

膜構造 건축물의 구조설계

朴 沆 林*

1. 序言

최근 많은 건축가 및 엔지니어들이 膜構造의 뛰어난 조형성과 구조 및 시공상의 장점을 활용하여 膜構造를 대규모 공간에 적용하려 하고 있으며, 막구조 건축기술의 先進諸國에서는 많은 實驗的, 解析的 연구를 기초로 永久 建築物로서의 막구조가 실제로 많이 설계·시공되고 있다.

그러나 막구조는 해석·설계시에 그 구조적 특수성 때문에 일반 구조물과는 전혀 다른 해석·설계의 Flow를 가지게 된다(그림 1 참조).

따라서, 본 고에서는 전산 프로그램에 의해 膜構造를 설계할 경우, 각 解析 단계에서의 주요 내용을 기술하여 膜構造 구조설계에 대한 이해를 도모하고자 한다.

표1은 막구조 해석에 필요한 전산 프로그램의 요구기능을 나타낸다.

2. 膜構造 구조설계의 개요

膜構造의 구조설계는 우선 제1단계 해석으로, 구조적으로 膜應力の 平衡條件을 만족시키면서 설계자가 의도하는 曲面形狀에 가까운 형상을 구하는 初期 形狀解析을 하여야 하며, 제2단계는 막구조 시공 수순으로 부터 非可展 曲面을 평면 展開圖로 분할한 것에 의한 오차, 평면 전개도에

서 초기장력에 의한 막재의 伸縮量의 推定 誤差등을 고려하여 실제 시공시의 초기 平衡狀態를 해석하는 것이다. 제3단계는 앞서의 해석에서 얻어진 평형 곡면에 풍하중 또는 설하중의 외력이 작용할 때의 變形 및 膜應力을 구하여 막구조의 安定性을 평가하는 해석을 하게 된다.

이하에서는 각 해석 단계별 주요 내용을 기술한다.

3. 初期 形狀 決定解析

일반적으로 膜構造는 휨응력이나 막면에 수직으로 작용하는 不平衡力에는 저항할 수 없는 不安定 구조물에 속하며, 이러한 힘들은 막면에서의 적절한 Initial Prestress의 분포와 막면의 형상의 조절을 통해서 저항되어야 한다. 또한 막은 재료의 특성상 異方性的의 Creep하기 쉬운 재료이므로 초기 곡면에서의 장력에 편차가 생기면 재료는 Creep에 의해 스스로 等張力이 되려고 초기 설계 곡면과는 다른 큰 變形을 일으키게 된다. 따라서 초기 형상 결정해석은 構造的 安定性, 건축적인 미, 막재료의 경제적 사용등의 측면에서 다른 어떤 해석 과정보다 강조되어야 한다.

초기 형상 해석법으로는 Siev-Eidelman법, Force density법, Iterative Smoothing법, Non-linear displacement법 등 여러 해석법이 있으며, 한가지 해석법에 의한 近似解가 다른 해석법의

* (株)大宇 建設技術研究所, 所長

표 1. 막구조 해석에 요구되는 Program 기능

Requirements for Membrane Structures Analysis Programs	
Element Model	<input type="checkbox"/> Membrane element (3D) <input type="checkbox"/> Cable element (3D) <input type="checkbox"/> Beam, Truss element (3D)
Material Model	<input type="checkbox"/> Linear Elastic Anisotropic <input type="checkbox"/> Incompressible Elastic material Model <input type="checkbox"/> Nonlinear Elastic
Procedure	<input type="checkbox"/> Nonlinear Static Analysis <input type="checkbox"/> Transient Dynamic Analysis <input type="checkbox"/> Mode Frequency
Geometric Nonlinearity	<input type="checkbox"/> Large Displacement <input type="checkbox"/> Large Strain
Loading Type	<input type="checkbox"/> Concentrated Force <input type="checkbox"/> Pressure Load <input type="checkbox"/> Deformation Dependent Pressure <input type="checkbox"/> Initial Stress/Strain <input type="checkbox"/> Thermal Load <input type="checkbox"/> Body Load <input type="checkbox"/> Prescribed Displacement
Pre and Post-Processor	<input type="checkbox"/> Structural Model Generation <input type="checkbox"/> Automatic Mesh Generation <input type="checkbox"/> Automatic Load Adjustment <input type="checkbox"/> Interactive Graphics
Wrinkling Analysis	<input type="checkbox"/> Wrinkling analysis which considers wrinkling effect of elements when wrinkling occurs
Patterning Analysis	<input type="checkbox"/> Patterning analysis which determines the cutting pattern of the fabric cloth

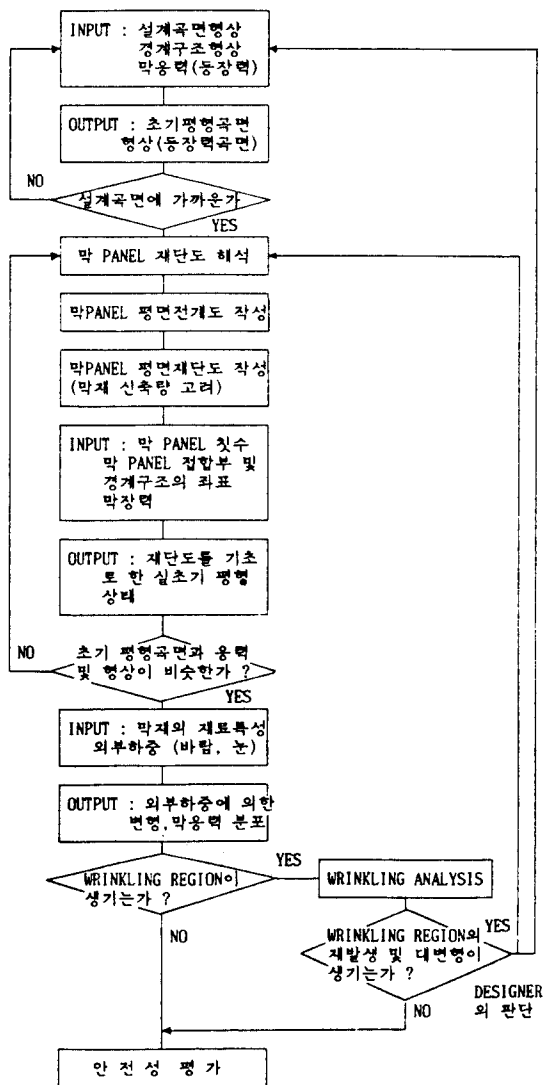
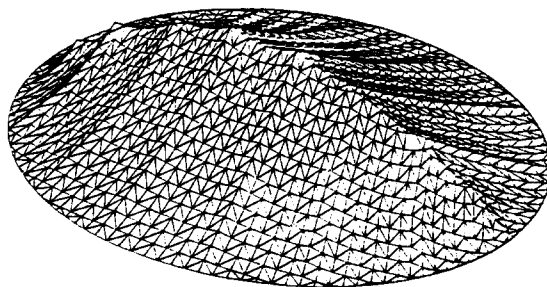


그림 1. 막구조 해석 Flow

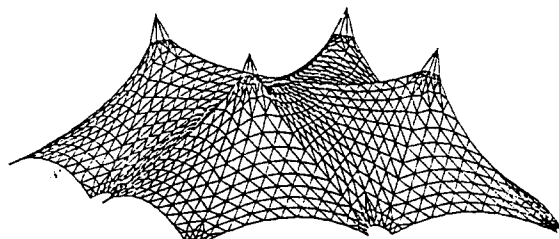
Input Data로 이용되면 보다 나은 해를 얻을 수 있다.

- 초기 형상 결정 해석시의 유의 사항으로는
- 幾何學的 대변형의 유도에 따른 막요소에서의 Membrane Locking 및 Shear Locking 현상이 생기지 않도록 해야 한다.
 - Cable 치환에 의한 경우, 異方性 막재를 적절하게 모델링하여야 한다.

등이다.



(a)



(b)

그림 2. 막구조의 형상해석 예

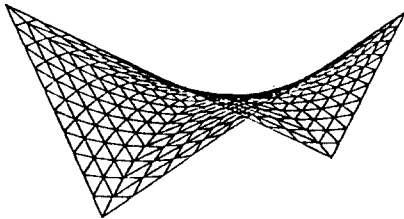
4. 膜裁斷圖 해석

형상해석은 막면의 張力을 가정해서 형상을 결정하므로, 막재단도 작성을 위한 곡면은 무장력 상태에서의 형태, 즉 막재의 初期伸張을 고려한 縮小率에 의해 줄어든 곡면이어야 한다. 이를 위한 방법으로는 장력 상태에서 얻어진 곡면에 대해 각 재단 展開圖를 만들어 각 재단 Strip에 대해 무장력시의 형태를 구하는 방법과 경계부의 위치를 설계상의 위치보다 내측에 설정하여 형상 해석한 결과를 그대로 無變形率 상태로서의 제작 곡면으로 하는 방법이 있다.

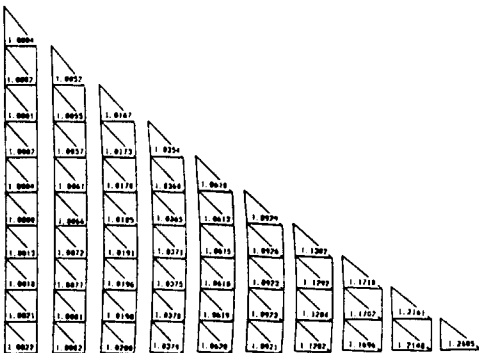
한편, 설계곡면에서 평면재단도를 구하는 방법으로는, 설계곡면에서 적당한 간격으로 測地線(Geodesic Line)을 구하고, 이 측지선군의 간격으로 부터 Strip의 폭을 결정하는 방법이있고, 또한가지는 3각형 유효요소를 사용한 형상해석 결과를 평면상에 3각형 요소를 병렬시켜 재단도로 하는 것이다.

막재단도 해석시 유의 사항으로는

- 막재료의 원단 폭(2~4m)을 고려, 막재가



a) 재단도 작성을 위한 요소분할



b) Strip의 평면전개

그림 3. 막재단도 작성예

남비되지 않도록 裁斷線을 고려한다.

- 裁斷線은 막면에 대해서, 국부적인 집중을 피하고, 균일하게 또한 수를 적게하며, 응력 집중등에 대한 배려로 매끈한 곡면이 되도록 해야한다.
- 膜纖維의 방향을 막면의 주응력 방향과 일치 되도록 재단도를 계획한다.
- 입체 재단도 작성시 막재료의 특성인 初期伸張을 반드시 고려하여야 한다.

등이다.

5. 應力·變形 해석

막구조의 응력·변형 해석시 적절하게 고려되어야 할 사항으로는

- 기하학적 非線形性
- 막재료의 非線形性
- 막재의 異方性
- 주름발생후의 해석(Wrinkling Analysis)
- 변형후의 작용하중

등이 있으며, 각 항목에 대해 경우에 따라 실용적으로 생략 가능한 것, 한정된 범위로 線形化할 수 있는 것도 있으며, 구하려는 정도와 안전측의 판정에 따라 항목을 결정한다.

일반적으로 막구조는 막재료는 선형으로 가정하고, 幾何學的 비선형성만 다루지만, 막과 Cable의 주름효과(Wrinkling Effect)를 고려하여 해석하여야 한다. 주름효과는 반복해석 과정에서 Stress Transfer Method에 의해 고려되는데, 이 과정의 定式化는 다음과 같다.

우선 요소의 각 Integration Point에서 주응력도(Principal Stress)는 다음식에 의해 Cartesian 성분 $\{\sigma\}$ 으로부터 구해진다.

$$\{\hat{\sigma}\} = [T]^* \{\sigma\}$$

여기서, $[T]^*$ 는 응력도 변환 매트릭스이다.

주응력도를 σ_1, σ_2 (단, $\sigma_1 \geq \sigma_2$)라고 하면, 요소의 주름 발생 상태를 고려하여, 다음 3가지 경우를 가정한다.

- (1) $\sigma_1 > 0, \sigma_2 > 0$ (주름발생 없음)

$$\{\sigma\} = [E] \{\epsilon\}$$

(2) $\sigma_1 < 0, \sigma_2 < 0$ (두방향 주름발생)

$$\{\sigma\} = \alpha [E] \{\epsilon\}$$

여기서, $\alpha \ll 1.0$ 이며 수치계산 과정에서 조정된다.

(3) $\sigma_1 > 0, \sigma_2 < 0$ (한방향 주름발생)

$$\{\sigma\} = [Ew] \{\epsilon\}$$

$$\text{여기서, } [Ew] = \begin{bmatrix} * & * & * \\ * & * & * \\ * & * & * \end{bmatrix} [A]^T \begin{bmatrix} * & * & * \\ * & * & * \\ * & * & * \end{bmatrix} [E] \begin{bmatrix} * & * & * \\ * & * & * \\ * & * & * \end{bmatrix} [A] \begin{bmatrix} * & * & * \\ * & * & * \\ * & * & * \end{bmatrix}^T$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\alpha} \end{bmatrix}$$

6. 結言

본 고에서는 막구조 해석·설계의 주요 내용을 각 해석단계별로 간략히 소개하였다. 막구조는

막이론 자신이 가진 近似性, 요소의 탄성 특성의 근사, 막면 요소로 곡면을 나타내는 幾何學的 근사등으로 구조물의 형태, 막재료의 특성등에 따라 해석시 오차가 발생하게 되며, 또한 구조설계 단계에서 막 판넬 제작 및 施工에 대한 고려가 되지 않으면 그 오차는 더욱 크게 된다. 따라서 향후, 보다 정확한 막구조의 설계를 위해서는 섬유직포에 코팅한 막재의 力學的 특성을 보다 잘 표현할 수 있는 막재모델의 定式化, 막재단도 해석시 無張力 상태의 설계곡면을 구하는 방법, 막판넬을 접합하고, 張力を 도입하는 시공과정을 고려한 實初期 平衡狀態 및 施工과정 해석법에 대한 연구가 계속되어야 한다. 또한 초기형상 해석에서 시공과정 해석까지 전 설계가정을 공통 Data Base에서 一貫 作業이 가능하도록 膜構造 統合 設計 System의 개발이 필요하다.