

## 철근콘크리트 격납 패널의 비선형 동적해석

### Nonlinear Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Containment Panel

박 재 근\*      김 태 훈\*\*      신 현 목\*\*\*  
Park, Jae Guen   Kim, Tae Hoon   Shin, Hyun Mock

---

#### ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the seismic behavior of reinforced concrete Containment Panel subjected to earthquake motions. A computer program, named RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology), was used for the analysis of reinforced concrete structures. A 4-node flat shell element with drilling rotational stiffness is used for spatial discretization. The layered approach is used to discretize behavior of concrete and reinforcement through the thickness. Material nonlinearity is taken into account by comprising tensile, compressive and shear models of cracked concrete and a model of reinforcing steel. The smeared crack approach is incorporated. Solution of the equations of motion is obtained by numerical integration using Hilber-Hughes-Taylor(HHT) algorithm. The proposed numerical method for the seismic analysis of reinforced concrete Containment panel is verified by comparison of analysis results with reliable experimental results.

---

#### 1. 서 론

원전 격납구조물은 지진 등의 원인으로 사고가 날 경우 내부 방사성 물질이 외부로 누출되지 않도록 하는 최후 방어벽으로, 이 때 발생하는 극한 내압으로 2축 인장응력을 받게 되는 격납구조물의 성능 검증 기술 확보는 격납구조물의 구조적 안정성 차원에서 필수적이다. 대부분 구조물의 설계는 균질성과 등방성을 가정하여 경험적인 재료모델에 의한 선형탄성해석에 크게 의존하고 있다. 그러나 실제로 많은 구조물들에 탄성영역을 넘어서는 하중이 작용하고 있고, 지진하중 등과 같은 큰 하중이 작용하여 구조물의 극한영역에 이르게 된다면 안전율을 확보할 수 없게 된다. 따라서, 구조물의 극한 영역에 이르기까지의 거동을 정확히 평가하기 위한 해석프로그램의 개발을 위해서는 구성재료의 비선형성을 정확히 추적할 수 있는 재료모델의 적용이 필수적이다.

이 연구는 콘크리트와 철근의 비선형 특성을 고려한 재료모델을 이용하여 이축인장을 받는 격납 패널과 면내 교번 반복전단을 받는 콘크리트 판과 동적해석 알고리즘을 사용하여 지진하중을 받는 철근콘크리트

---

\* 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정 수료  
\*\* 성균관대학교 건축, 조경 및 토목공학연구소 연구원, 공학박사  
\*\*\* 성균관대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사

격납 구조물의 거동을 해석적으로 예측할 수 있는 기법을 제시하는데 그 목적이 있다.

이 연구에서는 기존의 저자 등에 의하여 개발되었던 면내회전강성도를 갖는 철근콘크리트 셸요소<sup>(1)</sup>를 사용하여 이축인장, 반복하중 및 지진하중을 받는 철근콘크리트 격납구조물의 거동특성을 예측하고자 한다. 사용된 요소는 2차원 구성방정식과 층상화기법을 이용하여 임의 하중을 받는 철근콘크리트 셸구조에 대한 역학적 거동, 즉 탄성, 비탄성, 극한영역 등 모든 응력상태에 걸친 하중과 변형의 관계와 균열의 진행, 콘크리트와 철근의 응력추적 등을 정확히 해석할 수 있는 3차원 철근콘크리트 셸요소로서 3차원 Beam-Column 요소와 조합하여 사용할 수 있도록 일반적인 셸요소의 자유도에 부재회전 방향의 자유도인 drilling 회전강성도가 도입되어 있다.

## 2. 비선형 유한요소해석 프로그램

### 2.1 비선형유한요소해석 프로그램의 구성

유한요소해석 프로그램을 작성하는 방법은 사용목적에 맞는 전용 프로그램을 새롭게 작성하는 방법과 사용자가 개발한 요소를 추가할 수 있는 모듈화된 범용 유한요소해석 프로그램을 이용하는 방법으로 구분될 수 있다. 전자의 방법은 전용프로그램으로서 입력자료의 작성이 간단하고 해석시간을 줄일 수 있는 장점이 있는 반면에 이미 개발된 또는 앞으로 개발될 다른 종류의 요소와 조합으로 사용하기가 곤란하다.

이 연구에서는 후자의 방법을 택하여 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 셸요소<sup>(1)</sup> 등을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP<sup>(2)</sup>에 이식하여 표 1과 같은 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)를 사용하였다.

표 1 RCAHEST의 구성

Element library	Element number	Description
RCAHEST ( Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology )	Elmt20	2D or 3D Flexibility-based fiber beam-column element (Material nonlinear)
	Elmt21	2D or 3D Flexibility-based fiber beam-column element (Material & Geometry nonlinear)
	Elmt22	4 nodes Elastic shell element
	Elmt23	4 nodes RC shell element
	Elmt24	2D Elasto-plastic plane stress element
	Elmt25	RC Plane stress element
	Elmt26	Interface element
	Elmt27	Reinforcing or Prestressing bar element
	Elmt28	Joint element
	Elmt29	2D or 3D Spring element
Elmt30	4 nodes PSC shell element	

RCAHEST는 내부의 모듈화된 여러 요소들을 조합하여 복잡한 철근콘크리트 구조물 또는 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 비선형 거동을 추정할 수 있는 프로그램이다.

## 2.2 철근콘크리트 셀요소

유한요소해석에서 요소의 선정은 중요하며, 요소범위의 적용과 해석결과의 정확성에 영향을 미친다. 이 연구에서 RCAHEST 프로그램의 철근콘크리트 셀요소를 사용하였으며 셀두께 방향을 여러개의 층으로 나누어 각 층에 해당하는 재료의 2차원 구성방정식을 적용한 층상화기법을 이용하였다. 사용된 요소는 임의형상의 철근콘크리트 셀구조에 대한 역학적 거동, 즉 탄성, 비탄성, 극한영역 등 모든 응력상태에 걸친 하중과 변형의 관계와 균열의 진행, 콘크리트와 철근의 응력추적 등을 정확히 해석할 수 있는 3차원 철근콘크리트 셀요소이다<sup>(1)</sup>.

## 3. 철근콘크리트의 비선형 재료모델<sup>(1)</sup>

철근콘크리트는 복합재료이며, 재료의 비선형성은 타 구조재료에 비해 극히 복잡하다. 특히 균열발생후의 비선형성은 현저하게 나타나며, 이러한 재료적 비선형성에 대해서는 철근콘크리트 요소의 직교 이방성의 가정에 따라, 균열직각방향으로 콘크리트가 부담하게 되는 인장응력을 고려하기 위한 인장강성모델과 균열방향으로의 압축강성 저하를 고려하기 위한 압축강성모델 및 균열면에서의 전단전달효과를 고려하기 위한 전단전달모델을 각각 적용한다.

균열발생후의 비선형성은 현저하게 나타나며, 이러한 재료적 비선형성에 대해서는 철근콘크리트 요소의 직교 이방성의 가정에 따라, 균열직각방향으로 콘크리트가 부담하게 되는 인장응력을 고려하기 위한 인장강성 모델과 균열방향으로의 압축강성 저하를 고려하기 위한 압축강성모델 및 균열면에서의 전단전달효과를 고려하기 위한 전단전달모델을 각각 적용한다.

균열이 분산하여 분포된 철근콘크리트 부재의 변형거동은 사용된 균열개념에 크게 영향을 받는다. 이 연구에서는 제 2 균열의 발생을 제 1 균열과 직교방향으로 발생하도록 제한하여 콘크리트의 강성이 과대평가 되는 직교 고정균열모델과 달리, 실제 주응력의 방향과 직각으로 발생하도록 한 비직교 고정균열모델을 적용함으로써 콘크리트의 강성을 보다 사실적으로 평가하였다.

콘크리트 속의 철근에 대한 항복후 거동은 철근만의 특성과 함께 부차효과 등이 동시에 고려되어야 한다. 콘크리트 속의 철근응력은 일정하지 않고 균열면에서 최대가 된다. 철근의 응력-변형을 관계가 탄성영역에 있는 경우에는 철근만의 구성모델을 적용하면 된다. 그러나, 균열면에서 철근이 최초로 항복하게 되면 철근의 평균응력-평균변형을 관계는 더 이상 탄성관계가 성립하지 않는다. 균열부분을 제외하면 철근은 아직 항복을 하지 않았으므로 증가된 변형률에 따라 응력이 증가하게 된다. 즉 균열부분은 철근의 항복으로 인해 응력의 증가가 없지만 내부의 철근의 응력은 증가하여 철근의 평균응력이 증가하게 되므로 철근만의 응력-변형을 관계에서 볼 수 있는 항복고원현상은 나타나지 않는다. 이 연구에서는 포락선부분에 대한 철근의 항복 후 거동을 저자 등이 제안한 trilinear 모델로써 표현하였다.

## 4. 수치예제 및 고찰

철근콘크리트 격납구조물의 균열발생 및 철근의 항복 및 극한거동의 이력을 표현할 수 있는 이 논문에서 제안한 재료모델과 유한요소 프로그램의 검증을 위하여 가로 세로방향으로 2:1의 인장하중과 1:1 인장하중을 받는 격납 패널<sup>(3)</sup>, 요소레벨의 시험체인 면내 교번 반복전단을 받는 Stevens등<sup>(4)</sup>의 시험체와 구조물레벨의 지진하중을 받는 철근콘크리트 구조물을 모사한 프랑스 원자력청에서 실험한 5층 전단벽체 구조물<sup>(5)</sup>을 선정하여 해석하고 해석 결과를 고찰한다.

#### 4.1 이축인장을 받는 격납 패널

이 연구에서 선정한 실험체는 이축 인장을 받는 상태의 격납 패널을 대상으로 하였으며, 실험체의 두께는 실제 원전 격납구조물의 벽체 두께의 절반에 해당하는 half-thickness model의 패널을 제작하여 인장-인장을 받는 실험을 수행하였다.<sup>(3)</sup> 실험체는 균열거동 실험체(CP)와 구성방정식 도출 실험체(CL)로 나누어져 있으며, 실험체의 변수 및 설계조건은 표 2과 같고 실험체의 단면과 철근상세 재하방법 등은 참고문헌<sup>(3)</sup>에 자세히 설명되어있다. 해석결과는 그림 1~그림 5와 같이 이축인장을 받는 격납 패널의 실험결과를 해석결과가 잘 추측하는 것을 알 수 있다.

표 2 실험체 변수 및 설계조건

콘크리트 압축강도 (Mpa)	철근비	배 근	실험체 크기 (mm)	피 복 (mm)
40(CP)	0.0085	8-D35(SD40)	1500 × 1500 × 600	83
60(CP)				
40(CL)	R1=0.0090	8-D29(SD40)	1500 × 1500 × 380	80
	R2=0.0135	8-D29(SD40)	1000 × 1000 × 380	80
	R3=0.0188	10-D29(SD40)	900 × 900 × 380	80

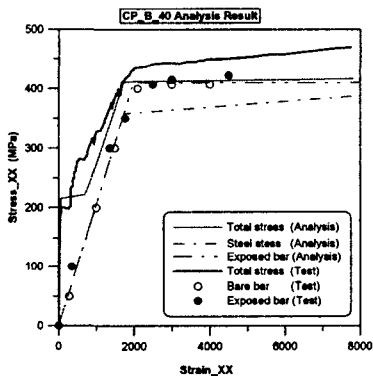


그림 1 CP\_B\_40의 해석결과

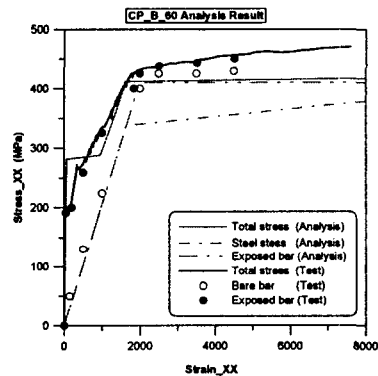


그림 2 CP\_B\_60의 해석결과

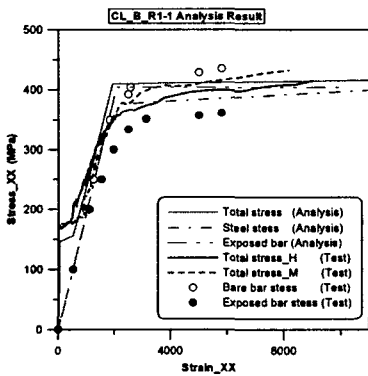


그림 3 CL\_B\_R1의 해석결과

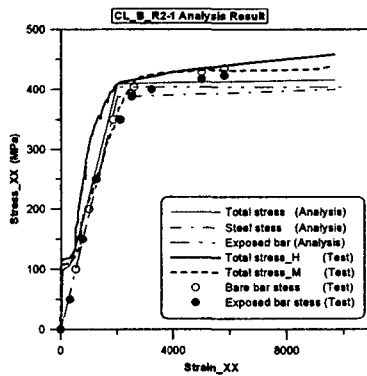


그림 4 CL\_B\_R2 해석결과

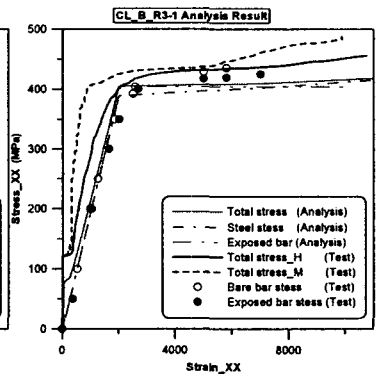


그림 5 CL\_B\_R3 해석결과

#### 4.2 면내 교번 반복전단을 받는 요소

면내 교번 반복전단을 받는 콘크리트 판의 거동에 대해서 타당성이 있는가를 확인하기 위해서 Stevens등<sup>(4)</sup>이 실험한 이형철근으로 된 철근콘크리트 셀요소를 해석하였다.

시험체의 크기는 1524×1524×285 mm이며 그림 6과 같이 하나는 철근이 등방성으로 배근되었고(SE9) 다른 두개는 이방성으로 배근되었다(SE8, SE10). 각 시험체의 재료특성은 표 3에 나타내었다.

교번 반복 전단하중은 철근과 45.°의 두 직각방향으로 작용된 등가의 인장과 압축력(그림 6의  $f_v = f_h$ )에 의해 철근방향에 작용된다.

요소에 걸쳐 힘의 분포가 균일하기 때문에 시험체의 응답을 예측하기 위해서 하나의 유한요소를 사용하였으며 요소당 층의 개수는 두 개로 하였다.

해석과 실험결과를 비교한 것이 그림 7까지 나와 있다. 재하뿐만 아니라 제하와 재재하의 실험결과에서도 해석결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

표 3 SE 시험체의 재료 특성

시험체	콘크리트	철근			
	압축강도 (MPa)	각 층당 x방향 철근비	x방향 철근의 항복강도(MPa)	각 층당 y방향 철근비	y방향 철근의 항복강도(MPa)
SE8	37.0	1.465	492	0.49	479
SE9	44.2	1.465	422	1.465	422
SE10	34.0	1.465	422	0.49	479

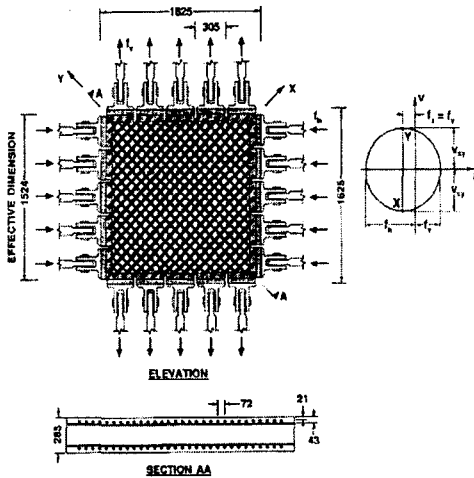


그림 6 철근배근과 하중상태

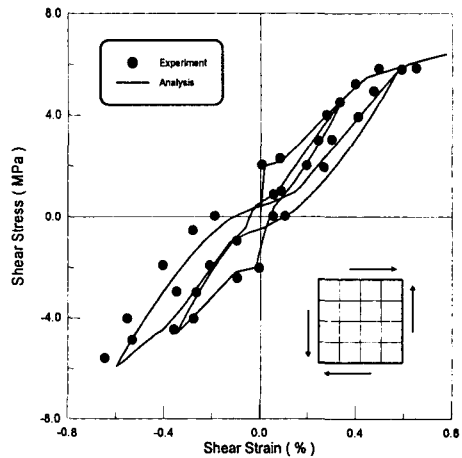


그림 7 SE8의 해석결과

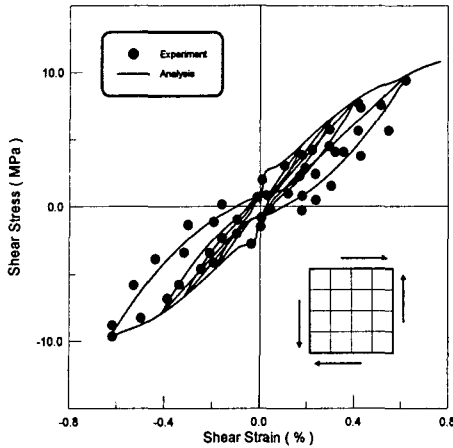


그림 8 SE9의 해석결과

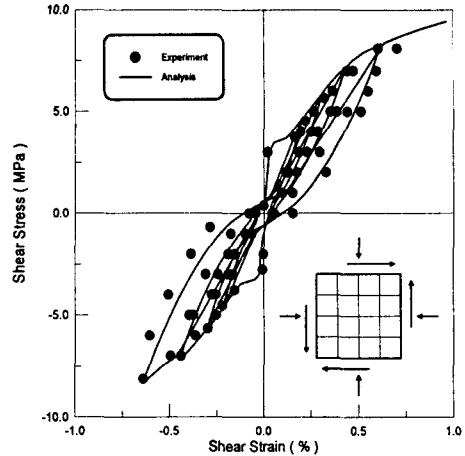


그림 9 SE10의 해석결과

#### 4.3 지진하중을 받는 전단 벽체 구조물

이 연구에서 철근콘크리트 재료모델과 지진하중을 받는 철근콘크리트 구조물 해석의 타당성을 검증하기 위해서 그림 10에 나타난 것과 같은 프랑스 원자력청에서 실험한 전단벽체<sup>(5)</sup>를 선정하였다. 이 실험체를 해석 예로 채택한 이유는 지진하중을 받는 철근콘크리트 구조물의 지진거동을 정량화 시킨 실험이기 때문이다. 구조물의 비선형응답은 운동방정식의 점층 증가방식의 수치적분에 의하여 구해지며 주로 직접적분법이 사용되고 있으며 이 연구에서는 Hilber-Hughes-Taylor(HHT) 법을 사용하였다.

이 연구에서 해석한 실험체(Camus)는 6개의 floor로 연결된 2개의 5층 철근 콘크리트 전단벽체로 기초는 shaking table에 고정되어 있다. 세부적인 구조제원, 재료물성, 그리고 재하방법 등은 참고문헌<sup>(5)</sup>에 자세히 설명되어있다.

유한요소해석은 요소수는 237개, 절점수 284개를 사용하여 한쪽 벽체만을 모델링하였다. Shaking table은 강재로 모델링하였으며, shaking table과 지반과의 연결에는 스프링 요소를 사용하였다. 이때 스프링 요소의 강성은 400 MN/m이다.

실험체(Camus)의 고유 진동수는 first mode는 7.24Hz, second mode의 고유진동수는 33Hz, 그리고 연직방향 eigenmode의 고유 진동수는 20Hz로 측정되었다. 이 연구의 해석모델을 적용한 해석결과는 first mode의 고유 진동수가 7.56Hz로 실험 결과와 약 4.4%의 오차를 보였고, second mode의 고유 진동수는 33.56Hz로 약 1.7%의 오차를, 그리고 eigenmode의 고유 진동수는 22Hz로 약 10%의 오차를 보여 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

실험은 그림 11과 같이 인공지진인 Nice signal과 San Francisco signal을 이용하여 서로 다른 PGA값을 가지는 RUN1부터 RUN3까지의 지진입력 데이터를 생성하여 사용하였다.<sup>(5)</sup>

그림 12 ~ 그림 14은 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석과 실험에 의한 변위응답을 나타내고 있다. 여기서의 변위는 상대변위로 level 6과 level 1에서의 변위의 차를 나타낸다.

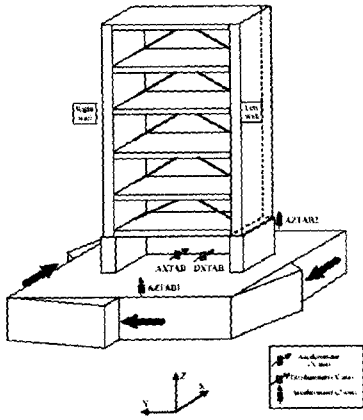


그림 10 실험체(Camus)의 형상

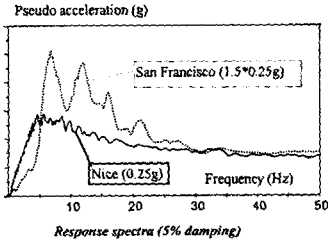
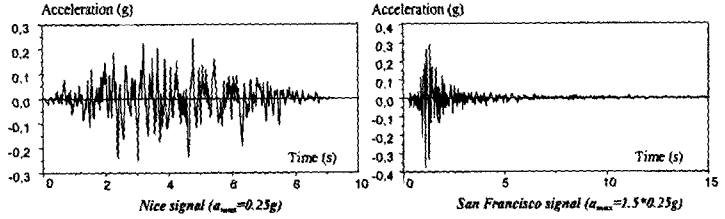


그림 11 입력지진의 유형

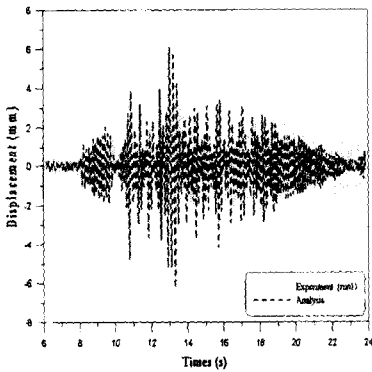


그림 12 변위응답 RUN1

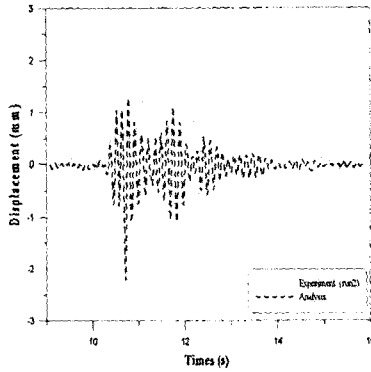


그림 13 변위응답 RUN2

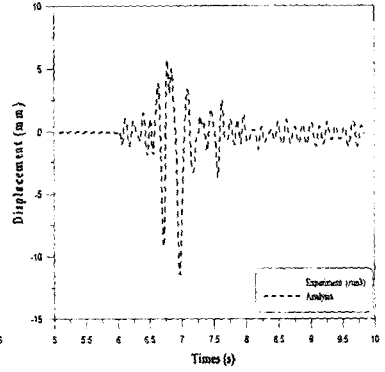


그림 14 변위응답 RUN3

3가지 입력데이터에 대한 구조물의 거동 특성을 분석한 결과 최대 상대변위의 크기에서 약간의 차이를 보이고 있으나 상대변위의 주기 및 지진하중에 대한 전체적인 거동 특성은 전반적으로 잘 추적하고 있음을 알 수 있다.

## 5. 결론

이 연구에서는 철근콘크리트 격납 구조물의 균열 및 반복하중과 지진하중에 대한 거동특성의 예측을 위하여 해석기법과 모델을 제시하였고 제안된 해석기법과 모델을 적용한 비선형 유한요소해석 프로그램 (RCAHEST)를 사용하여 이축 인장을 받는 격납 패널, 면내 교번 반복전단을 받는 콘크리트 판, 그리고 지진 하중을 받는 전단벽체를 해석하였다. 실험결과와 비교·검토된 수치예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 이축 인장을 받는 철근콘크리트 패널의 콘크리트의 균열발생과 철근의 항복을 비교적 정확하게 예측함

으로서 격납구조물과 같이 균열발생이 구조물의 안전에 지대한 영향을 미치는 철근콘크리트 구조물에 이 논문에서 제안한 유한요소해석 프로그램의 적절한 사용을 통하여 구조물의 안전을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

2) 면내 반복 전단을 받는 구조물의 해석을 통하여 제안한 유한요소해석 프로그램이 반복하중을 받는 철근콘크리트 격납구조물의 균열, 철근의 항복 및 극한거동을 비교적 잘 추적할 수 있음이 검증되었다.

3) 지진하중을 받는 철근콘크리트 전단벽의 응답특성을 제대로 평가함으로써 철근콘크리트 격납구조물과 같은 중요한 철근콘크리트 구조물의 내진성능 평가 및 설계검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 연구는 한국원자력안전기술원(KINS)과 지진공학연구센터(KEERC)의 연구비 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 지원에 감사드립니다. 자료를 제공해주신 한국원자력연구소의 이상진 박사님과 현대건설기술연구소의 김남식 박사님께 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Kim, T. H., Lee, K. M., and Shin, H. M., "Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Shells Using Layered Elements with Drilling Degree of Freedom", *ACI Structural Journal*, Vol. 99, No. 4, 2002, pp. 418-426.
2. Taylor, R. L. *FEAP - A Finite Element Analysis Program*, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2, 2000.
3. 한국원자력연구소(2001), 프리스트레스 콘크리트 격납건물 부재실험.
4. Steven, N.J., Uzumeri, S.M. and Collins, M.P. "Reinforced Concrete Subjected to Reversed Cyclic Shear - Experiments and Constitutive Model", *ACI Structural Journal*, 1991, pp. 135-146.
5. Combescure, D. "IAEA CRP-NFE Camus Benchmark. Experimental Results and Specifications to the Participants", SEMT/EMSI/RT/02-047/A, 2002.