

셀형 구조물의 최적곡면 탐색에 관한 연구

A Study on Optimum Shape Finding of Shell-Typed Structures

김 승 덕*
Kim, Seung-Deog

이 신 우**
Lee, Shin-Woo

요 약

셀형 구조물은 외력에 대해 효과적으로 저항할 수 있어, 두께를 얇게하면서 대공간 구조물을 만들 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점은 구조형태에 크게 의존한다. 그러므로 많은 설계자들은 최적 형태를 설계에 반영하고자 하지만, 이는 간단치 않다. 지금까지 보다 최적의 형태를 얻기 위한 많은 기법들이 발표되어 왔고, 이들은 각각 장단점을 나타낸다.

본 논문에서는 최적의 곡면을 얻기 위해 기하학적 비선형을 고려한 유한요소법을 이용한 비교적 간단한 방법을 제안한다. 이러한 방법을 이용하여 다양한 셀형 곡면에 적용하여 최적곡면을 얻고, 이를 비교한다.

Abstract

Shell-typed structures can make resistance to external forces efficiently, and have merits to construct the large-span structures with thin thickness. This merits are highly depending on the shape of structure. Therefore designers want to the optimum shape, but it is not so easy to find the shape. So far there are many schemes to find more optimum shape, and those methods have their own characteristics.

In this study, the authors introduce a relatively easy approach to find optimum shape by the finite element method considering geometric nonlinearity. We are finding the optimum shape of a shell-typed structure using line elements, and compared the results by various analytic models.

키워드 : 셀 구조물, 기하학적 비선형, 막이론, 돔 구조물, 최적형상

Keywords : Shell structure, Geometric Nonlinearity, Membrane theory, Dome structure, Optimum Shape

1. 서 론

대공간 구조물을 만들기 위해서는 역학적으로 휨 모멘트와 전단력 등의 휨 부재의 사용을 가급적 피하고 축력에 의한 구조부재를 적극적으로 사용하는 것이 유리하다. 더 나아가 축력을 받는 부재의 경우 압축력에 대해 효과적으로 저항하기 위해서는 좌굴 문제를 고려하여야 하므로 인장부재를 적극적으로 이용하면 구조 및 시공성이 우수한 보다 경제적인 대공간 구조물을 만들 수 있다³⁾.

또한, 곡면 구조 형태인 셀 구조의 기본적인 구조

저항 메커니즘은 구조물의 자체의 곡률을 이용하여 면외방향으로 작용하는 외력을 주로 면내력으로 저항할 수 있게 한 형태저항형 구조물로서 매우 우수한 역학적 특성을 가지고 있다. 그러나 하중 상태에 따라 안정 상태에서 불안정 상태, 또는 불안정 상태에서 안정 상태로 변화함으로써 불안정 현상으로 인한 파괴 메커니즘을 파악하고 이를 설계에 반영하는 것은 매우 중요하다⁴⁾.

휨, 구조안정 문제를 최대한 해결할 수 있는 곡면을 구하는 문제는 축력이 주로 구조저항할 수 있는 최적의 곡면을 구하는 문제로 오래전부터 많은 연구자에 의해 수행되어 왔다. 각각의 방법들은 다양한 기법을 이용하여 나름의 장단점을 들어내며 발전을 해 왔으며, 경우에 따라서는 복잡한 수학적 기초를 이용해야 하는 어려움도 있다.

* 정회원 · 세명대학교 건축공학과 부교수, 공학박사
Tel : 043-649-1326 Fax : 043-649-1326
E-mail : seungdeog@yahoo.ca

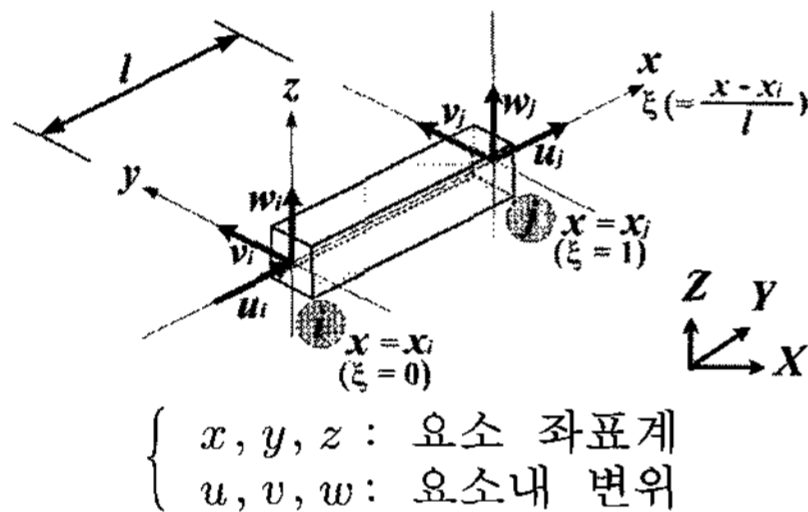
** 정회원 · 세명대학교 건축공학과 공학석사

본 논문에서는 최적의 곡면을 얻기 위해 비교적 간단한 방법을 제안하고자 한다. 즉 기하학적 비선형을 고려한 유한요소법을 이용하여, 면부재를 선부재로 치환하는 선재치환기법을 사용한다. 이러한 방법을 이용하여 다양한 곡면에 적용하여 이에 대한 가능성을 시험해 본다.

2. 비선형 유한요소의 정식화

2.1 Cable/Truss 요소의 정식화

Cable/Truss 요소의 요소 좌표계 및 전체 좌표계를 <그림 1>과 같이 정의한다.



<그림 1> Cable/Truss 요소의 절점자유도와 좌표계

현재의 상태를 초기 상태로 가정하고, 현 상태에서의 증분에 관한 가상일을 고려하면, 다음과 같은 가상일의 방정식을 구할 수 있다⁸⁾.

$$(f^{(0)} + f)^T = Al \{ (\sigma_x^{(0)} + EA_1 d + \frac{1}{2} Ed^T B^T B d) \times (A_1 + d^T B^T B) \} \quad (1)$$

여기서 윗첨자(0)는 증분과정에서 현재시점의 양을 나타낸다. 고차항의 생략, 수치 해석의 오차 등으로 인하여 불평형력(residual force)이 발생하며, 이러한 불평형력 r 을 식(1)의 오른쪽 제 1항으로부터 다음과 같이 정의한다.

$$r = Al A_1^T \sigma_x^{(0)} - f^{(0)} \quad (2)$$

위 식을 이용하여 증분 방정식을 구하면 다음과 같다.

$$f - r = Al E (A_1^T A_1) d + Al (\sigma_x^{(0)} B^T B) d \quad (3)$$

$$= (k_E + k_G) d$$

여기서,

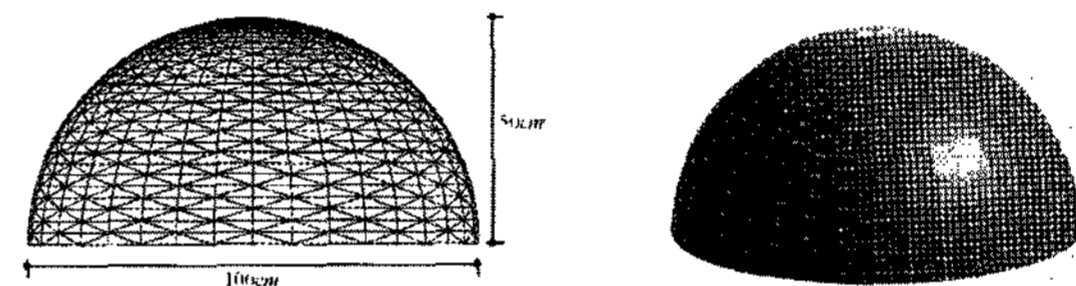
$k_E = Al E (A_1^T A_1)$: 요소의 탄성강성행렬

$k_G = Al (\sigma_x^{(0)} B^T B)$: 요소의 기하강성행렬

3. 최적 현수곡면 탐색

3.1 반구형 돔의 거동특성

최적 현수곡면을 탐색하기 위해 우선 비교대상이 되는 반구곡면 형태의 돔을 해석한다. 해석모델은 <그림 2>와 <그림 3>과 같으며, 모델의 요소는 얇은 PLATE이며 삼각요소를 사용하고, 해석 조건은 <표 1>과 같다.



<그림 2> 반구형 돔의 정면도 <그림 3> 반구형 돔의 입체도

<표 1> 돔의 해석조건

해석조건	MIDAS STEEL KS(RC) SM490
탄성계수	$E = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
두께	$d = 0.1 \text{ cm}$
밀도	$\rho = 0.00785 \text{ kgf/cm}^3$
포아송비	$\nu = 0.3$
하중조건	수직하중 $F = -0.015 \text{ kgf/cm}^2$

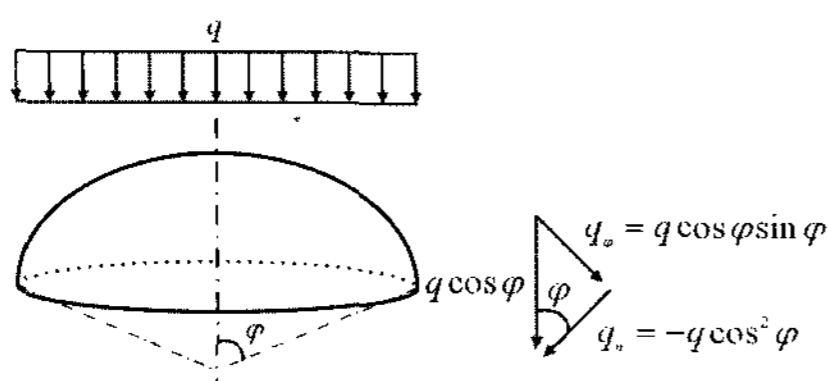
지지부분의 경계조건은 DX, DY, DZ가 고정이며 나머지 절점의 모든 경계조건은 고정하지 않고, 수직하중의 수치는 가상 적설하중으로써, 50cm 적설량의 최대 하중이다.

반구형 돔의 응력상태를 알아보기 전에 먼저 막이론에 의한 이론식을 검토해 본다.

셸에는 면내응력(N_1, N_2, N_{12})과 휨응력($M_1, M_2, M_{12}, Q_1, Q_2$)이 생긴다. 어떤 하중조건 및 경계조건하에서는 막응력 상태가 존재하고, 일반적인 셸에 있어서, “휨응력의 하중부담 << 면내응력의 하중부담” 이라

는 조건이 근사적으로 성립하고, 이러한 것이 셀의 특징이다.

막이론은 셀의 근사적 특징인 $M \approx 0, Q \approx 0$ 으로 하는 가정으로 시작한다⁵⁾.



<그림 4> 등분포하중을 받는 반구면

<그림 4>는 등분포 하중에 의한 막응력을 예제로 하는 모델이다. 단위 면적당 하중을 q 라 하고, 셀면에 있어서 단위 면적당 하중은 $q \cos \varphi$ 가 되므로

$$q_\varphi = q \cos \varphi \sin \varphi \quad (4)$$

$$q_\theta = -q \cos^2 \varphi \quad (5)$$

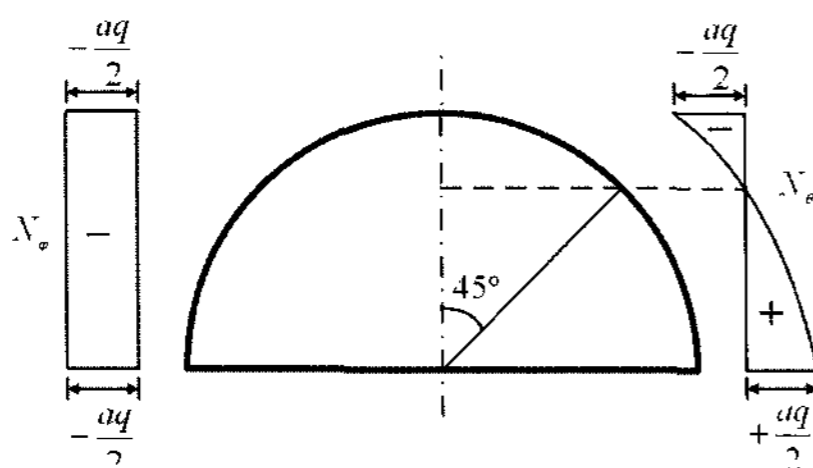
따라서,

$$N_\varphi = -\frac{1}{a \sin^2 \varphi} \int_0^\varphi a^2 \sin \varphi (q \cos \varphi \sin^2 \varphi + q \cos^3 \varphi) \quad (6)$$

$$= -\frac{1}{2} a q$$

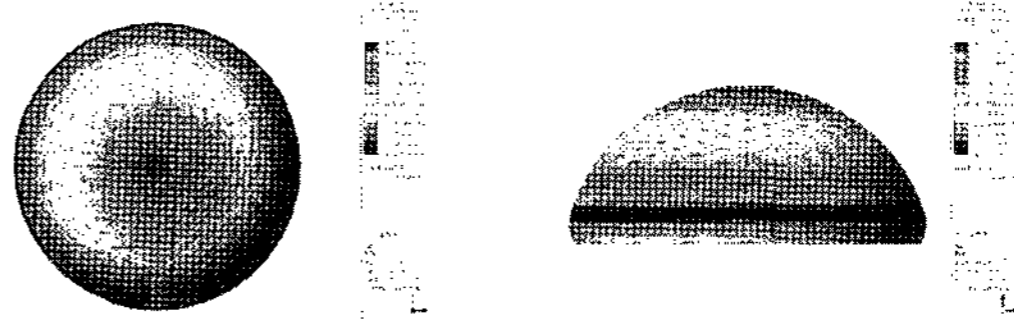
$$N_\theta = -a q \cos^2 \varphi + \frac{1}{2} a q = -\frac{a q}{2} \cos 2\varphi \quad (7)$$

$N_\theta = 0$ 가 되는 φ 의 값은 $\cos 2\varphi = 0$ 으로부터 $\varphi = 45^\circ$ 가 된다.



<그림 5> 막이론에 의한 등분포하중을 받는 반구면의 응력분포도

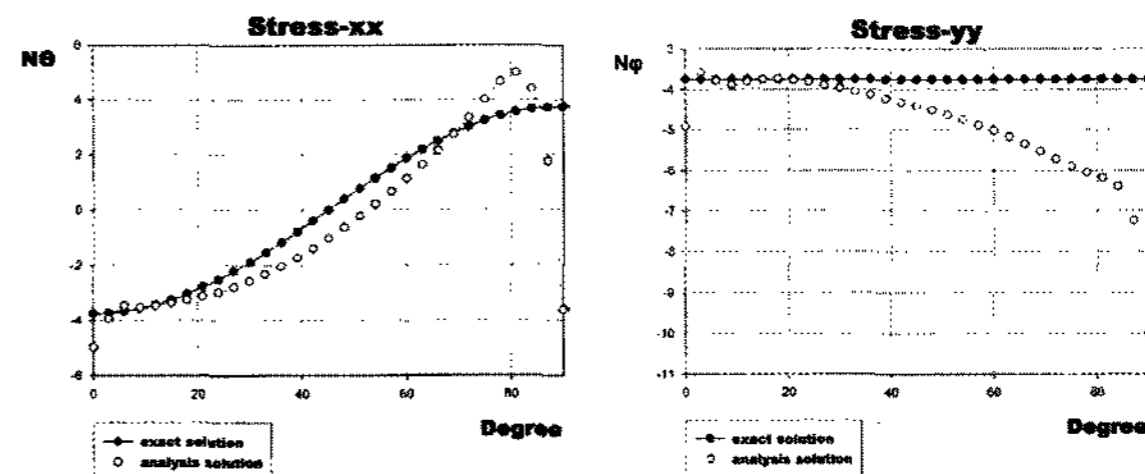
위와 같은 <그림 5>의 응력을 기준으로, 반구형 돔을 해석하여 비교해 본다.



<그림 6> 반구형 돔의 응력 <그림 7> 반구형 돔의 응력 N_θ 평면도 <그림 7> 반구형 돔의 응력 N_θ 정면도

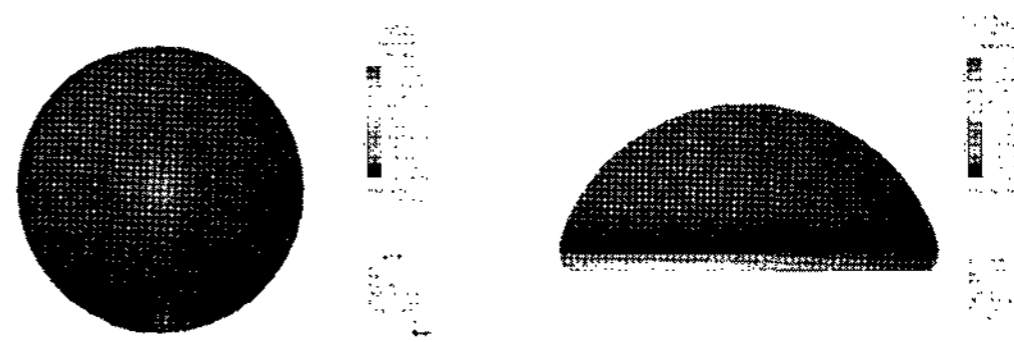


<그림 8> 반구형 돔의 응력 <그림 9> 반구형 돔의 응력 N_φ 평면도 <그림 9> 반구형 돔의 응력 N_φ 정면도



<그림 10> 반구형 돔 N_θ 비교 <그림 11> 반구형 돔 N_φ 비교

<그림 6>~<그림 9>는 반구형 돔의 응력 분포를 나타내며, <그림 10>과 <그림 11>은 막이론에 의한 이론치와 해석결과를 비교한 그래프이다. 해석결과, 돔의 하부에서 응력이 이론식보다 더 증가하고 $\varphi = 81^\circ$ 부분에서 지지부분까지 급격히 감소하는 양상을 이고, N_φ 는 돔의 최상부에서 하부로 내려오며 이론식과는 다르게 계속 증가하는 양상을 보인다. 이는 하중의 전달이 면내력 뿐만 아니라 휨에 대해서도 이루어지기 때문이다.

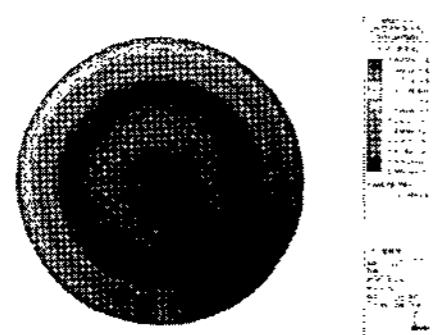


<그림 12> 반구형 돔의 M_x 평면도 <그림 13> 반구형 돔의 M_x 정면도

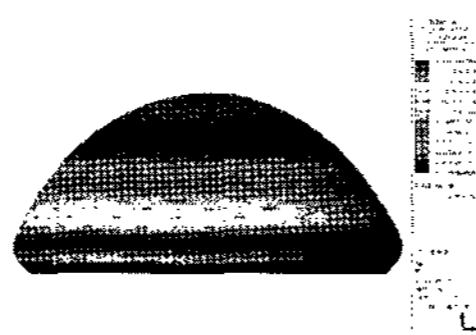
<그림 12>와 <그림 13>은 반구형 돔의 모멘트를 나타내며, 반구형 돔 최상부에서 최대값을 나타낸다.

다. 최하부의 모멘트는 최상부의 국부적 모멘트발생량보다 적으며, (-)방향의 최대 모멘트는 (+)면외방향으로의 변위가 가장 큰 요소 부근에서 보인다.

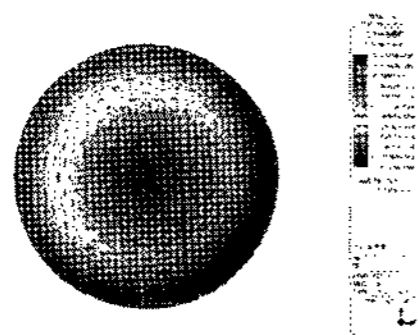
<그림 14>~<그림 18>은 반구형 돔의 변위상태를 나타내며, 기본적으로 전체의 변위가 미소하기 때문에 그림에서 표현하는 변형은 scale factor를 이용하여 크게 확대하여 나타낸다. Dxy 변위 위선방향 즉 Hoop방향의 변위를 말하며, 전체적으로 최상부로부터 하부로 내려갈수록 변위가 커지고, Hoop방향으로 (+)방향의 변위를 갖는다. Dz 변위는 수직 변위이며, 최상부가 가장 큰 변위를 나타내고 하부로 갈수록 변위는 작아진다.



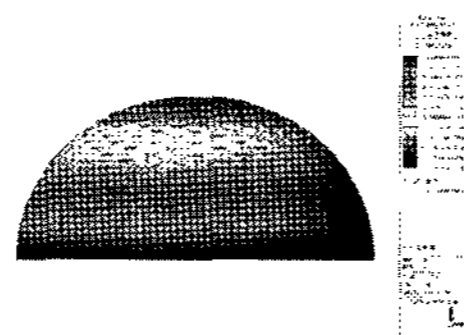
<그림 14> 반구형 돔의 변위 Dxy의 평면도



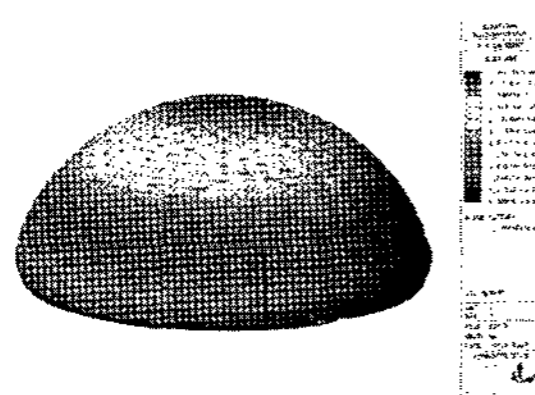
<그림 15> 반구형 돔의 변위 Dxy의 정면도



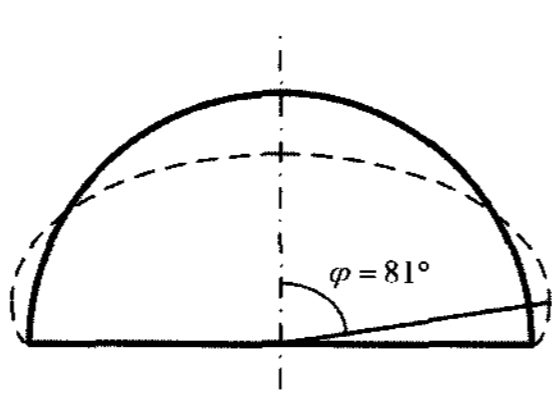
<그림 16> 반구형 돔의 변위 Dz의 평면도



<그림 17> 반구형 돔의 변위 Dz의 정면도



<그림 18> 반구형 돔의 변위 Dxyz의 입체도



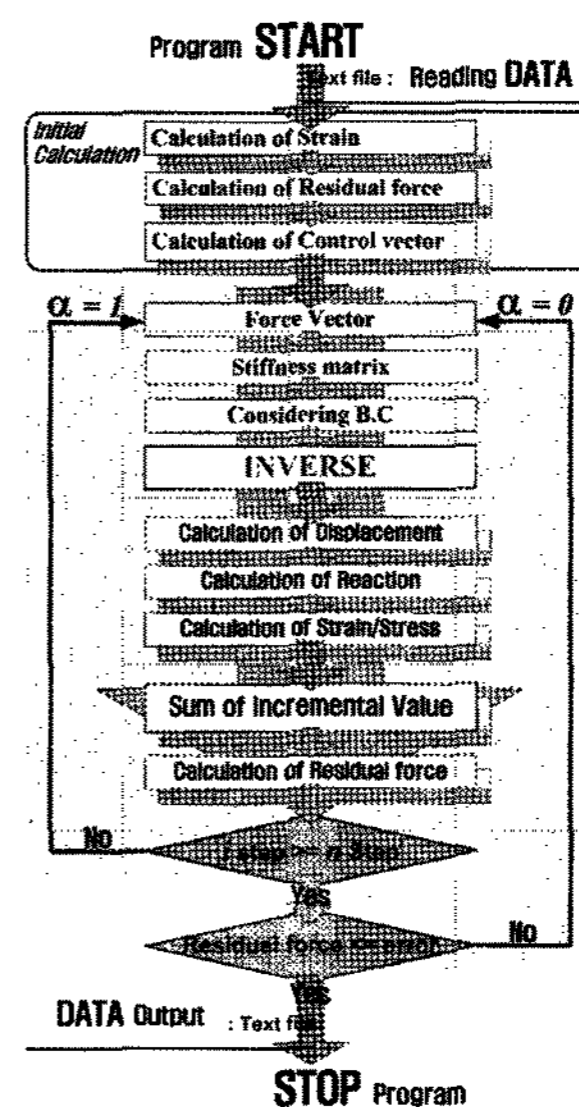
<그림 19> 반구형 돔의 거동

<그림 18>의 Dxyz는 전체적으로 변형상태를 살펴보는 그림이며, 전체적 변형상태를 간단히 표현하면 <그림 19>과 같다. 수직 변위가 상대적으로 Hoop 방향의 변위보다 큰 값을 나타냄을 알 수 있다.

3.2 반구형 돔의 최적곡면

3.1절에서는 반구형 돔의 거동을 파악하였고, 3.2절

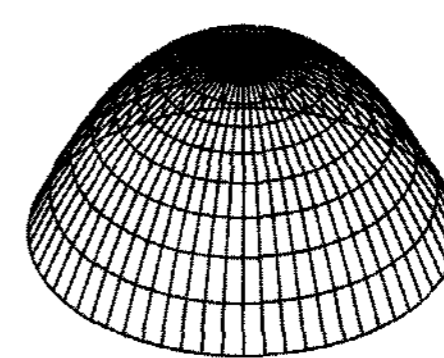
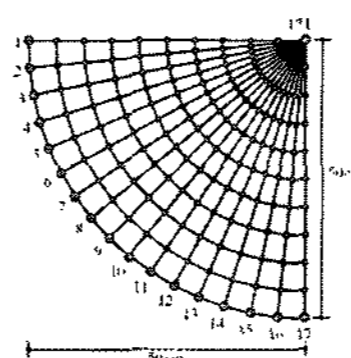
에서는 같은 Rise-span비의 최적곡면을 탐색하여 거동을 파악한다. 최적곡면 탐색은 비선형해석 프로그램인 NASS(Nonlinear Analysis of Spatial Structures)를 사용하였다. 비선형해석 프로그램 NASS의 flow-chart는 <그림 20>과 같다.



<그림 20> 비선형해석 프로그램 NASS의 Flow-chart

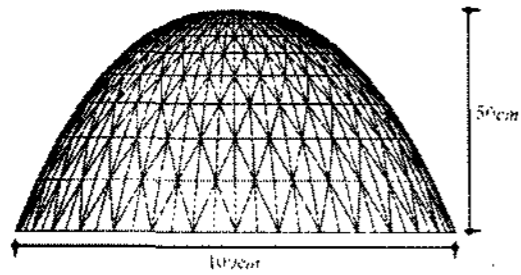
해석모델은 기하학적 대칭성을 고려하여 1/4만 해석하며 해석모델은 <그림 21>과 같다.

요소는 선재요소로 하며 선재요소의 초기장력은 $\sigma^0 \cdot t = 0.3 \text{kgf/cm}^2$ 로 설정한다. 모델의 탄성계수는 '0'에 가깝게 주며, 절점 1번부터 17번까지 경계조건은 X, Y, Z축방향 자유도를 고정으로 한다. 171번 절점은 X, Y축 방향을 고정시키고 (+)Z방향으로 강제변위 50cm를 적용한다. 나머지 모든 절점에 171번 절점과 같은 하중비를 적용하여 형상을 탐색한다. <그림 22>는 비선형해석 프로그램 NASS로 해석한 형상탐색 결과이며, 이때의 절점좌표를 이용하여 평면요소를 갖는 모델로 모델링을 한다.

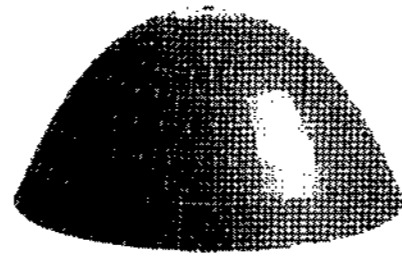


<그림 21> 형상탐색 모델 <그림 22> 형상탐색 결과

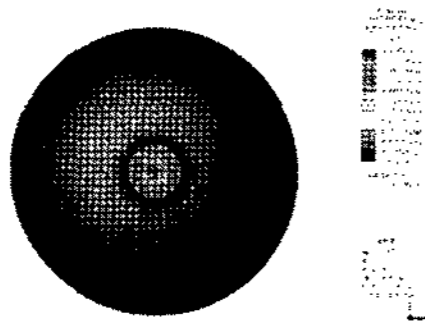
<그림 23>과 <그림 24>는 최적곡면을 갖는 반구형 돔의 모델이며, 지지부분의 경계조건은 DX, DY, DZ가 고정이며 나머지 절점의 모든 경계조건은 고정하지 않고, 해석 조건은 <표 1>과 같다.



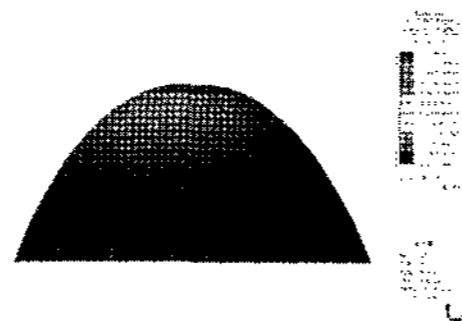
<그림 23> 최적곡면 반구형 돔 정면도



<그림 24> 최적곡면 반구형 돔 입체도



<그림 25> 최적곡면 돔의 응력 N_θ 평면도



<그림 26> 최적곡면 돔의 응력 N_θ 정면도

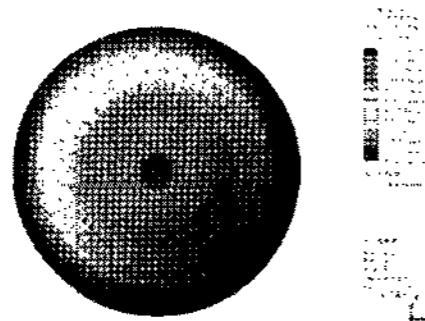


그림 27. 최적곡면 돔의 응력 N_ϕ 평면도

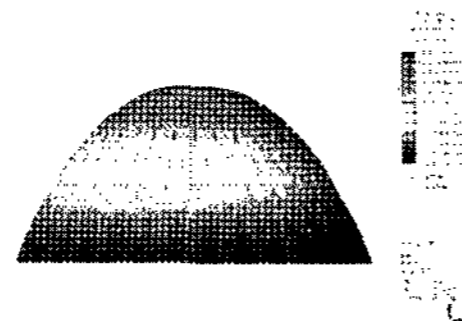
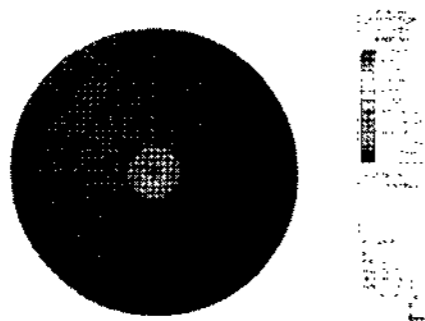
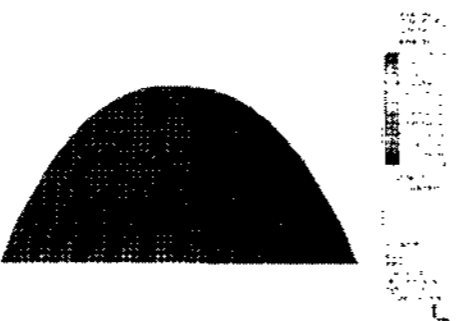


그림 28. 최적곡면 돔의 응력 N_ϕ 정면도

<그림 25>~<그림 28>은 최적곡면 돔의 응력분포를 나타내며, 해석결과 최적곡면을 갖는 돔의 N_θ 는 전체적으로 압축응력이 나타나고 하부로 내려갈수록 응력이 감소한다. N_ϕ 는 돔의 최상부에서 하부로 내려오면서 반구형 돔과 마찬가지로 계속 증가하는 양상을 보인다.



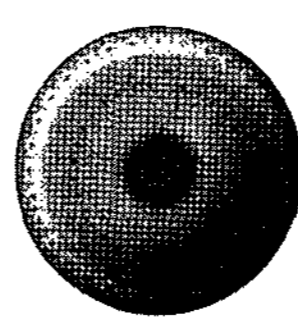
<그림 29> 최적곡면 돔의 M_x 평면도



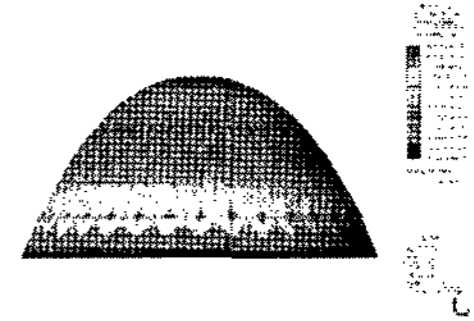
<그림 30> 최적곡면 돔의 M_x 정면도

<그림 29>~<그림 30>은 최적곡면 돔의 모멘트를 나타내며, 해석결과 제한된 최상부에서는 (+)방향 최댓값을 보이고 반구형 돔의 M_x 보다 큰 값을 나타

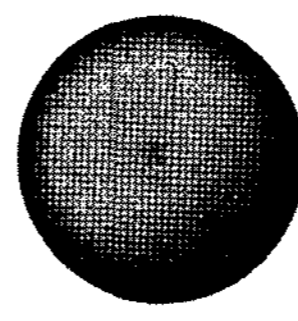
낸다. 최하부인 지지부분에서는 반구형 돔의 최하부보다 작은 값을 나타낸다.



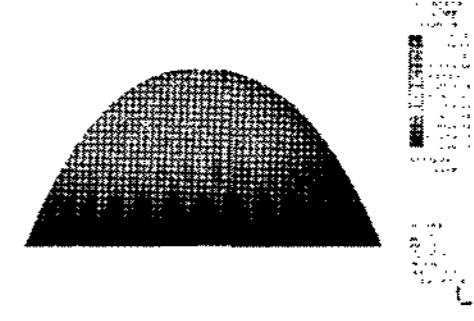
<그림 31> 최적곡면 돔 변위 D_{xy} 의 평면도



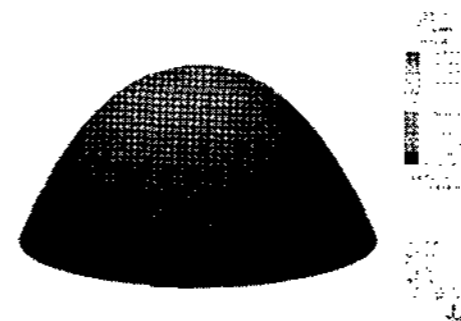
<그림 32> 최적곡면 돔 변위 D_{xy} 의 정면도



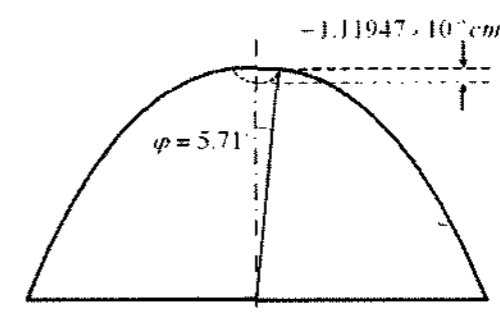
<그림 33> 최적곡면 돔 변위 D_z 의 평면도



<그림 34> 최적곡면 돔 변위 D_z 의 정면도



<그림 35> 최적곡면 돔 변위 D_{xyz} 의 입체도

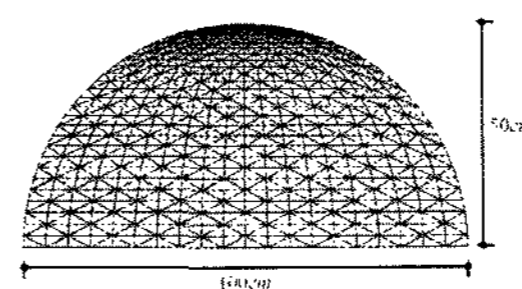


<그림 36> 최적곡면을 갖는 반구형 돔의 거동

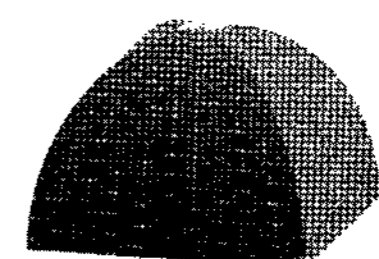
<그림 31>~<그림 35>는 최적곡면 돔의 변위상태를 나타내며, Hoop방향의 변위는 최상부로부터 하부로 내려갈수록 변위값이 커지고 수직변위 D_z 는 국부적인 최상부에서 가장 큰 변위를 가지며 하부로 갈수록 변위가 작다. 이를 간단하게 표현하면 <그림 36>과 같다.

3.3 사각평면 돔의 거동특성

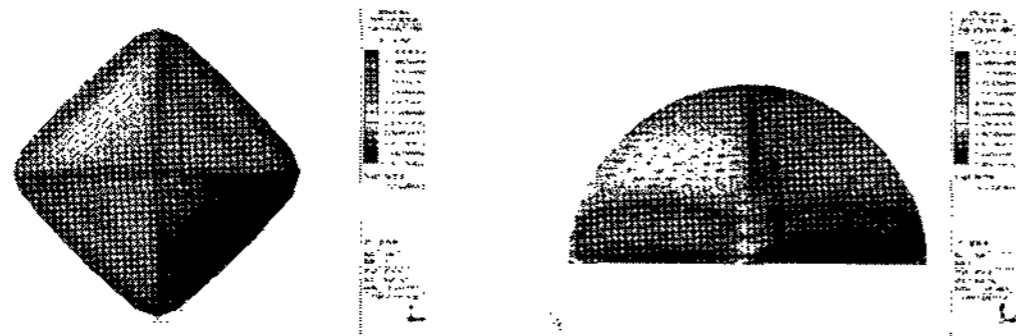
본 장에서는 평면상의 기하학적 특성이 정사각형을 갖는 돔을 해석하여 거동특성을 알아본다. <그림 37>과 <그림 38>는 높이 50cm 사각평면의 대각선 길이 100cm인 사각평면 돔의 모델이며, 이때 해석 조건은 <표 1>과 같다.



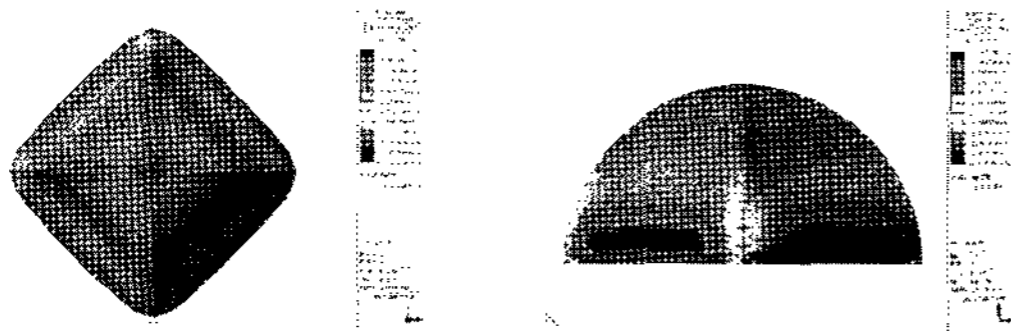
<그림 37> 사각평면 돔의 정면도



<그림 38> 사각평면 돔의 입체도

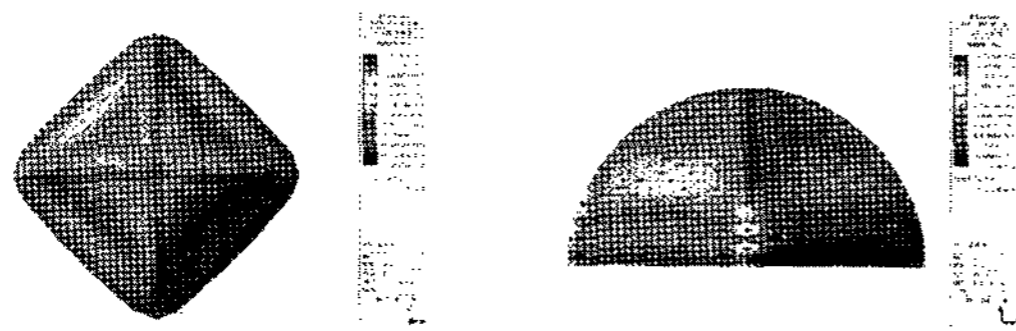


<그림 39> 사각평면 돔의 N_θ 평면도 <그림 40> 사각평면 돔의 N_θ 정면도



<그림 41> 사각평면 돔의 N_ϕ 평면도 <그림 42> 사각평면 돔의 N_ϕ 정면도

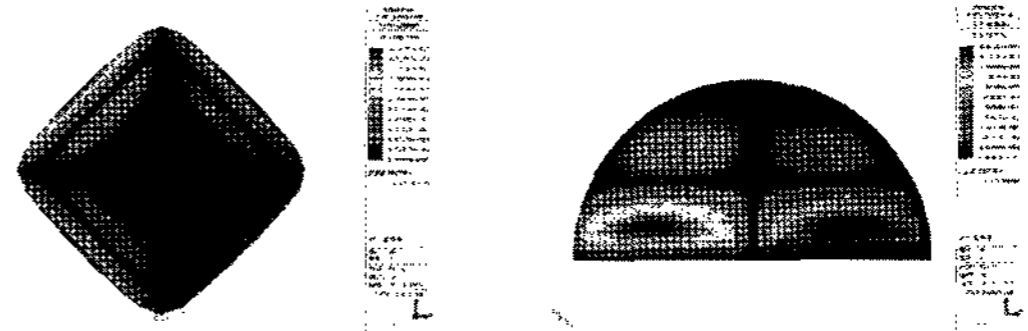
<그림 39>~<그림 42>은 사각평면 돔의 응력분포를 나타며, N_θ 는 최상부에서 압축응력이 발생하고 하부로 이동할수록 인장응력이 발생한다. 사각평면 돔의 대각선 방향 요소 부분에서 (-)면외방향으로 변위가 발생하는 부분에서는 인장응력, (+)면외방향으로 변위가 발생하는 부분에서는 압축응력이 발생한다. 사각평면의 변 방향 요소는 이와 반대의 경향을 보이며, 최대압축응력은 사각평면 돔의 최하부 모서리 부분에서 발생한다. 최대인장응력은 (+)면외방향으로 변위가 가장 큰 변 방향 요소와 같은 위도에서 발생한다. N_ϕ 는 최상부에서 '0'에 가까운 압축응력이며, 사각평면 돔의 대각선 요소에서 N_θ 와 같이 인장과 압축을 반복한 결과를 보인다. 최대압축응력은 사각평면 돔의 최하부 모서리 부분에서 발생하고 최대인장응력은 (+)면외방향으로 변위가 가장 큰 요소 지점에서 발생한다.



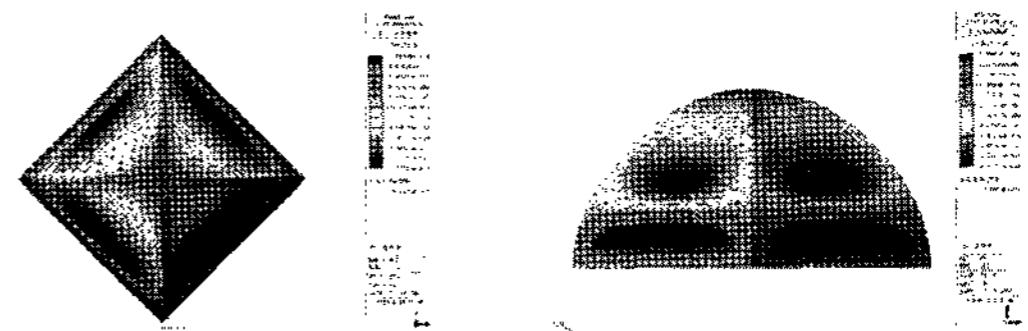
<그림 43> 사각평면 돔의 M_x 평면도 <그림 44> 사각평면 돔의 M_x 정면도

<그림 43>~<그림 44>는 사각평면 돔의 모멘트를 나타내며, 사각평면 돔의 대각선방향 요소에서는 상부에는 (-) M_x 하부에는 (+) M_x 를 보이고 최대(+) M_x

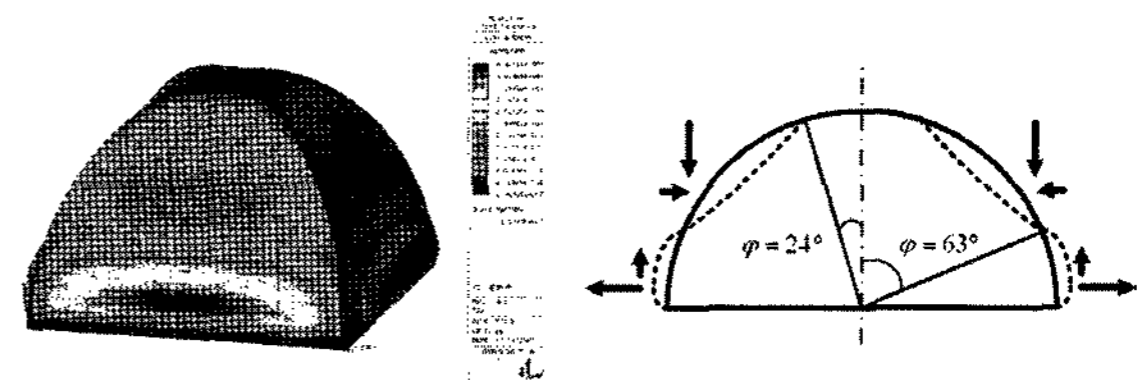
와 최대(-) M_x 를 나타낸다.



<그림 45> 사각평면 돔 변위 D_{xy} 의 평면도 <그림 46> 사각평면 돔 변위 D_{xy} 의 정면도



<그림 47> 사각평면 돔 변위 D_z 의 평면도 <그림 48> 사각평면 돔 변위 D_z 의 정면도



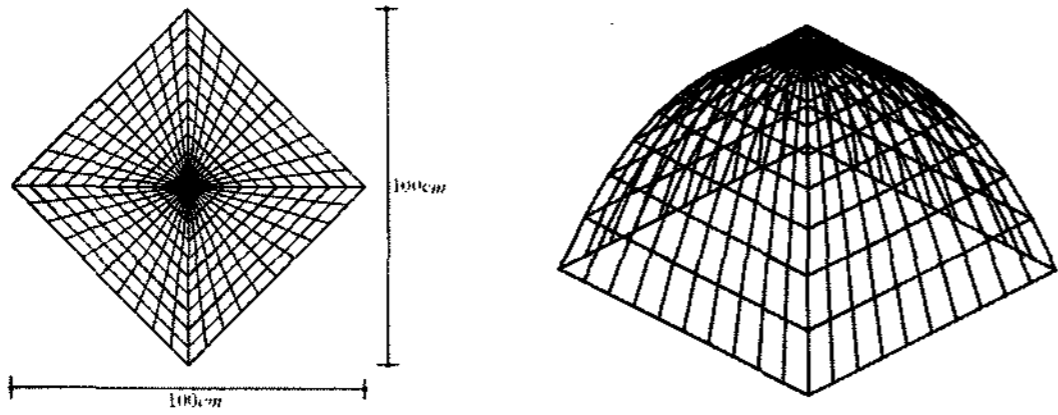
<그림 49> 사각평면 돔 변위 D_{xyz} 의 입체도 <그림 50> 사각평면 돔의 거동 D_{xyz} 의 입체도

<그림 45>~<그림 49>은 사각평면 돔의 변위상태를 나타며, Hoop방향의 변위는 최상부는 '0'에 가깝고 $\varphi = 24^\circ$ 기준으로 하부요소는 (-)면외방향으로, $\varphi = 63^\circ$ 기준으로 (+)면외방향으로 발생한다. 전체적으로 Hoop방향으로의 변위가 수직변위보다 크게 발생하 이를 간단하게 나타내면 <그림 50>과 같다.

3.4 사각평면 돔의 최적곡면

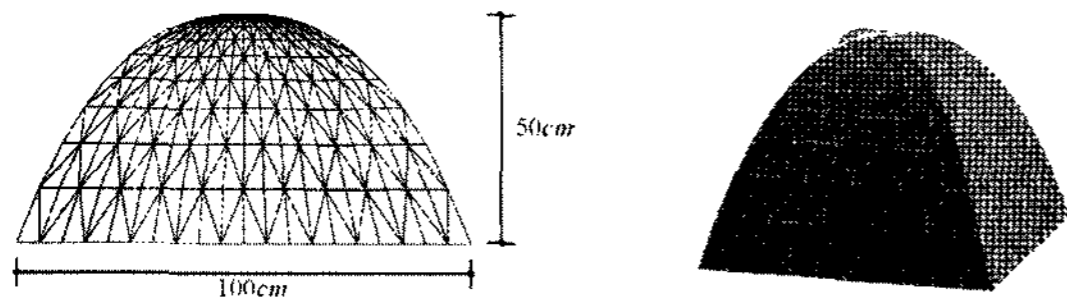
3.4절에서는 <그림 51>의 해석모델을 비선형 해석프로그램 NASS를 이용하여 3.3절 모델과 같은 Rise-span비로 최적곡면을 탐색하여 돔의 거동을 파악한다. 요소는 선재요소로 하고, 선재요소의 초기장력은 $\sigma^0 \cdot t = 0.3 \text{kgf/cm}^2$, 모델의 탄성계수는 '0'에 가깝게 하며, 사각형 외각 절점들은 X, Y, Z축 자유도를 고정한다. 모델의 중심 절점은 X, Y축 자유도를 고정하고 (+)Z방향으로 강제변위 50cm를 적용한다. 그 외 모든 절점에 중심 절점과 같은 하

중비를 적용하여 형상을 탐색한다.



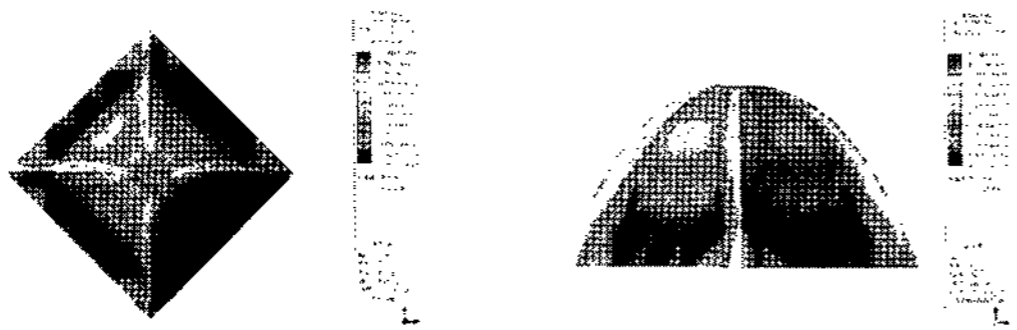
<그림 51> 형상탐색 모델 <그림 52> 형상탐색 결과

형상탐색 결과인 <그림 52>의 절점좌표를 이용하여 평면요소를 갖는 모델로 다시 구성하며, 이때의 해석조건은 <표 1>과 같고, 최적곡면의 형상은 <그림 53>, <그림 54>와 같다.

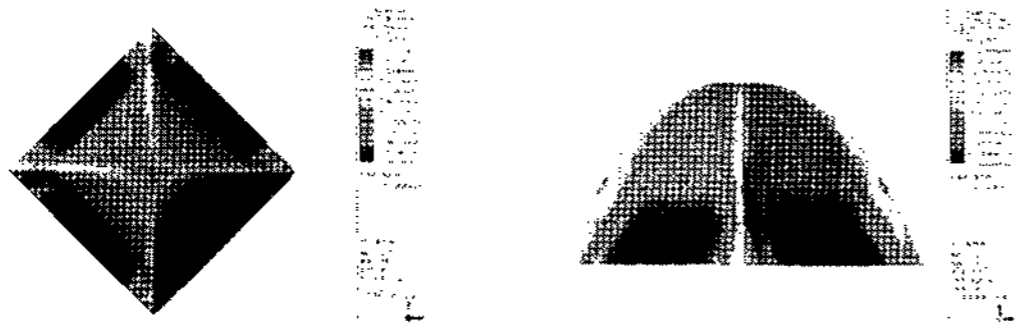


<그림 53> 최적곡면의 사각 평면 돔 정면도 <그림 54> 최적곡면의 사각 평면 돔 입체도

지지부분의 경계조건은 DX, DY, DZ가 고정이며 나머지 절점의 모든 경계조건은 고정하지 않는다.



<그림 55> 최적곡면 사각평면 돔의 N_θ 평면도 <그림 56> 최적곡면 사각평면 돔의 N_θ 정면도



<그림 57> 최적곡면 사각평면 돔의 N_ϕ 평면도 <그림 58> 최적곡면 사각평면 돔의 N_ϕ 정면도

<그림 55>~<그림 58>는 최적 사각평면 돔의 응력분포를 나타내며, 사각평면 돔의 N_θ 는 전체적으로 대각선요소에서는 인장응력, 변요소에서는 압축응

력이 나타나고 (-)면외방향으로 변위가 가장 큰 부분에 최대압축응력이 작용한다. 최상부는 압축응력이 작용하고, 대각선요소 중 변위 Dz가 (+)방향으로 올라가는 요소에서 최대인장응력이 발생하며, 지지부분에서는 모서리를 제외하고 압축응력을 나타낸다. N_ϕ 는 N_θ 와 마찬가지로 대각선요소에서 인장응력, 변요소에는 압축응력이 작용한다.

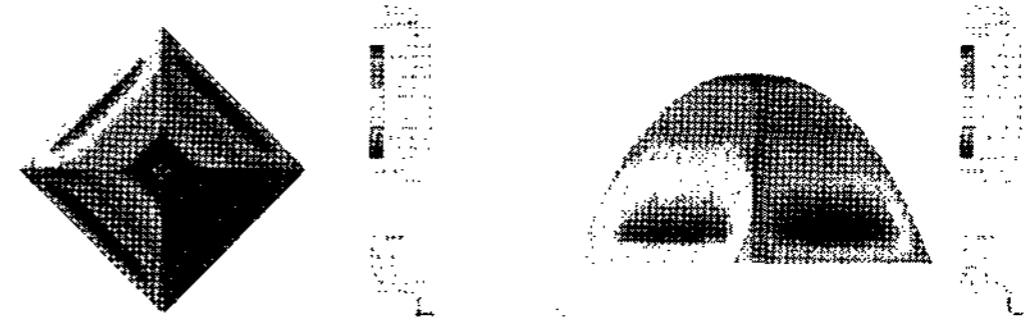


<그림 59> 최적 사각평면 돔의 M_x 평면도 <그림 60> 최적곡면 사각평면 돔의 M_x 정면도

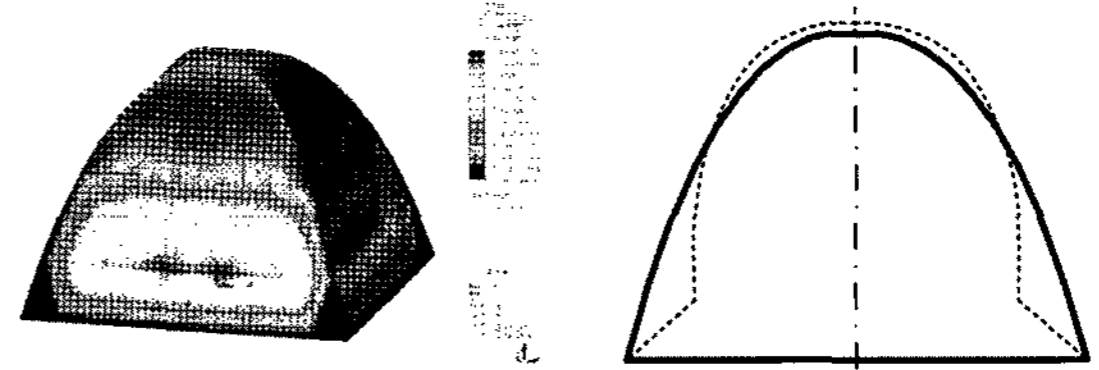
<그림 59>~<그림 60>은 최적 사각평면 돔의 모멘트를 나타내며, 전체적으로 대각선요소에서는 (-) M_x , 나머지 변 요소에서는 (+) M_x 가 작용한다.



<그림 61> 최적 사각평면 돔 변위 D_{xy} 의 평면도 <그림 62> 최적 사각평면 돔 변위 D_{xy} 의 정면도



<그림 63> 최적 사각평면 돔 변위 D_z 의 평면도 <그림 64> 최적 사각평면 돔 변위 D_z 의 정면도



<그림 65> 최적 사각평면 돔 변위 D_{xyz} 의 입체도 <그림 66> 최적곡면을 갖는 사각평면 돔의 거동

<그림 61>~<그림 65>은 최적 사각평면 돔의 변위상태를 나타며, Hoop방향의 변위는 최상부로부터 하부로 내려갈수록 변위값이 (-)면외방향으로 커지고 최하부는 경계조건의 영향으로 변위가 작다. 결과적으로 사각평면의 변 요소에서 좌굴거동과 비슷한 양상을 보며, 상대적으로 대각선 요소의 변위는 매우 작다. 수직변위도 사각평면의 변 요소에서 최대값을 나타내며, 일부 상부에서는 (+)방향으로 올라가는 현상을 나타낸다. 전체적인 거동은 <그림 66>과 같다. 각 모델별 각 최대응력은 <표 2>~<표 6>과 같으며, 이를 정리하면 다음과 같다.

<표 2> σ_{xx} 의 최대응력 비교

모델	최대응력	
반구형 돔	인장	4.9209kgf/cm^2
	압축	-4.96901kgf/cm^2
원 최적곡면 돔	압축	$-1.06478 \times 10 \text{kgf/cm}^2$
사각평면 돔	인장	$1.16562 \times 10 \text{kgf/cm}^2$
	압축	$-2.47337 \times 10 \text{kgf/cm}^2$
사각 최적곡면 돔	인장	5.34865kgf/cm^2
	압축	-4.85603kgf/cm^2

<표 3> σ_{yy} 의 최대응력 비교

모델	최대응력	
반구형 돔	압축	$-1.00071 \times 10 \text{kgf/cm}^2$
원 최적곡면 돔	압축	-6.76475kgf/cm^2
사각평면 돔	인장	$1.22359 \times 10 \text{kgf/cm}^2$
	압축	$-3.91835 \times 10 \text{kgf/cm}^2$
사각 최적곡면 돔	인장	$1.54797 \times 10 \text{kgf/cm}^2$
	압축	$-1.3202 \times 10 \text{kgf/cm}^2$

<표 4> M_x 의 최대모멘트 비교

모델	최대모멘트
반구형 돔	$1.51112 \times 10^{-3} \text{kgf} \cdot \text{cm}$
원 최적곡면 돔	$1.09478 \times 10^{-2} \text{kgf} \cdot \text{cm}$
사각평면 돔	$1.51092 \times 10^{-2} \text{kgf} \cdot \text{cm}$
사각 최적곡면 돔	$-1.00858 \times 10^{-2} \text{kgf} \cdot \text{cm}$

<표 5> D_{xy} 의 최대변위 비교

모델	최대변위
반구형 돔	$1.6057 \times 10^{-4} \text{cm}$
원 최적곡면 돔	$4.875 \times 10^{-5} \text{cm}$
사각평면 돔	$4.41207 \times 10^{-3} \text{cm}$
사각 최적곡면 돔	$3.70725 \times 10^{-3} \text{cm}$

<표 6> D_z 의 최대변위 비교

모델	최대변위
반구형 돔	$-3.60078 \times 10^{-4} \text{cm}$
원 최적곡면 돔	$-1.11947 \times 10^{-3} \text{cm}$
사각평면 돔	$-1.3735 \times 10^{-3} \text{cm}$
사각 최적곡면 돔	$-1.16667 \times 10^{-3} \text{cm}$

4. 결 론

본 논문에서는 곡면의 곡률을 이용하여 외력에 대해서 합리적으로 저항할 수 있는 형태저항형 구조물을 대상으로, 보다 합리적인 힘의 흐름을 유도할 수 있는 최적곡면을 구하는 방법을 연구하였다. 면외방향 내력을 최소화시키고 면내방향 내력을 중심으로 외력에 저항할 수 있는 곡면을 얻기 위해 선재치환기법을 이용하였다. 비선형 형상해석에 의해 얻어진 최적곡면을 검증하기 위해 선형 응력-변형 해석을 통하여 내력을 비교 검토하였고, 본 기법에 의해 얻어진 최적곡면은 외력의 저항에 보다 효과적임을 알 수 있었다.

- 1) 최적곡면을 탐색하지 않은 모델에 비해 최적곡면을 갖는 모델의 모멘트는 최상부의 일부분에서 증가하는 양상을 나타냈지만, 지지부분을 포함하여 전체적으로 최적곡면을 갖는 모델이 모멘트가 감소되었다.
- 2) 최적곡면을 탐색하지 않은 모델에 비해 최적곡면을 갖는 모델의 Hoop방향 변위가 작은 값을 나타냈고 수직변위 또한 최적곡면을 갖는 모델이 최상부의 일부분을 제외하면 전체적으로 감소함을 알 수 있었다. 즉 최적곡면을 탐색하기 이전의 모델보다 최적곡면을 갖는 모델이 면외방향 변위가 감소하는 양상을 보였다.
- 3) 막이론에 의한 구형 셸의 내부 응력과 비교하면, 상부 요소에서 하부 요소로 갈수록 구형 셸의 정해보다 응력이 더 증가하는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서 제시한 최적형상 결정방법을 이용하면, 비교적 간편하게 면내내력이 중심이 되는 최적곡면형상을 얻을 수 있고, 따라서 실제 구조설계에

서도 보다 간단한 방법에 의해 최적곡면에 접근할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호#06 R&D B03)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Siev, A. and Eidelman, J., "Shapes of Suspended Roofs," Proc. of the IASS Colloquium on Hanging Roofs, 1962, pp.42-47
2. 김승덕, "대공간 구조물의 연구 동향," 한국강구조학회지, 제7권 3호, 1995.9., pp.78-81.
3. Mallet, R. H. & Marcal, P. H., "Finite element analysis of non-linear structures", Proc. ASCE, J. of Struct. Div., 94, ST9, pp. 2081-2105, 1968.
4. 문혜수, 안상길, 손수덕, 이동우, 김승덕, "송도 컨벤션 센터의 초기형상불완전 및 절점강성에 따른 좌굴하중 특성에 관한 연구," 한국셀·공간구조학회, 제3권 제1호 통권 제3호, 2006, pp. 191-192
5. 권택진 외 3인, "Shell구조의 이론 및 응용," 한국전산구조공학회, 제 9회 기술강습회, 1994, pp.184
6. Otto, F. TENSILE STRUCTURES, Vol. I, II, MIT Press, Cambridge, Mass.,1969
7. Li, C. T. and Srivastava, N. K., "Analysis of Pneumatic Shells with or without Cable Net; General Finite Element Formulation," Computers & Structures, Vol.4, Pergamon Press, 1974, pp.813-828.
8. 권택진, 향가이 야수히코, 최현식, 김승덕, 서삼열, "기하학적 비선형을 고려한 막형 케이블네트 구조물의 최적형상 및 응력-변형해석에 관한 연구," 대한건축학회논문집, 11권, 1호, 통권 75호, 1995, pp.153-160
9. 최옥훈, "케이블 돔 구조물의 최적형태해석," 한국강구조학회지, 제11권, 제1호, 1999, pp.53-60
10. 김승덕, 백인성, 김형석, "케이블 돔 구조물의 형태변화에 따른 비선형 불안전 거동의 특성에 관한 연구," 한국강구조학회 논문집, 제16권, 제3호, 통권 70호, 2004. 6, pp.345-353