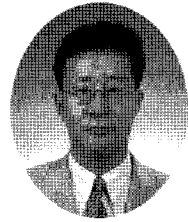


# 인장 막 구조물의 재 인장 도입 시스템

## Re-Tensioning Systems of Tensioned Membrane Structures



서삼열\*

Sur, Sam - Yeol

### 1. 서론

현대 산업 사회에서는 건축 구조물의 경량화, 경제성, 새로운 특성의 신소재 등장 및 새로운 건설공법의 개발 등으로 무주 대 공간 구조에 많은 관심을 갖게 되었다. 이러한 무주 대 공간구조시스템에서 팔목할 만한 주목을 받고 있는 것은 형태의 구성이 자유로운 Space-Frame과 막 구조시스템일 것이다. 그 중 막 구조는 일반 구조와는 달리 연성구조물이며, 구조물에 사용되는 막 재는 일반구조 재료와 달리 장력에 대해서 변형이 큰 재료이다. 이러한 막 재의 특성에 기인하여 적설하중, 풍하중에 대하여 대 변형이 발생하고, 하중의 변화에 따라 수시로 형상변화를 일으킨다. 또한, 인장 막 구조물은 시공 초기에 도입하는 초기장력에 의해서 막 구조물 전체에 강성 부여되므로 초기설계에 있어서 설계자는 이러한 성질을 잘 이해하여, 구조시스템에 항상 적절한 수준의 장력이 존재하도록 설계해야 한다. 따라서 시공 당시에는 초기 장력도입의 도입 방법 및 초기장력의 크기 설정문제, 도입 장력의 크기 측정 문제, 시공완료 후에는 잔류하고 있는 장력의 크기를 수시로 점검하고 기준 이하의 장력이 측정될 때에는 장력의 재도

입에 대해서 고려해야 한다. 적절한 장력의 유지는 구조물의 안정성 뿐 아니라 더 나아가 막 재의 주름(Wrinkling)이나 폰딩(Ponding)등과 같은 재료 및 구조적 결함을 사전에 방지할 수 있다.

따라서 본 고에서는 인장 막 구조물의 재 인장 도입의 필요성과 방법 그리고 이에 따른 시공 예를 보여 주고 각 방법에 따른 장단점을 제시하여 설계자가 인장 막 구조물의 초기 설계에 도움이 될 수 있도록 한다.

### 2. 재 인장도입

#### 2.1 막 재 특성

우리나라에서 인장 막 구조물에 널리 사용되고 있는 막 재료는 PVC계열의 막 재와 테프론 계열의 막 재가 있다. 각 막 재의 신율은 재료의 밀도, 직포의 종류, 두께, 중량 등에 따라서 다르다. 표 1은 막 재 성능 비교표로 막 재의 신율이 재료에 따라 현저히 다르게 나타남을 보여준다.

그림 1과 2는 공기막구조와 현수막 구조에서의 Ponding이 발생하기 쉬운 부분을 나타내고 있다.

사진1은 골조 막 구조에 있어 폰딩 현상이 발생한 부분의 실제 예다. 이러한 현상의 예방책으로는

\* 정회원, 대림대학 빌딩설비시스템과, 교수

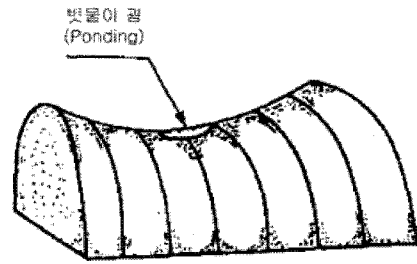
초기 설계 시 물매의 위치를 잘 파악하여 설계하고, 초기 처짐량은 단기 하중 시 스패의 1/15 정도, 장기 하중 시에 있어서는 1/20정도로 유지하도록 계획해야 한다.

이런 현상을 없애기 위해서는 2차 인장응력 도입이 반드시 필요하게 된다. 또한 설치 시 도입한 초기 장력이 감소하거나 완전히 이완되는 경우에는 장력 막 구조의 원리가 성립될 수 없게 되기 때문에 막 면의 상황에 따라 추가장력이 도입될 수 있는 구조디테일이 반드시 필요하다.

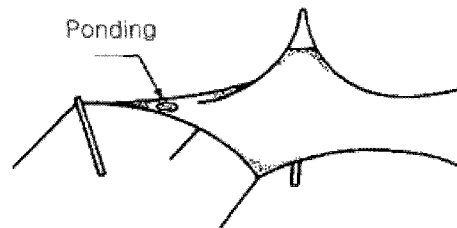
이러한 재 인장 도입 방법으로는 지점 부를 밀어 올리는 방법, 경계 케이블과 막하단부의 긴장, 주변 지주를 바깥으로 기울이는 방법, Valley 케이블과 Lacing 로프를 매는 방법 등에 의하여 시행된다. 어떤 방법을 적용하든 막 면 전역에 장력의 분포가 균등하도록 시공계획을 세우는 것과 유지 보수관리 시스템을 구축하는 것이 장력 막 구조에서는 매우 중요하다.

<표 1> 막 재의 성능비교표

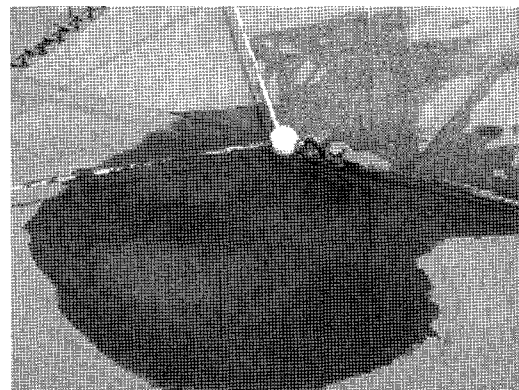
항 목	PTFE	PVF	PVDF
직 포	유리섬유	폴리에스터	폴리에스터
코팅재	테프론(PTFE)	PVC+PVF	PVC+PVDF
밀도 (개수/2.5Cm)	26X22 이상	24X24 이상	24X24 이상
중량 (g/m <sup>2</sup> )	700 이상	900 이상	900 이상
두께 (mm)	0.7 이상	0.9 이상	0.9 이상
인장강도 (kg/5cm)	600 ~ 800	400 ~ 750	400 ~ 750
인열강도 (kgf)	30 ~ 40	60 ~ 80	60 ~ 80
신장율 (%)	6 ~ 12	20 ~ 25	20 ~ 25
투광성 (%)	10 ~ 13	7 ~ 9	7 ~ 9
가격	고가	중고가	중가
내구연한	25 ~ 30	12 ~ 15	6 ~ 8
난연성	난연 1등급	난연 2등급	난연 2등급
자정능력	우수	우수	보통



<그림 1> 공기막구조에서의 Ponding



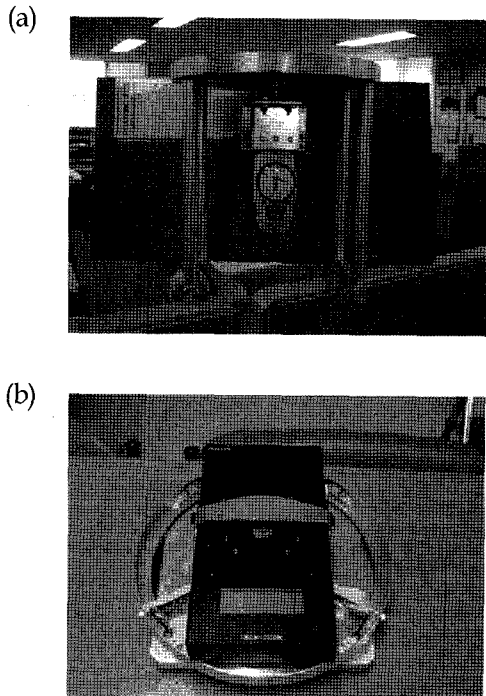
<그림 2> 현수막 구조에서의 Ponding



<사진 1> Ponding 현상

## 2.2 막 장력 측정기(Tensionometer)

인장 막 구조물의 시공완료 후 장력의 이완으로 인하여 막 재에 큰 재장력 도입은 막 재료 특성에 있어 creep등을 고려하면 그다지 바람직한 상황은 아니다. 따라서 규모, 형상등을 고려하여 적정하게 설정되어야 한다. 또한, 시공된 구조물에서 잔류하고 있는 막장력 값을 정확하게 측정하기는 현실적으로 어렵다. 현재는 막장력의 상대적인 값을 측정하여 막장력을 판단하는 경우가 대부분이다. 또한, 막장력 측정기 사용시 측정 시 날씨, 계절 그리



〈사진 2〉 장력측정기

고 측정부 위치에 따라서 많은 결과 차이를 보이므로 막장력 측정시 엔지니어의 경험과 능력이 절대적으로 필요하다. 사진 2는 막장력의 상대적인 값을 측정할 수 있는 장력 측정기다.

이러한 막 장력 측정기는 실험실에서 로드 셀로부터 측정된 장력치를 이 시험기의 기준으로 설정하여 사용하고 있다. 따라서, 수시로 실험실에서 보정하여 정확도를 유지하여야 하며, 측정 시 측정자의 측정 방법에 의해서도 많은 편차를 보이므로 세심한 주의가 필요하다.

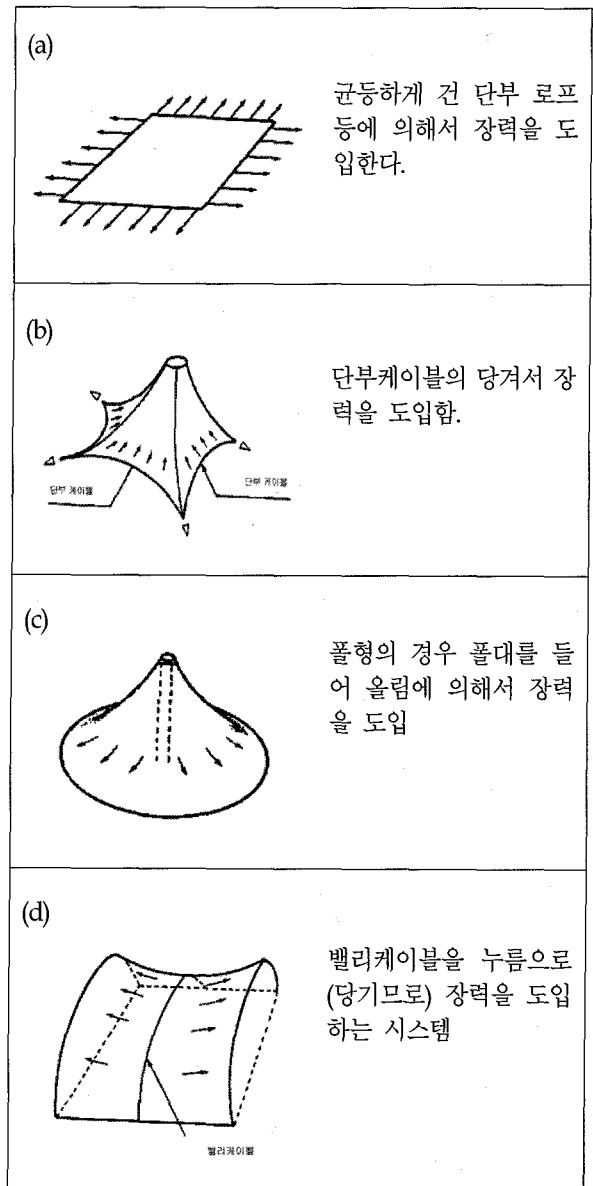
### 2.3 재인장력 도입 방법

현수 막 구조의 경우 막면의 강성을 유지하기 위해서는 막면에 항상 일정 수준의 장력이 유지되어야 한다. 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 바람에 의한 펄럭임, 주름 발생, 응력집중 그리고 반복하중에 의한 막재의 강도저하 등을 방지할 수 있고, 또한 구조체로써 안정된 형상을 유지하게 한다. 그러므로 안정된 막구조물을 유지하기 위해서는 경험 있는 엔지니어가 정기적으로 막장력을 측정해야 한다. 그리고 장력 이완된 막재에 대해서는 설정된

장력 값에 도달하도록 장력의 재도입을 통하여 구조물이 안정된 상태를 항상 유지하도록 해야한다.

막면에 장력을 도입하는데는 이에 필요한 디테일의 도입이 설계 초기 단계에서 반드시 필요하며 따라서 설계자는 막 구조 전문가의 협조를 받아 한다. 일반적인 장력 재도입 장치의 기본 개념은 그림 2와 같다.

재인장 도입은 그림 2에서와 같이 경계부의 강제 변위 또는 중심 폴 주변의 강제 변위 등에 의하여 도입되고 그 재인장 도입 방법은 크게 6가지로 나눌 수 있다.



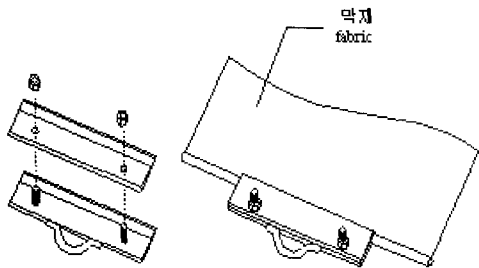
〈그림 2〉 장력 재도입의 기본원리

2.3.1 Lacing Rope 방식

이 방식은 막면에 고리 등의 보강철물등을 부착, Lacing Rope를 구멍쇠에 끼워 끌어당긴 Lacing Rope를 강관보에 감아 댄으로써 막면에 장력을 도입하는 방법이다. 막재료 및 로프의 신축력에 의해 초기장력이 저하 될 경우, 로프를 다시 꼭 조임으로써 장력을 도입할 수 있다. 또 이때 그림 3과 같은 장력 도입용 클램프 등 간단한 장치를 이용하여 체결 할 수 있는 장점이 있다.

그러나 단점으로는 로프가 자외선, 비 등에 의해 약화되기 때문에 일정기간이 경과한 후에는 로프를 교환해야 할 필요가 있다. 또한, 구멍쇠에 집중적으로 힘이 가해지기 때문에 로프에 힘이 너무 크면 그림4. (c)와 같이 막재에 뚫린 구멍이 크게 변화하여 그곳으로부터 막재의 파손과 구멍쇠가 빠질 수 있으므로 주의를 요한다.

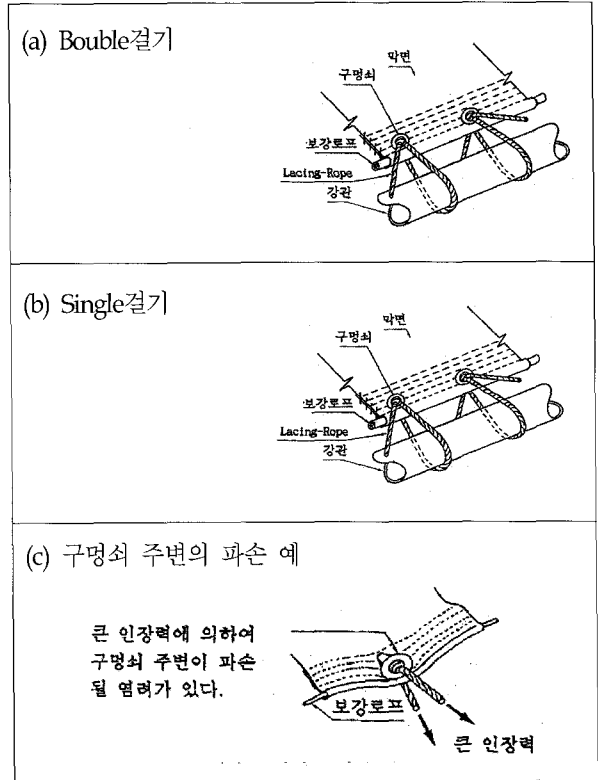
또한, 도입할 장력의 크기는 사람의 감각에 의하여 조정하기 때문에 일정장력을 도입하기는 곤란하며 편차가 생긴다. 이 때문에 경미한 구조물이나, 발생하는 응력이 작은 경우에 주로 이용한다. 시공 완료 후 2차 인장력을 가하기에는 불합리한 구조로 초기 디자인시 처짐이 무리하게 발생하지 않도록 주의를 요한다.



<그림 3> 장력도입용 클램프



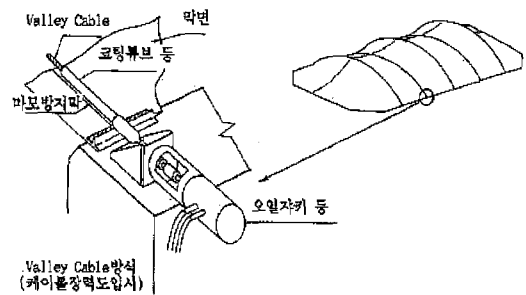
<사진 4> Lacing Rope 방식의 예



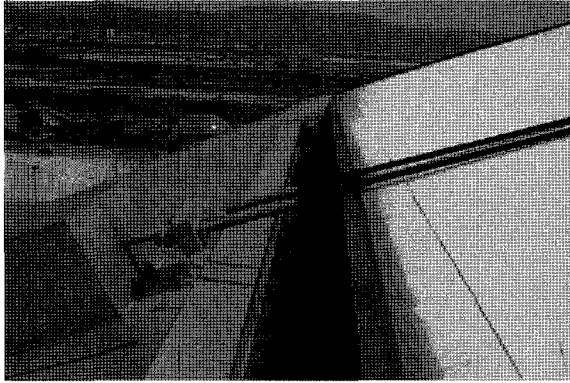
<그림 4> Lacing Rope 방식의 예

2.3.2 밸리케이블 방식

설치된 밸리케이블을 유압잭, 기계식잭, 턴버클 등에 의하여 잡아 당겨 케이블이 막면을 누르게 해 막면에 장력을 도입하는 방법이다. 이 방식은 막면의 넓은 범위에 장력을 도입하는데는 유효하다. 그러나, 케이블 등의 마찰에 의해 파손될 위험이 있으므로 피복케이블을 이용하거나 또는 내마찰성이 높은 막재료를 케이블과 막면과의 접촉부분에 부착해야 하는 단점이 있다. 사진 5의 방식은 기계식 잭으로 볼트를 조임으로 케이블에 인장력을 재도입하는데 용이한 방식이다.



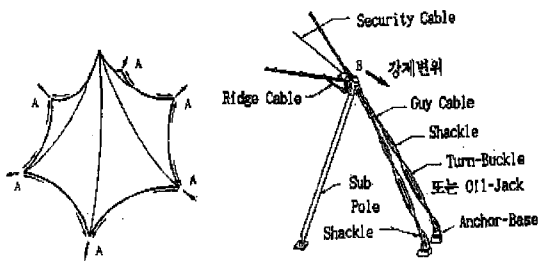
<그림 5> 유압잭 등에 의한 장력도입 방법의 예



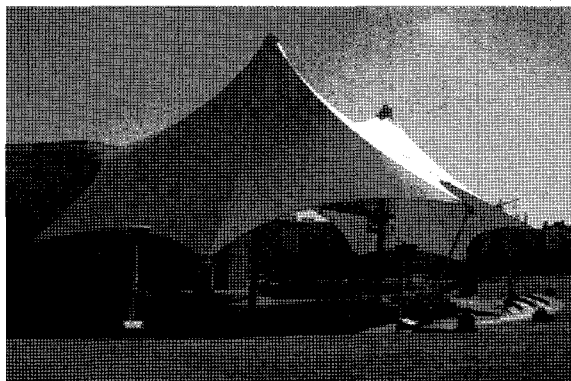
〈사진 5〉 울산 실내 체육관

2.3.3 주변 케이블 긴장 방식

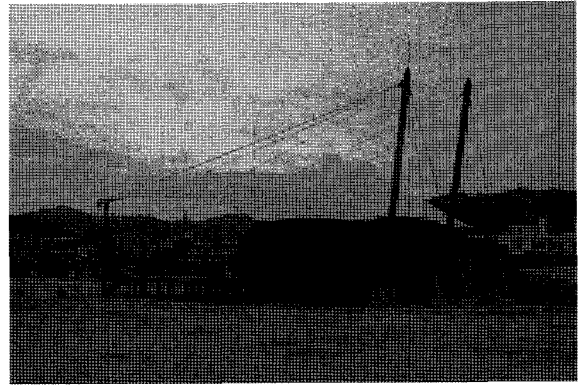
막면 주변에 케이블을 이용하는 구조에 주로 사용되는 방법으로 주로 현수막 구조에서 Catenary 케이블을 넣는 형식의 전형적인 장력도입방법이다. 그림 6의 수원 야외음악당의 경우는 Catenary 케이블과 Ridge 케이블을 2개의 강관 기둥 뒤에 부착된 Tie Back 케이블에 부착된 턴버클을 이용하여 구조물 전체에 장력을 도입하도록 설계되어 있다.



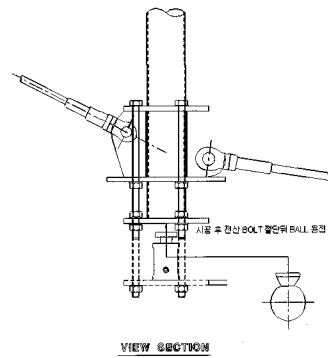
〈그림 6〉 주변 케이블의 긴장방식의 예



〈사진 6〉 수원 야외음악당



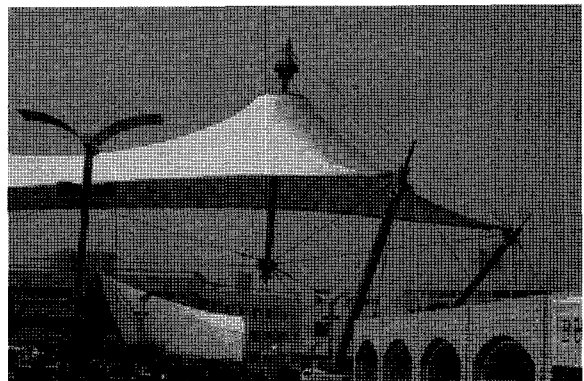
〈사진 7〉 봉화군 야외무대



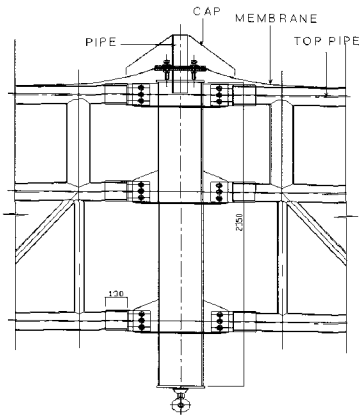
〈그림 7〉 밀어올림 방식의 예

2.3.4 밀어올림 방식

지주를 유압잭등으로 상부로 밀어 올려 막면에 장력을 도입한다. 중앙기둥을 들어 올리는 대신 지주 상부에서 턴버클 및 유압잭 등에 의하여 막재 상부랑을 들어 올리는 방법이다. 그림 7은 밀어올림 방식의 디테일을 보여주고 있다. 이 방식은 초기 장력도입 후 장력 도입부분을 제거하므로, 재인장 도입이 어려운 방식중에 하나이다. 그러므로 막패턴 및 초기 인장도입에 있어서 엔지니어가 주의를 기울여야한다.



〈사진 8〉 제주 관광대학정문



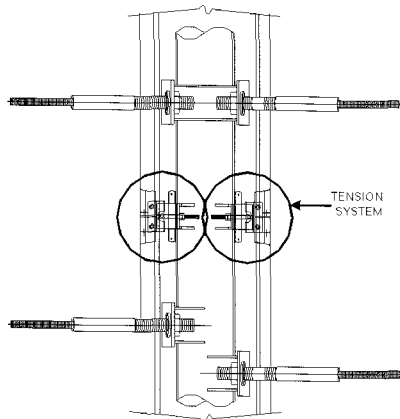
〈그림 8〉 파이프 들어올림 방식의 예

### 2.3.5 파이프 들어올림 방식

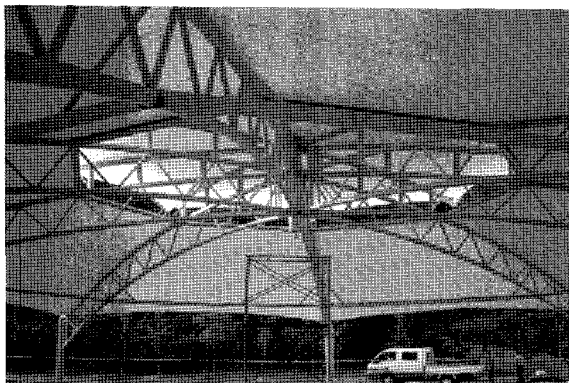
하부의 지지구조와 막재 사이에 파이프를 설치하여 그 파이프를 잭 및 볼트 등에 의하여 들어 올려 막재에 장력을 도입하는 방법이다.

### 2.3.6 텐션볼트 방식

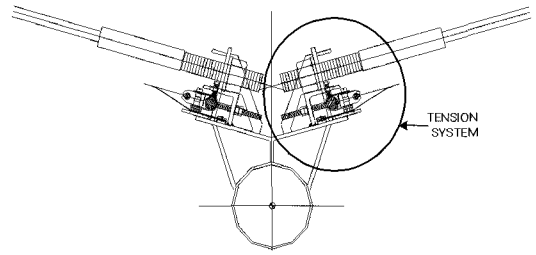
막재 끝 부분을 보강판으로 끼워 그 판에 텐션볼



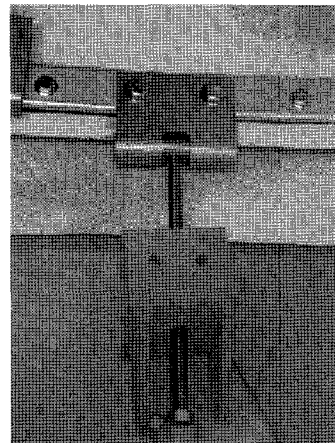
〈그림 9〉 텐션 볼트 방식의 예(평면)



〈사진 9〉 시흥시 육구공원



〈그림 10〉 텐션 볼트 방식의 예(단면)



〈사진 10〉 텐션 볼트 방식

트를 부착한다. 경계지지구조에 볼트축이 오도록 하고, 너트를 세계 조여 막재에 장력을 도입한다. 그림 7,8은 현재 제주 월트컵 경기장에서 사용된 텐션 볼트 방식이다. 이 방식은 시공 완료후 막재에 2차 응력을 주기가 용이한 방식이다.

## 3. 결론

인장 현수막구조의 경우 막면에 도입된 장력은 구조물 전체의 강성을 유지하는 매우 중요한 요소가 된다. 따라서 시공 초기에 적절한 크기의 초기 장력 설정은 매우 중요하고 따라서 초기 설계시 이러한 구조물의 설계 및 시공에 경험이 많은 엔지니어의 협력이 필수적이라 할 수 있다. 그러나 구조물이 완공된 후 사용 상태에서 여러 가지 이유에서 도입된 장력이 이완되는 바람직하지 못한 현상이 발생할 수 있다. 이 경우에 앞서서도 언급한 바와 같이 구조물에는 작은 하중에도 대 변형을 일으켜 펄럭거림(fluttering), 물고임(Ponding), 주름(Wrinkling)등과 같은 바람직스럽지 않은 현상을 유발한다. 따라서, 이러한 형태의

구조물의 경우에는 사후 유지관리 체계가 매우 중요하게 된다. 과거의 유지관리는, 비가 새거나 마감재의 박리가 있다든가, 건물이 실용상의 지장이 생겨 수행하는 사후보전이 많았다. 그러나, 최근은 적극적으로 점검, 검사를 수행해서 기능성능의 저하를 미리 관찰하여 대책을 만들고, 파손을 미연에 방지하는 개념으로 진행해 오고 있다. 결국 막구조에 있어서 시공후에도 막장력 체크 및 디테일에 대한 검토를 충분히 하여 태풍이나 눈에 의해 막구조물에 큰 피해가 없도록 계획적이고 정기적으로 점검 및 검사를 철저히 해야한다. 하지만 아직 우리나라에서는 이러한 예지 및 예방보전이 잘 이루어지지 않고 있는 실정이다.

막구조물은 아주 조그마한 오차에 의해서도 쉽게 변형될 수 있다. 특히 다른 일반 구조와는 달리 접합부 디테일에 따라서 시공성과 유지-관리적측면에서

많은 영향을 준다. 따라서 현수막 구조물의 사용자는 이러한 구조물의 특성을 잘 이해하고 유지 관리에 임하는 것이 이 구조물을 오래 동안 아름답게 유지할 수 있는 지름길이라 할 수 있다.

### 참고문헌

1. 고헌웅 외2인, "막구조물의 재인장 도입방법에 관한 연구," 한국셀공간구조학회 2004년도 춘계 학술발표회 논문집, 제1권, 제1호, 2004, pp238-244
2. 현대건설주식회사 기술연구소, 대공간구조물의 구조방식 및 공법특성에 관한 연구-제2부Membrane 구조물에 관한 연구, 1995, 177-191