

체적 제어법을 이용한 철근 콘크리트 구조물의 비선형 해석

Nonlinear Analysis of RC Structures Using Volume Control Method

송 하 원* · 남 상 혁** · 이 준 희*** · 임 상 묵****

Song, Ha-Won · Nam, Sang-Hyeok · Lee, June-Hee · Lim, Sang-Mook

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-dependant behaviors of RC structures subjected to cyclic loading. RC shell structures including 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 dependant volume control method is verified by comparing analysis results with other data including experimental results.

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

1. 서 론

철근콘크리트 구조물의 거동을 해석적으로 분석하고 예측하기 위해 유한요소법이 널리 사용되고 있다. 유한요소해석시 하중제어를 통해 해석을 수행할 경우 극한 하중 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. 이러한 두 방법의 단점을 극복하기 위해 쉘요소에 가상의 압력절점을 도입하고 하중-변위의 평형방정식에 체적-압력과의 관계를 도입하여 구조물의 체적을 제어함으로써 구조물의 비선형 해석을 하게 되는 체적제어법이 널리 적용되고 있다.

체적제어법은 원자로 사고에 따른 내압증가에 의한 콘크리트 원자로 격납구조물의 극한해석 등에 효과적으로 사용되었으나(Song et al., 1999, 2002) 제어할 RC 쉘구조물의 체적을 반복하중 작용시 적절하게 조절하지 못하는 제한성이 있었고, 이에 재하, 재하, 재재하와 같은 반복하중을 받는 경우 구조물의 체적변화를 수정하여 이에 따른 작용하중을 구하는 방법인 경로의존형 체적제어법을 개발하게 되었다(송하원 등, 2004). 또한, 균열이 발생한 철근콘크리트 쉘요소의 비선형 해석을 개선하기 위하여 다방향으로 균열이 발생하며 임의의 하중이력을 받는 철근콘크리트 구조물에 적용 가능한 직교 2방향 고정균열모델을 2차원 평균화된 콘크리트의 균열모델에 적용하여 경로의존형 체적제어법에 의한 해석결과를 개선하였다.

* 정희원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 E-mail: song@yonsei.ac.kr

** 정희원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 연구교수 E-mail: salute@cmme.yonsei.ac.kr

*** 대한주택공사 토목설계처 토목구조부 사원 E-mail: nukel3@ugong.co.kr

**** 동부건설(주) 사원 E-mail: mook@dongbu.co.kr

이에 본 연구에서는 경로의존형 체적제어법을 이용한 철근콘크리트 구조물 해석의 타당성 및 적용성 검증과 함께 철근콘크리트 중공형 기둥에 대한 해석을 통해 그 적용성을 확대하고 기존의 실험 결과 및 해석 결과와의 비교·분석을 통해 본 연구결과의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 철근콘크리트 구성모델

경로의존형 체적제어법에 반영한 철근콘크리트 구성모델은 평균화된 응력-변형률을 사용한 구성모델로서 대표 체적요소에서 정의된 평균화된 응력-변형률 관계를 사용함으로써 균열간격, 균열밀도 등의 크기에 무관하게 균열이 존재하는 콘크리트의 압축, 인장, 전단 및 철근의 인장에 대하여 유일성을 만족하는 구성방정식을 얻을 수 있다(Okamura와 Maekawa, 1991; Song et al., 2002).

또한, 경로의존형 체적제어법에 반영한 철근콘크리트의 균열모델은 콘크리트 셸구조물에 발생하는 균열은 외부하중조건에 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(Irawan과 Maekawa, 1997)과 균열발생전의 콘크리트 구성모델, 평면응력하의 균열이 발생한 콘크리트의 거동은 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(Maekawa et al., 2003)로 구성된다.

3. 경로의존형 체적제어법

3.1 압력절점을 이용한 경로의존형 체적제어법

압력절점은 요소의 균등한 압력중분(Δp)을 1개의 자유도로 갖는 가상의 절점이다. 한 절점이 6개의 자유도를 가지는 8절점 적중셀요소에 압력절점을 추가함으로써 요소는 총 49개의 자유도를 갖는다. 경계 b로 둘러싸인 물체의 Δp 에 의한 체적중분(ΔV)은 형상함수 N 을 이용하면 식 (1)과 같이 표현된다.

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

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

요소 경계면에 작용하는 표면력의 증감(Δt)은 압력절점에서의 압력중분을 이용하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

압력중분을 고려한 표면력항을 유한요소법의 평형방정식에 대입하면 식 (3)과 같다.

$$\mathbf{K}^e \Delta U = -(p + \Delta p) \int_b N^T \mathbf{n} db + \mathbf{F}^e \quad (3)$$

식 (1)의 체적변화와 압력중분과의 관계를 평형방정식 (3)에 대입하여 강성도 행렬을 재구성하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} & \int_b N^T \mathbf{n} db \\ \int_b \mathbf{n}^T N db & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}^e \\ \Delta p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -p \int_b N^T \mathbf{n} db + \mathbf{F}^e \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (4)$$

표 1 RC 압거의 물성치

Concrete		Reinforcing bar	
f_c	50.0 MPa	f_y	400.0 MPa
f_t	4.12 MPa	E_s	205,800 MPa
E_c	32,438 MPa	μ	1,900.0

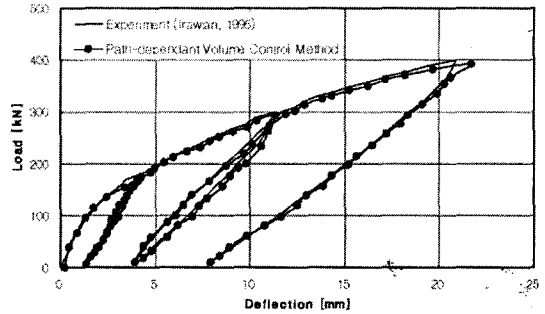


그림 3 RC 압거의 해석 및 실험결과

4.2 철근콘크리트 원통형 탱크

그림 4와 같은 철근콘크리트 원통형 탱크를 대상으로 수평재하시험(Harada et al., 2001)을 실시하여 지진 하중과 유사한 역반복 하중을 가하여 구조물의 변형 및 파괴특성에 관하여 검토하였다. 철근콘크리트 원통형 탱크의 원주방향과 수직방향의 철근비는 0.8%로 동일하며, 철근콘크리트 원통형 탱크의 역반복하중 실험에 사용된 구성재료의 물성치를 표 2에 나타내었다.

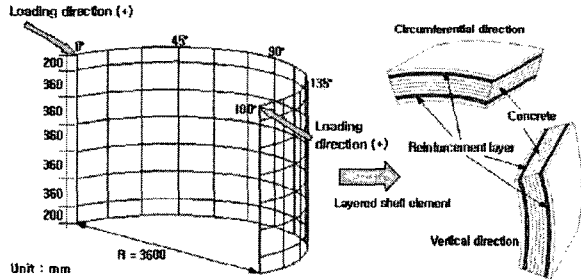
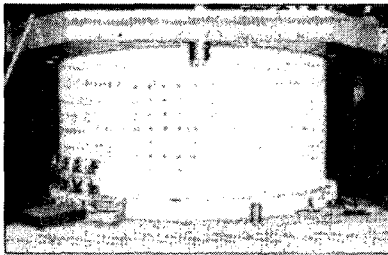


그림 4 RC 탱크의 형상 및 모델링

표 2 RC 탱크의 물성치

Concrete		Reinforcing bar	
f_c	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

RC 탱크의 하중-상대수평변위의 관계에 대한 경로의존형 체적제어법의 해석결과(그림 5)는 철근콘크리트 탱크의 반복거동을 유사하게 예측하고 있음을 확인할 수 있으며, 정(+)·부(-)재하시 대 각선 방향으로 균열이 발생하면서 철근콘크리트 탱크의 강성은 저하됨을 정확하게 재현하였다.

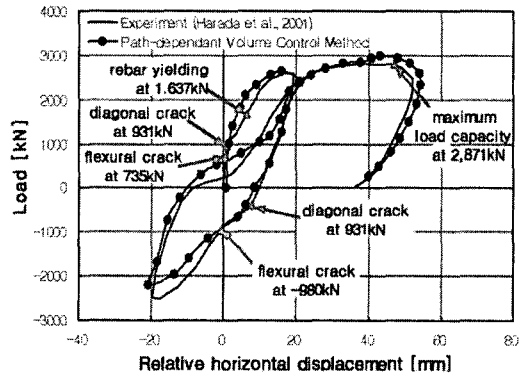


그림 5 RC 탱크의 해석 및 실험결과

4.3 역반복하중을 받는 철근콘크리트 중공 기둥 I

역반복하중을 받는 철근콘크리트 중공형 사각 기둥에 대한 실험과 해석이 일본의 Masukawa 등에 의하여 실시되었다. 대상 구조물은 높이 300cm의 단주형태에 중앙에 150cm의 중공단면을 가지고 있으며, 기둥 상단에서 역반복하중을 받고 있다(Masukawa et al., 1997). 대상 구조물의 제원 및 배근 상태는 그림 6과 같다.

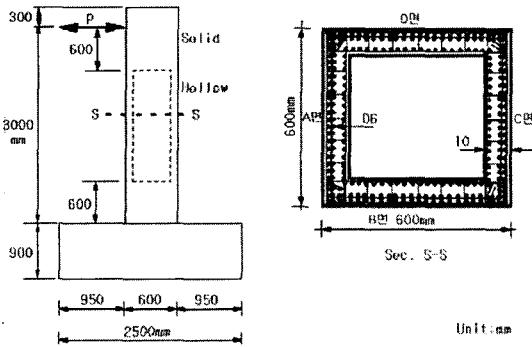


그림 6 실험체 형상

모델링은 기초부분은 제외하고 기둥부분만을 모델링하였는데, 실제와 유사한 모델링을 하기 위하여 구조물 전체를 40개의 요소로 모델링한 후 위·아래의 solid 부분은 다시 solid 요소로 모델링하였다. 각각의 요소에서 철근층은 실험과 같이 상단에 1개와 하단에 2개의 철근층을 적용하였으며, 지점은 모든 방향으로 구속하였고, 하중은 실험과 동일하게 원편 상단의 2개 요소에 역반복하중을 가하였다. 표 3은 철근콘크리트 중공형 기둥구조물의 각 재료 물성치를 나타낸 것이다.

그림 7은 역반복하중을 받는 철근콘크리트 중공형 기둥구조물에 대한 Masukawa의 실험 및 해석결과와 체적제어법에 의한 해석결과를 비교한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 체적제어법에 의한 해석결과는 Masukawa 등에 의해 실시된 해석결과와 상당히 유사한 결과를 보이고 있다.

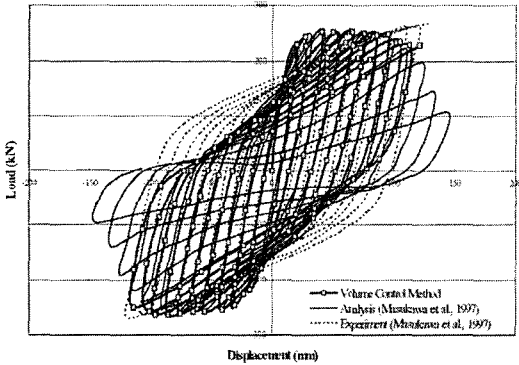


그림 7 실험 및 해석 결과 비교

표 3 실험체 재료물성치

Concrete		Reinforcing bar	
f_c	76.5 MPa	f_y	350 MPa
f_t	6.09 MPa	$f_u f_u$	421 MPa
E_c	31.4 GPa	E_s	200 GPa
ν	0.21	ρ	*

* 기둥 방향: 3.06%, 수평 방향: 1.13%(상단), 0.57%(하단)

4.4 역반복하중을 받는 철근콘크리트 중공 기둥 II

역반복하중을 받는 철근콘크리트 중공형 원형 및 사각 기둥에 대한 실험이 대만의 Cheng 등(2003)에 의하여 실시되었는데, 대상 구조물의 제원과 배근 형상은 그림 8에 나타낸 바와 같다. 대상 구조물의 높이는 원형단면의 경우(P11-C) 600cm이고, 사각형 단면의 경우(P12)에는 400cm이다. 또한 P11-C의 직경 및 P12의 단면길이는 150cm이며, 기둥 정상부에서 50cm 떨어진 곳에서 역반복하중을 가한다(Cheng et al., 2003).

그림 9는 P12에 대해 Cheng 등(2003)에 의한 실험결과와 체적제어법에 의한 해석결과를 비교한 것이고, 그림 10은 P11-C에 대해 실험결과와 체적제어법에 의한 해석결과를 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 체적제어법에 의한 해석결과는 실험결과와 상당히 유사한 거동을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

P12의 모델링은 구조물 전체를 40개의 요소로 모델링하였고, P11-C의 경우에는 총 120개의 요소로 모델링한 후 윗 부분은 독립된 solid 요소로 모델링하였다. 철근층은 P12와 P11-C 모두 상단에 1개와 하단에 1

개의 철근층을 적용함으로써 실험과 동일한 상태로 모델링하였으며, 지점은 모든 방향으로 구속하였다.

표 4는 PI2에 대한 각 재료의 물성치를 나타낸 것이고, 표 5는 PI1-C에 대한 각 재료의 물성치를 나타낸 것이다.

표 4 PI2의 재료물성치

Concrete		Reinforcing bar	
		연직방향	스터립
f_c	32.6 MPa	f_y	423.3 MPa
f_t	3.21 MPa	f_u	531 MPa
E_c	21.7 GPa	E_s	200 GPa
ν	0.18	ρ	1.01%
			0.26%

표 5 PI1-C의 재료물성치

Concrete		Reinforcing bar	
		연직방향	스터립
f_c	31.7 MPa	f_y	418.2 MPa
f_t	3.14 MPa	f_u	514.3 MPa
E_c	21.7 GPa	E_s	200 GPa
ν	0.18	ρ	1.72%
			0.29%

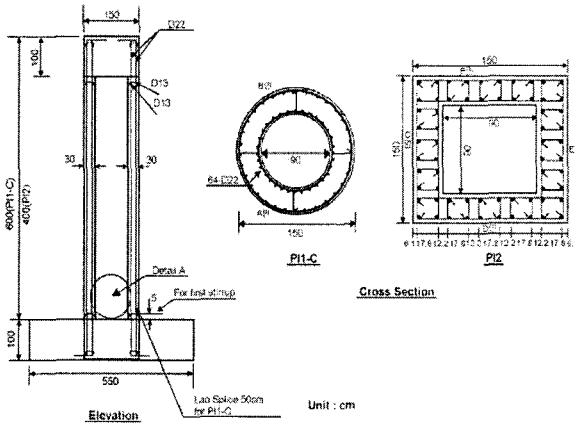


그림 8 실험체 제원 및 형상

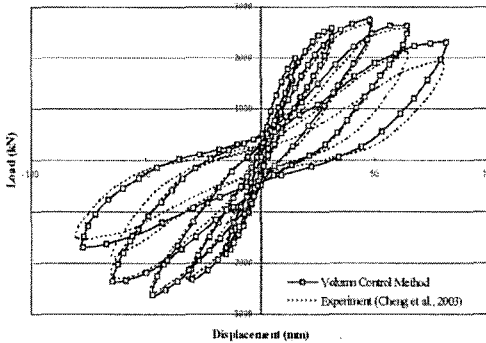


그림 9 PI2에 대한 실험 및 해석결과 비교

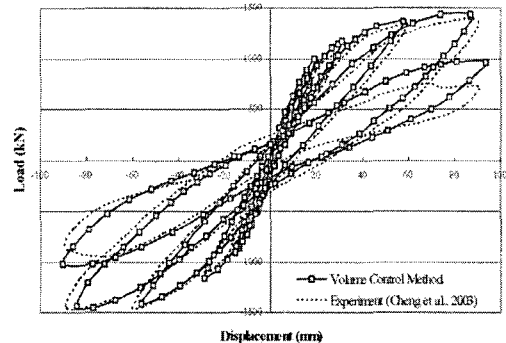


그림 10 PI1-C에 대한 실험 및 해석결과 비교

4.5 축력과 횡하중을 받는 철근콘크리트 중공 기둥

축력과 횡하중을 동시에 받는 철근콘크리트 중공형 기둥구조물에 대한 실험이 Zahn 등(1990)에 의하여 실시되었다. Zahn 등은 축력을 가한 후 중공 기둥의 중앙 부분에 수평하중을 가하는 실험을 실시하였는데, 구조물의 제원은 그림 11에 나타낸 바와 같다. 대상 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). 유한요소 해석시 총 104개의 쉘 요소로 모델링한 후, 양단 끝 부분과 가운데 부분을 solid 요소로 재모델링 하였다. 각각의 요소에서 철근층은 중간에 1개의 층으로 모델링하여 해석을 실시하였다. 또한 specimen 1, 2, 3은 쉘의 두께를 각각 94mm, 75mm, 55mm로 모델링하여 실험과 같은 중공비를 갖도록 하였고, 하중은 양 끝에 축하중을 가한 후 중앙 쉘에 체적을 제어하여 총 5번의 역반복하중을 가하였다. 표 6은 대상 구조물의 재료 물성치를 나타낸 것이다.

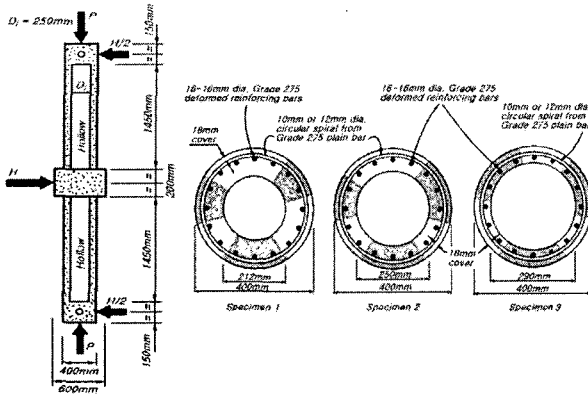


그림 11 실험체 제원 및 형상

그림 12는 축력과 횡하중을 동시에 받는 철근콘크리트 중공형 기둥 구조물에서 실험체 1에 대해 실험결과와 체적제어법에 의한 해석결과를 비교한 것이다. 또한 그림 13 및 그림 14는 실험체 2인 경우와 실험체 3인 경우의 결과를 비교한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 체적제어법에 의한 해석 결과가 실험결과와 재하, 제하, 그리고 재재하시의 거동면에서 유사함을 확인할 수 있고, 이를 통해서 체적제어법의 타당성을 확인할 수 있다.

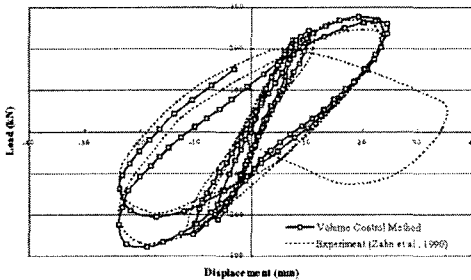


그림 12 실험체 1에 대한 결과 비교

표 6 실험체의 재료물성치

Concrete		Steel	
f_c	42.8 MPa	f_y	412.8 MPa
f_t	3.85 MPa	f_u	538.9 MPa
E_c	23.1 GPa	E_s	200 GPa
ν	0.19	ρ	*

* 기둥방향 철근비는 1.33%, 스티럽 철근비는 0.34%

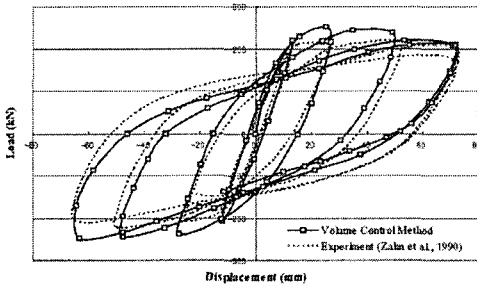


그림 13 실험체 2에 대한 결과 비교

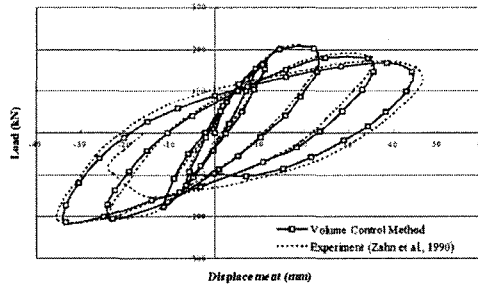


그림 14 실험체 3에 대한 결과 비교

5. 결 론

- 1) 반복하중을 받는 철근콘크리트 구조물에 대해 해석에 필요한 체적변화를 적절하게 선정하여 비선형 해석을 효과적으로 수행할 수 있는 경로의존형 체적제어 해석방법을 제안하였다.
- 2) 기존의 체적제어법에서 검증하였던 구조물 뿐 만 아니라 다양한 하중을 받는 중공 기둥에 대한 해석을 통해 해석기법의 적용성 및 타당성을 검증하였다.
- 3) 제안된 해석 기법은 반복하중을 받는 중공 철근콘크리트 기둥을 포함한 셸구조물에 대한 해석을 기존이 변위제어법보다 효과적으로 수행할 수 있다.

참고 문헌

- 송하원, 방정용, 변근주, 최강룡 (1999) 압력절점을 갖는 적층셀요소에 의한 콘크리트 구조물의 파괴해석, 한국전산구조공학회 논문집, 제 12권, 제 3호, pp.475~484.
- 송하원, 이준희, 변근주, 남상혁 (2004) 경로의존형 체적제어법을 이용한 반복하중을 받는 철근콘크리트 셀 구조물의 해석, 대한토목학회 논문집, 제 24권, 제 3A호, pp.473~480.
- 조제열, 김남식, 조남소, 최인길 (2003), “원자력 발전소 격납건물 벽체의 균열거동”, 한국콘크리트학회 논문집, 제 15권, 제 1호, pp.60~67.
- 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.
- Harada, M., Onituka, S., Adachi, M., and Matsuo, T. (2001) Experimental Study on Deformation Performance of Cylindrical Reinforced Concrete Structure, *Proceedings of Japan Concrete Institute*, Vol. 23, No. 3, pp.1129~1134.
- Irawan, P. and Maekawa, K. (1997) Path-Dependent Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Shells, *Proceedings of JSCE*, Vol. 34, No. 557, pp.121~134.
- Maekawa, K., Okamura, H., and Pimanmas, A. (2003) *Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete*, Spon Press, New York, N.Y.
- Masukawa, J., Amano, R., Suda, K. and Ichinomiya, T. (1997) Development of RC Column Members in use of High Strength Reinforcement, *Proceeding of JCI*, Vol. 19, No. 2, pp.789-794.
- Pfeiffer, P. A., Kennedy, J. M., and Marchertasm, A. H. (1992) 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, pp.143~157.
- Okamura, H. and Maekawa, K. (1991) *Nonlinear Analysis and Constitutive Model in Reinforced Concrete*, Gihodo-Shuppan, Japan.
- Song, H.-W., Bang, J. Y., Byun, K. J., and Choi, K. R. (1999) 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, VI341-348.
- Song, H.-W., Shim, S. H., Byun, K. J., and Maekawa, K. (2002a) 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.
- Song, H.-W., Shim, S. H., and Byun, K. J. (2002b) Finite Element Analysis of Prestressed Concrete Containment Vessel subjected to Internal Pressure, *Proceeding of the Third DIANA World Conference*, Tokyo/Japan.
- 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.