

# 체적제어법을 이용한 철근콘크리트 쉘구조물의 경로의존 비선형 해석

## Path-dependant Nonlinear Analysis of RC shell Structures using Volume Control Method

송 하 원\*      이 준 희\*\*      변 근 주\*\*\*  
Song, Ha-Won    Lee, June-Hee    Byun, Keun-Joo

### ABSTRACT

To overcome the drawbacks of conventional load control method and displacement control method, the so-called volume control method was developed by utilizing a pressure node added into a finite shell element. In this study, an improved volume control method which can analyze path-dependant behaviors of RC shell structures subjected to cyclic loading effectively is developed. RC shell structures are discretized with layered shell elements and in-plane two dimensional constitutive equations for concrete and reinforcements are implemented for each layer of the shell elements. Validity of the so-called path dependant volume control method is also verified by comparing analysis results with other data including experimental results.

### 1. 서 론

RC 쉘구조물은 구조적인 효율성이 뛰어나 지하 LNG 탱크나 각종 저장탱크 및 원자로 격납구조물과 같은 원통형 구조물, 벽체나 슬래브와 같은 판형 구조물 등에 널리 이용되고 있으며, RC 쉘구조물의 정확한 경로의존적 비선형 해석은 균열발생이후의 거동을 정확하게 예측할 수 있어야 한다. RC 쉘구조물의 효과적인 비선형 해석을 위하여 적층셀요소의 각 절점에 면내 회전자유도를 추가하고, 적층셀요소에 압력증분을 추가 자유도로 갖는 압력절점을 추가하여 구조물의 변형에 따른 체적변화를 제어하여 이에 따른 작용 하중을 구할 수 있는 체적제어법<sup>(1)</sup>이 제안되었으나, 반복하중이 작용하는 경우 제어할 체적을 적절하게 규명하지 못하는 제한성이 있었다. 이에 본 논문에서는 RC 쉘구조물이 재하, 제하, 재재하와 같은 반복하중을 받는 경우 구조물의 체적변화를 효과적으로 조절하여 경로의존적 비선형 해석을 효과적으로 수정할 수 있는 소위 경로의존형 체적제어법을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 체적제어법을 기존 체적제어법의 해석시 하중이력에 따른 체적변화 조절의 제한성을 극복하였다.

### 2. 경로의존형 체적제어법

압력절점은 요소의 균등한 압력증분  $\Delta p$ 를 1개의 자유도로 가지는 가상의 절점이며, 유한요소의 강성도 행렬과 하중벡터에 체적과 압력의 관계를 추가하여 체적변화에 따른 압력증분을 직접적으로 제어하기 위한 절점이다. 압력절점을 갖는 적층셀요소는 유한요소의 평형방정식을 만족하면서 요소의 강성도 행렬과 하중벡터에 포함하여 정식화된다. 적층셀요소를 이용한 구조모델링에서 균등한 내압이나 외압을 받는 경우는 물론 부분적으로 압력을

\* 정희원 · 연세대학교 토목공학과 교수 (E-mail:song@yonsei.ac.kr)  
\*\* 정희원 · 연세대학교 토목공학과 석사 (E-mail:nuke13@cmme.yonsei.ac.kr)  
\*\*\* 정희원 · 연세대학교 토목공학과 교수 (E-mail:bvun@yonsei.ac.kr)

받는 경우에도 하중조건에 적합하게 적층셀 요소에 압력절점을 분배함으로써 체적과 압력의 관계를 구할 수 있다. 체적제어법은 압력절점을 갖는 요소의 평형방정식을 만족하는 체적증분  $\Delta V$ 에 대한 등가 압력증분  $\Delta p$ 를 반복 해석으로 구하는 방법이다. 반복해석 과정은 일반적인 접선강성도 행렬을 반복할 때마다 재구성하여 변위증분 및 내부하중 증분을 결정하는 방법인 Newton-Raphson 반복과정을 이용하여 평형방정식을 만족하는 체적변화  $\Delta V$ 에 대한 등가 압력증분  $\Delta p$ 를 구할 수 있다. 따라서 체적을 계속 감소시키거나 증가시켜서 압력증분  $\Delta p$ 의 부호가 바뀌는 한계하중 또는 한계압력에서의 해를 구할 수 있다<sup>(2)</sup>.

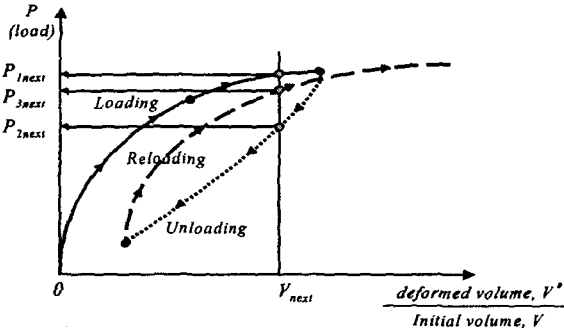


그림 1. 경로의존형 체적제어법에서 체적과 압력과의 관계  
 하중 P는 구조물의 변형이력에 의존한다. 즉, 체적변화는 식(1)과 같다.

$$V_{next} = f(P_{1next}, P_{2next}, P_{3next}) \quad (1)$$

즉, 경로의존형 체적제어법에서는 구조물의 변형이력에 따라 동일하게 주어진 체적에 대해서도 3가지 압력값을 가질 수 있으며, 다음 단계의 계산을 위한 제어체적량도 구조물의 변형이력에 의존함을 알 수 있다.

### 3. 균열을 고려한 철근콘크리트 구성모델

경로의존형 체적제어법에 반영한 철근콘크리트 구성모델은 평균화된 응력-변형률을 사용한 평면구성모델<sup>(2)</sup>이다.

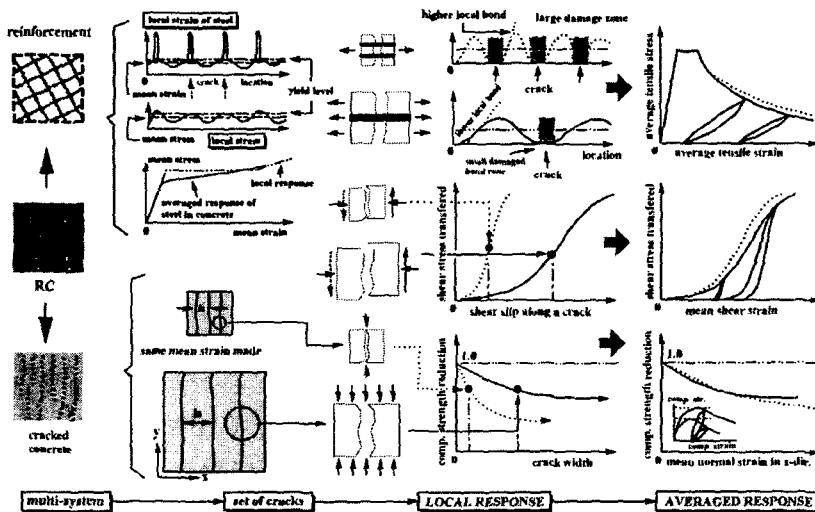


그림 2. 철근콘크리트의 구성모델

또한, 경로의존형 체적제어법에 반영한 철근콘크리트의 균열모델은 콘크리트 셸구조물에 발생하는 균열은 외 부하중조건에 따라 균열폭이 커지거나 작아지는 활성균열(active crack)과 기존의 하중경로에 의해 발생되었지만 현재 닫혀있는 비활성균열(dormant crack)로 나뉘고, 그 발생순서에 따라 제 1 균열과 제 2 균열로 나눌 수 있는 경로의존적 콘크리트 균열모델<sup>(3)</sup>과 균열발생전의 콘크리트 구성모델, 평면응력하의 균열이 발생한 콘크리트의 거 동은 균열면에 평행·직각방향에 관한 이력거동모델(수직응력-변형률 관계)과 균열면에 따른 전단차이에 관한 이력거동모델(전단응력-변형률 관계)를 조합한 균열발생후의 콘크리트 구성모델 및 철근의 철근콘크리트 내에서 평균거동구성모델 등의 각 구성모델을 조합한 직교 2방향 고정균열모델<sup>(4)</sup>로 구성된다.

#### 4. 철근콘크리트 셸구조물의 해석

##### 4.1 이축인장응력하의 철근콘크리트 패널

원자로 격납구조물의 사고시 구조물의 극한거동을 지배하는 격납구조물 중앙부분 벽체의 일부를 모사한 이축 인장 철근콘크리트 패널 부재<sup>(5)</sup>를 대상으로 해석하였다. 실험체의 형상과 유한요소모델링을 그림 3에 나타내었 고, 철근콘크리트 패널의 각 구성재료의 물성치는 표 1과 같다.

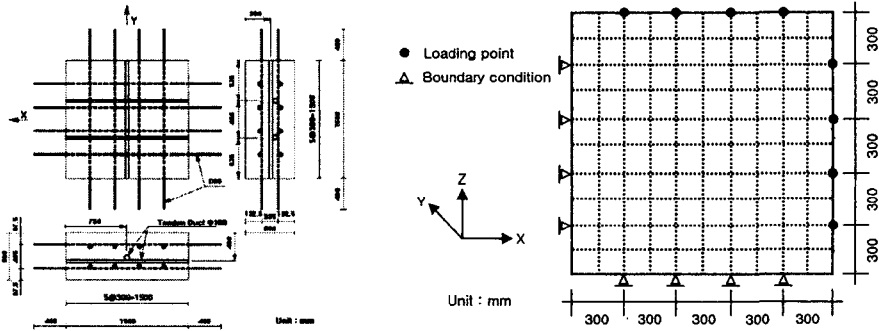
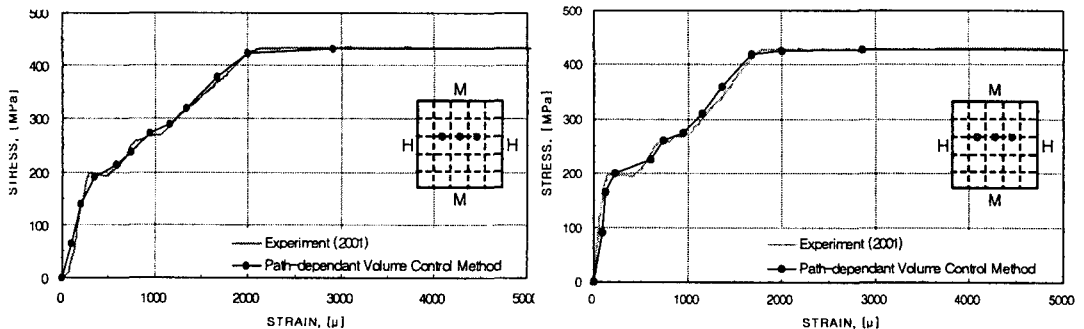


그림 3. RC panel 부재의 형상 및 모델링

표 1. RC panel 부재의 물성치

Concrete				Reinforcing bar	
$\sigma_c$	41.9 MPa	$E_c$	28,328 MPa	$\sigma_y$	410.0 MPa
$\sigma_t$	2.87 MPa			$E_s$	205,744 MPa

체적제어법의 해석결과를 그림 4에 나타내었으며, 실험체의 전체적인 거동을 유사하게 예측함을 알 수 있다.



(a) 콘크리트에 묻힌 상부철근

(b) 콘크리트에 묻힌 하부철근

그림 4. RC panel 부재의 해석 및 실험결과

#### 4.2 극한내압을 받는 철근콘크리트 원자로 격납구조물

1987년에 미국 원자력 규제위원회(NRC)의 주도하에 Sandia National Lab. (SNL)에서 철근콘크리트 격납구조물(RCCV)의 1/6 축소모형<sup>(6)</sup>에 대해 제안된 체적제어법을 적용하여 해석하였다. 설계압력( $P_d$ )은 0.31 MPa이며, 주철근인 원환방향(hoop) 철근과 자오선방향(meridional) 철근은 #4 철근을 이용하였으며, 2개의 장비출입구(E/H)와 2개의 공기밸브(A/L) 및 파이프 등의 관통부를 포함하고 있다. 철근콘크리트 격납구조물 구성재료 각각의 물성치는 표 2와 같으며 SNL에서 수행한 1/6 철근콘크리트 격납구조물 축소모형에 사용된 값과 동일하다. 장비출입구, 공기밸브 및 파이프 등과 같은 변환영역과 기초슬래브는 생략하고 모델링하였다(그림 5).

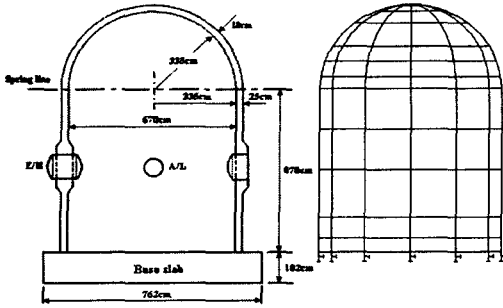


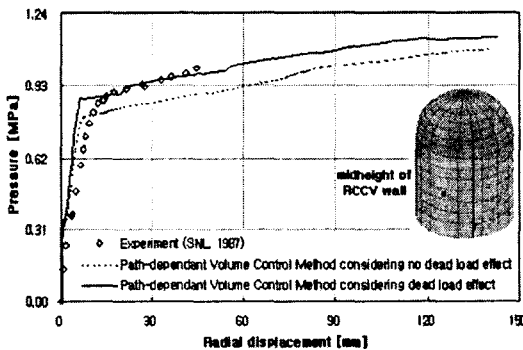
그림 5. RCCV의 형상 및 모델링

해석 초기에 돔 정상부에는 초기변형을 유도하기 위하여 중력방향으로 분포하중을 재하하였고, 자중 고려여부에 따른 철근콘크리트 격납구조물의 전체거동에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 경로의존형 체적제어법을 통한 해석결과를 실험결과와 비교하였다.

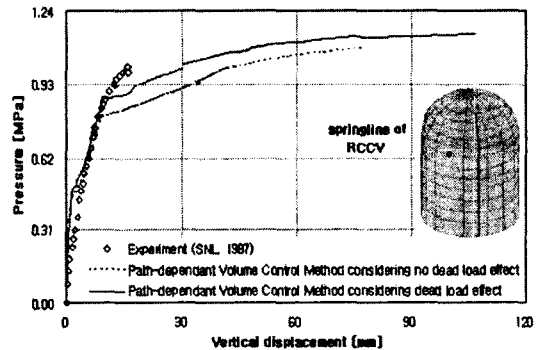
표 2. RCCV의 물성치

Concrete				Reinforcing bar	
$\sigma_{ck}$	46.0 MPa	$\nu$	0.2	$\sigma_y$	450.0 MPa
$\sigma_t$	3.45 MPa			$E_s$	214,000 MPa
$E_c$	33,100 MPa			$\nu$	0.3

그림 6으로부터 자중을 고려하는 것은 격납구조물에 프리스트레스를 가하는 것과 동일한 효과를 보이며, 결과적으로 격납구조물을 보강하는 역할을 하게 되어 실험결과를 보다 정확하게 예측하고 있음을 확인할 수 있다.



(a) 벽체 중앙부



(b) 돔과 벽체 접합부

그림 6. 자중고려유무에 따른 RCCV의 해석 및 실험결과

#### 4.3 철근콘크리트 박스암거의 해석

반복하중을 받는 철근콘크리트 박스암거<sup>(3)</sup>실험에 사용된 형상 및 유한요소모델링은 그림 7과 같고, 해석시 사용한 콘크리트와 철근의 물성치는 표 3에 나타내었다.

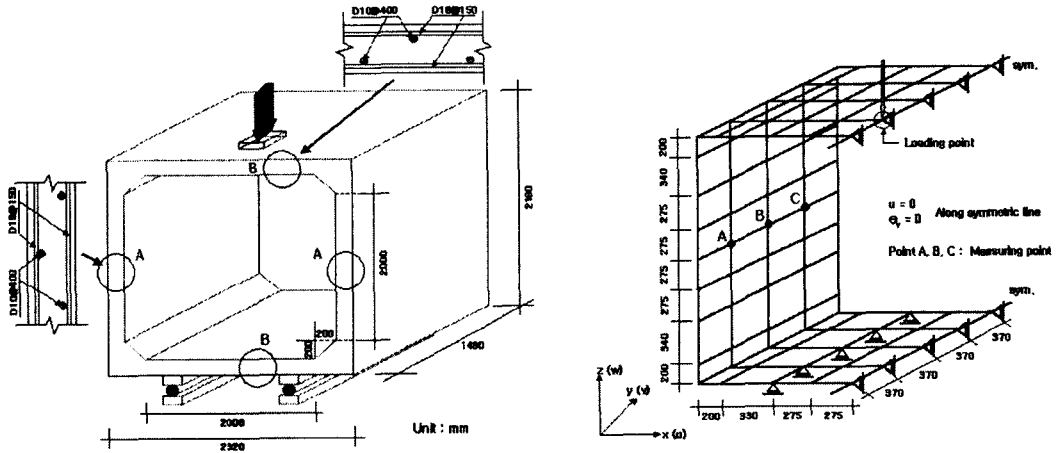


그림 7. RC 암거의 형상 및 유한요소모델링

표 3. RC 암거의 물성치

Concrete		Reinforcing bar	
$\sigma_c$	50.0 MPa	$\sigma_y$	400.0 MPa
$\sigma_t$	4.12 MPa	$E_s$	205,800 MPa
$E_c$	32,438 MPa	$\mu$	1,900.0

그림 8은 반복하중을 받는 철근콘크리트 박스암거의 재하지점에서 하중-변위에 대한 실험결과와 경로의존형 체적제어법의 해석결과를 비교한 것으로, 철근콘크리트 박스암거의 반복거동을 정확하게 재현함을 확인할 수 있다.

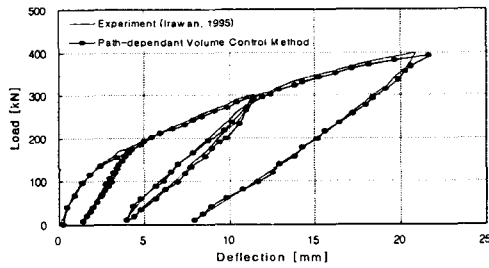


그림 8. RC 암거의 해석 및 실험결과

#### 4.4 철근콘크리트 원통형 탱크

철근콘크리트 원통형 탱크(그림 9)를 대상으로 수평재하시험<sup>(7)</sup>을 실시하여 지진하중과 유사한 역반복 하중을 가하여 구조물의 변형 및 파괴특성에 관하여 검토하였다.

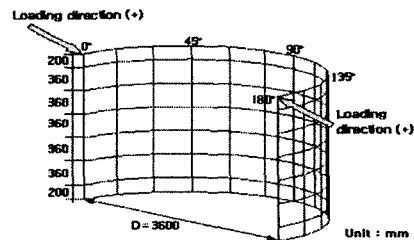
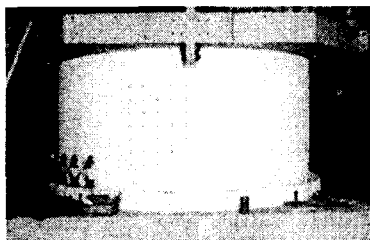


그림 9. RC 탱크의 형상 및 모델링

철근콘크리트 원통형 탱크의 원주방향과 수직방향의 철근비는 0.8%로 동일하며, 철근콘크리트 원통형 탱크의 역반복하중 실험에 사용된 구성재료의 물성치를 표 4에 나타내었다.

표 4. RC 탱크의 물성치

Concrete		Reinforcing bar	
$\sigma_c$	28.0 MPa	$\sigma_y$	386.0 MPa
$\sigma_t$	2.20 MPa	$E_s$	200,000 MPa
$E_c$	22,600 MPa	$\mu$	1,900.0

RC 탱크의 하중-상대수평변위의 관계에 대한 경로 의존형 체적제어법의 해석결과(그림 10)는 철근콘크리트 탱크의 반복거동을 유사하게 예측하고 있음을 확인할 수 있으며, 정(+), 부(-)재하시 대각선 방향으로 균열이 발생하면서 철근콘크리트 탱크의 강성은 저하됨을 정확하게 재현하였다.

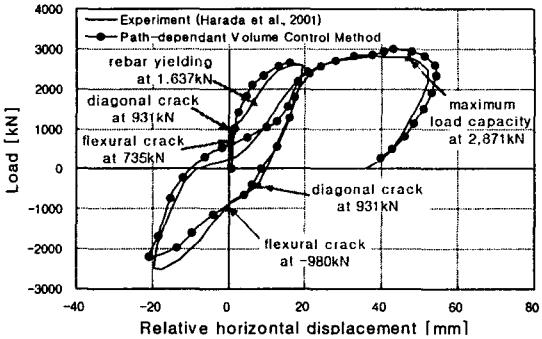


그림 10. RC 탱크의 해석 및 실험결과

## 5. 결 론

본 논문에서는 재하, 제하, 재재하와 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 셸구조물에 대해 해석에 필요한 체적변화를 적절하게 선정하여 비선형 해석을 효과적으로 수행할 수 있는 경로 의존형 체적제어해석방법을 제안하였다. 이 해석기법을 이용하여 이축인장응력을 받는 철근콘크리트 패널, 내압을 받는 철근콘크리트 격납구조물, 반복하중을 받는 철근콘크리트 박스암거, 역반복하중을 받는 철근콘크리트 탱크 등의 해석을 통하여 제안한 해석기법의 적용성과 타당성을 검증하였다.

## 참고 문헌

1. 송하원, 방정용, 변근주, 최강룡, “압력절점을 갖는 적층셸요소에 의한 콘크리트 구조물의 파괴해석”, 한국전산구조공학회 논문집, 제 12권, 제 3호, 1999, pp.475~484
2. 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*, Vol. 128, No. 5, 2002, pp.655~664
3. Irawan, P. and Maekawa, K., “Path-Dependent Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Shells”, *Proceedings of JSCE*, Vol. 34, No. 557, 1997, pp.121~134.
4. Maekawa, K., Okamura, H., and Pimanmas, A., *Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete*, Spon Press, New York, N.Y., 2003
5. 조재열, 김남식, 조남소, 최인길, “원자력 발전소 격납건물 벽체의 균열거동”, 한국콘크리트학회 논문집, 제 15권, 제 1호, 2003, pp.60~67
6. Pfeiffer, P. A., Kennedy, J. M., and Marchertasm, A. H., “Post-test Analysis for Nonlinear Response of an Incrementally Pressurized One Sixth Scale Reinforced Concrete Containment Model”, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 133, No. 1, 1992, pp.143~157
7. Harada, M., Onituka, S., Adachi, M., and Matsuo, T., “Experimental Study on Deformation Performance of Cylindrical Reinforced Concrete Structure”, *Proceedings of Japan Concrete Institute*, Vol. 23, No. 3, 2001, pp.1129~1134.