

원전 격납건물 비선형 해석을 위한 콘크리트 재료모델 개발

Development of Concrete Material Model for Nonlinear Analysis of Nuclear Containment Building

이홍표* 전영선** 서정문** 신재철***
Lee, Hong-Pyo Choun, Young-Sun Seo, Jeong-Moon Shin, Jae-Chul

ABSTRACT

This paper is mainly focused to develop new concrete material model such as ultimate failure surface in compression-compression region, hardening rule and cracking criteria which are basically used in the nonlinear finite element analysis of nuclear prestressed concrete containment building. From the Kepri's experimental results, failure surface of the concrete based on the elasto-plastic material model is modified and new cracking criteria is proposed. Nonlinear FE analysis program using a new material model is implemented to analysis plane concrete. Finally, numerical simulation to compare the performance of the new material model with experimental results is employed. The numerical results by the proposed model in this study agree very well with the experimental data.

1. 서론

원전 격납건물은 사고발생시 방사능물질의 외부유출을 차단하는 최후의 방어벽 역할을 한다. 따라서 운영 중인 격납건물의 구조적 성능을 검증하는 일은 필수적이며 이를 위하여 격납건물의 성능평가방법을 개발하기 위한 연구를 수행해야 한다. 최근 원전의 안전성에 대한 관심이 증대되면서 격납건물 건설 당시의 재료를 사용하여 콘크리트 이축 응력시험이 수행되었으며 격납건물에서 가장 취약하다고 알려진 벽체중간부위를 철근콘크리트 패널로 제작하여 격납건물의 균열양상과 구성방정식 도출을 위한 실험을 수행한 바 있다.^{(1),(2)} 이와 같은 실험과 병행하여 격납건물의 극한내압해석을 위한 유한요소해석프로그램을 개발 중에 있고 실험에서 도출된 콘크리트 파괴포락선과 재료상수를 해석모델에 삽입하기 위한 연구가 진행되고 있다.^{(3),(4)} 기존에 제시된 콘크리트 재료모델을 이용한 해석방법이 불합리한 것은 아니지만 해석결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 대상 구조물의 재료적 특성을 정확히 반영한 실험을 이용하여 재료모델을 개발하는 것이 필요하다.

* 정회원 · 한국원자력연구소 · 박사수료후연수생 · 공학석사

** 정회원 · 한국원자력연구소 · 책임기술원 · 공학박사

*** 정회원 · 충남대학교 · 교수 · 공학박사

이러한 맥락에서 이 논문에서는 무근 콘크리트에 대한 이축 응력실험을 바탕으로 격납건물 해석을 위한 콘크리트 재료모델을 도출하고 이를 진행 중인 격납건물 해석프로그램의 콘크리트 재료모델로 정식화 하고자 한다.

2. 콘크리트 재료모델

2.1 압축거동

3축응력상태의 콘크리트 항복조건은 일반적으로 3개의 응력불변항으로 정의할 수 있다. 그러나 콘크리트 구조해석에 있어서는 대부분의 경우에 I_1 과 J_2 두 개의 응력불변항으로 항복조건을 만족시킬 수 있다.(5) 따라서 이 논문에서는 식 (1)과 같이 두 개의 응력불변항과 두 개의 매개변수로 항복함수를 정의하였다.

$$f(I_1, J_2) = [\alpha I_1 + 3\beta J_2]^{1/2} = \sigma_0 \quad (1)$$

여기서 α 와 β 는 콘크리트의 재료 매개변수이고 σ_0 는 등가유효응력값으로 1축 압축실험으로부터 구할 수 있다. 그리고 I_1 과 J_2 는 식 (2)와 식 (3)으로 정의되는 응력불변량이다.

$$I_1 = \sigma_{ii} = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} \quad (2)$$

$$J_2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ji} = \frac{1}{2} \left(\sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} \right) \left(\sigma_{ji} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ji} \right) \quad (3)$$

$$= \frac{1}{6} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2] + \sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2$$

여기서 σ_{ij} 와 s_{ij} 는 각각 수직응력과 전단응력의 텐서량이고 δ_{ij} 는 크로네커 델타(kronecker delta)이다.

식 (1)의 항복기준을 3차원상에서 주응력(principle stress)항으로 나타내면 다음과 같다.

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \left\{ \alpha(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + \frac{1}{2} \beta [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \right\}^{1/2} \quad (4)$$

식 (4)는 3차원 응력장에서 콘크리트 파괴포락선에 대한 값이므로 쉘 구조해석을 위해 중층에 수직한 응력값 (σ_3)이 영이라 가정하면 식 (5)와 같은 파괴포락선을 정의할 수 있다.

$$f(\sigma_1, \sigma_2) = \left\{ \alpha(\sigma_1 + \sigma_2) + \beta [(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2)] \right\}^{1/2} \quad (5)$$

여기서 재료상수 α 와 β 는 2축 응력실험 결과로부터 구할 수 있다. 1축 압축실험으로부터 최대주응력(σ_1)은 최대 1축 압축강도 f'_c 에 도달할 때 값이고 이는 등가유효응력(σ_0)과 같으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_0 = (\alpha \sigma_1 + \beta \sigma_1^2)^{1/2} = (\alpha f'_c + \beta f_c'^2)^{1/2} \quad (6)$$

식 (6)을 매개변수 α 에 대해 정리하면,

$$\alpha = \frac{\sigma_0^2}{f_c'} - \beta f_c' \quad (7)$$

이다.

무균 콘크리트에 대한 2축 압축실험⁽¹⁾으로부터 $\sigma_1 = \sigma_2$ 일 때 항복발생 응력이 1.17이므로 식 (5)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_0 = (2.34\alpha f_c' + 1.17^2 \beta f_c'^2)^{1/2} \quad (8)$$

식 (8)에 식 (7)을 대입하고 $\sigma_0 = f_c'$ 이므로 매개변수 β 는 다음과 같이 결정된다.

$$\sigma_0 = f_c' = [2.34(f_c'^2 - \beta f_c'^2) + 1.17^2 \beta f_c'^2]^{1/2} \quad (9)$$

$$\therefore \beta = 1.379878 \quad (10)$$

식 (7)에 식 (10)을 대입하면

$$\therefore \alpha = -0.379878\sigma_0 \quad (11)$$

이다.

식 (5)에 재료상수 값을 대입하고 전체좌표계에 준하는 응력성분으로 항복함수를 나타내면 다음식과 같다.

$$f(\sigma) = [1.379878\{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)\} - 0.379878\sigma_0(\sigma_x + \sigma_y)]^{1/2} = \sigma_0 \quad (12)$$

그림 1에 도시한 바와 같이 콘크리트의 주응력이 일축압축강도의 35%를 넘으면 초기항복면(initial surface)에 도달하고 콘크리트의 주응력이 이 시점을 넘어서면 파괴면(failure surface)에 도달할 때까지 소성경화거동한다. 소성경화거동은 소성변형이 발생하는 동안 항복면의 이동을 정의하는데 소성영역에서 항복면의 이동은 소성경화규칙에 의해서 유효응력과 유효소성변형률의 관계로 가정된다. 이 논문에서는 소성경화규칙으로 포물선형태의 등방성 경화모델(isotropic hardening model)을 적용하였다.

$$\sigma_0 = E_0\epsilon - \frac{1}{2} \frac{E_0}{\epsilon_f} \epsilon^2 \quad (13)$$

여기서 E_0 는 초기 탄성계수이고 ϵ 는 전변형률 그리고 ϵ_f 는 최대응력에 상응하는 변형률값이다.

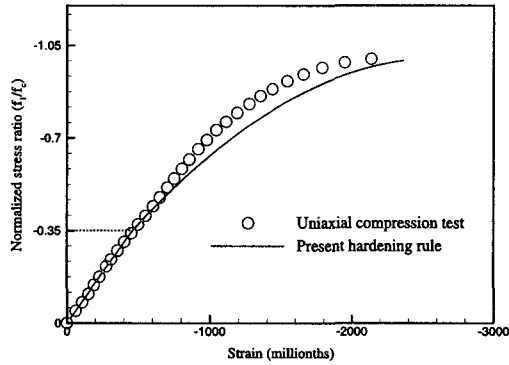


그림 1. 소성경화모델

2.2 균열발생기준

콘크리트 균열발생기준은 압축-인장영역에 Niwa 모델(6), 인장-인장영역에 Aoyagi-Yamada 모델(7)을 개발된 격납건물 전용해석프로그램(3),(4)에 사용해 왔다. Niwa 모델은 Kuper(8)에 의한 실험으로부터 도출한 포락선이고 Aoyagi-Yamada 모델은 철근콘크리트 셸 부재로부터 도출한 파괴포락선으로 그림 2에 도시한 바와 같이 이 논문에서 이용한 무근 콘크리트의 실험과 다소 차이를 보이고 있다. 따라서 실험으로부터 압축-인장영역과 인장-인장영역에 대한 콘크리트 파괴포락선을 다음과 같이 수정하였다.

$$(가) \text{ 압축-인장영역: } \left(\frac{\sigma_1}{f_t}\right)^{2/3} + \left(\frac{\sigma_2'}{f_c'}\right) = 1 \quad (14)$$

$$(나) \text{ 인장-인장영역: } \left(\frac{\sigma_1}{f_t}\right) + \alpha \cdot \left(\frac{\sigma_2'}{f_c'}\right)^2 = 1 \quad (15)$$

여기서 α 는 인장-인장영역의 포락선의 크기를 결정하는 계수이다. $\alpha = 0.26$ 일 경우 실험과 잘 일치하였다.

인장-인장영역의 콘크리트 파괴포락선은 Aoyagi-Yamada 모델을 도입하여 포락선의 크기를 결정하는 상수값을 수정하였다. 이 모델은 일축 인장강도값을 균열발생기준으로 직접 이용하지 않고 이축 인장응력상태를 고려하여 균열기준을 사용하므로 이축 인장하중상태에서 발생하는 콘크리트의 균열시점을 적절하게 예측할 수 있다.

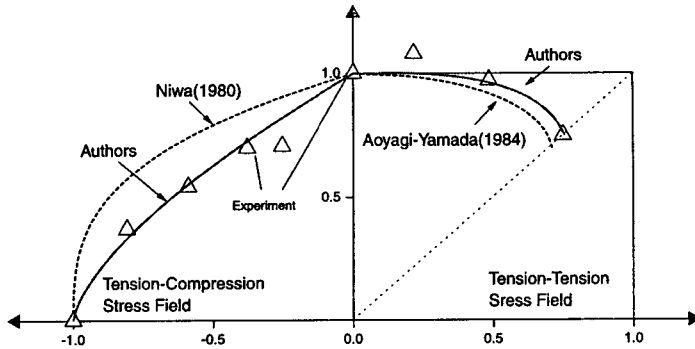


그림 2. 균열발생 기준

3. 수치예제

이 논문에서는 콘크리트의 비선형해석을 위해 가변형도법을 적용한 8절점 쉘 유한요소를 정식화 하였다.⁽⁴⁾ 요소의 절점당 자유도는 3개의 병진변위와 2개의 회전변위를 갖는다.

이축 응력시험에 사용된 콘크리트 시편은 $200 \times 200 \times 60mm$ 의 크기를 갖는 판형시편이다. 참고로 Kuper가 실험에 사용한 시편의 크기는 $200 \times 200 \times 50mm$ 이다. 콘크리트의 기본물성으로 압축강도 $398kg/cm^2$, 인장강도 $43kg/cm^2$, 탄성계수 $301,000kg/cm^2$ 그리고 포아송비는 0.1745이다. 이축 응력비($\alpha = \sigma_2/\sigma_1$)로는 압축-압축 영역의 경우 0, 0.2, 0.5, 1, 압축-인장영역은 -0.005, -0.1, -0.2, -0.3 그리고 인장-인장영역의 경우는 1, 2, 5, ∞ 이다.

쉘 유한요소해석을 위해 시험체를 4개의 8절점 요소로 이산화 하였고 하중은 각 모서리에 등분포로 가하였다. 비선형해석을 수행하기 위해 초기강성법을 이용하여 강성행렬을 형성하였고 수치적분은 정상적분을 사용하였다. 그리고 해석알고리즘으로는 호장법(arc-length control)을 이용하였다.

이축 압축-압축하의 응력-변형률관계에 대한 유한요소 해석결과와 실험결과를 그림 3에 도시하였다. 일축 압축하중을 받는 경우($\sigma_1/\sigma_2 = -1/0$) 콘크리트의 탄성한계는 $0.35f'_c$ 으로써 이는 앞에서 제시한 소성경화모델과 잘 일치하고 있다. 일축 압축하중의 경우 콘크리트에 압쇄가 발생할 때의 변형률은 0.00236으로써 실험값인 0.00231과 매우 유사하게 나타났다. 콘크리트의 최대 주압축응력의 크기는 이축 압축 하중비가 -1/-0.5, -1/-0.2, -1/-1 그리고 -1/0인 경우에 각각 $1.285f'_c$, $1.23f'_c$, $1.17f'_c$ 그리고 $1.0f'_c$ 으로 나타났다. 이축 압축 하중이 동시에 작용할 경우 조합하중으로 인한 구속효과가 발생하여 일축 하중만 작용할 경우 보다 큰 하중에 견딜 수 있음을 보인다. 콘크리트의 강성은 이축 압축하중비가 클수록 즉, 하중비가 -1/-1인 경우에 가장 큰 값을 보이고 일축 하중만 작용할 경우에 강성이 제일 작은 것으로 나타났다. 이러한 현상도 조합하중으로 인하여 구속효과가 생기기 때문이다. 압축-압축영역에서 해석에 의한 응력-변형률관계는 전반적으로 실험과 유사한 결과를 도출하였다.

이축 압축-인장하의 응력-변형률관계에 대한 유한요소 해석결과와 실험결과를 그림 4에 도시하였다. 그림에서 보듯이 인장하중이 증가할수록 파괴 변형률은 점차 낮아지고 있다. 이 영역에서 해석에 의한 콘크리트 응력-변형률관계는 실험결과와 잘 일치하고 있다. 인장-인장영역에 대한 응력-변형률관계는 비선형거동이 아닌 선형 탄성거동을 하므로 그림으로 도시하지는 않았다.

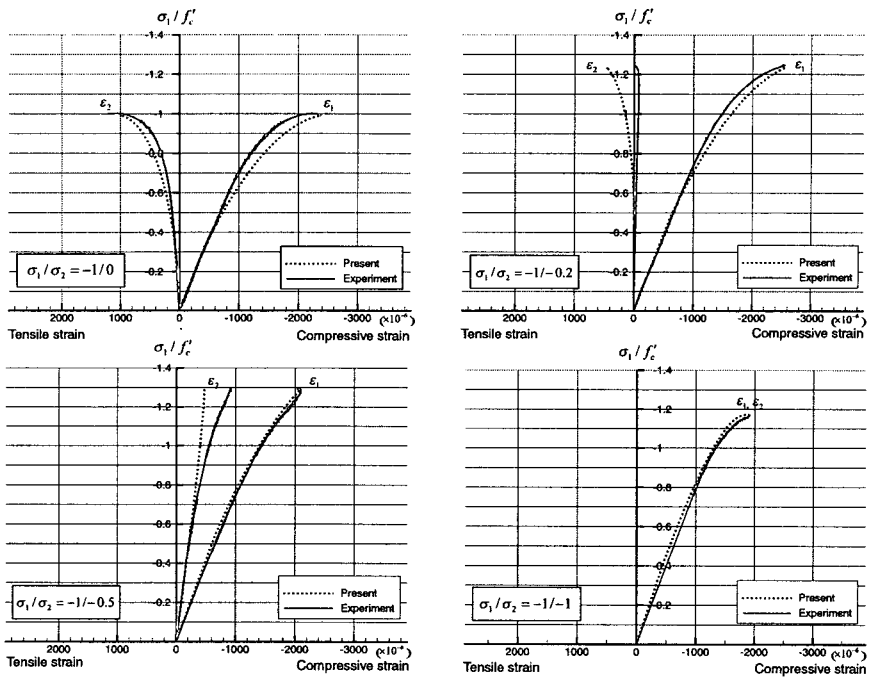


그림 3. 이축 압축-압축하의 응력-변형률곡선

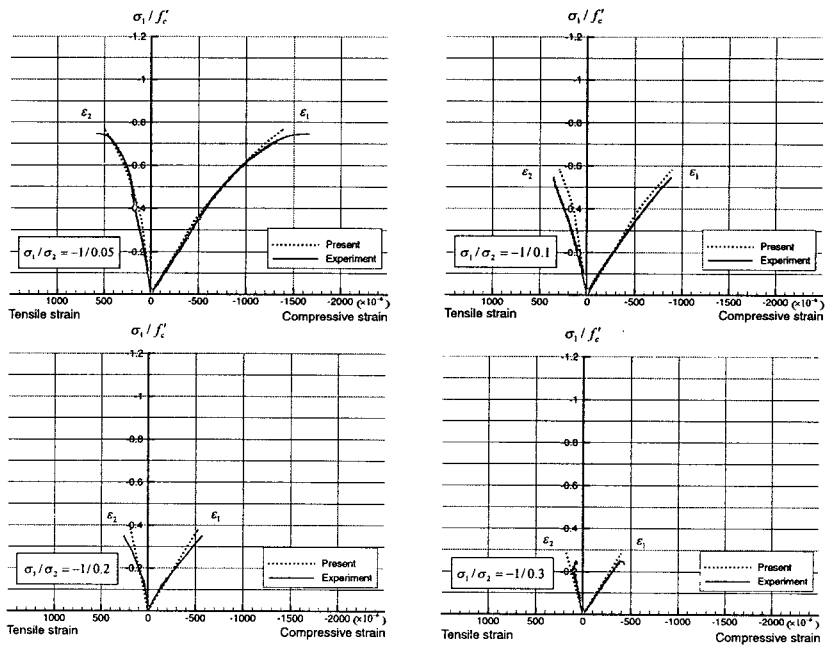


그림 4. 이축 압축-인장하의 응력-변형률곡선

각각의 영역에 대한 콘크리트의 최대응력값을 일축압축강도에 대한 상대강도비로 나타내어 이축 응력에 대한 콘크리트의 파괴포락선을 그림 5에 도시하였다. 각 영역에 대한 유한요소해석결과는 실험과 잘 일치하였고 압축-압축영역의 경우 Kuper의 결과보다 다소 높은 응력수준에서 파괴포락선이 형성되고 있다. 이축 응력장에서 해석에 의한 콘크리트의 파괴포락선이 실험과 잘 일치하므로 이 논문에서 제안한 콘크리트 재료모델이 격납 건물의 비선형해석에 직접적으로 적용될 수 있을 것으로 생각된다.

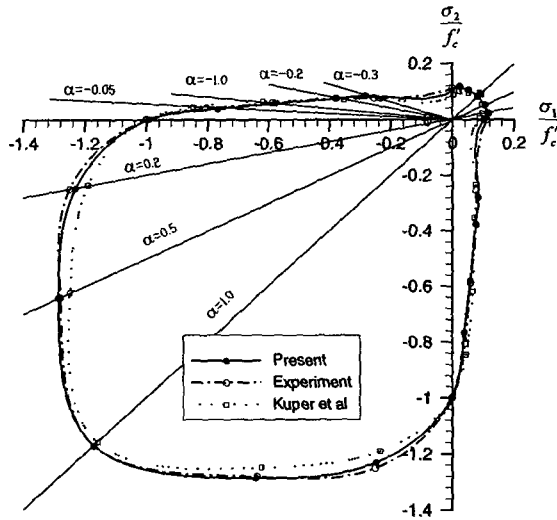


그림 5. 콘크리트의 이축 파괴포락선

4. 결론

이 논문에서는 원전 격납건물의 비선형해석을 하기 위한 콘크리트 재료모델개발과 개발된 재료모델을 이용한 비선형유한요소해석에 대해 기술하였다. 콘크리트의 압축거동은 등방성 소성경화를 고려한 탄소성 재료모델의 파괴포락선을 콘크리트 이축 응력실험으로부터 구한 재료상수값으로부터 수정하였다. 균열발생기준은 실험 결과로부터 새로운 모델을 제안하였고 제안된 모델을 기존에 사용했던 Niwa모델과 Aoyagi-Yamada 모델과 비교하면 압축-인장영역에서는 다소 낮은 응력수준으로 나타났고 인장-인장영역은 다소 높은 응력포락선을 형성하였다. 제안한 모델을 쉘 유한요소 해석 프로그램으로 정식화 하였고 이를 이용하여 이축 응력상태의 콘크리트에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석은 실험과 아주 유사한 결과를 도출하였고 이축 응력상태의 콘크리트 파괴시점을 잘 예측하였다. 따라서 이 논문에서 제안한 콘크리트 재료모델은 추후 격납건물의 비선형해석을 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. 이상근, 조명석, 송영철, 콘크리트 이축 응력시험, 전력연구원 과기부 수탁과제 2차년도 보고서, TM.99NE02.P2001.178, 2001, p.53
2. 김남식, 조남소, 구은숙, 조재열, 프리스트레스 콘크리트 격납건물 부재실험, 한국원자력연구소 위탁연구보고서, KAERI/CM-493/2001, 2001, p.177
3. 이상진, 이홍표, 서정문, 철근콘크리트 격납건물의 비선형해석을 위한 유한요소해석프로그램 NUCAS, 한국원자력연구소, KAERI/TR-2076/02, 2002, p.122
4. 이홍표, 이상진, 전영선, 서정문, 철근콘크리트 구조물의 비탄성해석을 위한 탄소성 쉘 유한요소모델에 대한 연구, 한국원자력연구소, KAERI/TR-2483/2003, 2003, p.81
5. Chen, W.F., *Plasticity in Reinforced Concrete*, McGraw-Hill Book Company, 1982, p.474
6. Niwa, K., *The Structural Characteristic of Reinforced Concrete Panel*, Msc. thesis, Department of Civil Engineering, University of Tokyo, 1980
7. Aoyagi, Y. and Yamada, K., Strength and Deformation Characteristics of RC Shell Elements subjected to In-plane Forces, *Concrete Library International JSCE*, No.4, 1984, pp.129-160
8. Kuper, H., Hilsdorf, K.H. and Rush, H., Behaviour of Concrete under Biaxial Stresses, *Precedings, ACI*, Vol.66, No.8, 1969, pp.656-666