

막구조(Membrane Structure)의 소개

배 동 지 (쌍용건설 근무)

막구조라 함은 코팅된 직물을 주재료로 하여 사용하는 구조를 말하며, 특히 구조체로서 연성을 가진막을 사용하여 초기장력을 도입하고 강성을 늘림으로서 외부하중에 대해 안정된 형태를 유지하는 구조물을 말한다. 막구조는 대형공간을 덮는 매우 효과적인 구조시스템으로서 막재료의 투광성 때문에 내부가 밝고 경량성, 시공성 측면에서 이점을 갖고 있어 다양한 용도로 사용되고 있다. 그러나 막구조가 국내에 사용된 예가 많지 않고 그 규모도 작아 실제 막구조를 접할 수 있는 기회를 가질 수 없는 기술자들을 위해 막구조에 대한 간략한 소개를 하고자 한다.

지니고 있으며 화학섬유를 이용한 새로운 막재의 개발, 해석에 관한 체계적인 연구, 컴퓨터 해석기술의 발달로 현재의 막구조는 가설 구조물이 아닌 영구 구조물로 인식의 전환을 가져오게 되었다.

현대의 막구조는 기후가 온난한 유럽에서 발전하기 시작하였으며 1970년대에 유리섬유를 이용한 막재의 개발은 높은 인장강도를 지니면서 내구성, 내화성 및 막을 지지하는 구조시스템의 개발과 더불어 대형공간에서의 공간창출을 가능하게 하였으며 막구조의 빠른 발전을 가져오게 되었다.

막구조를 이용한 구조시스템은 대규모 스타디움, 실내 빙상경기장 등과 같은 대형무주공간에 널리 이용되고 있다. 최근에는 대형공장, 박람회장, 공연장 등에도 이용되고 있으며, 소규모 건물에도 그 적용 예를 찾아볼 수 있다.

막구조는 공간창조의 다양성, 재료사용의 경제성, 재료의 경량화 등에서 탁월하기 때문에 선진국에서는 막구조의 사용이 날로 증가하고 있는 추세이며, 재료가 가볍고 운반이 쉬워 달 기지, 해저구조물, 극지방 등으로의 활용을 기대하여 이에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

1. 막구조의 도입

1) 막구조의 발달 과정

초기 막구조는 가설 구조물로서서의 역할을 담당하여 동물 가죽 또는 식물 섬유 등을 이용하여 유목민의 텐트에서 서커스 막에 이르기까지 오랜 역사를

2) 막구조의 장점

전통적인 구조재료인 목재, 콘크리트, 철 등을 이용한 구조물은 강성체 구조물로서 디자인의 한계성과 경제성이 맞물려 대공간을 유지함에 있어 다소 제약

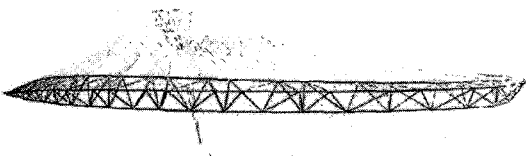


사진 1. Bottom Outlet Intake Tower

표 1. 막구조의 장점

항 목	내 용
디자인성	연성체이므로 기하학적인 곡면의 형상과 원관 형태의 자유로운 연출이 가능함
경 제 성	스틸 중량의 1/30수준이어서 하부 구조 시스템의 경량화로 공사비 절감
시 공 성	공장에서 재단, 접합되어 현장에서 설치만 하면 되므로 공기 단축가능
내 구 성	막재에 따라 조금씩 다르지만 PTFE막재를 사용할 경우 기본적으로 30년 이상 사용가능
투 광 성	반투명으로 자연광이 13%정도 투과하므로 조명시설의 절감으로 에너지 비용이 절약되며 자외선을 차단음으로 내부 마감재의 변색방지
불 연 성	불소수지 코팅 등 불연재의 사용으로 불연성을 지님
흡 음 성*	직포구조에 유연성과 통기성을 확보하고 있어 흡음효과를 지니고 있으며 이중막 설치를 통해 흡음 효과의 증대가능
세정작용	코팅 처리된 표면은 비가 내릴 때 먼지, 이물질 등이 씻겨 내려 가므로 외부 청결상태와 투광성 유지

* 흡음성은 일반 지붕재에 비해 우수하지만 흡음지붕재보다는 효과가 떨어짐.

** 일반 지붕재에 비해 단열효과가 다소 떨어짐.

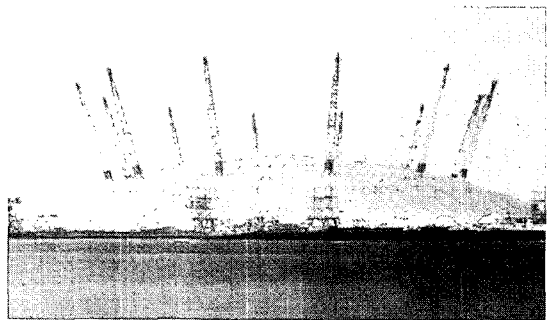
이 있으나 막구조의 경우는 표1과 같은 장점들이 있어 대공간에서는 막구조를 많이 채택하고 있다.

3) 막구조의 사용 예

해외의 경우 미국의 Georgia Dome, Tropicana Dome, Orlando International Airport, Denver International Airport, Sandiego Convention Center, 독일의 Berlin Sony Center, 영국의 Millennium Dome, Folkestone Chunnel Terminal, 이탈리아의 Rome Olympic Stadium, Ravenna Sports Place, 캐나다의 Vancouver Place, Osaka Dome Yokkaichi Dome, Sapporo Community Dome, 중국의 Shanghai Stadium, 사우디아라비아의 Jeddah Haj Terminal, 필리핀의 Manila Freedom Ring, 대만의 Taoyuan Dome 등 세계적으로 유명한 대공간 구조물에 이용되었다.

국내의 경우 88올림픽 체조경기장, 펜싱경기장, 분당 주택전시관, 대전EXPO'93국제관, 수원 야외음악당, 울산 실내체육관 등지에 사용되었으며 최근 2002 월드컵을 위한 서울 경기장, 인천 경기장, 부산 경기장, 대구 경기장, 제주 경기장 등의 각종 경기장과 공연장 등에서 채택되어 시공되었거나 시공 되어

지고 있으며 당사에서도 올림픽 체조경기장, 성남운동장 스탠드를 시공한 바 있으며 현재 양주 별산대 놀이마당과 고양 종합운동장 스탠드를 막구조로 시공 중에 있다.



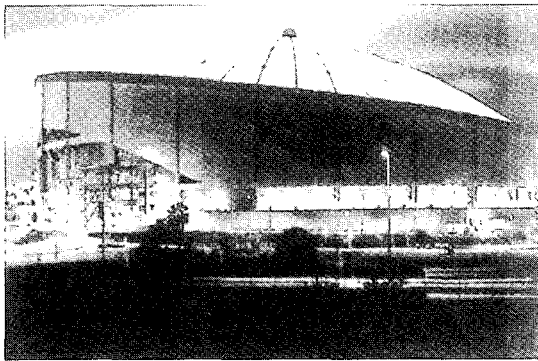
Millennium Dome(영국)



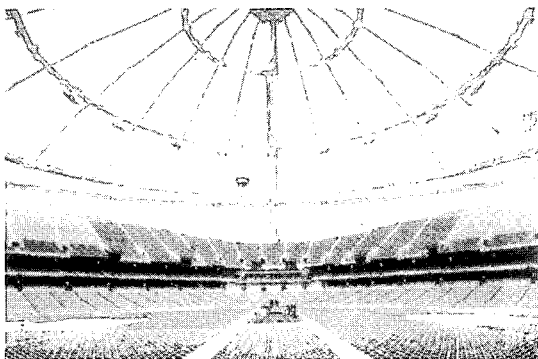
Georgia Dome 외부(미국)



Georgia Dome 내부(미국)



Tropicana Dome 외부(미국)



Tropicana Dome 내부(미국)

2. 막구조의 분류

막구조라 함은 흔히 막재를 이용한 구조물로 표현되나 그 분류는 매우 다양하며 막을 지지하는 하부구조 시스템에 따른 분류와 막의 형상을 유지하는 초기장력 도입방법에 따라 크게 분류되어진다.

1) 구조시스템에 따른 분류

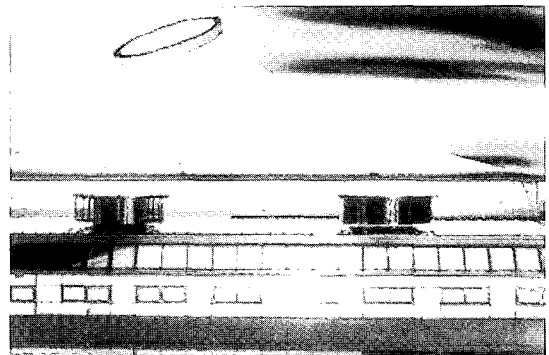
막구조는 외력에 대한 저항방식이 형태에 따라 매우 다양하게 전개되며, 하중전달과 지지방법에 따라 공기 막구조, 프레임지지 막구조, 서스펜션 막구조 그리고 프레임지지와 서스펜션을 혼합한 하이브리드 막구조로 분류되어진다.

막구조는 초창기에는 전통적인 프레임에 막을 설치하는 형태였으나 기술의 발달과 더불어 1980년대에 이르러 공기 막구조가 등장하였고, 케이블을 보강함으로써 훨씬 더 안정적인 구조시스템으로 발전하고 있다.

구조시스템에 따른 막구조의 특징은 <표 2>와 같다.

2) 초기장력 도입방법에 따른 분류

인장력 만을 부담하는 막재료에 의해 형성되는 막구조 형태는 스스로 자랍하기에는 한계가 있고, 형태를 유지하기 위해서는 초기장력의 도입에 의해 평형상태를 유지할 필요가 있다. 막구조는 형태를 유지하기 위한 초기장력의 도입방법에 따라 인장 막구조와 공기 막구조로 분류되어지며 그 특징은 <표 3>과 같다.



Folkestone Chunnel Terminal(영국)

표 2. 구조시스템에 따른 막구조의 분류

명 칭	구조 시스템	특 성	국내 사용예
공기 막구조	1중막 2중막 튜브막	<ul style="list-style-type: none"> • 공기압에 의해 지지되므로 기둥이나 보가 필요 없음 • 곡면 형태의 지붕형상 • 보강케이블을 사용할 경우 100m 이상의 공간 창출도 가능 • 지속적인 공기압 유지가 필요하여 유지관리 비용이 많이 듦 	여의도 종합전시장 COEX 에어돔
프레임 지지 막구조	트러스 스페이스프 레이م	<ul style="list-style-type: none"> • 청이나 목재 등의 전통적인 구조 • 지붕형상이 단순 • 스패인이 작은 경우에 적합 • 가장 보편적인 구조시스템 	분당 주택전시관 성남운동장 스탠드 고양운동장 스탠드 월드컵 대구경기장
서스펜션 막구조	케이블 스트러트	<ul style="list-style-type: none"> • 인장재에 의해지지 • 기하학적인 지붕형태의 창출 가능 • 100m가 넘는 대규모 스패인에 적합 • 케이블의 설계 및 시공에 특별한 기술이 필요 	올림픽 체조경기장 올림픽 펜싱경기장 월드컵 부산경기장 월드컵 인천경기장
하이브리드 막구조	프레임 + 케이블	<ul style="list-style-type: none"> • 휨 및 압축력을 받는 프레임과 인장력을 받는 케이블의 복합구조에 의해 지지 • 프레임의 장점과 서스펜션의 장점을 살려 공간활용의 극대화 가능 	양주별산대놀이마당 월드컵 서울경기장 월드컵 서귀포경기장

표 3. 초기장력 도입방법에 따른 막구조의 분류

명 칭	구조 시스템	특 성	국내 사용예
공기 막구조	공기지지 방식 공기팽창 방식 공기막관 방식	<ul style="list-style-type: none"> ○ 공기의 압력을 조절함으로써 발생하는 내부와 외부의 압력차에 의해 막면에 강성을 주어 형태를 안정시키는 방식 ○ 곡면 형상의 지붕형태이며 보강 케이블을 사용할 경우 비교적 평평하게 할 수 있음 ○ 대기압+막자중=내부공기압 ○ 공기압 상시 송풍 필요 ○ 공기지지방식 <ul style="list-style-type: none"> • 1중막구조(일반적인 공기 막구조) • 내부의 공기로 막을지지 • 공기압 유지를 위해 출입문의 특별한 제한필요 ○ 공기팽창방식 <ul style="list-style-type: none"> • 막 사이에 공기를 넣어 압력을 증가시킴으로서 면내 강성을 주어 구조물을 형성한다. 이 구조는 막이 공기의 팽창성에 의해서지지 • 출입문의 제한은 필요없지만 막 지지용 풀이 필요 • 2중막 사이에 인장부재 사용가능 ○ 공기막관방식 <ul style="list-style-type: none"> • 튜브막구조 • 튜브막에 공기를 불어 넣어 아치형태를 만들어서 외력에 저항하는 방식 • 큰 스패에서는 튜브의 지름이 커짐 	여의도 종합전시장 COEX 에어돔
인장막* 구조	케이블 네트방식 막 방식	<ul style="list-style-type: none"> ○ 골조 또는 경계 테이블 등에 둘러 싸인 영역에 막재를 고정시키고 막의 면내에 직접 초기장력을 주어 형태를 안정시키는 방식 ○ 기하학적인 지붕의 형상이 가능 ○ 막면의 규모가 커지면 보강 케이블이 필요 ○ 케이블-네트 방식은 면내 장력이 균일하지 않아도 되나, 막방식은 면내 균일 장력을 가하여야 함 ○ 막은 가볍고 진동수가 작기 때문에 동하중에 의한 공진 가능성이 있으므로 설계시 이에대한 검토가 필요 	국내 대부분의 막구조는 인장막 구조임

3. 막 재료

1) 막재의 구성

건축물에서 기본적으로 요구되는 지붕 마감재의 성능은 마감재에 가해진 외력을 하부구조로 확실히 전달할 수 있는 강도와 강성을 확보하여야 하고, 하부구조의 변형에 유연하게 따르는 구조이어야 하며, 방수성능이 우수한 접합 디테일이 가져야 한다.

이러한 요구조건을 만족하는 재료는 막재, 알루미늄판, 철판, 스테인레스판, 콘크리트 등이 있으나 대공간 구조물인 경우 지붕마감재의 하중이 증가하면 하부구조체 또한 증가하게 되어 시공성, 경제성 면에서 불리하게 되므로 경량화가 가능한 막재가 지붕마감재로 널리 이용된다.

막재는 막구조의 중요한 구조재료로서 면내 인장력에 저항하는 유리섬유, 폴리에스테르 섬유 등을 이용한 직포구조를 기본으로 하고 있으며, 방수성, 방화성, 내구성 등의 확보를 위해서 표면에 테프론, 실리콘, PVC등을 이용한 코팅재의 조합으로 이루어 진다.

2) 막재의 구분

일반적으로 사용하는 막재의 명칭은 직포구조와 코팅재의 조합방법에 따른 것으로서 조합방법에 따라

표 4. 막재의 직포섬유와 코팅재 종류

직 포	코팅재
유리 섬유	4불화 에틸렌수지(불소수지) 실리콘수지 염화비닐수지(PVC) 클로로플렌 고무 클로로폰화 폴리에틸렌고무
폴리에스테르 섬유 폴리아미드 섬유 폴리비닐알콜 섬유 폴리아미드 섬유	염화비닐수지(PVC) 클로로플렌고무 클로로폰화 폴리에틸렌 고무

* 직포는 유리섬유와 폴리에스테르 섬유가 주로 이용되며 코팅 재료는 불소수지, 염화비닐수지가 주로 이용된다.

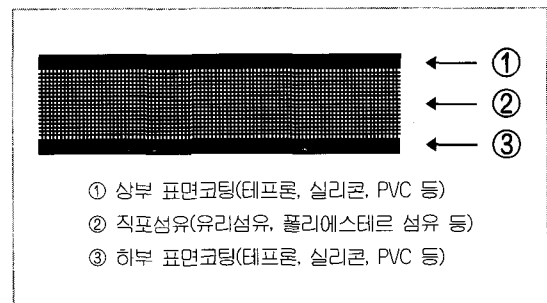


그림 1. 막재 구성도

여러 가지가 있지만 구조물에 주로 사용하는 막재는 <표 5>와 같다.

직포의 사용은 경기장, 체육관 등 대공간 구조물에서는 내구성이 뛰어난 유리섬유 막재를 참고, 공장 등의 소형 구조물에서는 가격이 저렴한 폴리에스테르

표 5. 조합에 따른 막재의 구분

종 류	직 포 섬 유	표 면	비 고
PTFE 막재	유리섬유	불소수지(PTFE)코팅	• PTFE : 4불화불소수지 • Teflon막재라고도 함
SILCONE 막재	유리섬유	실리콘 코팅	생산중단
P.V.C 막재	폴리에스테르	PVC 코팅	
P.V.F 막재	폴리에스테르	PVC 코팅 + Tedlar 필름	
P.V.D.F 막재	폴리에스테르	PVC + 불소수지(PVDF)	PVDF : 2불화불소수지

※ PTFE : Poly Tetra Flour Ethylene (Teflon 이라고도 함)
※ SILCONE 막재 : Silicone coated fiberglass
※ P.V.F : Poly Vinyl Fluoride

※ Teflon 막재 : Teflon coated fiberglass
※ P.V.C : Poly Vinyl Coating
※ P.V.D.F : Poly Vinyl Dene Fluoride

표 6. 막재의 장단점 비교

항 목	테프론 막재(PTFE)	폴리에스터 막재(PVC, PVF, PVDF)
내구년한	25~50년	10~20년
가 격	100%	PVC : 60% PVDF, PVDE : 70~80%
장 점	<ul style="list-style-type: none"> • 내구성능이 좋음 • 신율이 작음 • 불활성임 • 자정능력이 탁월 • 외부환경(빛, 열, 오염)에 대한 저항력 • 불연성이 좋음 	<ul style="list-style-type: none"> • 색상이 다양 • 가격이 저렴 • 연성능력이 좋음 • 제작하기 쉬움(단, PVDF는 PVC에 비해 제작이 어려움)
단 점	<ul style="list-style-type: none"> • 흰색만 가능 • 가격이 비쌈 • 제작기술이 어려움 	<ul style="list-style-type: none"> • 내구성능이 좋지않음 • 신율이 큼 • 외부환경에 의한 변색 우려 • 불연성이 떨어짐 • 접착시 표면코팅의 손상이 발생함

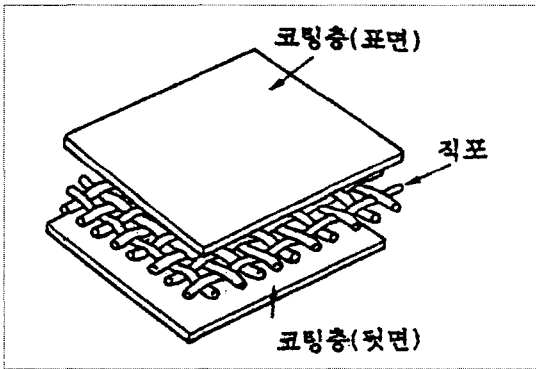


그림 2. 막재의 구성

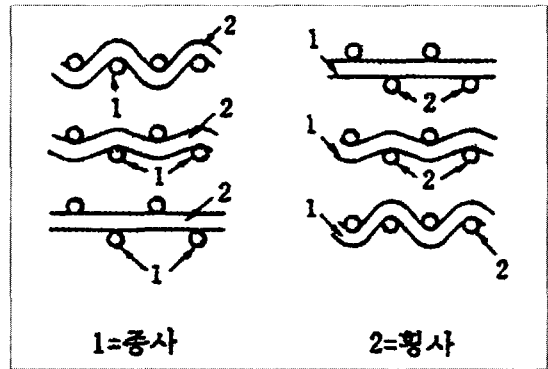


그림 3. 가력에 의한 직포의 변형

막재를 주로 이용한다. 테프론 막재와 폴리에스터 막재의 장단점을 표6에 나타내었다.

3) 막재의 성능

막재는 직포구조를 기본으로 하고 있다. 직포구조는 종사와 횡사로 구성되어 한쪽이 늘어날려고 하면 다른 한쪽은 줄어들려고 하며 이 때문에 기하학적인 형태의 안정성이 확보되는 것이다.

막재는 실의 굵기, 직조 밀도 등에 의하여 다양한 강도를 갖는다. 또 막재의 강도 특성은 실 방향의 강

도로 나타나지만 종사, 횡사 방향에 의한 강도차, 늘어남의 차, 인장강성의 차, 포아송비의 차 등이 있으며 제품에 따라 달라질 수 있다.

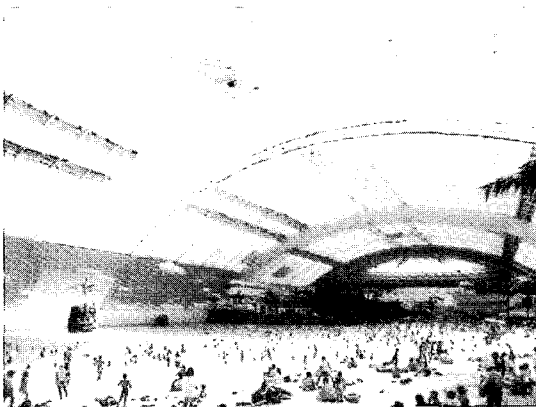
막재의 파손은 흡과 인장내력에 의해 파단이 시작되어 찢어짐을 동반할 경우 큰 파손으로 이어진다. 따라서 막재는 인장강도가 우선적으로 중요하지만 인열강도가 높은 재료를 사용하는 것이 바람직하다.

막재의 내구성은 코팅재의 종류, 양, 색 등에 의해 크게 변화된다.

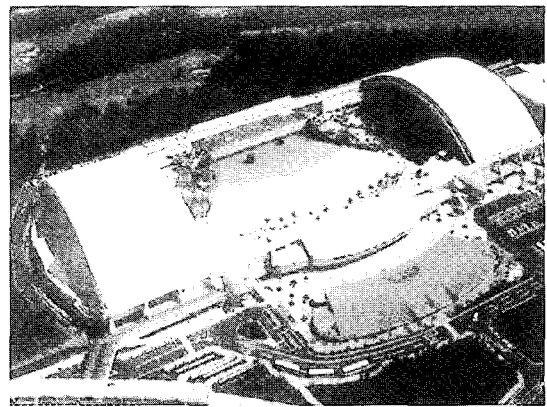
막재의 접합은 고주파 접합, 열융착 접합, 봉재 접합이 주로 사용되며 접합력 확보를 위해 접합폭을 충

표 7. 막재의 사용시 고려사항

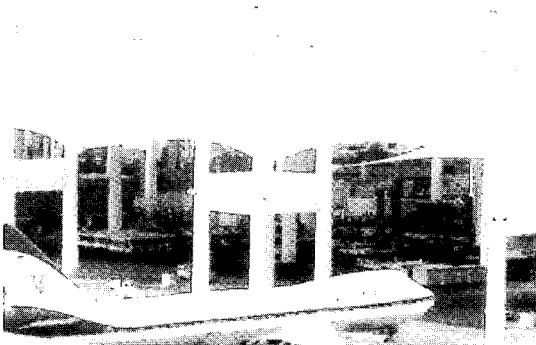
항 목	고 려 사 항
강 도	압축, 휨에는 저항하지 않으며 인장과 전단에만 저항한다. 실의 방향에 의한 강도차이가 있다.
인 열	막구조에서는 얇은 막재가 구조재료가 되므로 인열에 의한 파손이 많다. 인열을 막을수 있는 고려, 인열에 강한 재료의 선택 등이 필요하다.
크림(Creep)이방성	장기하중 하에서의 Creep을 고려하여 그것을 흡수하는 방법이 필요하다. 실 방향과 다른 방향에서는 늘어남이 크다. 종사와 횡사의 인장강성의 차가 크다.
내구성	PVC코팅으로서는 내구성에 한도가 있어 영구적으로 사용할려면 교체해야 한다. 봉제접합을 한 경우에는 접합부 내구성에 유의해야 하며 도장 등으로 보호해야 한다.
방화성	4불화 에틸렌수지(PTFE)코팅 유리 섬유직포는 방화성이 좋아 불연재에 해당한다. PVC코팅 폴리에스테르 섬유직포는 방염2등급에 해당된다.



Ocean Dome 내부(일본)



Ocean Dome 내부(일본)



Jeddah Haj Terminal(사우디)

분히 확보할 필요가 있다.

고주파 접합과 열융착 접합의 경우 박리에 주의해야 하며, 봉제 접합의 경우 접합부 내구성 문제에 주

의해야 한다. 유리섬유 직포의 경우는 봉제 접합은 바람직하지 않다.

막재의 사용시에 고려할 사항을 <표 7>에 정리하였다.

4) 막재의 시험방법

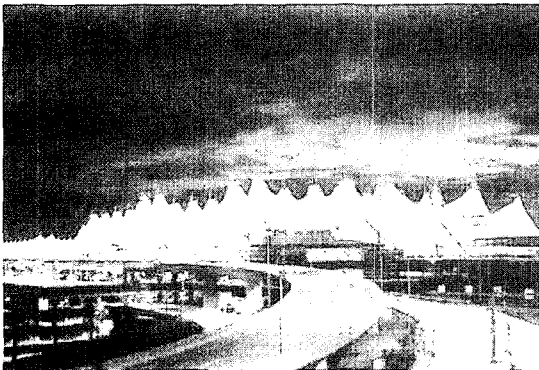
막재의 물리적 특성을 확인하기 위해서는 제작, 가공된 제품의 시험이 필요하다.

시험 항목은 무게, 두께, 장력(인장, 인열, 접합부), 코팅상태, 전도성, 불연성, 흡음성 등에 대하여 정한 시험기준을 통과한 제품을 사용하여야 한다.

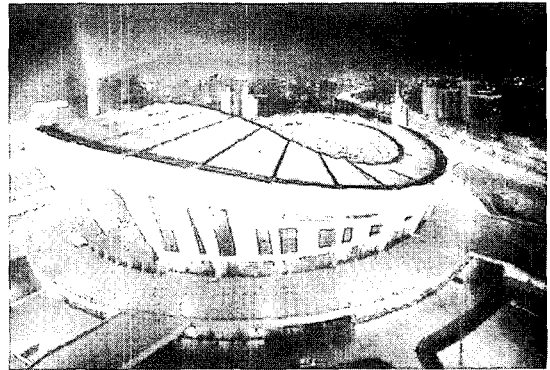
국내에서는 막재에 대한 시험 기준이 없어 미국 ASTM, 독일 DIN, 일본 JIS 등의 해외 기준을 적용

표 8. 막재의 생산회사

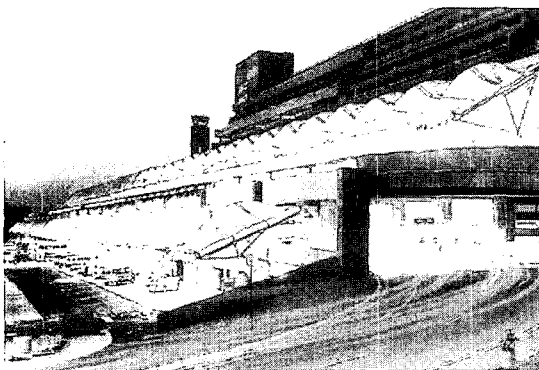
종 류	국가명	회 사 명	제 품 명	국내 사용예
PTFE 막재	미국	CHEMFAB	SHEERFILL	월드컵대구경기장, 월드컵인천경기장, 월드컵 서울경기장, 수원야외음악당, 주택은행전시관, 울산체육관, 양주별산대놀이마당
	일본	ALPHA	ALPHAGLAS	
		FURON	FLUORGLAS	
		CHUKOH KANBO PRAS 외 10 여개 업체	SKY TOP	월드컵제주경기장, 분당주택전시관, 성남운동장 스탠드
독일	VERSEI DAG	VELAFLON	반포주유소	
PVC 막재	국내	한국화이바	HGF	동덕여대 음악당, 무주운동장본부석
PVF 막재	국외	많은 회사가 있음		
PVDF 막재	국내	경인, 한화포리마 등 많은 회사가 있음		여의도종합전시장(PVDF)외 다수



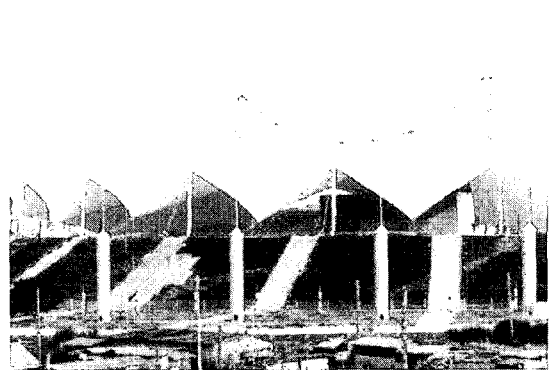
Denver 국제공항(미국)



Shanghai Stadium(중국)



Orlando 국제공항(미국)

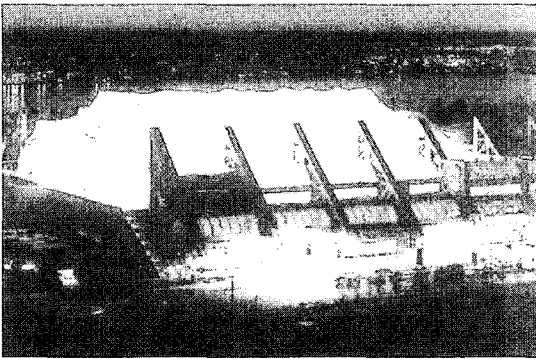


Manila Freedom Ring(필리핀)

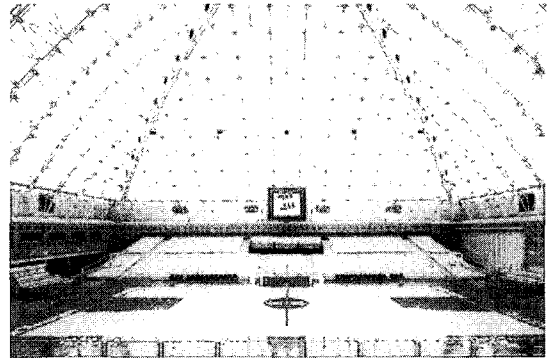
하고 있으며 특별한 지침이 없는 한 국내 적용시 위 시험법 중 어느 한가지를 통과하면 된다.

5) 막재의 생산회사

막재는 크게 유리섬유를 직포로 하는 PTFE 막재



Sandiego 회의장(미국)



Ravenna 경기장(이탈리아)

와 폴리에스테르를 직포섬유로 하는 PVC계열의 막재가 있다. PVC계열의 막재 생산은 국내에서도 가능하나, PTFE 막재는 대부분 구조용으로 사용되므로 생산에 특별한 기술이 필요하고, 큰 스팬의 막재생산, 균질한 품질 확보가 필요하여 대부분 국외에서 생산된 제품을 사용하고 있다. 막재의 생산업체와 적용 예를 위 표8에 정리하였다.

4. 맺음말

초기 구조물의 역사는 돌로서 시작되어 현재는 콘크리트, 철, 알루미늄, 막 등 여러 다양한 재료가 구

조재료로 이용되고 있으며 공간의 대형화로 인한 구조재료로 이용되고 있으며 공간의 대형화로 인한 구조재료의 경량화가 필수적인 것이 되고 있다. 그러나 콘크리트, 철 등의 재료로는 대형공간을 창출함에 한계가 있으며 이를 극복할 수 있는 것이 막구조이다.

막구조의 수명은 30년 정도로 추정되나 유지관리에 따라 50년 이상을 바라볼 수 있는 구조이며, 디자인의 수려함, 초경량성, 운반성, 시공성 등에서 탁월하기 때문에 전세계적으로 그 사용이 증가추세에 있으며 국내에서도 2002 월드컵을 계기로 본격적으로 막구조가 시작되고 있으므로 이를 대비하는 지혜가 필요할 것이다.