

격납건물 안전성 향상 해석기술 개발에 대한 소고

Development of FE Analysis Techniques for Enhancing the Safety of Containment Building in NPP



이 상 진*

*경성대학교 건축공학과 교수

1. 머리말

원자력분야의 콘크리트구조물의 해석에 대한 연구는 원자력발전소의 격납건물과 매우 밀접한 관계를 가지고 있다. 격납건물은 원자력안전의 최후의 방벽으로 인식되고 있으며 이러한 격납건물의 구조적 안전성을 확보하기 위해 그동안 세계적으로 실험 및 해석적 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 그림 1은 격납건물의 제원을 나타낸다.

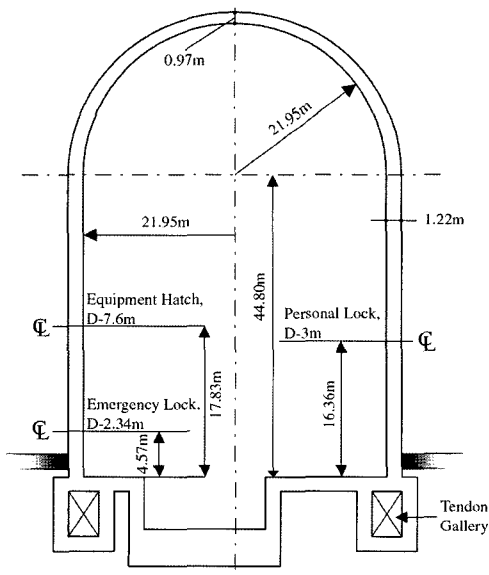


그림 1 한국형 격납건물의 제원

본고에서는 한국원자력연구소 종합안전평가부에서“원자력안전성향상기술개발”의 일환으로 수행한 바 있는 연구내용과 그 결과를 기술하고자 한다. 지금까지 원자력 분야 구조물 안정성 향상 및 평가 기술에 대한 연구는 단계별로 진행되어 왔으며 구조재료의 열화 평가기술, 재료성능검증실험, 재료의 장기거동모델개발, 콘크리트 구성방정식 개발, 격납건물 벽체요소 실험, 격납건물 비선형 해석기술개발 등에 대한 연구가 다양하게 수행되었다.¹⁾

격납건물의 해석기술에 대한 연구는 격납건물의 실제거동을 평가하기 위한 것으로 먼저 파괴모드에 대한 정확한 이해를 필요로 하고 내압능력을 평가하기 위한 구조해석 방법 그리고 수치해석을 수행하기 위한 구조재료모델 개발 등과 같은 총체적인 기술의 개발이 함께 수행되어야 한다. 따라서 이 분야에서 최근 재료 및 구조실험을 통하여 콘크리트 재료의 파괴포락선, 변형률연화모델 등을 도출하였고 이와 관련한 비선형해석코드를 개발하고 있다. 또한 구조물의 안전성 확보를 위해 개발된 구조해석기술은 구조물의 수명연장을 위해 개발되는 장기거동해석모델에도 적용할 예정이다. 이러한 연구과정을 통하여 획득한 다양한 실험데이터와 해석원천기술은 재료의 열화를 포함하는 격납건물의 안전성평가 및 수명연장 코드개발에 활용될 수 있으며 일반 구조물의 안전성평가를 위해서도 활용될 수 있다. 본고에서는 이러한 원자력분야 안전성향상을 위한 연구내용 중에서 격납건물 안전성 향상 해석기술개

발에 대하여 기술하고자한다.

2. 격납건물 안전성향상 해석기술개발

원자력분야의 격납건물 안전성 향상은 궁극적으로 컴퓨터 시뮬레이션 코드로 집약되어야 한다. 컴퓨터 시뮬레이션 코드의 개발과정을 통하여 격납건물과 같은 원전 중요 구조물의 거동을 정확히 예측하고 궁극적으로는 구조해석 원천기술을 효과적으로 축적하고 집약할 수 있다. 그런데 이러한 코드개발과정은 원전 격납건물의 비선형해석에 이용할 재료모델에 대한 심층적인 이해를 먼저 요구한다.

이러한 맥락에서 우리나라에서도 원전 격납건물의 비선형해석에 이용될 재료모델의 개발을 위한 일련의 실험이 수행된 바 있다. 국내 격납건물 건설에 사용된 콘크리트 재료의 특성을 보다 정확히 모사하기 위한 수치모델을 개발하기 위해 그림 2에 도시한 바와 같은 이축응력에 대한 콘크리트재료의 특성분석실험을 한국전력연구원과 한국원자력연구소가 공동으로 수행하였다.²⁾ 실험을 통하여 이축응력상태에 있는 콘크리트재료의 균열발생시점을 적절히 예측할 수 있는 수치모델을 그림 3에 도시된 바와 같이 파악하고 이를 안전해석에 이용하였다.

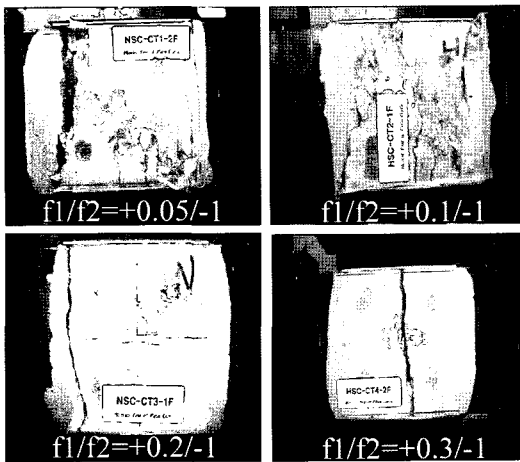


그림 2 순수 콘크리트의 이축응력실험

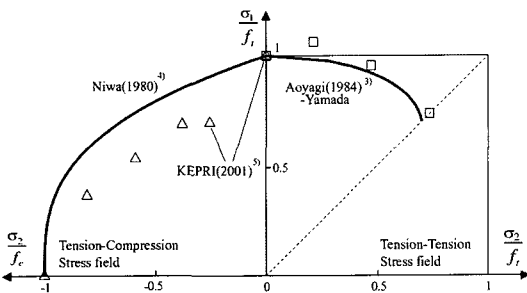


그림 3 콘크리트의 균열발생기준

또한 앞서 언급한 순수 콘크리트재료의 이축응력특성을 분석하기 위한 실험뿐만 아니라 콘크리트 재료의 파괴에너지를 측정하기 위한 직접인장 연화실험을 그림 4에 도시된 것과 같이 실시한 바 있다.³⁾ 이 실험을 통하여 국내 원전 격납건물의 구조해석을 수행할 때 이용하기 위한 콘크리트의 파괴에너지 값 $G_f = 50 N/m \sim 200 N/m$ 을 제시하였다. 그림 5에는 파괴에너지 G_f 를 이용하는 변형률연화 모델을 나타낸다.

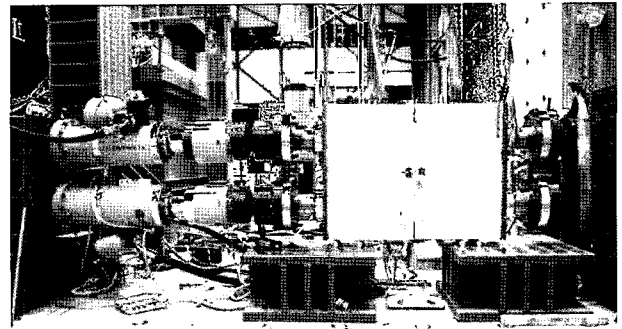


그림 4 순수콘크리트의 직접인장연화실험

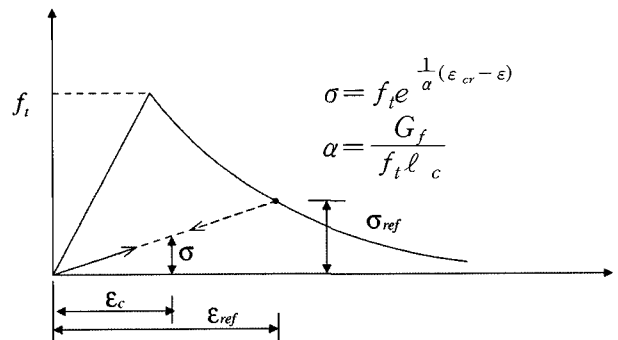


그림 5 변형률연화모델

또한 철근콘크리트 구조물의 인장강성모델을 개발하기 위한 실험적 연구가 그림 6에 도시된 바와 같이 진행되었다.⁴⁾ 한국원자력연구소 주관으로 현대건설기술연구소에서 위탁 수행한 이 격납건물 벽체요소의 축소모델 실험결과를 이용하여 국내 원전 건설에 일반적으로 사용되는 건설재료에 대한 인장강성모델을 그림 7과 같이 도출하였다.

실험을 통하여 제시된 모델을 검증하기 위하여 수치해석모델을 확립하고 격납건물 벽체요소의 축소모델실험에 대한 유한요소해석을 수행하였다.

또한 이와 관련하여 국내 최초로 철근콘크리트 구조물의 실험결과를 이용한 RRA(Round Robin Analysis)를 수행한 바 있다. RRA에는 총 5개의 기관이 참여하였으며 그

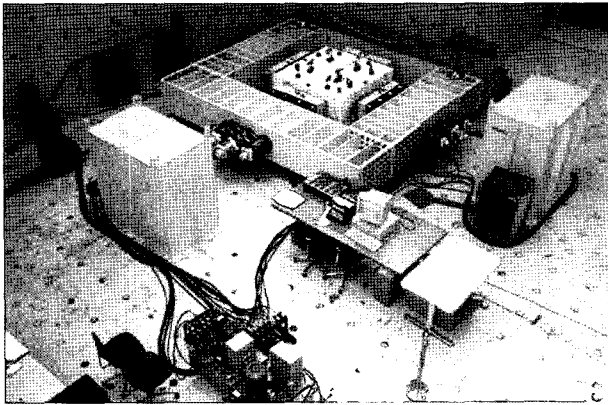


그림 6 격납건물 벽체요소 실험

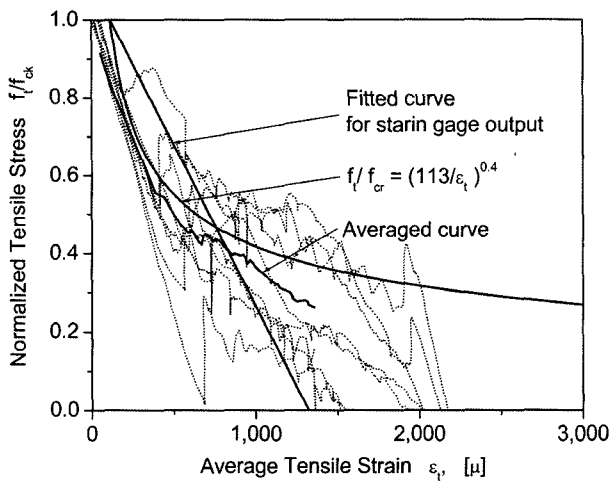


그림 7 균열 발생 후 콘크리트의 응력-변형을 관계곡선

해석결과는 2003년 한국전산구조공학회 가을학술발표회의 특별세션 “A bridge between concrete and computational mechanics”로 구성되어 발표된 바 있다. 그림 8에는 5개 기관에서 수행한 결과의 일부를 도시하였다.⁵⁾

또한 국내에서 수행한 이러한 일련의 연구와 함께 국제 공동의 현안인 격납건물 유한요소해석기술개발을 위해 미국 산디아 국립연구소에서 수행한 격납건물 1/4 축소모델의 실험(그림 9참조)과 관련된 OECD/NEA 공동연구에 참여한 바 있다.⁶⁾

이 실험은 미국 산디아국립연구소와 일본의 NUPEC이 함께 수행하였으며 실험을 전후하여 Pretest RRA와 OECD/NEA 공동연구가 실시되었다. Pretest RRA에는 10개국 17개 기관이 참가하였으며 국내기관 중에서는 한국원자력안전기술원과 한국전력이 참가하였다.⁷⁾ 또한 OECD/NEA 공동연구에는 10개국 12개 기관이 참가하였고 제출된 해석결과는 그림 10에 도시된 바와 같이 함께 비교되었다.

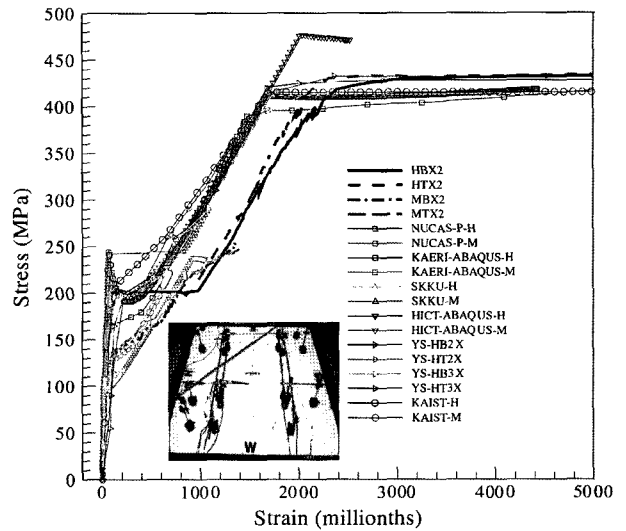


그림 8 격납건물 벽체실험 S40에 대해 5개 기관이 제출한 RRA 결과



그림 9 격납건물 1/4 축소모델 실험

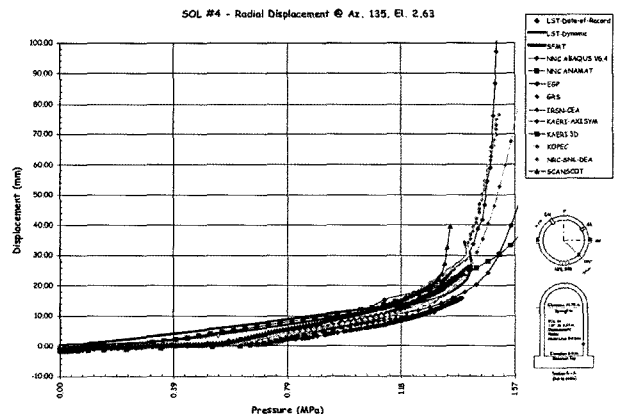


그림 10 격납건물의 방사방향 변위

국내에서는 OECD/NEA 공동연구에 한국원자력연구소와 한국전력이 참가하였으며 축대칭모델과 3차원모델에 대한 결과를 제공하였다. 그림 10에 도시된 바와 같이 참

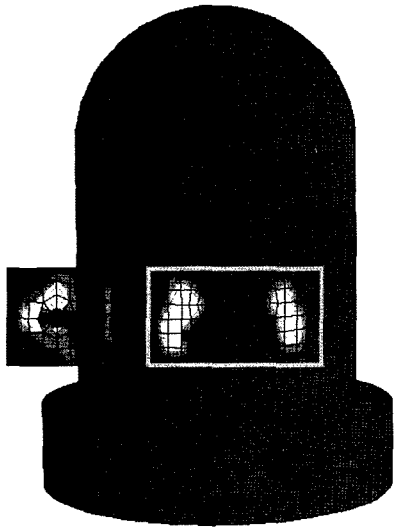


그림 11(a) 극한내압에 의한 격납건물의 초기균열 발생지점

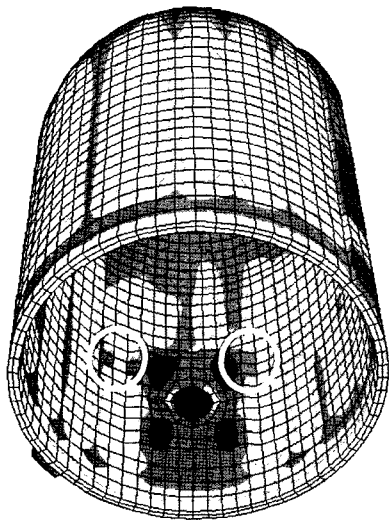


그림 11(b) 극한내압에 의한 격납건물의 철근항복 지점

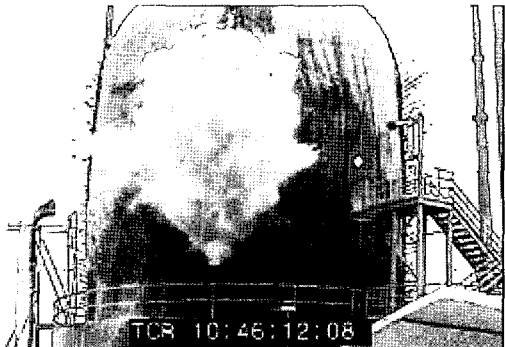
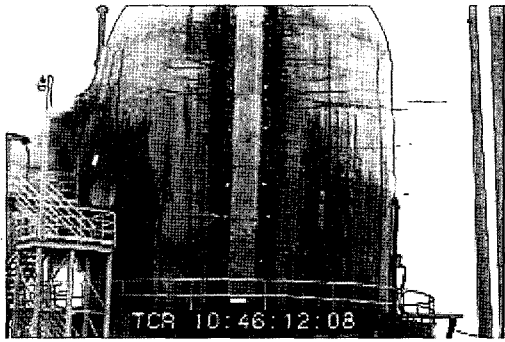
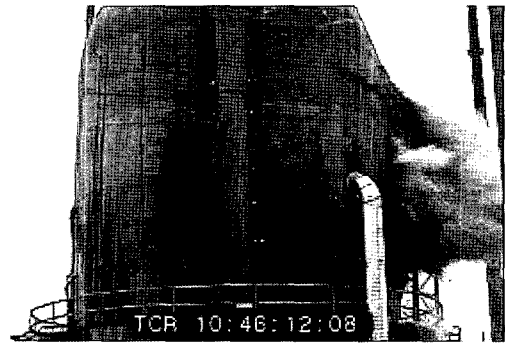


그림 12 격납건물의 극한내압실험에서 파괴시점: 90°각도로 회전하며 촬영

가기관이 제공한 수치해석결과는 실험결과에 비교적 근접한 결과를 나타내었으며 궁극적으로 수행된 실험과 RRA를 통하여 격납건물의 성능에 대한 심층적인 자료와 경험을 축적하였다. 그림 11에는 내압이 작용하는 격납건물에서 발생하는 초기균열과 철근항복이 발생하는 지점을 나타내고 있다. 또한 그림 12에는 격납건물 내압실험에서 격납건물이 파괴되는 시점의 상황을 나타내고 있다. 실험결과와 해석결과로부터 격납건물의 파괴는 개구부 주변에서 발생하는 초기균열이나 접합부파괴에 의해서 일어나는 것으로 나타났다.

실험결과와 함께 현재 국내에서 격납건물의 구조해석을 위해 개발되거나 검증된 연구내용은 다음과 같다:

- 콘크리트의 압축응력상태를 표현하기 위한 소성재료 모델
- 인장-인장 그리고 인장-압축응력상태를 표현하기 위한 콘크리트 균열기준
- 콘크리트의 인장강성모델
- 콘크리트의 전단전달모델
- 철근의 시간이력모델

- 가변형도를 도입한 쉘 유한요소개발
- Enhanced Assumed Strained Method를 이용한 저차 고체유한요소개발
- 철근 및 텐던 삽입요소개발
- 호장조절법과 라인서치를 이용한 비선형 해석알고리즘 개발

개발된 수치해석모델은 다양한 철근콘크리트 구조물에 적용하여 그 성능을 검증하였다. 특히 변형률연화현상에서 나타나는 후정점해석(post peak analysis)와 균열패턴 확인 해석 그리고 구조물의 극한내압해석 등을 통하여 개발된 유한요소해석모델을 검증하였다.⁸⁾

이러한 일련의 연구 활동은 원전 구조물의 안전성을 평가하기 위한 기술개발에 필요할 뿐만이 아니라 앞으로 수행될 다양한 분야의 구조물에 대한 안전성평가기술개발의 기반기술로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

3. 향후 연구방향

지금까지 진행된 연구뿐만이 아니라 궤납건물 안전성 평가분야에서 앞으로 진행되어야 할 연구현안은 다음과 같다.

- 궤납건물 및 원전 중요구조물의 지진해석 및 내진설계지침
- 원전 궤납건물의 항공기 충격해석관련연구
- 동적 비선형해석을 위한 철근콘크리트재료모델의 개발
- 연속체 구조물의 손상추적기법개발
- 열화와 손상을 포함하는 궤납건물의 안전성 평가기술개발
- 지반구조물상호작용 동적 비선형해석개발
- 궤납건물의 확률론적 안전성 평가기술개발

특히 항공기충돌에 대한 원전궤납건물의 충격해석과 관련된 연구 분야는 911 세계무역센터 항공기 테러사건 이후에 그 관심이 증폭되고 있다. 그리고 이와 관련하여 최근 OECD/NEA에서 관련국들의 연구 활동에 대한 보고가 있었으며 항공기충돌 관련실험, 충돌함수유도, 재료모델개발, 해석모델개발 등에 대한 연구가 각국에서 진행 중에 있다. 항공기충돌에 대한 실험은 그림 13에 도시된 바와 같이 수행한 바 있으며 국내에서도 한국형 궤납건물의 항공기 충돌에 대한 3차원 유한요소해석에 대한 연구가 그림 14에 도시된 바와 같이 수행되었다. 현재 우리나라는

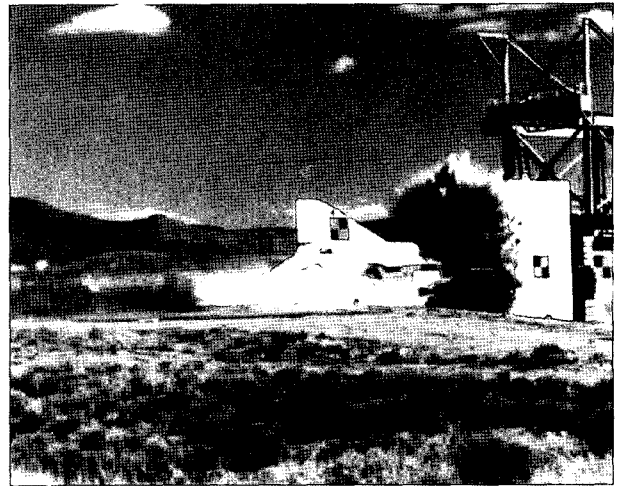


그림 13 콘크리트 벽체에 대한 실물크기의 비행기 충돌실험

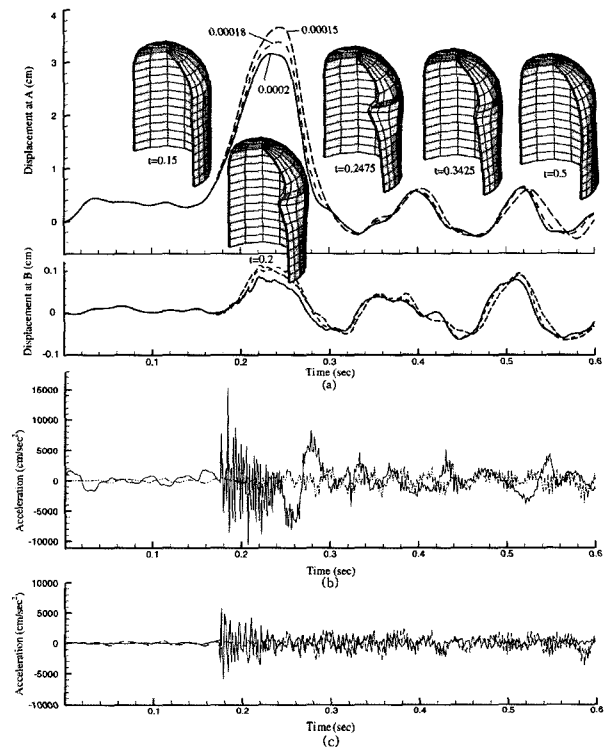


그림 14 항공기충돌에 대한 궤납건물의 동적 비선형거동

항공기 충돌과 관련한 보다 자세한 기술획득과 연구개발이 필요한 시점이라 할 수 있다.

4. 맺음말

궤납건물과 같은 원자력분야의 중요 구조물에 대한 안전성을 향상시키고 평가하기 위한 연구가 매우 다양하게 추진되어 왔다. 이러한 연구개발은 과학기술부 후원으로 중장기과제의 형태로 추진되고 있으며 이는 원자력관련

구조공학분야에서의 지속적인 기술축적과 신기술개발을 위한 밑거름이 되고 있다. 특히 원자력 안전의 최후 방벽으로 간주되고 있는 격납건물의 안전성 향상 및 평가를 위해 구조해석기술개발 분야에서 추진하고 있는 컴퓨터 시뮬레이션 시스템구축과 관련된 연구개발은 격납건물의 안전성 향상 및 평가를 위한 총체적인 기술발전에 크게 이바지 할 것으로 기대되며 앞으로 이 분야에 대한 지속적인 관심과 지원이 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. “격납건물 안전성 향상기술 개발,” KAERI/RR-2213/2001, 2001
2. “콘크리트 이축응력시험,” 한국전력공사 전력연구원, KEPRI/TM.99NE02.P2001.178, 2001
3. “콘크리트 인장연화모델 개발,” 한국전력공사 전력연구원, KEPRI/TM.99NE02. P2002. 178, 2002
4. 김남식, 조남소, 구은숙, 조재열, “프리스트래스 콘크리트 격납건물 부재실험,” 한국원자력연구소, KAERI/ CM-493/ 2001, 2001
5. 세션 “A bridge between concrete and computational mechanics,” 한국전산구조공학회 가을학술발표회 논문집, 2003, pp.569-606
6. “International Standard Problem No.48 Containment Capacity,” NEA/CSNI/R (2005)5
7. “Pretest Round Robin Analysis of a Prestressed Concrete Containment Vessel Model,” NUREG/CR-6678
8. 이상진, 이홍표, 서정문, “철근콘크리트 격납건물의 비선형해석을 위한 유한요소해석프로그램 NUCAS,” 한국원자력연구소, TR-2076 /02, 2002 