

# 단일공기막 구조물의 설계하중에 따른 비선형 응력-변형 해석 및 설계에 관한 연구

## A Study on the Nonlinear Stress-Deformation Analysis and Design of Unity-typed Pneumatic Structures Under the Design Load

손수덕\*                      정을석\*\*                      김승덕\*\*  
Shon, Su-Deok              Jeong, Eul-Seok              Kim, Seung-Deog

### 요약

공기막구조물의 공간형성방법은 크게 단일공기막과 이중공기막 방식으로 나뉜다. 내압으로 인해 평형곡면이 형성되는 공기막구조물의 형상은 형태의 변화가 외력에 의해 크게 변형되거나 응력이 집중되지 않는 등장력 곡면으로 많이 이용된다. 따라서 본 연구에서는 공기막 구조물의 초기 형성된 형상에 대해서 설계하중조합에 대한 구조해석을 비선형 전용해석프로그램인 NASS를 이용하여 수행한 후 변형형상을 살펴보고, 최대응력을 이용하여 안전성을 검토한다. 해석 모델은 사면에서 지지되는 장방형 단일공기막 구조물을 대상으로 하며, 직교이방성을 고려하여 비선형 증분해석을 수행한다.

### Abstract

The method to form the space of the pneumatic structures by internal pressure is classified greatly as the dual type with the unity type. The shape of the pneumatic structures consists of the curved surface under uniform tension not greatly to be deformed by the design load and stress must not be concentrated also. Therefore, In this study, we have done the structural analysis of the unity typed pneumatic structures by the NASS which is the program for nonlinear analysis. The analytic model is a rectangular pneumatic membrane structures which have four side fixed edges. And we have done the nonlinear incremental analysis considering the orthotropic material.

**키워드 :** 단일공기막구조, 기하학적 비선형, 응력-변형해석

**Keywords :** Unity-typed Pneumatic Structures, Geometric Nonlinearity, Stress-Deformation Analysis

## 1. 서론

대공간 구조물은 20세기 중반에 신재료 및 신기술의 개발과 함께 점차 경량화해 가기 시작하면서 비약적인 발전을 시작했다. 경량구조란 필요 최소한의 자중으로 최대의 적재하중을 지지하는 구조시스템으로 경제적이고, 또 힘의 흐름이 그대로 구조물의 형태로 표현되므로 미적으로 아름답다. 경량의

대공간 구조물은 압축과 휨을 주체로 하는 돔 구조물을 대신하여, 1950년대부터 장력을 주체로 하는 막구조 시스템이 등장하였다. 막구조는 옛날부터 전해오는 유목민들의 텐트구조의 이미지에서 벗어나지 못한 채 가설구조물이라는 개념을 가지고 있었으나, 불연성 막재료의 개발 및 막구조 시스템의 체계화와 함께, 종래의 가설구조물이란 개념에서 영구 구조물로의 개념 전환이 이루어졌다. 수많은 연구자 및 설계자로부터 막의 형태결정 및 구조해석에 관하여 연구 개발되어 왔고, 오늘날에는 크게 3 종류의 기본 시스템, 즉 서스펜션식 막구조, 프레임식 막구조, 공기 막구조 등으로 나눌 수 있다.

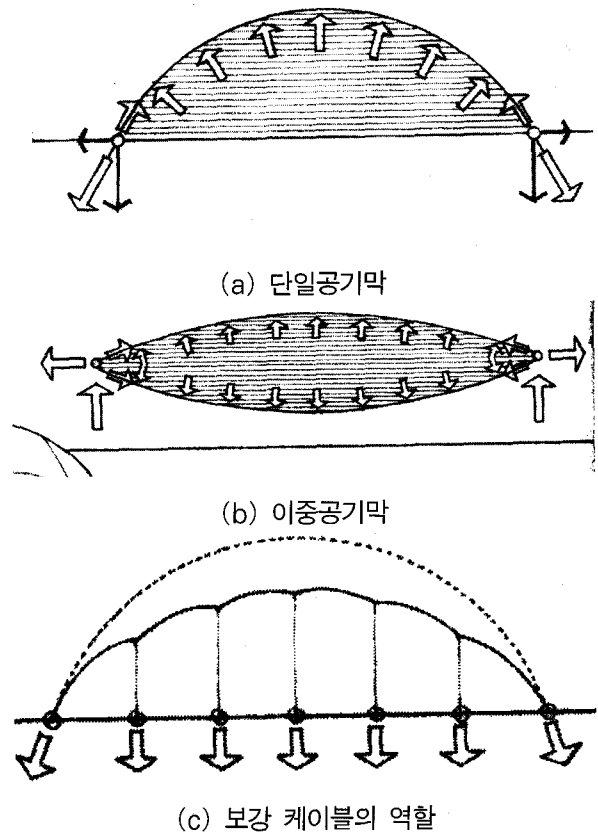
공기막구조는 기구의 원리를 이용하여 매우 가벼운 구조를 사용하고자 하는 시도로 1950년대 군사용

\* 정회원, NTRAS 구조기술연구소, 연구원  
Tel : 053-753-5591      FAX : 043-649-1326  
E-mail : sdshon@passmail.to  
\*\* 정회원, 세명대학교 건축공학과, 공학석사  
E-mail : kara\_ra@semyung.ac.kr  
\*\*\* 정회원, 세명대학교 건축공학과, 부교수  
E-mail : sabinus@semyung.ac.kr

시설에서부터 실현되어졌다.<sup>[11]</sup> 영국의 기술자 F. W. Lanchester(1917년)에 의해 제안된 공기 막구조는 미국의 기술장교 W. Bird에 의해 실용화되었고(1946년), 1960년대에는 전람회 또는 전시장을 중심으로 많이 건설되었다. 건축에서 시작된 최초의 예는 1970년 오사카 박람회의 미국관('70 Expo U.S. pavilion)이다. 이 건물은 공기막구조 단일막 방식으로 직사각형 모양으로 143m×83m의 대형 스패의 건축물이 PVC로 코팅한 유리섬유막과 보강케이블을 이용하여 덮어지고 내부에 공기압이 가해져 건설되었다. 이후 특히 미국에서 폭발적으로 퍼져갔으며, 스패 102m의 산타클라라대학의 Leavey center(1974년), 228m 스패의 폰티악 Silver dome(1975년), 시라쿠스에 있는 Carrier dome(1979년), 230m 스패의 규모를 가진 미네소타 Metro dome(1982년), Vancouver stadium(1982년), 인디애나 The Hoosier stadium(1984년) 그리고 200m에 달하는 Tokyo dome(1988년) 등이 대형 공기막구조의 계보를 이으며 발전해 갔다.

공기막구조와 현수막구조를 포함하는 인장구조물의 곡면은 초기장력 및 자중에 대해서 평형을 이룰 수 있는 형태가 아니면 실현될 수 없다. 공기막구조의 평형곡면은 내압에 의해 발생하는 막장력에 대해 구조물의 곡면형상이 평형상태에 있게 되는 것을 의미한다.<sup>[8]</sup> 이와 같은 공기막구조의 힘의 흐름은 <그림 1>에서 보는 바와 같이 내부에서나 막 사이에 공기를 가압하여 막에 생기는 장력으로 구조를 유지시키고 형성하는 것이므로 대표적인 장력 구조시스템이라 할 수 있다. 공기로 막을 지지하여 막의 장력을 이끌어내고 이로써 공간을 이루는 구조방식에는 사용공간에 직접 공기를 주입하는 단일 공기막 방식과 튜브와 같이 공기를 담고 있는 쿠션이나 아치, 기둥 등의 구조를 이뤄 공기를 주입하지 않는 공간을 만들어 내는 이중공기막 방식으로 크게 나누어지고, 공기막구조는 장력의 효율을 위하여 항상 보강케이블을 사용하기는 하지만 부가적인 구조부재라고 생각할 수 있다.<sup>[11]</sup>

건축분야에 있어서 공기막구조의 적용은 초기에는 주로 비누막 실험에 의하여 형태가 결정 되었고, 이것을 응용하여 실제로 건설된 예가 많다. 공기막



<그림 1> 공기막구조의 힘의 흐름

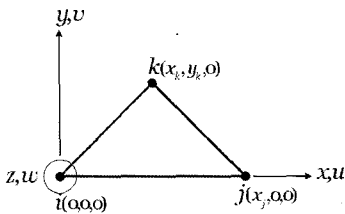
구조물의 초기에 설정한 곡면은 장력의 적은 편차가 있더라도 재료가 변형됨에 따라 점차 형태도 변해 간다. 따라서 초기에 설정할 막면의 장력상태를 등장력 상태로 하여 형태의 변화가 적도록 하는 것이 공기막구조의 설계에 있어서 매우 중요한 문제가 된다. 또한 이 형태는 건축물로서 안정성이 높은 곡면이어야 하고 외력에 의하여 크게 변형되거나 응력이 크게 집중되지 않는 형태의 곡면이어야 한다. 이 때문에 공기막구조의 초기설계곡면으로 등장력 곡면이 자주 사용된다.<sup>[8][9]</sup>

본 논문에서는 내압으로 인해 평형상태에 있는 단일공기막 구조물의 설계하중조합에 따른 응력-변형 해석을 직교이방성을 고려하여 수행하고, 최대 응력에 대한 안전성 여부를 살펴본다. 비선형 해석 방법으로는 하중증분법과 수정하중 증분법을 사용하며<sup>[7]</sup>, 매 증분단계마다 기하학적 비선형성을 고려한 접선강성을 구성한다. 공기막구조물의 큰 변형에 대한 비보존(non-conservative)력은 엄밀하게 강성에 하중 변형성을 고려해야 하지만 이러한 방

법으로는 대칭 매트릭스를 구성할 수 없게 된다. 따라서 본 연구에서는 대칭매트릭스를 사용하기 위해 매 증분단계마다 변형을 고려하여 증분해석을 수행, 변형형상 및 응력의 변화에 대해서 살펴본다.

## 2. 막요소의 정식화

삼각형 평면 막요소의 요소좌표계를 <그림 2>에 서와 같이 정의한다.



요소좌표계 :  $x, y, z$   
 요소내변위 :  $u(x, y), v(x, y), w(x, y)$

<그림 2> 막요소의 요소좌표계

요소내 변위  $u, v, w$ 를  $x, y$ 의 1차 근사식으로 다음과 같이 가정한다.

$$\begin{aligned} u(x, y) &= a_1 + a_2x + a_3y \\ v(x, y) &= \beta_1 + \beta_2x + \beta_3y \\ w(x, y) &= \gamma_1 + \gamma_2x + \gamma_3y \end{aligned} \quad (1)$$

변위  $u, v, w$ 를 각 절점좌표로 표현하여 정리하면 계수  $a_1, a_2, a_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 는 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} u(x, y) &= a_1 \cdot d_{xi} + (b_1d_{xi} + b_2d_{xj}) \cdot x \\ &\quad + (c_1d_{xi} + c_2d_{xj} + c_3d_{xk}) \cdot y \\ v(x, y) &= a_1 \cdot d_{yi} + (b_1d_{yi} + b_2d_{yj}) \cdot x \\ &\quad + (c_1d_{yi} + c_2d_{yj} + c_3d_{yk}) \cdot y \\ w(x, y) &= a_1 \cdot d_{zi} + (b_1d_{zi} + b_2d_{zj}) \cdot x \\ &\quad + (c_1d_{zi} + c_2d_{zj} + c_3d_{zk}) \cdot y \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,

$$a_1 = 1, b_1 = -\frac{1}{x_j}, b_2 = \frac{1}{x_j}$$

$$c_1 = \frac{x_k - x_j}{x_j y_k}, c_2 = -\frac{x_k}{x_j y_k}, c_3 = \frac{x_j}{x_j y_k}$$

변형도-변위 관계식을 다음과 같이 비선형항을 포함한 식으로 채택한다.

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right\} \\ \epsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \\ &\quad + \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

식(2)를 식(3)에 대입하여 변형도를 절점 변위로 표현하면 다음과 같은 매트릭스 식으로 나타낼 수 있다.

$$\{\epsilon\} = [A] \{d\} + \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} d^T B^T B d \\ \frac{1}{2} d^T C^T C d \\ d^T B^T C d \end{array} \right\} \quad (4)$$

여기서,

$$[A] = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 & b_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_1 & 0 & 0 & c_2 & 0 & 0 & c_3 & 0 \\ c_1 & b_1 & 0 & c_2 & b_2 & 0 & c_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}$$

$$\{d\} = \{d_{xi} \ d_{yi} \ d_{zi} \ d_{xj} \ d_{yj} \ d_{zj} \ d_{xk} \ d_{yk} \ d_{zk}\}^T$$

$$[B] = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 & b_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & 0 & 0 & b_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_1 & 0 & 0 & b_2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 & c_2 & 0 & 0 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & c_1 & 0 & 0 & c_2 & 0 & 0 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & c_1 & 0 & 0 & c_2 & 0 & 0 & c_3 \end{bmatrix}$$

증분 구간에서의 응력-변형도 관계식을 직교이방성을 고려하여 다음과 같이 채택한다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{21}E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

즉,

$$\{\sigma\} = [E] \{\epsilon\} \quad (6)$$

현재의 상태를 초기 상태로 가정하고, 현상태에서의 증분에 관한 가상일을 고려하면, 다음과 같은 가상일의 방정식을 구할 수 있다.

$$\int \int \int_V [(\sigma_x^{(0)} + \sigma_x)\delta\varepsilon_x + (\sigma_y^{(0)} + \sigma_y)\delta\varepsilon_y + (\tau_{xy}^{(0)} + \tau_{xy})\delta\gamma_{xy}] dV \quad (7)$$

$$= (f^{(0)} + f)^T \delta d$$

여기서  $\sigma_x^{(0)}$ ,  $\sigma_y^{(0)}$ ,  $\tau_{xy}^{(0)}$ 는 초기 응력이고,  $f^{(0)}$ 와 평형 상태를 이루고 있다.

식(4)로부터  $\delta\varepsilon_x$ ,  $\delta\varepsilon_y$ ,  $\delta\gamma_{xy}$ 를 구하면,

$$\begin{aligned} \delta\varepsilon_x &= A_1 \delta d + d^T B^T B \delta d \\ \delta\varepsilon_y &= A_2 \delta d + d^T C^T C \delta d \\ \delta\gamma_{xy} &= A_3 \delta d + d^T [C^T B + B^T C] \delta d \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)을 식(7)에 대입하여 정리하면,

$$\begin{aligned} A_m h_m [(\sigma_x^{(0)} + \sigma_x)(A_1 + d^T B^T B) \\ + (\sigma_y^{(0)} + \sigma_y)(A_2 + d^T C^T C) \\ + (\tau_{xy}^{(0)} + \tau_{xy})(A_3 + d^T [C^T B + B^T C])] \quad (9) \\ = (f^{(0)} + f)^T \end{aligned}$$

여기서,

$A_m$ : 삼각형 요소의 면적,  $h_m$ : 두께

식(6)에 식(4)를 대입하고, 그 결과를 다시 식(9)에 대입하여,  $d$ 의 고차항을 생략하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} f^{(0)} + f &= A_m h_m (A^T \sigma^{(0)}) \\ &+ A_m h_m [\sigma_x^{(0)} B^T B + \sigma_y^{(0)} C^T C \\ &+ \tau_{xy}^{(0)} (B^T C + C^T B)] d \quad (10) \\ &+ A_m h_m [A^T E A] d \end{aligned}$$

여기서,

$$\{\sigma^{(0)}\} = \{\sigma_x^{(0)} \sigma_y^{(0)} \tau_{xy}^{(0)}\}^T$$

고차항의 생략, 수치 해석의 오차 등으로 인하여 불평형력(residual force)이 발생한다. 이러한 불평형력을  $r$ 라고 하면, 식(10)의 오른쪽 제 1항으로부터,

$$r = A_m h_m \cdot A^T \sigma^{(0)} - f^{(0)} \quad (11)$$

윗 식을 이용하여, 식(10)의 증분 방정식은 다음과 같이 된다.

$$f - r = [k_E + k_G] d \quad (12)$$

여기서,

$$\begin{aligned} k_E &= A_m h_m [A^T E A] \\ k_G &= A_m h_m [\sigma_x^{(0)} B^T B + \sigma_y^{(0)} C^T C + \tau_{xy}^{(0)} (B^T C + C^T B)] \end{aligned}$$

좌표변환 매트릭스  $T$ 를 이용하여 전체좌표계에서 증분방정식을 나타내면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} F - R &= T^T [k_E + k_G] T D \\ &= [K_E + K_G] D \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,

$$\begin{aligned} K_E &= T^T k_E T : \text{전체좌표계에서의 탄성강성행렬} \\ K_G &= T^T k_G T : \text{전체좌표계에서의 기하강성행렬} \end{aligned}$$

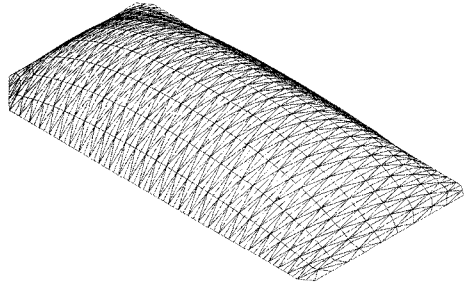
### 3. 해석모델

내압을 받는 단일공기막 구조물의 설계하중에 따른 비선형 구조해석을 수행하기 위해 본 논문에서는 200m(L)×100m(D)×50m(H) 크기의 케이블로 보강된 장방형 구조물을 해석모델로 채택한다. 해석대상모델의 형상 및 보강케이블의 설정위치는 <그림 3>과 같다.

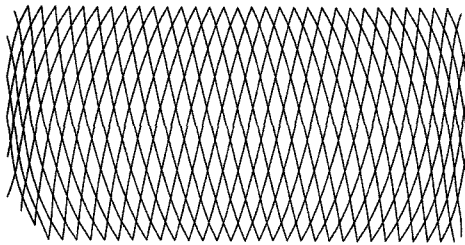
해석 모델의 물성치는, 막재의 경우 <표 1>과 같다. 초기형상에 적용되는 내압은 20mmAq이고, 형상해석을 위해 사용되는 초기장력은 Warp과 Fill방향 모두 700kgf/m를 적용한다. 또 케이블의 단면적은 0.00047m<sup>2</sup>, 탄성계수 E=1.4E+10kgf/m<sup>2</sup>으로 모든 요소에 동일하며, 외력에 의한 평형곡면의 변

〈표 1〉 막재의 물성치

Material	Dir.	E (kgf/m)	V	G (kgf/m)	Max. Tensile Strength (kgf/cm)	Self-Weight (kgf/cm)
PVDF	Warp	51200	0.410	1650	133.33	0.8
	Fill	31000	0.248		116.67	



(a) 입체도



(b) 케이블 위치

〈그림 3〉 해석모델의 형상

형형상에 대해서 케이블의 슬라이딩은 고려하지 않는다.

평형곡면으로 형성된 공기막구조물의 외력에 대한 변형형상을 살펴보기 위해서 본 논문에서는 <표 2>에서와 같은 설계하중조합을 선정한다. 설계하중에 사용되는 외력은 막과 케이블의 자중, 내압, 내압에 의해 형성되는 막장력 그리고 Wind Load와 Snow Load로 구성하며 각각의 하중을 모두 다섯가지 형태로 조합하여 고려한다.

<표 2>의 설계하중조합에 대한 명칭에서 ADLC는 AirDome Load Condition을 의미하며, 뒤이어 오는 w와 s는 각각 Wind Load와 Snow Load를 말한다. 또 x와 y는 Wind Load의 방향을, 60과 40은 Snow Load에 따라 달리 적용되는 내압을 의미한다. 하중조합에서 Snow Load를 고려할 때 내압은 평상시보다 높은 60mmAq를 적용하며, 온풍기 가동시 구조물 상부의 적설량이 감소되는 것을 고려하여 40mmAq의 내압을 가정하도록 한다.

〈표 2〉 해석대상모델의 설계하중조합

Load Case	Load Name	Combination
1	ADLCwx	DL+IL+WLy
2	ADLCwy	DL+IL+WLy
3	ADLCwp	DL+IL+WLy
4	ADLCs60	DL+IL+SLa
5	ADLCs40	DL+IL+SLp

- \* DL : Dead Load
- \* IL : Initial Load = Internal Pressure + Initial Stress
- \* WL : Wind Load
- \* SL : Snow Load

작용하는 외력 중 Wind Load와 Snow Load의 산정은 식(14)와 식(15)에 의해 각각 산정하며<sup>[10]</sup>, <그림 4>에 하중 분포도를 이용하여 나타내었다. 여기서 '-'는 정압을, '+'는 부압이 요소의 범면에 작용하는 것을 의미한다.

$$W_r = p_r \times A_m \quad (14)$$

$$S_s = C_s S_f \quad (15)$$

여기서,  $p_r = 100 C_f \text{ kgf/m}^2$  : 설계력

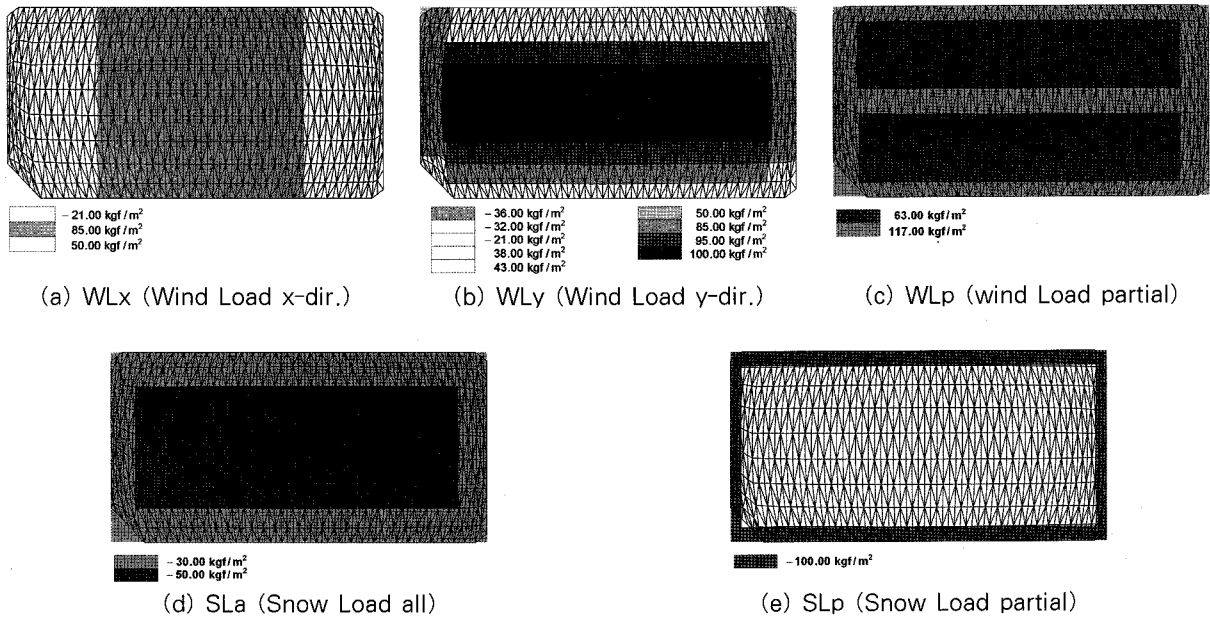
$S_f = 50 \text{ kgf/m}^2$  : 평지붕 적설하중

$C_f$  : 풍력 계수

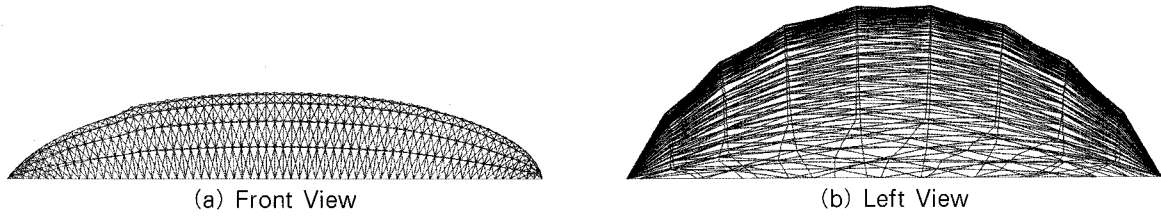
$C_s$  : 지붕 경사도 계수

설계하중조합에 대한 대상구조물의 변형형상을 <그림 5>에 Front View와 Left View로 구분하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 하중조합에서 Dead Load나 Initial Load같은 하중벡터보다는 Wind Load나 Snow Load의 하중벡터 형태와 유사한 변형형상을 보이고 있다. <그림 4(c)> ADLCwp의 하중분포도에서 볼 때 Wind Load가 가장자리와 중앙부분에서 부분적으로 작용하는 하중벡터는 <그림 7> Left View에서 곡면의 기울기 변화를 통해 직접적으로 드러나고 있음을 알 수 있다. 마찬가지로 <그림 4(e)>의 ADLCs40에서도 가장자리의 하중벡터에 대한 변형형상은 <그림 9> Left View의 가장자리 곡면의 기울기 변화에서 또다시 살펴볼 수 있다.

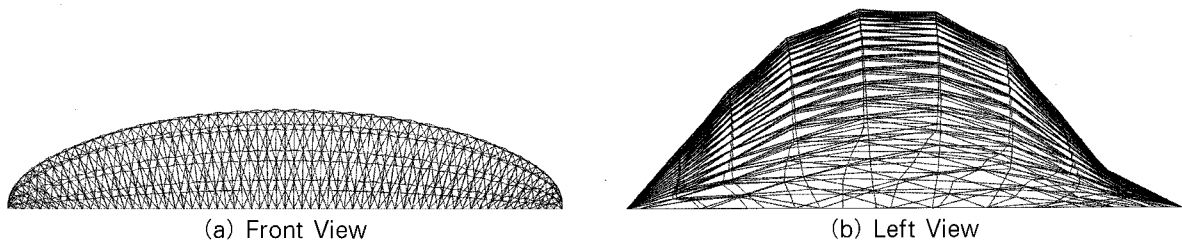
변형형상에 대한 해석대상구조물의 Warp방향과 Fill방향의 응력분포결과는 <그림 10>에서 <그림 14>에까지 등고선도를 이용하여 나타내었다.



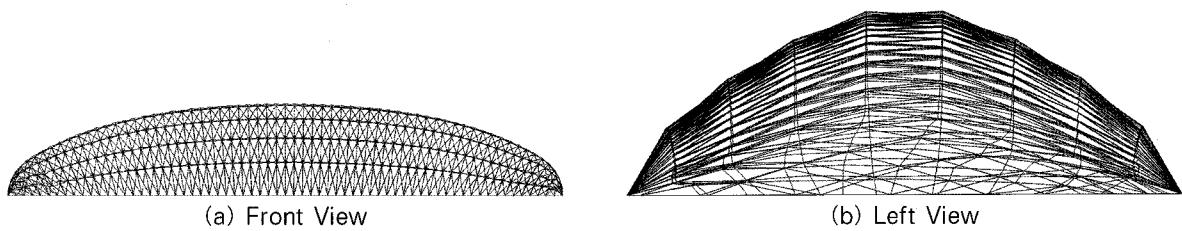
〈그림 4〉 Wind Load 및 Snow Load의 하중분포도



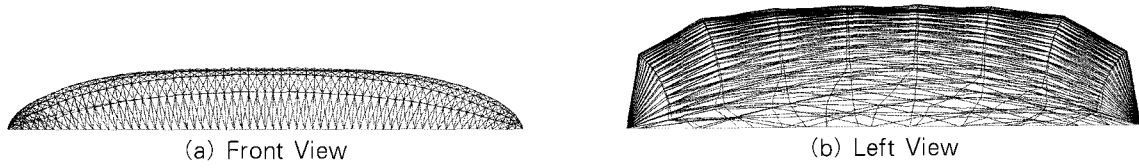
〈그림 5〉 하중조합 ADLCwx의 변형형상



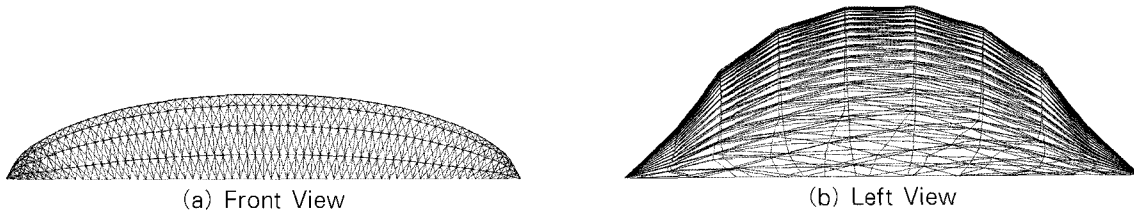
〈그림 6〉 ADLCwy1



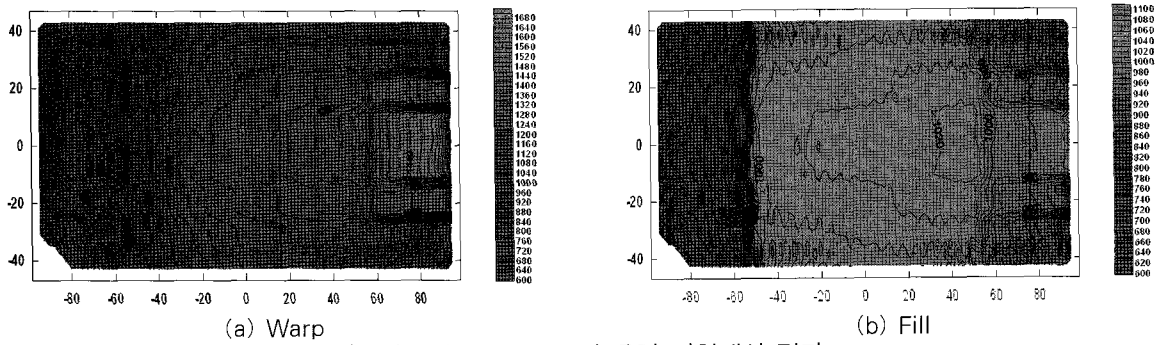
〈그림 7〉 하중조합 ADLCwp의 변형형상



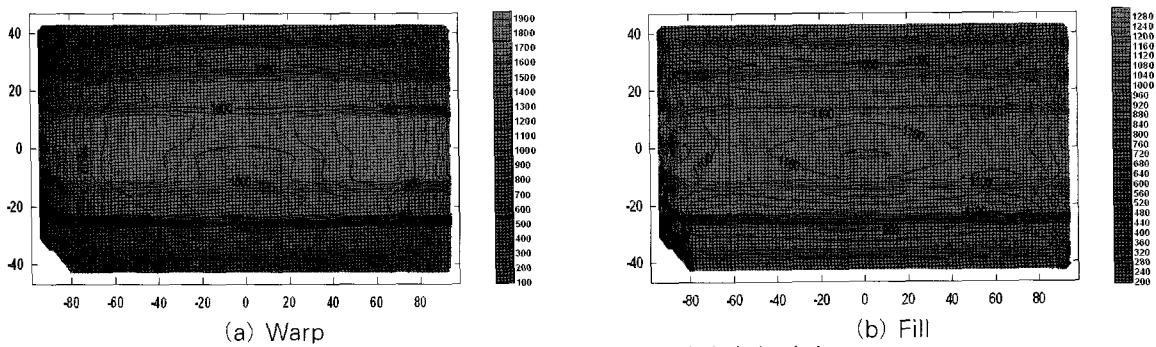
〈그림 8〉 하중조합 ADLCs60의 변형형상



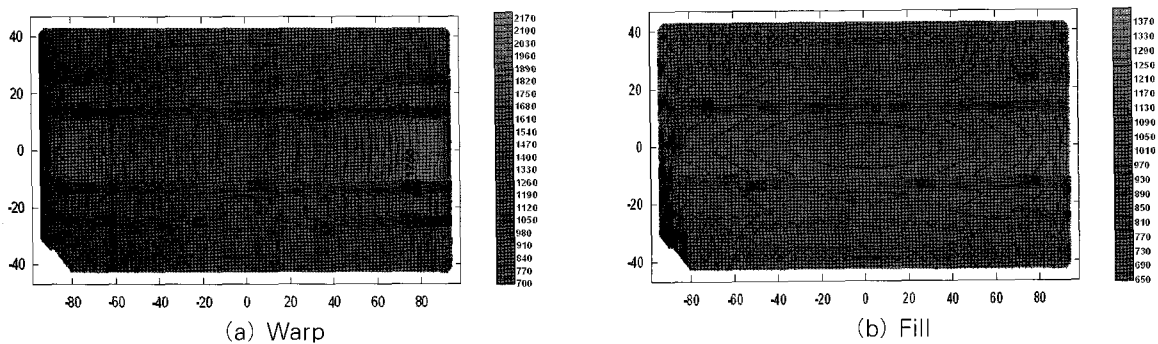
〈그림 9〉 하중조합 ADLCs40의 변형형상



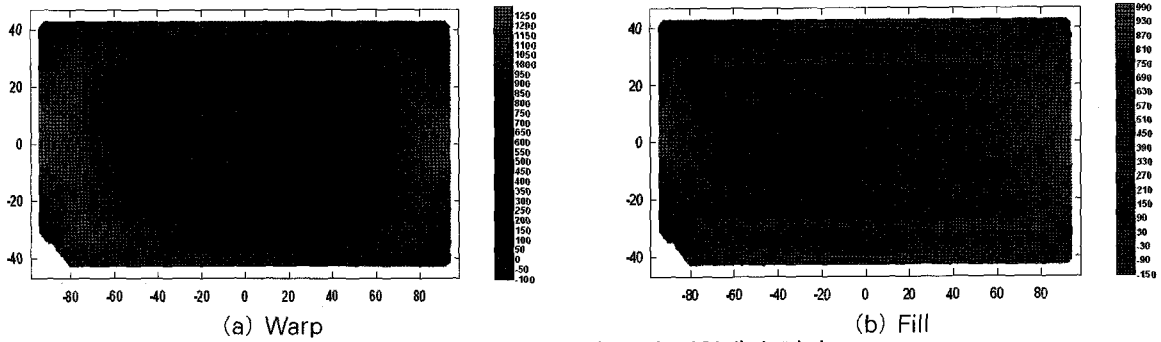
〈그림 10〉 ADLCwx의 응력-변형해석 결과



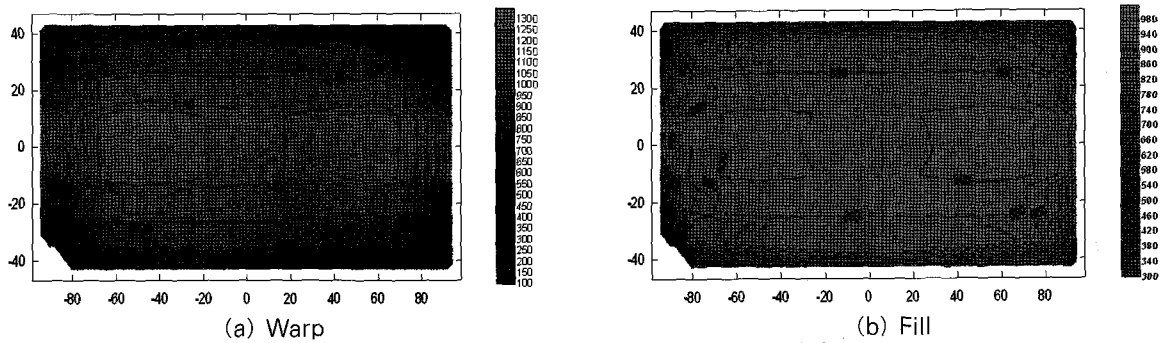
〈그림 11〉 ADLCwy의 응력-변형해석 결과



〈그림 12〉 ADLCwp의 응력-변형해석 결과



〈그림 13〉 ADLCs60의 응력-변형해석 결과



〈그림 14〉 ADLCs40의 응력-변형해석 결과

하중조합별 응력-변형해석을 통한 최대 막응력값을 <표 3>에 나타내었다. 설계하중조합 모두 Warp 방향의 최대응력이 Fill방향의 최대응력과 비교할 때 더 큰 값을 나타내며, 이는 막재료가 직교이방성의

〈표 3〉 최대 막응력

LOAD COMBINATION	ELEMENT NO.	MAXIMUM MEMBRANE STRESS(kgf/cm)	
		$\sigma_x$ (WARP)	$\sigma_y$ (FILL)
ADLCnml	1064	12.63	8.49
	1141	10.37	9.78
ADLCwx	1064	20.12	10.45
	1056	16.71	10.95
ADLCwy	1064	23.16	11.15
	1141	15.41	14.50
ADLCwdm	1064	27.68(Max)	12.43
	1141	18.99	16.67(Max)
ADLCs60	1064	13.70	8.75
	1141	11.57	10.74
ADLCs40	629	12.73	9.11
	1134	10.66	10.36

성질을 가지기 때문이다. 이상의 결과에서, 설계하중조합에 대한 최대 막응력은 하중조합 ADLCwp의 경우가 가장 크며, Warp방향은 27.68kgf/cm, Fill방향은 16.67kgf/cm로 나타났다. 해석대상구조물의 안전율을 살펴보기 위해 재료의 최대인장강도를 각각의 설계하중조합에 대한 최대 막응력 값으로 나누어 <표 4>에 나타내었다. <표 4>에 따르면, 장기의 경우 10.56(Warp)과 11.93(Fill)으로 장기하중에 대하여 안전율 8이상의 값을 가지며, 단기의 경우 4.82(Warp)와 7.00(Fill)로 단기하중에 대한 안전율 4이상의 값을 가짐을 알 수 있다.

〈표 4〉 막요소의 안전율

Yarn Direction	MAXIMUM STRESS (kg/cm)		FACTOR OF SAFETY	
	Long Term	Short Term	Long Term	Short Term
Warp	12.63	27.68	10.56	4.82
Fill	9.78	16.67	11.93	7.00



## 4. 결 론

본 논문에서는 단일공기막 구조물을 대상으로 하중조합에 따른 비선형 응력-변형 해석을 수행하였으며, 직교이방성을 고려한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 평형형상의 단일공기막 구조물은 외력에 의한 변형형상에 대해 자중이나 내압에 의한 영향보다 Snow Load나 Wind Load의 국부적인 하중벡터에 의해서 변형형상이 결정된다.
2. 설계하중조합에 따른 비선형 응력-변형 해석은 막재질의 직교이방성 성질이 잘 나타난 결과를 얻을 수 있었다.
3. 외력을 받는 단일공기막구조물의 최대 막응력은 설계하중의 조합에서 국부하중이 적용될 때 가장 크게 나타났으며, 본 논문의 예제에서 볼 때 Snow Load에 대한 영향보다 Wind Load의 영향이 크다.

이상과 같이 내압을 받는 단일공기막구조물의 비선형 응력-변형 해석 및 설계하중조합의 하중산정 및 적용에 관하여 살펴보고, 안전성을 검토할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. Li, C. T. and N. K. Srivastava, "Analysis of pneumatic shells with or without cable net ; General finite element formulation," Computer & Structures, Vol. 4, Pergamon press, 1974, pp.813-828
2. F. Otto, "Tensile Structures," Prentice-Hall, 1980
3. R. B. Haber, J. F. Abel, "Initial equilibrium solution methods for cable reinforced membranes Part2-Implementation," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, No.30, 1982 pp.285-306
4. Wilkinson C., "Supersheds," Butterworth Architecture, 1991
5. Peter Broughton & Paul Ndumbaro, The analysis of Cabel & Catenary Structures, Thomas Telford, 1994
6. 김승덕, 서일교, 최옥훈, 서삼열, 한상을, 대공간 구조물의 해석 및 설계, 교재 15-2, 한국전산구조공학회, 1997
7. 김승덕, "대공간 구조물의 비선형 해석기법," 한국전산구조공학회 특집기사, 1997.3, pp.7-18
8. 서삼열, 이장복, 권택진, "공기막구조물의 형상탐색해석에 관한 연구," 대한건축학회논문집 구조계, 14권5호, 1998.5, pp.285-292
9. 김승덕, 손수덕, 조병욱, 손승철, "비선형 해석프로그램 NASS-98을 이용한 연성 막구조물의 구조설계에 관한 연구," 대한건축학회학술발표논문집, 제18권 2호, 1998.10., pp.27-32
10. 대한건축학회, "건축물 하중기준 및 해설," 태림문화사, 2000
11. 이주나, 박선우, 김승덕, 박찬수, "연성구조시스템의 분류체계와 용어," 한국셀공간구조학회논문집, 제4권 제2호, 2004.6, pp.99-105
12. 김승덕, 정을석, 백인성, "직교이방성을 고려한 Barrel Vault형 지붕 막구조물의 비선형 구조해석에 관한 연구," 한국셀공간구조학회논문집, 제5권 제1호, 2005.3, pp.91-98