

# 건축구조용 막재의 특성

## The Properties of architectural fabrics

이 장 북\*  
Lee, Jang Bog

### 1. 서 론

현재 국내외에서 대공간 구조를 형성하기 위해 많이 사용되는 막구조물의 주 재료는 건축구조용 막재 (architeturual fabric)이다. 건축구조용으로 사용되는 막재는 일반 산업현장에서 쓰이는 막재와 비교할 때, 기본적인 구성은 비슷하지만 내구성능면에서 많은 차이가 있다. 막재 내구성능의 차이는 직포의 종류와 더불어 코팅(coationg) 및 토핑(toppiong)재료에 따라 다르다. 이러한 차이는 막구조물의 공사금액에 많은 영향을 미치게 되므로 구조물의 사용목적, 규모, 장소 등에 따라 적절한 막재가 선택이 되어야 경제적인 설계가 될 수 있다.

지금까지 구조용 막재는 기술개발을 통해 문제점들을 보완함으로써 지난 30년 동안 많은 변화가 있었다. 이제는 건축구조물에 사용되는 대표적인 막재는 pvc 계열과 테프론 계열의 막재로 양분화 되어가고 있다. 이러한 양분화 과정 중에도 상호의 장단점을 보완하는 수많은 구조용 막재가 개발되고 있으나 이에 관한 전문적인 지식의 전달이 원활하지 않아 초기설계에서 재료적 특성을 무시한 채 진행되어 경제적인 손실은 물론, 사용목적을 이루지 못하는 경우가 종종 발생하고 있다.

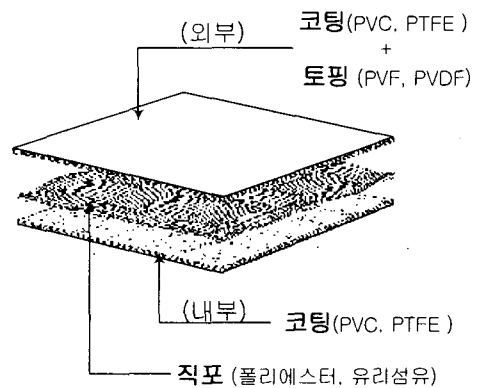
설계자는 막구조 전문업체에 종사하는 회사로부터 설계에 필요한 정보를 얻게 되는 것이 국내의 일반적인 시스템이다. 그러나 전문업체에 종사하는 엔지니어조차도 막재의 특성을 정확히 이해하지 못하고 자사의 이익을 위해 왜곡된 정보를 전달함으로써

막구조물이 지니고 있는 장점을 살리지 못하는 경우가 많다. 따라서, 본 고에서는 건축구조용 막재의 구성, 재료특성과 장단점을 소개함으로써 막구조물의 경제적 설계에 도움이 될 수 있도록 하고자 한다.

### 1. 건축구조용 막재

#### 1.1 막재의 구성

막재의 구성은 그림 1.과 같이 기본적으로 직포와 코팅재로 구분된다. 구성 요소들 중에서 막재의 인장강도는 직포에 의해 대부분 결정되며 코팅재와 토핑재는 자외선과 오염 등의 외부 환경 요인으로부터 직포를 보호하는 역할을 한다. 토핑은 PVC 계열의 막재에서 필요하며 테프론 막재에서는 사용하지 않는다. 이와 같이 막재의 물리적인 성능을 유지시키기 위한 코팅재의 선택과 직포의 종류에 따라 다양한 막재가 만들어 진다.



\* 정회원 · (주)대동엠에스 이사, 공학박사

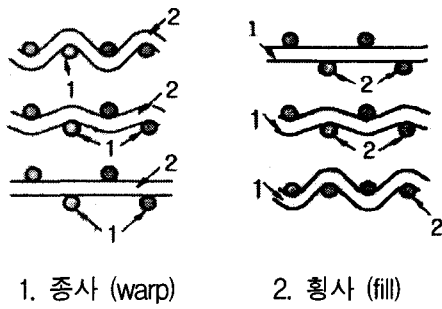
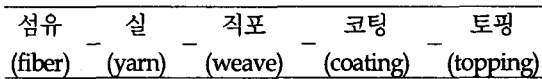


그림1 막재의 구성

막재의 생산과정을 살펴보면, 아래와 같이 섬유생산에서 토퍼까지의 많은 단계를 거치게 된다



주로 건축용 막재에 사용되는 섬유는 폴리에스터(polyester)와 유리섬유(glass fiber)이다. 이러한 섬유를 꼬아서 만든 것이 실이 되며 실을 이용하여 옷감을 만드는 방법과 동일하게 종사와 횡사로 배치하면 직포가 되는 것이다. 실을 배치하는 방법에 따라서도 그림 2와 같이 평직, 수자직, 능직 등의 방법이 있으나 구조용 막재는 양방향의 인장강도를 비슷하게 하기 위해 평직을 주로 사용한다.

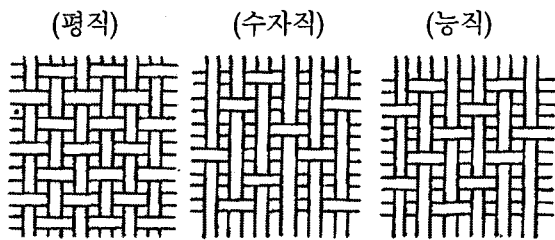


그림 2. 직포의 구성방법

## 1.2 막재의 조합

막재의 조합은 직포와 코팅재 및 토퍼재의 결합으로 구성되며 주로 사용되는 종류는 표 1.과 같다. 막재의 인장강도는 섬유의 굵기가 작은 것을 여러 가닥으로 꼬아 만드는 것이 좋기 때문에 유리섬유를 사용할 경우  $\beta$ -yarn을 이용하는 막재가 구조적으로 유리하며 폴리에스터 섬유의 경우도 최소 1000 데니

어(denier) 이상의 가는 섬유를 이용하는 것이 좋다.

표 1. 막재의 구성재료

직포	코팅재	토퍼재
- 유리섬유 (D-yarn, $\beta$ -yarn)	- 4불화에틸렌 수지 (PTFE, A종) - 실리콘 (A종) - 폴리염화비닐(PVC, B종)	
- 폴리에스터 - 폴리아라미드	- 폴리염화비닐(PVC, B종) - 크로로 플렌고무 (C종)	- 아크릴 - PVDF - PVF

표 1.에서 폴리아라미드 섬유와 크로로플렌고무는 현재 구조용 막재로는 거의 사용하지 않고 아래와 같은 막재의 조합을 많이 사용한다.

- (1) 유리섬유 + PTFE 코팅 (테프론 코팅)
- (2) 유리섬유 + 실리콘 코팅
- (3) 폴리에스터 + PVC 코팅
- (4) 폴리에스터 + PVC 코팅 + 아크릴 토퍼
- (5) 폴리에스터 + PVC 코팅 + PVDF 토퍼
- (6) 폴리에스터 + PVC 코팅 + PVF 토퍼

기본적으로 (1)번 막재에 사용된 PTFE는 불소성분 이므로 재료의 화학적으로 특성상 토퍼를 하지 않는다. (2)번 막재는 국내 최초의 막구조물인 올림픽 체조경기장에 사용된 막재이다. 실리콘 코팅막은 사용 당시 세계적으로 가장 좋은 막재로 알려졌으나 자정 능력(self cleaning)에 문제가 발생되어 지금은 거의 사용하지 않는다.

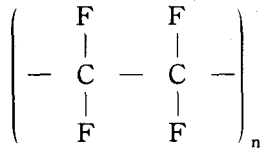
폴리에스터를 이용한 (3),(4)번 막재는 가격이 가장 저렴하지만 자외선과 자정능력이 좋지 않아 짧은 시간동안 사용되는, 행사용 천막이나 임시 가설텐트에 주로 사용된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 코팅위에 토퍼 처리를 한 (5),(6)번 막재가 PVC 계열의 구조용 막재로 사용된다.

## 1.3 코팅재 및 토퍼재의 화학적 특성

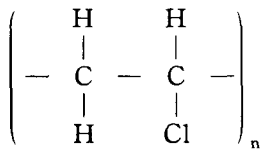
코팅재 및 토퍼재의 화학적 특성은 막재의 인장강도에 직접적인 영향을 주지 않지만, 직포를 보호하여 강도를 장기간 보존하기 위한 재료이므로 막재의

수명에 많은 영향을 미치게 된다. 사용재의 화학적 특성은 다음과 같다.

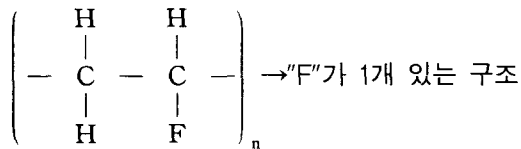
(1) PTFE (Poly Tetra Fluoro Ehtylene, 4염화불소)



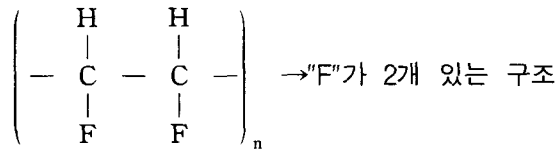
(2) PVC (Poly Vinyl Chloride, 염화비닐)



(3) PVF (Poly Vinyl Fluoride)



(4) PVDF (Poly Vinyl Deneffluoride)



PTFE는 불활성 재료로써 가장 화학적 결합력이 강하여 염기( $cl_2$ )나 자외선에 오랫동안 견딜 수 있기 때문에 막재의 수명이 가장 길다. PVC 코팅은 화학적 결합력이 약하기 때문에 불소가 포함된 PVDF나 PVF로 토핑을 하여 막재의 수명을 연장하여야 한다. 막재의 토핑방법에 있어 PVF는 필름의 형태로 접합(laminate)하지만 PVDF는 수지형태의 액상 방법으로 처리한다. 따라서 자정능력은 물론 막재의 수명은 PVF로 토핑처리한 막재가 PVDF 막재에 비해 우수하다.

#### 1.4 막재의 상품명

막재를 만드는 기본적인 방법은 동일하지만 생산 회사마다 특정상표를 사용하기 때문에 이에 관해 정

리하면 표 2와 같다.

테프론 막재는 월드컵 경기장을 위해 국내에서 생산을 시도하였으나 채산성의 원인으로 인해 지금은 전량 해외로부터 수입에 의존하고 있다. 그 외 PVC 계열의 막재는 해외에 수출을 할 정도로 제품이 우수한 것으로 알려져 있다.

표 2. 막재의 호칭

막재조합	상품명	일반호칭
유리섬유+PTFE	- sheerfill (Chemfab사, 미국)	- 테프론 막재 - PTFE 막재
	- FGT (Chukoh사, 일본)	
	- velaplon (Versaidag사, 독일)	
	- solus (Taconic사, 영국)	
폴리에스터+PVC	- joltop의 다수	PVC 막재
폴리에스터+PVC +PVDF	- mirasol	PVDF 막재
	- MS-01	
	- SSB 2000	
폴리에스터+PVC +PVF	- MS-11	-PVF 막재
	- MVT	-테드라 막재

동일한 막재의 조합일 경우라도 직포의 밀도, 코팅 기술력에 의해 제품이 달라지므로 통상 "MS-01, MS-02, FGT 600, FGT 800" 등과 같이 숫자를 이용하여 제품의 강도를 표기한다. 그러므로 정확한 명칭을 확인하는 것이 설계자의 올바른 선택이다.

## 2. 막재의 물리적 특성

### 2.1 막재의 강도

막재를 선택하는 중요한 물리적 강도는 인장강도(tensile strength), 굽힘강도(folded strength), 접합부 인장강도(welding strength), 인열강도(tear strength) 등이 있다.

인장강도와 접합부 인장강도는 막구조물의 기본 검토 사항으로 응력-변형 해석결과와 비교하여 막재를 선택하는 중요한 기준이 된다. 굽힘강도는 시공 시 필연적으로 발생하는 막재의 접합부분에 인장강도 저하와 관련된 강도이다. 인열강도는 예측하지 못한 막의 부분파손 후 발생한 크랙(crack)에 저

항하는 능력을 의미 한다.

인장강도의 시험은 사진 1,2와 같이 1축 인장시험기  
이나 2축 인장시험기를 수행하여 성능을 평가한다.

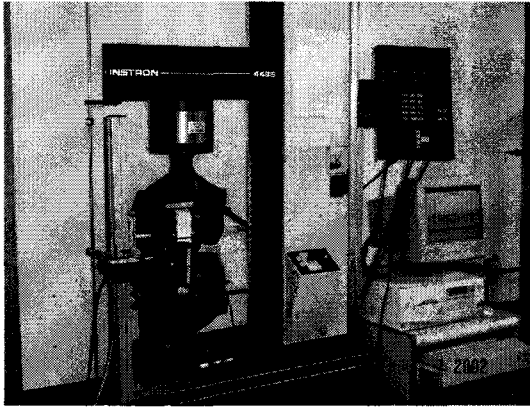


사진 1. 1축 인장시험기

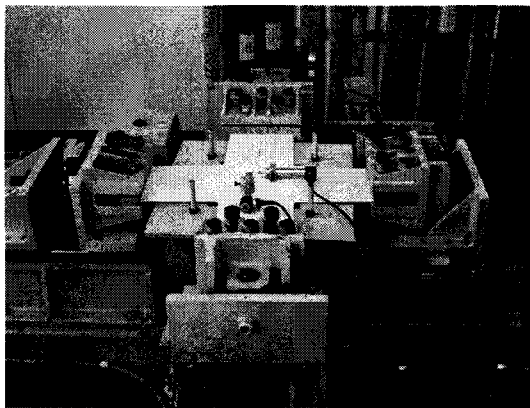


사진 2. 2축 인장시험기

범규상으로 외국은 물론 국내도 1축 인장시험이  
일반화 되어있다. 그러나 실제 막재는 직포의 구성상

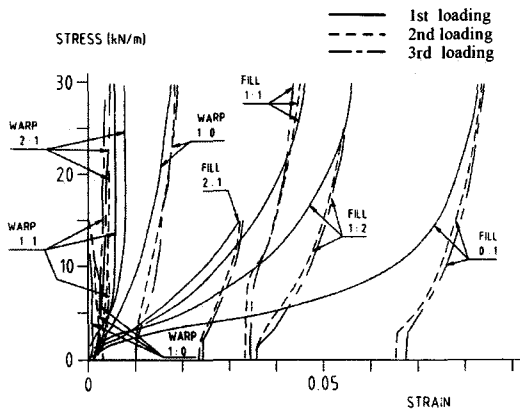


그림 3. 유리섬유 막재의 2축 인장시험결과

그림 3.과 같이 재료적 비탄성 거동을 하게 되고 2  
축의 초기응력 비에 따라서도 다른 거동이 나타나  
게 된다. 이것은 막구조 해석 시 막재가 선형 탄성  
이라는 가정을 하기 때문에 탄성계수를 산정하기  
위해 어려움이 있다는 것을 의미한다.

현재의 탄성계수 산정 방법은 그림 4.와 같이 일  
부 구간을 제외한 부분에서 직선으로 가정하여 사  
용하고 있다. 따라서 사용 막재의 탄성계수 값을 산  
정하는 엔지니어에 의해 해석오차가 발생할 가능성  
이 있다. 이러한 해석적 오차를 줄이고 실제 막재료  
의 거동에 맞는 재료비탄성 해석에 관한 연구가 지  
속적으로 진행되고 있는 중이다.

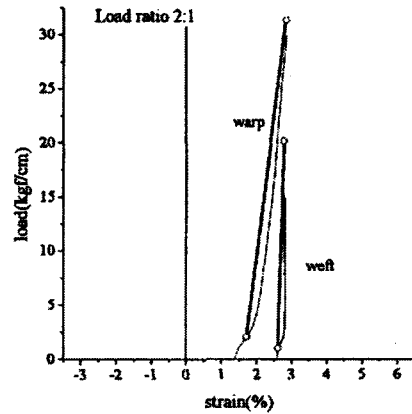


그림 4. 탄성계수의 산정

굽힘강도 시험은 사진3.과 같이 막재를 한번 접은  
후 인장시험과 동일한 방법으로 수행한다.



사진 3. 접힘강도 시험편 제작과정

막재를 구성하는 직포의 성분 중에서 유리섬유를  
사용한 막재는 시공 시 접힘에 의해 막재의 인장강  
도 저하 현상이 크게 발생되어 구조물의 유지 보수

에 문제를 발생시키는 경우가 있다.

사진 4. 는 테프론 막재를 사용한 구조물에서 시공 시 접힌 부분이 발생하여 일정한 시간이 경과한 후 구멍이 발생한 경우이다. 구멍주위의 검은 선은 접힌 부분의 유리섬유가 손상되어 빛의 굴절에 의해 나타나는 현상이다. 이러한 부분의 인장강도 저하는 30% 이상일 경우가 많기 때문에 시공 시 많은 주의를 기울여야 한다.

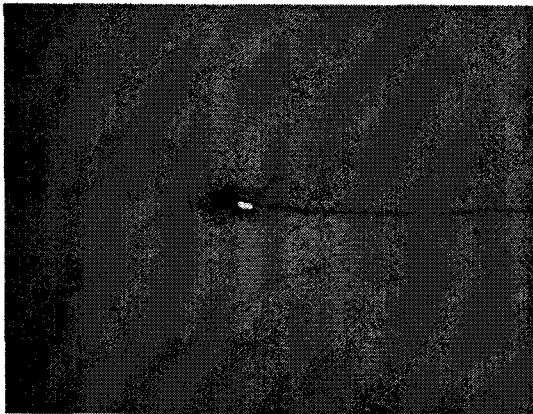


사진 4. 시공시 접힘에 의한 손상

폴리에스터 섬유를 사용한 막재는 전체적인 수명은 유리섬유 막재에 비해 짧지만 접힘에 의한 손상은 거의 발생하지 않는 장점이 있다.

인열강도 시험은 사진 5.와 같이 일부를 자른 후 시험하게 된다. 폴리에스터를 사용한 막재가 유리섬유를 사용한 테프론 막재에 비해 인열강도가 좋다.

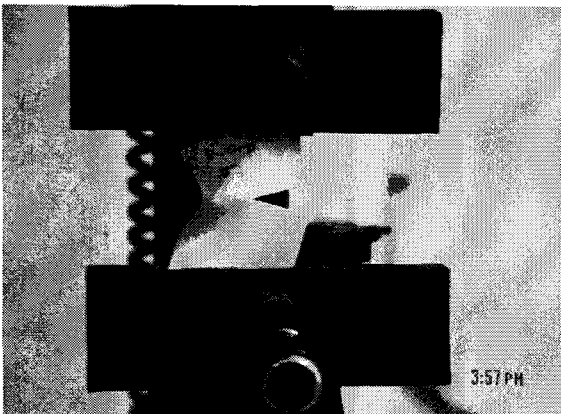


사진 5. 인열강도 시험

이러한 이유는 인열에 의해 섬유에 전단응력이 발생하면, 유리섬유는 부러지게 되지만 폴리에스터 섬유

유는 유연하게 방향이 변화됨으로써 크랙의 시작점에 섬유가 모이는 볼링(balling)현상이 발생되기 때문이다.

그림 5.는 막재의 생산과정에서도 강도 편차가 다른 구조재에 비해 많이 발생하는 것을 보여주고 있다. 이러한 특성은 막구조물의 해석 시 막재 안전율을 단기하중에 대해 8, 장기하중에 대해 4를 선택하는 한 가지 원인이기도 한다.

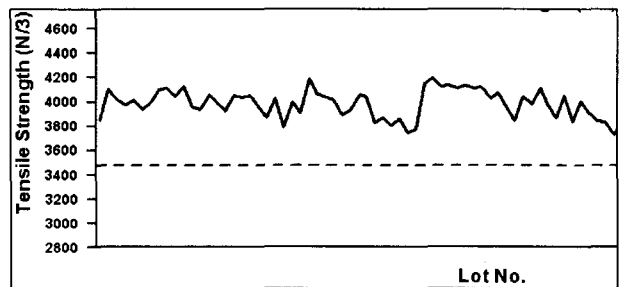


그림 4. 막재 생산 Lot별 인장강도 변화 (PTFE)

## 2.2 막재의 비교

막재를 선택하는 기본적인 항목으로는 강도 외에 내한성, 투광성, 난연성 등 많은 항목들이 설계목적에 따라 고려되어야 한다. 중요한 항목들의 장·단점을 비교하면 표 3. 과 같다.

표 3. 막재의 성능비교표

항목	Teflon	PVF	PVDF
적포	유리섬유	폴리에스터	폴리에스터
코팅재	테프론(PTFE)	PVC+PVF	PVC+PVDF
밀도 (개수/2.5Cm)	26X22 이상	24X24 이상	24X24 이상
중량 (g/m <sup>2</sup> )	700 이상	900 이상	900 이상
두께 (mm)	0.7 이상	0.9 이상	0.9 이상
인장강도 (kg/5cm)	600 - 800	400 - 750	400 - 750
인열강도 (kgf)	30 - 40	60 - 80	60 - 80
신장율 (%)	6 - 12	20 - 25	20 - 25
투광성 (%)	10-13	7-9	7-9
색 상	흰색만 가능	제한적	다양함
내한성	우수함	우수함	우수함
가 격	고가	중고가	중가
내구연한	25 - 30	12 - 15	6-8
난연성	난연 1등급	난연 2등급	난연 2등급
자정능력	우수	우수	보통

표 3.에서 명기된 밀도, 중량, 두께 및 강도는 구조물의 규모와 설계자의 판단에 의해 변할 수 있다. 여기서는 구조용 막으로 사용된 경우와 생산회사의 카다록 및 구조해석에 관한 경험을 참고하여 설정한 값들이다.

이외에도 막재의 성능을 개선하기 위해 PVC 계열의 막재는 난연, 항균, 자외선에 저항할 수 있는 재료들을 혼합하여 사용하는 것이 일반화 되어 있다.

테프론 막재는 일본과 미국에서 영구 막구조물에 많이 사용되어 왔다. 이것은 코팅재의 특성상 외부의 환경으로부터 장기간 성능을 보존할 수 있는 특성과 난연에 대한 성능이 좋기 때문이다. 그러나 유럽은 스투트 가르트(Stuttgart stadium) 경기장과 같이 초대형 구조물과 중소형 막구조물에 PVC계열의 막재를 많이 사용한다. 이것은 초기 투자비용이 적고 시공이 테프론 막재보다 용이하기 때문이다.

### 3. 막재별 국내 주요시공 사례

국내의 월드컵 경기장(상암, 부산, 인천, 대구, 제주)에 사용된 막재는 수입용 테프론 막재로써 표 2에 명기된 4개국의 막재가 모두 사용되었다. 사진 6, 7, 8은 국내 중소규모에 테프론 막재가 사용된 사례이다.



사진 6. 수원야의 음악당 (PTFE, Sheerfill)

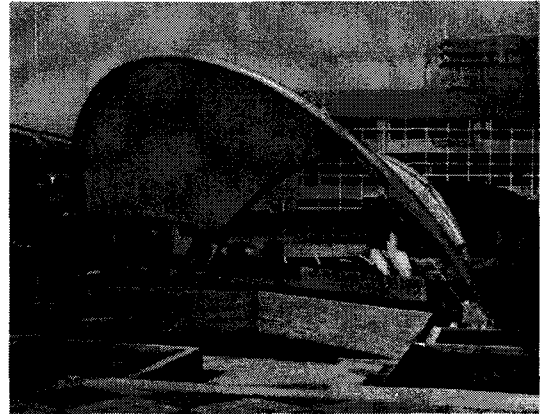


사진 7. 제주관광대 야외무대 (PTFE, FGT)



사진 8. 울산동천체육관 (PTFE, Sheerfill)

사진 9, 10은 PVF 막재를 사용한 사례이다. 자정능력이 PVDF 막재에 비해 우수하고 가격이 테프론 막재에 비해 상대적으로 저렴하기 때문에 중규모 이상의 구조물에서 수요가 많이 발생하고 있다.

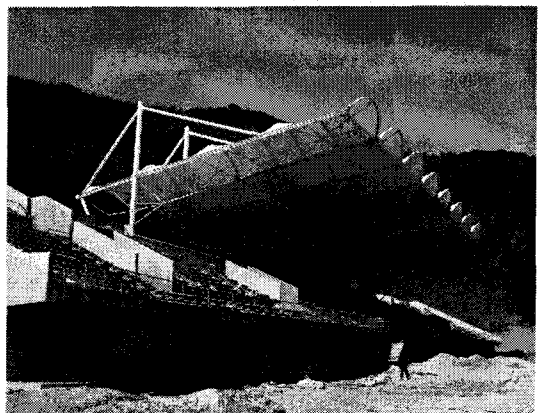


사진 9. 울진공설운동장 본부석 (PVF, 경인 MS-44)

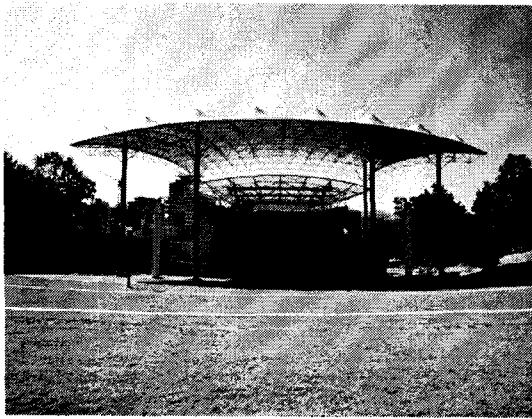


사진 10. 분당중앙공원 야외무대 (PVF,경인 MS-11)

사진 11, 12는 PVDF 막재를 사용하여 시공한 사례이다. 현재 국내에서 저렴한 구조용막재로 널리 사용되고 있으나 자정능력은 PVF나 PTFE보다 좋지 못하다.

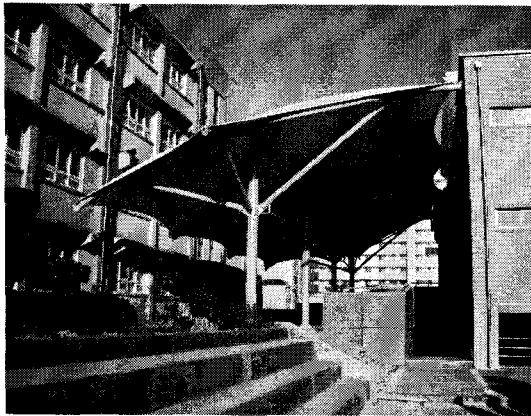


사진 11. 울산신정여중 연결통로 (PVDF, MS-04)



사진 12. 봉화군 야외무대 (PVDF, MS-04)

#### 4. 결론

설계자가 전문적인 지식이 없는 상황이라면, 막재를 선택하는 기준은 전체적인 예산과 막구조물의 규모가 될 것이다. 본인의 경험으로도 설계자의 첫 번째 질문은 “평당 가격이 얼마나 하는가?”라는 것과 “바람에 앞뺏어 지나요?”라는 것이었다. 월드컵 경기장을 통해 일반인들에게 막구조물의 홍보가 많이 되었음에도 태풍으로 일부 경기장에 손상이 발생했기 때문에 당연히 궁금할 수밖에 없는 질문들이다.

첫 번째 질문을 살펴보면, 막구조물의 가격이 구조물의 규모, 막재의 종류, 형태의 난이도 등에 따라 달라 정확하게 결정할 수 없는 사항이다. 참고적으로, 규모가 클수록 평당 가격은 낮아지게 되고 막재는 테프론, PVF, PVDF 순서로 저렴해 진다. 또한, 시공의 난이도 관점에서 케이블을 많이 사용하는 인장 시스템 보다 골조막이나 공기막이 더 저렴하다.

두 번째는 막재의 특성과 구조시스템을 정확히 이해 못한 결과일 것이다. 상대적으로 다른 재료에 비해 막재 개발의 역사가 짧기 때문에 정보 전달에 많은 문제점이 있었던 것으로 판단된다. 비록 전문업체에서 설계를 하였다 해도 현장 담당자를 포함한 관련자 모두가 막재의 특성을 이해하지 못하면 좋은 막구조물이 만들어지기 어렵다. 그러므로 전문업체에 근무하는 엔지니어들도 잘못된 정보의 전달이 되지 않도록 막구조와 재료에 대한 이해도를 높이도록 노력해야 할 것이다.

지금까지 간략하게 건축구조용 막재의 구성 및 특성에 대해 살펴보았다. 설계자와 구조엔지니어들이 막재의 특성을 이해하고 보다 경제적이면서 안전한 막구조 설계를 하는데 도움이 되었으면 한다.