Journal of the Korean Association for Spatial Structures
Vol. 7, No. 2 (통권 24호), pp. 115~124, April, 2007

건축 설계프로세스와 형상해석을 통한 막 구조물의 형상결정 방안에 관한 연구

A Study on the Shape-Decision Technique of Membrane Structures According to the Design Process and Shape Analysis

박 선 우* 김 승 덕** 손 수 덕*** 정 을 석****
Park, Sun-Woo Kim, Seung-Deog Shon, Su-Deok Jeong, Eul-Seok

요 약

막 구조물을 설계하기 위해서는 우선 초기장력 도입으로 인한 구조물의 형상을 정확히 알아야 한다. 이를 위해서 모형을 통한 모델링이나 컴퓨터를 이용한 형상해석이 요구되며, 초기장력의 도입으로 형성되는 막 구조물의 곡면은 일반적으로 등장력 곡면이다. 이와 같은 특성을 가진 막 구조물은 모형만을 대상으로 형상을 구할 때에는 정량적으로 형상의 정보를 얻기가 힘들고, 형상해석만을 수행한 경우는 예기치 않은 문제가 발생하기도 한다. 또 설계자의 의도에 따른 형상은 실질적으로 등장력 곡면에 부합되지 않는 경우가 많고, 심지어 실현 불가능한 형상도 발생한다. 따라서 설계프로세스에 따른 구조물의 형상에 부합되면서 실현가능한 형상으로의 초기형상 결정과정은 막 구조물의 설계에 있어서 무엇보다 중요한 과정이다.

본 연구에서는 건축 설계프로세스에 따른 모델링과 수치적 형상해석과의 결과에 대한 차이를 살펴보고, 피드백 과정을 통하여 막 구조물의 초기형상을 결정하는 프로세스에 대해서 연구한다.

Abstract

The initial shape is arrived at by a self-formation process, which accomplishes a form in the natural world, or is determined analytically by considering the equilibrium of initial stress only. Therefore, the self-formation process, which accomplishes a form in the natural world is grasped and the types of modeling techniques available to find the shapes of soft structures are well investigated and classified. To establish a form-finding modeling techniques, the models of string, soap film, fabric, rubber, plaster, and etc. are used. These modeling techniques can be used as a method of understanding the characteristics of structures when the material of model shows similar characteristics. Generally, the model test confirms the structure based on numerical analysis, at the same time it is important preceding process to develop such a program. With the above process, the relationship between model test and numerical analysis becomes a feedback process. Therefore, in this study, two examples which have been accomplished from such a technique are investigated and considered according to modeling process.

키워드 : 막 구조물, 설계프로세스, 형상해석, 초기장력

Keywords : *Circular Steel Piers, Diaphragm, Elastic-Plastic Finite Element Analysis, Seismic Performance, Energy Dissipation.*

1. 서 론

국내의 대규모 막구조 건축물 시공실적은 2002년 월드컵을 정점으로 그 수가 현저히 줄어든 상태이고, 최근의 불투명한 경기전망으로 인해 대공간구조의 미래 역시 예측하기 힘든 실정이다. 그러나 체육시설 외에 다수의 중·소규모 상업시설에서는 막구조의 도입이 오히려 증가되고 있는 현상으로 볼 때, 경기활성화에 따른 수요증대와 국가기반사업의 시행 등에 대비한 기술축적의 필요성은 꾸준히 제기되고 있다.

연성 구조물은 축강성은 강하고 휨 강성이 매우 작은 재료를 주 구조재로 사용하므로 초기강성에 매우 민감한 구조체이다. 또 연성 구조물중의 하나인

* 정회원, 한국예술종합학교 미술원 건축과 교수, 공학박사
Tel : 02-746-9624 Fax : 02-746-9615
E-mail : psw@knua.ac.kr
** 정회원, 세명대학교 건축공학과 부교수, 공학박사
E-mail : sabinus@semyung.ac.kr
*** 정회원, 경북대학교 건축공학과, 공학박사
****학생회원, 세명대학교 건축공학과, 공학석사

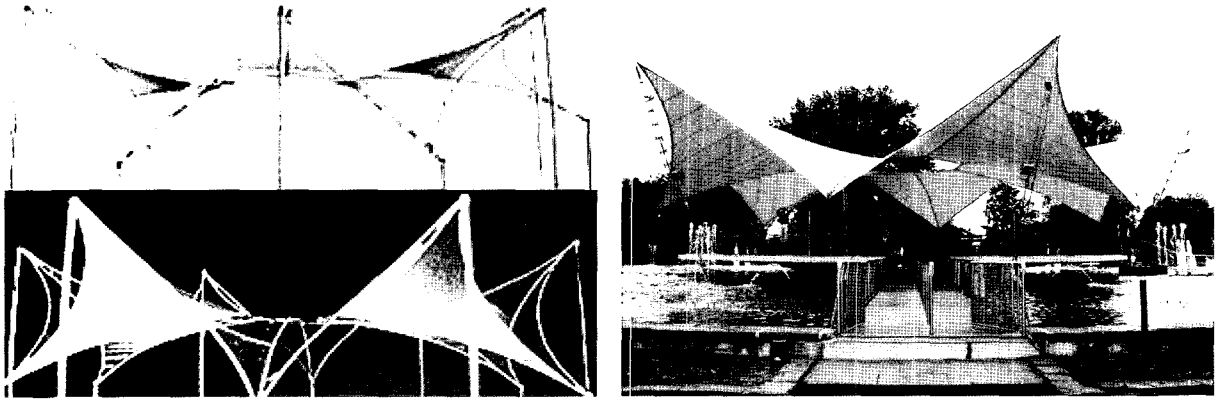
막구조는 구조물의 해석과 설계에 있어서 기존의 강성구조물과는 다른 형상해석, 응력-변형해석, 재단도 작성의 3단계 과정이 요구되어진다. 이 중 형상해석은 초기응력의 도입으로 인한 3차원 공간상의 등장력 평형 형상을 결정하는 중요한 단계이다.

자연계의 관찰을 통한 구조형상결정방법들은 구조물의 정창방식이나 구조형식 등에 따라 다양한 형태의 방법론이 제기되었다. 그 예로 쾰른의 연방가든박람회(1957년)에서 이용된 험프형 파빌리온이나 탄젠부르렌<그림 1> 막구조는 비누막 모델링을 통해 힘의 전달에 필요한 최소면적과 가장자리의 파형을 얻어 적용한 결과이고, 함부르크 국제가든박람회(1963년)의 웨이브홀<그림 2>은 실험을 통해 막에 집중되는 인장력에 대한 문제점을 밝혀내어 시공 시 보완하여 처리되었다. 이 외에도 모나스트리 야외극장(1967년), 슈트트가르트 중앙철도역(2000년)등의 다양한 구조물에서 구조모델링의 방법을 제시하여 형상을 결정하였다.

등장력 평형상태인 막 구조물의 곡면은 구조모델링이나 형상해석을 통해서 초기형상을 결정한다. 그러나 구조모델링만을 대상으로 초기형상을 결정할 때는 정량적으로 형상의 정보를 얻기가 힘들고, 형상해석만을 수행한 경우는 예기치 않은 문제가 발생하기도 한다. 또 설계자의 의도에 따른 형상은 실질적으로 등장력 곡면에 부합되지 않는 경우가 많고, 심지어 실현 불가능한 형상도 발생한다. 따라서 설계프로세스에 따른 구조물의 형상에 부합되면서 실현가능한 형상으로의 초기형상 결정과정은 막 구조물의 설계에 있어서 무엇보다 중요한 과정이다.

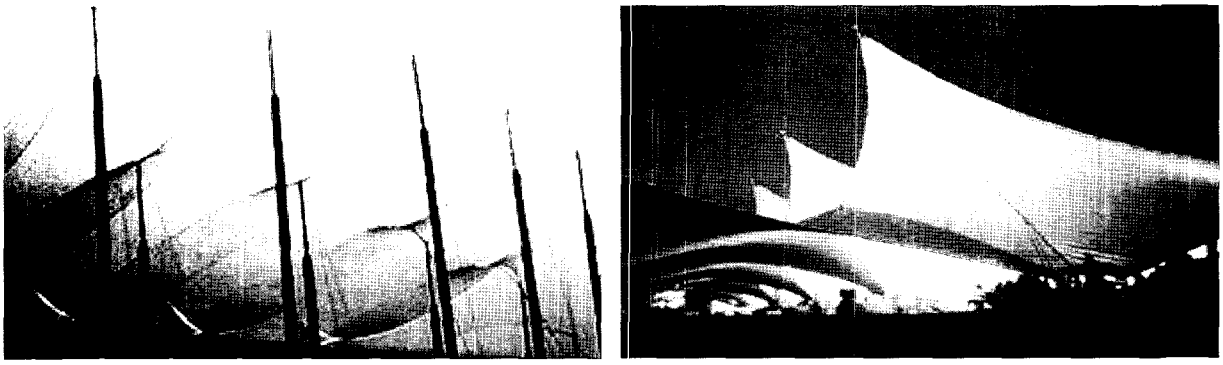
본 연구에서는 건축 설계프로세스에 따른 구조모델링과 수치적 형상해석과의 피드백 과정을 통해 결정형상을 살펴보고, 막 구조물의 초기형상을 결정하는 프로세스에 대해서 연구한다.

구조모델링에서 제안된 모델에 대하여 수치적 해석을 수행하고, 시뮬레이션 결과를 통해 발견된 문제점을 다시 모델링에 반영하는 과정에서 발견된 문제점



(a) 모델 (b) 전경

〈그림 1〉 Tanzen Brunnen



(a) 모델 (b) 전경

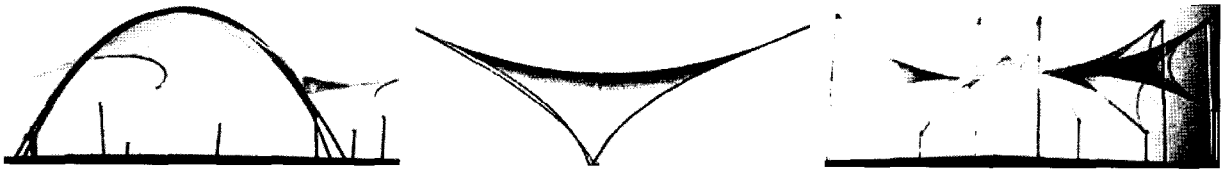
〈그림 2〉 Great Wave Hall

들을 보다 더 합리적이고 공학적인 방법으로 해결하여 실제 구조물에 반영하는 과정에 대해서 살펴본다.

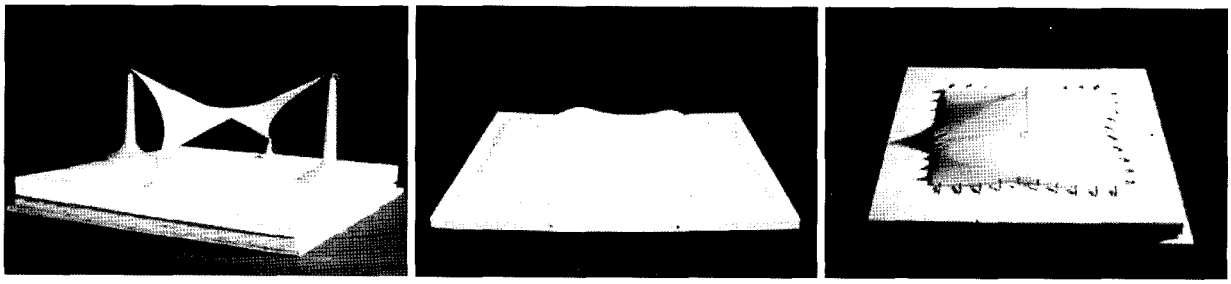
2. 구조모델링과 형상해석

2.1 막 구조물의 구조모델링 기법

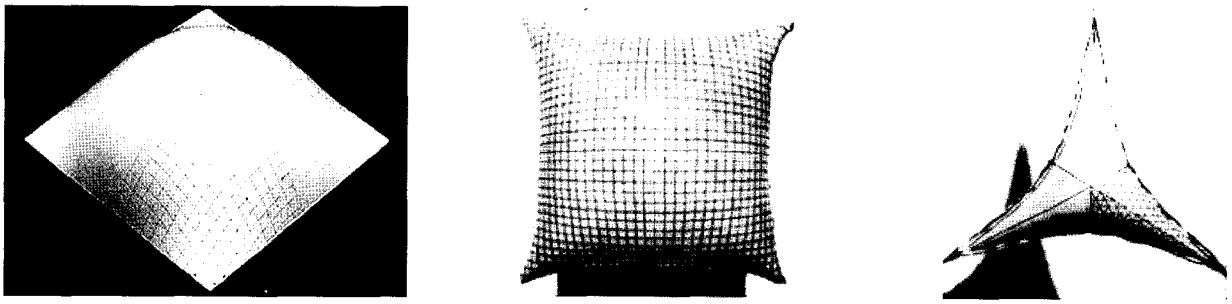
막과 케이블네트구조 등의 형상탐색 모델로는 최소면을 갖는 비누막 모델링을 이용할 수 있다. 비누막은 구형 또는 경계를 가진 형태로 얇은 와이어나 실을 이용하여 형성할 수 있으며, 프레임형 막구조 등에 많이 이용할 수 있다. 또 섬유막 모델링 또한 비누막 모델링과 유사한 방법으로 사용될 수 있으며, 여러 가지 형상을 비누막 모델보다 쉽게 형태에 접근할 수 있다. 이 외에도 고무막 모델이나 플러스터 성형 모델링, 현수모델의 상하반전 모델링 열가소성 재료를 사용한 기법 및 압축공기를 불어넣어 팽창시키는 공기 막구조 모델링 방법이 있으며, 실



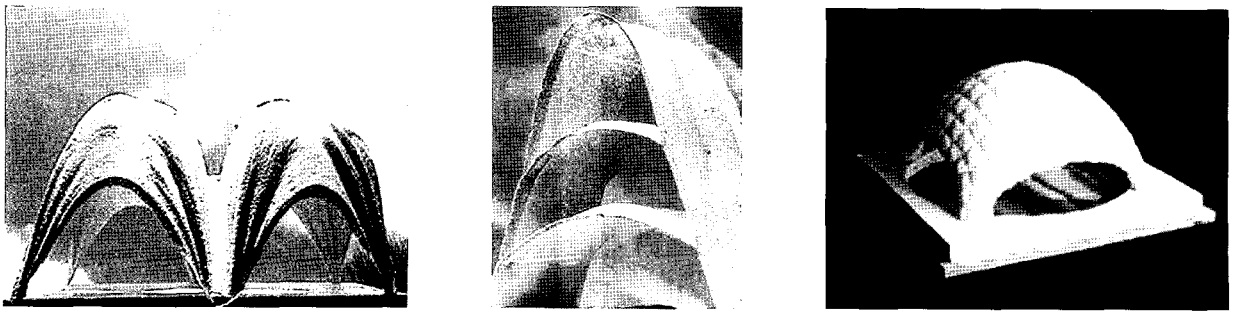
〈그림 3〉 비누막 구조모델링



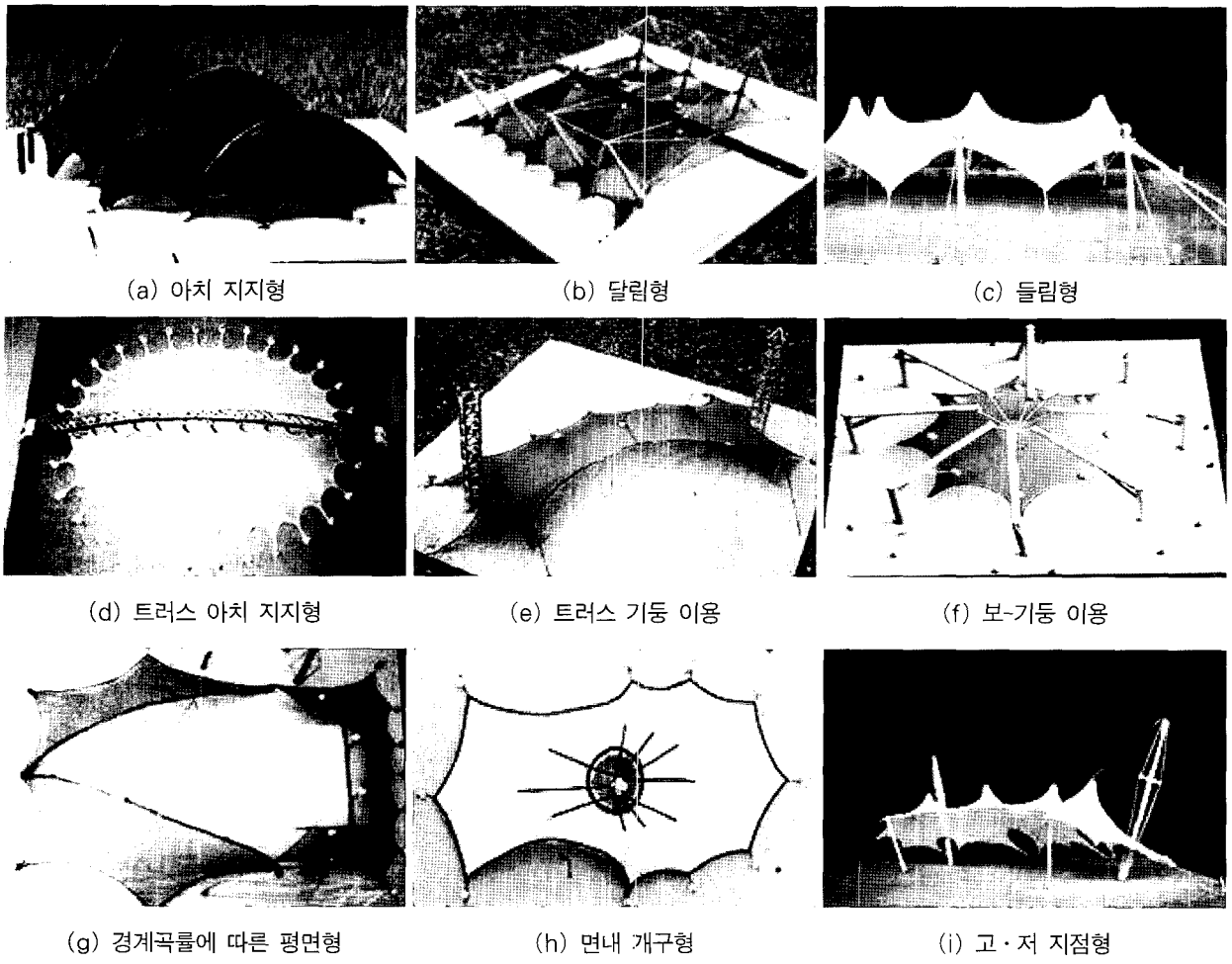
〈그림 4〉 섬유막 구조모델링



〈그림 5〉 고무막 구조모델링



〈그림 6〉 플러스터 구조모델링



(a) 아치 지지형 (b) 달림형 (c) 들림형

(d) 트러스 아치 지지형 (e) 트러스 기둥 이용 (f) 보-기둥 이용

(g) 경계곡률에 따른 평면형 (h) 면내 개구형 (i) 고·저 지점형

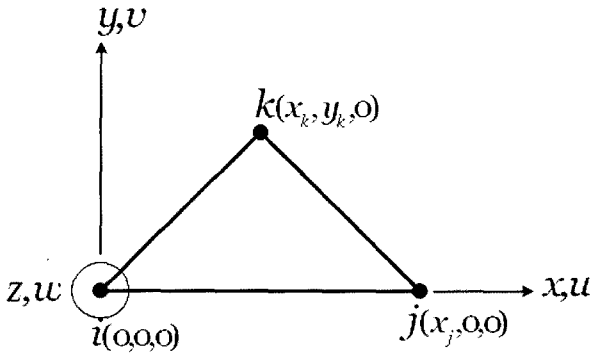
〈그림 7〉 섬유막 구조형식별 구조모델링

제 구조물의 형식에 따라 여러 방법을 조합하여 구조모델링 할 수 있다<그림 3~그림 6>.

공기 팽창식이나 프레임 형 등은 비누막이나 압축공기를 이용하여 형태를 탐색할 수 있으나, 현수막 또는 달림형이나 들림형의 하이브리드 막 구조의 경우는 스타킹과 실을 이용한 섬유막을 모델링을 하는 것이 편리하다. 구조모델링과정 중에서 응력의 분포가 동일하게 형성되도록 유의하여야 하며, 섬유막 구조모델링을 구조형식에 따라 분류하면 <그림 7>과 같고, 이를 이용하여 다양한 형태의 구조를 모델링할 수 있다.

2.2 막 요소의 정식화

수치적 방법을 이용하여 등장력 곡면을 탐색하는 형상해석방법은 기하학적 비선성형을 고려한 막 요소를 이용하여 평형상태를 찾아간다. 본 연구에서



〈그림 8〉 막요소의 요소좌표계

채택된 비선형 막요소는 삼각형 요소를 사용하며 <그림 8>과 같은 좌표계와 자유도로 정의된다.

기하학적 비선형성을 고려하기 위해서 변형도-변위 관계식을 다음과 같이 비선형항을 포함한 식으로 채택한다.

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

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

$$\begin{Bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \tau_{xy}\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}\frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{21}E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0\\ \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0\\ 0 & 0 & G_{12}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \gamma_{xy}\end{Bmatrix} \quad (2)$$

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

$$\int\int\int_V [(\sigma_x^{(0)} + \sigma_x)\delta\varepsilon_x + (\sigma_y^{(0)} + \sigma_y)\delta\varepsilon_y + (\tau_{xy}^{(0)} + \tau_{xy})\delta\gamma_{xy}]\,dV = (f^{(0)} + f)^T\delta d \quad (3)$$

이상의 관계식과 가상일의 방정식을 이용하여, 고차항이 생략된 접선강성방정식을 유도하면 불평형력과 함께 다음과 같이 전체좌표계에서의 증분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$F - R = T^T[k_E + k_G]\,T\,D = [K_E + K_G]\,D \quad (4)$$

여기서,

$K_E = T^T k_E T$:전체좌표계에서의 탄성강성행렬

$K_G = T^T k_G T$:전체좌표계에서의 기하강성행렬

위의 증분형 강성방정식을 이용하여 비선형 형상탐색을 수행하여 등장력의 평형 상태를 탐색한다.

3. 막 구조물의 형상 결정 프로세스

구조모델링과 수치적 형상탐색을 통한 막구조물의 형상 결정 프로세스를 살펴보기 위해서 본 절에서는 강성지지 현수막구조 모델(RS-06)과 달림형 하이브리드 막구조 모델(RS-09)을 선정하여 적용하여 본다.

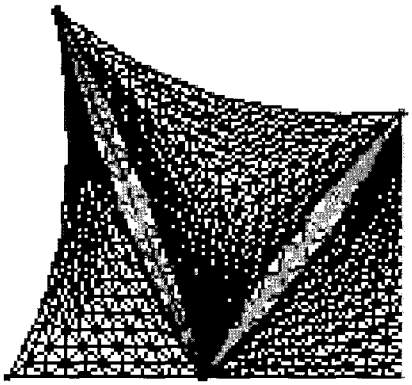
설계프로세스에 따른 형상의 1차 구조모델링과 이에 대한 형상의 수치적 탐색을 수행하고, 발견된 문제점과 개선점을 바탕으로 2차 구조모델링 및 수치적 탐색을 통해서 형상을 결정한다.

3.1 강성지지 현수막구조 모델(RS-06)

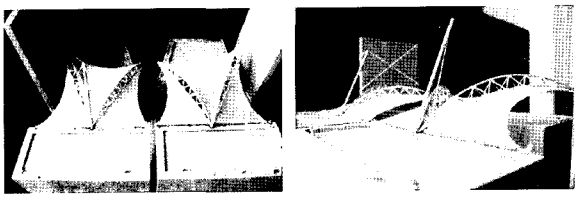
<그림 9>와 같은 강성지지 현수막 구조의 초기 설계안을 통한 형상해석의 수행결과에 대해서 섬유막 구조모델링을 테스트 한다. 모델링에 사용되어지는 재료는 스타킹, 실 및 목재 봉을 이용하며, 모형을 통해 형상을 관찰한다.

실제 모델링된 막구조물 RS-06은 동일한 두 유닛이 나란한 형태로 배치되어 있지만 해석은 두 유닛의 동일한 거동을 기대하여 하나의 해석모델만으로 수행되었다. 그러나 두 유닛이 상호작용하여 예기치 못한 결과를 초래할 수도 있고, 전반적인 거동을 확인하기 위해서는 실제 형상과 유사한 구조모델이 필요한 것으로 판단하고 100:1 규모의 축척으로 모델을 제작하였다.

구조모델은 섬유막 모델링 기법을 이용해서 계획된 평면과 막의 테두리 지지조건을 확인해 가면서 제작하였고, 제작된 구조모델을 통해 관찰한 사항은



〈그림 9〉 RS-06모델의 초기설계안



〈그림 10〉 RS-06모델의 1차 구조모델링

형상해석의 결과와 비교·분석하기 위하여 촬영이 병행되었다. RS-06의 형상해석과 제작된 구조모델 테스트를 통해 그 형태를 고찰하고 비교한 결과는 <그림 10>에 제시하였다.

고찰 결과 확인된 형상해석의 가장 큰 문제점은 두 유닛이 접하는 경계면의 막 형상으로 분석되었다. 막 가장자리의 모든 방향에서 곡률반경이 같으면 막 인장이 균일하여 테두리는 동일한 원호를 그리지만, 그렇지 않은 경우는 다른 형태를 보이게 된다.

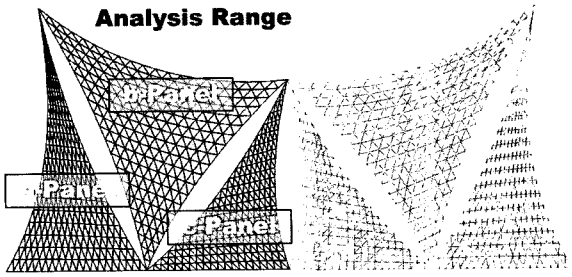
이에 비해 초기설계안인 <그림 9>의 모델에서는 이 사항이 반영되지 않은 상태로, 두 유닛이 접한 경계면을 직선으로 처리하였고, 결국 이 형상에서 확인된 초기설계안의 막 응력은 집중과 분포형태가 올바르지 않다고 할 수 있다.

RS-06모델의 1차 모델링 테스트를 통해서 실제에 가까운 막의 형상을 확인할 수 있었다. 그러나 경계면의 정확한 형상의 정보는 모형 특성상 정밀도가 높은 정량적인 값을 얻을 수 없고, 또 경계부의 Seg 값에 따른 케이블의 장력상태는 수치적 해석을 통해서 검토되어져야 한다.

RS-06모델의 1차 구조모델링에 대한 형상해석을 수행하기 위해서 먼저 <그림 11>과 같이 세 개의 패널로 분리하여 해석을 수행한다. 형상탐색에 있어서 강성지지 현수막의 경우 결정형상의 가장 큰 변수는 경계부분의 지지방식에 따라 결정된다. 경계면이 골조로 형성될 경우는 골조의 형태에 따라 막구조물의 형상이 결정되나 케이블에 의해서 경계면이 형성되는 경우는 케이블의 장력에 의해서 Sag가 결정되므로 <표 1>과 같은 초기장력의 경우를 적용하여 해석결과를 검토한다.

형상탐색을 위해서 RS-06 모델의 각각의 패널은 231개의 절점과 400개의 비선형 Membrane 요소 및 20개의 비선형 Cable 요소로 모델링된다.

RS-06의 케이블 초기장력에 따른 형상해석 수행결



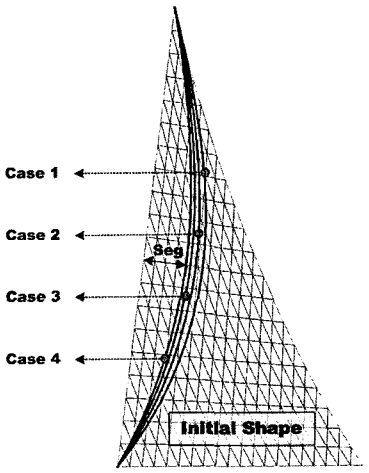
〈그림 11〉 RS-06 모델의 형상해석 영역

〈표 1〉 RS-06 모델의 초기장력

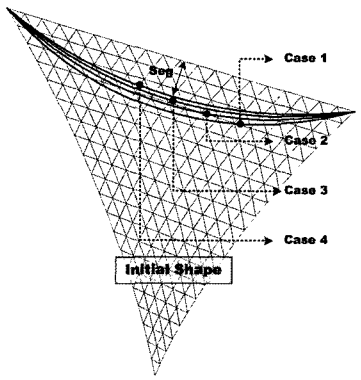
	막 장력	케이블 장력
Case 1	200 kgf/m	4000 kgf/m^2
Case 2	200 kgf/m	4500 kgf/m^2
Case 3	200 kgf/m	5000 kgf/m^2
Case 4	200 kgf/m	5500 kgf/m^2

과 <그림 12~14>와 같은 형상을 얻을 수 있었다. 케이블의 초기장력이 증가함에 따라 케이블의 Seg량은 감소하였으며, 설계자의 의도에 따라 경계면의 곡률에 따른 초기장력을 설정할 수 있다.

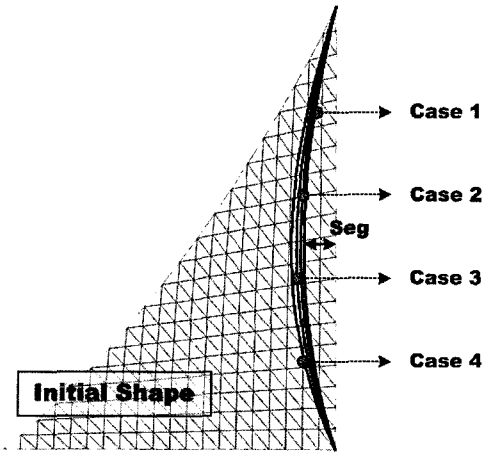
RS-06의 2차 구조모델링은 1차 구조모델링과 형상해석에서 보안된 사항을 적용하여 테스트 하였다. 해석결과에 따른 구조모델링은 하부 건축부분을 제외하고 재단도에 따라 막구조물 부분만을 제작하였다. 두 유닛은 분리된 상태로 100:1 규모의 축척으로 제작되었고, 형상해석의 결과와 비교하였다. 섬유막 모델링 기법을 기본으로 하고 성형 기법을 응용하여 제작하였으며, 모델링 재료는 로얄지와 목재봉 및 레진이다.



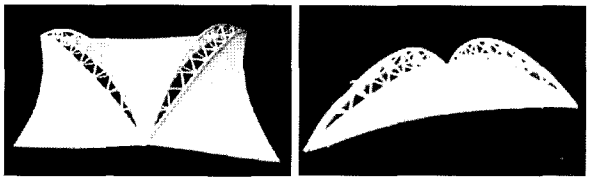
〈그림 12〉 a-Panel의 초기장력에 따른 형상해석



〈그림 13〉 b-Panel의 초기장력에 따른 형상해석



〈그림 14〉 c-Panel의 초기장력에 따른 형상해석



〈그림 15〉 구조모델링 2차 테스트 후의 막 형상

제작된 구조모델을 통해 관찰한 사항은 형상해석의 결과와 비교·분석하기 위하여 1차의 경우와 동일하게 촬영이 병행되었고, 막구조물 RS-06의 형상해석과 제작된 구조모델 테스트를 통해 그 형태를 고찰하였다. <그림 15>의 해석모델은 1차 테스트에서 지적된 사항인 두 유닛의 경계면 곡률이 수정된 상태이고, 구조모델은 막재의 재단도에 따라 제작한 것이다.

고찰 결과, 해석모델과 구조모델은 거의 흡사한 곡률의 막 형상을 보이고 있다. 이것은 1차 테스트에서 지적된 두 유닛이 접하는 경계면의 막 형상이 적절하게 수정되어 해석에 반영되었고, 재단도의 형상 역시 적절한 것을 의미한다. 이 상태로 해석된 막재의 응력은 실제 막구조물의 상태와 유사할 것으로 판단된다.

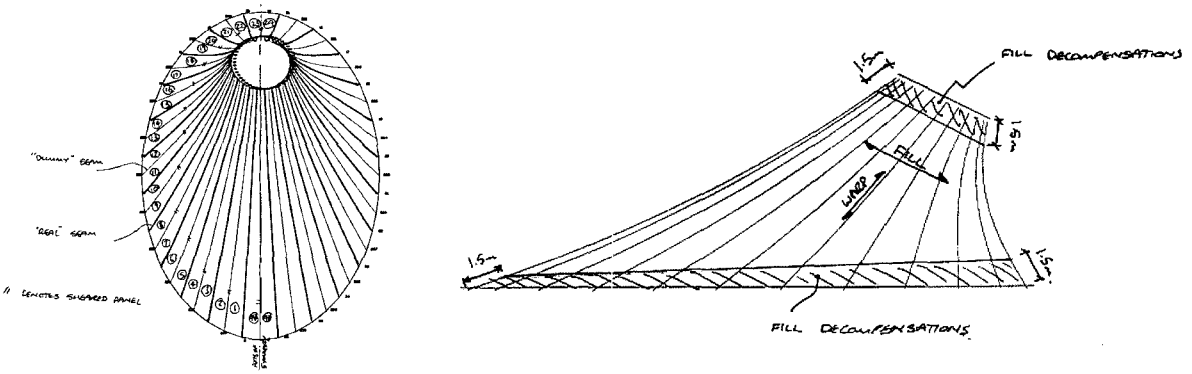
3.2 달림형 하이브리드 막구조 모델(RS-09)

막구조물 RS-09는 큰 타원을 그리는 막의 테두리를 철골프레임으로 지지하고 막의 1개 고점을 역시 철골로 제작된 타워의 상부에서 당기고 있는 전형적인 달림형 하이브리드 막구조로 분류된다. 막구조물 RS-09의 초기 설계안은 <그림 16>과 같고 초기 설계안에 대한 1차 구조모델링 테스트를 통해서 설계안에서 간과되어지는 현상에 대해 관찰해 본다. 초기 설계안의 형상해석에서는 당김 케이블과 철골타워 및 테두리 지지구조가 포함하지 않았으며, 실제 계획된 막구조물의 형상과 유사하게 100:1 규모의 축척, 섬유막 모델링 기법을 이용해서 계획된 평면과 막의 테두리 지지조건을 확인해 가면서 제작하였다.

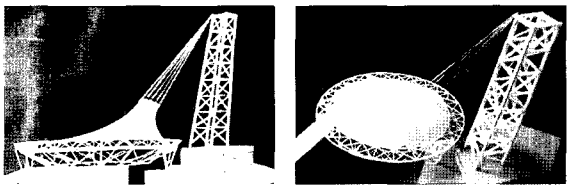
RS-09의 형상해석과 제작된 구조모델 테스트를 통해 그 형태를 고찰한 결과는 <그림 17>에서 확인된다. 측면에서 바라본 막의 형상을 보면 RS-09의 초기설계안과 구조모델에서 두드러지는 차이를 발견할 수 있는데, 설계안의 경우는 막의 곡률이 거의 없는 상태로 계획되어 있다. 그러나 구조모델을 통해 고찰한 결과, 이와 같은 형상은 보강 프레임이나 케이블을 추가하지 않은 상태에서는 얻을 수 없는 형상인 것으로 드러났다.

따라서 이 결과에 대한 해결책들이 제기될 필요가 있었는데, 본 모델에서 선택된 방안은 계획된 형상을 유지하기 위해 케이블들을 배치하고 사전가력하는 것이었다. 막구조물 RS-09의 구조모델을 이용한 1차 테스트 결과를 통해서는 문제점을 발견하여 설계안을 변경하는 대신, 이것을 유지하기 위해서 필요한 사항을 2차 모델링에 반영한다.

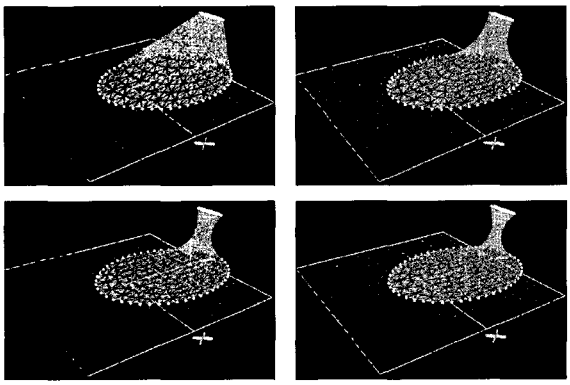
구조모델의 모형을 통해 확인된 형상은 설계안과 비교할 때 곡률의 차이가 있었다. 이 과정에서 나타나는 문제점을 정량적으로 살펴보기 위해서 테스트 모형을 수치적 모델링을 하여 형상해석을 수행한다.



〈그림 16〉 RS-09 모델의 초기설계안



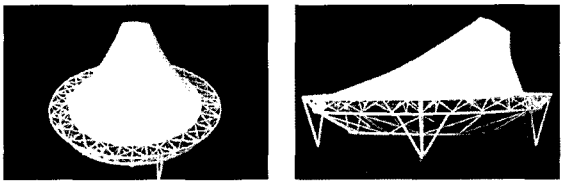
〈그림 17〉 구조모델링 1차 테스트 후의 막 형상



〈그림 18〉 RS-09 모델의 1차 구조모델링 안에 대한 형상해석

곡면의 곡률 변화에 대한 영향을 분석하기 위해 해석단계별 형성곡면을 시뮬레이션하고 모형에서 나타나는 형상을 비교한다. 여기서 막의 초기장력은 200kgf/m를 도입하여 해석을 수행하였고, 해석결과는 <그림 18>과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 해석스텝이 증가 할수록 형상은 발산되어 진다. 또 케이블의 보강이 없이는 폰딩 현상도 유발될 수 있음이 드러났다.

막구조물 RS-09의 구조모델링을 이용한 2차 테스트는 1차 테스트 과정에서 지적된 문제점과 제시된 해결책이 합리적으로 반영되었는지를 확인하고, 이 과정에서 발생할 수 있는 오류를 재차 점검하고 최종 구조물의 형상을 도출하기 위한 목적으로 수행



〈그림 19〉 구조모델링 2차 테스트 후의 막 형상

되었다.

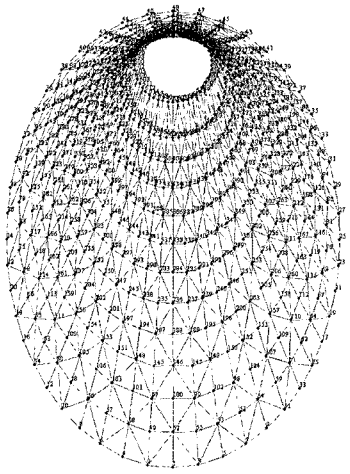
막구조물 RS-09의 재단도에 의한 형상과 제작된 구조모델의 형태를 <그림 19>에 나타내었다. 1차 테스트에서 지적된 바와 같이 RS-09의 설계안은 막의 당김에 의해 발생하는 곡률을 사전 가력된 케이블의 보강으로 억제하는 것으로 유지된다. 이에 따라 재단도가 작성되었고, 구조모델에서도 이 점을 반영하여 곡률이 발생하지 않도록 보강한 상태로 제작하였다. 구조모델을 통해 고찰한 결과, 계획안과 재단도의 형상은 케이블 보강이 추가되었을 때 나타날 수 있는 형상인 것으로 확인되었다.

2차 모델링 테스트 과정에서 등장력 곡면의 형성에 대한 정량적 평가를 형상해석을 통해 확인하고, 케이블의 보강에 따른 보완에 대해 초기장력을 조정하여 형상 변화 과정을 시뮬레이션 한다.

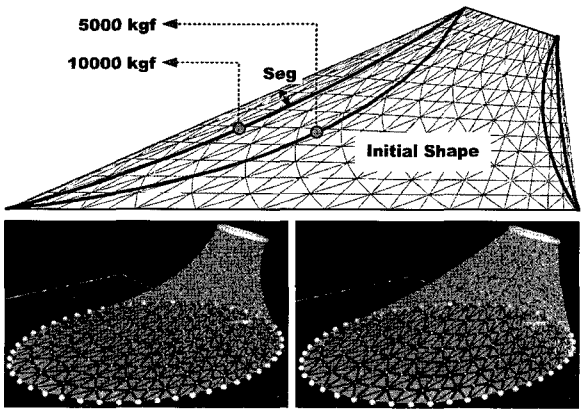
형상탐색을 위한 RS-09 모델의 초기자료를 <그림 20>과 같이 설정한다. 여기서 각각의 패널은 624개의 절점과 1,152개의 비선형 Membrane 요소 및 288개의 비선형 Cable 요소로 모델링된다.

스타킹을 재료로 한 테스트 모델은 설계안과 비교할 때 형상의 곡률 차이를 다소 보였고, 이 과정에서 설계안의 곡면은 케이블의 보강이 없이는 형성할 수 없는 모델임을 알 수 있었다.

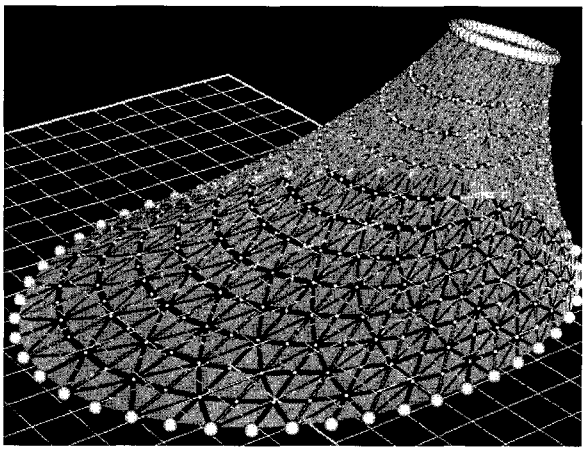
설계안을 만족하는 곡면을 형성하기 위해서는 케



〈그림 20〉 RS-09 구조물의 해석모델



〈그림 21〉 케이블 보강 막구조 모델의 형상해석



〈그림 22〉 RS-09 모델의 최종 설계 형상

이블 보강에 따른 형상 변화를 살펴보고 또 이를 적용하였다. 여기서 케이블의 장력은 5000kgf 및 10000kgf를 적용하여 형상해석을 수행하며, 해석결과는 <그림 21>과 같다.

두 차례에 걸쳐 구조모델링과 형상해석을 이용한 형상결정 프로세스과정은 RS-09 모델의 케이블 보강 달림형 하이브리드 막 구조물로 결정되어졌고 해석결과 최종 형상은 <그림 22>와 같다.

이와 같이 구조모델을 이용한 형상탐색 결과에 따라서 설계안의 형태를 유지하기 위한 방안이 모색될 수 있고, 합리적인 해결책을 찾을 수 있다.

5. 결 론

막구조 건축물의 초기형상을 결정하기 위해서 본 연구에서는 설계프로세스에 따른 구조모델링 기법을 적용하고 형상탐색을 통하여 시공 가능한 형상을 구하는 형상 결정 프로세스를 제시하였다. 프로세스에 따라 두 모델에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 구조모델기법과 형상탐색을 통한 막 구조물의 형상결정 프로세스는 설계자의 초기설계안의 형태에 따른 문제점을 효율적으로 검토할 수 있다. 본 논문에서 적용된 RS-06 및 RS-09모델 모두 형상의 보안된 사항에 대한 정량적 평가를 구할 수 있었다.
2) 구조모델기법을 적용한 모델링은 형상의 결정과정에서 설계자의 의도를 충분히 만족시키는 프로세서를 제공할 수 있다. RS-06모델의 경우 설계자의 형태를 수정하였고, RS-09모델의 경우 케이블을 이용한 구조모델로 수정하여 초기설계안의 형상을 유지 하였다.

설계 프로세스에 따른 형상 결정 프로세스의 적용 및 활용성은 형태저항형 구조물에서 활용성이 높다. 이는 형태저항형 구조물의 역학적 메커니즘이 형상에 따라 매우 다르게 나타나기 때문이며, 형상의 해석적 접근과 더불어 모델링 기법을 통한 축소모형의 형태분석이 중요한 영향을 미친다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 첨단도시개발사업의 연구

비 지원(과제번호#'06 R&D B03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Haug, E. and Powell, G. H., "Finite Element Analysis of Nonlinear Membrane Structures," IASS Pacific Symposium-Part Ⅱ, Oct., Tokyo and Kyoto, 1971, pp.2-3-1/2-3-13.
2. Ishii, K. and Suzuki, T., "Shape of Membrane Structures," IASS Pacific Symposium-Part Ⅱ, Oct., Tokyo and Kyoto, 1971, pp.1.9.1-1.9.10.
3. 石井一夫, "膜構造における等張力曲面形態について," 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1975, 10, pp.719-720
4. Yamada, N., "Inital Shape Generation for Membrane Structures," Proceeding of 4'th International conference on Space Structures, Univ. of Surrey, Guildford, UK, September, 1993, pp.1169-1175.
5. Peter Broughton & Paul Ndumbaro, The analysis of Cabel & Catenary Structures, Thomas Telford, 1994.
6. Ohsaki, M. and Jun, F., "An Inverse Method For Cutting Pattern Optimization of Membrane Structures considering Material Nonlinearity," IASS International Symposium, Madrid, Vol. Ⅰ, 1999, pp.B3.23-30.
7. 김승덕, 손수덕, 조병욱, 손승철, "비선형 해석 프로그램 NASS-98을 이용한 연성 막구조물의 구조설계에 관한 연구," 大韓建築學會學 術發表論文集, 第18卷, 第2號, 1998, pp.27-32.
8. 이주나, 박선우, 김승덕, 박찬수, "연성구조시스템의 분류체계와 용어," 한국쉘·공간구조학회 논문집, 4권, 2호, 2004. 6., pp.99-105.
9. 이주나, 박선우, 박찬수, "연성구조시스템의 발달과정과 역사적 특성," 한국쉘·공간구조학회논문집, 제4권, 3호, 2004. 9., pp.93-101.