

## 표준 8절점 고체요소를 이용한 원전 격납건물 벽체요소의 비선형해석

### Nonlinear Analysis of Nuclear Containment Wall Element using Standard 8-node Solid Element

이홍표\*                      전영선\*\*  
Lee, Hong-Pyo      Choun, Young-Sun

---

#### ABSTRACT

For the safety analysis of large structures such as nuclear containment buildings, we conventionally prefer to use analytical approach using finite element method rather than empirical test. Therefore, this paper is mainly focused to develop low-order solid finite element model with the elasto-plastic material model for the safety analysis of nuclear containment building. Drucker-Prager failure criteria in uncracked concrete and maximum tensile stress criteria in cracked concrete are used to model the constitutive behavior of concrete. The concrete material model takes into account the aspects of tensile strain, compression strength reduction of concrete and shear transfer to improve the accuracy of the finite element analysis. Finally, numerical simulation to compare the performance of the developed model with experimental results is employed. The numerical results in this study agree very well with the experimental data.

---

#### 1. 서론

원자력발전소의 격납건물은 냉각재 상실사고와 같은 내부압력이나 지진 등에 의한 외부하중으로부터 방사능 물질의 유출을 차폐하는 최후의 방벽역할을 한다. 따라서 가동 중인 격납건물에 대한 성능검증은 필수적이며 이를 위해 실험적인 방법과 해석적인 방법을 병행하는 것이 가장 바람직하다.

국내의 경우, 최근 원자력에 대한 관심이 증대되면서 원자력발전소의 안전관련 구조물 중에서 핵심인 격납건물의 구조성능과 파괴메카니즘 규명을 위해 무근콘크리트에 대한 이축 응력실험과 철근콘크리트 패널에 대한 이축 인장실험이 수행된 바 있다. 또한 이 실험들을 바탕으로 한 격납건물 전용해석프로그램(NUCAS)<sup>(1)</sup>의 개발 등과 같은 연구가 진행되고 있다. 이러한 일련의 연구는 단순히 구조물의 극한성능을 결정하려는 연구 활동을 지양할 뿐만 아니라 구조물의 파괴모드에 대한 전체적인 이해를 증진시키고 격납건물 전용해석프로그램의 개발을 촉진시킨다는 점에서 매우 고무적이다.

---

\* 정희원 · 한국원자력연구소 · 박사후연수생 · 공학박사

\*\* 정희원 · 한국원자력연구소 · 책임기술원 · 공학박사

따라서 이 논문에서는 격납건물의 비선형해석을 위해서 탄소성 재료모델을 바탕으로 한 표준 8절점 고체요소를 정식화 하였고 이를 NUCAS코드에 장착하였다. 그리고 작성된 프로그램의 성능을 검증하기 위해서 이축인장하중을 받는 격납건물 벽체 패널을 수치해석 하였고 이를 실험결과와 비교, 분석하였다.

## 2. 표준 8절점 고체요소

### 2.1 고체요소의 형상과 변위장

이 논문에서는 고체 유한요소를 형성하기 위해 변위와 기하학적 형상에 동일한 형상함수(shape function)를 적용하는 등매개변수법을 사용하였다. 등매개변수법은 변위의 적합조건을 항상 만족하며 불규칙한 기하학적 형상도 비교적 잘 표현하므로 가장 많이 사용된다. 따라서 표준 8절점 고체요소의 위치벡터와 변위장은 각각 다음과 같다.

$$\mathbf{x} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \sum_{a=1}^8 N_a(\xi_1, \xi_2, \xi_3) \begin{Bmatrix} x_1^a \\ x_2^a \\ x_3^a \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \sum_{a=1}^8 N_a(\xi_1, \xi_2, \xi_3) \begin{Bmatrix} u_1^a \\ u_2^a \\ u_3^a \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서  $a$ 는 절점번호를 나타내며  $x_1^a, x_2^a, x_3^a$ 와  $u_1^a, u_2^a, u_3^a$ 은 절점  $a$ 에서 각각 직각좌표값과 변위를 나타낸다. 그리고 요소의 형상함수  $N_a$ 는 다음과 같다.

$$N_a = \frac{1}{8} (1 + \xi_1 \xi_1^a) (1 + \xi_2 \xi_2^a) (1 + \xi_3 \xi_3^a) \quad (a=1, 8) \quad (2)$$

여기서  $\xi_1^a, \xi_2^a, \xi_3^a$ 은 절점  $a$ 의 자연좌표값이다.

절점의 위치는 그림 1에 도시한 바와 같고 각 절점은 3개의 이동변위를 갖는다. 그리고 고체요소 내부에 일정한 두께  $t_s$ 의 철근 층이 있다고 가정하였다. 이때 철근의 방향성은 자연좌표계와 철근이 이루는 각도를 이용하여 철근 층의 강성행렬을 형성할 때 고려하였다.

### 2.2 고체요소의 변형률

변형률항은 변위성분의 미분값을 사용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

여기서 고체요소의 변형률은 6개의 성분  $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{23}, \varepsilon_{13}$ 을 가진다.

이산화된 유한요소영역에서 변형률-변위행렬은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\mathbf{B}^a = \mathbf{L}[\boldsymbol{\varepsilon}] \quad (4)$$

여기서, 미분연산부호  $\mathbf{L}^T = \{\partial/\partial u_1^a, \partial/\partial u_2^a, \partial/\partial u_3^a\}$  이다.

그리고 절점 a와 연관된 행렬  $\mathbf{B}^a$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{B}^a = \begin{bmatrix} N_{a,1} & 0 & 0 & N_{a,2} & 0 & N_{a,3} \\ 0 & N_{a,2} & 0 & N_{a,1} & N_{a,3} & 0 \\ 0 & 0 & N_{a,3} & 0 & N_{a,2} & N_{a,1} \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

여기서,  $N_{a,i} (= \partial N_a / \partial x_i)$ 는 절점 a에 연관된 형상함수를 좌표  $x_i$ 에 대하여 미분한 값을 나타낸다.

### 2.3 고체요소의 강성행렬

절점 a, b에 연관된 요소의 강성행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{K}^{ab(e)} = \int_{\Omega^{(e)}} [\mathbf{B}^a]^T \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{B}^b d\Omega \quad (6)$$

여기서,  $\mathbf{B}^a$ 는 절점 a와 연관된 변형률-변위관계의 행렬을 나타내며 재료행렬  $\mathbf{D}$ 는 사용되는 재료에 준하여 형성된다.

## 2. 철근콘크리트 재료모델

### 2.1 균열전 콘크리트 모델

3축 응력상태의 콘크리트 항복조건은 대개의 경우  $I_1$ 과  $J_2$  두 개의 응력불변항(stress invariant)으로 나타낼 수 있기 때문에 이 논문에서는 Drucker-Prager의 항복기준을 바탕으로 다음과 같이 항복면을 정의하였다<sup>(2)</sup>.

$$f(I_1, J_2) = [\alpha I_1 + 3\beta J_2]^{1/2} = \sigma_0 \quad (7)$$

여기서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 콘크리트의 재료매개변수이고  $\sigma_0$ 는 등가유효응력값으로 1축 압축실험으로부터 구할 수 있다. 그리고  $I_1$ 과  $J_2$ 는 응력불변량이다.

식 (7)의 항복기준을 3차원 주응력항으로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \left\{ \alpha(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + \frac{1}{2} \beta [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \right\}^{1/2} \quad (8)$$

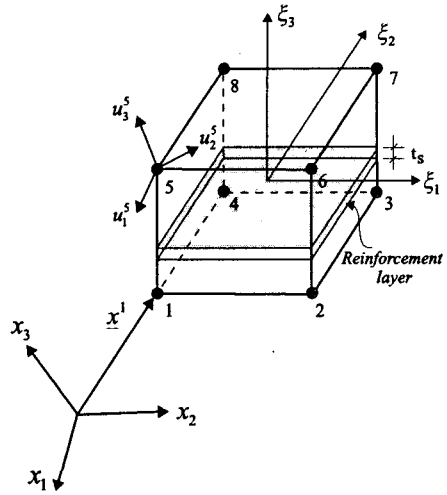


그림 1. 표준 8절점 고체요소

여기서, 재료상수  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 이축 응력실험<sup>(3)</sup>으로부터  $\alpha = -0.3799\sigma_0$ ,  $\beta = 1.3799$ 의 값을 도출하였다.

콘크리트의 압쇄파괴기준은 응력 또는 변형률을 이용하여 정의할 수 있는데 이 논문에서는 변형률기준을 적용하여 다음과 같은 압쇄파괴기준을 정의하였다.

$$3J_2' = \varepsilon_u^2 \quad (9)$$

여기서,  $J_2'$ 는 두 번째 편차변형률 불변항이고  $\varepsilon_u$ 는 일축 압축실험으로부터 구한 극한압축변형률이다.

## 2.2 균열후 콘크리트 모델

콘크리트의 균열은 최대인장응력이나 최대인장변형률기준을 이용하여 결정할 수 있다. 이 논문에서는 최대인장응력 기준을 사용하여 분산균열모델(smearred cracking model)을 도입하였다. 즉, 최대주응력이 인장강도보다 크면 주응력방향의 직각인 방향으로 균열이 발생하는 것으로 하였다. 균열이 발생하면 콘크리트는 이방성재료로 간주되며 이방성재료의 국부좌표계는 주응력의 방향과 일치하는 것으로 가정하였다. 그리고 균열이 방향은 균열이 생긴 후 고정되는 것으로 가정하는 고정균열모델(fixed crack model)을 적용하여 각 적분점에서 최대 두 개의 균열을 허용하였다.

삼축 인장영역에 대한 균열발생기준은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\sigma_{i0} = f_i', \quad (i = 1, 2, 3) \quad (10)$$

여기서,  $f_i'$ 는 실험으로부터 얻은 인장강도값이다.

인장-인장-압축과 인장-압축-압축영역에 대한 균열발생기준은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_{i0} = f_i' \left( 1 - \frac{\sigma_{i+1}}{f_c'} \right), \quad (\sigma_{i+1} \leq 0) \quad (11)$$

$$\sigma_{i0} = f_i' \left( 1 - \frac{\sigma_{i+1}}{f_c'} \right) \left( 1 - \frac{\sigma_{i+2}}{f_c'} \right), \quad (\sigma_{i+1}, \sigma_{i+2} \leq 0) \quad (12)$$

위와 같은 콘크리트의 3차원 균열발생기준에 대한 파괴면을 그림 2에 도시하였다.

콘크리트에 균열이 발생하면 응력-변형률관계는 점차 감소하게 된다. 이러한 현상을 인장연화(tension softening)라 하고 격납건물에 사용된 재료를 바탕으로 수행된 직접인장실험<sup>(4)</sup>으로부터 지수함수 형태의 인장연화모델이 가장 적합한 것으로 나타났다. 이때의 콘크리트 파괴에너지(fracture energy)는 대략 160~250N/m으로 평가되었다.

따라서, 이 논문에서는 콘크리트의 인장연화현상을 묘사하기 위해 다음 식과 같이 지수함수 형태의 연화모델을 사용하였다(그림 3).

$$\sigma_t = f_t' e^{-\frac{1}{\alpha}(e^{\alpha} - e)} \quad (13)$$

여기서,  $\epsilon_{cr}$ 는 콘크리트의 균열변형률이고 연성매개변수  $\alpha = G_f/f'_c l_c$ 이다. 각 적분점에서의 유효길이  $l_c$ 는  $(dV)^{1/3}$ 로 정의되며  $dV$ 는 유한요소 적분점에서 콘크리트의 부피를 나타낸다.

콘크리트에 균열이 발생하면 거친 균열면을 따라서 상당한 양의 전단응력을 전달할 수 있다. 무근콘크리트에서는 골재의 맞물림 작용에 의해 주도되므로 골재의 크기와 입도가 주요변수로 작용한다. 그리고 철근콘크리트에서는 다우얼(dowel) 작용이 중요하므로 철근비, 철근의 크기 그리고 균열과 철근 사이의 각도 등이 중요한 역할을 한다.

이러한 물리적 현상을 유한요소에 나타내기 위해서 전단계수를 감소시킴으로써 전단전달체계를 구현하였다. 즉, 다음과 같이 전단감소계수를 정의하였다.

$$G_c = \beta G_o \quad (14)$$

여기서,  $G_o$ 는 균열이 발생하지 않은 콘크리트의 전단계수이고  $\beta$ 는 감소계수이다. 감소계수는 상수값을 사용하는 경우도 있으나 분산균열모델에서 균열면에 수직한 방향의 인장변형률은 균열폭에 따라서 변하기 때문에 다음 식과 같이 감소계수를 인장변형률의 함수로 정의하였다(그림 4).

$$\beta = 1 - (\epsilon_t / 0.005)^\phi \quad (15)$$

여기서,  $\epsilon_t$ 는 균열면에 수직한 인장변형률이고  $\phi$ 는 매개변수으로써 일반적으로 0.3에서 1.0사이의 값을 갖는다.

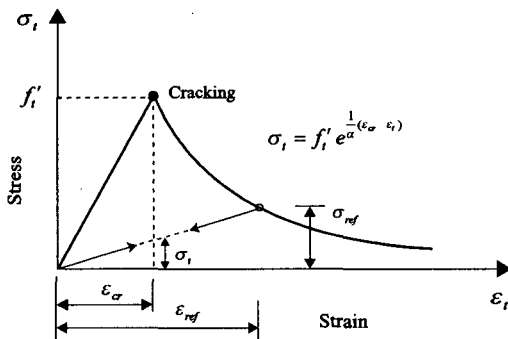


그림 3. 인장연화모델

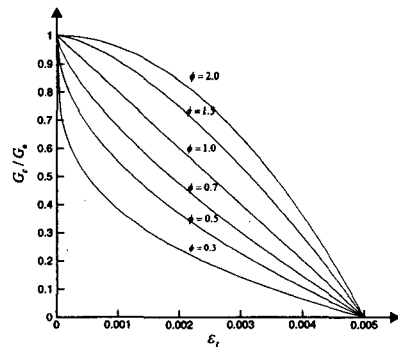


그림 4. 전단감소계수

### 2.3 철근 모델

철근은 축력에만 저항하는 일차원부재로 가정하여 응력-변형률관계를 압축과 인장영역에 동일하게 적용하여

쌍일차모델(bilinear model)을 이용하였다. 철근이 항복하기 전에는  $\sigma_y = E_s \varepsilon_s$ 와 같이 철근의 응력을 구하며 철근 항복후에는  $\sigma_y = E_{sy} \varepsilon_s$ 와 같이 가정하였다. 여기서  $E_s$ 와  $E_{sy}$ 는 각각 철근이 항복 전,후의 탄성계수이고  $\varepsilon_s$ 는 철근의 전변형률이다.

콘크리트 내부에 배근되어 있는 철근을 표현하기 위해서 이 논문에서는 그림 1에 도시한 것처럼 고체요소로서 일정한 두께를 갖는 분산모델(smearred model)을 이용하였다.

### 3. 수치해석

격납건물 벽체 패널의 이축 인장실험은 내압작용시 가장 큰 응력을 받는 것으로 알려진 벽체 중간부위를 실제 원자력발전소 격납건물의 1/2 두께로 제작하여 일축 및 이축하중에 의한 균열발생양상을 측정하기 위해 수행되었다<sup>(6)</sup>. 이와 유사한 실험이 미국의 CTL에서 수행된 바 있으나 국내의 경우 격납건물에 대한 비선형 거동 예측을 위해 유일하게 수행된 실험이라는 점에서 매우 고무적이다.

대상 실험체의 형상을 그림 7에 도시하였다. 시편의 크기는 1,500mm×1,500mm×600mm이고 텐던을 매설하기 위한 덕트(duct)가 수평방향으로 2개, 수직방향으로 1개가 존재한다. 철근은 D-35가 사용되었고 수평과 수직방향으로 각각 8개씩 배근하였다.

콘크리트의 재료특성치는 표 1에 나타내었고 철근의 탄성계수는 E=205,744MPa, 항복응력은  $f_y=410$ MPa이다.

변형률과 변위는 패널의 상부 철근과 하부 철근에 부착된 변형률게이지와 상면에 부착된 LVDT로부터 측정되었다. 이 논문에서는 실험결과와 해석결과를 비교하기 위하여 그림 7에 도시한 것처럼 상부 철근(HTX2)과 하부 철근(HBX2)에 부착된 변형률게이지로부터 측정된 값을 이용한다.

유한요소해석을 위한 전체 패널을 4개의 요소로 이산화 하였고 하중은 작용면에 등분포하게 적용하였다. 참고로 실험에서는 노출된 철근(exposed bar)에 집중하중을 가하였다. 비선형해석을 수행하기 위해 초기강성법을 이용하여 강성행렬을 형성하였고 수치적분은 정상적분을 사용하였다. 또한 콘크리트 균열발생 이후에 나타나는 국부변형도를 추적하기 위해 호장법(arc-length method)을 이용하였다.

이 논문에서 작성한 프로그램을 이용한 해석결과와 실험결과 및 상용프로그램 ABAQUS<sup>(6)</sup>를 이용하여 구한 해석결과를 그림 6에서 그림 9에 도시하였다. 순수 철근(bare bar)의 재료실험으로부터 구한 응력-변형률곡선과 패널 실험에서 노출된 철근(exposed bar)에 부착된 변형률게이지에서 측정된 응력-변형률곡선은 거의 유사한 거동을 나타내고 있지만 철근의 평균응력-변형률곡선(HBX2, HTX2)은 상당한 차이를 보이고 있다. 즉, 콘크리트에 균열이 발생하기

표 1. 콘크리트의 재료특성치

	압축강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	하중비
PV1	41.2	1.88	30,020	1:0
PV2	41.9	1.96	28,328	1:0.5
PV3	61.4	2.05	29,053	1:0
PV4	54.5	1.95	29,435	1:0.5

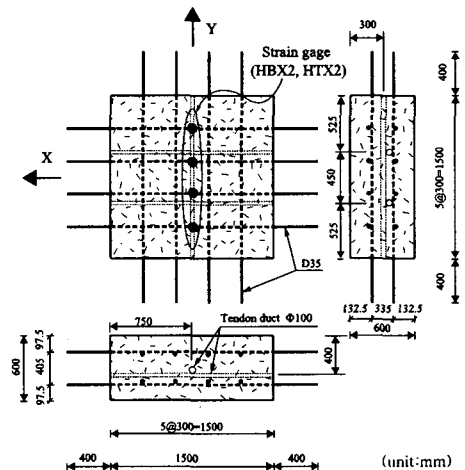


그림 5. 벽체 패널에 대한 형상

전에는 콘크리트와 철근의 부착에 의해서 철근콘크리트의 강성이 철근만의 강성보다 상당히 증가되고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 유한요소해석에서도 잘 나타나고 있다.

유한요소 해석결과로부터 콘크리트에 균열이 발생하기 전의 강성은 실험과 유사하게 나타났고 초기균열발생 시점도 실험과 비슷하게 나타났다. 대상 실험체에서 첫 번째 균열은 텐던 덕트가 매설된 위치에서 발생하였고 하중이 증가할수록 점차적으로 콘크리트 표면으로 퍼져나갔다. 이것은 텐던 덕트가 매설된 위치에서 콘크리트의 단면손실이 가장 크기 때문이다. 그러나 해석에서는 요소의 측면에 균일한 등분포하중을 가하였고 분산모델을 이용하여 요소의 전면적에 균일한 두께로 철근층을 형성했기 때문에 모든 요소에서 동일한 하중시점에서 균열이 발생하였다.

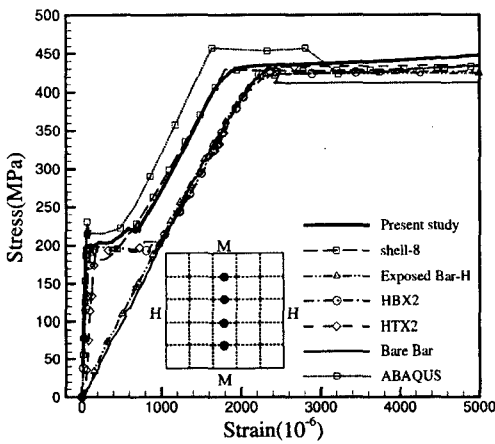


그림 6. PV1에 대한 해석결과

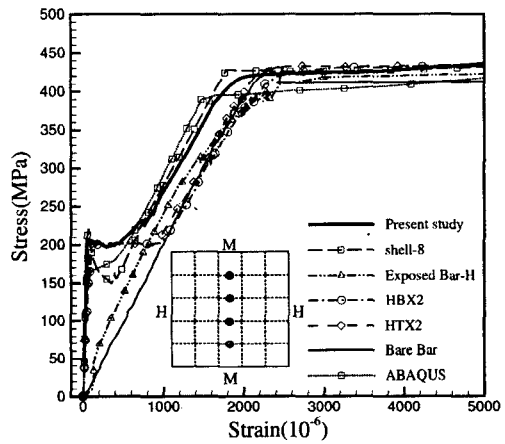


그림 7. PV2에 대한 해석결과

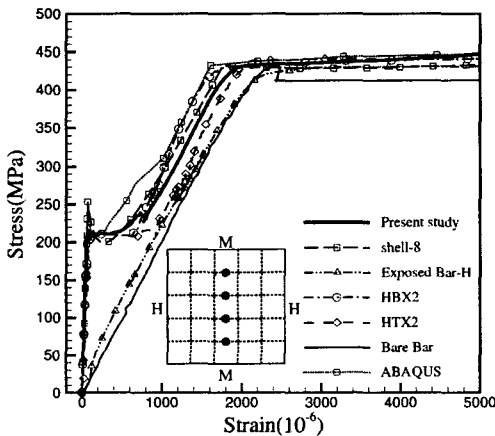


그림 8. PV3에 대한 해석결과

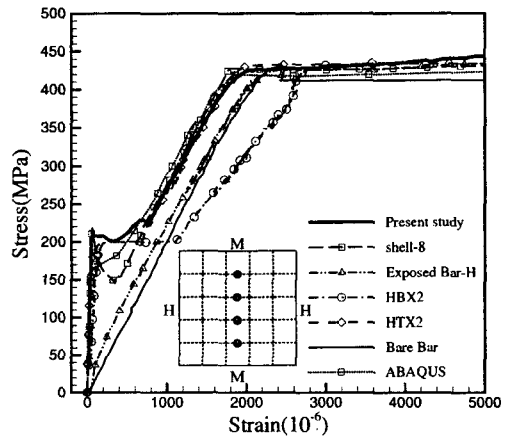


그림 9. PV4에 대한 해석결과

콘크리트에 초기균열이 발생하면 불연속면에 의해서 급격한 변형률의 증가가 발생하는데 이러한 현상은 이 논문의 해석결과와 ABAQUS에 의한 해석결과에서 모두 잘 나타나고 있다. 다만, 쉘 요소에 의한 해석결과인 shell-8<sup>(7)</sup>은 균열발생 후 콘크리트의 국부변형도 추적을 위해 응력-변형률선도가 급격하게 감소하다가 해의 안정성을 확보하면 서서히 증가하고 있다. 그러나 전반적인 거동에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

실험결과에서 균열발생 후 곡선의 기울기가 여러 단계에 걸쳐서 변화하는데 이것은 실험체 내에서 추가적인 균열이 계속 발생하기 때문이다. 그러나 유한요소 해석에서는 앞에서 언급한 바와 같이 동일한 하중에서 모든 요소의 가우스적분점에서 균열이 발생하였기 때문에 균열발생시점에서 약간의 기울기 변화를 제외하면 철근 항복전까지 곡선의 기울기 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

모든 실험체의 해석결과에서 보듯이 철근의 항복시점은 실험결과와 매우 유사한 응력수준에서 발생하였다. 또한 철근의 항복 후에도 철근의 강성은 어느 정도 존재하는 소성경화거동을 보이고 있다. 벽체 패널에 대한 유한요소 해석결과로부터 이 논문에서 제안한 해석기법은 실험결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

이 논문에서는 원전 격납건물의 비선형해석을 하기 위해서 탄소성 재료모델을 도입한 표준 8절점 고체요소를 정식화 하였다. 균열발생전 콘크리트의 압축거동은 등방성 소성경화를 고려한 탄소성 재료모델의 파괴포락선을 콘크리트 이축 응력실험으로부터 구한 재료상수값으로부터 수정하였다. 균열발생기준은 최대인장응력기준을 적용하였다. 또한 균열면에서 압축강도 감소와 전단전달 및 인장연화모델과 같은 세부재료모델을 구현하였다. 작성한 요소의 성능을 검증하기 위해서 이축인장 하중을 받는 격납건물 벽체패널에 대한 수치해석을 수행하였다. 유한요소 해석결과는 초기 균열발생 및 철근의 항복시점을 실험과 아주 유사하게 예측하였고 전반적인 응력-변형률관계도 잘 추적하였다. 따라서 이 논문에서 작성한 철근콘크리트 고체요소는 추후 격납건물의 비선형해석을 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

#### 참고문헌

1. 이상진, 이홍표, 서정문, 철근콘크리트 격납건물의 비선형해석을 위한 유한요소해석프로그램 NUCAS, 한국원자력연구소, KAERI/TR-2076/02, 2002, p.122
2. Chen, W.F., *Plasticity in Reinforced Concrete*, McGraw-Hill Book Company, 1982, p.474
3. 이상근, 조명석, 송영철, 콘크리트 이축 응력시험, 전력연구원 과기부 수탁과제 2차년도 보고서, TM.99NE02.P2001.178, 2001, p.53
4. 이상근, 송영철, 콘크리트 인장연화모델 개발, TM.99NE02.P2002, 한국전력공사 전력연구원, 2002, p.56
5. 김남식, 조남소, 구은숙, 조재열, 프리스트레스 콘크리트 격납건물 부재실험, 한국원자력연구소 위탁연구보고서, KAERI/CM-493/2001, 2001, p.177
6. ABAQUS, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. Ver. 6.3, 2002.
7. 이홍표, 이상진, 전영선, 서정문, 철근콘크리트 구조물의 비탄성해석을 위한 탄소성 쉘 유한요소모델에 대한 연구, 한국원자력연구소, KAERI/TR-2483/2003, 2003, p.81