

# 초기결함을 갖는 철근 콘크리트 축대칭 쉘의 동적 특성

- 돔의 결함의 영향을 중심으로 -

## Dynamic Characteristics of Reinforced Concrete Axisymmetric Shell with Initial Imperfection

- Effect of Dome Imperfection on the Dynamic Response -

조           진           구  
Cho,         Jin         Goo

### Abstract

In this study, a computer program considering initial imperfection of axisymmetric reinforced concrete shell which show plastic deformation by large external loading was developed. Initial imperfection of dome was assumed as 'dimple type' which can be expressed as  $W_i = (W_0/h) (1-x^2)^3$ . The developed model was applied to the analysis of dynamic response of axisymmetric reinforced concrete shell when it has initial imperfection. The initial imperfection of 0.0, -5.0, and 5cm and steel layer ratio 0, 3, and 5% were tested for numerical examples. The results can be summarized as follows:

1. Dynamic response of vertical deflection at dome crown showed slow increase if it has not initial imperfection. But the response showed relatively high amplitude when initial imperfection was inner directed (opposite direction to loading). Similar trends also appeared for different steel layer ratios.

2. Dynamic responses of radial displacement at the junction of dome and wall showed the highest amplitude when initial imperfection was inward directed (opposite direction to loading). The lowest amplitude occurred when initial imperfection was outward directed (same direction to loading). Vibration period also delayed for inward directed initial imperfection. These trends were obvious as steel layer ratio increasing.

3. The effects of imperfection for the dynamic response of radial displacement at the center of wall scarcely appeared. The effects of initial imperfection of dome on the dynamic response of the wall can be neglected.

4. Effect of steel on the dynamic response of axisymmetric shell structure was great when initial imperfection did not exist. And the effect of direction of initial imperfection (inward or outward) did not show big difference.

\* 전남대학교 농과대학

키워드 : 축대칭, RC 구조물, 원형돔, 초기결함, 격납  
건물, 동적해석

## I. 서 론

축대칭 셀 구조물은 평면곡선을 동일 평면내에 있는 회전축 주위로 회전시킴으로서 얻어지는 회전곡면을 중립면으로하는 곡면판 구조체이다.<sup>1)</sup> 이러한 축대칭 셀 구조물의 설계는 많은 산업 분야에서 빈번히 사용되고 있다. 따라서 그러한 구조물의 해석에 대한 신뢰성이있고 정도가 높은 해석도구가 절실히 필요하게 되었다.<sup>4,5,12)</sup> 예를 들면 저수지의 취수탑이나 정유공장을 비롯한 대규모 공장에 건설되는 액체 저장탱크 또는 원자력 발전소의 격납 건물등이 이에 속한다. 이러한 대형 구조물은 사고시 재해로부터 인명과 재산을 보호하기 위한 안전성이 확보되어야하고 이를 위해서는 정하중은 물론 동하중에 대해서도 안전성이 보장되어야한다.<sup>15,16)</sup> 구조물의 동적응답에 대한 연구는 항공기 설계에서 널리 사용되어 왔으며 최근에는 빈번한 지진의 발생으로 일반 구조물의 설계에서도 많은 관심을 받게 되었다. 일반적으로 정적 하중조건에서 설계된 구조물은 동하중이 작용하면 붕괴될 수도 있다.<sup>2)</sup> 따라서 이러한 셀 구조물의 설계에는 동적해석이 수행되어야 하는데 동적해석에 대한 보다 실제적인 해석을 위해서는 재료 및 기하학적 비선형성을 고려한 동적해석은 물론 초기결합등의 영향이 포함되어야 한다. 왜냐하면 이들 인자는 서로 다른 형태로 구조물의 동적 거동에 영향을 끼치기 때문이다.<sup>2,3,4,5,10)</sup> 초기결합은 셀에 동적하중이 작용하기전 발생된 결함을 뜻하며 이러한 초기결합은 여러 가지의 원인에 의해서 발생된다. 이러한 초기결합은 셀구조물의 동적거동에 큰 영향을 미치고 있으므로 정밀한 해석을 위해서는 반드시 고려되어야한다.<sup>8,9)</sup> Zienkiewicz<sup>6,10)</sup> 등은 대변형을 고려한 소성문제의 해석방법을 연구하였고 Robert Kao<sup>8,10)</sup>는 초기결합을 갖는 축대칭 셀의 좌굴문제의 해석에서 초기결합을 갖는 축대칭 구형 썩의 경우 동적 좌굴 능력이 현저히 감소된다고 하였다. Stanley Klein<sup>11)</sup>는 매트릭스 변위법에 의해서 셀의 선형탄성 동적 문제를 연구하였으며 셀의 거동에 대한 재료 및 기하학적 비선

형성의 영향에 관하여 Marcal<sup>7)</sup> Bushell Levine 및 Robert Kao<sup>8,9)</sup> 등이 연구 하였고 이들의 연구에 의하면 구형 썩의 기하학적 파라미터가 중요한 인자임이 규명되었다.

본 연구의 목적은 초기결합을 갖는 철근 콘크리트 축대칭 셀의 동적 거동 특성을 규명하기 위한 것이다. 이를 위하여 해석방법으로는 유한요소법을 사용하였으며 유한요소 정식화에는 재료의 실제적인 거동과 잘 일치하는 탄·점소성 모델에 의해서 재료 비선형 효과를 고려하고 기하학적 비선형 효과는 변형선의 초기형상과 잘 일치하는 전체 라그랑지안 좌표계에 의해서 고려하였다. 또한 콘크리트의 거동은 Drucker-Prager 항복 기준에 의해 모델링 하였고 철근은 등가의 두께를 갖는 철근층으로서 이상화시킨후 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.

이러한 8-절점 등매개 변수 요소에 대한 형상함

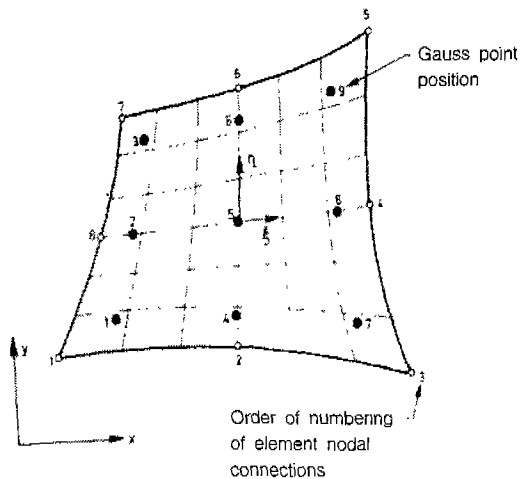


Fig. 1. Two dimensional parabolic isoparametric element

수는 식 (1)과 같이 주어진다.

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

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

III. 초기결함

초기결함을 갖는 철근 콘크리트 축대칭 쉘의 형상은 Fig. 2와 같다.

여기서 H는 돔의 중앙에서의 높이이고 R은 돔의 반경이다. 또한  $W_i(r, t)$  및  $U(r, t)$ 는 각각 임의의 시간 t에서의 법선방향 및 접선방향 변위 성분이며  $W_i(r, 0)$ 는 초기결함이다.

초기결함을 갖지않는 원래의 축대칭 쉘의 형상은 식 (2)에 의해서 나타낼 수 있다.<sup>9)</sup>

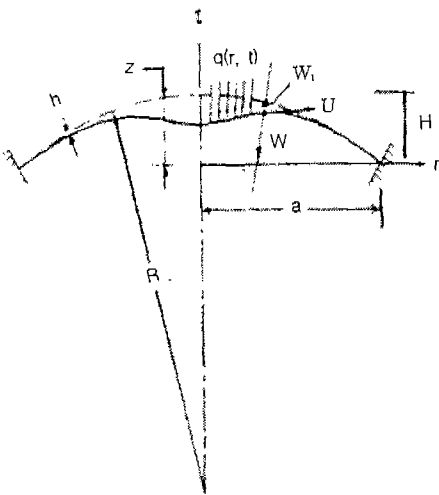


Fig. 2. Geometry of reinforced concrete axisymmetric shell with initial imperfection

$$z = H(1 - (r/a)^2) \dots\dots\dots(2)$$

여기서, r : 반경방향 좌표

z : 돔의 저면에서 임의점의 높이

본 연구에서 채용된 돔의 초기결함은 식 (3)과 같은 'dimple type'으로 가정한다.

$$W_i = (W_0/h)(1 - (r/a)^2)^3 \dots\dots\dots(3)$$

여기서,  $W_0$  : 돔의 정점에서 초기 최대 결함

h : 돔의 두께

a : 돔의 저면반경

IV. 동적해석

초기결함을 갖는 축대칭 쉘이 동하중을 받는 경우 임의시간  $t_n$ 에서의 동적 평형방정식은 다음과 같다.

$$[M] \{ \ddot{d} \}_n + [C] \{ \dot{d} \}_n + (P)_n = (F)_n \dots\dots\dots(4)$$

여기서,

[M] : 질량행렬

[C] : 감쇠행렬

{ P }<sub>n</sub> : 저항절점력벡터

{ F }<sub>n</sub> : 절점외력벡터

{  $\ddot{d}$  }<sub>n</sub> : 절점가속도벡터

{  $\dot{d}$  }<sub>n</sub> : 절점속도벡터

식 (4)에 의해서 주어지는 동적 평형방정식의 해는 중앙차분법을 이용하여 수치적분을 실시하여 구하였다.

V. 해석예 및 고찰

필자에 의해서 개발된 프로그램(문헌 13, 14)을 축대칭 쉘이 벽체 및 저판을 갖는 경우에도 적용할 수 있도록 수정한 후 모델 케이스로서 선정된

철근 콘크리트 원자로 격납 건물<sup>15)</sup>이 초기결함을 갖는 경우의 동적 응답 해석에 적용하였으며 이때 원주방향 철근 및 자오선 방향 철근은 등가의 철근층으로 환산되었다. 모델 구조물의 기하학적 형상 및 요소의 분할은 Fig. 3과 같다. 한편 사용된 재료의 성질은 Table 1과 같다.

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

초기결함에 따른 축대칭 셀의 동적 응답을 알아보기 위하여 돔의 초기결함의 값을 돔 두께의 5%

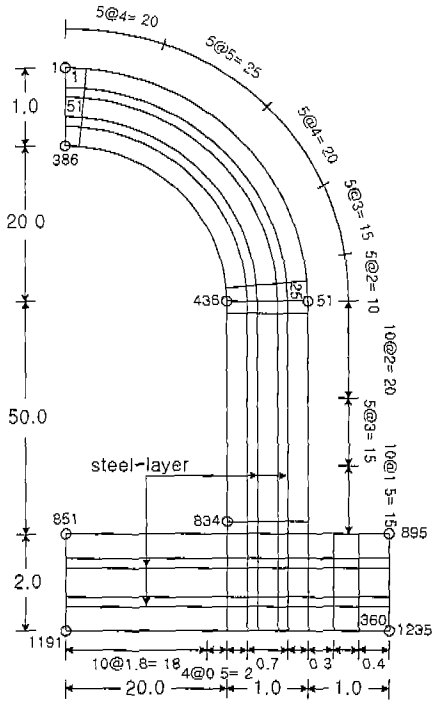


Fig. 3. Mesh generation for analysed structures

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	$2.5 \text{tf/m}^3$	$7.85 \text{tf/m}^3$
Yield criterion	Drucker-Prager	Von Mises

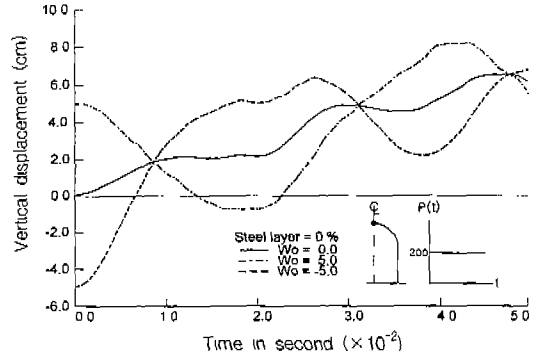


Fig. 4.(a) Time response of vertical displacement at crown due to dome initial imperfections (without steel layer)

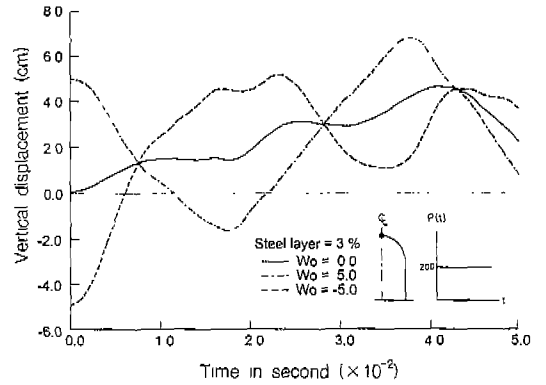


Fig. 4.(b) Time response of vertical displacement at crown due to dome initial imperfections (steel layer ratio : 3%)

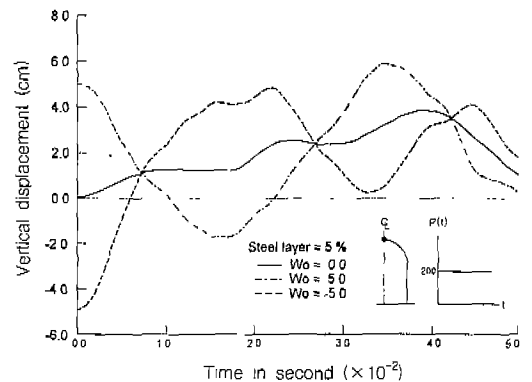


Fig. 4.(c) Time response of vertical displacement at crown due to dome initial imperfections (steel layer ratio : 5%)

를 기준으로하여 0.0, -5.0 및 5.0cm로 하였다. 또한 동적 응답에 대한 철근의 영향을 알아보기 위하여 철근층비의 값을 0, 3, 및 5%로 하였다. 여기서 철근층비 0%는 철근층을 무시하고 균질의 콘크리트만으로 가정한 경우를 의미한다.

돔의 정부에서의 연직 변위의 동적 응답은 Fig. 4와 같다.

초기결함이 없는 경우 연직 처짐의 동적 응답은 시간에 따라 완만한 증가를 보이면서 긴 주기를 나타냈지만 초기결함을 갖는 경우에는 약간의 진동을 나타냈으며 특히 내향 초기결함(작용하중과

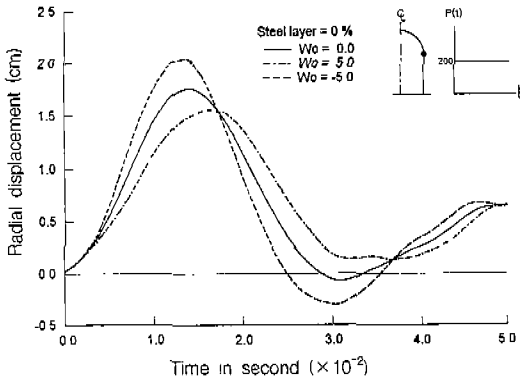


Fig. 5.(a) Time response of radial displacement at dome-wall junction due to dome initial imperfections (without steel layer)

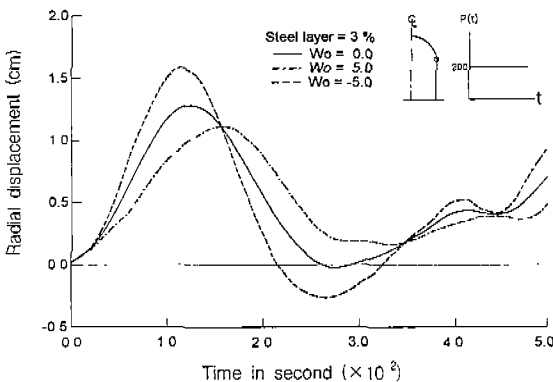


Fig. 5.(b) Time response of radial displacement at dome-wall junction due to dome initial imperfections (steel layer ratio : 3%)

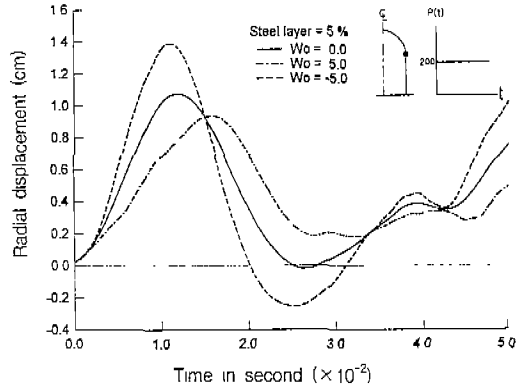


Fig. 5.(c) Time response of radial displacement at dome-wall junction due to dome initial imperfections (steel layer ratio : 5%)

반대방향)을 갖는 경우 진폭이 약간 크게 나타났다. 이러한 현상은 모든 철근층비에서 유사하였다.

돔과 벽체의 결합부에서 반경방향 변위의 동적 응답은 Fig. 5와 같다.

동적 응답 특성은 초기결함을 갖는 경우나 없는 경우 거의 유사하게 나타났지만 내향 초기결함을 갖는 경우에 진폭이 가장 크게, 외향 초기결함을 갖는 경우 가장 작은 진폭을 나타냈으며 초기결함이 없는 경우와 외향 초기결함을 갖는 경우 진동의 주기가 거의 같았지만 내향 초기결함을 갖는 경우에는 진동주기가 약간 지연되는 즉 진동주기가 약간 길어지는 경향이 있었다. 이러한 현상은 철근층비가 증가할수록 더욱 현저하였다. 현저한 피크에서의 반경방향 변위의 동적응답의 증감을 보면 초기결함이 없는 경우를 기준으로 하였을 때 내향 초기결함을 갖는 경우 철근층비에 따라 20, 28 및 33%의 증가를 보였으며 외향 초기결함을 갖는 경우 철근층비에 따라 9, 12 및 14%의 감소를 나타냈다. 즉 철근층비가 클수록 초기결함의 영향이 크게 나타났다.

벽체 중앙에서의 반경방향 변위의 동적 응답은 Fig. 6과 같다.

그림에서 보는 바와 같이 동적 응답에 대한 초기결함의 영향은 거의 없었다. 즉 돔의 초기결함이 벽체의 동적 응답에 미치는 영향은 거의 없음

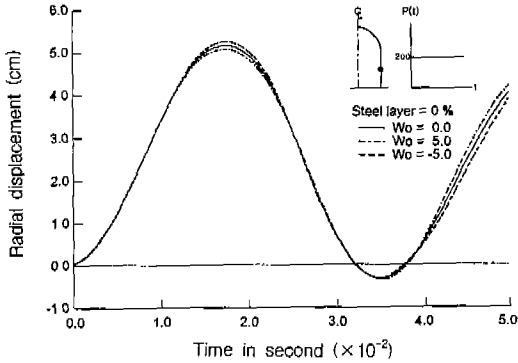


Fig. 6.(a) Time response of radial displacement at mid-point of wall due to dome initial imperfections (without steel layer)

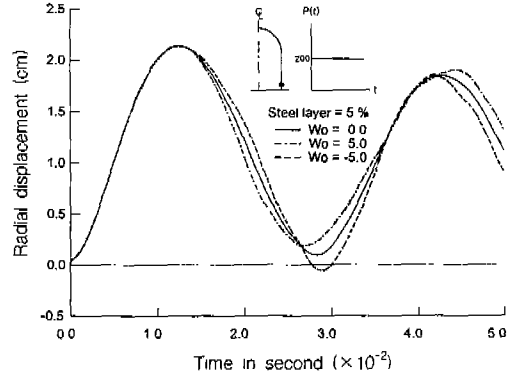


Fig. 7. Time response of radial displacement at lower-part of wall due to dome initial imperfections (steel layer ratio : 5%)

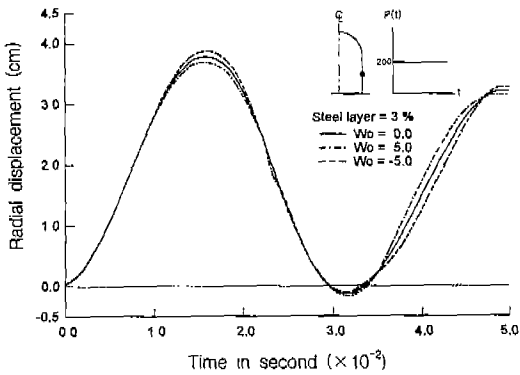


Fig. 6.(b) Time response of radial displacement at mid-point of wall due to dome initial imperfections (steel layer ratio : 3%)

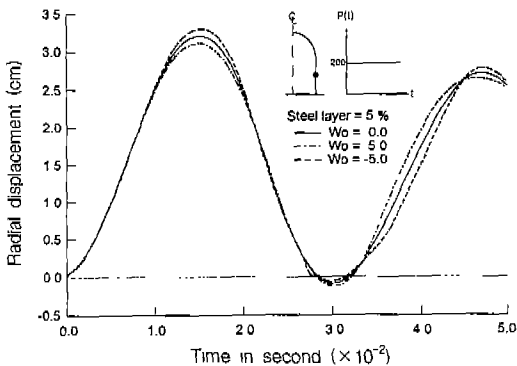


Fig. 6.(c) Time response of radial displacement at mid-point of wall due to dome initial imperfections (steel layer ratio : 5%)

을 알 수 있다. 그러나 철근충비가 증가할수록 초기결함의 영향은 약간 크게 나타났다.

벽체 하부에서 반경방향 변위의 동적 응답은 Fig. 7과 같다.

모든 철근충비에서 유사한 특성을 나타냈으므로 철근충비 5%의 경우만을 제시하였다.

벽체 상부 또는 중앙부에서보다 오히려 초기결함의 영향이 크게 나타났으며 진동주기도 초기결함의 값에 따라 약간씩 차이가 있음을 뚜렷하게 볼 수 있다. 외향 초기결함을 갖는 경우 진동주기가 가장 짧게 그리고 내향 초기결함을 갖는 경우에 진동주기가 가장 크게 나타났다.

변위의 동적 응답에 대한 철근의 영향을 알아보면 다음과 같다.

철근충비에 따른 돔의 정부의 동적 응답은 Fig. 8과 같다.

초기결함이 없는 경우 철근이 없을 때를 기준으로 하여 현저한 피크에서의 변위의 감소를 보면 철근충비 3%의 경우 30% 철근충비 5%의 경우 약 40%의 감소를 보였다. 외향 초기결함을 갖는 경우에는 각각 20% 및 30%의 감소를 보였으며 내향 초기결함을 갖는 경우에는 20% 및 25%의 감소를 나타냈다. 이를 종합하여볼 때 초기결함이 없는 경우 철근의 영향이 크게 나타났으며 초기결함의 방향에 따른 - 외향 및 내향 결함 - 영향은

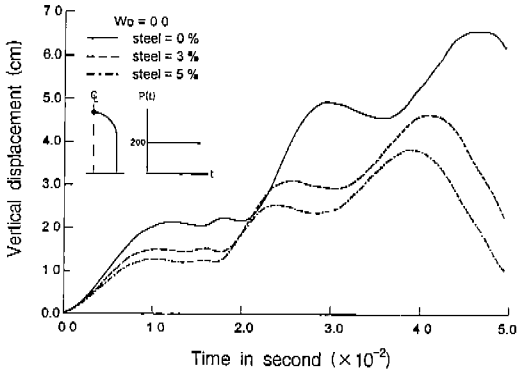


Fig. 8.(a) Time response of vertical displacement at crown due to steel layer (without initial imperfections)

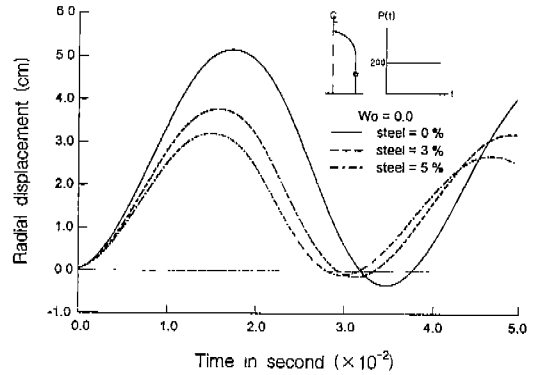


Fig. 9.(a) Time response of radial displacement at mid-point of wall due to steel layer (without initial imperfections)

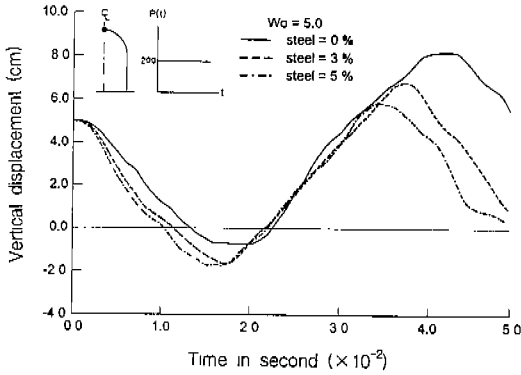


Fig. 8.(b) Time response of vertical displacement at crown due to steel layer (initial imperfection=5cm)

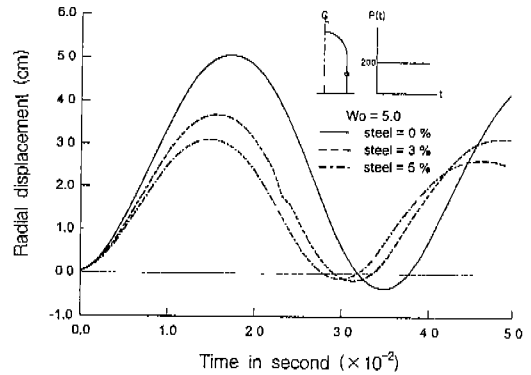


Fig. 9.(b) Time response of radial displacement at mid-point of wall due to steel layer (initial imperfections=5cm)

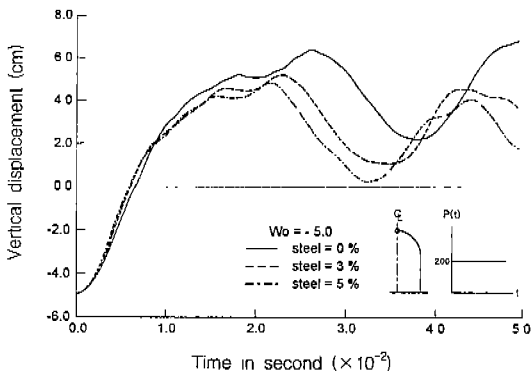


Fig. 8.(c) Time response of vertical displacement at crown due to steel layer (initial imperfection=-5cm)

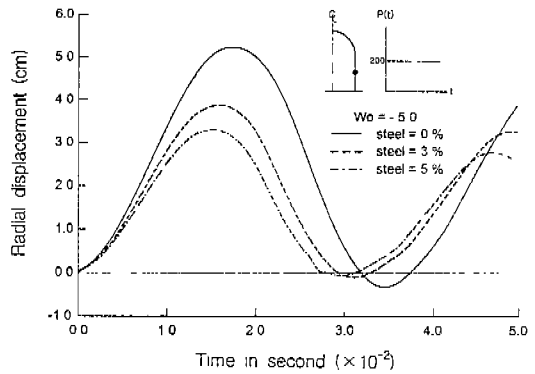


Fig. 9.(c) Time response of radial displacement at mid-point of wall due to steel layer (initial imperfections=-5cm)

크지는 않았다.

벽체 중앙에서의 반경방향 변위의 동적 응답은 Fig. 9와 같다.

초기결합과는 무관하게 유사한 경향을 그리고 대단히 규칙적인 응답 특성을 나타냈다. 초기결합이 없는 경우 철근이 없는 경우를 기준으로 하였을 때 철근충비에 따라 20% 및 40%의 감소를 나타냈으며 외향 초기결합을 갖는 경우 철근충비에 따라 27% 및 40% 그리고 내향 초기결합을 갖는 경우 25% 및 35%의 감소로서 변위 응답의 감소율이 거의 비슷하였다. 즉 변위의 응답에 미치는 철근의 영향은 크게 나타나고 있지 않았다. 그러나 돔의 정부에서의 동적 응답과 유사하게 철근이 많을수록 진폭은 현저히 감소하였고 진동의 주기도 점차로 감소하고 있음을 알 수 있다.

## V. 결 론

본 연구에서는 큰 외적 하중을 받아서 소성변형을 일으키는 철근 콘크리트 축대칭 셸의 돔이 초기결합을 갖는 경우 이를 고려하여 해석할 수 있는 프로그램이 개발되었다. 프로그램의 개발에 있어서 돔의 초기결합은  $W_i = (W_0/h)(1-(r/a)^2)^3$ 으로 주어지는 'dimple type'으로 가정하였다. 개발된 프로그램을 모델케이스로 선정된 철근 콘크리트 축대칭 셸이 초기결합을 갖는 경우의 동적 응답 해석에 적용하였다. 수치예에서 돔의 초기결합의 값을 돔 두께의 5%를 기준으로 하여 0.0, -5.0 및 5.0cm 의 3경우로 하였고 철근충비의 값을 0, 3 및 5%로 하였다.

이러한 수치예를 통하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 돔 정부에서의 연직처짐의 동적 응답은 초기결합이 없는 경우 완만한 증가를 나타냈으며 내향 초기결합(작용하중과 반대 방향)을 갖는 경우 비교적 진폭이 크게 나타났다. 이러한 현상은 모든 철근충비에서 유사하였다.

2. 돔과 벽체의 접합부에서의 반경방향 변위의 동적 응답은 내향 초기결합(작용하중과 반대 방

향)을 갖는 경우에 진폭이 가장 크게 나타났고 외향 초기결합(작용하중 방향)을 갖는 경우 가장 작은 진폭을 나타냈다. 또한 내향 초기결합을 갖는 경우 진동주기가 약간 지연되는 경향이 있었다. 이러한 현상은 철근충비가 증가할수록 더욱 현저하였다.

3. 벽체 중앙에서 반경방향 변위의 동적 응답에 대한 초기결합의 영향은 거의 나타나지 않았다. 즉 돔의 초기결합이 벽체의 동적 응답에 미치는 영향은 무시할 수 있다고 판단된다.

4. 축대칭 셸 구조물의 동적 응답에 대한 철근의 영향은 초기결합이 없는 경우 크게 나타났으며 초기결합의 방향(내향 및 외향)에 따른 영향은 큰 차이가 없었다.

## 참 고 문 헌

1. C. Philip Johnson : 'The analysis of thin shell by a finite element procedure', Thesis for Ph. D., University of California, Berkeley, sept., 1967.
2. D. R. J. Owen and E. Hinton : Finite elements in plasticity, 1980.
3. James A. Stricklin and Walter E. Haisler : 'Formulation and solution procedure for nonlinear structural analysis', pergamon, computer & structures, vol. 7, pp. 125-136, 1983.
4. Karan S. Surana : 'Geometrically nonlinear formulation for the axisymmetric transition finite elements', pergamon, computer & structures, vol. 17 no. 2, pp. 243-255, 1983.
5. Kos Surana : '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 : '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, 1971.
7. P. V. Marcal : 'Large deflection analysis of elastic-plastic shells of revolution', AIAA, J. vol. 8 no. 9, pp. 629-636, 1970.
  8. Robert Kao : 'Dynamic buckling of axisymmetric spherical caps with initial imperfections', pergamon, computer & structures, vol. 9, pp. 463-473, 1978.
  9. Robert Kao : 'Nonlinear dynamics buckling of spherical caps with initial imperfections', pergamon, computer & structures, vol.12, pp.49-63, 1980.
  10. R. D. Wood and O. C. Zienkiewicz : 'Geometrically nonlinear finite element analysis of beams, frames, arches and axisymmetric shells', pergamon, computer & structures, vol. 7, pp. 725-735, 1977.
  11. Stanley Klein : '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, 1965.
  12. 조진구 : 철근 콘크리트 축대칭 구조물 해석 모형의 개발, 한국농공학회지 제37권 제2호 pp. 86-94, 1995.
  13. 조진구 : 초기처짐을 갖는 Spherical Shell의 동적 특성에 관한 연구(I), 한국농공학회지 제40권 제3호 pp. 113-121, 1998.
  14. 조진구 : 초기처짐을 갖는 Spherical Shell의 동적 특성에 관한 연구(II), 한국농공학회지 제40권 제5호 pp. 91-99, 1998.
  15. 한국전력공사 기술연구원 : 격납건물 포스트텐션닝 계통의 구조건전성 평가기술 개발, 1989.
  16. 한국전력공사 기술연구원 : 격납건물 포스트텐션닝 계통의 구조건전성 평가기술 개발 (부록), 1989.