

# 탄성지반상에 놓인 철근콘크리트 축대칭 쉘의 정적 및 동적 해석( I )

- 철근 콘크리트 원자로 격납 건물을 중심으로 -

## Static and Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Axisymmetric Shell on an Elastic Foundation

- With Application to the Nuclear Reinforced Concrete Containment Structures -

조       진       구\*  
Cho,     Jin     Goo

### Summary

This is a basic study for the static and dynamic analysis on the elasto-plastic and elasto-viscoplastic of an axi-symmetric shell. The objective of this study was to investigate the mechanical characteristics of a nuclear reinforced concrete containment structure, which was selected as a model, by a numerical analysis using a finite element method. The structure was modeled with discrete ring elements of 8-noded isoparametric element rotating against the symmetrical axis, and the interaction between the foundation and the structure was modeled by Winkler's model. Also, the meridional tendon was modeled with 2-node truss elements, and the hoop tendon was done with point elements in two degrees of freedom. The effect of the tendon was considered without the increasement in total degree of freedom as the stiffness matrix of modeled tendon elements was assembled on the stiffness matrix of ring elements linked with the tendon.

The results obtained from the analysis of an example were summarized as follows :

1. The stresses in the hoop direction on the interior and exterior surfaces of the structure were shown in changes of similar trend, and high stresses appeared on the structure wall
2. The stresses in the meridional direction on the interior and exterior surfaces were

---

\* 전남대학교 농과대학

키워드 : 축대칭, R.C.구조물, 원통형돔, 원자로, 격납건물

shown in changes of different trend. Especially, the stresses at the junctions between the dome and the wall and between the wall and the bottom plate of the structure were very high, compared with those at other parts of the structure.

3. The stress changes in the direction of thickness on the crown of the dome were much linearly distributed. However, as the amount of tendon increased, the stresses in the upper and lower parts of the wall established with the tendon were shown stress concentration.

4. The stress changes in the direction of thickness on the center of the structure wall was linearly distributed in the all cases, and special stress change due to the use of the tendon was not shown.

## I. 서 론

축대칭 셸 구조는 평면곡선을 동일 평면내에 있는 회전축 주위로 회전시킴으로서 얻어지는 회전곡면을 중앙면으로하는 곡면판 구조이다. 축대칭 하중을 받는 회전체의 해석문제는 2차원 평면응력 문제로 취급할 수 있다.<sup>5,10)</sup>

예를 들면 저수지의 취수탑이나 정유공장을 비롯한 대규모 공장에 건설되는 액체저장탱크 또는 원자력 발전소의 격납건물등은 모두 평판지붕 또는 원형돔을 갖는 원통형 셸의 형태 즉 축대칭 형태가 된다.<sup>11)</sup> 그런데 이러한 대형 구조물들은 사고시의 재해로부터 인명과 재산을 보호하기 위한 안전성이 확보되어야 하고 이르기 위해서는 정하중은 물론이러니와 동하중에 대해서도 안전성이 보장되어야한다. 얇은 축대칭 셸 구조에서 막응력만 문제삼는 경우에는 일반적인 셸 구조와 마찬가지로 정력학적으로 구할 수 있다. 그러나, 액체 저장탱크나 원자로 격납건물 등의 축벽과 같이 원형돔이나 저판에 의하여 반경방향의 변형이 구속되어 있을 때는 경계면에서 응력교란현상이 발생되고 이러한 교란응력은 막응력 이론으로는 구할 수 없다.

특히 원자로 격납 건물은 원자력 발전소의 정상 운전 상태에서 핵분열에 의해 생긴 방사

능 물질의 유출방지 방사능의 생물학적 차폐 및 외부의 위협으로 부터의 원자로 및 내부 설비를 보호하는 중요한 구조물이다. 이러한 격납건물은 건설 재료에 따라 강재, 철근 콘크리트 및 P.S 콘크리트 건물로 크게 나누어 진다.

격납 건물은 구조적으로 사고시에 내압을 받는 압력 용기로서 1960년대 말까지는 강재 격납 건물이 주로 채택되었으나 건설비가 싸고 건설 공기가 짧고 원자로 구조물의 내부 설비의 시설과 기기 설치의 조기 착수가 가능하며 내압과 온도하중 이외에 배관 및 기기의 지지부 역할을 할 수 있는 잇점 등으로 그후 철근 또는 P.S 콘크리트 격납 건물의 건설이 주종을 이루게 되었다.<sup>16,17)</sup>

철근 콘크리트 격납 건물은 hemispherical dome을 갖는 경우와 shallow dome을 갖는 경우가 있다. 이러한 격납 건물 설계시 고려되는 하중으로는 사하중, 활하중, 지진하중, 냉각제 상실 사고시에 발생하는 내부압력, 운전 및 사고시의 온도 하중 등이 있다. 이러한 하중에 대한 합리적인 고려를 위하여 여러 가지 구조 해석 기법이 연구되어 왔다.<sup>11)</sup>

ASME Section III, Div. 2에 의하면 격납 건물의 해석은 선형 탄성 해석이 가능하나 콘크리트 균열로 인한 단면 강성도 변화가 고려

되어야 한다고 하였다.<sup>16,17)</sup>

일반적으로 격납 건물의 구조 해석은 2가지 방법—얇은 셸이론과 유한 요소법—에 의해서 이루어진다.<sup>16)</sup> 물론 이러한 구조물의 재료의 거동은 응력이력 및 현재의 응력상태등 여러 가지 인자들의 영향을 받기 때문에 매우 복잡하여 실제 상태를 명확하게 모델링 하는 것은 거의 불가능하다. 그러나 일반적으로 이들의 거동은 선형탄성모델, 비선형탄성모델, 탄소성 모델 및 탄·점소성모델 등과 같은 수학적 모델로 모델링하여 해결하고 있다.

본 연구의 목적은 축대칭 셸의 정적 및 동적 해석을 위한 기초적 연구로서 여기에서는 모델케이스로 선정된 철근콘크리트 원자로 격납건물의 선형해석을 통하여 그의 역학적 특성을 규명하고자 한다.

이를 위해서 해석방법으로는 유한요소법을 사용하였으며 이때 구조체는 8-절점 등매개변수 요소를 대칭축에 관해서 회전시킨 링 요소로서 이산화되었으며 Winkler모델로서 지반-구조물 사이의 상호작용을 모델링하였다. 또한 자오선방향 철근은 2-절점 트러스 요소로, 원주방향 철근은 2-자유도의 점요소로 모델링한다.

## II. 해석방법

본 연구에서 채택된 유한요소 해석 방법은 논문(14)와 매우 유사 하므로 여기서는 간단히 요점만을 기술하기로 한다.

### 1. 축대칭 콘크리트 요소

원자로 격납건물의 해석에 있어서 콘크리트는 Fig. 1과 같은 8-절점 등매개변수 요소를 대칭되는 축에 대해서 회전시킨 Fig. 2와 같은 링 요소를 채용하였다.

이러한 8-절점 등매개변수 요소에 대한 형

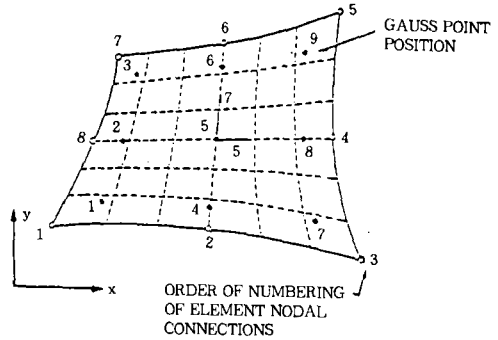


Fig. 1. Two dimensional parabolic isoparametric element

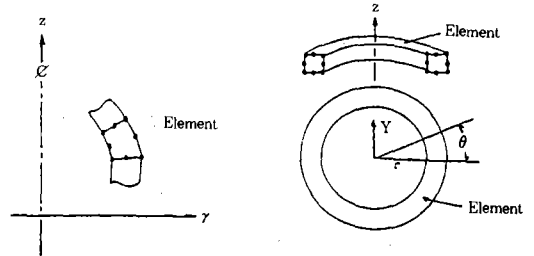


Fig. 2. Typical 8-node isoparametric ring element

상함수는 다음과 같이 주어진다.

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

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

### 2. Winkler 접합요소

원자로 격납건물의 저판과 지반과의 상호작용을 고려하기 위하여 Fig. 3에 보인 것과 같은 접합요소를 생각한다. 이 접합요소는 i, j 및 k의 3절점 원통형요소이다. 3절원 i, j 및 k에 대하여 각각 다음과 같은 형상함수를 가정한다.

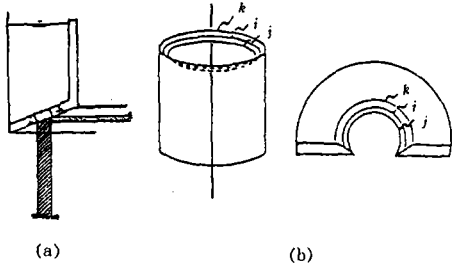


Fig. 3. Winkler axisymmetric joint element

$$N_i(\xi) = 1/2 \xi(\xi-1)$$

$$N_j(\xi) = (1+\xi)(1-\xi) \dots\dots\dots (2)$$

$$N_k(\xi) = 1/2 \xi(\xi+1)$$

지반과 구조물 사이의 상대운동은 (i)면에 평행한 방향의 운동(지반과 구조물간의 활동) (ii) 면에 수직한 방향의 운동(박리 및 접촉)의 2성분으로 분리된다. 이러한 운동성분에 대응하여서 접합요소의 전단방향의 강성  $k_s$  수직방향의 강성  $k_n$ 으로 되는 선형 스프링계수에 의해서 접합요소의 구성관계가 규정된다.

기초저면의 변형이 그 점에 작용하는 하중에만 독립적으로 비례한다고 가정하면 기초저면에 작용하는 하중 {f}와 변형 {δ} 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$\{f\} = [K_G] \{\delta\} \dots\dots\dots (3)$$

여기서,

{f} : 등가 절점력

{δ} : 절점변위

$$[K_G] = 2\pi \int [N_i]^T [k] [N_i] r dr \dots (4)$$

; 접합요소 강도행렬

$$[k] = \begin{bmatrix} k_s \\ k_n \end{bmatrix}$$

여기서  $k_s$  : 전단방향 강성

$k_n$  : 수직방향 강성

### 3. 철근요소

#### 가. 자오선 방향 철근 요소

축대칭 회전체에서 자오선방향 철근요소는 Fig. 4와 같이 절점 i, j를 가지며 Fig. 5와 같이 축대칭 배치를 전제로 취급된다.

이와 같은 자오선방향 철근요소의 강도행렬은 다음과 같다.

$$[K_\ell] = \frac{Ea_e}{\ell} \begin{bmatrix} \cos^2\varphi \cos\varphi \sin\varphi & -\cos^2\varphi & -\cos\varphi \sin\varphi \\ \sin^2\varphi & -\cos\varphi \sin^2\varphi & -\sin^2\varphi \\ sym. & \cos^2\varphi & \cos\varphi \sin\varphi \\ & & \sin^2\varphi \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

여기서

$\ell$  : 부재길이

$a_e$  : 단면적

$E$  : 탄성계수

$\varphi$  : 철근이 기준 좌표축과 이루는 각

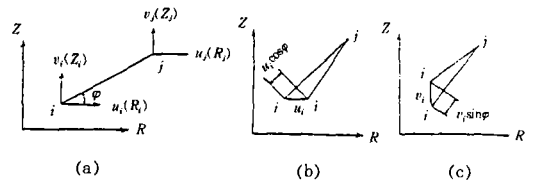


Fig. 4. Stresses and strains of meridional tendon element

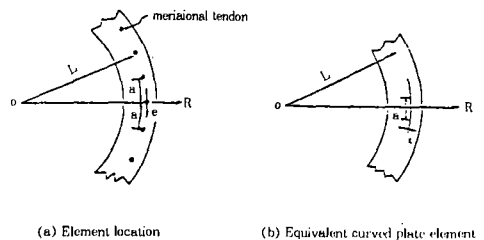


Fig. 5. Meridional tendon element

나. 원주방향 철근 요소

원주방향 철근 요소는 Fig. 6과 같이 축대 칭 2차원 평면에서는 점 요소로 생각할 수 있으며 강도행렬  $[K_h]$ 는 다음과 같다.

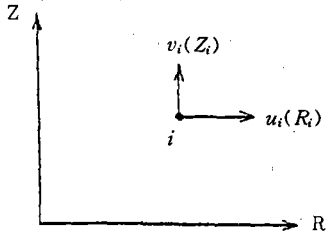


Fig. 6. Stresses and strains of hoop tendon element

$$[K_h] = \frac{2\pi a_h E}{r_i} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(6)$$

여기서  $a_h$ : 원주방향 철근 단면적  
 $E$ : 탄성계수  
 $r_i$ : 절점의 반경방향 좌표

4. 강도 행렬의 중첩

철근 콘크리트 요소의 강도행렬은 위에서 구해진 8-절점 콘크리트 요소, 접합요소 및 철근 요소의 강도행렬을 중첩하므로서 얻어질 수 있다.

$$\text{즉 } [K] = [K_C] + [K_G] + [K_h] + [K_\ell] \dots\dots\dots(7)$$

여기서,  $[K_C]$ ; 8-절점 콘크리트 요소 강도행렬

5. 프로그램의 검증

본 논문에서 개발된 프로그램을 검증하기 위하여 철근콘크리트 원자로 격납 건물-원자력 발전소 건물-의 해석에 적용하였으며 격납 건물의 기하학적 형태 및 치수는 Fig. 7-a와 같고 요소 분할은 Fig. 7-b와 같다.

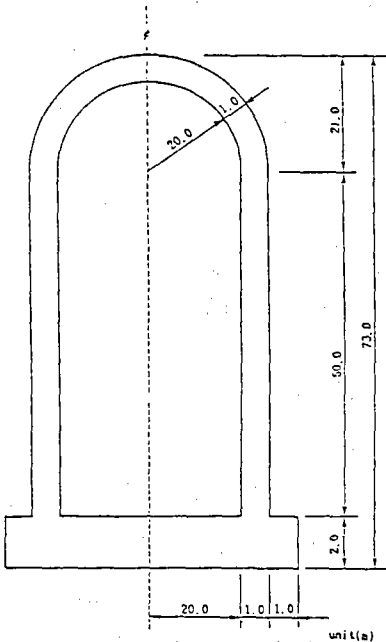


Fig. 7-a. Model structures for example

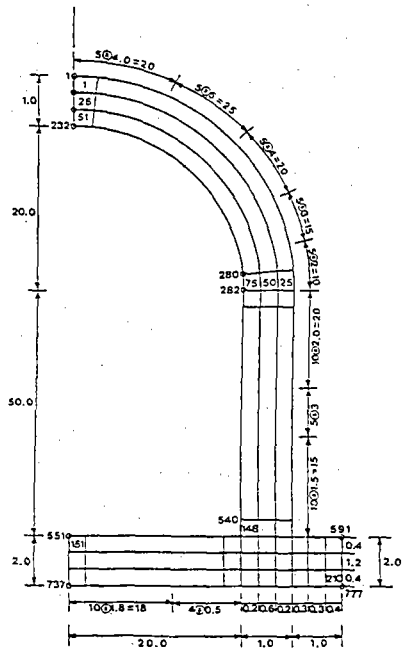


Fig. 7-b. Mesh generation for example

Fig. 7-a 와 같은 구조물의 해석시 사용된 재료성질 및 작용내압은 Table-1과 같다.

**Table-1. Material properties and internal pressure**

콘크리트	탄성 계수	$E_c=2,600,000t/m^2$
	포아손 비	$\nu=0.167$
	자 중	$w=2.5t/m^3$
작 용 내 압		$p=200t/m \cdot rad$

해석결과를 문헌(16, 17)의 경우와 비교하여 보면 Table-2 및 Table-3과 같다.

**Table-2. Radial deflection in model structures**

Height from bottom (m)	present study	한전기술연구원 보고서		
		theory	SAPV-2	ADINA
7.0	0.0234	0.0213	0.0226	0.0214
6.0	0.0194	0.0169	0.0187	0.0178
5.0	0.0145	0.0118	0.0139	0.0133
4.0	0.0090	0.0065	0.0086	0.0084
3.5	0.0064	0.0040	0.0060	0.0057
3.0	0.0039	0.0020	0.0036	0.0036
2.0	0.0005	0.0005	0.0017	0.0017

unit: m

**Table-3. Hoop-stresses in model structures**

Height from bottom (m)	present study	한전기술연구원 보고서		
		theory	SAPV-2	ADINA
26.00	4044	3995	4041	4045
24.00	3972	3994	4040	4057
6.50	2849	2714	2863	2711
5.50	2350	2125	2332	2231
4.50	1747	1492	1750	1687
3.75	1309	1050	1324	1292
2.75	871	640	893	891

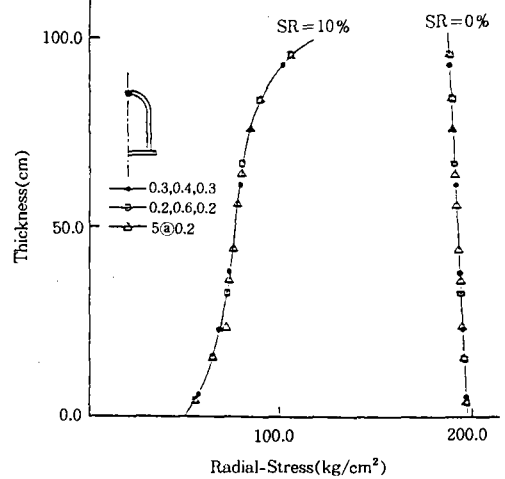
unit : t/m<sup>2</sup>

### III. 해석에 및 고찰

선정된 모델 구조물은 Fig. 7-a와 같으며 요소 분할은 Fig. 7-b와 같이 하였다. 이때 철근비는 0, 1, 2, 3, 4, 5, 8 및 10%로 하였으며 여기서 철근비 0%는 철근의 영향을 무시하고 콘크리트 균질재료로 가정한 경우를 의미한다.

두께방향으로의 적절한 요소 분할수를 알아보기 위하여 요소 분할 방법을 3등분 5등분하여 그 결과를 비교하면 Fig. 8과 같다. 2등분의 경우는 철근 덮개를 조절하기 어려워 제외시켰다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 3등분의 경우와 5등분의 경우 결과는 완전히 일치 하였다. 원주방향 응력 및 자오선 방향 응력의 경우도 동일 하였으므로 생략하였다.



**Fig. 8. Distribution of radial stress along the thickness at crown for various mesh division**

먼저 격납 건물의 전체적인 역학적 특성을 알아보기 위하여 원주방향 응력 및 자오선 방향 응력의 변화를 그림으로 나타내었다.

콘크리트의 최대축 및 최외측 Gaussian

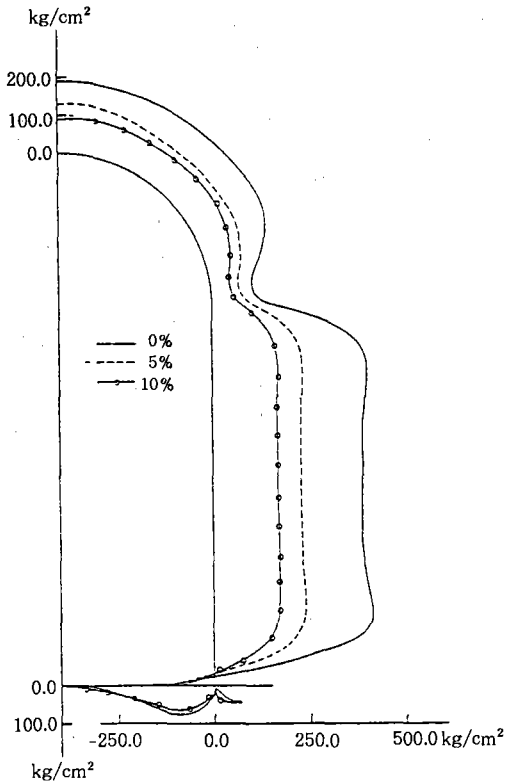


Fig. 9-a. Distribution of hoop-stress at exterior surface for various steel-ratio

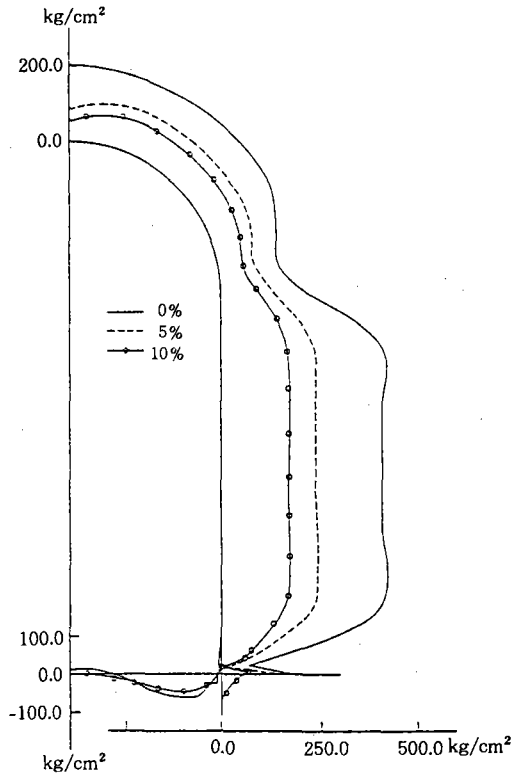


Fig. 9-b. Distribution of hoop-stress at interior surface for various steel-ratio

Point(G.P.)에서의 응력의 변화는 Fig. 9와 같으며 양쪽 모두 벽체에서 큰 응력이 발생되고 있었으며 양쪽이 유사한 변화양상을 보였다.

자오선 방향 응력의 변화는 Fig. 10과 같으며 내측 및 외측에서의 응력의 변화는 상당히 다른 양상을 보였다. 외측에서의 응력은 돔과 벽체의 접합부에서는 거의 응력이 없었으며 벽체와 저판과의 접합부에서는 큰 압축성 응력이 발생되는데 반해서 내측에서의 응력은 돔과 벽체의 접합부 및 벽체와 저판과의 접합부에 대단히 큰 인장응력이 유발되었다.

두께방향으로의 응력의 변화를 보면 다음과 같다.

먼저 돔의 정점에서의 응력의 두께방향 변

화는 Fig. 11과 같다.

균질 재료(철근비 0%)인 경우 완전히 선형의 분포를 하고 있지만 철근비가 커질수록 곡선의 분포를 나타내고 특히 상·하부 즉 철근층이 있는 곳에서의 응력 분포는 대단히 급격하게 변화하는 것을 알 수 있으며 이는 철근으로 인해서 응력이 집중되고 있음을 알 수 있다.

벽체 중앙 단면에서의 두께 방향 응력 변화는 Fig. 12와 같으며 모든 경우 선형의 분포를 하고 있으며 철근비가 클수록 두께방향의 변화는 적게 일어남을 알 수 있다. 이는 돔의 정부에서의 변화와는 상이한 현상이다.

철근비에 따른 원주 방향 응력의 변화는

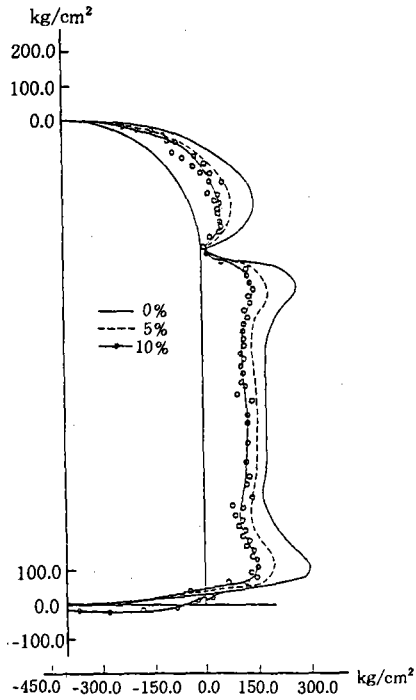


Fig. 10-a. Distribution of meridional-stress at exterior surface for various steel-ratio

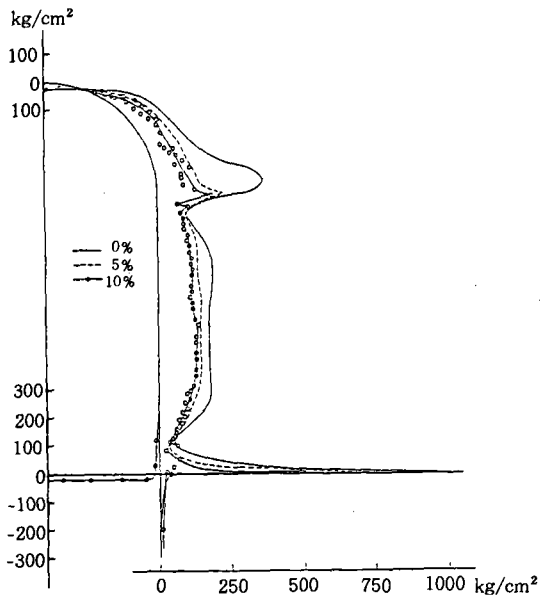


Fig. 10-b. Distribution of meridional-stress at interior surface for various steel-ratio

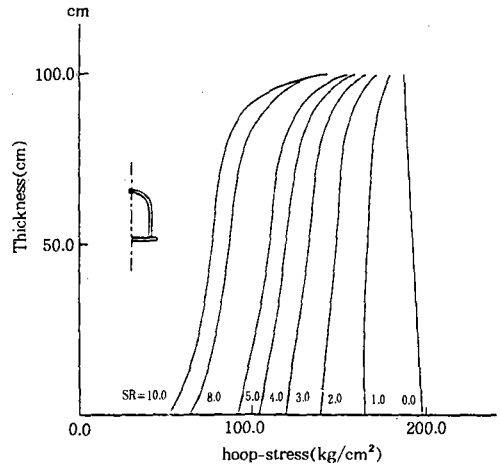


Fig. 11. Distribution of hoop-stress along the thickness at crown for various steel-ratio

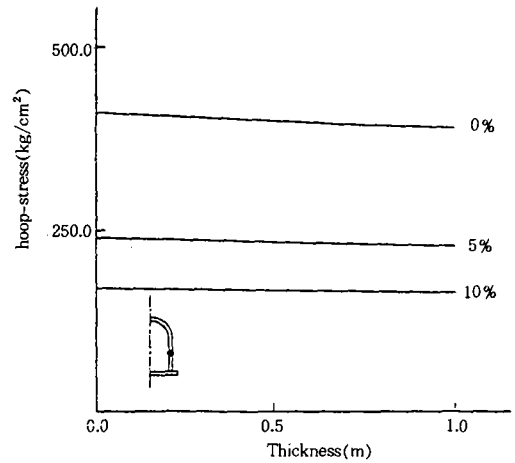


Fig. 12. Distribution of hoop-stress along the thickness at mid-wall for various steel-ratio

Fig. 13과 같다.

철근비의 증가에 따라 외측 보다는 내측에서 응력 감소가 현저하게 일어나는 것은 동일한 철근비일 경우 동일한 철근량을 배근하게 되므로 내측의 원주방향 철근 간격이 작기 때문으로 판단된다.



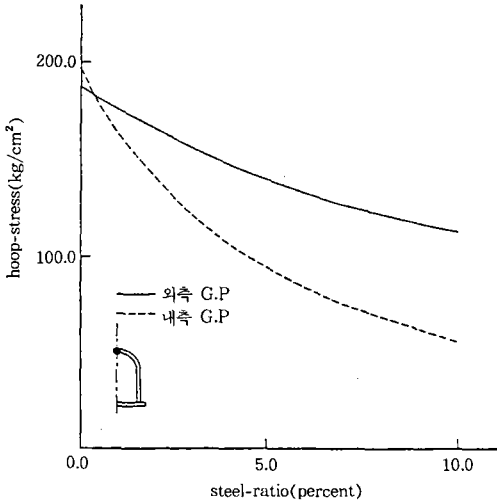


Fig. 13. Hoop stress variation at interior and exterior surface of crown

#### IV. 결 론

본 연구는 축대칭 쉘의 탄소성 및 탄점소성의 정적 및 동적해석을 위한 기초적 연구로서 모델적용대상으로 선정된 축대칭 쉘 특히 철근콘크리트 원자로 격납건물의 선형해석을 통하여 그의 역학적 특성을 규명한 것이다.

이를 위해서 해석방법으로는 유한요소법을 사용하였으며 이때 구조체는 8-절점 등매개변수 요소를 대칭축에 관해서 회전시킨 링 요소로서 이산화되었으며 Winkler 모델로서 지반-구조물 사이의 상호작용을 모델링하였다. 또한 자오선방향 철근은 2-절점 트러스 요소로 원주방향 철근은 2-자유도의 점요소로 모델링하였다.

해석예를 통하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 원주방향 응력은 격납 건물의 최대축 및 최외측에서 유사한 변화 양상을 보였으며 벽체에서 큰 응력이 발생되었다.

2. 자오선 방향 응력은 격납 건물의 최대축 및 최외측에서의 변화 양상이 서로 상이 하였

다. 특히 돔과 벽체 및 벽체와 저판의 접합부에서의 응력의 값의 차이가 현저하였다.

3. 돔 정부에서의 두께방향 응력 변화는 철근을 고려하지 않는 경우 완전한 선형 분포를 이루었지만 철근량이 많아질수록 곡선 분포를 이루었으며 특히 철근이 배근된 상·하부에서의 응력은 큰 집중 현상을 나타냈다.

4. 벽체 중앙에서의 두께 방향의 응력 변화는 모든 경우 선형 분포를 이루었으며 철근 사용에 따른 특별한 차이는 찾을 수 없었다.

예제의 제시는 되어 있지 않지만 지붕은 원형돔의 경우뿐만 아니라 임의의 경사각을 갖는 경사슬래브의 경우도 처리 가능하며 P.C 구조물의 경우에도 아무런 수정 없이 적용이 가능하다

본 연구는 1995년도 교육부 지원 한국 학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구 조성비에 의해서 수행되었으며 이번엔 발표된 부분은 연구과제 수행을 위한 기초 연구 결과임을 밝히며 연구비를 지원하여 준 재단 당국에 감사를 드린다.

#### 참 고 문 헌

1. C. T. F. Ross : Finite element programs for axisymmetric problems in engineering, John Wiley & Sons, 1984
2. D. P. Mondkar and G. H. Powell : Evaluation of solution schemes for nonlinear structures, computers and structures Vol. 9 pp. 223-236, 1978
3. D. R. J. Owen and E. Hinton : Finite elements in plasticity, 1980
4. Nagarajan S. and Popov E. P. : Elastic-plastic dynamic analysis of axisymmetric solid, Computers and structures, Vol. 4 pp. 1117- 1134, 1974

5. O. C. Zienkiewicz : The finite element method(3/e) pp. 450-606, 1977
6. R. Bukowski and W. Wojewodzki : Dynamic buckling of Visco-plastic spherical shell, Int. J. Solids structures Vol. 20 No. 8, pp. 761- 776, 1984
7. Sargis S. Safarian and Ernest C. Harris : Design and Construction of silos and bunkers, VAN NOSTRAND Reinhold Company, 1985
8. 山田嘉昭 : 塑性·粘彈性, 培風館, 1980
9. 小堀爲 雄, 吉田 博 : 有限要素法による構造解析プログラム, 丸喜株式會社, 昭和55年
10. 송유진 : 탄성지반상의 축대칭프리스트레스트 콘크리트 탱크해석에 관한 연구, 부산대학교 대학원 박사학위청구논문, 1978
11. 오병환 이명규 : 온도 및 내압을 받는 원자로 철근 콘크리트 격납구조물의 비선형 해석, 대한 토목학회 논문집, Vol. 14 No. 3, pp. 403-414 1994
12. 정창화 : 철근요소를 고려한 축대칭 콘크리트 셸의 유한요소해석, 부산대학교 산업대학원 석사학위청구논문, 1988
13. 조진구·조현영 : 지반과 구조물사이의 상호작용을 고려한 농업용 사이로의 해석에 관한 연구 (I - IV), 한국농공학회지
14. 조진구 : 철근 콘크리트 축대칭 구조물 해석 모형의 개발, 한국농공학회지 Vol. 37 No. 3 pp. 86-94
15. 전북대학교 부설 농업개발연구소 : 농업토목설계를 위한 유한요소해석시스템 개발 (VI) 농어촌진흥공사, 1990
16. 한국전력공사 기술연구원 : 격납건물 포스트텐션닝 계통의 구조건전성 평가기술 개발, 1989
17. 한국전력공사 기술연구원 : 격납건물 포스트텐션닝 계통의 구조건전성 평가기술 개발(부록), 1989

(접수일자 : 1996년 3월 22일)