c' 은 각각 1축 인장강도와 압축강도, σ_j 와 σ_k 는 σ_i 와 서로 직교하는 주응력이다. 균열이 발생하면 콘크리트 인장응력은 해제되고 재분배된다.

이 모델에서 조합된 강성은 다음과 같이 유도된다.

$$[C] = \begin{bmatrix} \alpha \begin{bmatrix} E_1 & \beta\sqrt{E_1E_2} & \beta\sqrt{E_1E_3} \\ (\text{sym}) & E_2 & \beta\sqrt{E_2E_3} \\ & & E_3 \end{bmatrix} & 0 \\ 0 & \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ (\text{sym}) & G_{22} & G_{23} \\ & & G_{33} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\text{여기서 } \alpha = \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \beta = \frac{\nu}{1-\nu} \quad (10)$$

$$G_{ij} = E_i E_j / [(1+\nu)(E_i + E_j)] \quad (11)$$

$$E_i = bE_{ci}A_{ci} + E_{si}A_{si} \quad (12)$$

로 표시된다. 위 식에서 ν 는 철근과 콘크리트에 대해 조합된 포아손비, G_{ij} ($i, j=1, 2, 3$)는 전단계수, E_{ci} 와 E_{si} 는 i 번째 직교면에 대해 투영된 콘크리트와 철근의 상대면적, b 는 균열에 의해 저하되는 부착력을 고려하기 위한 계수로서 0과 1 사이의 값을 갖는다.

콘크리트에 대한 equivalent uniaxial tangent modulus는 균열의 유무, 응력상태 및 하중 재하상태에 따라서 달라진다. 균열이 없는 콘크리트의 압축에 대한 비선형 거동을 나타내기 위해서 loading tangent modulus는 다음과 같이 나타낸다.

$$E_{ci} / E = [1 - R^2] / [1 + (E/E_{xc} - 2) + R^2]^2 \quad (13)$$

여기서, $R = e_j / \varepsilon_f$, $E_{xc} = f_c' / \varepsilon_f$, ε_f 는 1축 파괴변형률, f_c' 는 1축 파괴응력, E 는 콘크리트의 1축 탄성계수이다.

3. 격납건물의 비선형 거동

격납건물의 거동을 해석하기 위하여 그림 2와 같이 8절점 고체요소 828개로 구성된 3차원 해석모델을 사용하였다. 이때 격납건물의 기초매트는 매우 두껍고 강성이 벽체에 비하여 대단히 큰 것으로 가정하여 벽체와 기초매트와 접하는 부분은 고정단으로 간주하였다. 그리고 프리스트레싱 시스템에 작용하는 긴장력은 하중으로 환산하여 외력으로 작용시켰다. 격납건물의 주요 구조재료인 콘크리트, 철근 및 텐든의 열화에 의한 거동변화를 분석하기 위하여 재료 특성치와 긴장력이 설계시의 5%로부터 20%까지 열화에 의해서 저하되는 것으로 가정하였다. 해석결과를 요약하면 다음과 같다.

3.1 콘크리트 열화에 대한 거동

격납건물의 콘크리트가 각종 열화요인과 크리이프 등에 의해서 열화되어 탄성계수 값이 설계치에 비하여 5% ~ 20% 감소하였을 경우에 기초매트로부터 25.6m 높이에서의 변위를 나타내면 그림 3과 같다. 설계상태와 5% 열화시, 10% 열화시에서 72psig까지 완만한 선형변화를 보이고 72psig 이상에서는 급격하게 변위가 증가하는데 이것은 콘크리트의 여러 부위에서 인장균열이 발생하고 있음을 나타내고 있다. 열화정도에 따라서 변위의 차이가 약간 발생하는데 탄성구간에서는 대략 비슷하지만 소성구간에서는 열화정도가 심할수록 크게 증가하게 됨을 알 수 있다.

표 1은 콘크리트의 열화정도에 따라서 콘크리트의 인장에 의한 파괴가 발생할 때의 내압의 크기를 보여준다. 인장균열은 하중에 의해 발생하는 응력이 항복인장응력보다 클 경우에 발생되며 이때의 변형률이 한계치인 0.0002보다 클 경우에는 인장균열에 의해서 파괴되는 것으로 하였다. 콘크리트가 열화됨에 따라서 균열파괴 내압은 점점 작아져서 콘크리트가 10% 열화되었을 경우에는 설계상태에 비해 약 4%, 20% 열화되었을 경우에는 약 7% 정도 감소된 값을 갖게 된다. 강도개념의 파괴기준을 적용하였을 경우에는 부분적인 파괴가 처음으로 나타나는 내압은 설계상태에서 80.28psig 였으나 5% 열화시에는 74.29psig, 10% 열화시에는 73.29psig, 20% 열화시에는 약 72psig로서 변형을 파괴기준보다 약간 큰 값을 보여준다.

71.82psig의 내압이 작용할 때 20% 열화 되었을 경우의 탄소성 거동을 그림 4에 나타내었다. 설계상태에서는 벽체중간부에서 소성거동을 하고 있지만 20% 열화시에는 기초매트 바로 위에서부터 스프링라인 윗부분까지 폭넓게 소성거동을 하고 있다. 또한 이때의 수평방향 최대변위는 0.98cm에서 1.77cm로 약 1.8배 이상 증가하였다. 콘크리트의 재료특성, 즉 탄성계수가 저하됨으로써 영구변형률이 존재하는 소성영역으로의 이동이 빨라지고 그에 따라서 최대변위가 크게 증가하게 됨을 알 수 있

다. 그리고 격납건물에서 가장 취약한 부위는 벽체중간부임을 알 수 있다.

열화정도에 따라서 균열발생양상도 변하는데 그림 5는 설계상태와 10% 열화시 균열발달 양상을 나타낸 것이다. 설계상태에서는 벽체 중간 일부분에서 인장균열이 나타났지만 10% 열화시에는 벽체는 물론 스프링라인부분까지 폭넓게 인장균열이 발생했다. 콘크리트의 인장균열은 하중-변위 관계에서 탄성영역으로부터 소성영역으로 변할 때 발생한다. 콘크리트가 15%와 20% 열화시에는 68.89psig까지 탄성거동을 하고 68.89psig 이상에서는 급격하게 소성거동을 한다.

3.2 철근의 열화에 대한 거동

격납건물의 구조재료 중에서 철근만 열화되었을 경우의 거동을 해석한 결과로서 내압-변위 관계를 그림 6에 나타내었다. 72psig까지는 완만한 탄성거동을 하며 72psig 이상에서 급격하게 소성거동을 보이고 있다. 이것도 앞에서 언급한 바와 같이 콘크리트에 균열이 발생하여 변위가 크게 증가하기 때문이다. 철근의 경우에는 재료적 특성저하정도가 격납건물의 콘크리트의 파괴에 별 영향을 미치지 않는데 이것은 철근은 콘크리트가 소성구간 이후에 그 기능을 주로 발휘하는 구조재료이기 때문이다. 그림 7에서 알 수 있듯이 균열발생 범위는 콘크리트가 열화되었을 경우(그림 5(b))보다 적게 나타났다. 그러나 설계상태의 결과(그림 5(a))와 비교해 볼 때 철근의 열화는 격납건물의 인장균열 발생을 증가시킨다는 것을 알 수 있다.

3.3 텐돈의 긴장력 이완에 대한 거동

격납건물의 구조재료중 콘크리트와 철근의 상태는 설계상태를 유지하고 텐돈의 초기 긴장력이 이완되었을 경우에 대한 거동을 분석하였다. 텐돈의 초기 긴장력은 시간이 흐름에 따라서 5%, 10%, 15%, 20% 로 점차 감소하는 것으로 가정하였다. 텐돈의 긴장력 이완에 따른 수평방향의 변위를 그림 8에 나타내었다. 그림에서부터 알 수 있듯이 텐돈의 경우에는 콘크리트나 철근의 열화와는 달리 성능저하에 의한 격납건물의 변위변화는 크게 나타났다. 텐돈의 긴장력이완에 따라서는 작은 내압하에서도 콘크리트의 소성거동이 발생하는 것을 알 수 있다. 텐돈의 긴장력이 10% 이완되었을 경우는 65.8psig에서, 15%와 20% 이완되었을 경우는 62.7psig에서 소성거동을 하고 있는 것으로 나타났다. 표 2는 텐돈의 긴장력 이완정도에 따라서 인장파괴를 야기시키는 내압의 크기가 변하고 있는 것을 보여 주고 있다. 이완정도가 10% 일 경우에는 설계상태에 비해 약 7%, 20%의 이완이 생겼을 때에는 약 15%의 감소된 인장파괴 내압을 갖는다. 이것은 다른 구조요소에 비하여 텐돈의 성능저하의 영향이 대단히 큰 것을 보여준다. 텐돈의 긴장력 10% 이완되었을 경우에 격납건물의

균열분포를 그림 9에 나타내었다. 콘크리트가 열화되었을 때(그림 5(b))나 철근이 열화되었을 때(그림 7)보다 균열 발생범위가 벽체 부분은 물론이고 구형돔의 중간에서 스프링라인부분까지 폭넓게 균열이 발생하고 있다. 이는 곧 격납건물에 있어서 프리스트레싱 시스템은 콘크리트의 영구변형이 존재하는 소성거동을 지연시킬 뿐만 아니라 균열 발생도 억제하고 있음을 보여준다.

4. 결론

격납건물의 구성재료인 콘크리트, 철근 및 텐돈이 각종 열화요인으로 인해 성능이 저하되었을 경우에 격납건물의 비선형 거동을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 콘크리트의 열화와 텐돈의 긴장력 이완은 격납건물의 거동에 큰 영향을 미치며, 특히 텐돈의 긴장력 이완시에는 격납건물의 소성거동이 작은 하중에서도 발생한다.
- 철근이 열화되었을 경우에는 다른 재료에 비해 거동의 변화가 크지 않았다.
- 변형을 파괴기준에 의해 구한 인장파괴내압은 강도파괴기준에 의해 구한 값보다 약간 작은 값을 보여준다.
- 재료의 성능저하는 격납건물의 거동과 내압능력에 큰 영향을 미친다. 그러므로 원전의 운영중에 격납건물의 열화상태를 철저히 점검하는 것이 필요하며 안전성 평가시에도 구성재료의 성능저하현상을 고려하여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. Naus, D.J., Oland, C.B., and Ellingwood, B.R., Report on Aging of Nuclear Power Plant Reinforced Concrete Structures, NUREG/CR-6424, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1996.
2. 한국원자력안전기술원, 원자력 안전규제 기술개발-원전 콘크리트 구조열화 안전성평가 기술개발(1차년도), KINS/GR-062, 1993.
3. 한국전력공사 전력연구원, 원전 안전성 관련 콘크리트 구조물의 열화에 관한 연구, KEPRI-93H-JO2, 1996.

4. Chen, A.C.T., and Chen, W. F., "Constitutive Relations for Concrete", *J. Eng. Mech. Div., ASCE*, Vol. 101, No. EM4, Proc. paper 11529, pp. 465~481, 1975.
5. Chen, A.C.T., and Chen, W.F., "Constitutive Equations and Punch-Indentation of Concrete", *J. Eng. Mech. Div., ASCE*, Vol. 101, No. EM6, Proc. paper 11809, pp. 889~906, 1975.
6. Chen, W. F., *Plasticity in Reinforced Concrete*, McGraw-Hill, New York, 1982.
7. Smith, P. D. and Anderson, C. A., *NONSAP-C: A Nonlinear Stress Analysis Program for Concrete Containments Under Static, Dynamic, and Long-Term Loadings*, NUREG/CR-0416, 1978.

표 1. 콘크리트 열화에 대한 인장파괴내압(psig)

열화정도	내압
설계상태	73.36
5%	72.03
10%	70.50
15%	69.30
20%	68.01

표 2. 튜브의 긴장력 이완에 대한 인장파괴내압(psig)

이완정도	내압
설계상태	73.36
5%	70.64
10%	67.87
15%	65.19
20%	62.58

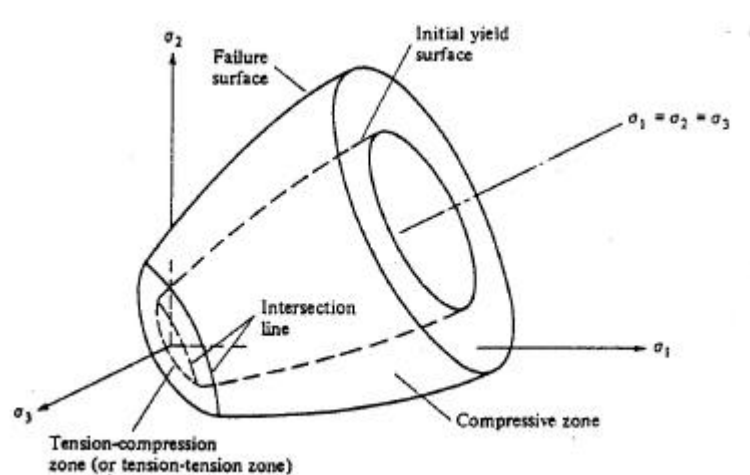


그림 1. 3축 응력공간에서 파괴와 초기불연속면

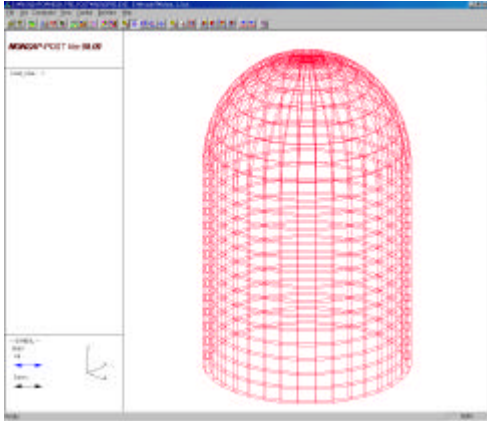


그림 2. 해석모델

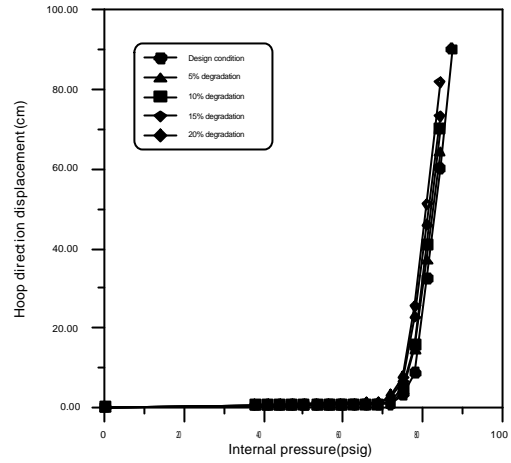
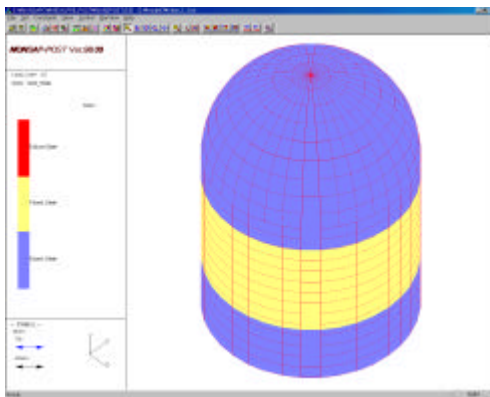
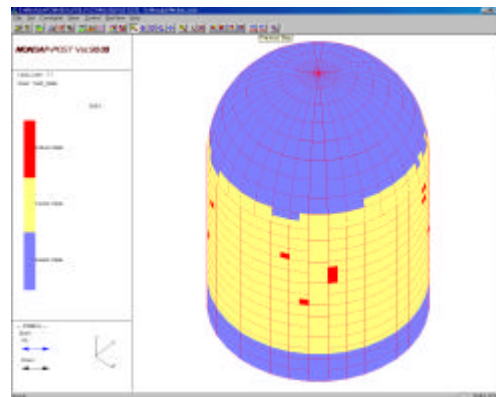


그림 3. 콘크리트의 열화에 따른 격납건물의 변위변화

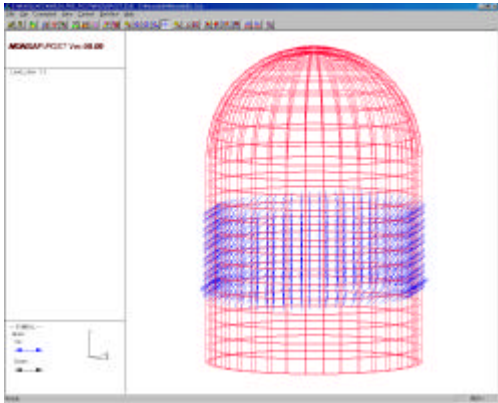


(a) 설계상태

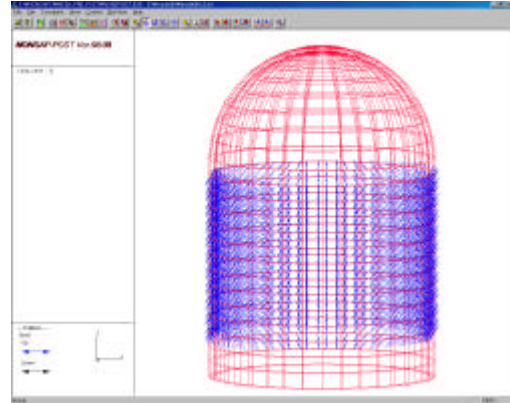


(b) 20% Degradation

그림 4 콘크리트 열화에 의한 탄소성 영역 변화(내압=71.82psig)



(a) 설계상태



(b) 10% Degradation

그림 5. 콘크리트의 열화에 대한 격납건물의 균열분포(내압=72psig)

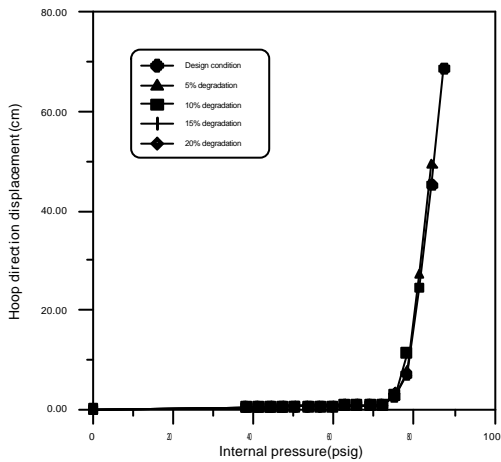


그림 6. 철근의 열화에 따른 격납건물의 변위변화

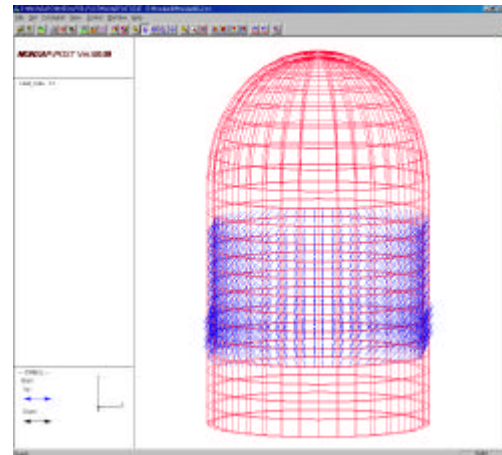


그림 7. 철근 10% 열화시 균열분포 (내압=72psig)

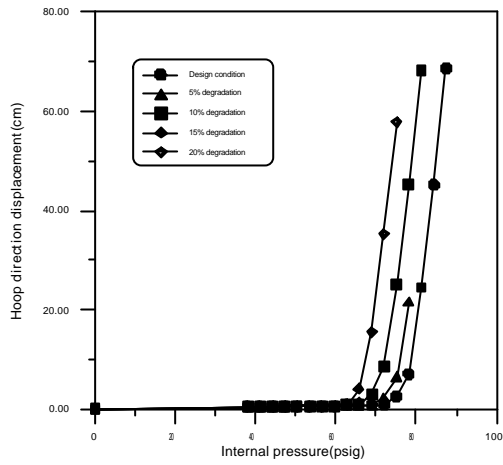


그림 8. 텐돈의 긴장력 이완에 따른 격납건물의 변위

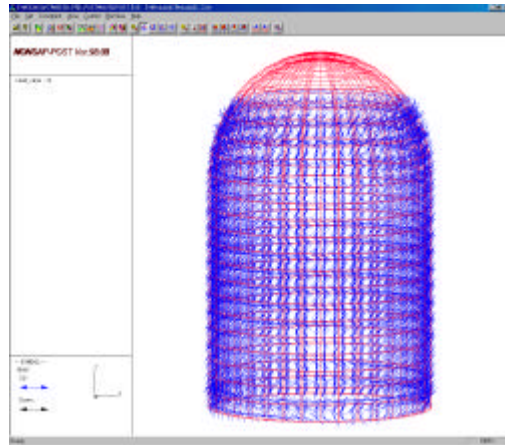


그림 9. 텐돈 긴장력 이완시 균열분포 (내압=72psig)