



경로의존형 체적제어법을 이용한 철근콘크리트 중공 기둥의 유한요소해석

송하원^{1)*} · 남상혁¹⁾ · 임상목²⁾

¹⁾ 연세대학교 사회환경시스템공학부 ²⁾ 동부건설 주식회사

Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Hollow Columns Using Path-dependent Volume Control Method

Ha-Won Song^{1)*}, Sang-Hyeok Nam¹⁾, and Sang-Mook Lim²⁾

¹⁾School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

²⁾Dongbu Co. Ltd., Seoul 135-523, Korea

ABSTRACT The volume control method which utilize a pressure node added into a finite shell element can overcome the drawbacks of conventional load control method and displacement control method. In this study, an improved volume control method is introduced for effective analysis of path-dependent behaviors of RC columns subjected to lateral cyclic loading or reversed cyclic loading along with compressive loading. RC shell structures and RC hollow columns are analyzed by discretizing the structures with layered shell elements and by applying in-plane two dimensional constitutive equations for concrete layers and reinforcement layers of the shell elements. The so-called path dependent volume control method as a finite element analysis technique is verified by comparing analysis results with other data including experimental results. The validity and applicability of the modeling technique is also confirmed by the comparison.

Keywords : volume control method, path-dependent, RC shell structures, RC hollow columns

1. 서 론

구조물의 거동 예측을 위해 주로 사용되고 있는 유한요소법을 이용한 해석시 하중제어법과 변위제어법을 주로 사용하고 있다. 그러나, 하중제어를 통해 해석을 수행할 경우 극한하중 이후의 거동에 대한 해석을 적절히 수행하지 못하게 되는 한계가 나타나게 되고, 변위제어를 통해 해석을 수행할 경우 극한 하중 이후에 하중이 증가함에 따라 변위가 크게 증가하기 때문에 특정 변위를 선택하는데 어려움이 따르게 된다. 현재 광범위하게 사용중인 기존의 유한요소해석 기법인 하중제어법과 변위제어법의 단점을 극복하기 위해, 셸 요소에 가상의 압력 절점을 추가하고 하중-변위의 평형방정식에 체적-압력과의 관계를 도입하여 구조물의 체적을 제어함으로써 구조물의 비선형 해석을 하게 되는 체적제어법이 널리 적용되고 있다.

이 방법으로 외압을 받는 원통형 파이프와 콘크리트 관의 한계압력과 한계압력 이후의 거동을 분석하였고¹⁾, 철근콘크리트 원자로 격납 구조물의 극한 내압을 구할 수 있었으나 수치해석의 발산으로 인하여 극한 내압 이후의

거동은 해석할 수 없었다²⁾. 그 후, 판 구조물과 돔형 및 원통형 구조물 등의 셸 구조물에 적용 가능한 기존의 체적제어법을 의사체적제어법으로 개선하여 원통형 관 및 반구형 돔 구조물과 판형 구조물의 경로의존적 거동을 해석하여 의사체적제어법의 타당성을 검증하였다³⁾.

또한, RC 원자로 격납 구조물 1/6 축소 모델과 PSC 원자로 격납 구조물 1/10 축소 모델 등의 전체 모델링을 통한 해석을 통하여 극한하중 상태와 그 이후에서 구조물의 극한 거동을 안정적으로 수행함을 검증하였으며⁴⁾, PSC 원자로 격납 구조물 1/4 축소 모델에 대한 극한 내압 능력 해석시 기존의 해석 방법보다 체적제어법이 보다 안정적이고 정확한 해석 결과를 도출할 수 있음을 확인하였다⁵⁾. 그리고, 하중 이력에 따라서 변화하는 체적을 적절하게 계산하지 못하는 단점을 극복한 경로의존형 체적제어법을 개발하여 RC 원자로 격납 구조물과 그 벽체, 역 반복 하중을 받는 RC 원통형 탱크, 면의 반복 하중을 받는 RC 슬래브, 반복 하중을 받는 RC 박스 암거 등의 비선형 해석을 실시함으로써 경로의존형 체적제어법의 타당성과 적용성을 검증하였다⁶⁾.

이에 본 연구에서는 경로의존형 체적제어법을 이용하여 다양한 하중과 단면 형태를 갖는 철근콘크리트 중공 기둥에 대한 해석을 통해 그 적용성을 확대하고 기존의 실험 결과 및 해석 결과와의 비교·분석 통해 본 연구

*Corresponding author E-mail : song@yonsei.ac.kr

Received December 26, 2006, Accepted April 30, 2007

©2007 by Korea Concrete Institute

결과의 타당성을 검증하고자 한다.

본 연구에서는 일본 동경대학교에서 개발된 프로그램 COM3를 기반으로 하여 저자들에 의해 개발된 경로의존형 체적제어 해석 프로그램 PCOM을 이용하여 해석을 수행하였다.

2. 철근콘크리트 구성 모델

Fig. 1에 나타난 바와 같이 경로의존형 체적제어법에 반영한 철근콘크리트 구성 모델은 평균화된 응력-변형률을 사용한 구성 모델로서 대표 체적 요소에서 정의된 평균화된 응력-변형률 관계를 사용함으로써 균열 간격, 균열 밀도 등의 크기에 무관하게 균열이 존재하는 콘크리트의 압축, 인장, 전단 및 철근의 인장에 대하여 유일성을 만족하는 구성 방정식을 얻을 수 있다. 콘크리트 내의 철근 모델은 변형률 경화 거동을 고려하여 이중선형 (bilinear)의 평균응력과 평균변형률의 형태로 모델링 되었다. 반복

하중을 받는 경우에는 제하와 재재하에 의한 내부의 곡선을 Kato모델 (1979)과 코사인곡선에 의하여 표현되는 응력 분포의 가정을 적용하였다^{4,7)}.

또한, 경로의존형 체적제어법에 적용된 철근콘크리트의 균열 모델은 경로의존적 균열 모델과 직교 2방성 고정 균열 모델이다. 콘크리트 셸 구조물에 발생하는 균열은 외부 하중 조건에 따라 균열폭이 커지거나 작아지는 활성 균열 (active crack)과 기존의 하중경로에 의해 발생되었지만 현재 닫혀있는 비활성 균열 (dormant crack)로 나눌 수 있다. 이 균열은 발생 순서에 따라 제 1 균열과 제 2 균열로 나뉘게 되고, 그 중 균열폭이 큰 균열을 주 균열, 균열폭이 작은 균열을 부균열이라고 정의한다. Fig. 2는 콘크리트 판 및 셸 구조물에서의 경로의존적 균열 양상을 나타낸 것이다⁸⁾.

또한, 평면응력 하에서 균열이 발생한 콘크리트의 거동은 균열면에 평행·직각 방향에 관한 이력 거동 모델 (수직응력-변형률 관계)과 균열면에 따른 전단 차이에 관한

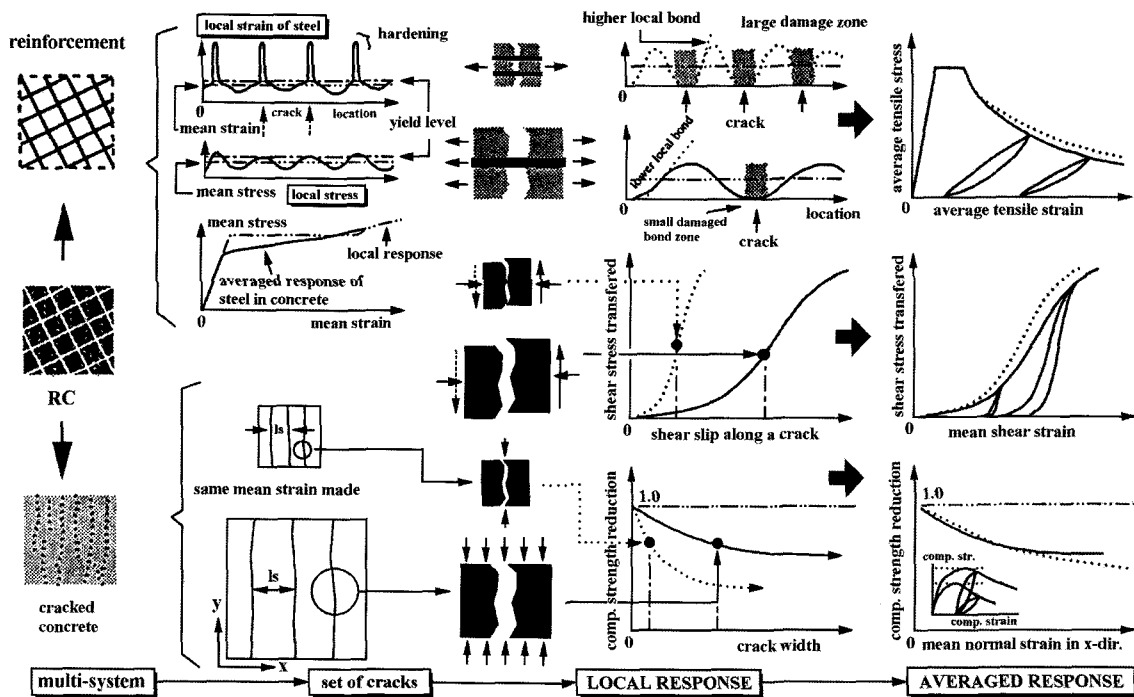


Fig. 1 Composition of constitutive models of reinforced concrete

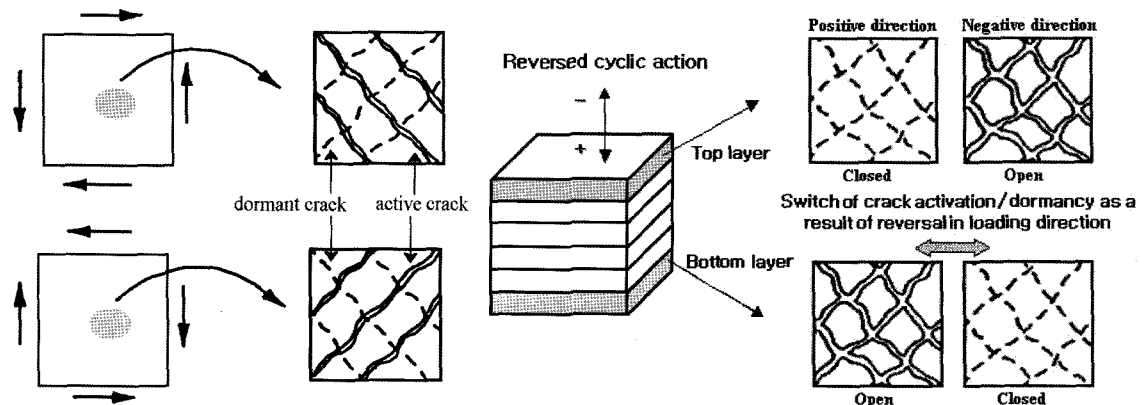


Fig. 2 Crack configuration in panel and shell elements under reversed cyclic loading

이력 거동 모델 (전단응력-변형을 관계)을 조합한 균열 발생 후의 콘크리트 구성 모델 및 철근의 철근콘크리트 내에서 평균 거동 구성 모델 등의 각 구성 모델을 조합한 직교 2방성 고정 균열 모델로 구성된다⁹⁾. Fig. 3은 직교 2방성 고정 균열 모델의 해석 흐름을 나타낸 것이다.

3. 경로의존형 체적제어법

3.1 압력 절점을 이용한 경로의존형 체적제어법

압력 절점은 요소의 균등한 압력 증분 (Δp)을 1개의 자유도로 갖는 가상의 절점이다. 한 절점이 6개의 자유도를 가지는 8절점 적층 쉘 요소에 압력 절점을 추가함으로써 요소는 총 49개의 자유도를 갖는다. 경계 b 로 둘러 쌓인 물체의 Δp 에 의한 체적 증분 (ΔV)은 형상함수 N 을 이용하면 식 (1)과 같이 표현된다.

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

여기서, \mathbf{n} 은 요소 경계면에 수직 방향인 단위 벡터이고, ΔU 는 전체 변위벡터이다.

요소 경계면에 작용하는 표면력의 증감 (Δt)은 압력 절점에서의 압력 증분을 이용하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta t = -\Delta p n \quad (2)$$

경계면에 작용하는 압력은 경계면으로 둘러싸인 체적 안에서 변하게 되므로 표면력의 항은 식 (3)으로 표현된다.

$$\int_b \mathbf{N}^T (t + \Delta t) db = -(\mathbf{p} + \Delta \mathbf{p}) \left(\int_b \mathbf{N}^T \mathbf{n} db \right) \quad (3)$$

압력 절점을 갖는 쉘 요소는 체적과 압력의 관계를 유한요소의 평형방정식을 만족하면서 요소의 강성도 행렬과 하중 벡터에 포함되어 정식화된다. 유한요소법에서 요소의 평형방정식은 외부 하중 벡터는 표면력 (t)만을 고려하면 식 (4)와 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{K}_e \mathbf{U}_k = -(\mathbf{p} + \Delta \mathbf{p}) \int_b \mathbf{N}^T \mathbf{n} db^e + \mathbf{F}_e \quad (4)$$

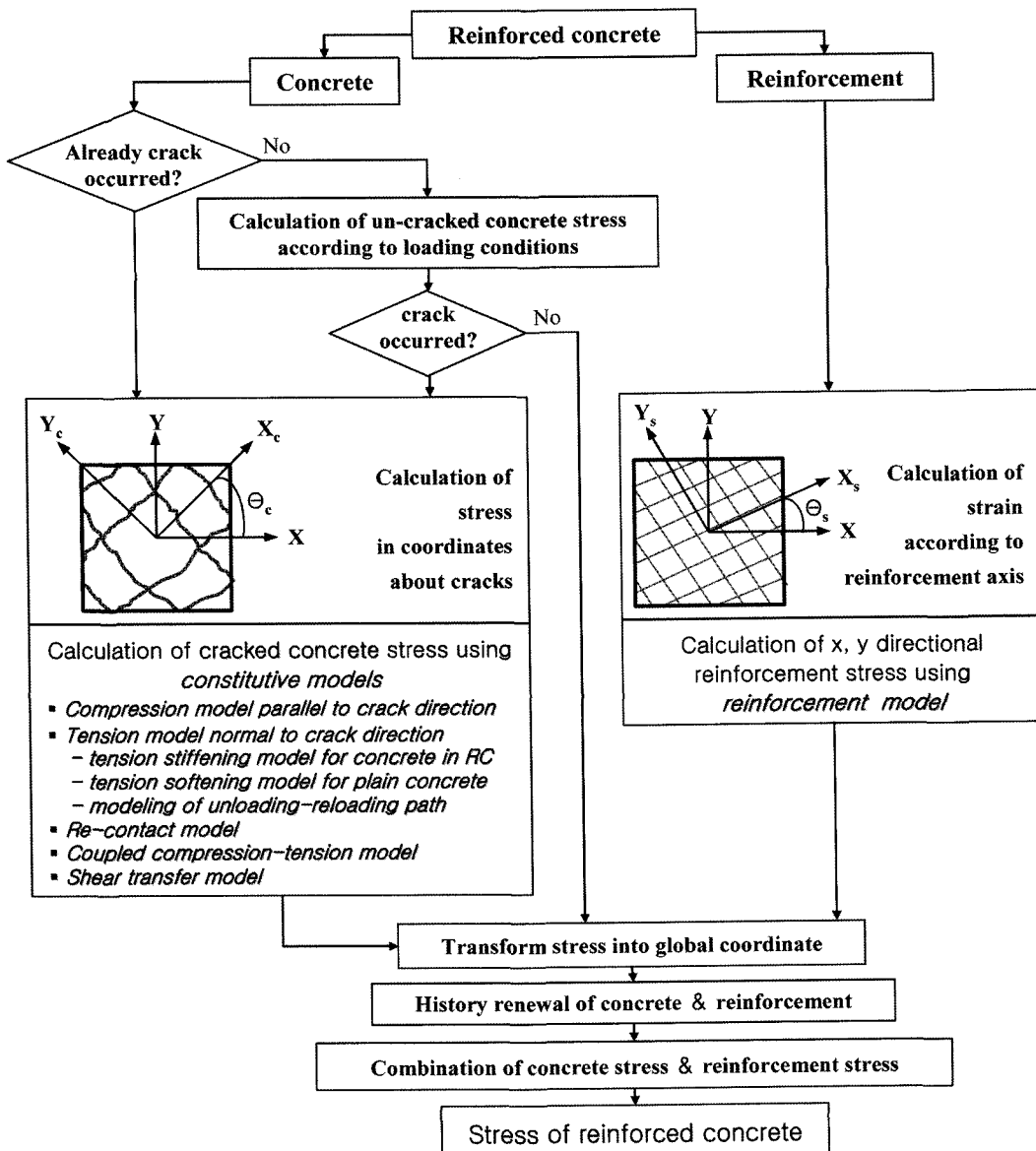


Fig. 3 Computational flow for the orthogonal two-way fixed crack model

체적 증분 ΔV 와 압력 증분 Δp 를 평형방정식에 포함시켜 압력 증분과 체적 증분의 관계를 강성도 행렬과 하중 벡터에 포함하여 나타내면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_e & \int_{b^e} \mathbf{N}^T \mathbf{n} db^e \\ \int_{b^e} \mathbf{n}^T \mathbf{N} db^e & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_k \\ \Delta p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{p} \int_{b^e} \mathbf{N}^T \mathbf{n} db^e + \mathbf{F}_e \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (5)$$

재구성된 요소 강성도 행렬의 마지막 행과 열은 압력 증분 Δp 자유도에 상응하며, 하중 벡터는 추가적으로 체적 증분 ΔV 를 포함한다. 따라서 유한요소법의 평형방정식을 만족하면서 체적 변화에 상응하는 압력 증분량을 결정할 수 있다. 압력을 받는 쉘 요소는 압력 절점을 공유하게 되고, 식 (5)에서 수정된 요소의 강성도 행렬은 전체 강성도 행렬에 조합된다. 따라서 쉘 요소를 이용한 구조 모델링에서 균등한 내압이나 외압을 받는 경우는 물론 부분적으로 압력을 받는 경우에도 하중 조건에 적합하게 쉘 요소에 압력 절점을 분배함으로써 체적과 압력의 관계를 구할 수 있다.

경로의존형 체적 제어 비선형 해석 방법은 압력 절점을 갖는 요소의 평형방정식 (5)를 만족하는 체적 증분 ΔV 에 대한 등가 압력 증분 Δp 를 반복 해석으로 구하는 방법이다. 반복 해석 과정은 일반적인 접선강성도 행렬을 반복할 때마다 재구성하여 변위 증분 및 내부 하중 증분을 결정하는 방법인 Newton-Raphson 반복 과정을 이용하였다. 즉 외부 체적 증분 ΔV^{ext} 를 추가적으로 제어되는 체적으로 압력 절점을 가진 적층 쉘 요소에 주면 체적-압력 관계항이 추가된 강성도 행렬을 이용하여 식 (6)과 같이 외부 체적 증분 ΔV^{ext} 에 대한 변위 증분 \mathbf{U}_k 와 압력 증분 Δp 가 결정된다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_k \\ \Delta p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_e & \int_{b^e} \mathbf{N}^T \mathbf{n} db^e \\ \int_{b^e} \mathbf{n}^T \mathbf{N} db^e & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\mathbf{p} \int_{b^e} \mathbf{N}^T \mathbf{n} db^e + \mathbf{F}_e \\ \Delta V_m^{ext} \end{bmatrix} \quad (6)$$

변위 증분 \mathbf{U}_k 로부터 내부 체적 증분 ΔV_i^{int} 를 구하며, 내부 체적 증분 ΔV_i^{int} 와 외부 체적 증분 ΔV_m^{ext} 이 해당 단계 $t + \Delta t$ 에서 체적 평형방정식을 만족하는지를 판단하여 이를 만족하지 못하는 경우 그 차이의 잔차 체적 증분 ΔV_i^R 을 계산하고, ΔV_i^R 을 외부 체적 증분으로 하여 식 (7)과 같이 반복 계산을 실시한다.

$$\Delta V_i^R = \Delta V_m^{ext} - \Delta V_i^{int} \quad (7)$$

즉, 다음 단계 반복 계산에서 잔차 체적 ΔV_i^R 이 다시 하중 벡터에 포함되고, 식 (6)을 이용하여 잔차 체적에 대한 변위 증분 $\delta \mathbf{U}^{i+1}$ 과 압력 증분 δp^{i+1} 이 결정된다. 한 단계에서의 총 변위 증분과 압력 증분은 식 (8)과 같다.

$$\mathbf{U}^{i+1} = \mathbf{U}^i + \delta \mathbf{U}^{i+1} \quad (8)$$

$$\Delta p^{i+1} = \Delta p^i + \delta p^{i+1}$$

반복법에 의하여 잔차 체적 ΔV_i^R 이 영(0)에 수렴하도록

반복 계산을 수행하게 되며, 이러한 계산 과정을 통하여 평형방정식을 만족하는 체적 변화 ΔV 에 대한 등가 압력 증분 Δp 를 구할 수 있다. 따라서 체적을 계속 감소시키거나 증가시켜서 압력 증분 Δp 의 부호가 바뀌는 한계 하중 또는 한계 압력에서의 해를 구할 수 있다⁴⁾.

3.2 경로의존형 체적제어법의 체적과 압력과의 관계

경로의존형 체적제어법에서는 대상 구조물의 하중-변위 관계로부터 재하, 제하, 재재하시 실제 구조물의 변위와 각 단계별 해석 변위를 비교하여 일정한 수렴 조건을 만족할 때까지 하중 이력에 따라 체적변화량을 수정한다. 또한 구조물에 가해지는 하중 변화량 즉, 작용 하중의 접선 강성도 행렬을 반복계산시 단계별로 구하며 접선 강성도 행렬의 기울기에 따라 자동으로 재하, 제하, 재재하시의 체적변화량을 수정한다.

Fig. 4에서 구조물의 초기 체적으로 정규화된 변형된 체적 V_{next} 에 따른 작용 압력 (또는 하중) P 는 구조물의 변형 이력에 의존한다. 즉, 체적 변화는 식 (9)와 같다.

$$V_{next} = f(P_{1next}, P_{2next}, P_{3next}) \quad (9)$$

즉, 경로의존형 체적제어법에서는 구조물의 변형 이력에 따라 동일하게 주어진 체적에 대해서도 3가지 압력값을 가질 수 있으며, 다음 단계의 계산을 위한 제어체적량도 구조물의 변형 이력에 의존함을 알 수 있다. Fig. 5는 체적제어법의 반복 계산 알고리즘을 나타낸 것이고, Fig. 6은 체적제어법의 전체 해석 흐름도를 나타낸 것이다.

4. 철근콘크리트 기둥의 비선형 체적제어해석

4.1 경로의존형 체적제어해석 기법의 검증

제안된 해석 기법의 검증을 위해 Fig. 7과 같은 역반복 하중을 받는 원통형 탱크(10)를 대상으로 비선형 체적제어 해석을 실시하였다. 대상 구조물은 수평재하시험을 통해 지진 하중과 유사한 역반복하중을 받는 원통형 구조물의

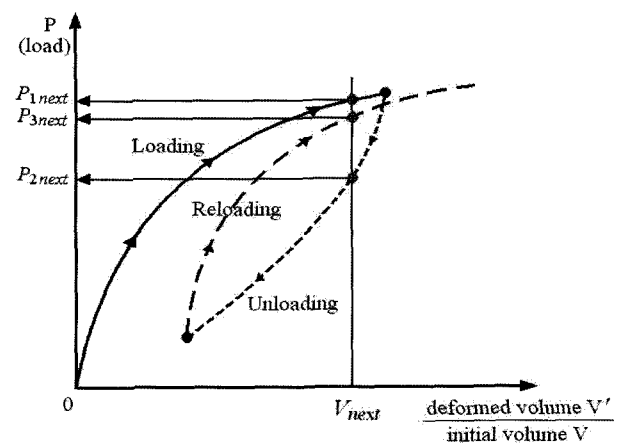


Fig. 4 Pressure-volume relationship in path-dependent volume control method

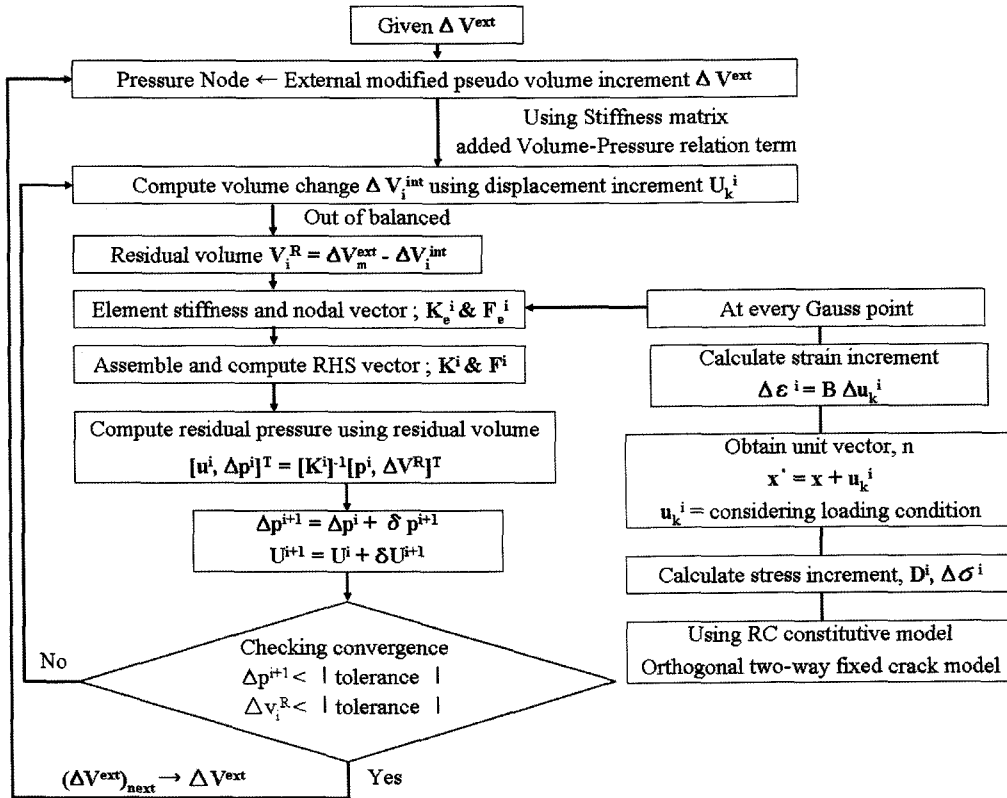


Fig. 5 Flow chart for path-dependent volume control iterative method

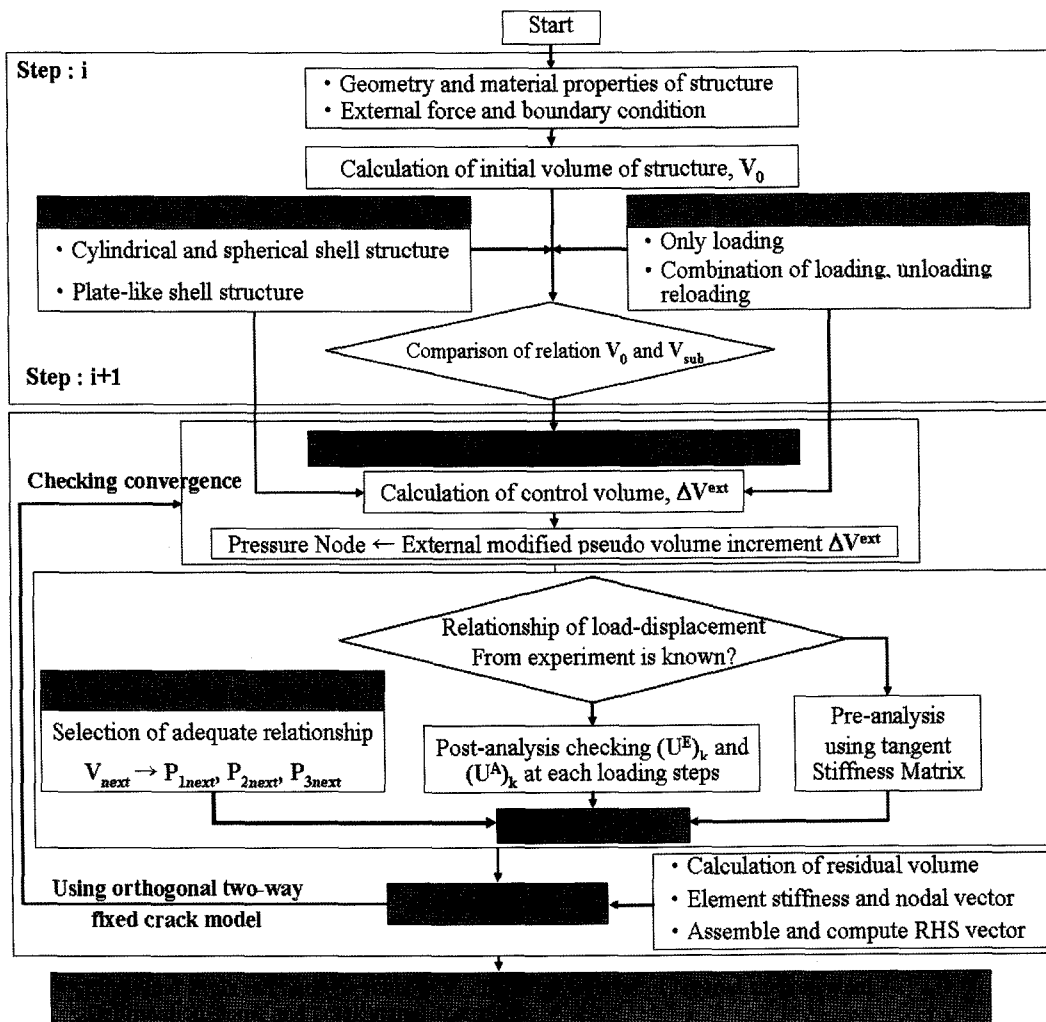


Fig. 6 Flow chart for overall path-dependent volume control method

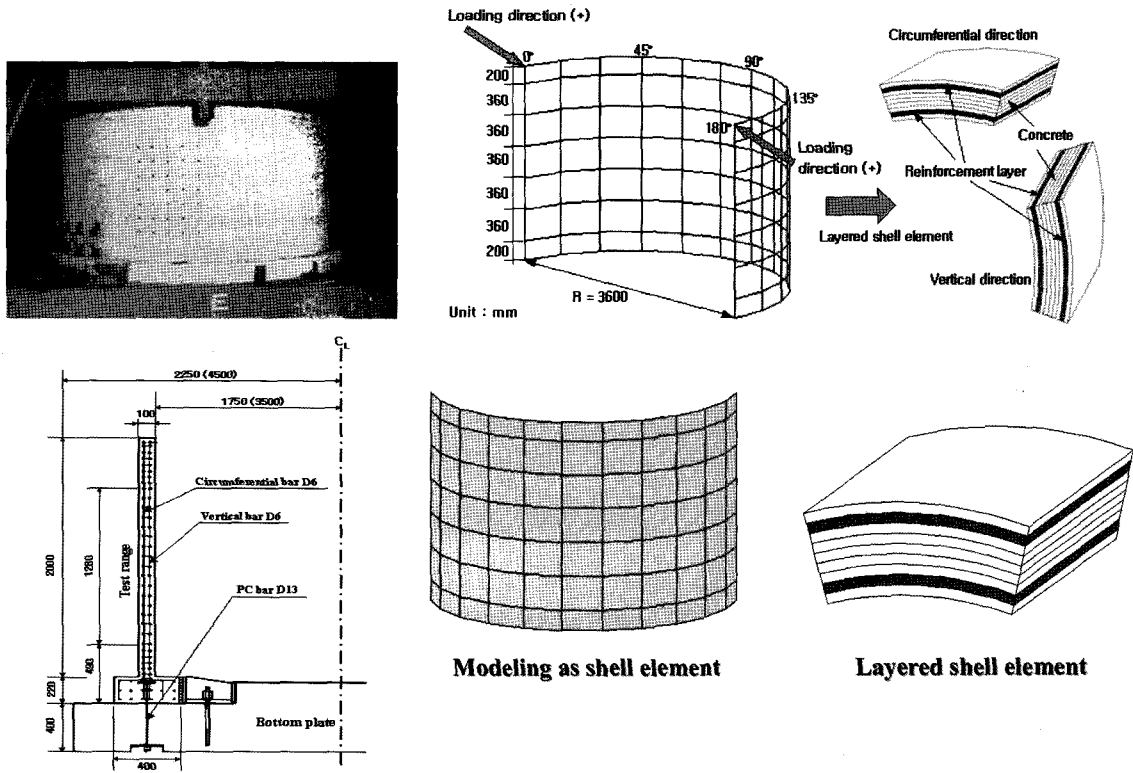


Fig. 7 Shape of RC tank and finite element discretization

Table 1 Material properties of RC tank

Concrete		Reinforcing bar	
f_{ck}	28.0 MPa	f_y	386.0 MPa
f_t	2.20 MPa	E_s	200,000 MPa
E_c	22,600 MPa	μ	1,900.0

변형 및 파괴 특성에 대해 검토한 것이다. 철근콘크리트 원통형 탱크의 원주 방향과 수직 방향의 철근비는 0.8%로 동일하며, 철근콘크리트 원통형 탱크의 역반복하중 실험에 사용된 구성 재료의 물성치를 Table 1에 나타내었다.

RC 탱크의 하중-상대 수평 변위의 관계에 대한 경로의존형 체적제어법의 해석 결과 (Fig. 8)는 철근콘크리트 탱크의 반복 거동을 유사하게 예측하고 있음을 확인할 수 있으며, 정(+), 부(-)재하시 대각선 방향으로 균열이 발생하면서 철근콘크리트 탱크의 강성은 저하됨을 정확하게 재현하였다.

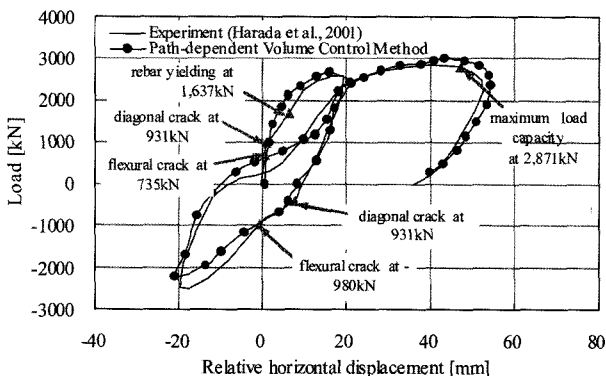


Fig. 8 Load-displacement relationship of RC tank

4.2 역반복하중을 받는 철근콘크리트 중공 사각형 기둥

역반복하중을 받는 철근콘크리트 중공형 사각 기둥에 대한 실험과 해석이 일본의 Masukawa 등¹¹⁾에 의하여 실시되었다. 대상 구조물은 높이 3,000 mm의 단주 형태에 중앙에 1,500 mm의 중공 단면을 가지고 있으며, 기둥 상단에서 역반복하중을 받고 있다. 대상 구조물의 제원 및 배근 상태는 Fig. 9와 같다.

모델링은 기초 부분은 제외하고 기둥 부분만을 모델링 하였는데, 실제와 유사한 모델링을 하기 위하여 구조물 전체를 40개의 쉘 요소로 모델링한 후 위·아래의 솔리드 부분은 다시 솔리드 요소로 모델링하였다. 각각의 요소에서 철근층은 실험과 같이 상단에 1개와 하단에 2개의 철근층을 적용하였으며, 유한요소 모델링시 철근을 나타내는 각 요소가 종방향철근 뿐 만 아니라 횡방향철근의

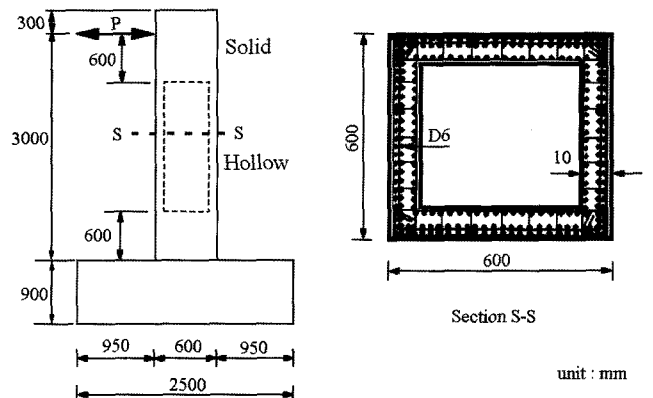


Fig. 9 Details of RC square hollow column

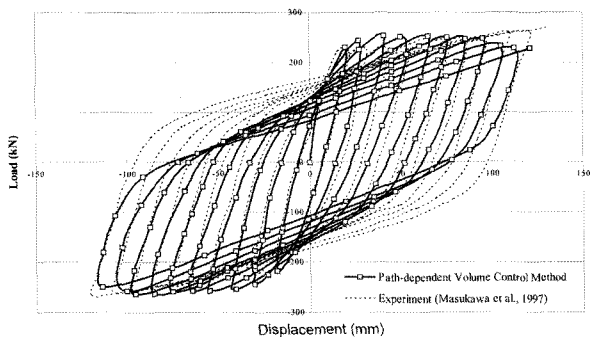
Table 2 Material properties of RC square hollow column

Concrete		Reinforcing bar	
f_{ck}	76.5 MPa	f_y	350 MPa
f_t	6.09 MPa	f_u	421 MPa
f_c	31.4 GPa	E_s	200 GPa
ν	0.21	ρ	*

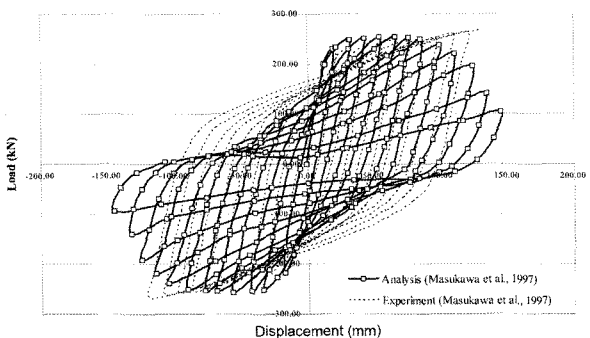
* Longitudinal direction : 3.06%, lateral direction : 1.13%(upper), 0.57%(lower)

심부 구속 효과까지 고려하게 된다. 또한 각각의 지점은 모든 방향으로 구속하였고, 하중은 실험과 동일하게 원편상단의 2개 요소에 역반복하중을 가하였다. Table 2는 철근콘크리트 중공형 기둥 구조물의 각 재료 물성치를 나타낸 것이다.

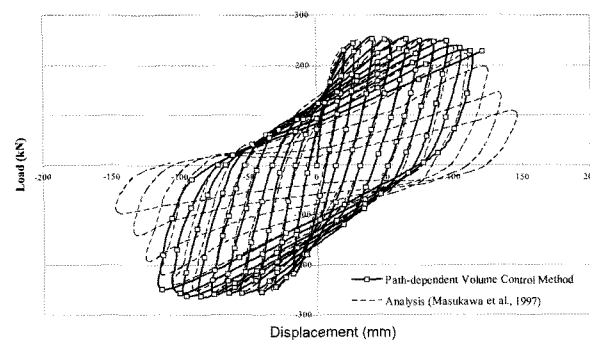
Fig. 10은 역반복하중을 받는 철근콘크리트 중공형 기둥 구조물에 대한 Masukawa의 실험 및 해석 결과와 체적제어법에 의한 해석 결과를 비교한 것으로, Fig. 10(a)는 경로의존형 체적제어해석 결과와 실험 결과, Fig. 10(b)는 Masukawa에 의한 해석과 실험 결과, Fig. 10(c)는 경로의존형 체적 제어해석결과와 Masukawa의 해석 결과를



(a) Path-dependent volume control method vs experiment



(b) Experiment vs analysis by Masukawa



(c) Path-dependent volume control method vs analysis by Masukawa

Fig. 10 Comparison of analytical and experimental results for RC square hollow column

비교한 것이다. 각 그림에 나타난 바와 같이 Masukawa 등에 의한 해석 결과는 실험 결과와 다소 차이를 보이고 있으나 체적제어법에 의한 해석 결과는 그에 비해 많은 개선을 보이며 전반적으로 실험 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있어 제안된 해석 기법의 적용 가능성을 확인 할 수 있다.

4.3 축하중 및 역반복하중을 받는 철근콘크리트 중공 원형 및 사각형 기둥

역반복하중을 받는 철근콘크리트 중공형 원형 및 사각 기둥에 대한 실험이 대만의 Cheng 등에 의하여 실시되었는데, 대상 구조물의 제원과 배근 형상은 Fig. 11에 나타난 바와 같다. 대상 구조물의 높이는 원형 단면의 경우 6 m이고, 사각형 단면의 경우에는 4 m이다. 또한 원형 단면의 직경 및 사각형 단면의 단면 길이는 1.5 m이며, 기둥 정상부에서 0.5 m 떨어진 곳에서 역반복하중을 가한다. 대상 기둥은 일정한 축하중 3,600 kN을 받고 있으며, 이 값은 사각형 단면의 경우 $0.08 f_{ck}' A_g$, 원형 단면의 경우 $0.1 f_{ck}' A_g$ 를 나타낸다¹²⁾.

원형 단면 기둥은 총 120개의 셀 요소로 모델링하였고, 사각형 단면 기둥은 총 40개의 셀 요소로 모델링하였으며, 상부의 솔리드 부분은 독립된 솔리드 요소로 모델링하였다. 철근층은 원형 단면과 사각형 단면 모두 상단에 1개와 하단에 1개의 철근 층을 적용함으로써 실험과 동일한 상태로 모델링하여 종방향 및 횡방향철근의 영향이 고려될 수 있게 하였다. 축하중은 체적 제어 이전 단계에 고정 하중처럼 재하 하였고, 지점은 모든 방향으로 구속하였다. Table 3은 원형 단면 및 사각형 단면 중공 기둥에 대한 각 재료의 물성치를 나타낸 것이다.

Fig. 12는 원형 단면에 대해 Cheng 등에 의한 실험 결과와 체적제어법에 의한 해석 결과를 비교한 것이고, Fig. 13은 사각형 단면에 대해 실험 결과와 체적제어법에 의한 해석 결과를 비교한 것이다. 또한 Table 4는 실험에 의한 최대 변위와 체적제어법에 의한 최대 변위를 비교하여 나타난 것이다. 그림 및 표에서 볼 수 있듯이 체적 제어법에 의한 해석 결과는 실험 결과와 잘 일치하고 있어 해석 기법의 타당성을 확인할 수 있다.

4.4 축하중과 횡하중을 받는 철근콘크리트 중공 원형 기둥

축하중과 횡하중을 동시에 받는 철근콘크리트 중공형 기둥 구조물에 대한 실험이 Zahn 등에 의하여 실시되었다¹³⁾. Zahn 등은 축력을 가한 후 중공 기둥의 중앙 부분에 수평하중을 가하는 실험을 실시하였는데, 구조물의 제원은 Fig. 14에 나타난 바와 같다. 대상 구조물의 높이는 3.9 m이고, 단면의 직경은 400 mm이며, 중공 부분의 직경은 각각 212 mm, 250 mm, 290 mm (column 1, 2, 3)의 세 가지로 나누어 실험을 실시하였다¹³⁾. 유한요소해석시 총 104개의 셀 요소로 모델링한 후, 양단 끝 부분

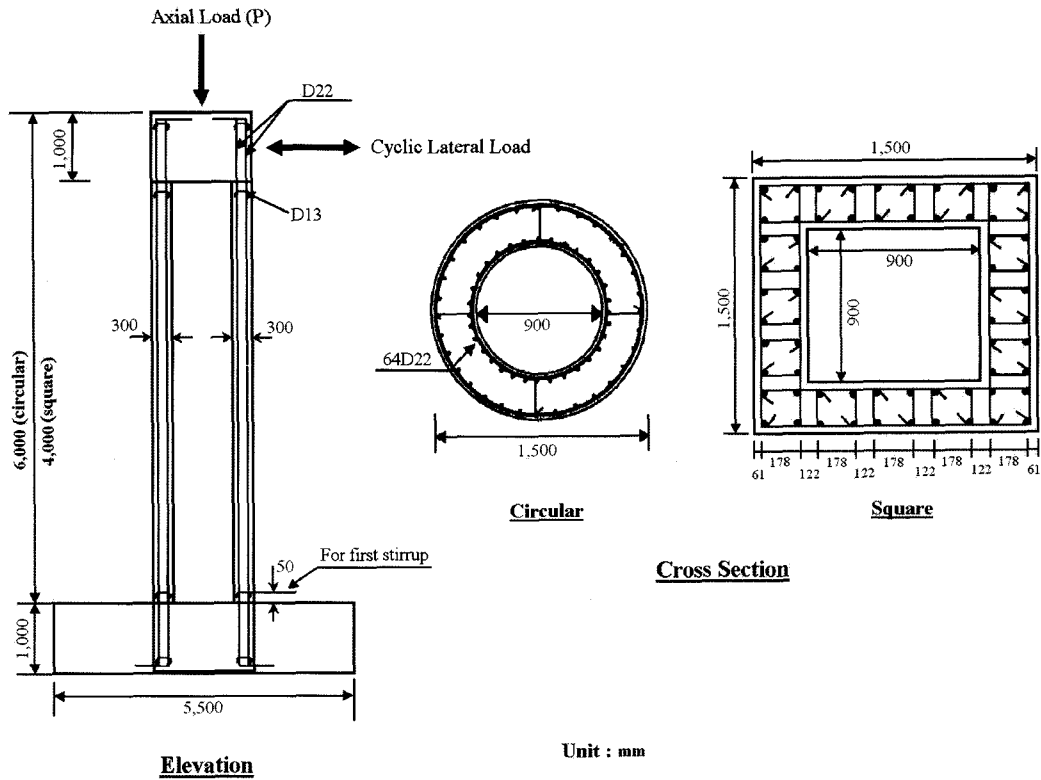


Fig. 11 Details of RC circular and square hollow column

Table 3 Material properties of RC circular and square hollow column

Column	Concrete				Reinforcements								
					Longitudinal bar				Stirrup bar				
	f'_{ck} (MPa)	E_c (GPa)	L (m)	P (kN)	D (mm)	f_y (MPa)	E_s (GPa)	ρ (%)	D (mm)	Spacing (mm)	f_y (MPa)	E_s (GPa)	ρ (%)
Circular	33.8	21.7	6.0	3,600	22	418.2	200	1.72	13	300	410	200	0.29
Square	32.6	21.7	4.0	3,600	22	423.3	200	1.01	10	200	392	200	0.26

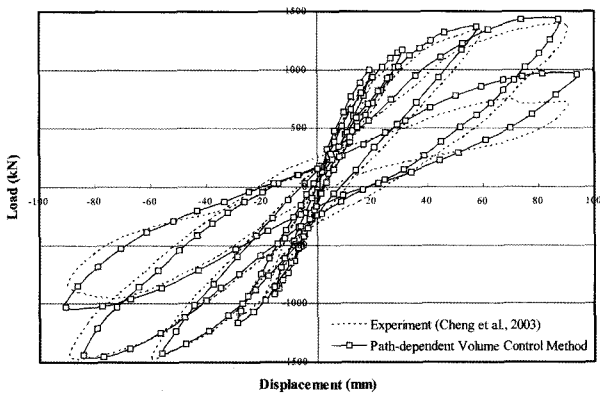


Fig. 12 Comparison of analytical and experimental results (circular column)

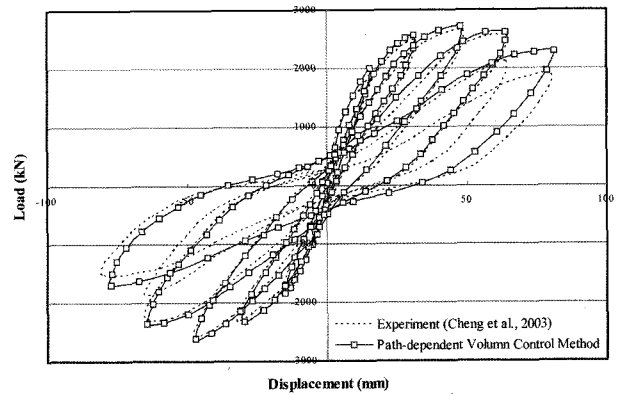


Fig. 13 Comparison of analytical and experimental results (square column)

과 가운데 부분을 솔리드 요소로 재모델링 하였다. 각각의 요소에서 철근층은 중간에 1개의 층으로 모델링하여 종방향 및 횡방향철근의 영향을 동시에 고려할 수 있도록 하였다. 또한 column 1, 2, 3은 셀의 두께를 각각 94 mm, 75 mm, 55 mm로 모델링하여 실험과 같은 중공비를 갖도록 하였고, 하중은 양 끝단에 축하중을 가한 후 중앙 셀 요소에 체적을 제어하여 총 5번의 역반복하

Table 4 Comparison of maximum displacement

	Circular column (mm)		Square column (mm)	
	Push	Pull	Push	Pull
Experiment	90.1	89.6	75.2	67.5
Volume control method	93.5	90.7	81.2	77.4

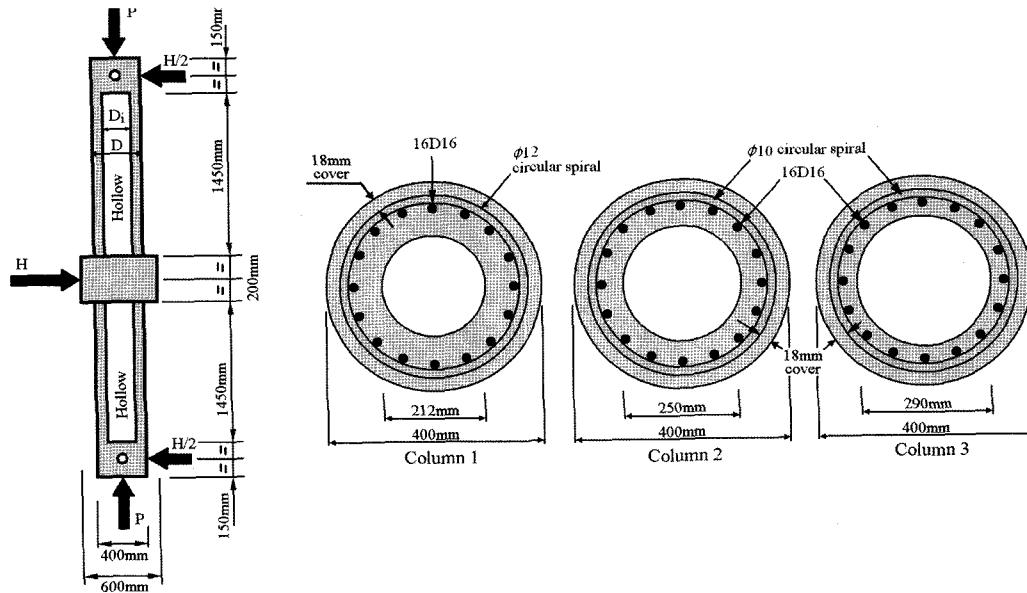


Fig. 14 Details of circular hollow columns

Table 5 Material properties of RC circular hollow columns

Column	$\frac{D_i}{D}$	$\frac{A_g}{A_{tot}}$	$\frac{P}{f_{ck}'A_g}$	$f_{ck}'^*$ (MPa)	Longitudinal reinforcement		Transverse reinforcement		
					f_y (MPa)	ρ (%)	f_y (MPa)	Spacing (mm)	ρ (%)
1	0.53	0.72	0.40	29.6	306	3.67	318	90	2.02
2	0.63	0.60	0.10	29.6	306	4.20	340	75	2.08
3	0.73	0.47	0.12	27.3	306	5.40	340	75	2.94

* 28-day strength of 100 by 200mm diameter cylinders

중을 가하였다. Table 5는 대상 구조물의 재료 물성치를 나타낸 것으로, A_{tot} 는 중공 부분을 포함한 기둥 단면적, A_g 는 중공 부분을 제외한 기둥 단면적을 나타낸다.

Fig. 15는 축력과 횡하중을 동시에 받는 철근콘크리트 중공형 기둥 구조물에서 column 1에 대해 실험 결과와 체적제어법에 의한 해석 결과를 비교한 것이다. Column 1의 경우 총 5회의 반복 하중이 가해지는 동안 체적제어법에 의한 해석 결과와 실험 결과가 잘 일치하고 있으나 마지막 단계에서 두 결과가 다소 오차를 보이고 있는 것으로 나타난다. 하지만 이것은 실험시 마지막 단계에서 취성파괴에 가까운 갑작스런 파괴가 발생하여 거동 형태가 다소 다르게 나타난 것으로, 해석의 경우에도 마

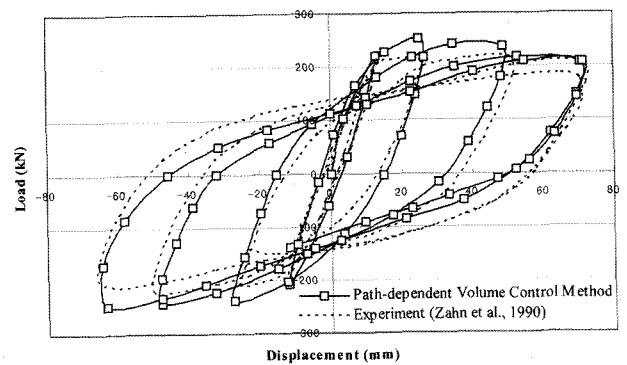


Fig. 16 Comparison of analytical and experimental results (column 2)

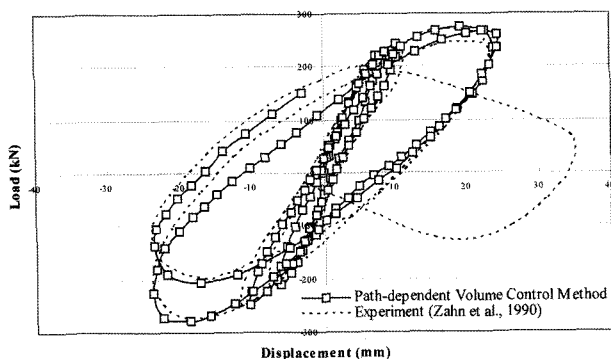


Fig. 15 Comparison of analytical and experimental results (column 1)

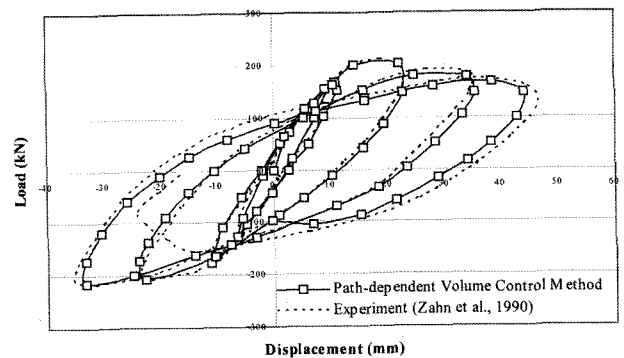


Fig. 17 Comparison of analytical and experimental results (column 3)

지막 단계에서 파괴가 발생하여 실험 결과를 유사하게 표현하고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 Figs. 16 및 17은 column 2인 경우와 column 3인 경우의 결과를 비교한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 체적제어법에 의한 해석 결과가 실험 결과와 재하, 제하, 그리고 재재하시의 거동면에서 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있고, 이를 통해서 체적제어법의 타당성을 확인할 수 있다.

5. 결 론

압력 절점이 추가된 적층 셸 요소와 경로의존적 체적제어법을 이용하여 철근콘크리트 중공 기둥의 비선형 유한요소해석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 반복하중을 받는 철근콘크리트 구조물에 대해 해석에 필요한 체적 변화를 적절하게 선정하여 비선형 해석을 효과적으로 수행할 수 있는 경로의존형 체적제어해석 방법을 제안하고 검증하였다.
- 2) 개발된 체적제어법을 적용하여 반복하중을 받는 철근콘크리트 중공형 기둥 구조물, 축력과 횡하중을 동시에 받는 철근콘크리트 중공형 기둥 구조물에 대한 비선형해석을 실시하였으며, 기존의 해석 결과 및 실험 결과와의 비교·분석을 통하여 제안한 해석 기법의 타당성 및 적용성을 검증하였다.
- 3) 제안된 해석 기법은 반복 하중을 받는 중공 철근콘크리트 기둥을 포함한 셸 구조물에 대한 해석을 기존의 변위제어법보다 효과적으로 수행할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 교육인적자원부 BK21 사업인 연세대학교 사회환경시스템공학부 미래사회기반시설 산학연공동사업의 일환으로, 보수보강된 콘크리트 교량의 성능평가/개선 기술개발 연구단(IPET; 과제번호 C105B1030001-05B030300110)의 재정적 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Song, H. W. and Tassoulas, J. L., "Large Deformation Buckle Analysis of an Inelastic Ring under External Pres-

- sure", *Computers and Structures*, Vol.51, No.2, 1994, pp.225~233.
2. 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", *Transactions of the 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-15)*, Seoul, Korea, Aug. 15-20, 1999, pp.341~348.
3. 심상효, 송하원, 최강룡, 남상혁, 변근주, "의사체적제어법을 이용한 철근콘크리트 슬래브의 파괴거동 해석", 한국콘크리트학회, 봄 학술발표회 논문집, 12권 1호, 2000, pp.577~682.
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*, Vol.128, No.5, 2002, pp.655~664.
5. Song, H. W., Shim, S. H., and Byun, K. J., "Finite Element Analysis of Prestressed Concrete Containment Vessel subjected to Internal Pressure", *Proceeding of the Third DIANA World Conference*, Tokyo/Japan, 2002, pp.467~475.
6. 송하원, 이준희, 변근주, 남상혁, "경로의존형 체적제어법을 이용한 반복하중을 받는 철근콘크리트 셸구조물의 해석", 대한토목학회 논문집, 24권, 3A호, 2004, pp.473~480.
7. Okamura, H. and Maekawa, K., *Nonlinear Analysis and Constitutive Model in Reinforced Concrete*, Gihodo-Shuppan, Japan, 1991, pp.28~58.
8. Irawan, P. and Maekawa, K., "Path-Dependent Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Shells", *Proceedings of JSCE*, Vol.34, No.557, 1997, pp.121~134.
9. Maekawa, K., Okamura, H., and Pimanmas, A., "Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete", Spon Press, New York, N.Y., 2003, pp.13~44.
10. 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.
11. Masukawa, J., Amano, R., Suda, K., and Ichinomiya, T., "Development of RC Column Members in Use of High Strength Reinforcement", *Proceeding of JCI*, Vol.19, No.2, 1997, pp.789~794.
12. Cheng, C. T., Yang, J. C., Yeh, Y. K., and Chen, S. E., "Seismic Performance of Repaired Hollow-Bridge Piers", *Construction and Building Materials*, Vol.17, 2003, pp.339~351.
13. Zahn, F. A., Park, R., and Priestley, M. J. N., "Flexural Strength and Ductility of Circular Hollow Reinforced Concrete Columns without Confinement on Inside Face", *ACI Structural Journal*, Vol.87, No.2, 1990, pp.156~166.

요 약 철근콘크리트 적층 셸 요소에 압력 증분을 추가 자유도로 갖는 압력 절점을 추가하여 셸 구조물의 체적 제어를 통해 비선형해석을 하는 체적제어법은 기존의 유한요소해석 기법인 하중제어법과 변위제어법이 갖는 한계를 극복하기 위해 개발된 방법이다. 본 연구에서는 개선된 체적제어법을 통해 다양한 하중을 받는 철근콘크리트 중공형 기둥 구조물의 경로의존적 거동을 효과적으로 분석하기 위해 역반복하중을 받는 철근콘크리트 중공형 기둥 구조물과 횡하중과 축력을 동시에 받는 철근콘크리트 중공형 기둥 구조물 등에 대한 비선형해석을 수행하였으며, 실험 결과 및 해석 결과와의 비교를 통해 유한요소해석 기법으로서의 체적제어법의 적용성 및 타당성을 입증하였다.

핵심용어 : 체적제어법, 경로의존형, RC 셸 구조물, 철근콘크리트 중공 기둥