

한국형 원전 격납건물의 비선형해석에 관한 연구

A Study on the Nonlinear Analysis of Containment Building in Korea Standard Nuclear Power Plant

이 홍 표* · 전 영 선**

Lee, Hong-Pyo · Choun, Young-Sun

ABSTRACT

In this paper, a nonlinear finite element analysis program NUCAS, which has been developed for assessment of pressure capacity and failure mode for nuclear containment building is described. Degenerated shell element with assumed strain method and low-order solid element with enhanced assumed strain method is adapted to microscopic material and elasto-plastic material model, respectively. Finally, the performance of the developed program is tested and demonstrated with several examples. From the numerical tests, the present results show a good agreement with experimental data or other numerical results.

1. 서 론

원전 격납건물은 사고 발생시 방사능 물질의 외부 유출을 차폐하는 최후의 방벽역할 역할을 하기 때문에 격납건물의 구조적 안전성을 검증하는 일은 필수적이다. 따라서 이를 위한 격납건물의 성능평가방법을 개발하기 위한 연구가 국내외에서 활발하게 진행되고 있다. 국내의 경우 원전 격납건물의 건설에 사용된 철근콘크리트(김남식 등, 2001) 및 무근콘크리트(이상근 등, 2001)에 대한 재료특성을 이해하기 위한 재료실험과 이를 바탕으로 한 수치해석모델(이상진 등, 2002)의 개발 등과 같은 일련의 연구가 진행되고 있다. 외국의 경우 격납건물의 부재단계 실험은 물론이고 축소모델 실험(SNL, 2003)을 수행하여 격납건물의 기능적인 파괴와 구조적인 파괴거동을 분석하고자 하였다.

이 논문에서는 지금까지 진행된 격납건물 전용 해석프로그램 NUCAS 코드의 개발현황을 기술하였다. NUCAS 코드의 유한요소모델은 쉘 요소와 고체요소를 이용하였고, 재료모델은 미시적인 재료모델(岡村甫 등, 1991)과 탄소성 재료모델(이홍표 등, 2005)을 도입하였다. 또한 콘크리트에 균열이 발생된 후에 나타나는 복잡한 비선형거동을 추적하기 위해서 호장법(arc-length control)을 도입한 해석알고리즘을 이용하였다. 개발된 NUCAS 코드의 성능을 검증하기 위해서 다양한 구조물 및 격납건물에 대한 수치해석을 수행하였고, 그 결과로

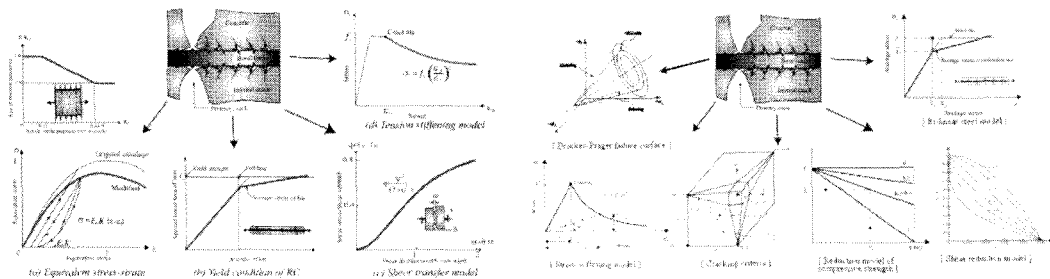
* 정회원 · 한전 전력연구원 연구원 Email: hplee@kepri.re.kr

** 정회원 · 한국원자력연구소 책임기술원 Email: sunchun@kaeri.re.kr

부터 이 논문에서 제시한 프로그램의 해석결과와 실험결과 값이 유사하게 나타났다.

2. Nuclear Containment Analysis System

이 논문에서 개발한 NUCAS(NUclear Containment Analysis System) 코드는 미국의 버클리 대학 R.L. Taylor 교수가 개발한 FEAP(Finite Element Analysis Program)에 기반을 두어 요소 및 재료모델을 이식하였다. 요소에는 가변형도법을 도입한 8, 9절점 퇴화 쉘요소와 EAS(Enhanced Assumed Strain)법을 도입한 저차 고체요소를 사용하였고, 콘크리트에는 비시적인 재료모델과 탄소성 재료모델을 적용하였다. 비시적인 재료모델은 Mackawa(1991) 등에 의해서 제안된 모델로 철근콘크리트 구조물의 거동을 철근과 콘크리트의 거동특성으로 나누어 나타냈으며 등가응력-등가변형률도의 관계를 이용하여 다차원이 값으로 표현되는 응력과 변형도값을 일차원의 관계로 표현하였다. 철근콘크리트에 균열이 발생하면 철근과 콘크리트의 부착을 고려하는 인장강성(tension stiffening)모델과 무근콘크리트에서 균열이 발생하면 인장연화(tension softening)모델을 각각 적용하였다. 철근과 텐던은 압축과 인장영역에서 동일한 거동을 하는 것으로 가정하여 탄소성모델을 적용하였다. 그리고 텐던은 임의의 위치에서 구현이 가능하도록 삽입(embedded) 기법을 도입하여 모델링 하였다. NUCAS 코드의 쉘요소와 고체요소에 사용된 콘크리트의 재료모델을 그림 1(a)와 (b)에 각각 도시하였다.



(a) 쉘요소에 도입한 비시적인 재료모델

(b) 고체요소에 도입한 탄소성 재료모델

그림 1. NUCAS에 도입한 재료모델

3. 수치예제

개발된 NUCAS 코드의 성능을 검증하기 위해 다양한 형태의 철근콘크리트 구조물에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석은 쉘요소와 고체요소를 이용해서 각각 수행하였다. 그림 2는 쉘요소를 이용한 수치예제를 보여주고 있다. 쉘요소에 대한 수치예제는 면내 및 면외 하중을 받는 패널, 격납건물 벽체와 유사한 쌍곡셀, 무근콘크리트의 인장연화 거동 예측을 위한 단일노치 보 그리고 한국표준형 격납건물에 대한 비선형해석을 수행하였다. 참고로 해석에 사용된 입력자료와 실험에 관한 자료들은 참고문헌(이상진 등, 2002)에 있다. 수치해석결과로부터 NUCAS 코드의 쉘요소는 실험 및 다른 해석결과와 유사한 결과를 도출하였다.

NUCAS 코드의 고체요소에 대한 성능을 검증하기 위해서 무근콘크리트 이축응력 실험에 사용된 패널을 수치해석 하였다. 이축응력 실험에 사용된 패널은 격납건물 수치해석을 위한 구성방정식 도출을 위해서 격납건물 건설당시의 동일한 재료를 사용하여 제작한 것이다. 해석에 사용된 패널의 유한요소망과 이축응력포락선 그리고 압축-압축영역에서 응력-변형률관계를 그림 3에 도시하였다. 해석결과는 실험결과와 전반적으로 유사한 경

향으로 나타났다.

또한, 격납건물에 대한 적용성을 검증하기 위해 1/6 축소모델에 대한 해석을 수행하였다(그림 4 참조). 그림 4(a)는 1/6 축소모델 격납건물의 기하학적인 형상을 나타내고 있다. 전반적인 거동을 예측을 위해서 개구부와 기초메트는 생략하여, 1/4만 모델화 하였다. 유한요소해석 결과는 격납건물에서 가장 취약하다고 알려진 벽체중간부분 및 스프링라인에서 하중-변위관계를 추출하여 그림 4(b)와 (c)에 각각 도시하였다. 격납건물에 비선형해석 결과로부터 고체요소를 이용한 비선형해석은 실험 및 다른 해석결과와 유사한 결과를 도출하였다.

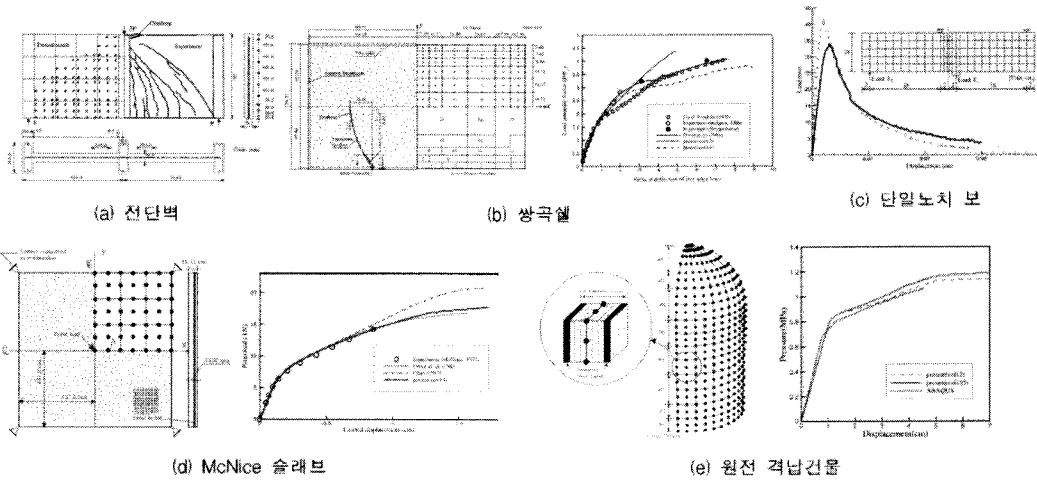


그림 2. 9절점 셸요소를 이용한 수치예제

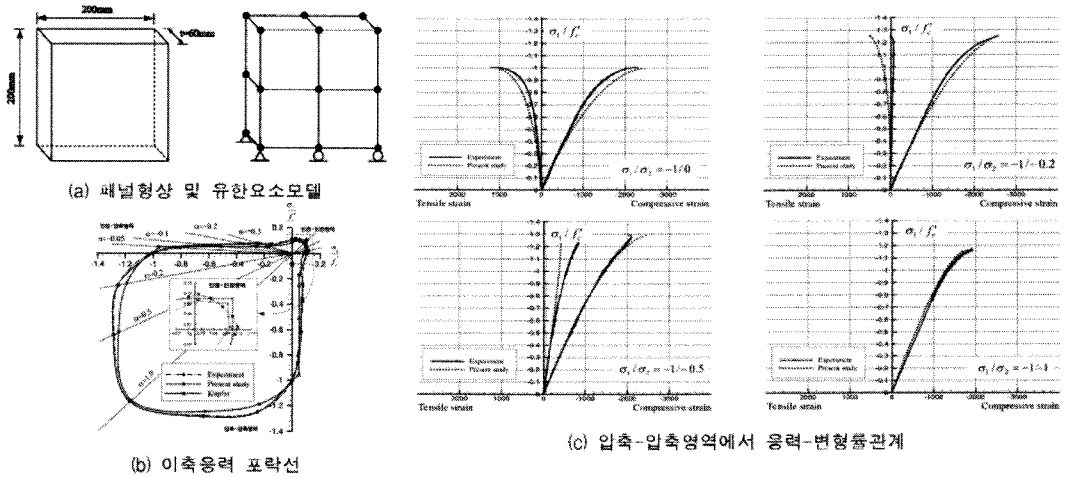


그림 3. 고체요소를 이용한 무근콘크리트 패널의 수치해석 결과

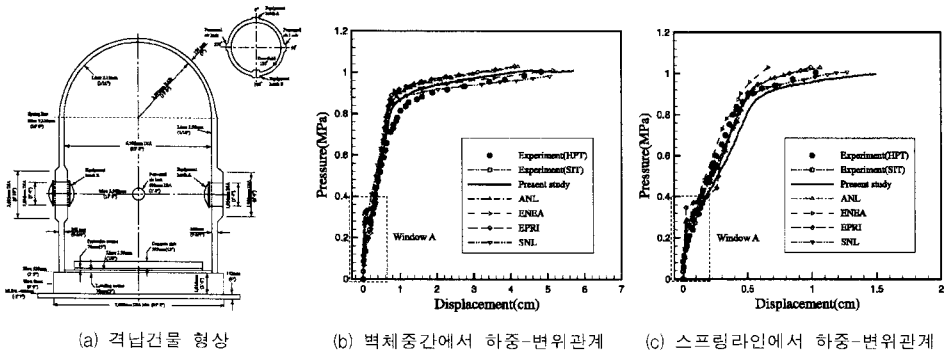


그림 4. 고체요소를 이용한 격납건물의 수치해석 결과

4. 결론

이 논문에서는 원전 격납건물의 비선형해석을 위해 개발된 NUCAS 코드의 모듈과 그 성능을 검증하였다. 한국형표준 격납건물은 기초매트와 벽체 및 돔으로 구성되어 있고, 유한요소해석시 벽체와 돔은 쉘요소로 이산화 할 수 있고 기초매트는 상대적으로 두께가 크기 때문에 고체요소로 이산화 할 수 있으므로 쉘요소와 고체요소를 각각 개발하였다. 개발된 코드의 성능을 검증하기 위해서 다양한 구조물과 격납건물에 대한 수치해석을 쉘요소와 고체요소로 나누어 각각 수행하였다. 유한요소 해석결과로부터 이 논문에서 작성한 NUCAS 코드는 실험 및 다른 해석결과와 유사한 결과를 나타내었다. 따라서 향후 격납건물에 대한 극한내압능력 평가 및 파괴 거동예측을 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- 김남식, 조남소, 구은숙, 조재열 (2001) 프리스트레스 콘크리트 격납건물 부재실험, 한국원자력연구소 위탁 연구보고서, KAERI/CM-493/2001, 2001, p.177.
- 이상근, 조명석, 송영철 (2001) 콘크리트 이축 응력시험, 전력연구원 과기부 수탁과제 2차년도 보고서, TM.99NE02.P2001.178.
- 이상진, 이홍표, 서정문 (2002) 철근콘크리트 격납건물의 비선형해석을 위한 유한요소해석프로그램 NUCAS, 한국원자력연구소, KAERI/TR-2076/02, p.122.
- 이홍표, 전영선, 서정문 (2005) 철근콘크리트 격납건물의 비선형해석을 위한 표준 8절점 고체 유한요소해석에 대한 연구, KEARI/TR-2963/2005, p.72.
- 岡村甫, 前川宏一 (1991) 鐵筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版.
- Sandia National Laboratories (2003) Overpressurization test of a 1:4 scale prestressed concrete containment vessel model, NUREG/CR-6810, 2003.