

막구조의 변천역사

강 문 명* 최 현 식**

수천년의 오랜 역사를 갖고 있는 막구조는 몬트리올에서 개최된 Expo'67 및 오오사카에서의 Expo'70을 계기로 건축계의 새로운 인식과 관심을 불러 일으키고 있다.

膜構造(Membrane Structures)를 명확히 정의하기는 어려우나 구조적인 측면에서는 '구조체가 휘강성을 갖고 있지 않거나 이를 무시할 수 있는 부재로 구성되며, 외부 하중에 대하여 막응력상태 즉, 막면내의 인장, 압축 그리고 면내전단력만으로써 평형을 유지하는 구조물'이라고 할 수 있다.

이와 같은 정의에 근거한다면 휘강성이 무시될 수 있는 셸구조도 막이론이 적용될 수 있기 때문에 이에 속할 수 있으나, 여기에서는 장력과 면내전단력에만 저항할 수 있는 재료를 사용하는 구조물 즉, 구조체로써 막재를 사용하고 초기장력을 도입시켜 강성을 증대시키고 외부하중에 대한 안정된 형태를 유지하는 구조물을 의미한다.

막구조형식은 역학적인 측면에서나 형태에 있어서 기미줄, 곤충의 날개 그리고 비누방울과 같은 자연현상과 매우 밀접한 관계를 갖고 있다. 이러한 자연적인 현상들은 매우 효율적이며 아름다운 미적요소라 할 수 있다. 따라서 이러한 자연미를 집적(集積)해 나감으로써 건축에 있어서의 새로운 조형미를 추구할 수 있게 한다. 이와 같은 면은 다른 구조형식에 비하여 이 구조가 가지는 특성이란 생각된다.

근년에 와서 큰 발전을 보이고 있는 막구조물

및 케이블 네트는 수만년전의 원시적인 망상(網狀)의 고기잡이 그물에서부터 우산, 차양, 텐트 등으로 발전하여 오면서 다양한 목적에 이용되어 왔다. 주거에 관한 개화의 초기형태라 할 수 있는 텐트(Tent)는 기원전 8000년경에 고안된 구조이며 오늘날의 유연성 셸(Soft Shell) 구조와 가장 가까운 관계를 가지고 있다고 할 수 있다.

텐트의 경량성, 이동과 설치의 용이함 등은 유목민들의 생활양식에 부합되는 특성이라 특히 유목사회에 많이 이용되었지만, 환경의 변화에 대한 적응성도 뛰어나 사우디아라비아로부터 히말라야 산맥의 고원지대, 몽고의 초원으로부터 북극의 툰드라에 이르는 극단적인 기후조건을 갖는 넓은 지역 어디에서나 이러한 텐트구조는 존재하여 왔다. 이들의 형태는 원추형, 돔, 보울트, 상자형 등이 있으며 일반적으로 막재는 염소털로써 만들어지고 몇개의 지주를 갖는 초기장력 도입구조로 되어 있다. 이에 반해 북미의 인디언들의 천막집은 원추형의 텐트이고 막재로써는 들소 가죽이 쓰였다.

로마시대에 들어와서도 원형극장에서 대형의 차일에 초기장력을 도입하여 사용하였으며 남스페인에서는 16세기부터 길위에 차일을 설치하는 등 막재의 이용은 계속되어 왔다. 또한 이집트인과 앳시리아인에 의해 널리 알려져 온 우산역시 텐트와 함께 장력식 막구조(張力式 膜構造: Tensile Membrane Structures)의 선조라 할 수 있다.

1820년대초부터 서커스의 흥행장에 텐트구조가 이용되어 1940년대의 Ringling Brothers 텐트는

* 성회원, 경북대학교 교수, 공학박사
** 성회원, 세명대학교 부교수, 공학박사

13,000명을 수용할 수 있는 대형의 구조물로 발전되고 있다. 1896년 Nijny-Novgorod Industrial Fair에서의 V.G. Shekhov가 만든 직경 223피트의 강철판으로 된 원형텐트는 1900년대 이전의 근대적인 대형 텐트구조의 일례라 할 수 있다.

제1차 세계대전 이전, 모든 우주현상은 자연력의 작용에 기인한다는 역본설(力本說)을 실험적으로 도입한 이탈리아의 예술가 Antonio Sant'Elia의 작품이나, 1930년대의 러시아의 구성파 예술가들의 구성주의 조각품중에서 장력의 도입을 통하여 구성미를 추구하려는 시도를 엿볼 수 있다. 이 시기에 개발된 장력구조의 초기작품이라 볼 수 있는 Marcel Breuer의 안락의자가 1925년 제작되었다.

이러한 흐름속에서 1950년대에 접어들면서 건축물로서의 장력식 막구조가 본격적으로 등장하게 되었다. 최근의 현수구조(懸垂構造) 또는 막구조의 발전에 크게 기여한 사람들로써 Walter Bird, David Geiger, Fritz Leonhard, Frei Otto, Robert Le Ricolais, Aero Saarinen, Rene Sarger, Fred Severud, Peter Stromeyer, Lev Zetlin, Kenzo Tange와 Yashigatsu Tsuboi 등을 들 수 있다.

장력식 막구조는 그 형식에 있어서 텐트와 유사하게 막면에 초기장력을 도입하여 구조적인 강성을 확보하는 텐트 혹은 막 방식과 케이블 등을 이용한 막상의 구조체를 형성하고 마감재 또는 구조재로써 막을 이용하는 케이블 네트구조로 분류할 수도 있다. 그리고 이러한 장력식 막구조는 철골조 등의 구조체 또는 철골과 케이블을 병행하여 얻어지는 구조체에 막을 설치하는 골조 막구조와 케이블 돔(Cable Dome)형식 등으로 변모하고 있다.

1960년대 이후 이러한 막구조는 막재료의 개발, 구조형식의 개발, 막구조 해석 및 시공기술의 발전에 힘입어 건축구조형식으로써 새로운 위치를 차지하고 있다.

한편, 공기지지식(空氣支持式)과 공기팽창식(空氣膨脹式)으로 대별할 수 있는 공기막구조의 발전배경은 고대 로마인들이 동물가죽으로 만든 밀폐형의 주머니에 공기를 부어넣어 다리나 멧목을 지지한 것으로부터 오랜 시간을 통하여 축적된

기술을 바탕으로 1783년 프랑스의 Montgolfier 형제에 의하여 종이와 아마포로 만들어져서 공중에 띄어지게 되었고 이는 공기막구조의 초기단계의 성과라 볼 수 있다.

공기막을 현실적으로 이용하는 기술은 주로 항공분야에서 발전하였으며 기구형식이 건축에 도입된 것은 1917년 영국의 Frederic W. Lanchester의 야전병원용 공기막특허(空氣膜特許)라 할 수 있다.

세계 최초의 공기지지구조인 직경 16m의 레이 다동이 Walt W. Bird에 의하여 1946년 군사용시설물로서 등장한 후 그는 1956년 공기막구조회사를 설립하여 100m²정도의 이동식 구조물을 판매함으로써 세계적으로 알려졌다고 할 수 있다. 이러한 사실은 스펜200m이상의 공기막구조가 실현되고 있는 오늘날의 기술적인 발전의 계기가 되었다고 할 수 있다.

다음으로 앞에서 언급된 장력식 막구조와 공기막구조의 발전의 전성기라 볼 수 있는 1960년대 이후에 건설된 막구조물을 중심으로 시대적인 변천을 살펴보기로 한다. 주요한 막구조물들을 표 1에 개략적으로 정리하였다. 다만, 건설년도 및 규모에 있어서 참고자료들간의 차이가 다소 있었음을 알려준다.

1851년 London 박람회의 Crystal Palace, 1889년 Paris 박람회의 Eiffel Tower는 그 시대의 산업이나 구조기술의 산물이었다고 할 수 있으며, 막구조물은 이러한 박람회를 계기로 1960년 이후 건축계의 커다란 관심을 모으게 하면서 기술발전을 이루어 오늘에 이르고 있다. 건축가들은 이러한 박람회를 통하여 새로운 건축기술에 도전할 수 있는 기회가 되어, 1964년 Laussne 박람회에서의 장력식 막구조, 1964년 New York 박람회에서의 공기팽창식 막구조, 1967년 Montreal 박람회에서의 지붕면적이 10,000m² 정도의 케이블 네트 보강의 막구조물이 등장하면서 새로운 재료와 구조기술의 발전을 이루어 왔다. 특히 Frei Otto와 Walter Bird는 막구조의 발전에 크게 기여하였다 고 할 수 있다.

1970년 Osaka 박람회에서는 보강 케이블에 의한 공기지지막구조인 미국 전시관, 튜브형식의

표 1. 막구조물의 변천

년도	건 물 명	구조형식	규모 길이×폭×높이(m)
1947	Radar Dome(USA)	공기막구조	직경 15
1958	Panam 전시관(Belgium)	공기막구조	
1958	Boston Art Center(USA)	이중막구조	직경 44
1958	Balloon House(Australia)	공기막구조	12×6×3
1980	윈사력위원회 전시장(USA)	이중막구조	90×35×15
1963	Kajima Air Dome(Japan)	공기막구조	직경 30
1964	Lussne 박람회전시장 (Switzerland)	Cable Net의 장력막구조	스팬 36
1964	New York 박람회식당 (USA)	공기팽창식	직경 18
1965	동경스케이팅링(Japan)	장력막구조	65×35×12
1970	Osaka 박람회 미국전시장 (Expo '70, Japan)	보강Cable의 공기막구조	138×78
1970	Fuji 전시관(Expo'70,Japan)	튜브형식	직경 50
1972	뮌헨올림픽 Main Stadium (Germany)	Cable Net의 장력막구조	65(높이58)
1973	La Verne 대학 Campus Center(USA)	최초의 영구 현수막구조	
1974	Michigan대학 체육관(USA)	이중막구조	84
1974	Santaclarea 대학 체육관(USA)	공기막구조	90×60
1975	Pontiac Silver Dome(USA)	공기막구조	220×168
1976	Nothern Iowa대학 Unl Dome	이중막구조	142×142×38
1976	Riyadh대학 체육관(Saudi Arabia)	공기막구조	131×44
1978	South Dakota 대학 Dakota Dome(USA)	일부이중막구조	122×122×35
1980	급속공기막구조(Japan)	0.3mm의 스텐레스공기막구조	직경 20
190	Flolida 대학 O'Connel Center(USA)	공기막구조	131×125
1980	Syracus Carrier Dome(USA)	이중공기막구조	155×144
1982	Minneapolis Metro Dome (USA)		227×192×56
1982	Jeddah 국제공항 Haj Terminal(Saudi Arabia)	장력막구조	425,000m ²
1983	B.C. Palace Stadium(Canada)	공기막구조	231×190×61
1988	Korakuen Air Dome(Japan)	공기막구조	201×201×61
1988	서울올림픽 제조경기장(Korea)	Cable Dome	스팬 120
1988	서울올림픽 펜싱경기장(Korea)	Cable Dome	스팬 90
1988	St. Pertersburg Stadium(USA)	Cable Dome	스팬 205

Fuji 전시관 등이 선보이게 되었고, Expo '70의 미국전시관의 설계는 1968년부터 계획되어져 예산 등의 문제로 계획안은 여러차례 수정되어 최종적으로 사진 1과 같이 준공되었다.

1970년대초까지만 하더라도 막구조물이 주로 전시관의 임시구조물로써 사용되었으나 막구조물의 내구성을 확보하여 영구구조물로 사용하기 위한 막재의 개발이 시작되었다. Dupont, Owens Corning Fiberglass, Birdair Structures, Chemical Fabrics Coporation 등에 의하여 Teflon 코우팅의 유리섬유계의 막재 (Glassfiber Fabrics)가 생산되면서 내구성, 흡음, 내열 등의 재료적인 면에서의 요구가 충족되기에 이른다. 이러한 여건속

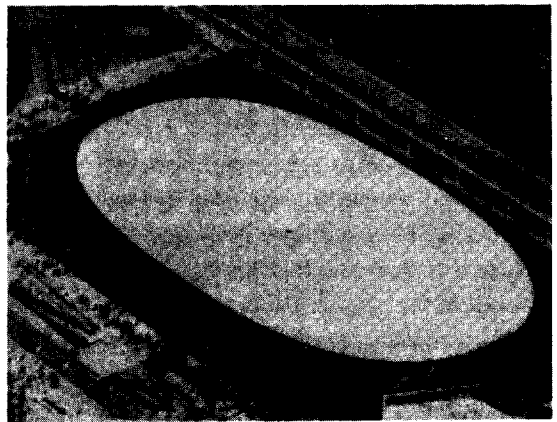


사진 1. Expo '70 미국전시관, Osaka, Japan

에서 미국내 건축법규에 의하여 막구조에 관한 규정이 제정되므로써 영구적인 막구조물이 탄생하게 되었다. 최초의 영구 건축물이라고 할 수 있는 La Verne 대학 학생회관이 1973년 준공되고 이어서 이중막구조이며 용설시설(融雪施設)의 Mishigan 대학 체육관, 공기막구조인 Santaclara 대학 체육관이 초기의 영구막구조물로서 탄생되었다.

한편 공기지지막구조물에 해당하는 대형스타디움은 약 8만명을 수용할 수 있는 Pontiac Silver Stadium이 Michigan 주의 Pontiac에 1975년 준공된 이후 Minnesota 주의 Minneapolis, Indiana 주의 Indianapolis, 캐나다 British-Columbia 주의 Vancouver 그리고 1988년 일본 동경에 세워지게 되었다. 이러한 막구조물들의 지붕형상은 케이블들이 각각 최대하중을 받으면서 최소의 케이블수로 막면을 보강할 수 있는 형태 즉, Minimal Roof로 되어 있으며, 이러한 형상의 일례가 사진2의 캐나다 Vancouver의 B.C. Palace Stadium이다. 이러한 공기지지식의 막구조물과 함께 1982년 사우디아라비아에서는 수용인원 8만, 면적 425,000m²의 장력막구조인 Haj Terminal이 사진3과 같이 건설되었다.

공기지지식 막구조물의 합리적인 설계를 위하여서는 컴퓨터에 의한 새로운 해석기술을 도입하여야 한다. 지붕면의 형상결정 및 응력해석에 있어서 케이블네트의 초기에서부터 최종의 재하상태에 따른 대변형을 설명할 수 있는 비선형해석 프로그램이 요구되며, 이것을 1970년 Osaka 박람회의 미국전시관을 설계하기 위하여 1968년 Geiger Associates에 의하여 개발되기 시작하였으며, 1974년경에는 임의의 형태를 갖는 신축성이 적은 장력막구조물의 형상결정 및 비선형해석을 할 수 있는 해석프로그램으로 수정, 발전되었다.

1978년 이후부터 많이 건설된 공기지지식 막구조물에서 용설 및 내압유지에 관한 유지관리의 문제가 대두되면서 이와같은 문제들을 극복하기 위하여 공기막구조의 장점을 지니면서 단점을 보완할 수 있는 새로운 구조방식이 요구되게 된다. 압축재와 케이블의 조합에 의하여 안정된 구조가 성립될 수 있는 Tensegrity의 원리를 Buckminster

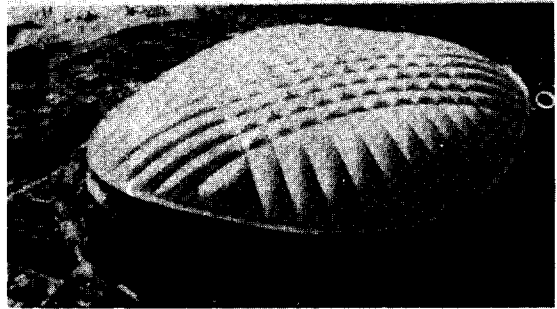


사진 2. B.C. Palace Stadium, Vancouver, Canada



사진 3. Haj Terminal, Jeddah, Saudi Arabia

Fuiler가 제안하였다. 이러한 원리는 이 시대에 요구되는 막구조물의 유지관리에 관한 문제점 해결 방안과 맞물려 새로운 형식의 막구조물을 탄생시키게 되었다. Geiger Associates의 협조하에 설계된 김수근의 체조경기장, 강건희의 펜싱경기장이 Tensegrity의 원리를 이용한 최초의 건축물이며, Cable Dome이라 부르고 있다. 그리고 Illinois 주립대학 경기장과 St. Petersburg Stadium 역시 Geiger Associates에 의하여 Cable Dome 형식을 채택하고 있다. 그림 4는 Cable Dome 형식의 체조경기장의 사진이다.

1988년 이후 새롭게 등장한 Cable Dome은 다른 공기막구조에 비하여 경제성이나 형태상에서 손색없는 새로운 구조형식이라 할 수 있겠다.

지난 20여년간 구조기술, 재료, 설비 등의 발전으로 대스팬 구조물에 적합한 막구조물은 규모면에서나 기능적인 면에서 큰 발전을 보여왔다. 시대의 변화에 따라 새롭게 탄생되는 재료들의 구조

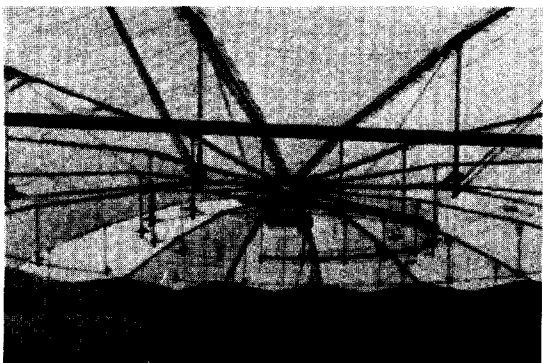


사진 4. 서울 올림픽 체조경기장

성능은 지금으로써는 짐작하기 어려울 만큼 큰 발전을 보일것으로 추측된다. 특히, 고강도의 재료가 개발 될수록 구조단면은 얇고, 세장한 형태가

되며, 이때에는 압축형식 보다는 인장형식의 구조가 더욱 재료의 성능을 유감없이 발휘할 것이다. 이러한 의미에서 막구조형식은 초대형 건축공간의 창조에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. D.H. Geiger : Bulletin of the interational association for shell and spatial structures, Vol. 27-2, August, 1986, pp.33-36.
2. W. Schueller : Horizontal-span building structures, John Wiley and Sons, pp.505-520.
3. 齊藤公男 : 카ラム, 1983, pp.46-51.
4. 金洙岩 : 건설기술연구속보, Vol.4, No.5, 1986, 5, pp.72-86.