

## 프리스트레스트 콘크리트 원자로 격납고의 유한요소해석

### Finite Element Analysis of PSC Reactor Containment Vessels

송 하 원\*      최 강 룡\*\*      김 경 단\*\*\*      변 근 주\*  
Song, Ha-Won, Choi, Kang-Ryung, Kim, Kyung-Dan      Byun, Keun-Joo

---

#### ABSTRACT

In this paper, a finite element technique is applied to both reinforced concrete and prestressed concrete containment vessels to predict the ultimate pressure capacity of the vessels subjected to internal pressure due to accident. The so-called volume-control technique is utilized to control the change in volume enclosed by the cylindrical containment vessels and layered shell elements equipped with a pressure node is utilizing to model the PSC vessels. The finite element analysis is carried out to obtain both global and local failure behavior of prestressed concrete nuclear containment vessels. Analytical results are verified by comparison with experimental data.

---

#### 1. 서 론

변위제어법은 콘크리트 구조물의 한계하중 또는 최대하중이후 준취성 거동을 구하는 경우 하중제어법의 단점을 극복하며 효과적으로 사용될 수 있다. 그러나, 외압 또는 내압을 받는 원통형 구조물이나 원자로 격납건물과 같이 특정변위로 구조물의 거동을 대표하기 어려운 경우 전체구조물을 변형에 따른 체적변화를 제어하고 그에 대한 하중의 변화를 구할 수 있는 체적제어법은 변위제어법보다 효과적으로 사용될 수 있다<sup>1),2),3)</sup>. 또한 철근 콘크리트 셸 구조물에 대하여 철근콘크리트 비선형 구성방식과 경로의존적 균열모델을 채택하는 경우, 콘크리트 구조물의 균열등에 따른 거동을 체적제어법을 이용하여 효과적으로 구할 수 있다<sup>4)</sup>.

본 논문에서는 프리스트레스트 콘크리트 원자로 격납건물을 압력증분을 추가 자유도로 갖는 압력절점을 추가한 다층 셸요소로 이산화하여 체적제어 유한요소 해석을 수행하였다. 먼저, 프리스트레싱에 의한 콘크리트 원자로 격납고의 초기변형 거동을 체적제어법을 통하여 재현하였고 내압 증가에 따른 국소 및 전체거동을 해석하여 해석결과를 실험값과 비교하여 체적제어 유한요소 해석방법의 타당성을 검증하였다.

---

\*정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

\*\*한국원자력안전기술원 책임연구원, 연세대학교 박사과정

\*\*\*VSL KOREA 기술연구소 연구원, 연세대학교 석사졸업

## 2. PSC 원자로 격납고의 유한요소 모델링

### 2.1 체적제어법

철근 콘크리트 원통형 구조물의 비선형 파괴해석은 주로 철근의 항복, 콘크리트의 전단파괴 등을 파괴기준으로 한 하중제어 방법을 이용하여 수행되는 경우 구조물의 실제적인 한계하중 및 한계하중 이후의 연화거동을 해석하지 못하거나, 철근과 콘크리트의 상호작용에 의한 재료 모델링이 적절히 수행되지 않아 콘크리트 균열발생 이후에 수치해석이 불안정해지는 문제점을 갖고 있다<sup>1)</sup>. 한편 구조물의 대변형 문제나 안정성 문제에 널리 적용되어 온 변위제어 방법은 구조물의 일부분의 변위가 구조물의 거동을 지배하는 경우 그 부분의 변위를 제어함으로써 최대 하중 이후의 파괴거동을 해석할 수 있으나 원통형 격납고와 같이 특정변위를 정하기 어려운 경우 적용하기 어려운 한계를 갖고 있다<sup>3)</sup>. 이에 본 논문은 철근 콘크리트 구조내에서의 텐던에 의한 프리스트레싱과 철근과 콘크리트의 구성방정식을 도입한 적층셀 요소를 이용하여 PSC 구조물을 모델링하였고, 적층셀 요소에 압력증분을 자유도로 갖는 소위 압력절점<sup>5)</sup>을 추가하여 유한요소법의 평형방정식으로부터 원통형 구조의 변형에 따른 체적의 변화와 이에 따른 하중의 변화를 직접적으로 구할 수 있도록 체적제어법을 도입하였다. 즉 전체적인 변형이 구조물의 거동을 지배하는 원통형 구조물의 체적을 직접적으로 제어함으로써 최대하중과 그 이후의 파괴거동을 해석할 수 있게 하였다.

체적제어법을 위해 도입된 압력절점은 요소의 균등한 압력증분( $\Delta p$ )을 1개의 자유도로 갖는 가상의 절점이다. 경계  $b$  로 둘러 쌓인 물체에  $\Delta p$  에 의한 체적증분( $\Delta V$ )은 형상함수( $N$ )를 이용하여 식 (1)과 같다.

$$\Delta V = \left( \int_b n^T \cdot N db^e \right) \Delta U \quad (1)$$

이 절점을 셀요소에 추가하고 체적변화와 압력증분의 관계를 기존의 유한요소이산화에 따른 평형방정식에 포함시켜서 강성도행렬을 재구성하면 식 (2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}^e & \int_b n^T N db^e \\ \int_b n^T N db^e & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -p \int_b n^T n db^e + \mathbf{F}^e \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서  $n$  은 요소 경계면에 수직방향의 단위 벡터이고,  $\Delta u$ 는 변위 증분벡터,  $\Delta U$ 은 전체 변위벡터이다. 재구성된 요소 강성도 행렬의 마지막 행과 열은 압력증분  $\Delta p$  자유도에 상응하며, 하중벡터는 추가적으로 체적증분  $\Delta V$  를 포함한다. 따라서 유한요소법의 평형방정식을 만족하면서 체적변화에 상응하는 압력증분량을 결정할 수 있다. 역으로 압력증분에 따른 체적변화도 추정할 수 있다.

### 2.2 적층셀요소

본 논문의 적층셀 요소는 8절점 serendipity 형태의 degenerate isoparametric quadratic 셀요소이며 면외방향 전단변형을 고려한 Reissner-Mindlin형식의 셀요소로서, 두께방향으로 여러 층으로 나누어 각각의 층에 철근 콘크리트의 구성방정식 및 다방향 고정 분산균열모델을 적용하여 구성되었다<sup>4)</sup>. 즉, 적층셀의 정식화는 두께 방향으로 여러 개로 나누어진 층을 무근콘크리트 층과 철근이 분포된 철근콘크리트 층 그리고 프리스트레스트 텐던층으로 구분하여 수행되었다. 셀 요소의 각 절점은 3개의 변위와 2개의 회전, 그리고 요소 평면에 수직한 방향의 회전에 대한 drilling 자유도를 포함한 6개의 자유도를 보유하고 있다.

콘크리트층과 텐던 그리고 철근층으로 나누어 모델링된 적층셀 요소에 사용되는 철근콘크리트의 비선형 재료모델은 콘크리트의 압축균열모델, 인장균열모델, 전단균열모델에 콘크리트내의 철근에 대한 구성법칙을 평균화하여 조합함으로써 구성된다<sup>6)</sup>.

### 3. PSC 원자로 격납고의 극한내압능력 해석

#### 3.1 1/10 축소모델 해석

##### 3.1.1 모델링

Sizewell-B 1/10 축소모형<sup>7)</sup>에서는 라이너가 없으며 1/10 축소모델(그림 1a)이기 때문에 벽체의 두께가 비교적 작고 벽체에 배근되는 철근비가 작은 특징이 있다. 설계압력( $P_d$ )은 0.35 MPa(3.57 kgf/cm<sup>2</sup>)이며 실험에 사용된 텐던은 직경이 8 mm와 12.9 mm의 두가지를 사용하였다. 설계압력( $P_d$ )은 0.35 MPa(3.57 kgf/cm<sup>2</sup>)이며 실험에 사용된 텐던은 직경이 8 mm와 12.9 mm의 두가지를 사용하였다. 사용한 콘크리트의 압축강도는 벽체와 돔에서 42.3 MPa(432 kgf/cm<sup>2</sup>)이고 인장강도가 4.3 MPa(44 kgf/cm<sup>2</sup>)이다. 철근은 항복강도가 644 MPa(6577 kgf/cm<sup>2</sup>)인 철근을 사용하였고, 원주방향 철근비가 0.41%이고 연직방향 철근비가 0.42%를 사용하였다. 버트레스와 같은 벽체의 기하학적인 불연속부분은 모델링에서 생략하였고, 기초부분을 생략하여 회전과 변위를 모두 구속하여 경계조건으로 처리하였다. 그림 1b에서처럼 유한요소로 다층셀 요소를 사용하였다. 벽체부분의 두께는 13.2 cm 이고 돔부분의 두께는 11.4 cm이다.

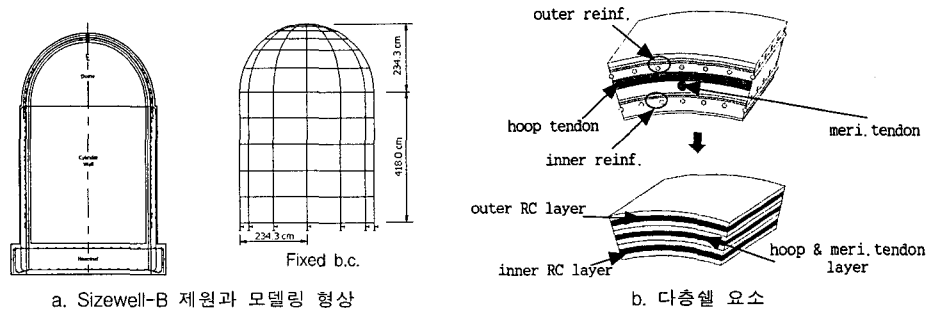


그림 1 1/10 축소모델과 모델링

#### 3.2.2 해석결과 및 비교분석

##### (1) 내압-변위 그래프

벽체원주방향 변위에 대한 체적제어 유한요소해석결과를 하중제어법의 결과와 실험결과<sup>7)</sup>와 비교하였다(그림 2). 해석결과 전체적인 벽체의 강성이 실험값보다 상대적으로 크게 예측함을 알 수 있다. 이는 실제 실험에서는 기초부분의 들림에 의한 벽체의 연성에 영향을 주지만 하중제어법이나 체적제어법에서는 기초부분을 생략한 이유로 판단되며, 체적제어에 의한 해석이 하중제어에 의한 해석 보다 극한하중 상태이후에서 좀 더 안정적으로 거동을 예측함을 알 수 있다.

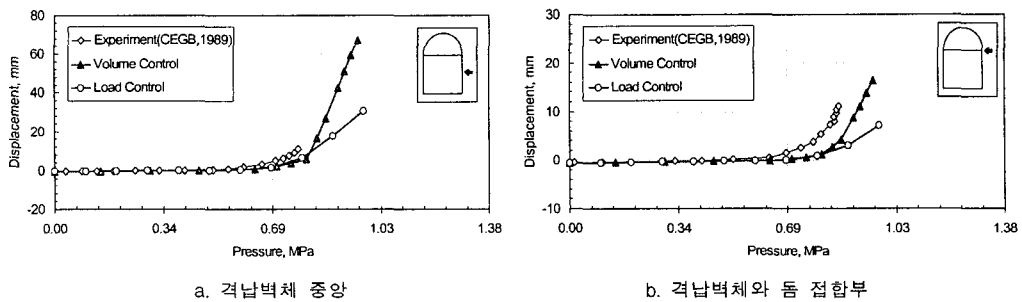


그림 2 원주 방향 변위 그래프

(2) 국소거동

벽체 중앙과 돔 중앙부에서의 원주방향 국소 변형률을 비교하였다(그림 3). 벽체 중앙부의 경우 하중제어법에 의한 해석에서는 철근의 변형률이 약 1.3%에서 해석이 종료하는 반면에 체적제어법에 의한 해석의 경우에는 철근의 변형률이 3.6%에 이를 때까지 해석을 수행하였다. 즉 원자로 격납건물이 극한하중 상태에 이르렀을 때 체적제어법이 국소거동도 안정적으로 예측함을 확인 할 수 있다.

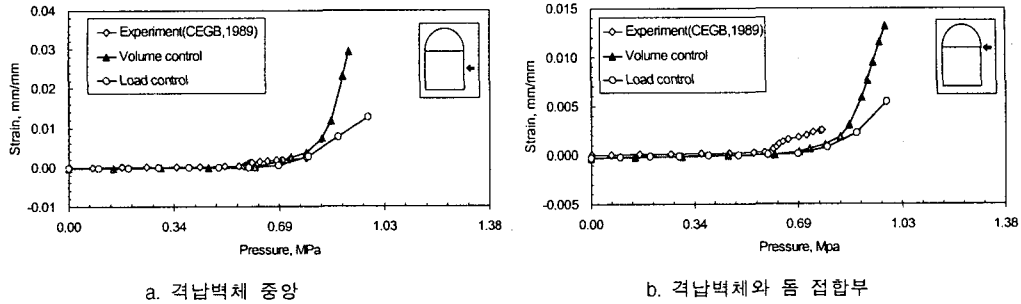


그림 3 원주 방향 변형률 그래프

(3) 하중 단계별 변형도 및 균열도

그림 4는 압력단계별 변형과 균열진행을 보여준다. 설계압력의 1.0배까지는 거의 변형이 없다가 2.0배부분에서 벽체의 부풀음이 보이고 2.5배 되었을 때는 이미 극한하중 이상에 다다랐음을 확인 할 수 있다. 균열발생도 설계압력의 1.0배까지는 균열이 발생하지 않다가 설계압력의 2.0배에서는 균열이 진행중인 것을 알 수 있고, 설계압력의 2.5배에서는 격납건물 벽체 전체에 균열이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

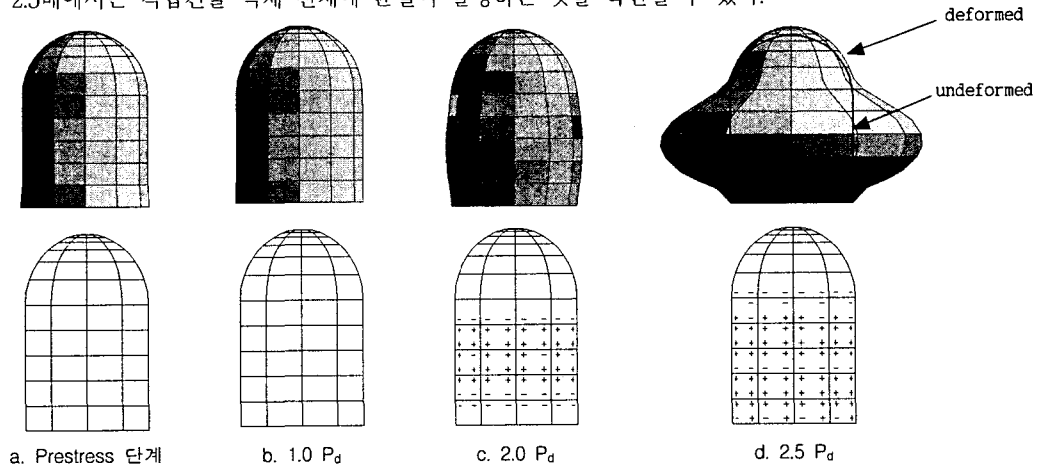


그림 4 하중 단계별 변형도와 균열도

3.2 1/4 축소모델 해석

3.2.1 모델링

미국 Sandia National Lab.(SNL)에서 수행된 가압실험의 모형은 프리스트레스트 콘크리트 원자로 격납건물(PCCV)의 1/4 모형으로서 가압경수로형 원자로(PWR) 격납건물을 1/4로 축소한 모형이며, 두께 1.6 mm 두께의 강제 라이너와 장비출입용 해치, personal airlock 등의 개구부를 포함한다. 그림 5는 PCCV 모형의 형상과 제원을 나타내며 설계압력( $P_d$ )은 0.38 MPa (3.9 kgf/cm<sup>2</sup>)이다. PCCV 1/4 축소모형은 원주 및 연직방향의 철근

및 텐던을 모두 사용하였으며 모형에 사용한 텐던은 직경 13.7 mm 7연선 3개로 구성되며 실린더 벽에 90개, 돔에 18개의 hoop 텐던이 배치되며, 연직텐던은 90개가 배치된다. 사용한 콘크리트의 강도는 벽체와 돔 부분이 43.1 MPa (440 kgf/cm<sup>2</sup>), 기초가 28.9 MPa (295 kgf/cm<sup>2</sup>)이다.

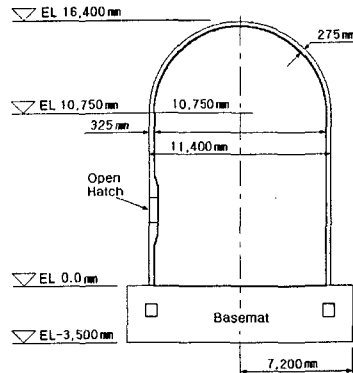
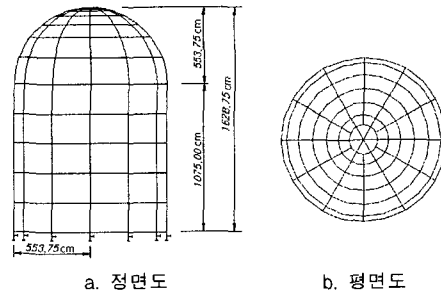


그림 5 PCCV 1/4 모델

모델링에서 벽체와 돔은 그림 1의 b와 같이 9개의 층을 갖는 다층 쉘요소를 사용하여 이산화하였고 장비출입용 해치와 같은 개구부는 모델링에서 제외하였다(그림 6). 9개의 다층쉘요소는 격납건물의 내측에서부터 강제라이너층, 내측철근층, 콘크리트층, 외측철근층, 콘크리트층으로 이루어져 있다. 특히 강제라이너층은 추가 철근층으로 가정하여 해석하였다. 격납건물 벽체 하단의 경계조건은 모든 방향의 변위, 회전을 구속하였다.



a. 정면도

b. 평면도

그림 6 PCCV 유한요소 모델링

해석에 사용한 재료의 물성치는 표 1과 같고 프리스트레스트 콘크리트 원자로 격납건물은 프리스트레싱력에 의하여 초기 변형을 유도하였다.

표 1 PCCV 1/4 모델의 물성치<sup>h)</sup>

Concrete		Reinforcement	
$\sigma_{rk}$	43.1 MPa	$\sigma_y$	480.5 MPa
$\sigma_t$	4.1 MPa	$E_s$	205,800 MPa
$E_c$	31330 MPa	$\nu$	0.3
$\nu$	0.18		

체적제어법에 필요한 텐던의 물성치는 항복응력이 1,666 MPa 이고 원주방향 텐던의 프리스트레싱에 의한 초기 변형률이 0.0059, 자오선방향 텐던의 초기변형률은 0.0072이다. 강제 라이너효과는 철근비를 추가하여 고려하였다.

### 3.2.2 해석결과 및 비교분석

해석결과는 하중제어법에 의한 해석결과 그리고 실험값<sup>8)</sup>과 비교하였다.

#### 1) 내압-변위 그래프

내압-변위 거동을 비교하였다(그림 7). 체적제어법을 한 경우에는 hoop 텐던의 변형률이 3%에 도달하는 지점에서 해석을 종료하였다. 텐던의 변형률이 3%에 도달한 경우에는 텐던이 극한강도에 이른 것이고 이 때부터는 내압의 증가 없이 변위만 지속적으로 증가하게 된다. 실험값의 경우에는 라이너가 찢어지기 시작하면서 누수에 의한 실험의 지속이 불가능한 시점까지 수행된 값이다. 격납건물벽 중앙부에서는 기초부분의 생략에 의한 경계조건의 영향이 거의 없이 실험값 및 하중제어 해석값과도 유사한 경향을 확인할 수 있다. 격납건물벽 중앙부에서는 설계압력의 3.0배까지도 그래프의 경향이 유사하며 3.0배 이후에도 크게 차이를 보이지 않는다.

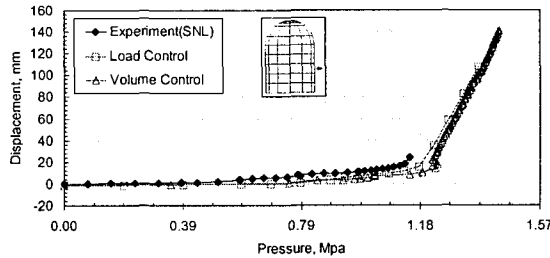


그림 7 벽체중앙에서의 원주방향 변위

그림 8과 9에서 돔 부분의 변위는 돔 정상부와 돔 45° 부분의 변위를 검증하였다. 돔 45° 부분의 지름방향 변위는 전체적인 경향이 하중제어해석과 유사하며 실험값과도 거의 비슷하다. 초기 프리스트레싱력에 의한 변위에서 해석값과 실험값이 차이를 보이고 있으나 하중제어법과는 초기변형에서도 유사한 경향을 확인할 수 있다. 돔 45° 부분의 수직방향 변위에 있어서는 초기변형에 있어서는 하중제어 해석값, 실험값, 체적제어 해석값이 일치하는 것을 확인할 수 있으나 설계압력의 약 2.5배 이후에서 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

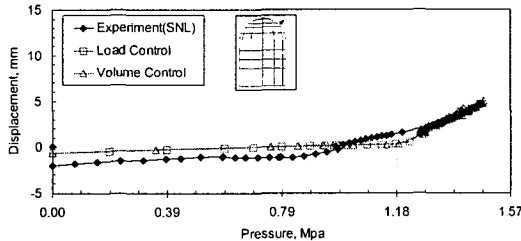


그림 8 돔 45° 부분에서 원주방향 변위

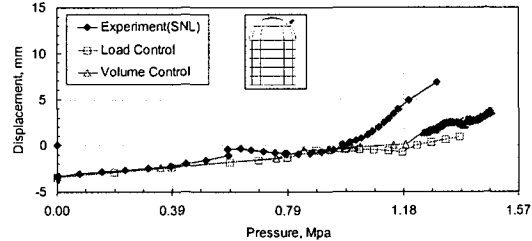


그림 9 돔 45° 부분에서 연직 변위

돔 정상부의 수직방향 변위 그림 10은 돔 45° 부분의 수직방향 변위와 결과가 유사하다. 실험값은 설계압력의 2.5배 이후에서 변위가 상승하는 것을 보여주고 하중제어법과 체적제어법에 의한 해석값은 실험값처럼 급격한 변위의 상승은 없지만 지속적으로 변위가 증가하였다.

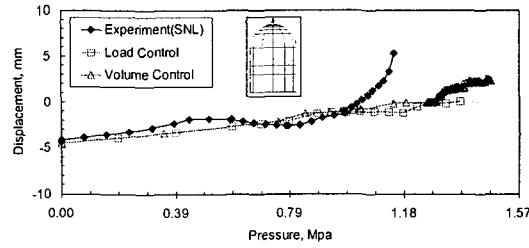


그림 10 돔 정상에서의 수직 변위

### 2) 국소거동

내압-변형률 거동은 철근의 변형률 비교로 프리스트레스트 콘크리트 원자로 격납건물의 벽체 중앙부, 벽체·돔 접합부, 돔 45° 부에서의 외측철근의 원주방향 변형률(그림 11, 12, 13)이다. 변위 그래프는 텐던의 변형률이 약 3%까지의 변위이고 철근의 원주방향 변형률은 3%이후에 해석이 완전히 종료될 때까지의 그래프이다.

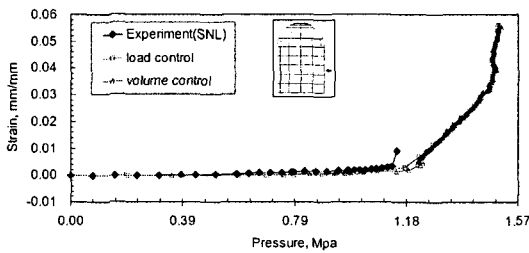


그림 11 벽체중에서 외부철근의 hoop 변형률

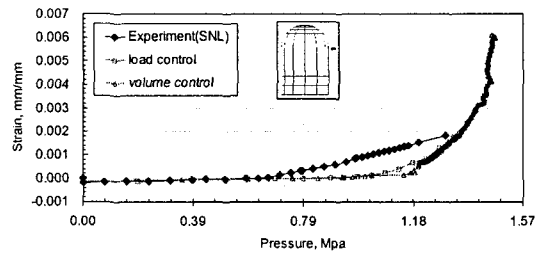


그림 12 스프링라인에서 외부철근의 hoop 변형률

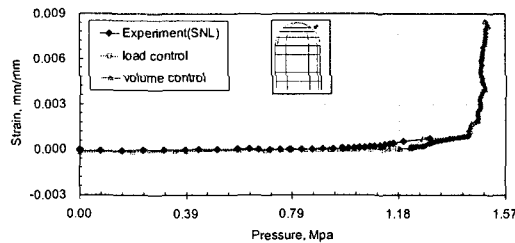


그림 13 돔 45° 부분에서 외부철근의 hoop 변형률

철근 변형률의 국소거동은 전체적으로는 지름방향 격납고의 변위거동과 유사한 경향을 보여준다. 초기경향에 있어서는 실험값 및 하중제어법에 의한 해석값과 매우 흡사한 거동을 확인 할 수 있지만 텐던이 항복하여 처음 그래프의 거동이 바뀌기 시작하는 시점에 있어서는 다소의 차이를 보여준다.

### 3) 하중 단계별 변형 및 균열

내압-변위 거동에서처럼 전체적인 거동이 지름방향 변위의 영향을 많이 받고 설계압력의 3.0배 이후에는 지름방향 변위가 급격하게 증가하였다. 이는 텐던이 항복하기 시작하는 시점이 설계압력의 3.25배이기 때문이다. 즉 3.25배 이후에는 지름방향 변위가 수직방향 변위에 비해서 상대적으로 급격하게 증가하며, PCCV 격납고 모형의 극한거동은 원주방향 거동이 지배함을 알 수 있다. PCCV 1/4 축소모형의 경우 균열을 해석한 결과 설계

압력의 2.0배까지는 균열이 발생하지 않다가, 설계압력의 3.0배에서는 균열이 발생되어 있었고, 설계압력의 3.5배에서는 구조물 전반에 걸쳐서 균열이 발생된 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

압력절점이 추가된 적층셀요소에 의한 원자로 격납건물의 체적제어 비선형 해석으로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 프리스트레스트 콘크리트 원자로 격납고의 누출사고에 의한 거동 및 내압 능력을 압력절점을 추가한 적층셀 요소와 체적제어법을 사용한 유한요소해석으로 규명할 수 있음을 보였다.
2. 프리스트레스트 콘크리트 원자로 격납고(Sizewell-B) 1/10 축소모델 해석을 통하여 원통형 구조와 돔 구조의 복합형태에서의 체적제어법의 적용성을 검증하였고 실험 및 하중제어법과의 비교를 통하여 극한하중 상태에서 체적제어법이 해석을 안정적으로 수행함을 보였다.
3. 프리스트레스트 콘크리트 원자로 격납건물(SNL) PCCV 1/4 축소모델을 유한요소해석하여 하중제어법과의 비교를 통하여 체적제어법이 극한하중 상태에서도 안정적으로 격납고의 내압에 따른 극한거동을 규명할 수 있음을 보였다.

#### 감사의 글

본 연구의 일부는 한국 원자력 안전 기술원의 연구지원(KINS/HR-439)으로 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

1. 송하원, 방정용, 변근주, 최강룡, "압력절점을 갖는 적층셀요소에 의한 콘크리트 구조물의 파괴해석", 전산구조 공학회 논문집, Vol. 12, No. 3, 1999. 9., pp. 475-484.
2. 송하원, 심상효, 방정용, 변근주, "철근콘크리트 원통형 구조물의 비선형 체적제어 해석법", 대한 토목학회 가을학술발표회 논문집, Vol. 1, 1999, pp. 345-348
3. Song, H.-W., Bang, J. Y., Byun, K. J. and Choi, K. R., "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Reactor Containment Vessels subjected to Internal Pressure", *Nuclear Engineering and Design*, (accepted).
4. Song, H.-W., Shim, S. H., Byun, K. J. and Maekawa, K., "Failure Analysis of RC Shell Structures using Layered Shell Element with Pressure Node", *Journal of the Structural Engineering*, ASCE, May, 2002, (in print).
5. Song, H.-W. and Tassoulas, J.L. "Finite Element Analysis of Propagating Buckles", *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, Vol. 36, No. 20, 1993, pp. 3529-3552.
6. Song, H.-W., You, D.-W., Byun, K.-J. and Maekawa, K., "Finite Element Failure Analysis of Reinforced Concrete T-girder Bridges", *Engineering Structures*, Vol 24/2, 2002, pp.151-162.
7. Dameron, R. A., Rashid, Y. R. and Sullaway, M. F., *Pretest Prediction Analysis and Posttest Correlation of the Sizewell-B 1:10 Scale Prestressed Concrete Containment Model Test*, Anatech Research Co., 1998.
8. Hessheimer, M. F., *Pretest Round Robin Analysis of a Prestressed Concrete Containment Vessel Model*, Nureg/Cr-6678, Sandia National Lab., Albuquerque, NM., 2000.