

이축인장하중을 받는 철근콘크리트 패널의 비선형 유한요소해석

Nonlinear FE Analysis of Reinforced Concrete Panels subjected to Biaxial Tensile Loads

이상진* · 이영정** · 전영선***

Lee, Sang-Jin · Lee, Young-Jung · Choun, Young-Sun

ABSTRACT

Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete panels subjected to biaxial tensile loads are carried out by using a 9-node assumed strain shell element. The present study mainly focuses on the performance evaluation of material models such as cracking criteria, tension stiffening model and steel model in the membrane energy dominant situation. From numerical results, the exponential form of tension stiffening model together with the use of average yield stress model for the steel embedded in the concrete performs well in the panel analysis under biaxial tensile loading condition and it produces a good agreement with experiment results. Finally, the present results are provided as a benchmark test for reinforced concrete panel structures.

1. 서론

원자로 격납건물은 원자력발전소의 안전을 지키는 최후방벽이다. 따라서 격납건물의 구조적 성능을 검증하는 일은 필수적이며 이를 위하여 격납건물의 성능평가방법을 개발하기 위한 연구가 국내에서도 점차 활발하게 진행되고 있다. 특히 원전 격납건물의 건설에 사용된 철근콘크리트 재료특성을 이해하기 위한 재료실험⁽¹⁾ 그리고 이를 바탕으로 한 해석프로그램의 개발⁽²⁾등과 같은 일련의 연구가 진행되었다. 이러한 연구는 단순히 구조물의 극한성능을 결정하려는 연구 활동을 지양할 뿐만이 아니라 구조물의 파괴모드에 대한 전체적인 이해를 증진시킨다는 점에서 매우 고무적이다.

이러한 맥락에서 최근 극한내압에 대한 격납건물의 성능을 검증하기 위한 관련기술 확보를 위해 격납건물 벽체요소를 모사한 철근콘크리트 패널실험⁽³⁾이 수행된 바 있다. 이 실험을 통하여 격

* 정회원 · 한국원자력연구소 · 선임연구원 · 공학박사 · 042-868-2223 (sjlee@kaeri.re.kr)
* 정회원 · 한국원자력연구소 · 석사후 연수연구원 · 공학석사
* 정회원 · 한국원자력연구소 · 책임기술원 · 공학박사

납건물 벽체요소의 균열거동과 이축인장하중을 받는 철근콘크리트 패널의 거동특성에 관련된 정보를 취득하였다. 본 연구에서는 실험에 이용된 철근콘크리트 패널의 비선형 유한요소해석을 수행하고 이를 실험결과와 비교함으로써 이축인장을 받는 패널의 거동에 지배적인 영향을 끼치는 콘크리트의 균열기준, 인장강성모델 그리고 철근모델이 유한요소해석에 끼치는 영향을 분석하고 그 결과를 기술하였다.

2. 철근콘크리트 패널실험

최근 격납건물의 성능을 평가하는데 필요한 관련 정보를 축척하기 위해 철근콘크리트 패널실험⁽³⁾이 실시되었다. 실험체는 격납건물 벽체요소의 균열양상과 구성방정식을 도출한다는 두 가지의 관점에서 제작되었으며 이를 위해 각각 7개와 16개의 실험체를 테스트하였다. 본 연구에서는 균열양상을 도출하기 위해 인장하중이 원환방향과 자오선방향으로 각각 2:1의 비로 작용하는 패널과 구성방정식을 고안하기 위해서 제작된 실험체 중에서 인장하중이 두 방향으로 동일(1:1)하게 적용된 패널의 실험결과를 이용하였다. 본 연구에 이용된 패널의 제원은 그림 1에 도시하였다.

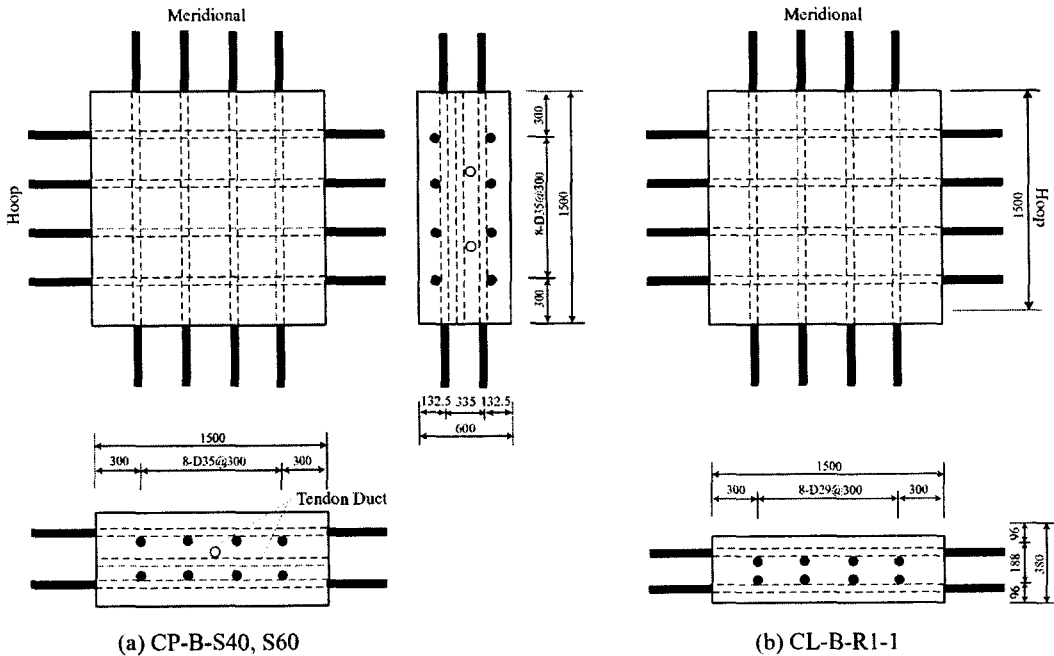


그림 1 철근콘크리트 패널 실험체

패널 CP-B-S40과 CP-B-S60의 제작에는 동일한 재질의 철근을 사용하였으나 각각 다른 압축강도를 가지는 콘크리트를 사용하였다. 그리고 이들 패널의 제작시 그림 1(a)에 도시된 바와 같이 원환방향과 자오선방향으로 각각 2개와 1개의 텐돈 덕트를 매설하였다. 패널 CL-B-R1-1은 두 패널에 비해 두께가 얇고 텐돈의 덕트를 설치하지 않았다. 패널제작에 사용된 재료의 특성치를 정리하면 표 1과 같다.

표 1 철근콘크리트 패널제작에 사용된 재료 특성치

재료 실험체명	콘크리트				철근			
	압축강도 (MPa)	인장강도(MPa)		탄성계수 (MPa)	철근비	항복하중 (MPa)	탄성계수 (MPa)	철근직경 (mm)
		할렬	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	44.0	2.56	1.73	25,160	0.0090	404	194,413	29

표 1에는 재료실험을 통하여 도출한 콘크리트의 할렬 인장강도와 패널실험을 통해서 구한 초기 균열강도 값을 함께 기술하였다. 참고문헌⁽³⁾에는 16개 전체 패널실험을 통하여 계측된 각 패널의 초기균열 값을 이용하여 콘크리트 인장강도 일반식 $f_t = 0.339\sqrt{f_c}$ 을 제시한 바 있다. 패널실험에서는 이축인장에 대한 패널의 거동을 측정하기 위하여 그림 2에 도시된 위치에 설치된 계측장치를 이용하여 패널의 변형률 및 변위를 측정하였다. 본 연구에서는 패널의 중앙부분 좌우에 위치한 변형률계로부터 측정된 변형률의 평균값 (M1, M2, H1, H2)을 해석결과와 비교하는데 이용하였다. 변형률의 평균값은 패널의 상하부(예: MIT, M1B)에서 원환방향과 자오선방향으로 각각 2개씩 계산하였다.

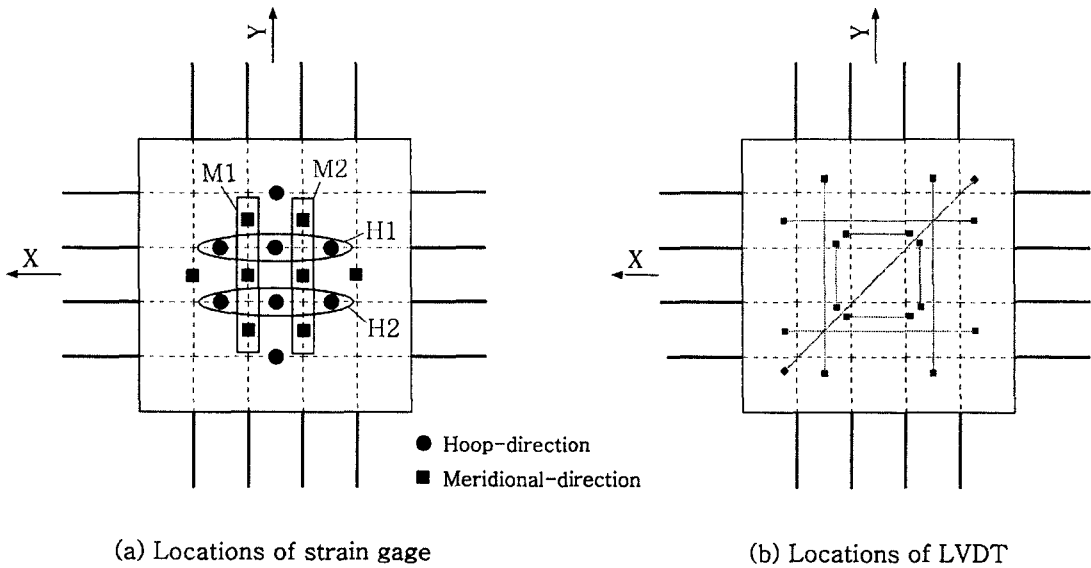


그림 2 변형률계와 변위계의 위치

3. 철근콘크리트 패널 유한요소해석

본 연구에서는 패널의 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 미시적인 재료모형을 바탕으로 개발된 9절점 가변형도 퇴화 셀요소⁽⁴⁾를 사용하였다. 본 절에서는 셀 유한요소에 도입된 재료모형 중 이축인장을 받는 패널의 거동과 특히 밀접한 관계가 있는 균열기준, 인장강성모델 그리고 철근 모델에 대하여 기술하였다.

가) 균열기준: 본 연구에서는 인장-인장영역에서 발생하는 콘크리트의 균열을 표현하기 위하여 Aoyagi(1984)⁽⁵⁾가 제시한 균열기준을 도입하였다. 도입된 모델은 최대인장응력 값을 균열의 발생기준으로 직접 이용하지 않고 콘크리트의 이축인장응력 상관관계를 고려한 균열기준을 이용하였다. 균열기준은 식(1)에서 보는 바와 같이 콘크리트의 일축인장강도 값과 밀접한 관계를 가지며 균열시점을 결정하고 균열발생 이후의 패널해석결과에 큰 영향을 미친다. 전절에 언급했듯이 실험에서 구한 초기 균열강도 값, 실험을 통하여 제시된 인장강도 일반식 그리고 할렬강도값등을 유한요소해석에 이용할 수 있다. 참고로 본 연구에 도입된 균열기준은 그림 3에 도시된 바와 같이 패널의 1축과 2축방향의 응력이 콘크리트 일축인장강도 값 f_t 의 0.7배에 해당하면 콘크리트에 균열이 발생한다. 최근 순수콘크리트 패널실험⁽¹¹⁾을 통하여 인장-인장과 인장-압축응력상태에서 나타나는 콘크리트 재료의 거동특성을 파악한 바 있으며 그 실험결과를 처리하여 도입된 균열기준과 함께 그림 3에 도시하였다. 참고로 순수 콘크리트 패널 실험체는 적잖건물의 건설에 사용되는 콘크리트 재료를 이용하여 제작되었다. 도출된 실험결과는 인장-인장영역에서 도입된 균열기준에 비하여 다소 높은 수준의 균열 포락선을 형성하는 것으로 나타났다. 그러나 하중이 2:1비로 작용할 경우 실험결과는 도입된 균열기준과 근사한 값을 나타내었다.

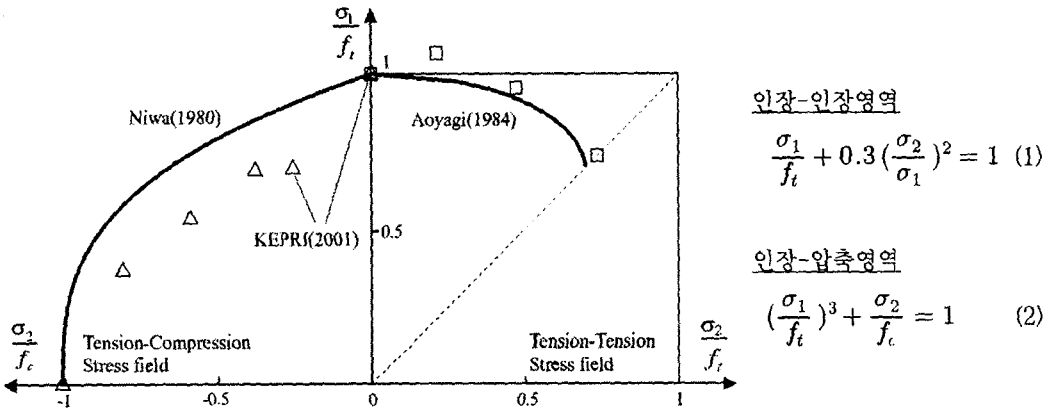


그림 3 콘크리트의 균열기준

나) 인장강성모델: 인장강성효과를 고려하기 위하여 그림 4(a)에 도시된 바와 같은 지수함수형태의 인장강성모델⁽⁶⁾을 도입하였다. 본 연구에서는 균열발생이후에 콘크리트와 철근의 부착력으로 인해 발생하는 콘크리트의 인장력증강효과를 콘크리트의 응력-변형률선도를 수정하여 고려하였다. 철근과 콘크리트사이에서 나타나는 부착력의 크기는 인장강성모델이 가지고 있는 지수 값에 따라서 조정할 수 있다. 본 연구에서는 패널의 실험결과와 해석결과를 비교하기 위하여 패널실험결과로부터 제시된 지수 값을 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다.

다) 철근모델: 콘크리트 내의 철근이 탄성을 유지하면 철근의 거동은 매우 단순하다. 그러나 콘크리트에 균열이 발생하고 균열면에서 철근이 항복하면 철근의 다른 부분이 항복하지 않았다더라도 철근의 평균응력과 평균 변형률은 더 이상 탄성을 유지하지 않는다. 이때 균열면에서 나타나는 철근의 응력집중현상은 변형률을 증가시키며 철근의 평균응력이 나철근의 항복응력 값보다 낮아진다. 본 연구에서는 그림 4(b)에 도시된 바와 같이 변형도 경화의 시발이 분명하게 나타나고 변형도 경화비속이 일정한 쌍일차형태의 철근모델⁽⁷⁾을 도입하고 평균항복응력값을 사용하여 철근의 항복시점을 결정하였다.

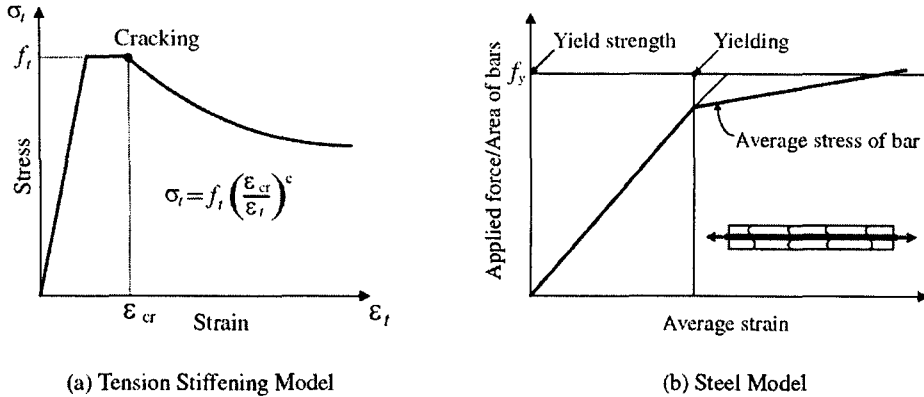


그림 4 재료모델:(a) 인장강성모델과 (b) 철근모델

패널의 유한요소해석을 위하여 전체 패널을 4개의 유한요소로 이산화 하였다. 본 연구에서는 쉘 유한요소 모델을 형성하기 위하여 패널에 존재하는 텐던 덕트는 생략하였으며 분산모델을 이용하여 철근을 모사하였으며 실험시 철근에 가력된 하중을 패널의 네변에 등가로 환산하여 적용시켰다. 비선형해석을 수행하기 위하여 초기강성법을 도입하여 강성행렬을 형성하였으며 균열이후에 나타나는 국부변형경로를 추적하기 위하여 호장법을 이용하였다.

본 연구에서는 패널의 균열발생시점, 인장강성효과 그리고 철근의 항복수준에 대해서 유한요소해석결과와 실험결과를 비교분석하였다. 패널의 균열시점과 밀접한 관계를 가지는 콘크리트의 인장강도값은 실험으로부터 측정한 초기균열값을 이용하였으며 인장강성효과를 고려하기 위하여 도입된 인장강성모델의 지수값을 $c = 0.4$ 로 하였다. 본 연구에서 9절점 쉘 유한요소를 이용하여 도출한 해석결과는 실험결과와 상용프로그램 ABAQUS⁽⁸⁾를 이용하여 도출한 결과와 함께 그림 5, 6, 7에 도시하였다. ABAQUS의 해석결과는 참고 문헌에서 제시된 인장강성모델⁽⁹⁾과 철근모델⁽¹⁰⁾을 이용하였다. 그리고 본 연구에서 제시한 해석결과는 모두 패널 원환방향에 대한 응력-변형률선도이다.

해석결과로부터 9절점 철근콘크리트 쉘 유한요소는 패널의 균열시기를 실험결과와 유사하게 예측하였다. 또한 실험결과가 가지는 오차의 범위를 고려하면 본 연구에서 도출한 해석결과는 전체적으로 실험결과와 매우 근사하였다. 앞서서도 언급했듯이 패널 CP-B-S40와 CP-B-S60는 격납건물 벽체의 1/2 두께로 모사된 실험체로 제작 시 서로 동일한 재료를 사용하였으나 콘크리트의 특성은 달리하였다. 압축강도를 달리하는 이 패널실험으로부터 콘크리트 압축강도 변화에 따른 패널의 응력-변형률선도는 전체적으로 크게 다르지 않았으며 다만 철근의 항복이전에 나타나는 인장강성효과가 콘크리트 압축강도가 적을수록 다소 작게 나타났다. 그러나 해석결과에서는 이러한 현상은 나타나지 않았으며 압축강도는 이축인장을 받는 패널의 거동에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한 그림 5, 6, 7에서 보듯이 해석결과는 각 패널에 대한 항복지점을 비교적 근사하게 예측하였다. 패널 CL-B-R1-1은 격납건물 벽체두께의 약 1/3로 제작되었으며 유한요소해석결과는 그림 7에서 보듯이 실험결과와 큰 차이를 보였다. 이는 유한요소해석에서 발생하는 문제라기보다는 실험상의 오차에 기인한 것으로 판단된다. 패널 CL-B-R1-1의 경우는 하중이 동일한 비(1:1)로 원환방향과 자오선방향으로 가해지기 때문에 이론적으로 원환방향과 자오선방향의 거동이 동일하여야 한다. 따라서 해석결과의 검증은 위해서 실험을 통하여 자오선방향으로 측정한 응력-변형률선도를 함께 비교하였다. 그림 7에서 도시된 바와 같이 실험결과는 원환방향과 자오선 방향으로 큰 차이를 보이고 있으며

자오선 방향으로 계측된 응력-변형률 선도는 다소 높은 항복시점을 보이거나 해석결과와 매우 유사한 결과를 나타내었다.

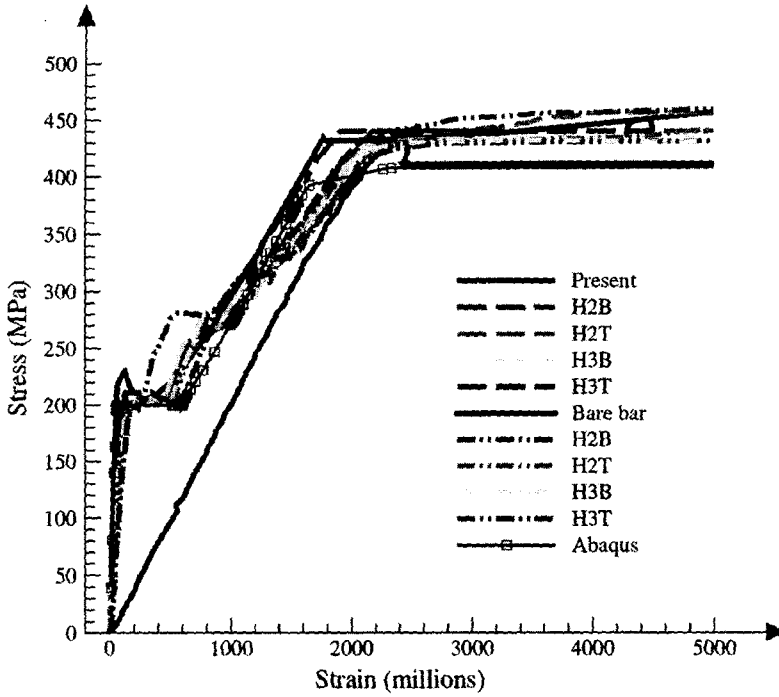


그림 5 패널 CP-B-S40의 응력-변형률선도

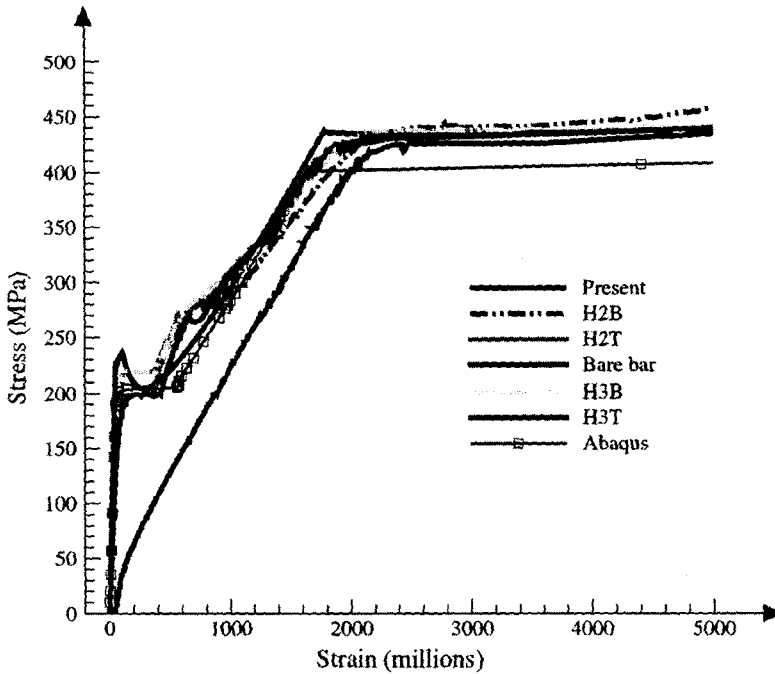


그림 6 패널 CP-B-S60의 응력-변형률선도

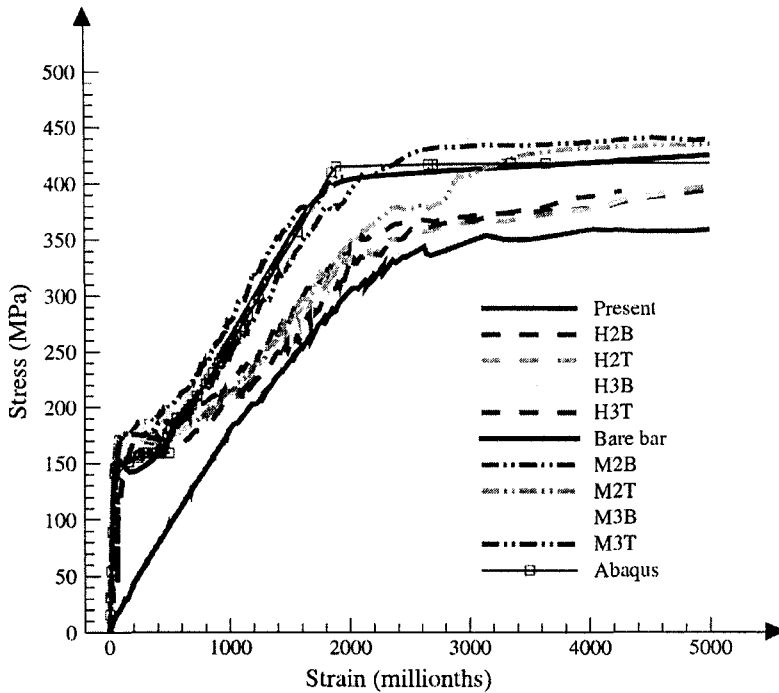


그림 7 패널 CL-B-R1-1의 응력-변형률선도

4. 결론

본 연구에서는 철근콘크리트 패널의 비선형 유한요소해석을 수행하고 이를 실험결과와 비교분석하였다. 도입된 콘크리트의 균열기준, 인장강성모델 그리고 철근모델이 유한요소해석에 끼치는 영향을 분석하면 인장강성모델과 철근의 재료모델은 적절한 조합이 반드시 필요하며 인장강성효과가 콘크리트의 균열생성 이후의 거동을 지배하는 것으로 나타났다. 실험을 통하여 도출한 인장강성모델의 지수 값을 이용하여 실험결과와 유사한 해석결과를 도출하였다. 그리고 패널 CL-B-R1-1의 경우와 같이 실험에서 나타나는 오차를 유한요소해석결과를 통하여 확인하고 보정할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. 이상근, 이상근, 송영철, 한상훈, "이축응력하의 콘크리트 파괴거동," 대한토목학회논문집, Vol. 22, No. 2-A, pp. 285-293, 2002
2. 이상진, 이흥표, 서정문, 철근콘크리트 격납건물의 비선형해석을 위한 유한요소해석프로그램 NUCAS, 한국원자력연구소, 기술보고서, TR-2076/02, 2002

3. 김남식, 조남소, 구은숙, 조재열, 프리스트레스 콘크리트 격납건물 부재실험, 한국원자력연구소, 위탁연구보고서, KAERI/CM-493/2001, 2001
4. 이상진, 서정문, "철근콘크리트 구조물의 비탄성해석을 위한 9절점 퇴화 쉘요소, 한국전산구조공학회논문집," Vol. 14, No. 4, pp. 481-494, 2001
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. Okamura, H., Maekawa, K. and Sivasubramaniyam, S., "Verification of modeling for reinforced concrete finite element," Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, ASCE, pp.528-543, 1985
7. 申鉉穆, 繰返し面内力を受ける部材の有限要素解析, 土木工學科, 東京大學博士論文, 1988
8. ABAQUS/Theory manual (Ver. 5.8), Hibbitt, Karlsson & Sorensen, INC, 1998
9. T.T.C. Hsu and Li-xing Zhang, "Tension stiffening in Reinforced Concrete Membrane Elements," ACI Structural Journal, Vol.93 No.1 pp 10815, 1996
10. T.T.C. Hsu and Abdeldjelil Belarbi, "Constitutive Laws of Concrete in Tension and Reinforcing Bars Stiffened by Concrete," ACI Structural Journal, Vol. 91 No. 4, 1994