

초기결함을 갖는 철근 콘크리트 축대칭 쉘의 동적 특성 — 벽체 결함의 영향을 중심으로 —

Dynamic Characteristics of Reinforced Concrete Axisymmetric Shell with Initial Imperfection

— effect of wall imperfection on the dynamic response —

조 진 구 * · 민 정 기**
Cho, Jin Goo · Min, Jeong Ki

Abstract

In this study, a computer program considering initial imperfection of wall of axisymmetric reinforced concrete shell which show plastic deformation by large external loading is developed. Initial imperfection of wall of axisymmetric reinforced concrete shell is assumed as sinusoidal curve expressed as $W_i = W_0 \sin(n \pi y / \ell) y$. The developed program is applied to the analysis of the dynamic response of axisymmetric reinforced concrete shell when the wall has initial imperfection. The initial imperfection of 0.0, -5.0, and 5cm and steel ratio 0, 3, and 5% are tested for numerical examples.

The effects of the wall initial imperfections and steel ratio on the dynamic response of the axisymmetric reinforced concrete shell are analysed. It is shown that the direction of the initial imperfection is very important factors for determining the dynamic response.

I. 서 론

축대칭 쉘 구조물은 평면곡선을 동일 평면내에 있는 회전축 주위로 회전시킴으로서 얻어지는 회전곡면을 중립면으로하는 곡면판 구조체이다.¹⁾ 이러한 축대칭 쉘 구조물의 설계는 많은 산업 분야에서 빈번히 발생되고 있다. 따라서 그러한 구조물의 해석에 대한 신뢰성이 있고 정도가 좋은 해석 기법이 절실히 필요하게 되었다.^{4,5,12)} 구조물의

동적응답에 대한 연구는 항공기 설계에서 널리 사용되어 왔으며 최근에는 빈번한 지진의 발생으로 일반 구조물의 설계에서도 많은 관심을 받게 되었다. 그런데 철근 콘크리트 축대칭 쉘 구조물은 여러 가지의 원인으로 초기결함을 갖는 경우가 많이 있고 이러한 초기 결함은 쉘 구조물의 동적 거동에 큰 영향을 미치고 있으므로 정밀한 해석을 위해서는 반드시 고려되어야 한다.^{8,9)} 필자는 이러한 초기 결함을 고려한 동적 해석 프로그램을 개발하

* 전남대학교 농과대학

** 충남대학교 농과대학

키워드 : 축대칭, R.C.구조물, 원형돔, 초기결함, 격납 건물, 동적해석

고 돌이 초기 결함을 갖는 경우의 동적특성의 결과를 이미 보고한 바 있다.¹⁵⁾ 본 연구에서는 벽체의 초기 결함이 철근 콘크리트 축대칭 셀의 동적 응답에 어떠한 영향을 미치는가를 구명하고자 한다. 이를 위하여 해석방법으로는 유한요소법을 사용하였으며 유한요소 정식화에는 재료의 실제적인 거동과 잘 일치하는 탄·점소성 모델에 의해서 재료 비선형 효과를 고려하였고 기하학적 비선형 효과는 변형전의 초기형상과 잘 일치하는 전체 라그랑지안 좌표계에 의해서 고려하였다. 또한 콘크리트의 거동은 Drucker-Prager 항복 기준에 의해 모델링 하였고 철근은 등가의 두께를 갖는 철근층으로서 이산화시킨후 Von Mises 항복 기준에 따라 모델링 하였다.

II. 유한요소 해석

초기결합을 갖는 철근 콘크리트 축대칭 셀의 동적 해석에 있어서 Fig. 1과 같은 8-절점 등매개 변수 요소를 대칭되는 축에 대해서 회전시킨 링 요소를 채용하였다.

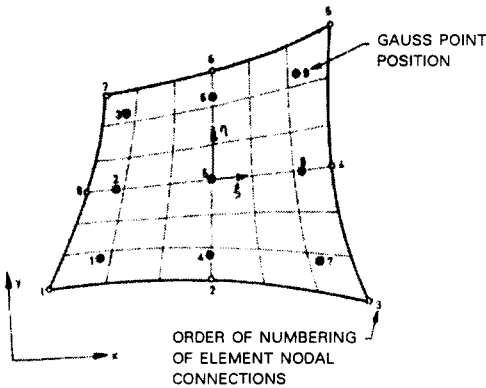


Fig. 1. Two dimensional parabolic isoparametric element

이러한 8-절점 등매개 변수 요소에 대한 형상함수는 식(1)과 같이 주어진다.

$$N_i(\xi, \eta) = \frac{1}{4} (1 + \xi \xi_i)(1 + \eta \eta_i) (\xi \xi_i + \eta \eta_i - 1) \quad (i=1,3,5,7)$$

$$N_i(\xi, \eta) = \frac{1}{2} \xi_i^2 (1 + \xi \xi_i)(1 - \eta^2) + \frac{1}{2} \eta_i^2 (1 + \eta \eta_i)(1 - \xi^2) \quad (i=2,4,6,8)$$

III. 초기결합

본 연구에서 채용된 철근 콘크리트 축대칭 셀의 벽체에서의 초기결합은 식(2)와 같은 정현곡선으로 가정하였다.

$$W_i = W_0 \sin(n \pi y / \ell) y \quad \dots\dots\dots(2)$$

여기서 W_0 : 벽체의 초기 최대 결함

ℓ : 벽체의 높이

y : 벽체 하단으로부터의 거리

n : 초기결합의 모드를 결정하는 상수로서 본 논문에서는 1로 하였다.

IV. 해석에 및 고찰

필자에 의해서 개발된 프로그램¹⁵⁾을 벽체의 초기 결함을 고려할 수 있도록 보완한 후 모델 케이스로서 선정된 철근 콘크리트 격납 건물의 벽체가 초기결합을 갖는 경우의 동적 응답 해석에 적용하였으며 이때 원주방향 철근 및 자오선 방향 철근은 등가의 철근층으로 환산되었다. 모델 구조물의 기하학적 형상 및 요소의 분할은 Fig. 2와 같고 사용된 재료의 성질은 Table 1과 같다.

이러한 철근 콘크리트 축대칭 셀에 작용하는 내압은 200 tonf/m·rad 의 등분포 단계하중(uniformly distributed step load)이 작용하는 경우로 하였다.

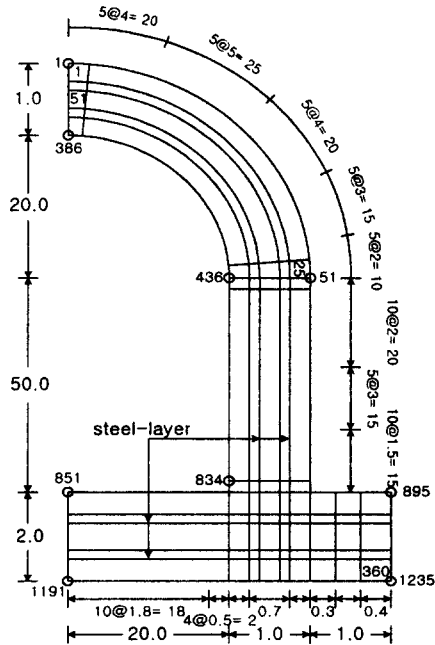


Fig. 2. Mesh generation for analysed structures

Table 1. Material properties

Items	Concrete	Steel
Strength	$\sigma_{ck} = 400 \text{ kgf/cm}^2$	$\sigma_y = 4000 \text{ kgf/cm}^2$
Elastic modulus	$2.8 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$	$2.04 \times 10^7 \text{ tf/m}^2$
Poisson's ratio	0.216	0.3
Self-weight	2.5 tf/m^3	7.85 tf/m^3
Yield criterion	Drucker-Prager	Von Mises

초기결함에 따른 철근 콘크리트 축대칭 쉘의 동적 응답을 알아보기 위하여 초기결함의 값을 벽체 두께의 5%를 기준으로하여 0.0, -5.0cm(하중작용 방향과 반대:내향 초기결함) 및 5.0cm(하중작용 방향:외향 초기결함)로 하였다. 또한 동적 응답에 대한 철근의 영향을 알아보기 위하여 철근비의 값을 0, 3, 및 5%로 하였다. 여기서 철근비 0%는 철근을 무시하고 균질의 콘크리트만으로 가정한 경우를 의미한다. 해석 결과의 제시는 최대 피크 값이 예상되는 돔의 정부 및 벽체 중앙에서의 값을 고찰하였다.

초기결함에 따른 돔의 정부에서의 연직 변위의 동적 응답은 Fig. 3과 같다.

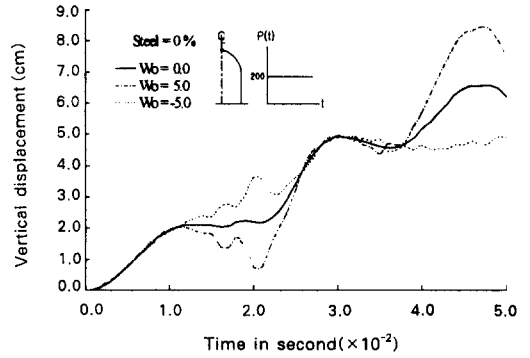


Fig. 3(a). Time response of vertical displacement at crown due to wall initial imperfections (without steel)

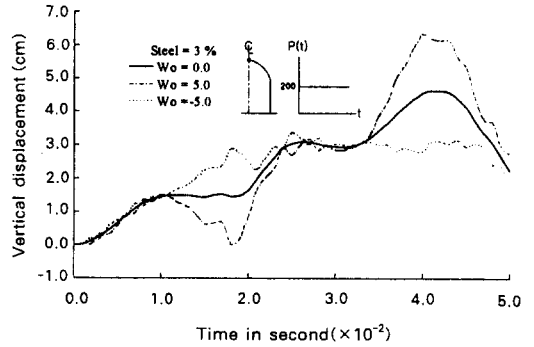


Fig. 3(b). Time response of vertical displacement at crown due to wall initial imperfections (steel : 3%)

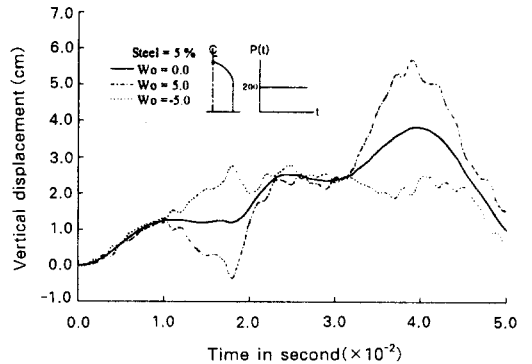


Fig. 3(c). Time response of vertical displacement at crown due to wall initial imperfections (steel : 5%)

철근이 없는 경우 진동 초기에는 초기결함에 관계없이 유사한 응답을 나타내다가 0.002초 후 초기결함에 따라 피크 값이 큰 차이를 보이다가 다시 유사한 응답을 나타냈고 0.005초 부근에서 피크 값이 큰 차이를 나타냈다. 현저한 피크에서 최대 피크 값은 외향 초기결함을 갖는 경우 가장 크게 그리고 내향 초기결함을 갖는 경우에 가장 작게 나타났다. 이러한 현상은 모든 철근비에서 유사하였지만 철근비가 증가할수록 피크 값에 큰 차이를 보이는 시간이 점점 빨라졌다.

초기결함에 따른 벽체 중앙에서의 반경방향 변위의 동적 응답은 Fig. 4와 같다.

벽체의 중앙에서의 반경방향 변위의 동적 응답

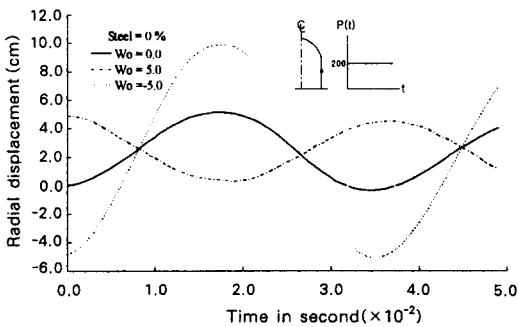


Fig. 4(a). Time response of radial displacement at mid-point of wall due to wall initial imperfections (steel = 0%)

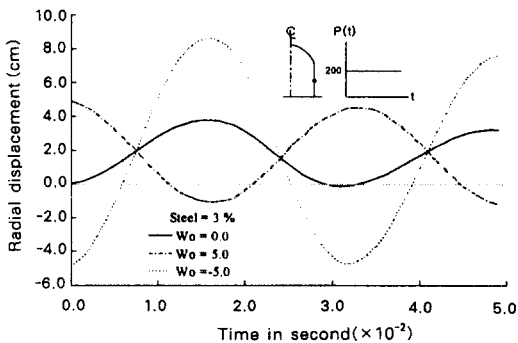


Fig. 4(b). Time response of radial displacement at mid-point of wall due to wall initial imperfections (steel=3%)

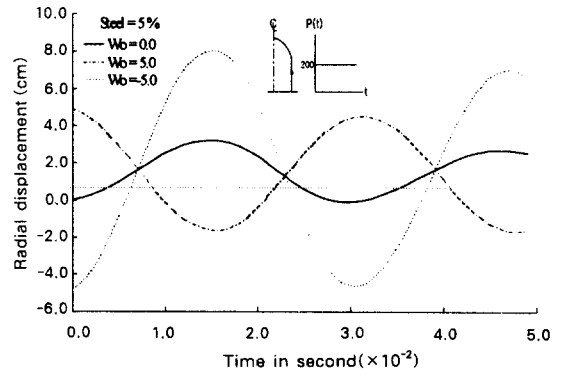


Fig. 4(c). Time response of radial displacement at mid-point of wall due to wall initial imperfections (steel = 5%)

은 내향 초기결함을 갖는 경우 피크 값이 현저하게 나타났으며 초기결함이 없는 경우와 외향 초기결함을 갖는 경우의 피크 값은 거의 유사하였다. 돔의 정부에서의 연직 변위의 응답곡선과 벽체 중앙에서의 반경방향 변위의 응답곡선에서 초기결함에 따라 피크 값이 큰 차이를 보이는 시간을 살펴보면 벽체에서 피크 값이 현저한 차이를 나타내는 시간은 돔의 정부에서 피크 값이 현저한 차이를 보이는 시간보다 약간 앞서 발생되고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 모든 철근비에서 유사하였다.

변위의 동적 응답에 대한 철근의 영향을 알아보면 다음과 같다.

철근비에 따른 돔 정부의 연직변위의 동적 응답은 Fig. 5와 같다.

초기결함이 없는 경우와 외향 초기결함을 갖는 경우 철근비에 따른 응답의 패턴은 전체적으로 유사하였다. 그러나 철근비 5%인 경우에 가장 빨리 현저한 피크에 도달하였으며 철근이 없는 경우 가장 늦게 도달하였다. 또한 내향 초기결함을 갖는 경우가 가장 빨리 현저한 피크에 도달하였고 외향 초기결함 및 초기결함이 없는 경우는 거의 유사하였다.

철근비에 따른 벽체 중앙에서의 반경방향 변위의 동적 응답은 Fig. 6과 같다.

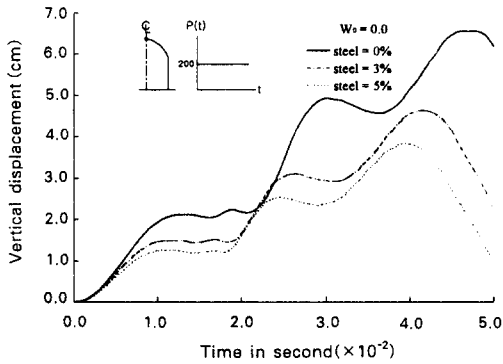


Fig. 5(a). Time response of vertical displacement at crown due to steel layer (without initial imperfection)

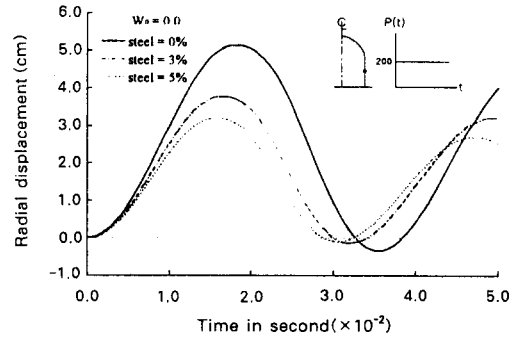


Fig. 6(a). Time response of radial displacement at mid-point of wall due to steel layer (without initial imperfection)

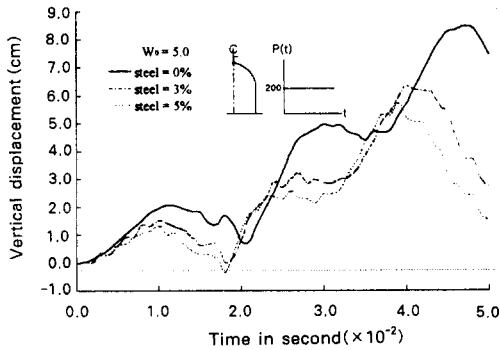


Fig. 5(b). Time response of vertical displacement at crown due to steel layer (initial imperfection = 5cm)

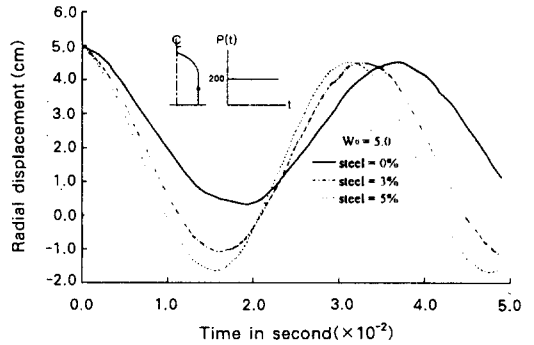


Fig. 6(b). Time response of radial displacement at mid-wall due to steel layer (initial imperfection = 5cm)

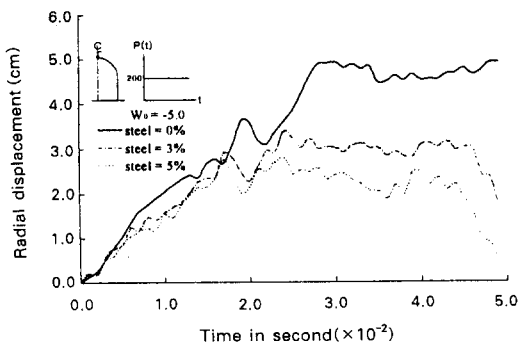


Fig. 5(c). Time response of radial displacement at mid-wall due to steel layer (initial imperfection = -5cm)

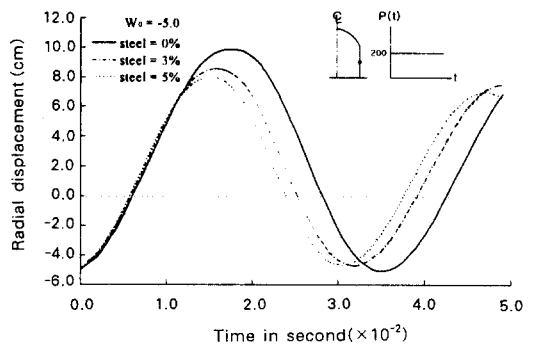


Fig. 6(c). Time response of radial displacement at mid-wall due to steel layer (initial imperfection = -5cm)

벽체 중앙에서의 반경방향 변위의 동적 응답도 모든 초기결합에서 철근비에 따른 응답의 패턴은 전체적으로 유사하였다. 현저한 피크에 도달하는 시간은 철근비 5%인 경우에 가장 빨리 철근이 없는 경우가 가장 늦게 나타났다. 최대 피크 값의 비교를 보면 철근이 없는 경우를 기준으로 하였을 때 철근비 3%인 경우 26% 그리고 철근비 5%인 경우 39%의 감소를 나타냈다. 또 철근비에 따른 피크 값의 차이는 초기결합이 없는 경우에는 최대 피크 값이 큰 차이를 보이고 최소 피크 값은 거의 유사하였다. 그러나 외향 초기결합을 갖는 경우에는 최소 피크 값이 큰 차이를 보이고 최대 피크 값은 거의 유사하였다. 즉 초기결합이 없는 경우와는 반대의 현상을 나타냈다. 내향 초기결합을 갖는 경우 최대 피크 값에 약간의 차이를 보이고 최소 피크 값은 큰 차이가 없는 것은 초기결합이 없는 경우와 유사하였지만 철근비에 따른 최대, 최소 피크 값의 차이는 현저히 적게 나타났다. 즉 내향의 초기결합을 갖는 경우에 철근의 영향은 가장 작게 나타났다.

V. 결 론

본 연구에서는 큰 외적 하중을 받아서 소성변형을 일으키는 철근 콘크리트 축대칭 셸의 벽체가 초기결합을 갖는 경우 이를 고려할 수 있는 프로그램이 개발되었다. 프로그램의 개발에 있어서 벽체의 초기결합은 $W_i = W_0 \sin(n\pi y / \ell)$ 로 주어지는 정현곡선으로 가정하였다. 개발된 프로그램을 모델케이스로 선정된 철근 콘크리트 격납건물의 벽체가 초기결합을 갖는 경우의 동적 응답 해석에 적용하였다. 수치예에서 벽체의 초기결합의 값을 벽체 두께의 5%를 기준으로하여 0.0, -5.0cm(하중작용 방향과 반대:내향 초기결합) 및 5.0cm(하중작용 방향:외향 초기결합)의 3경우로 하였고 철근비의 값을 0, 3, 및 5%를 기준으로하여 등가의 두께를 갖는 철근층으로 이산화 시켰다.

이러한 수치예를 통하여 얻어진 결과를 요약하

면 다음과 같다.

1. 돔 정부의 연직변위의 최대 피크값은 외향초기결합을 갖는 경우 가장 크게 나타났고 내향초기결합을 갖는 경우 가장 작게 나타났다. 이러한 현상은 모든 철근비에서 유사하였지만 철근비가 증가할수록 피크값에 큰 차이를 보이는 시간이 점점 빨라졌다.
2. 초기결합에 따라 피크값이 현저한 차이를 보이는 시간은 벽체에서의 경우가 돔에서의 경우보다 빨리 나타났으며 이러한 현상은 모든 철근비에서 유사하였다.
3. 내향초기결합을 갖는 경우에 가장 빨리 현저한 피크에 도달하였고 외향초기결합 및 초기결합이 없는 경우는 거의 유사하였다.
4. 변위의 응답이 현저한 피크에 도달하는 시간은 철근비 5%인 경우 가장 짧았고 철근이 없는 경우 가장 늦게 도달하였으며 이러한 현상은 모든 초기결합에서 동일하였다.
5. 초기결합이 없는 경우 철근비에 따른 응답특성은 최대 피크값이 큰 차이를 보인 반면 최소피크값은 거의 유사하였다. 그러나 내향초기결합을 갖는 경우에는 철근비에 따른 최대 및 최소피크 값이 큰 차이를 나타내지 않았다. 달리 말하면 내향의 초기결합을 갖는 경우 철근의 영향은 가장 작게 나타났다.

참 고 문 헌

1. C. Philip Johnson, 1967, The analysis of thin shell by a finite element procedure, Thesis for Ph.D., University of California, Berkeley, sept.
2. D. R. J. Owen and E. Hinton, 1980, Finite elements in plasticity.
3. James A. Stricklin and Walter E. Haisler, 1983, Formulation and solution procedure for nonlinear structural analysis, Pergamon, Computer & Structures, vol. 7, pp. 125~136.

4. Karan S. Surana, 1983, Geometrically nonlinear formulation for the axisymmetric transition finite elements, pergamon, Pergamon, Computer & Structures, vol. 17 no. 2, pp. 243~255.
5. Kos Surana, 1975, Geometrically nonlinear formulation for the axisymmetric shell elements, to be published in Int. J. Nnm. Meth. Engng.
6. O. C. Zienkiewicz and G. G. Nayak, 1971, A general approach to the problems of plasticity and large deformation using isoparametric elements, proc. conf. on matrix methods in structural mechanics, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio.
7. P.V. Marcal, 1970, Large deflection analysis of elastic-plastic shells of revolution, AIAA, J. vol. 8 no. 9, pp. 629~636.
8. Robert Kao, 1978, Dynamic buckling of axisymmetric spherical caps with initial imperfections, Pergamon, Computer & Structures, vol. 9, pp. 463~473.
9. Robert Kao, 1980, Nonlinear dynamics buckling of spherical caps with initial imperfections, Pergamon, Computer & Structures, vol. 12, pp. 49~63.
10. R. D. Wood and O. C. Zienkiewicz, 1977, Geometrically nonlinear finite element analysis of beams, frames, arches and axisymmetric shells, Pergamon, Computer & Structures, vol. 7, pp. 725~735.
11. Stanley Klein, 1965, The linear elastic dynamic analysis of shell of by the matrix displacement method, AFFDL-TR-66-80 Wright-Patterson Air Force Base, ohio, pp. 299~325.
12. 조진구, 1995, 철근 콘크리트 축대칭 구조물 해석 모형의 개발, 한국농공학회지 제37권 제2호 pp. 86~94.
13. 조진구, 1998, 초기처짐을 갖는 Spherical Shell의 동적 특성에 관한 연구(I), 한국농공학회지 제40권 제3호 pp. 113~121.
14. 조진구, 1998, 초기처짐을 갖는 Spherical Shell의 동적 특성에 관한 연구(II), 한국농공학회지 제40권 제5호 pp. 91~99.
15. 조진구, 1999, 초기결함을 갖는 철근 콘크리트 축대칭 셸의 동적 특성, 한국농공학회지 제41권 제4호 pp. 77~85.