

막구조물의 재인장 도입 방법에 관한 연구

A Study on Re-Tensioning Methods of Membrane Structures

고 광 응*, 정 승 택**, 박 명 현***
 Ko, Kwang Ung, Jung, Seung Teak, Park, Myung Hyun

1. 서 론¹⁾

현대로 넘어 오면서 구조물의 경량화, 경제성, 건설공법의 산업화등으로 대공간 구조에 많은 관심을 갖게 되었다. 그 중 형태의 개발에서 자유로움을 추구할 수 있는 구조 시스템으로 Space-Frame과 막구조에 대한 관심이 증대되고 있다. 그 중 막구조는 일반 구조와는 달리 연성구조물이며, 구조물에 사용되는 막재는 일반구조 재료와 달리 신율이 많이 발생하는 재료이다. 이러한 막재의 특성에 의해 적설하중, 풍하중에 대하여 대변형이 발생하고, 또 시간의 흐름에 따라서도 하중에 의하여 수시로 형상변화를 일으킨다. 그러므로 기본 설계에 있어서 설계자는 이러한 성질을 잘 이해하여, 막재료가 항상 인장응력이 작용해야한다. 시공시에는 초기 장력도입문제, 시공완료 후에는 장력 재도입에 대해서 고려하고, 또한 계획 및 유지, 관리상에 있어 충분히 고려해야 한다. 더 나아가 막재의 크랙(Crack)이나 폰딩(Ponding)등과 같은 재료 및 구조적 결함을 사전에 방지할 수 있겠다.

본 고에서는 막구조물의 재인장 도입 방법과 이에 따른 시공예제, 그리고 장력 재인장에 따른 시공 실예를 보여주고 각 방법에 따른 장단점을 제시하여, 설계자가 초기 설계에 도움이 될 수 있도록 하고자 한다.

* 정희원 · (주)대동엠에스
 ** (주)대동엠에스 주임
 *** 정희원 · (주)대동엠에스 본부장

2. 막재료 성능 및 막장력 검토

2.1 막재특성

현재 건축구조물에 사용되는 막재로는 PVC계열과 테프론 계열의 막재를 사용한다. 각 막재의 신율은 재료의 밀도, 직포의 종류, 두께, 중량 등에 따라서 다르다. 표 1은 막재 성능 비교표로 막재의 신율이 재료에 따라 현저히 다르게 나타남을 보여준다.

표 1. 막재 성능 비교표

	PVDF	PVF	PTFE
직 포	폴리에스터	폴리에스터	유리섬유
코팅재	PVDF	PVC + PVF	PTFE
두께 (mm)	0.8 ~ 1.2	0.9 ~ 1.2	0.7 ~ 0.8
중량 (g/㎡)	900 이상	1000 이상	1000 이상
인장강도 (kgf/5cm)	450 ~ 700	450 ~ 700	600~780
인열강도	65 ~ 100	65 ~ 100	30~40
파단시 신율 (%)	20 ~ 25	20 ~ 25	7.5 ~ 11
내구연한	7~10년	10~15년	15~30년

각각의 막재마다 정도의 차이를 보이지만 막재의 신율과 구조물의 형태에 따라 장력이완 현상이 일어난다. 만약, 막구조물에서 장력이완 현상이 발생하면 구조물에 작은 하중이 작용더라도 대변형을 일으켜 소위, 펄럭거림(fluttering), 물고임(Ponding), 크랙(Crack)등을 유발한다. 이런 현상을 없애기 위해서는 2차 인장응력 도입이 반드시 필요하게 된다. 또한 설치시 도입한 초기 장력이 감소하거나 완전히 이완되는 경우는 장력막 구조의 원리가 성립될 수 없게 되기 때문에 막면의 상황에 따라 추가장력이 도입될 수 있는 구조디테일이 반드시 필요하다.

이러한 재인장 도입 방법으로는 지점부 밀어올림, 경계 케이블과 막하단부의 인입, 주변지주를 바깥으로 기울이는 방법, Valley 케이블과 Lacing 로프를 매는 등에 의하여 시행된다. 어떤 방법을 적용하든 막면 전역에 균형이 잘맞는 적절한 초기장력의 분포를 있도록 구조계획과 시공계획을 수립해야 한다.

퐁딩현상 : 막재료는 빗물이 고여 있으면 그 부분의 변형이 진행되어 좋지 않은 상태가 초래될 위험이 있다. 그 때문에 전체의 형상을 결정할 때 물매에 유의함은 물론, 그 구조방법, 규모, 막재료의 종류등을 종합적으로 고려해야한다.

골조막에 있어서는 주로 물매 잡는법, 추녀안, 부착파이프의 배치등을 고려한다. 현수막구조에 있어서는 스패 높이의 비율, 규모와 초기 장력관계, 아래부분의 물매등이 주의가 요구 된다. 그리고, 공기 막구조의 경우는 스패와 높이의 비와 내압의 주의를 요구한다.

상기 어떤 구조방식이라 하더라도 규모가 클수록 빗물이 고일 위험성이 크다, 또한 막재료의 신율이 큰 재료일수록 주의가 필요하다.

사진1은 골조막 구조에 있어 퐁딩현상이 발생한 부분이다. 이러한 현상의 예방책으로는 초기 설계시 물매의 위치를 잘 파악하여 설계하고, 초기 처짐량은 단기 하중시 스패의 1/15 정도, 장기 하중시에 있어서는 1/20정도로 유지하도록 계획되어야 하겠다.

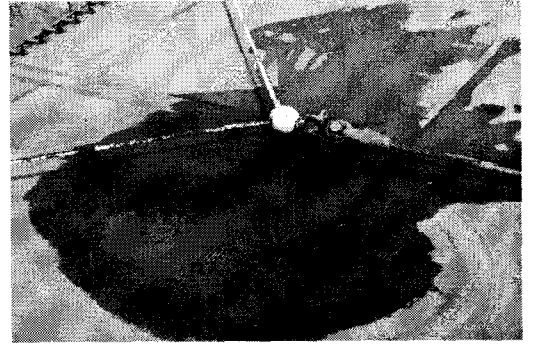


사진 1. Ponding 현상

2.2 초기장력에 따른 변위비교

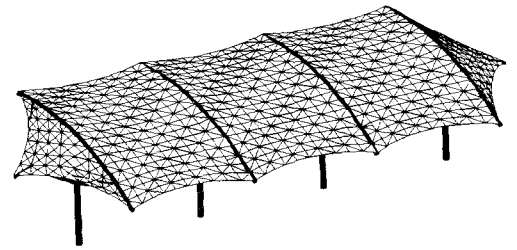


그림 1. 골조막

본 절에서는 막의 초기응력의 변화에 따라 막재의 변위를 비교 검토하고자 한다. 예제로 최근 시공된 골조막을 선택하였다. 초기응력은 각각 100kgf/m, 300kgf/m, 500kgf/m까지 주었다. 응력-변형 해석시 풍력은 정압 100kgf/m²만 고려하였고, 변위는 막재의 중앙부 z변위만을 비교하였다. 사용 프로그램은 성균관 대학교 대공간 구조연구실과 공동으로 개발한 "Larsh"를 사용하였다.

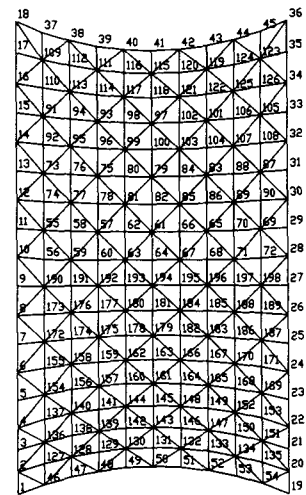


그림 2. Mesh 및 절점좌표

2.4 대구경기장 막장력 검토

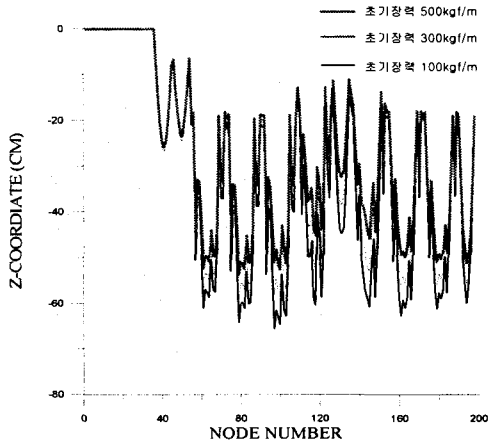


그림 3. 초기장력에 따른 변위검토

그림 3의 결과를 보면 초기 장력에 따라서 변위차이가 많이 발생함을 알수있다.

2.3 막장력 측정기(Tensionmeter)

시공완료 후 막재에 재인장력을 크게 준다는 것은 초기장력을 주는 것과 같이 막재료 특성에 있어 creep등을 고려하면, 그다지 바람직한 상황은 아니다. 그러므로, 규모, 형상등에 따라 적정하게 설정되어야 한다. 또한, 시공된 구조물에서 막장력의 절대값을 찾아내기란 현실적으로 어렵다. 현재 대부분은 막장력의 상대적인 값을 측정하여 막장력을 판단하는 경우가 대부분이다. 또한, 막장력 측정기 사용시 측정할 때 날씨, 계절 그리고 측정부 위치에 따라서 많은 결과 차이를 보이므로 막장력 측정시 엔지니어의 경험과 능력이 절대적으로 필요하다. 사진 2는 막장력의 상대적인 값을 측정할 수 있는 장력 측정기다.

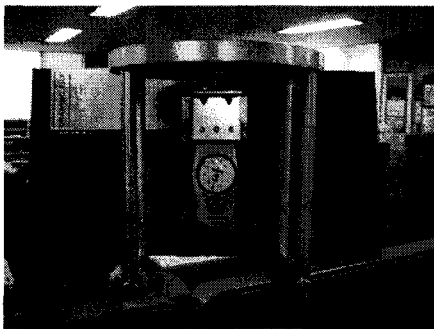


사진 2. 장력측정기

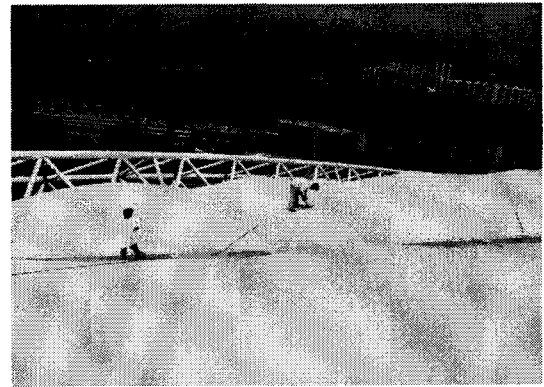


사진 3. 대구경기장 막장력 검토

사진 3은 대구 경기장 막장력 검토 모습으로 막공사 완료 9개월 후 2001년 7월에 막장력을 측정하였다. 실제 대구종합 경기장 막은 4.3 kn/m를 기준으로 하여 시공되었으나 측정 결과는 warp(종사) : 2.38, fill(횡사) : 2.36 로 초기 장력에서 45% 정도 장력이완이 일어났음을 알 수 있다.

표 2. Panel 장력 측정값

측정지점	Warp	Fill	측정지점	Warp	Fill
1	2.40	2.50	27	2.50	2.50
2	2.55	2.50	28	2.47	2.45
3	2.05	2.10	29	2.40	2.35
4	2.45	2.40	30	2.55	2.55
5	2.50	2.45	31	2.55	2.55
6	2.40	2.40	32	2.45	2.30
7	2.50	2.50	33	2.45	2.40
8	2.55	2.50	34	2.45	2.45
9	2.15	2.10	35	2.40	2.30
10	2.40	2.45	36	2.35	2.45
11	2.40	2.40	37	2.35	2.40
12	2.25	2.25	38	2.25	2.30
13	2.50	2.45	39	2.50	2.45
14	2.45	2.45	40	2.25	2.10
15	2.25	2.30	41	2.30	2.30
16	2.15	2.15	42	2.50	2.50
17	2.35	2.40	43	2.20	2.20
18	2.40	2.30	44	2.25	2.10
19	2.55	2.55	45	2.45	2.35
20	2.10	2.10	46	2.35	2.20
21	2.35	2.35	47	2.30	2.35
22	2.50	2.47	48	2.35	2.30
23	2.41	2.43	49	2.25	2.25
24	2.41	2.40	50	2.32	2.35
25	2.40	2.42	51	2.35	2.25
26	2.40	2.30	52	2.30	2.30
합계	61.82	61.62		61.84	61.00
평균	Warp : 2.38 Fill : 2.36				

실제 시공후 막재의 장력을 측정할 경우, 주의점은 막재의 재료마다 측정값이 다르게 되므로 사전에 실험실에서 같은 재료를 사용하여 정확한 값을 평가한 후 현장측정 결과를 환산하여 계산해야 한다.

3. 재인장도입

3.1 재인장력 도입 방법

시공완료 후 막면은 항상 인장력 상태를 유지해야 한다. 이것은 바람에 의한 펄럭임, 주름 발생, 응력집중 그리고 반복하중에 의한 막재의 강도저하 등을 방지할 수 있고, 또한 구조체로써 안정된 형상을 유지할 수 있다. 그러므로 안정된 막구조물을 유지하기 위해서는 경험있는 엔지니어가 정기적으로 막장력을 측정해야 하겠다. 그리고 장력 이완된 막재에 대해서 어느 정도 보정을 하여 구조물이 안정된 상태를 항상 유지하도록 해야한다. 막면의 재인장 도입은 경계부의 강제변위에 의하여 도입되고 그 재인장 도입 방법은 크게 6가지로 나눌 수 있다.

3.1.1 Lacing Rope 방식

로프를 단단히 조임으로써 막면에 긴장을 도입한다. 이 방식은 막면에 고리 등의 보강철물등을 부착, Lacing Rope를 구멍쇠에 끼워, 손으로 끌어당긴 Lacing Rope를 강관보에 감아 댐으로써 막면에 장력을 도입하는 방법이다. 막재료 및 로프의 신축력에 의해 초기장력이 저하 될 경우, 로프를 다시 팽조임으로써 장력을 도입할 수 있다. 또 이때 그림 4와 같은 장력 도입용 클램프 등 간단한 장치를 이용하여 체결 할 수 있는 장점이 있다.

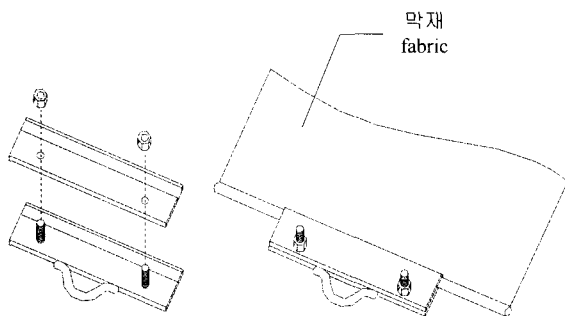


그림 4. 장력도입용 클램프

그러나 단점으로는 로프가 자외선, 비 등에 의해 약화되기 때문에 수년마다 로프를 교환해야 할 필요가 있다. 또한, 구멍쇠에 집중적으로 힘이 가해지기 때문에 로프에 힘이 너무 크면 그림 5. (c)와 같이 막재에 뚫린 구멍이 크게 변화하여 그곳으로부터 막재의 파손과 구멍쇠가 빠질 수 있으므로 주의를 요한다. 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.

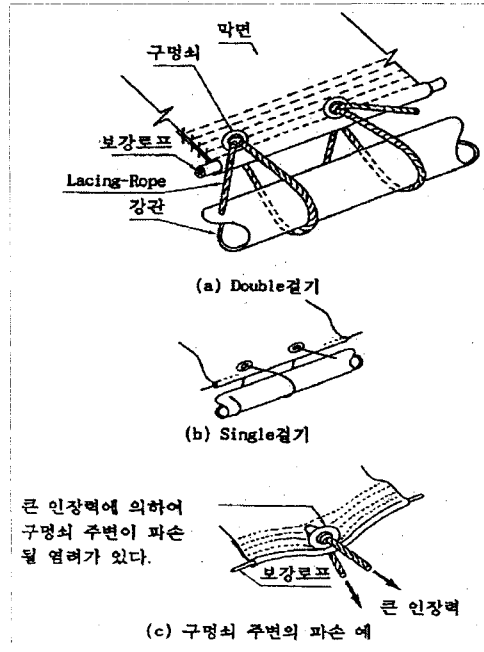


그림 5. Lacing Rope 방식의 예

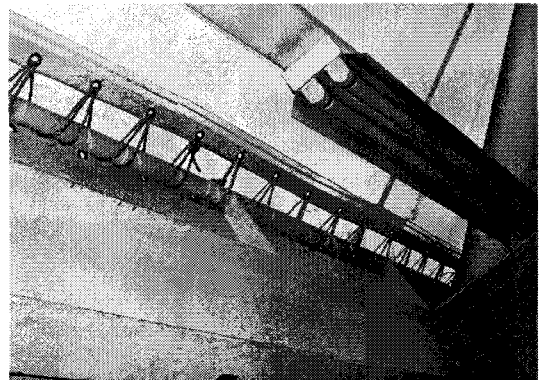


사진 4. Lacing Rope 방식의 예

3.1.2 누름케이블 방식

유압잭, 기계식잭, 턴버클 등에 의하여 잡아 당김으로써 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 기계식잭으로 볼트를 조임으로 케이블에 인장력을 재도입하는데 용이한 방식이다.

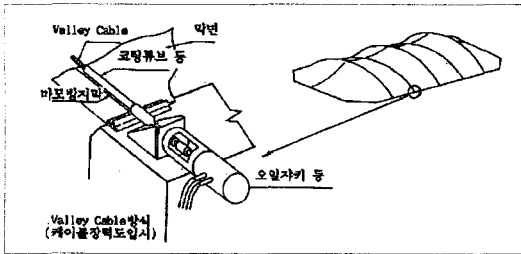


그림 6. 유압잭 등에 의한 장력도입 방법의 예



그림 5. 울산 실내 체육관

3.1.3 주변 케이블 긴장 방식

막면 주변에 케이블을 이용하는 구조에 주로 사용되는 방법으로 주로 현수막 구조에서 Catenary 케이블을 넣는 형식의 전형적인 장력도입방법이다. Catenary 케이블과 Ridge 케이블을 균형있게 유압잭, 기계식 잭, 턴버클등으로 긴장시킴으로서 막면에 장력을 도입한다. 또는 Sub-Post를 기울여 주변 케이블을 긴장시키는 방법등이 있다.

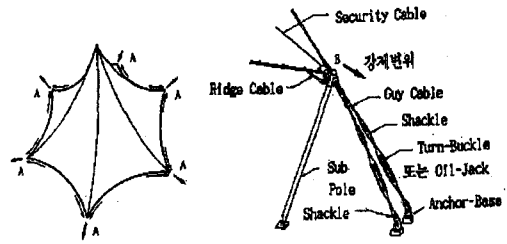


그림 7. 주변 케이블의 긴장방식의 예



사진 6. 봉화군 야외무대

3.1.4 밀어올림 방식

지주를 유압잭등으로 상부로 밀어 올려 막면에 장력을 도입한다. 중앙기둥을 들어 올리는 대신 지주 상부에서 턴버클 및 유압잭 등에 의하여 막재 상부링을 들어 올리는 방법이다. 그림8은 밀어올림 방식을 예를 보여주고있다. 이 방식은 초기 장력도입후 장력 도입부분을 제거하므로, 재인장 도입이 어려운 방식중에 하나이다. 그러므로 막 패턴 및 초기 인장 도입에 있어서 엔지니어가 주의를 기울여야한다.

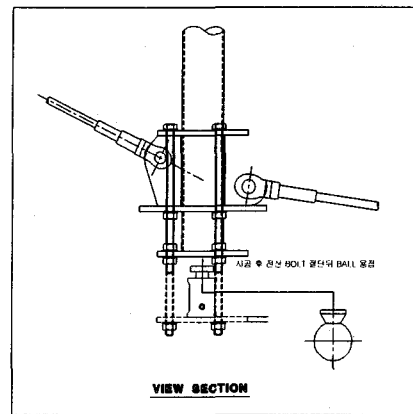


그림 8. 밀어올림 방식의 예

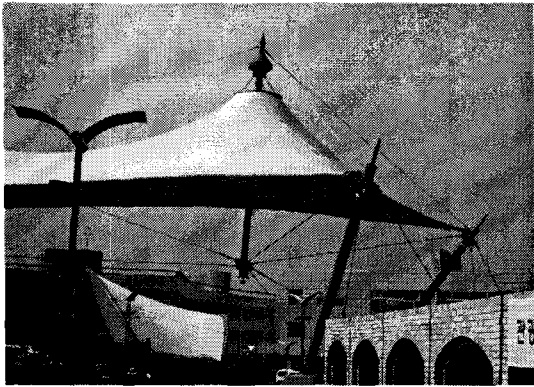


사진 7. 제주 관광대학정문

3.1.5 파이프 들어올림 방식

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

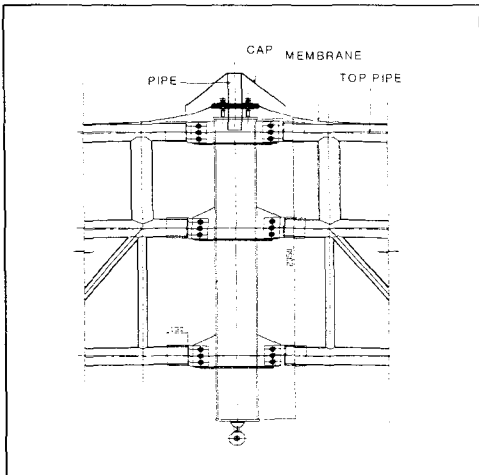


그림 9. 파이프 들어올림 방식의 예



사진 8. 시흥시 옥구공원

3.1.6 텐션볼트 방식

막재 끝 부분을 보강판으로 끼워 그 판에 텐션볼트를 부착한다. 경계지지구조에 볼트축이 오도록 하고, 너트를 세계 조여 막재에 장력을 도입한다. 그림 10, 11은 현재 제주 윌트컵 경기장에서 사용된 텐션볼트 방식이다. 이 방식은 시공 완료후 막재에 2차 응력을 주기가 용이한 방식이다.

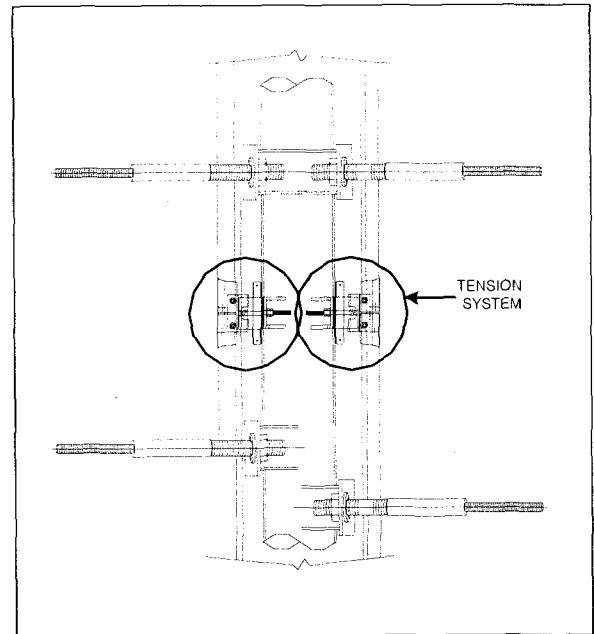


그림 10. 텐션 볼트 방식의 예(평면)

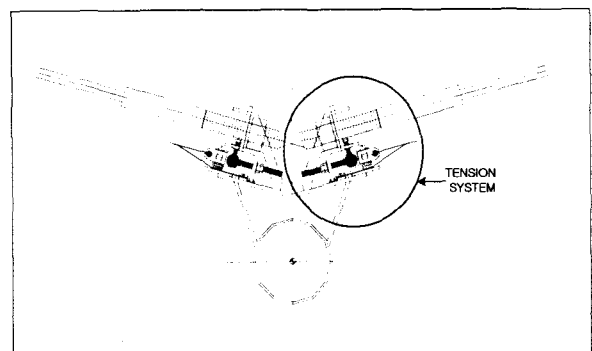


그림 11. 텐션 볼트 방식의 예(단면)

4. 결론

과거의 보전은, 낙수나 마감재의 박리가 있다든

가, 건물이 실용상의 지장이 생겨 수행하는 「사후 보전」이 많았다. 그러나, 최근은 적극적으로 점검, 검사를 수행해서 기능·성능의 저하를 미리 관찰하여 대책을 만들고, 파손을 미연에 방지하는 「예지 보전」, 계획적으로 점검·검사·교체 등을 실시하여 고장을 일으키지 않는 「예방보전」으로 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 해야겠다. 하지만 아직 우리나라에서는 이러한 예지 및 예방 보전이 잘 이루어지지 않고 있는 실정이다.

마지막으로, 요그 슈라히는 막구조물에 대해 “분명 이 경량 구조는 디테일에 있어서 조그마한 부주의도 용납지 않지만 열의 있는 디자이너에게는 결국 아름답고 자연스러운 외관으로 보답해준다.”라는 말을 했다. 이 말에서도 알 수 있듯이 막구조물은 아주 조그마한 오차에 의해서도 쉽게 변형될 수 있다. 특히 다른 일반 구조와는 달리 접합부 디테일에 따라서 시공성과 유지·관리적측면에서 많은 영향을 준다. 하지만, 설계자와 엔지니어 모두 막 구조를 잘 이해하고 열의 있게 노력한다면 어느 구조물보다도 아름다운 외관뿐만 아니라 안전한 구조물로서 존재할 수 있을 것이다.