

8절점 가변형도 쉘요소를 이용한 격납건물 벽체요소의
탄소성 응력해석

Elasto-Plastic Stress Analysis of Containment Wall Element
using 8-node Assumed Strain Method

이홍표, 이상진, 전영선, 서정문
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구에서는 격납건물 전용해석 프로그램인 NUCAS의 모듈 중 하나인 탄소성 재료모델을 8절점 가변형도 쉘요소를 이용하여 개발하였다. 탄소성 재료모델의 성능검증을 위해 국내 원전의 격납건물 벽체요소에 대해 비선형 유한요소해석을 수행하고 해석결과를 실험결과와 비교함으로써 이축인장하중을 받는 철근콘크리트 패널의 거동을 지배하는 콘크리트 균열기준, 인장강성모델 그리고 철근모델의 재료적 성능을 분석하였다. 수치해석결과 본 연구에서 사용한 콘크리트의 균열기준과 지수함수형태의 인장강성모델은 이축인장하중을 받는 철근콘크리트 패널의 응력-변형률선도를 실험결과와 유사하게 예측하였다.

Abstract

In this study, elasto-plastic material model using a 8-node assumed strain shell element is developed. To evaluate performance of the elasto-plastic material model nonlinear finite element analysis for the containment wall element in nuclear power plant are carried out and its results are compared with experiment results. The present study evaluates material performance such as cracking criteria, tension stiffening model and steel model in the RC panel subjected to biaxial tensile loads. From numerical results, the cracking criteria and exponential form of tension stiffening model in concrete perform well in the RC panel analysis under biaxial tensile loading conditions and it produces a good agreement with experiment results.

1. 서론

원전 격납건물은 사고시 방사능물질의 외부유출을 차폐하는 최후의 방벽역할을 한다. 따라서 격납건물에 대한 구조 안전성평가는 필수적이며 이를 위해서는 격납건물 건설 당시의 건설재료를 사용한 실험과 수치해석을 통한 성능검증을 병행해야 한다. 이러한 취지에서 국내 격납건물 벽체요소에 대한 균열거동과 구성방정식 도출을 위한 실험¹⁾이 수행된 바 있고 이 실험에 대한 수치해석 모델개발이 활발하게 진행되고 있다. 이 실험은 격납건물 벽체요소의 균열거동과 이축인장하중을 받는 철근콘크리트 패널의 거동특성을 규명하고자 하였다. 본 연구에서는 한국원자력연구소에서 개발하고 있는 격납건물 전용해석 프로그램인 NUCAS²⁾의 모듈로 개발된 탄소성 재료모델에 대한 성능검증을 위해 격납건물 벽체요소의 균열거동실험과 구성방정식 도출을 위한 실험을 유한요소해석하고 이를 실험결과와 비교분석하였다.

2. 격납건물 벽체요소의 실험 개요

격납건물 벽체요소의 이축인장실험¹⁾은 균열양상을 분석하기 위한 실험과 구성방정식도출을 위한 실험을 목적으로 수행되었다. 균열양상을 분석하기 위한 실험은 내압사고시 가장 큰 응력을 받는 벽체 중앙부위를 1/2 두께로 제작하여 원환과 자오선방향의 하중비를 각각 2:1로 하였고 6개의 패널에 대해 수행하였다. 구성방정식도출을 위한 실험은 국내 원전에 사용된 철근비를 고려하여 4개씩 제작한 12개의 패널에 대해 수행하였다. 실험체에 가해진 이축인장하중은 외부철근에 등분포하게 인장력을 가하였다. 본 연구에서는 균열양상을 분석하기 위한 실험체인 CP-B-S40과 CP-B-S60 그리고 구성방정식도출을 위한 실험체 중에서 R1-1 패널의 실험결과를 이용하여 유한요소 해석결과와 비교하였다. 이들 실험체에 대한 제원은 그림 1에 도시하였다.

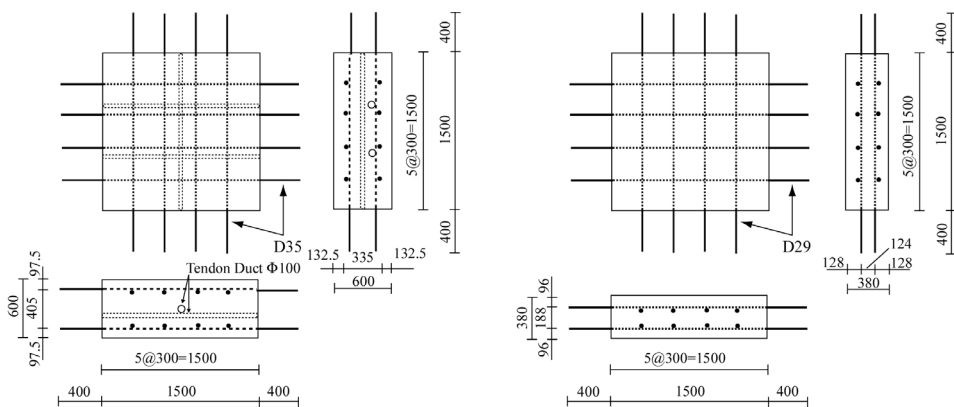


그림 1 실험체의 형상: (좌) CP-B-S40, S60, (우) CL-B-R1-1

표 1 격납건물 벽체 패널제작에 사용된 재료특성치

재료 실험체명	콘크리트				철근			
	압축강도 (MPa)	인장강도(MPa)		탄성계수 (MPa)	철근비	항복응력 (MPa)	탄성계수 (MPa)	철근직경 (mm)
		할렬강도	초기균열					
CP-B-S40	41.2	2.87	1.96	28,328	0.0085	410	205,744	35
CP-B-S60	54.5	5.00	1.95	29,435				
CL-B-R1-1	44.0	2.56	1.73	25,160	0.0090	404	194,413	29

CP-B-S40과 CP-B-S60은 콘크리트의 압축강도가 설계기준강도인 40MPa와 최대발현 강도인 60MPa를 목표로 제작되었으며 재료실험을 통한 물성치는 표 1에 나타내었다. 이들 패널은 동일한 D35 철근을 사용하였으며 그림 1에 도시한 것처럼 원환방향과 자오선 방향으로 각각 2개와 1개의 텐돈덕트를 매설하였다. 유한요소해석시 텐돈 덕트에 대한 영향은 고려하지 않았다.

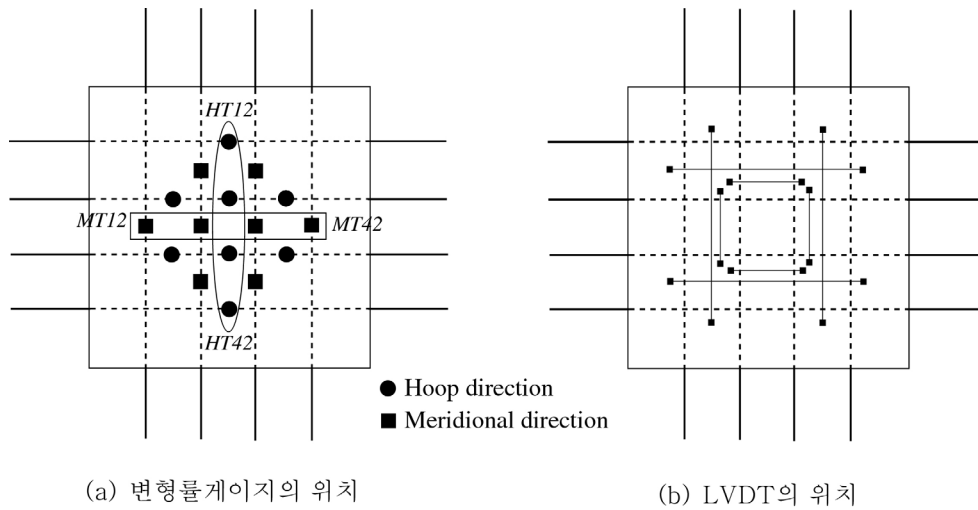


그림 2 변형률게이지와 변위계

실험체의 변형률과 변위는 그림 2에 도시한 바와 같이 패널의 상부면(HT,MT)과 하부면(HB,MB)에 부착된 변형률게이지와 상부면에 설치된 LVDT에서 측정하였다. 실험결과와 해석결과를 비교하기 위해 그림 2(a)에 도시된 위치의 변형률계로부터 측정한 상부면과 하부면의 평균값을 사용하였다.

3. 철근콘크리트 재료모델

본 연구에서는 격납건물의 재료적 특성을 표현하기 위해 Drucker-Prager³⁾ 항복기준을 바탕으로 한 탄소성 재료모델⁴⁾을 사용하였다. 이 재료모델은 콘크리트 압축거동과 균열 발생기준, 인장강화효과, 전단전달모델 그리고 균열면에서의 압축강도 감소모델로 구성된다. 콘크리트의 균열발생은 인장-인장영역과 인장-압축영역으로 나누어 적용하였고 균열 발생 후 철근과 콘크리트의 부착현상으로 발생하는 인장강성효과는 지수함수식을 이용하였다.

균열이 발생하지 않은 콘크리트는 등방성물질로 간주되며 탄성응력-변형률관계가 성립된다. 그러나 균열이 발생한 콘크리트는 균열로 인해 새로운 재료축이 생기고 이방성물질로 간주된다. 특히 격납건물 벽체부위와 같이 이축인장하중을 받는 경우 콘크리트 균열기준과 균열 후 거동을 지배하는 구성방정식은 해석결과에 큰 영향을 미친다.

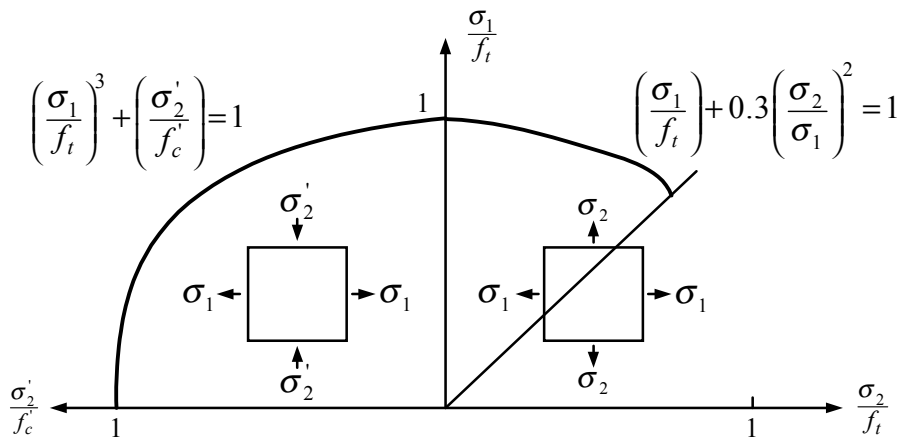


그림 3 콘크리트 균열기준

콘크리트 균열기준은 그림 3에 도시한 바와 같이 Aoyagi-Yamada⁵⁾가 제시한 모델을 이용하였다. 이 재료모델은 일축인장강도값을 균열발생기준으로 직접 이용하지 않고 이축인장응력상태를 고려한 균열기준을 사용하므로 이축인장하중상태에서 발생하는 철근콘크리트의 균열시점을 적절하게 예측할 수 있다. 첫 번째 균열이 생긴 후 그 방향을 계산한 뒤 균열면에서 최대응력을 계산하고 그 값이 한계값을 초과할 때 두 번째 균열이 첫 번째 균열의 직각방향으로 생긴다고 가정하였다. 그리고 각 적분점에서 최대 두개의 균열을 허용하였으며 개개의 균열발생에 대한 진전보다는 전체적인 균열발생에 관점을 두어 분산균열모델(smearred crack model)을 적용하였다.

철근콘크리트 재료는 콘크리트에 균열이 발생한 후에도 철근에 의해 인장력에 저항할 수 있다. 이를 인장강성효과(tension stiffening effect)라 하고 철근의 강성을 변화시키거

나 콘크리트의 응력-변형률관계를 조절함으로써 표현할 수 있다. 본 연구에서는 인장강성효과를 고려하기 위해 그림 4에 도시한 바와 같이 철근콘크리트 비선형 유한요소해석에 널리 사용되고 있는 지수형태의 인장강성모델을 이용하였다. 이때 지수값으로 $c=0.4$ 를 사용하였다.

콘크리트내의 철근은 인장과 압축영역에서 동일하게 축력에만 저항하는 부재로 간주된다. 콘크리트에 균열이 생기기 전의 철근은 탄성재료로 거동하고 균열이 발생한 면에서는 응력집중현상이 발생하여 균열이 발생하지 않은 곳보다 큰 힘을 받게 된다. 따라서 콘크리트내의 철근은 나철근의 항복응력보다 작은 응력에서 항복할 수 있다. 이러한 현상은 철근의 평균응력-변형률관계를 적용하여 나타낼 수 있는데 본 연구에서는 다음식과 같이 Hsu⁶⁾가 제시한 쌍일차 철근모델을 이용하였으며 그림 5에 도시하였다.

$$\frac{f_y^*}{f_y} = 1 - \frac{1.5\sqrt{n}}{\rho} \left(\frac{f_{cr}}{f_y} \right)^{1.5} \quad (1)$$

여기서 n 은 콘크리트와 철근의 탄성계수비이고 f_{cr} 은 콘크리트 인장균열장도, ρ 는 철근비 그리고 f_y 는 나철근의 항복응력값이다.

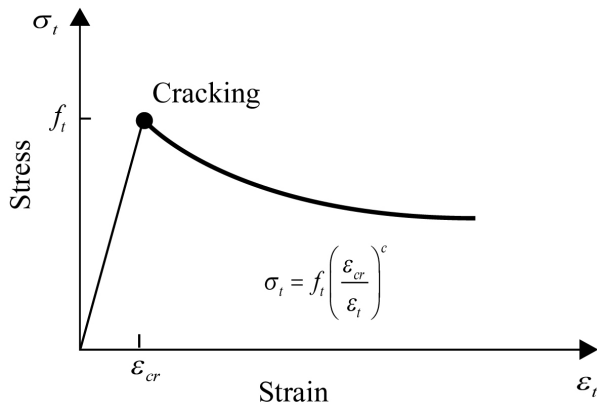


그림 4 인장강성모델

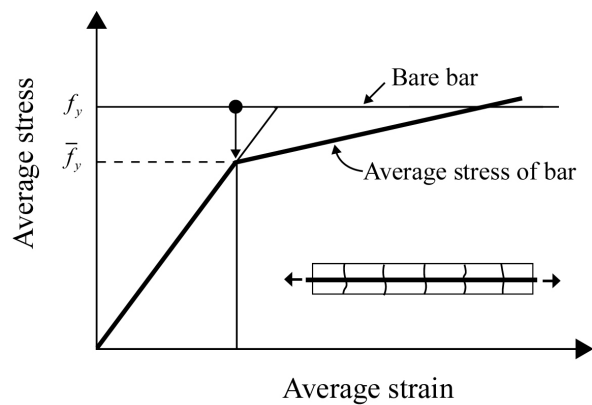


그림 5 쌍일차 철근모델

4. 셸 유한요소

본 연구에서는 등매개요소를 변형시켜 구성하는 퇴화고체개념의 8절점 셸요소⁷⁾를 정식화 하였다. 퇴화고체 셸요소는 특정한 셸이론에 구애받지 않고 임의의 셸구조를 이산화할 수 있으며 비선형으로의 확대가 쉬우므로 가장 많이 사용된다. 그리고 휨변형도 뿐만

아니라 전단변형까지 고려하기 위해 다음과 같은 Reissner-Mindlin가정⁸⁾을 도입하였다. RM 유한요소에서 발생할 수 있는 강성과대현상을 방지하기 위해 가변형도법(assumed strain method)²⁾을 도입하였다. 가변형도를 유도하기 위해서는 강성과대현상을 일으키지 않는 유한요소내부의 표본점(sampling point)의 위치를 구하고 그 점에서 계산된 변형도와 보간함수를 이용하여 가변형도를 형성하는 것이다. 본 연구에서 가변형도를 형성하기 위한 표본점의 위치는 그림 6에 도시한 바와 같고 가변형도를 이용하여 형성한 대체변형도 $\epsilon_{ij}^{(a)}$ 는 다음과 같다.

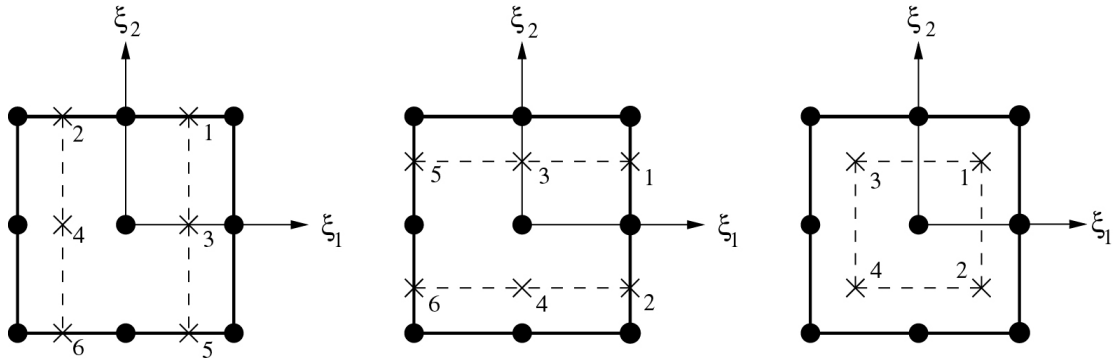


그림 6 변형도 형성을 위한 표본점: (좌) $\epsilon_{11}, \epsilon_{23}$ (중앙) $\epsilon_{22}, \epsilon_{13}$ (우) ϵ_{12}

$$\begin{aligned}
 \epsilon_{11}^{(a)} &= \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^2 P_i(\xi_1) Q_j(\xi_2) \epsilon_{11}^{\delta}, & \epsilon_{22}^{(a)} &= \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 Q_i(\xi_1) P_j(\xi_2) \epsilon_{22}^{\delta} \\
 \epsilon_{13}^{(a)} &= \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^2 P_i(\xi_1) Q_j(\xi_2) \epsilon_{13}^{\delta}, & \epsilon_{23}^{(a)} &= \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 Q_i(\xi_1) P_j(\xi_2) \epsilon_{23}^{\delta} \\
 \epsilon_{12}^{(a)} &= \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 Q_i(\xi_1) P_j(\xi_2) \epsilon_{12}^{\delta}
 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\delta = 2(j-1) + i$ 는 그림 6에 도시된 표본점의 위치를 나타내며 대체변형도를 형성하기 위하여 도입한 보간함수 $P_i(\xi), Q_i(\xi)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 P_1(\xi) &= \frac{1}{2} (1 + \sqrt{3}\xi), & P_2(\xi) &= \frac{1}{2} (1 - \sqrt{3}\xi) \\
 Q_1(\xi) &= \frac{1}{2} \xi(\xi + 1), & Q_2(\xi) &= 1 - \xi^2, & Q_3(\xi) &= \frac{1}{2} \xi(\xi - 1)
 \end{aligned} \quad (3)$$

5. 수치 해석

패널의 유한요소해석을 위해 전체 패널을 4개의 유한요소로 이산화 하였고 철근은 전면적에 걸쳐 등가의 두께로 균일하게 분포한다고 가정한 분산모델을 이용하였다. 따라서 실험시 철근에 가해진 인장하중은 유한요소의 네변에 균일하게 적용하였다. 비선형해석을 수행하기 위해 초기강성법을 도입하여 강성행렬을 형성하였으며 콘크리트에 균열발생 후 국부적인 해의 경로를 추적하기 위해 호장법(arc-length method)을 사용하였다. 또한 하중제어법을 사용하여 호장법과 비교하였다. 본 연구에서 도출한 해석결과는 실험결과와 ABAQUS⁹⁾를 이용한 해석결과와 함께 그림 7, 8, 9에 도시하였고 제시된 해석결과는 모두 원환방향에 대한 응력-변형률선도이다. ABAQUS를 이용한 해석결과는 전 절에서 언급한 인장강성모델과 철근모델을 이용하였다.

해석결과로부터 가변형도법을 도입한 8절점 탄소성 쉘요소는 철근콘크리트 패널의 균열시점을 잘 예측하였다. 철근콘크리트의 균열시점은 콘크리트의 인장강도와 밀접한 관계를 갖는데 유한요소해석시 할렬인장강도와 실험으로부터 제시된 균열강도를 사용할 수 있다. 표 1에서 보는 바와 같이 간접인장시험으로 구한 할렬인장강도는 초기균열강도보다 크기 때문에 유한요소해석시 초기균열시점을 과대평가할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 초기균열강도를 사용하였다. 유한요소해석결과는 하중비가 2:1인 CP-B-S40과 CP-B-S60 패널은 실험결과보다 약간 높은 응력값에서 초기균열이 발생하였고 하중비가 1:1인 R1-1 패널은 실험결과보다 낮은 응력값에서 초기균열이 발생하였다. 이는 앞에서 제시한 인장-인장영역에서 파괴포락선이 초기균열 발생시점을 잘 예측하지만 이축하중비의 차이가 작을 경우 초기균열 발생시점을 다소 과소평가하는 것으로 판단된다. 참고로 ABAQUS의 해석결과도 이와 유사한 경향을 나타내고 있다.

콘크리트에 균열발생 후 호장법을 이용한 해석결과는 응력-변형률선도가 하향 후 상승하는 변곡점을 갖는데 이는 균열로 인한 국소파괴가 생겨 정확한 해의 경로를 호장법이 추적해 가기 때문이다. 반면에 하중제어법은 실험결과와 마찬가지로 균열 후 변형률의 급격한 증가를 보이고 있다. 균열 후 응력-변형률선도는 전체적으로 실험결과와 유사한 거동을 보인다. 특히 격납건물의 1/2 두께로 제작된 S40과 S60 패널은 동일한 재료를 사용하였고 콘크리트의 압축강도를 다르게 하였지만 전체적인 응력-변형률선도는 크게 다르지 않았다. 이 패널실험으로부터 압축강도는 이축인장하중을 받는 철근콘크리트 패널의 응력-변형률선도에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 사료된다. S40과 S60 패널에서 해석에 의한 철근의 항복시점은 실험결과에 비해 다소 낮게 나타났지만 R1-1 패널의 경우 원환방향에 대한 유한요소해석결과는 실험결과와 다소 차이를 나타내고 있다. R1-1 패널은 동일한 하중비(1:1)로 원환방향과 자오선방향으로 가해지기 때문에 원환방향과 자오선방향에 대한 응력-변형률선도가 거의 동일한 결과를 나타내야 한다. 그러나 그림 9에서 보듯이 콘크리트 균열발생 후 원환방향과 자오선방향의 응력-변형률선도가 큰 차이를 보이

고 있다. 이는 균열이 발생한 지점으로 응력집중현상이 발생하여 균열이 발생하지 않은 곳보다 더 많은 응력을 받기 때문이다.

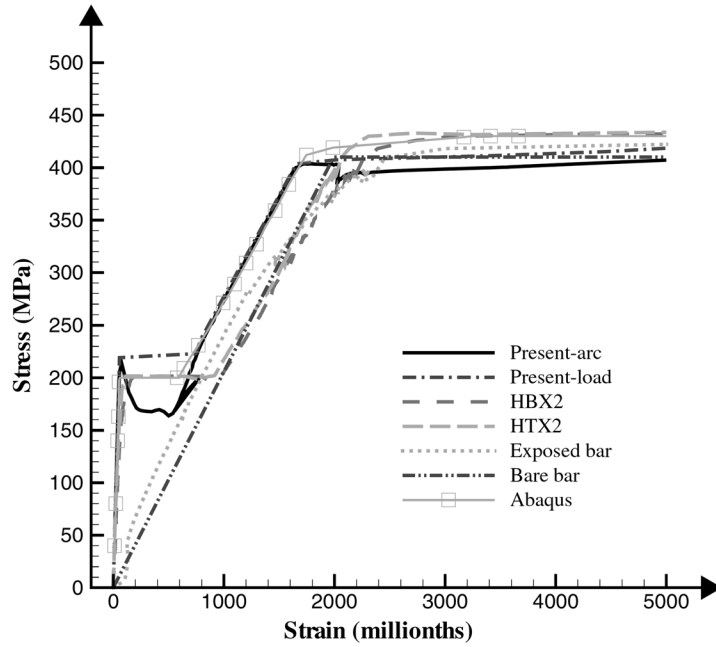


그림 7 CP-B-S40 패널의 응력-변형률선도

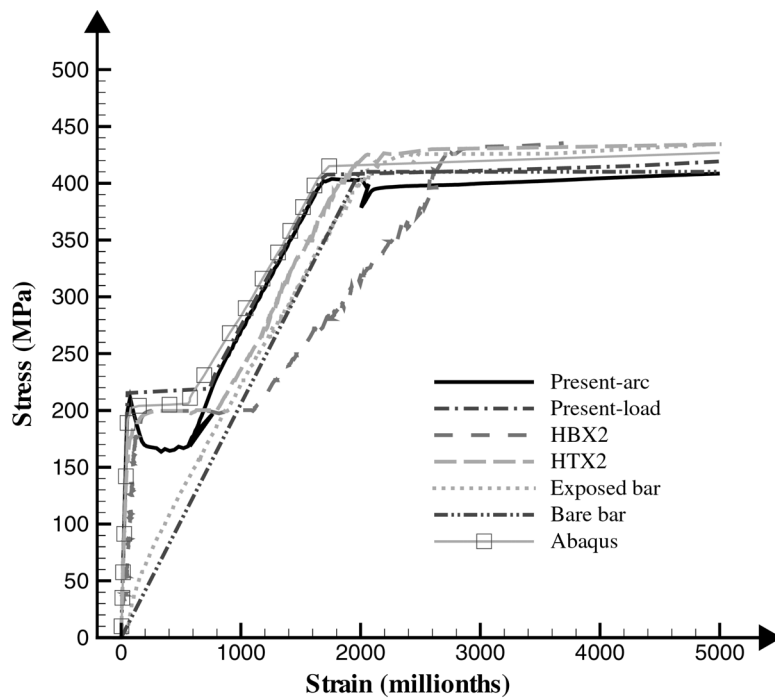


그림 8 CP-B-S60 패널의 응력-변형률선도

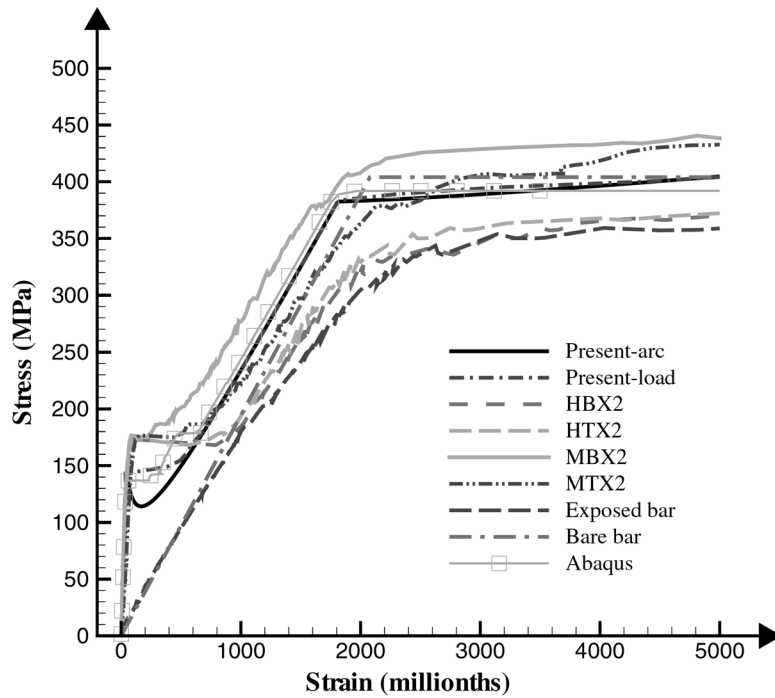


그림 9 CL-B-R1-1 패널의 응력-변형률선도

6. 결론

본 연구에서는 격납건물 전용해석 프로그램인 NUCAS의 모듈로 개발된 탄소성 재료모델의 성능검증을 위해 이축인장하중을 받는 철근콘크리트 격납건물 벽체요소의 비선형 유한요소해석을 수행하였고 그 결과를 실험결과와 비교분석하였다. 유한요소해석결과 이축인장하중상태의 패널은 균열기준과 인장강성모델 그리고 철근모델에 지배적인 영향을 받는 것으로 나타났다. 본 연구에서 사용한 콘크리트 균열기준은 이축하중비가 작을수록 초기균열 발생시점을 과소평가하였고 Hsu가 제시한 철근모델은 철근의 항복시점을 다소 낮게 평가하였다. 따라서 국내 원전의 격납건물에 대한 인장거동 특성을 모사하기 위한 수치모델은 이 실험결과를 바탕으로 매개변수 도출 테스트를 수행하고 도출된 결과로부터 기존에 사용된 모델을 수정 보완하여야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. 김남식, 조남소, 구은숙, 조재열, 프리스트레스 콘크리트 격납건물 부재실험, 한국원자력연구소 위탁연구보고서, KAERI/CM-493, 2001.
2. 이상진, 이홍표, 서정문, 철근콘크리트 격납건물의 비선형해석을 위한 유한요소해석프로그램 NUCAS, 한국원자력연구소, TR-2076, 2002.
3. Drucker, D.C. and Prager, W., "A more fundamental approach to plastic stress-strain relation," *Proc. Natl. Cong. USInst. Appl. Mech.*, pp. 487-491, 1951.
4. 이홍표, 이상진, 서정문, 전영선, 철근콘크리트 구조물의 비탄성해석을 위한 탄소성 쉘 유한요소모델에 대한 연구, 한국원자력연구소, TR-2483, 2003.
5. Aoyagi, Y. and Yamada, K., Strength and deformation characteristics of RC shell elements subjected to in-plane forces, *Concrete library international JSCE*, No. 4, pp.129-160, 1984.
6. Hsu, T.T.C. and Belarbi, A., Constitutive laws of concrete in tension and reinforcing bars stiffened by concrete, *ACI Stru. Jour.*, Vol. 91, No. 4, pp. 465-474, 1994,
7. Ahmad, S., Irons, B.M. and Zienkiewicz, O.C., "Analysis of thick and thin shell structures by curved finite elements," *Int. J. Numer. Method. Eng.* Vol. 2, pp.419-451. 1970.
8. Reissner, E., "The effect of transverse shear deformation on the bending of elastic plate," *ASME J. Appl. Mech.* Vol. 12, pp. 69-77, 1945.
9. ABAQUS, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. Ver. 5.8, 1998.