

체적제어법에 의한 철근콘크리트 중공 기둥의 비선형 해석

Nonlinear Analysis of Hollow RC Columns using Volume Control Method

임 상 목* 송 하 원** 변 근 주** 남 상 혁***
Lim, Sang-Mook Song, Ha-Won Byun, Keun Joo Nam, Sang-Hyeok

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 layered shell element. The pressure node has an increment of pressure as an additional degree of freedom of the shell element. In this study, the hollow RC columns are discretized with multi-layered shell elements and a modeling technique utilizing the volume-control analysis for various hollow RC column structures is introduced. The results of the nonlinear analysis using the modeling for hollow RC columns subjected to lateral reversed cyclic loading as well as lateral loading under compression are shown. Validity of the modeling technique is also verified by comparing the analysis results with experimental results and other analysis data.

1. 서론

기존의 하중제어법과 변위제어법의 단점을 극복하기 위하여 체적제어법이 개발되었다. 체적제어법은 정확한 요소의 강성을 구할 수 있도록 각 절점내 면내 회전자유도를 추가하고, 적층셀요소에 압력중분을 추가 자유도로 갖는 압력절점을 추가하여 이상화하며, 구조물의 변형에 따른 체적의 변화를 제어함으로써 비선형 해석을 수행할 수 있는 방법이다. 이러한 체적제어법을 이용하여 그동안 철근콘크리트 셸구조물, 철근콘크리트 판형 구조물 등에 대한 검증은 실시하여 체적제어법의 타당성을 입증하였다. 이에 본 연구에서는 철근콘크리트 중공 기둥 구조물을 각각의 셸로써 모델링하여 체적제어법에 의한 비선형 거동 해석을 실시함으로써, 체적제어법의 제한성을 극복하고, 철근콘크리트 중공형 기둥구조물의 거동 및 균열에 관한 해석결과를 기존의 실험결과 및 해석결과와 비교·분석하여 본 연구결과의 타당성을 검증하고자 한다.

* 정회원, 동부건설(주) 사원

** 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

*** 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 연구교수

2. 체적제어법의 정식화

2.1 기하학적 비선형성을 고려한 적층셀요소의 정식화

기하학적 비선형성을 고려하지 않은 유한요소행렬은 변위와 변형률이 매우 작다는 가정하에서 이루어진다. 구조물에 하중이 가해진 후, 형상은 초기 형상과 같고, 변형률은 미소선형항만을 이용한다. 여기서 기하학적 비선형성을 고려한 요소 중앙면에서의 변형률을 Green-Lagrangian 변형률로 표현하면 식(1)과 같다.

$$\boldsymbol{\epsilon} = \boldsymbol{\epsilon}_L + \boldsymbol{\epsilon}_N \quad (1)$$

변형률은 적층셀요소를 층으로 나누고 각 층마다 재료의 비선형성을 고려한 2차원 구성모델을 적용한다. 각 층의 응력들은 층 두께 중앙에 위치한 응력점들에서 계산되고 해당 층의 두께에 걸쳐 일정한 것으로 가정한다. 각 층의 셀요소에 작용하는 응력은 식(2)에 의해서, 변형률은 식(3)에 의해서 구할 수 있다.

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}\boldsymbol{\epsilon} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\epsilon} = \mathbf{B}\mathbf{d} = [\mathbf{B}_L + \mathbf{B}_N]\mathbf{d} \quad (3)$$

여기서 D_{ij} 는 각 구성재료에 대한 국부응력 구성 텐서를 의미한다. 윗 식을 변분하면 식(4)와 같은데, 식(2)와 식(4)를 곱하고, 요소 전체에 대하여 적분하면 요소의 평형방정식인 식(5)를 얻을 수 있다.

$$\delta\boldsymbol{\epsilon} = \mathbf{B}_L\delta\mathbf{d} + \delta\mathbf{B}_N\mathbf{d} \quad (4)$$

$$\int_V \delta\boldsymbol{\epsilon}^T \mathbf{D}\boldsymbol{\epsilon} dV = \delta\mathbf{d}^T \int_V \mathbf{B}_L^T \mathbf{D}\mathbf{B}_L dV + \mathbf{d}^T \int_V \delta\mathbf{B}_N^T \mathbf{D}\mathbf{B}_N dV \quad (5)$$

식(5)에서 행렬 \mathbf{B} 는 식(3)과 같이 변위에 의한 비선형항을 포함하고 있기 때문에 새로운 iteration마다 다시 계산해야 하는데, 이러한 비선형 평형방정식의 해석은 Newton-Raphson 기법을 이용하여 얻는다.

2.2 압력절점을 이용한 체적제어법

압력절점은 요소의 균등한 압력증분(Δp)을 1개의 자유도로 갖는 가상의 절점이다. 한 절점이 6개의 자유도를 가지는 8절점 적층셀요소에 압력절점을 추가함으로써 요소는 총 49개의 자유도를 갖는다(Song et al., 2001). 경계 b인 물체의 Δp 에 의한 체적증분(ΔV)은 형상함수 N 을 이용하면 식(6)과 같이 표현된다.

$$\Delta V = \left(\int_b \mathbf{n}^T \cdot N db \right) \Delta U \quad (6)$$

여기서 압력증분을 고려한 표면력항을 유한요소법의 평형방정식에 대입하면 식(7)과 같다.

$$\mathbf{K}^e \Delta U = -(p + \Delta p) \int_b N^T \mathbf{n} db + \mathbf{F}^e \quad (7)$$

식(6)의 체적변화와 압력증분과의 관계를 식(7)에 대입하여 강성도 행렬을 재구성하면 식(8)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}^e & \int_b N^T \mathbf{n} db \\ \int_b \mathbf{n}^T N db & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}^f \\ \Delta p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -p \int_b N^T \mathbf{n} db + \mathbf{F}^e \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (8)$$

재구성된 요소 강성도 행렬의 마지막 열과 행은 압력증분 Δp 에 해당하며, 하중벡터는 체적증분 ΔV 를 포함한다. 따라서 유한요소법을 만족하면서 체적변화에 상응하는 압력증분량을 결정할 수 있고, 압력증분에 따른 체적변화도 추정할 수 있으며 따라서 체적과 압력의 관계를 구할 수 있다(Song et al., 2001).

3. 해석결과의 검증

3.1 역반복하중을 받는 철근콘크리트 중공 기둥

역반복하중을 받는 철근콘크리트 중공 기둥구조물에 대한 실험이 대만의 Cheng 등(2003)에 의하여 실시되었는데, Cheng 등에 의해 실시된 실험 구조물의 제원과 철근배치도는 다음의 그림 1과 같다. 또한 실험체의 재료물성치는 표 1과 표 2와 같다. 구조물의 높이는 원형단면의 경우(PI1-C) 600cm이고, 사각형 단면의 경우(PI2)에는 400cm이다(Cheng et al., 2003).

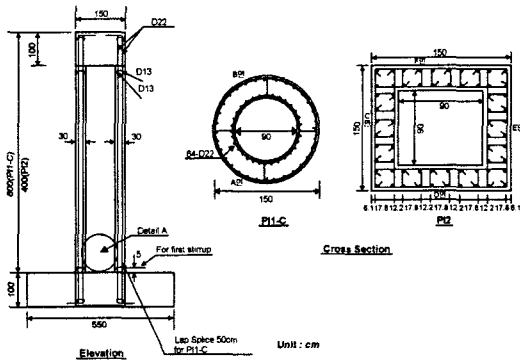


그림 1 실험체 제원 및 형상 (Cheng et al., 2003)

표 1 PI2종의 재료물성치 (Cheng et al., 2003)

Concrete		Steel	
		연직방향	스터립
압축강도	32.6 MPa	항복응력	423 MPa 392 MPa
탄성계수	21.7 GPa	극한강도	531 MPa 483 MPa
포아송비	0.18	탄성계수	200 GPa 200 GPa
인장강도	3.21 MPa	철근비	1.01% 0.26%

표 2 PI1-C종의 재료물성치 (Cheng et al., 2003)

Concrete		Steel	
		연직방향	스터립
압축강도	31.7 MPa	항복응력	418 MPa 410 MPa
탄성계수	21.7 GPa	극한강도	514 MPa 507 MPa
포아송비	0.18	탄성계수	200 GPa 200 GPa
인장강도	3.14 MPa	철근비	1.72% 0.29%

모델링은 기초부분을 제외한 후, 기둥 전체를 셸요소로 모델링하였는데, PI2종의 경우에는 총 40개의 셸요소로 모델링하였고, PI1-C종의 경우에는 총 120개의 셸요소로 모델링하여 해석을 실시하였다.

그림 2에 PI2종과 PI1-C종에서 Cheng 등(2003)에 의한 실험결과와 체적제어법에 의한 해석결과를 비교하였다. 그림에서 Cheng 등(2003)에 의해 실시된 실험결과는 점선으로, 체적제어법에 의한 해석결과는 원표식을 포함한 실선으로 표기하였는데 그림에서 알 수 있듯이 체적제어법에 의한 해석결과는 Cheng 등(2003)에 의해 실시된 실험결과와 상당히 유사한 거동을 하는 것으로 나타났고 이에 체적제어법이 타당한 결론에 도달하였음을 확인할 수 있었다.

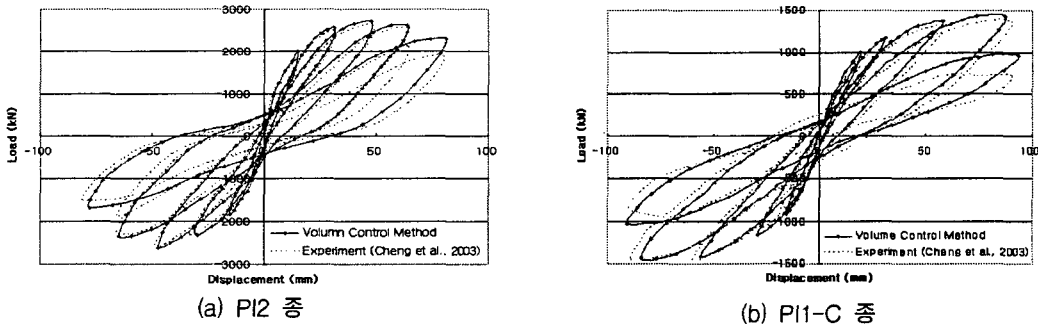


그림 2. 실험결과와 체어제어법에 의한 해석결과 비교

3.2 축력과 횡하중을 받는 철근콘크리트 중공 기둥

축력과 횡하중을 동시에 받는 철근콘크리트 중공형 기둥구조물에 대한 실험이 Zahn 등(1990)에 의하여 실시되었다. Zahn 등(1990)은 1000ton의 축력을 가한 후 중공 기둥의 중앙 부분에 힘을 가하는 실험을 실시하였는데 구조물의 제원은 그림 3과 같고 실험체의 재료물성치는 표 3과 같다. 구조물의 높이는 390cm이고, 단면의 직경은 400mm이며, 중공부분의 직경은 각각 212mm, 250mm, 290mm(Specimen 1, 2, 3)의 세 가지로 나누어 실험을 실시하였다(Zahn et al., 1990).

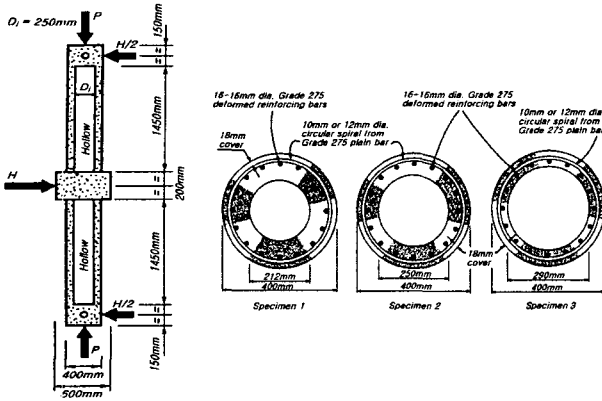


그림 3. 실험체 제원 및 형상 (Zahn et al., 1990)

표 3 재료물성치 (Zahn et al., 1990)

	Concrete		Steel
압축강도	42.8 MPa	항복응력	412.8 MPa
탄성계수	23.1 GPa	극한강도	538.9 MPa
포아송비	0.19	탄성계수	200 GPa
인장강도	3.85 MPa	철근비	*

* 기동방향 철근비는 1.36%, 스티립 철근비는 0.34%

그림 4에 Zahn 등(1990)에 의한 실험결과와 체적제어법에 의한 해석결과를 도시하였는데, 앞 절과 마찬가지로 점선과 원표를 포함한 실선을 이용하여 나타내었다. 그래프에서 알 수 있듯이 체적제어법에 의한 해석결과는 실험결과와 상당히 유사한 결론을 얻는 것을 알 수 있다.

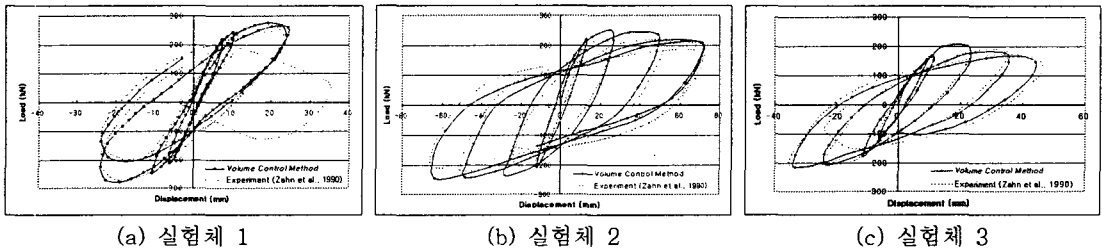


그림 4. 실험결과와 체적제어법에 의한 해석결과 비교

4. 결론

본 논문에서는 철근콘크리트 중공형 기둥구조물에 대한 비선형 거동 해석을 효과적으로 수행할 수 있는 체적제어 유한요소 해석 모델링 테크닉을 개발하였으며, 축력과 횡하중을 동시에 받는 철근콘크리트 중공형 기둥구조물에 대한 비선형 거동 해석을 실시하여 기존의 해석결과 및 실험결과와 비교함으로써 해석기법의 타당성을 검증하였다.

5. 참고문헌

- 1) Cheng, C. T., Yang, J. C., Yeh, Y. K. and Chen, S. E. (2003), "Seismic Performance of Repaired Hollow-Bridge Piers", *Construction and Building Materials*, Vol. 17, pp. 339-351.
- 2) Song, H.-W., Shim, S. H., Byun, K. J. and Maekawa, K. (2002), "Failure Analysis of RC Shell Structures using Layered Shell Element with Pressure Node", *Journal of the Structural Engineering*, Vol. 128, No. 5, pp. 655-664.
- 3) Zahn, F. A., Park, R. and Priestley, M. J. N. (1990), "Flexural Strength and Ductility of Circular Hollow Reinforced Concrete Columns without Confinement on Inside Face", *ACI Structural Journal*, Vol. 87, No. 2, pp. 156-166.