

이축인장을 받는 철근콘크리트 패널의 정적 유한요소해석에서의 논점

Issues in Static FE Analysis of Reinforced Concrete Panels subjected to Biaxial Tensile Loads

이상진* · 이홍표** · 이영정***

Lee, Sang-Jin · Lee, Hong-Pyo · Lee, Young-Jung

ABSTRACT

Fundamental issues in static finite element analysis of reinforced concrete panel subjected to biaxial tensile loads are discussed. This paper is trying to bring our attention to the appropriate use of concrete material models such as cracking criteria, tension stiffening model and the steel models which are basically used in the nonlinear finite element analysis of reinforced concrete panels. We mainly investigate the sensitivity of available material models and finite element technologies to the finite element analysis result using our recent reinforced concrete panel experiment result. Throughout this study, we found that the judicious use of the material models and finite element technologies with the sound understanding of structural characteristics can only guarantee the accurate prediction of panel behaviour.

1. 서론

철근콘크리트 패널의 거동을 예측하기 위한 해석적 접근방법으로 다른 공학 분야와 마찬가지로 유한요소법이 널리 이용되고 있다. 유한요소법의 도입은 유한요소 자체의 개발, 적절한 해석알고리즘의 채용 그리고 건설재료의 특성을 정확히 모사할 수 있는 수치재료모델을 형성하는 것이 중요하다¹⁾. 특히 건설재료의 특성에 대한 이해를 돕고 적절한 수치재료모델을 형성하기 위한 노력의 일환으로 재료특성실험과 부재성능 실험 등이 수행되어 왔다. 이러한 맥락에서 최근 국내에서도 단순히 구조물의 극한성능을 결정하려는 연구활동을 지양하고 구조물이나 부재의 파괴모드에 대한 전체적인 이해를 증진시키기 위해 격납건물 벽체요소의 축소모델실험²⁾이 수행된 바 있다. 이 실험은 극한내압에 대한 격납건물의 성능을 평가하기 위한 관련해석기술 확보를 위해 격납건물 벽체중앙부의 일부요소를 모사한 것이며 이 실험을 통하여 격납건물 벽체요소의 균열거동과

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

** 정회원 · 한국원자력연구소 · 박사수료후 연수연구원 · 공학석사

*** 정회원 · 한국원자력연구소 · 석사후 연수연구원 · 공학박사

이축인장하중을 받는 철근콘크리트 패널의 거동특성에 관련된 정보를 취득하였다. 본 연구에서는 이 실험결과를 이용하여 이축인장을 받는 철근콘크리트 패널의 유한요소해석에서 중요한 논점으로 인식되고 있는 콘크리트의 균열기준, 인장강성모델 그리고 철근모델 그리고 유한요소의 종류, 해석알고리즘의 종류가 유한요소해석결과에 끼치는 영향을 분석하고 그 결과를 기술하였다.

2. 철근콘크리트 패널의 유한요소해석에서의 논점

전술한 바와 같이 철근콘크리트 패널의 비선형 유한요소해석에서 중요한 논점은 해석에 도입된 콘크리트의 재료모델, 유한요소 그리고 해석알고리즘의 적절성과 정확성이다. 특히 이축 인장응력 상태에 있는 패널해석에서 콘크리트의 균열기준, 인장강성모델은 패널의 거동을 정확히 예측하는데 있어 중요한 역할을 한다. 또한 균열이후에 나타나는 패널의 거동은 철근과 콘크리트의 부착력을 나타내는 인장강성모델과 함께 적절한 철근의 재료특성모델을 선택하는 것이 중요하다.

2.1 콘크리트 균열기준

단적으로 말하면 균열은 콘크리트의 응력이 주어진 최대 인장응력 값을 초과할 때를 발생한다. 콘크리트의 균열은 재료의 인장력과 관련이 있으며 패널과 같은 이차원의 구조물을 해석할 경우 인장-인장의 응력이 작용하거나 인장-압축의 응력이 작용할 때 균열이 발생하게 된다. 따라서 패널과 같은 이차원의 구조물일 경우에는 이축응력에 대한 상관관계를 고려할 수 있는 균열기준을 유한요소해석에 도입하는 것이 바람직하다. 그리고 유한요소해석을 수행할 때 균열포락선의 크기에 직접적으로 영향을 미치는 콘크리트의 일축 인장값을 적절히 결정하는 것 또한 중요하다. 유한요소해석에서 콘크리트의 일축 인장값은 콘크리트의 균열시점을 결정하는데 있어 중요한 역할을 하며 일반적으로 부재실험을 통하여 구한 초기 균열강도 값, 인장강도 일반식을 이용하여 계산한 값 그리고 할렬 인장강도 값 등이 사용될 수 있다. 따라서 패널의 유한요소해석을 수행할 때는 콘크리트의 균열포락선 형상을 결정하는 모델의 선정도 중요하지만 균열포락선의 범위를 결정하는 일축 인장값을 적절히 사용하는 것도 패널의 거동을 정확히 평가하는데 있어 매우 중요하다. 본 연구에서 격납 건물 벽체패널의 유한요소해석을 위해서 도입한 순수 콘크리트의 인장-인장, 인장-압축영역에서의 파괴포락선은 그림 1에 도시된 바와 같다.

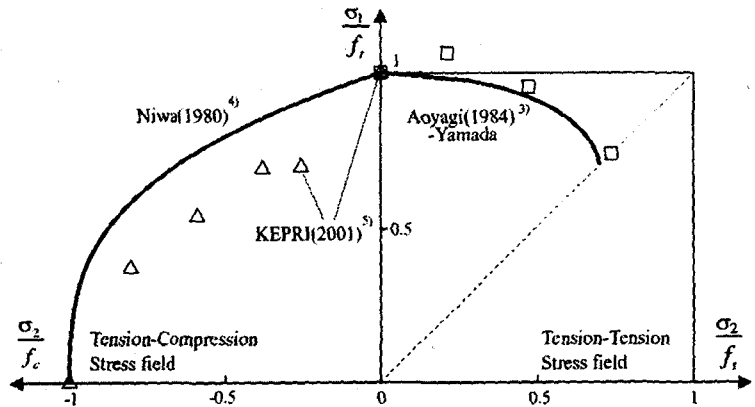


그림 1 콘크리트의 균열기준

콘크리트의 응력이 균열포락선에 도달하면 주응력방향의 직각인 면에 균열이 생기는 것으로 가정하게 된다. 균열이 발생하면 반복계산과정에서 균열의 방향을 고정하는 균열고정법과 균열의 회전을 허용하는 균열회전법을 이용하여 균열의 발생을 표현할 수 있다. 이 연구에서는 균열이 발생한 후 균열의 방향이 고

정되는 균열고정법을 도입하였다. 이때 유한요소의 각 적분점에는 최대 두 개의 균열을 허용하였다. 첫 번째 균열이 생기면 그 균열의 방향을 계산한 뒤 고정시키고 고정된 균열에 평행한 면의 최대응력을 계산한다. 이때 균열에 평행한 면의 수직응력과 전단응력만을 고려하게 된다. 일차 균열이 생긴 적분점의 최대응력이 주어진 한계 값을 초과할 때 두 번째 균열이 첫 번째 균열의 직각방향으로 생긴다고 가정하게 된다. 균열발생에 대한 이러한 처리방법을 직교균열고정법이라고 하며 참고문헌⁶⁾에 다양한 균열방향 처리방법이 소개되어 있다.

2.2 인장강성모델

콘크리트에 균열이 발생한 이후에 콘크리트와 철근의 부착력으로 인해 발생하는 콘크리트의 인장력강화 효과는 크게 콘크리트의 응력-변형률선도를 수정하는 방법과 철근모델의 응력-변형률선도를 수정하는 방법이 이용되어 왔다. 콘크리트의 응력-변형률선도를 수정하여 인장력의 강화효과를 나타내는 것이 보편적이며 지수함수형태의 인장강성모델을 유한요소해석에 많이 이용하고 있다. 이때 부착력의 크기는 인장강성모델의 지수 값에 따라 쉽게 조절할 수 있다. 또한 변형률연화모델을 이용하여 순수콘크리트의 파괴에너지를 높게 가정함으로써 철근과의 부착으로 인해 발생하는 인장강성효과를 고려하기도 하였다. 그리고 최근에는 인장강성모델과 변형률연화모델을 복합한 층상 인장강성모델⁷⁾이 제시되기도 했다. 이러한 층상 인장강성 모델은 그림 2에서 비교된 결과와 같이 철근과 콘크리트 사이의 부착력이 작용하지 않는 영역에서 과대하게 고려될 수 있는 인장강성의 효과를 감소시킬 수 있으며 균열이후에 나타나는 벽체의 층방향 응력분포를 보다 정확히 표현할 수 있다.

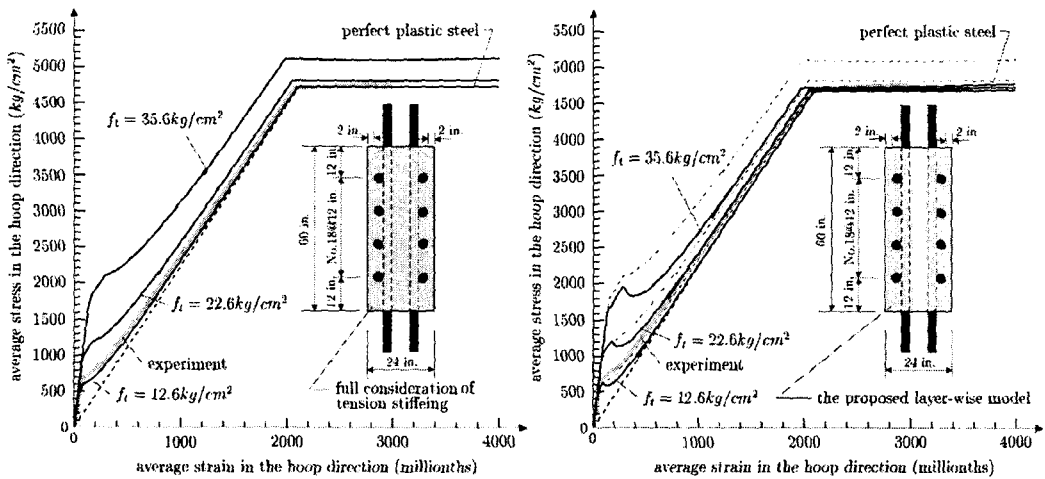


그림 2 일반 인장강성모델과 층상 인장강성모델의 해석결과비교 예

2.3 철근모델

콘크리트 내에 위치한 철근이 탄성을 유지하면 철근의 거동은 매우 단순하다. 그러나 콘크리트에 균열이 발생하고 균열면에서 철근이 항복하면 철근의 다른 부분이 항복하지 않았더라도 철근의 평균응력과 평균 변형률은 더 이상 탄성을 유지하지 않는다. 이때 균열면에서 나타나는 철근의 응력집중현상은 변형률을

증가시키며 철근의 평균응력이 나철근의 항복응력 값보다 낮아진다. 철근의 재료특성모델은 변형도 경화의 시발이 분명하게 나타나고 변형도 경화비속이 일정한 쌍일차형태의 철근모델이 일반적으로 많이 이용된다. 그리고 평균 항복응력값을 사용하여 철근의 항복시점을 결정하게 된다. 철근은 주위의 콘크리트와의 부착력에 의한 거동과 긴밀한 관계를 가지므로 철근모델은 콘크리트의 인장강성모델과 적절히 조합하여 해석에 이용되어야 한다.

2.4 다른 중요 인자들

패널해석에서 적절한 유한요소해석기법의 사용은 중요하다. 특히 해석에 이용되는 유한요소의 종류, 수치적분의 방법 그리고 비선형해석 알고리즘 등은 복잡한 비선형성을 가지는 구조물의 거동을 정확히 예측하기 위해서는 적절한 선택이 필요하다. 본 연구에서는 패널의 해석을 수행하고 이러한 중요인자에 대한 해석결과의 민감도를 분석하였다.

3. 이축인장을 받는 철근콘크리트 패널 유한요소해석

전술한바와 같이 패널유한요소해석에서 발생하는 논점을 분석하기 위하여 벽체요소의 실험결과를 이용하였다. 이들 패널실험에는 전부 다섯가지 종류의 시편이 제작되었다. 격납건물 벽체요소의 균열거동을 파악하기 위한 패널 CP-B-S40, CP-B-S60와 철근콘크리트의 유한요소해석에도입된 구성방정식의 정확도를 검증하기 위한 패널 CL-B-R1, CL-B-R2, CL-B-R3로 나누어진다. 시편의 제작에 대한 자세한 내용은 참고문헌²⁾에 있다. 패널 CP-B-S40, CP-B-S60의 경우는 원환방향과 자오선방향으로 각각 2개와 1개의 텐돈덕트를 매설하였으나 다른 패널은 이 두 패널에 비해 두께가 얇아서 텐돈덕트를 설치하지 않았다. 이들 패널의 제작에 사용된 콘크리트와 철근의 재료특성치는 표 1과 같다.

표 1 격납건물 벽체 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 | 27,447 | 0.0090 | 404 | 194,413 | 29 |
| CL-B-R2 | | | 1.62 | | 0.0135 | | | |
| CL-B-R3 | | | 2.41 | | 0.0185 | | | |

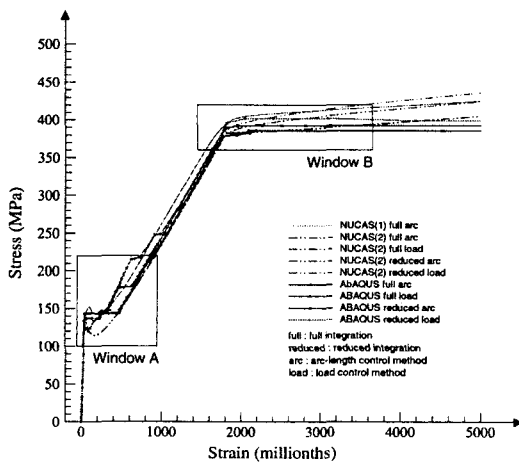
표 1에는 재료특성실험과 패널성능실험을 통하여 계측한 콘크리트의 할렬 인장강도와 초기 균열강도값을 함께 기술하였다. 그리고 패널성능실험을 통하여 계산된 균열 인장강도값을 이용하여 콘크리트 인장강도 일반식 $f_t = 0.339\sqrt{f_c}$ 을 제시한 바 있다. 또한 이 실험을 통하여 이축인장에 대한 패널의 거동을 측정하기 위하여 패널 상하부에 설치한 계측장치를 이용하여 패널의 변형률 및 변위를 측정하였다. 본 연구에서는 패널의 중앙부분 좌우에 위치한 변형률계로부터 측정된 변형률의 평균값(M2, M3, H2, H3)을 해석

결과와 비교하는데 이용하였다. 변형률의 평균값은 패널의 상하부(예: M2T, M2B)에서 원환방향과 자오선 방향으로 각각 2개씩 계산하였다. 이 논문에서는 한국원자력연구소에서 개발중인 격납건물해석코드 NUCAS와 상용해석프로그램 ABAQUS⁸⁾를 이용해서 도출한 세 가지의 유한요소해석결과를 기술하고자 한다. 본 연구에서 수행한 유한요소해석에 도입된 기법을 정리하면 표 2와 같다.

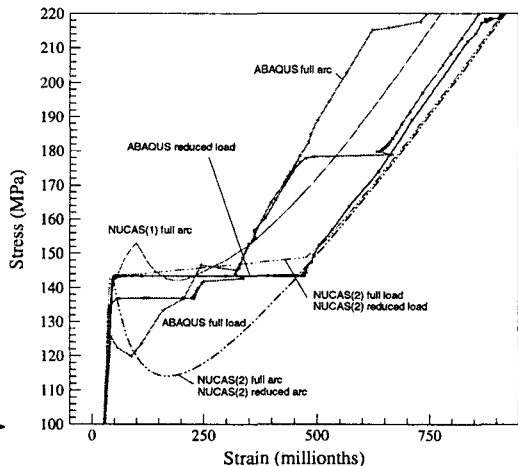
표 2 패널해석에 이용된 해석기법 관련사항

| 기법 코드 | 균열기준 | 인장강화 모델 | 철근 모델 | 유한요소 (콘크리트) | 유한요소 (철근) | 해석기법 | 강성행렬형성법 |
|----------|-----------------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|--------------|----------------|---------|
| NUCAS(1) | Aoyagi-Yamada ³⁾ | Shima ⁹⁾ | Shima ⁹⁾ | 가변형도 9절점셀요소 ¹⁰⁾ | 분산 철근모델 | 호장제어법 | 초기강성법 |
| NUCAS(2) | Aoyagi-Yamada ³⁾ | Hsu ¹¹⁾ | Hsu ¹²⁾ | 표준 8절점요소 | 분산 철근모델 | 호장제어법 하중제어법 | 수정 NR법 |
| ABAQUS | 최대 인장강도 | Hsu ¹¹⁾ | Hsu ¹²⁾ | 평면응력요소 (CPS4) | 트러스요소 (T2D2) | 호장제어법 하중제어법 | NR법 |

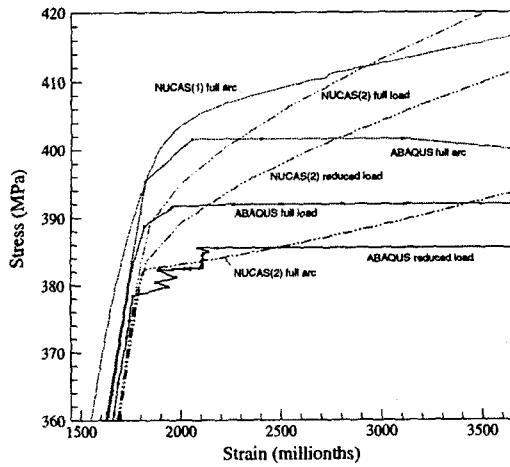
패널의 유한요소해석을 위하여 전체 패널을 4개의 유한요소로 이산화 하였다. 본 연구에서는 패널을 셀 유한요소모델을 형성하기 위하여 패널에 존재하는 텐던트트는 생략하였다. 그리고 NUCAS의 경우 분산모델을 이용하여 철근을 모사하였으므로 실험시 철근에 가력된 하중을 패널의 네변에 등가로 환산하여 적용시켰으며 ABAQUS의 경우 트러스요소에 하중을 적용시켰다. 비선형해석을 수행하기 위하여 초기강성법, 수정 NR(Newton Raphson)법 그리고 NR법을 이용하여 강성행렬을 형성하였으며 균열이후에 나타나는 국부변형경로를 추적하기 위하여 하중제어법과 함께 호장제어법을 이용하였다. 본 해석에서는 콘크리트의 인장강도값으로 실험으로부터 측정한 초기균열값을 이용하였으며 인장강성모델의 지수값을 $c = 0.4$ 로 하였다. 그리고 표 2에 기술된 기법을 이용하여 도출한 유한요소해석결과는 그림 3에 실험결과와 함께 도시하였다. 이 논문에서는 원환방향과 자오선방향의 하중비가 (1:1)일 때 패널의 원환방향에 대한 응력-변형률 선도만을 해석결과로 제공하였다.



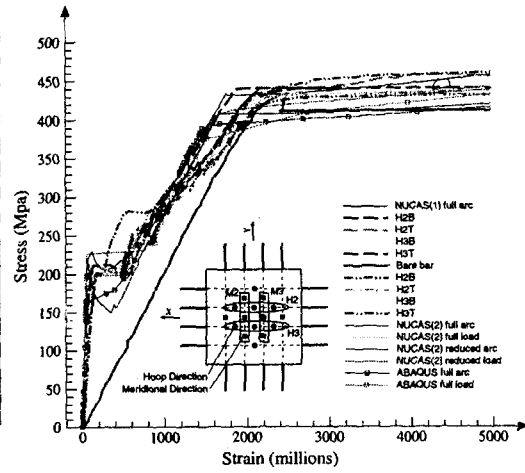
(a): CL-B-R1 유한요소해석결과비교



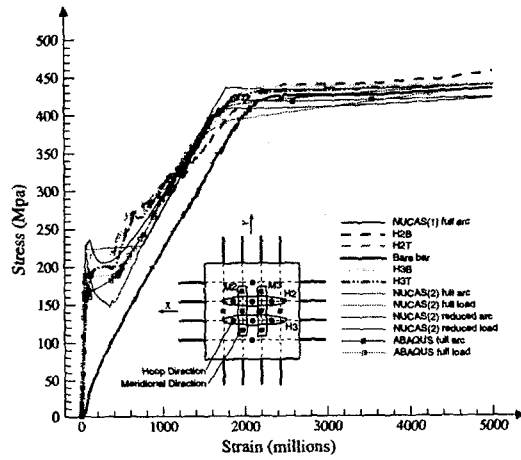
(b) Window A 확대



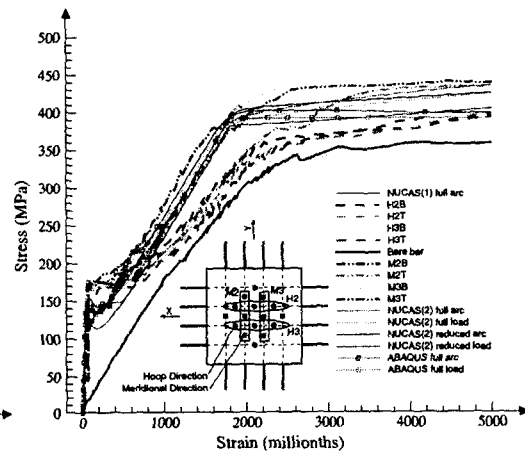
(c) Window B 확대



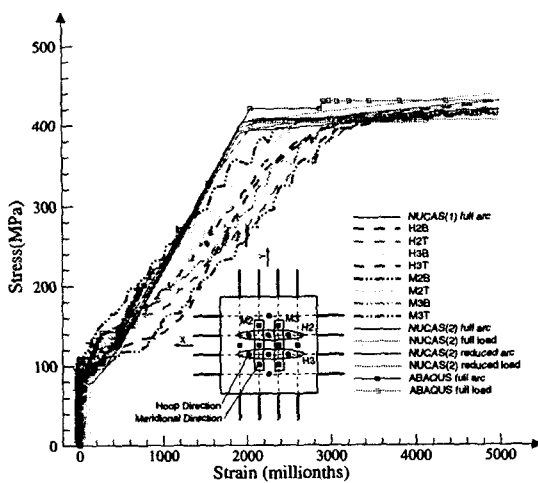
(d) CP-B-S40



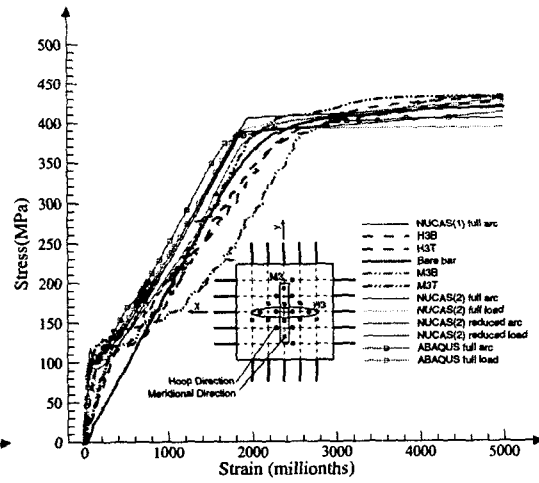
(e) CP-B-S60



(f) CL-B-R1



(g) CL-B-R2



(h) CL-B-R3

그림 3 응력-변형률선도

해석결과와 분석을 통하여 균열강도값에 따라 패널은 균열시점에 큰 차이를 보였으며 해석에 사용된 균열강도의 값이 클수록 패널전체에 인장강성효과를 고려하는 기존의 인장강성모델을 사용할 경우 그림 2(좌)에 이미 도시된 바와 같이 철근의 항복시점과 항복이후의 응력수준이 높게 측정되었다. 이러한 현상은 전술한 층상 인장강성모델을 사용함으로써 상쇄될 수 있었다. 본 연구를 통하여 이축인장을 받는 패널해석에서는 그림 3(a)에 도시된 바와 같이 균열발생이후와 철근의 항복이후에 나타나는 패널의 거동을 정확히 이해하고 이를 모사할 수 있는 재료모델을 제시하는 것이 매우 중요한 것으로 나타났다. 그리고 그림 3(b)에 도시된 바와 같이 상용프로그램 ABAQUS는 감차적분을 이용하여 강성행렬을 형성하면 정차적분을 이용하는 것에 비해 응력-변형률선도가 유연하게 나타났으며 하중스텝에 대한 조절을 하지 않을 경우 하중-변위경로를 추적하지 못하는 경향이 나타났다. 그러나 ABAQUS와는 달리 삽입모델을 도입한 쉘 유한요소의 해석결과는 정방형 유한요소망을 사용할 경우 감차적분과 정차적분은 큰 결과의 차이가 없었다. 그러나 비정방형 유한요소망에 대한 해석결과와 민감도는 향후 조사되어야 할 것으로 사료된다.

패널해석에서 정확한 해석알고리즘의 선택은 복잡하게 나타나는 하중-변위경로에 대한 세부적인 추적을 가능하게 하였다. 본 연구에서는 호장제어법과 하중제어법을 함께 사용했으며 그림 3(b)에서 보는 바와 같이 호장제어법을 사용할 경우 균열발생이후에 나타나는 하중의 국부경로를 성공적으로 추적할 수 있었다. 그러나 하중제어법을 사용할 경우 이 국부경로를 추적할 수 없었다.

본 연구에 이용된 실험에서 패널 CP-B-S40와 CP-B-S60는 콘크리트 압축강도에 대한 패널거동의 변화를 검증하기 위하여 콘크리트의 압축강도를 제외한 동일재료를 이용하여 제작되었다. 이 두 패널의 실험결과를 통하여 압축강도만 다른 두 패널의 응력-변형률선도는 전체적으로 크게 다르지 않게 나타났으며 다만 철근의 항복이전에 나타나는 인장강성효과가 콘크리트 압축강도가 낮을수록 작은 것으로 나타났다. 그러나 유한요소해석결과에서는 이러한 현상은 나타나지 않았으며 압축강도는 이축인장을 받는 패널의 거동에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

또한 본 연구를 통하여 적절한 재료모델과 유한요소기법을 사용할 경우 그림 3 (d), (e), (f), (g), (h)에서도 볼 수 있듯이 유한요소해석결과가 실험결과와 매우 근접하게 도출되었다. 다만 격납건물 벽체두께의 약 1/3로 제작된 패널 CL-B-R1의 경우 유한요소해석결과는 그림 3 (d)에서 보듯이 실험결과와 큰 차이를 보이는데 이는 유한요소해석에서 발생하는 문제라기보다는 실험상의 오차에 기인한 것으로 판단된다. 이는 하중이 원환방향과 자오선방향으로 각각 동일한 비(1:1)로 가해지기 때문에 이론적으로 원환방향과 자오선방향의 거동이 동일해야함에도 불구하고 실험을 통하여 자오선방향으로 계측한 응력-변형률선도가 원환방향의 값과 많은 차이를 보이는 것에서도 단적으로 알 수 있다. CL-B-R2와 CL-B-R3도 유사한 현상을 나타내 전체적으로 유한요소해석을 통하여 실험결과와 유사한 균열시점과 항복시점을 예측할 수 있었다.

4. 결론

본 논문은 이축인장을 받는 철근콘크리트 패널에서 논점으로 인식되는 사항을 기술하였다. 그리고 최근 수행된 격납건물 벽체요소실험에 대한 유한요소해석 결과를 제시하고 이를 앞서 기술한 논점과 연관하여 분석하였다. 철근콘크리트 패널의 균열포락선의 크기를 결정하는 콘크리트의 일축인장값은 할렬인장강도 값이나 제한된 시편으로 현장에서 도출한 균열인장 강도값 보다는 다양한 실험을 통하여 제시된 일반식을 사용하는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 또한 이축인장하중의 경우 이축응력의 상관관계를 고려한 균열기준이 일반적으로 실제의 균열발생시점을 잘 모사하는 것으로 나타났다. 그리고 콘크리트의 응력-변형률을 수정하여 철근과 콘크리트사이의 부착력

을 모사하는 인장강성모델을 사용할 경우 철근모델은 이에 부합하는 모델을 도입하여야 하는 것으로 나타났다. 또한 콘크리트의 재료모델과 마찬가지로 수치적분, 유한요소 그리고 해석알고리즘의 선택은 비교적 간단한 패널의 해석에서도 그 결과에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며 결론적으로 철근콘크리트 구조물의 해석에 사용되는 유한요소해석기법의 신중한 선택이 필요한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. 이상진, 이홍표, 서정문, 철근콘크리트 격납건물의 비선형해석을 위한 유한요소해석프로그램 NUCAS, 한국원자력연구소, 기술보고서, TR-2076/02, 2002
2. 김남식, 조남소, 구은숙, 조재열, 프리스트레스 콘크리트 격납건물 부재실험, 한국원자력연구소, 위탁연구보고서, KAERI/CM-493/2001, 2001
3. 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
4. Niwa, J., Maekawa, K. and Okamura, H., "Nonlinear finite element analysis of deep beam," IABSE Colloquium, Vol.34, pp.625-38, Delft, 1981
5. 이상근, 송영철, 한상훈, "이축응력하의 콘크리트 파괴거동," 대한토목학회논문집, Vol. 22, No. 2-A, pp. 285-293, 2002
6. Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H., "Nonlinear mechanics of reinforced concrete," Spon Press, London and New York, 2003
7. Lee, S.J., Lee, H.P. and Seo, J.M., "A layer-wise tension stiffening model for the inelastic finite element analysis concrete wall-like structures," 한국원자력학회 추계학술발표회 CD 논문집, 2002
8. ABAQUS/Theory manual (Ver. 5.8), Hibbitt, Karlsson & Sorensen, INC, 1998
9. Shima, h., Chou, L. and Okamura, H., "Micro and macro models for bond behaviour in reinforced concrete," J. Faculty Eng., University of Tokyo (B), vol. 39, No.2, pp 133-194, 1987
10. 이상진, 서정문, "철근콘크리트 구조물의 비탄성해석을 위한 9절점 퇴화 쉘요소," 한국전산구조공학회논문집," Vol. 14, No. 4, pp. 481-494, 2001
11. Hsu T.T.C. and Zhang Li-xing, "Tension stiffening in reinforced concrete membrane elements," ACI Structural Journal, Vol.93 No.1 pp. 108-115, 1996
12. Hsu T.T.C. and Belarbi Abdeldjelil, "Constitutive laws of concrete in tension and reinforcing bars stiffened by concrete," ACI Structural Journal, Vol. 91 No. 4, 1994