

막구조의 구조해석 및 구조설계

권택진* 서삼열**

1. 서론

막구조(膜構造)는 그 특유의 조형성과 구조적 특성으로 인하여 여러가지 용도의 건축물로 그 사용의 범위가 날로 증가하고 있다.

또한, 이 구조방식은 재료의 투광성(透光性)때문에 내부공간이 밝고, 경량성, 시공성 등에서 이점이 있으며, 전통적인 다른 구조방식과 비교하여 동질의 안전성과 내구성을 인정받고 있다.

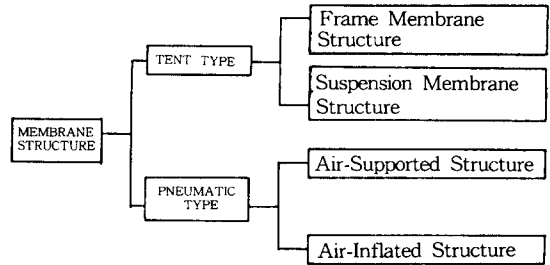
그러나, 막구조는 다른 구조 방식과는 상이한 구조적 특성을 가지고 있으므로 구조계획 및 설계는 이러한 사항을 충분히 인지하여, 구조적인 합리성, 경제성, 시공성 등을 고려하여 수행하여야 한다.

따라서, 본 고에서는 막구조를 구조적 특성에 따라서 분류하고, 각 구조방식에 대한 구조설계시 고려사항을 기술하여 막구조설계에 대한 기초자료를 제공하고자 한다. 또한, 막구조의 특성상 반드시 수행되어야 하는 형상탐색(Shape Finding) 과정을 설명하고 그 필요성을 논의하고자 한다.

2. 막구조의 구조적 분류

막구조는 일반적으로 텐트방식의 막구조와 공기막구조로 대별할 수 있다. 이 두 구조방식은 주하중에 대한 저항요소(抵抗要素)가 근본적으로 다르고, 또한 두 방식은 각각 여러가지 형태의 외

표1. 막구조의 구조적 분류



력에 대한 저항 Mechanism을 가지고 있다.

이것을 체계적으로 도표화하면 표 1과 같이 분류할 수 있다.

여기에서, 골조막구조(Frame Membrane Structures)는 철골 Frame, 특히, Space Frame 과 같은 골조위에 덮혀서, 막 Panel의 기능을 수행하는 구조방식이다.

또한, 현수막구조(Suspension Membrane Structures)는 Cable-Net Roof와 유사한 구조적 거동을 하는 구조방식이다.

Tent 구조방식과는 다르게 공기막구조(Pneumatic Structures)는 가압(加壓)된 공기에 의해서 외부하중에 저항하는 구조시스템으로, 공기지지방식(Air-Supported)은 연속적으로 내부에 공기를 불어넣어 내부와 외부의 기압차에 의해서 막구조의 형태를 유지하는 방식이고 공기팽창(Air-Inflated)방식은 자동차 튜브와 같이 밀폐된 막에 공기를 넣어 외력에 저항하도록한 구조방식이다.

* 부회장, 성균관대학교 교수, 공학박사
 ** 정회원, 명진기술연구소 실장

3. 막구조의 형상탐색(形狀探索)

막구조는 휨 강성이 없기 때문에, 설계자가 기하형태와 부재력을 독립적으로 규정하는 것이 불가능하다. 또한 막구조물은 미리 규정된 경계조건을 갖는 무제한의 많은 쉘 기하형태가 가능하기 때문에 공학자는 이러한 무한히 많은 막형태 가운데서, 그의 구조물에 가장 적합한 형상을 선택하는 문제에 직면하게 된다.

막의 형태탐색은 크게 두가지 방법으로써 접근한다. 해석적 접근 방법과 Model Test가 그것이다. 해석적 접근은 다음과 같은 3가지의 방법이 시도되고 있다.

ㄱ) 초기에 평평한 상태에서, 막력에 의한 자기 평형상태(自己平衡狀態)를 찾는 방법.

ㄴ) 설계자가 의도하는 형상에 가장 가까운 최적 형태를 찾는 방법.

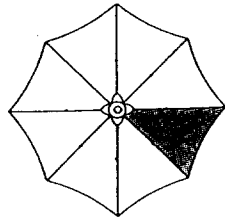
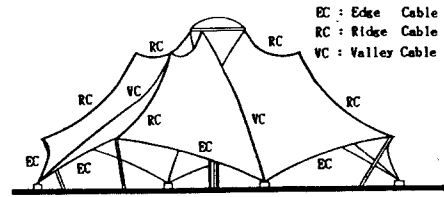
여기에서, 최적형태는 구조적으로 Wrinkling region이 없거나 있는 경우 Cable로써 보강 가능성 여부, 내부공간의 이용성, 재료의 경제성 등의 Factor가 있다.

ㄷ) 앞의 두 방법을 혼합한 형태의 방법.

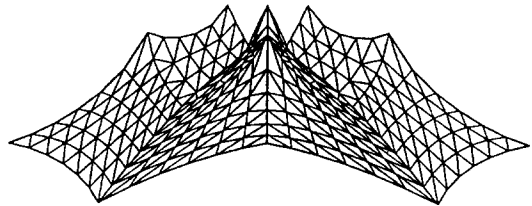
이상과 같은 막구조의 해석적 형태탐색법으로는 Siev법, Haug법, Least-Square법, Force Density법, Kawaguchi법, Ishii법, 기하학적 비선형(非線形) 이론에 의한 막력평형화 system을 찾는 방법 등 많은 연구자들에 의해서 계속적으로 연구되고 있다. 또한, 이러한 형상탐색해석의 출력데이터는 주하중에 대한 구조해석시 입력데이터로써 활용된다.

또한, 실험적 방법으로서는, 유럽에서 막 Dam의 초기형상해석에서 많이 사용하는 Rubber Membrane Analogy(그림 2)와 Ramaswamy법, Bini법 등이 있으며 Model Test에 의한 여러가지 방법이 사용되고 있다.

이러한 형태탐색해석은 막구조물의 설계의도, 주변상황 등에 의해서 가장 적합한 방법을 선택하여 수행할 수 있으나, 근본적으로 막재료는 비교적 Creep되기 쉬운 재료이고, 초기에 도입된 장력에 오차가 발생하면 막면은 스스로 등장력(等張力)형태로 이동하므로, 초기에 막장력 분포가 등



(a) 解析모델



(b) 解析結果

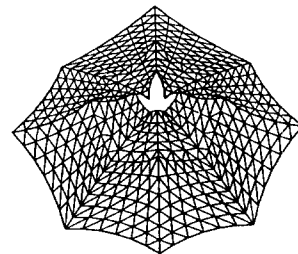


그림1. 유한요소 해석에 의한 형상탐색해석에

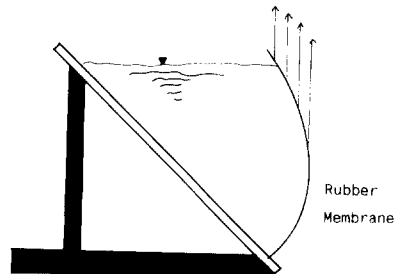


그림2. Rubber Membrane Analogy

상력 상태가 되는 형태를 결정하는 것이 좋다. 부득이, 설계상의 문제에서 등장력 상태가 아닌 형태를 필요로 하는 경우에 케이블로써 보강하도록 한다.

또한, 이러한 형상해석에서는 바람에 의한 막구조의 Flutter현상을 방지하기 위한 Mode Shape Analysis를 병행하는 것이 바람직하다.

4. 막구조의 해석 및 구조설계

막구조는 휨 문제가 존재하지 않으며, 인장막력이 주체가 되는 액체막적(液體膜的) 성격이 특징이다. 또한, 재료자체의 초경량성으로 인하여, 외부하중에 대한 구조물의 강체이동이 크므로 구조물에 대한 평형방정식은 변형된 기하형태에 대하여 구성되어야 한다. 그러나, 기하학적 비선형 막이론에 의한 지배방정식으로 임의의 기하형태와 경계조건을 갖는 막에 대한 정확한 해를 얻는다는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서, 이러한 지배방정식에 대한 Closed Form의 해는 특정기하형태와 하중조건에 대해서 얻어졌다. 이것은 막구조물 특히, 공기막구조물의 기본적인 형태로써 원통셀과 구형 셀의 광범위한 사용으로 증명되고 있다. 그러나, 컴퓨터를 이용한 수치해석법의 발달에 따라서 다양한 형태의 막구조에 대한 수치해석법이 전개되어 왔다. 특히 유한요소(有限要素)에 의한 유한변형 해석은 Oden, Martin, Argyris, Smith 등에 의해서 정식화되었으며 Leonard, Haug, Powell 등은 변형해석을 통한 형상해석을 수행하였다.

그림 3은 유한요소법에 의한 기하학적 비선형 해석과정의 흐름도를 보여주고 있다. 그림 3의 흐름도에서 해기법으로는 Newton-Raphson 반복법과 하중증분법을 함께 사용하였다. 일반적인 막구조의 해석에서, 막재료는 선형의 직교이방성(直交異方性)재료로 설정하여 해석한다.

이하에서는 각 구조방식에 대한 구조설계시 주의할 점을 알아본다.

- 1) 골조막구조(Frame Membrane Structure)
철골 프레임상의 막 Panel에는 막면(膜面)의

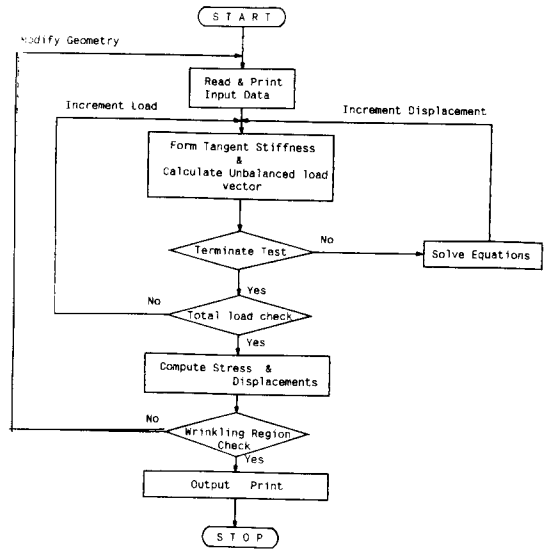


그림3. 유한요소법에 의한 막구조의 정적 해석과 정도

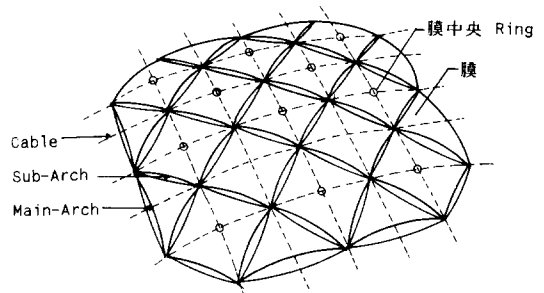


그림4. 골조막구조의 예

안정을 위해서, 초기장력이 도입되고, 이에 의해서 외력에 저항한다. 또한 막 Panel의 경계부는 일반적으로 고정으로 가정한다. 따라서 막재(膜材)가 부착되는 부분은 막에서 발생한 응력을 충분히 전달할 수 있는 강도와 막면의 형상을 유지할 수 있는 강성이 필요하다.

또한, 막의 곡률이 적은 경우, 막면의 Creep에 의한 영향이 크므로, 막의 초기장력의 도입방법 및 Re-prestress system을 충분히 고려해야 한다.

골조막구조의 골조로는, 트러스, 아치 등과 같은 평면골조와 Space Frame, Dome, Shell 등과 같은 입체골조가 많이 사용되고, 특히 입체골조의 경계부, 기초부의 선정에 따라서 응력이 크게 다

큰 작용을 하므로 모델링과정에서 장 스펀 구조물 로써의 세심한 주의가 요망된다. 또한, 골조의 Weak Point를 만들지 않도록 안정된 Proportion을 갖는 부재를 사용하여, 골조전체의 변형능력을 발휘시켜 안전도가 높은 골조계획을 세워야 한다.

2) 현수막구조(Suspension Membrane Structures)

현수막구조는 그림 5의 경우와 같이, 무하중상태(초기곡면)에서는 서로 반대의 곡률을 가진 Ridge와 Valley부분 섬유(Fiber)의 초기장력에 의해서 평형상태를 유지한다. 적재하중, 풍하중(특히, Suction Force), 적설하중과 같은 부가적인 하중에 대해서는 Ridge부분 또는 Valley부분 섬유가 저항하게 된다.

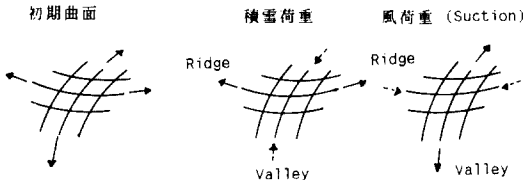


그림5. 현수막구조의 Mechanism

따라서, 한쪽 방향에서는 장력이 소실되어 Wrinkling 현상이 발생하게 된다. 이러한 현상과 적설하중시 응력집중을 막기위해서 케이블로써 보강을 한다.

보강케이블 설치시에는, 막면으로의 응력전달이 Smooth해야 하고, 부가적인 하중이 큰 경우 케이블의 이동이 없어야 한다. 또한 두 재료의 접촉에 의한 막면이 손상되지 않도록 케이블 위치 설정과 설치시에 유의해야 한다. 특히, 막면케이블의 초기장력의 도입은 응력계산에도 영향을 주는 중요한 요소이므로 신중하게 결정해야 한다. 또한 막면에도 200~500 kgf/m정도의 초기장력을 도입하고 이를 구조설계시 반영해야 한다.

3) 공기막 구조(Pneumatic Structures)

공기막 구조는 비교적 새로운 구조방식이고, 구조계획상 검토해야할 사항이 많이 있다. 또한 이 구조방식은 상시송풍(常時送風)이라는 Mechanism이 불가피하고, 이점은 설계시 매우 중요한 요

소가 된다.

따라서, 공기막 구조의 구조설계는 먼저 그 특성을 잘 이해하고, 구조적으로 지장이 없는 계획이 필요하다. 특히, 상시내압과 최대내압의 적절한 설정 그리고, 형태, 재료, Anchor System 및 송풍 System의 적절한 선정 등을 종합적으로 검토해서, 구조계획을 해야한다.

구조설계시 유의할 사항은 다음과 같은 것이 있다.

ㄱ) 공기막 구조의 지붕면은 항상 안정된 팽창상태(膨脹狀態)로 되어, 내부를 사용하지 않을 때에도 수축시키지 않도록 해야 한다. 따라서, 피난시, 보수시, 검사시 등을 제외하고는 항시, 팽창상태를 유지하도록 계획해야 한다. 그러나, 예상적설 하중보다 많은 적설이 있고, 이에 대응하는 송풍 System이 없는 경우에는 수축시킬 수 있다.

ㄴ) 각 부재는 설계내압하(設計內壓下)에서, 하중에 충분히 견딜 수 있는 강도와 강성을 갖고, 항상 지붕면을 안정상태로 유지할 수 있어야 한다. 특히, 팽창상태를 유지하기 위한 적절한 내압의 설정 및 이것을 확보하기 위한 유지관리에 관한 계획과 실행이 특히 중요하다.

ㄷ) 공기막구조는 지붕면의 최대 적설에 대해서, 항상 팽창상태를 유지하기 위해서는 높은 내압이 필요하고, 이것은 구조상, 사용상, 특히 피난상 바람직하지 못하다. 또한 지붕면에서 케이블을 사용하여 보강하는 경우에는 다음 사항을 고려하여 그 Layout을 결정한다.

- 케이블은 막면전체의 강성 및 하중의 분담이라는 관점에서, 유효하게 배치되어야 한다.
- 지붕면이 용이하게 팽창, 수축될 수 있도록 케이블을 배치해야 한다.
- 허용내압시, 케이블의 늘어짐이 없도록 배치해야 한다.

케이블의 배치는 1방향과 2방향배치가 있으며, 각각 수평투영면상의 직선배치, 곡면의 측지선(測地線)배치, 곡률선배치 등이 있고 그 구조특성은 다소간의 차이가 있다.

또한, 보강케이블은 막재와 구조적으로 일체가 되도록 접합해서, 하중에 따른 케이블과 막재가 서로 독립적으로 거동하지 않도록 해야 한다.

5. 결론

본 고에서는 막구조의 해석과 각 구조형식별로 구조설계의 고려사항을 간략하게 언급하였다. 막구조는 그 고유의 기하학적 특성을 가지고 있는 반면에 해석상에서 해결해야 할 많은 연구과제가 남아 있다. 자유자재의 기하형태를 간단하게 모델링하는 방법, 최적화설계법의 정립, 막재료의 재료적, 구조적 특성에 관한 연구 등도 아직까지도 미흡하다고 생각된다.

또한 지면관계상 누락되어 있는 Patterning Analysis에 의한 재단도 작성 및 각부의 연결 철물 등에 대한 역학적 특성의 규명이 수행되어야 한다고 생각한다.

시공시, 막재료의 접합방법과 막구조 설치상의 각 단계별 반복해석 방법또한 개발되어야 할 것이다.

따라서, 궁극적으로는 Pre-Processor, Main-Processor, Post-Processor를 일관성 있게 처리될 수 있는 Structurl Design Process의 정립

이 시급하다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Haug, E., "Tension Structures", Doctoral Thesis, University of California, Berkeley.
 2. Leonard, J.W., TENSION STRUCTURES, McGraw-Hill Book Company, NewYork, 1988.
 3. Kunieda, H.D., "Flutter of Hanging Roofs and Curved Membrane Roofs", International Journal of Solids and Structures, Vol. 11, No.4, 1975.
 4. Otto, F., TENSILE STRUCTURES, VOLS. I and II, MIT Press, Cambridge, 1967, 1969.
 5. Bird, W.W., "The Development of Pneumatic Structures, Past, Present, and Future", Proceedings, 1st International Colloquium on Pneumatic Structures, IASS, Stuttgart, Germany, 1967.
 6. Subcommittee on Air-Supported Structures : "Air-Supported Structures", ASCE, Spec. Publ., 1979.
- 石井一夫, 安宅信行, 膜構造の設計, 工業調査會, 1969.