

원자로 격납건물의 열응력해석연구 (Nonlinear analysis of containment structure under thermal and pressure load)

오 병 환* , 이 명 규**

ABSTRACT

Nonlinear analysis of RC containment structure under thermal load and pressure is presented to trace the behaviour after LOCA. The concrete plate and shell finite elements are used to represent the structure. The shell elements used are layered to consider the stress change through thickness. Thermal stress components are determined by the initial strain concept during each time step. The present study indicates that the nonlinear distribution of temperature in the cross-section of a member may create a significant nonlinearity in stresses and that this fact must be realistically taken into account.

요 약

본 연구는 철근콘크리트 격납구조물에서 가상의 냉각제 유출사고에 의한 온도하중과 압력에 따른 거동을 알아보기 위한 비선형 해석을 수행하였다. 시간에 따른 온도하중을 결정하기 위하여 과도온도 해석을 통해 격납구조물 단면내의 온도분포를 구하였다. 구조물은 기하학적 비선형성과 재료비선형성을 고려한 판 및 셸요소로 이상화되며, 셸요소는 두께방향에 따라 변하는 응력을 고려하기 위해 몇개의 층으로 이루어진 모델을 사용하였다. 열응력은 인접한 두시간 단계에서의 온도차를 하나의 하중중가로 고려하여 초기변형 문제로 변환하여 결정되었다. 본 연구에서의 수치실험에 의하여 과도온도해석에 근거한 비선형온도경사를 고려할때의 변위가 고려하지 않을때의 변위에 비해 크게 나타남을 알 수 있었다.

1. 서론

원자로 격납구조물은 원자력발전소의 정상운전 상태에서 핵분열에 의해 생긴 방사능물질의 유출방지, 방사능의 생물학적 차폐 및 외부의 위협으로부터의 원자로보호와 격납구조물 설계의 기준이 되는 LOCA(Loss of Coolant Accident)시의 방사능 누출을 최소화할 목적으로 건설된다. 격납구조물 설계시 고려되는 하중에는 사하중, 활하중, 포스트텐션링, 지진하중, LOCA시에 발생하는 내부압력, 온도하중 등이 있으며 본 연구에서는 격납구조물에 작용하는 하중중에서 단면내의 온도경사에 의한 RC격납구조물의 거동에 대해 살펴보기로 한다.

본 연구에서는 축대칭의 격납구조물을 3차원 셸요소로 이상화하고, 대칭성을 고려해서 전체구조물의 1/4을 해석한다. 가상의 LOCA에 대한 격납구조물 내부의 온도와 압력의 시간이력을 입력 기초자료로 이용하여, 압력만 고려할 때와 온도

의 영향만을 고려할때의 거동해석을 한다. 또한, 온도하중과 압력상승이 동시에 작용할 때의 격납구조물의 거동을 해석하였다.

2. 구조물의 비선형모델

철근 콘크리트 구조물의 모델은 재료 비선형과 기하학적 비선형을 동시에 고려하는 철근 콘크리트 셸요소를 사용한다.

본 연구에서 사용한 구조물의 모델링은 다음과 같다.

2.1 재료 비선형 모델링

2.1.1 콘크리트의 압축거동

(1) 항복기준

해석에서 사용하는 Thick Plate와 Shell의 모델에서는 횡방향 전단력영향을 고려해 압축 항복 기준을 적용해야 한다. 두 개의 응력불변량 I_1, J_2 로 정의된 항복기준은 다음과 같이 쓸 수 있다.

* 정회원 서울대학교 토목공학과 교수

** 정회원 서울대학교 토목공학과 박사과정

$$f(I_1, J_2) = [\beta(\xi J_2) + \alpha I_1]^{1/2} = \sigma_0 \quad (1)$$

여기서, α 와 β 는 재료상수이고 σ_0 는 일축압축시험에서 구한 동가 응력(Equivalent Stress)이 된다.

본 연구에서 사용한 콘크리트의 구성방정식(Constitutive Equation)의 모델을 이축과 일축 거동으로 나타내면 각각 그림 1과 그림 2와 같다.

(2) Flow Rule과 Hardening Rule

콘크리트의 소성변형은 Associated Flow Rule를 따른다고 가정하면 Flow Rule은 다음과 같다.

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2)$$

여기서, $d\lambda$ 는 소성변형 증가의 크기를 결정하는 비례상수이고, Gradient $\partial f(\sigma)/\partial \sigma_{ij}$ 는 항복면에서 수직방향을 정의하며 $f(\sigma)$ 는 Subsequent Loading Function이다. 유효응력과 유효변형 사이의 관계는 다음 식에 의해 일축시험의 결과로부터 구한다.

$$\sigma = E_0 \epsilon - \frac{E_0}{2 \epsilon_0} \epsilon^2 \quad (3)$$

여기서, E_0 는 초기탄성계수, ϵ 는 총변형, ϵ_0 는 f_c' 에서의 총변형이다. 탄성변형성분 $\epsilon_e = \sigma / E_0$ 를 식(3)에 대입하면

$$\sigma = -E_0 \epsilon_p + \sqrt{2E_0^2 \epsilon_0 \epsilon_p} \quad (4)$$

$0.3f_c' \leq \sigma \leq f_c'$

여기서, ϵ_p 는 소성변형 성분이고 ϵ_0 는 $2f_c' / E_0$ 로 한다. 식(4)의 소성변형을 사용해 Loading Surface에서의 유효응력 $\sigma = \sigma_0$ 를 얻을 수 있다.

(3) 압축파괴기준(The Crushing Condition)

Crushing은 변형에 의해 지배되는 현상이므로 적당한 변형 규준은 응력항으로 표시된 항복규준을 변형항으로 변환하여 얻을 수 있다.

$$\beta (3J_2') + \alpha I_1' = \epsilon_u^2 \quad (5)$$

여기서, I_1', J_2' 은 변형 불변량(Invariant)이고 Kupfer의 실험에 의한 상수값을 사용한다.

2.1.2 콘크리트의 인장거동

인장응력하에서 콘크리트의 거동은 파괴가 발생할 때까지 탄성거동을 한다라고 가정한다. 일반적으로 균열현상은 최대인장응력에 의해 지배된다. Shell요소의 사용으로 균열은 xy평면에 수직인 면에서만 일어나고 이 면에 수직인 방향으로의 탄성계수와 포와송비는 균열이 발생하면 "0"으로 줄어든다. 이 면에서는 또한 균열 발생에 따른 골재의 맞물림과 철근의 Dowel효과를 고려하여 감소된 전단탄성계수를 사용한다. 균열이 발생한 콘크리트는 이방성(Anisotropic)이므로 국부좌표의 관계식을 xy축으로 변환시켜야 한다. 해석 모델에 있어서는 유한요소내에 균열이 분포된 것으로 가정하는 분포 모델(Smeared Representation)을 사용한다. 1방향으로 균열이 발생한 콘크리트와 1,2방향으로 모두 발생한 경우의 구성 방정식은 각각 (6), (7)과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & & & & \\ & E & & & \\ & & G_{12}^c & & \\ & & & G_{12}^c & \\ & & & & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & & & & \\ & 0 & & & \\ & & G_{12}^c/2 & & \\ & & & G_{13}^c & \\ & & & & G_{23}^c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

(1) 인장증강(Tension Stiffening)

부착효과(Bond Effect)에 의해 균열이 발생한 후에도 균열면은 상당한 인장력을 부담할 수 있으며 이러한 현상은 균열이 발생한 철근 콘크리트 강성을 증가시킨다. 본 연구에서 사용한 인장증강모델은 그림 3과 같이 이상화한 것이다.

(2) 균열면의 전단 탄성계수(Cracked Shear Modulus)

분포균열모델(Smeared Cracking Model)에서 골재 사이의 맞물림(Interlocking)과 철근의 Dowel Action을 고려해 주기 위해 전단탄성계수를 인장변형의 함수로 정하였다. 균열이 발생한 각 경우에 대해 살펴보면 다음과 같다.

1 방향으로 균열이 발생한 경우

$$G_{12}^c = \begin{cases} 0.25*G(1-\epsilon_1/0.004) \\ 0 \text{ if } \epsilon_1 \geq 0.004 \end{cases} \quad (8)$$

$G_{13}^c = G_{12}^c, \quad G_{23} = G$

여기서, G 는 비균열 단면의 전단탄성계수이며, ε_1 은 1의 방향으로의 인장 변형이다. 1, 2의 양방향 모두 균열이 발생한 콘크리트의 경우

$$G_{13}^c = \begin{cases} 0.25 * G(1 - \varepsilon_1 / 0.004) \\ 0 \text{ if } \varepsilon_1 \geq 0.004 \end{cases}$$

$$G_{23}^c = \begin{cases} 0.25 * G(1 - \varepsilon_2 / 0.004) \\ 0 \text{ if } \varepsilon_2 \geq 0.004 \end{cases} \quad (9)$$

$$G_{12}^c = \begin{cases} 0.5 * G_{13}^c \\ 0.5 * G_{23}^c \text{ if } G_{23}^c < G_{13}^c \end{cases}$$

2.1.3 철근의 거동

본 연구의 모델에서 철근은 Equivalent Thickness의 철근층으로 생각할 수 있다. 각 철근층은 철근 방향으로 축력만 받으므로 일축거동을 한다. 탄소성응력-변형관계를 나타내기 위해 Bilinear Idealization을 사용했다.

2.1.4 라이너의 거동

본 연구에서는 라이너의 거동을 Von Mises의 항복기준을 사용한 탄성-소성(Elastic-Plastic) 모델을 사용하였다.

2.2 기하학적 비선형모델

해석에서는 Thick Shell Element를 사용하며 철근을 합리적으로 나타내고 두께 방향의 콘크리트 거동을 살피기 위해 층접근법(Layered Approach)을 사용해 콘크리트의 압축 거동과 균열 진전을 각 층요소의 Gauss Point에서 해석하고 관찰하기로 한다. 철근 콘크리트 보, 판, 셸의 거동에서 중요한 역할을 한다고 알려진 기하학적 비선형성을 고려하기 위해 Von Karman 변형식을 사용한 Total Lagrangian 접근법을 사용한다.

3. 원자로 격납구조물의 해석

3.1 해석모델의 선정

해석구조물은 1/6크기의 격납건물로, 해석모델 철근의 배근상세와 수치모델에서 사용한 유한요소망은 각각 그림 4와 그림 5에 보인 바와 같

다.

온도하중에 따른 격납구조물의 변형도 증분은 다음 식에 의해 결정한다.

$$\{\Delta \varepsilon_T\} = [\alpha_T \Delta T \quad \alpha_T \Delta T \quad \alpha_T \Delta T \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T,$$

$$T = \sum_{i=1}^n N_i T_i \quad (10)$$

여기서, $\Delta \varepsilon_T$ 는 온도차에 따른 변형도 증분, α_T 는 열팽창계수이며 ΔT 는 고려하는 위치에서의 온도 증분이다. 변형도 증분에 따른 정역학적 등가하중은 다음과 같다.

$$\{\Delta F\}^T = \int [B]^T [D] \{\Delta \varepsilon_T\} dvol$$

$$= \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D] \{\Delta \varepsilon_T\} dJ |d\xi d\eta d\zeta \quad (11)$$

3.2 온도하중만 고려할 때의 거동해석

LOCA에 따른 격납구조물 내부의 대기의 시간에 따른 온도변화의 대략적인 경향을 참고하여 작성한 내부 온도이력이 그림 6과 같을 때의 해석결과를 그림 7과 같다. 이 결과에 의하면 LOCA 발생 직후에는 벽체 내측 부분(철근층 1, 2)에서는 압축응력을, 외측 부분(철근층 3, 4)에서는 인장응력을 각각 받다가 시간이 경과하면서 온도경사의 변화에 따라 부담하는 응력이 변화함을 알 수 있다.

3.3 내압만 고려할 때의 거동해석

LOCA에 따른 격납구조물내부의 압력이력은 그림 8과 같다. 그림 9는 10번 요소에서의 시간에 따른 철근 및 Steel Liner의 응력 변화를 도시한 것이다.

3.4 내압과 온도하중을 동시에 고려하는 경우의 거동해석

격납구조물의 거동해석에 있어 내압과 온도하중을 동시에 고려하는 경우의 해석결과를 그림 10과 같다. 앞의 해석결과와 비교해보면 구조물내의 응력분포는 LOCA 발생직후의 열응력의 영향에 의해 약간의 압축응력이 발생하나 대체적인 경향은 압력에 의해 응력변화와 유사하다.

5. 결론

본 연구에서는 RC 격납구조물의 LOCA 발생시 유발되는 고온고압 상태에 대하여 LOCA 발생 후의 거동을 시간 경과에 따라 해석하였다. 본 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. LOCA 발생에 따른 내압해석에서 온도하중을 고려해야 합리적인 해석결과를 얻을 수 있다.
2. 격납구조물의 내압해석으로부터는 초기균열이 약 25psi에서 발생하며, 이후의 구조물은 균열에 의한 응력재분배에 의해 상당한 비선형성을 보인다.
3. 온도하중의 영향은 LOCA발생 직후에는 비교적 큰 응력을 유발시키나, 시간이 경과함에 따라 내부압력의 영향이 증가하게 되는 것을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. Kupfer, H., and Gerstle, K.,H., "Behaviour of Concrete under Biaxial Stress," ASCE, Vol.99, No.ST4, 1973, pp.1025-1034
2. Owen, D.R.J., and Figueiras, J.A., "Ultimate Load Analysis of Reinforced Concrete Plates and Shells including Geometric Nonlinear Effects," Finite Element Software for Plates and Shells, Pineridge Press, Swansea, U.K., 19843. Buyukozturk, O, "Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Structures," Computer & Structures, Vol.7, 1977, pp.149-156
3. Chen, W.F., Plasticity in Reinforced Concrete, McGraw-Hill, New York, 1982
4. Owen, D.R.J., and Hinton, E., Finite Elements in Plasticity-Theory and Practice, Pineridge Press, Swansea, U.K., 1980
5. Zienkiewicz, O.C., The Finite Element Method, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1977
6. Owen, D.R.J., and Damjanic, F., "Reduced Numerical Integration in Thermal Transient Finite Element Analysis," Computer & Structures, Vol.17, 1983, pp.261-276
7. Horschel, D.S., and Jung, J., "Construction and Analysis of a 1/6th-Scale Concrete Containment Model,"
8. Sharma, S., Wang, Y.K., and Reich, M., Ultimate Pressure Capacity of Reinforced and Prestressed Concrete Containments, Brookhaven National Laboratory, NUREG/CR-4149

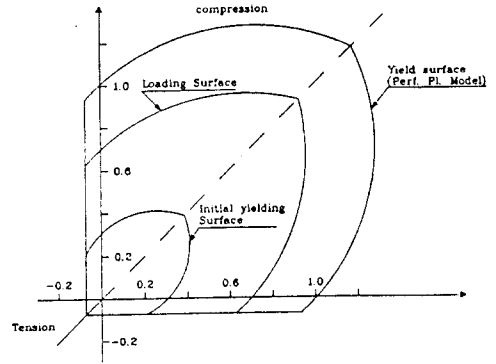


그림 1. 이축응력하의 콘크리트의 구성방정식 모델

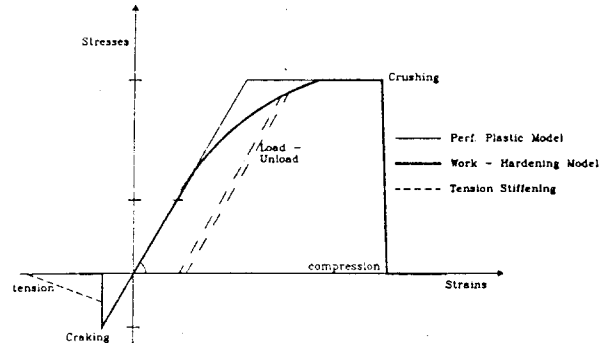


그림 2. 일축응력하의 콘크리트 구성방정식 모델

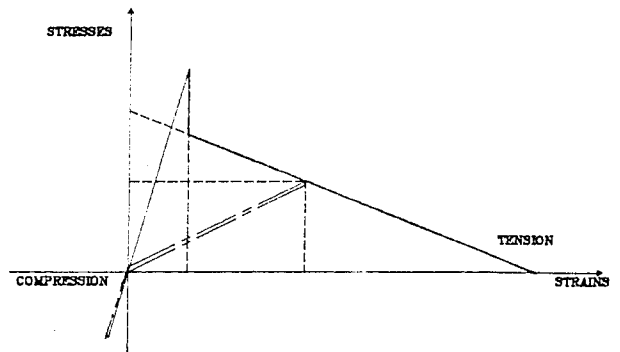


그림 3. 콘크리트의 인장증강 모델

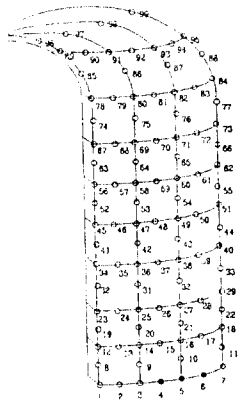


그림 4. 해석구조물의 유한요소 모델

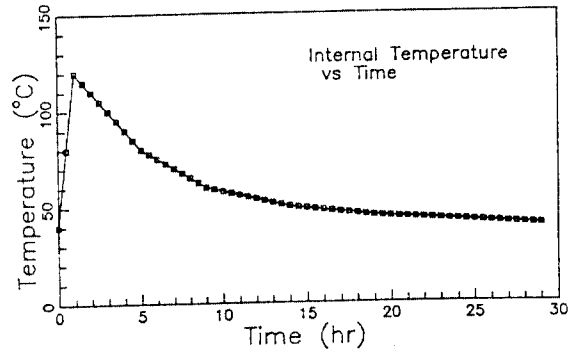


그림 6. LOCA후 내부 온도이력

층	형태	직경
1	Hoop	φ 4
2	Meridional	φ 4
3	Hoop	φ 4
4	Hoop	φ 4
5	Meridional	φ 4
6	Hoop	φ 4
7	Seismic(45° Diag)	φ 4
8	Seismic(45° Diag)	φ 4

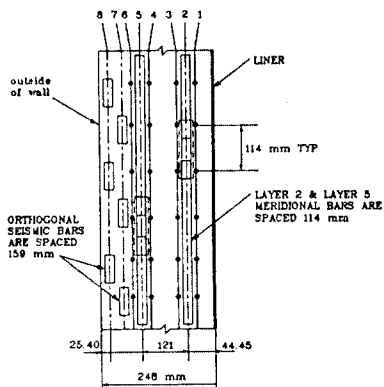


그림 5. 해석구조물의 단면형상

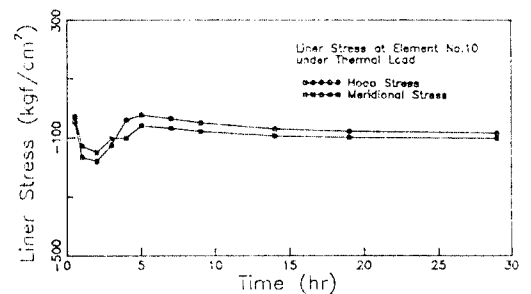
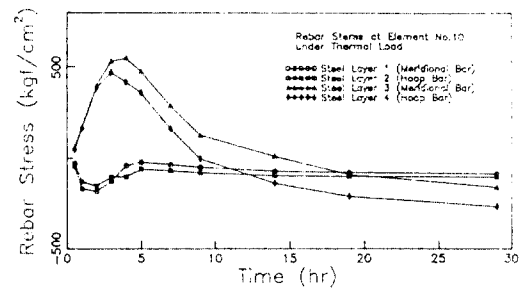


그림 7. 온도이력 해석결과

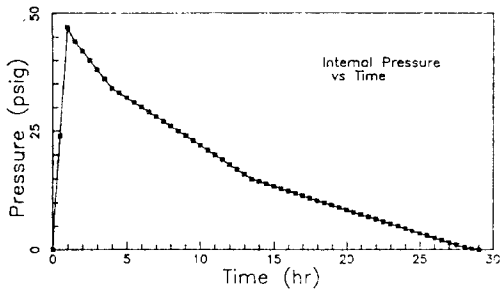
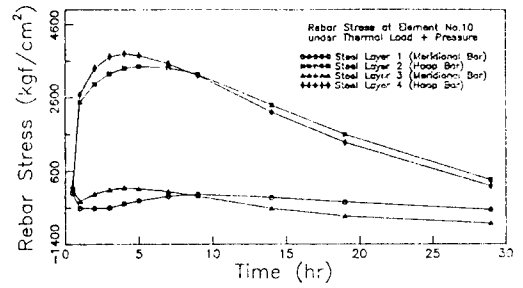
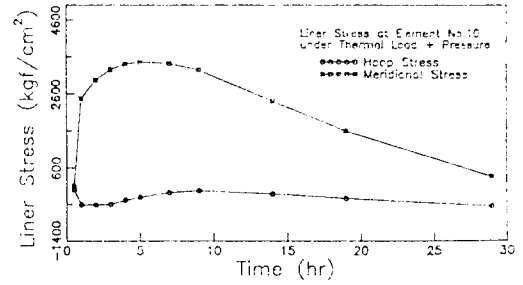


그림 8. LOCA후 내부 압력이력

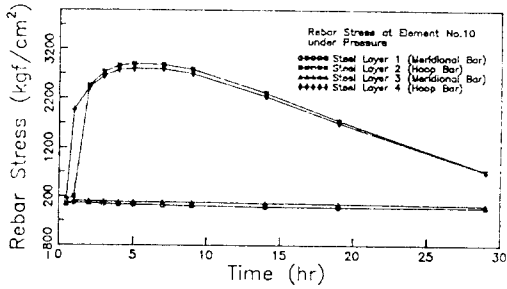


(a)

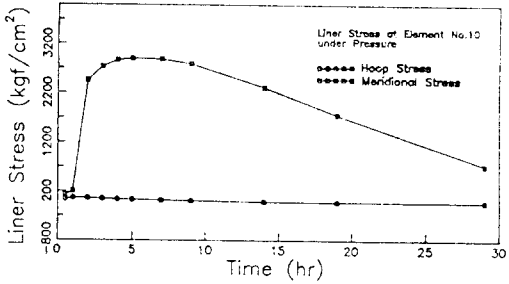


(b)

그림 10. 온도와 압력을 동시에 고려한 해석결과



(a)



(b)

그림 9. 압력이력 해석결과