

경기장 막구조의 계획 및 시공사례

Saito Yoshihito*

이 동 우**
Lee, Dong-Woo

1. 서 론

마감재와 구조재로 형성되는 막재는 경쾌함과 경량성이 우수한 소재로서 최근 대공간구조물의 설계에 빠질 수 없는 재료로 인식되고 있다. 특히 막재료는 경기장과 돔건축에서 자외선을 차단하고 투광성이 좋아 실내공간을 밝게하며 약간의 조명으로도 밝은 실내공간을 연출할 수 있으며, 막재료의 경량성은 구조적으로 내진성능의 향상과 2차부재의 생략에 도움을 줄 수 있다. FIFA월드컵2002에서도 많은 구장에서 막구조가 채택되었고 또한 J리그와 육상경기장에도 많이 이용되고 있다.

이 외에 막구조의 특징으로는 자중이 적어 다루기 쉽고 현장작업이 적어 시공성이 우수한 장점이 있으며, 주재료인 테프론막 코팅 막재의 경우에는 내구성과 방오성이 우수하여 유지관리가 매우 편리한 장점을 가지고 있다.

2. 막구조 계획 및 시공

구조형식과 막재료

막구조는 크게 골조막구조, 서스펜션막구조, 공기막구조로 3가지 구조형식으로 분류할 수 있다(그림 1). 일본 월드컵경기장의 계획은 대부분 골조막구조가 주류를 이루고 있다. 이 경우 막재는 마감재 기

능으로 주로 사용되었으나 한국의 막구조에서는 서스펜션구조가 많이 이용되었다. 일반적으로 서스펜션 막구조는 철골부재 대신에 케이블 등의 인장재가 주 구조물로 형성되기 때문에 구조계획시 인장에 의한 큰 반력을 어떻게 합리적으로 처리할 것인가가 매우 중요하다. 또한, 구조체 중량을 최소한으로 줄인 서스펜션 막구조에는 골조막구조에서 찾을 수 없는 경량감이나 세련된 느낌의 매력이 있다.

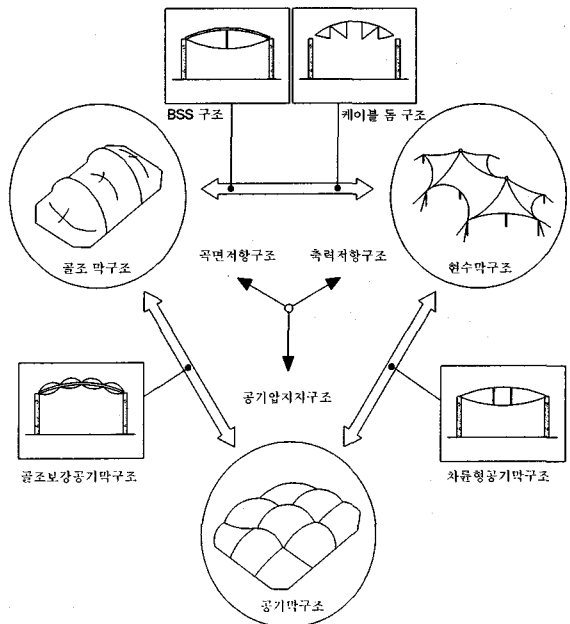


그림1. 막구조의 분류

* Taiyokogyo Japan Co., Ltd. 설계부

** (주)플러스구조기술사사무소 대표이사, 구조기술사, 공학박사

최근 막재료는 접힐 경우 유리섬유에서 발생하는 재료의 손상 때문에 막재에 테프론수지를 코팅하여 방오성을 향상시킨 특수한 막재료를 사용하고 있다.

일반적으로 테프론코팅 막재는 20년 이상의 내구성을 갖고 있으나 PVC계열의 막재는 두께와 수지의 조합에 따라 내구성이 결정된다.

막면형식과 그리드구성

막면형상과 그리드는 디자인에 따른 철골지지재의 적합한 배치계획에 따라 막강도와 원단의 폭, 현장 시공성 등을 고려하여 결정한다. 일반적으로 막면을 곡면으로 형성하는 것이 외하중에 의해 발생하는 막장력을 작게 할 수 있다(그림2).

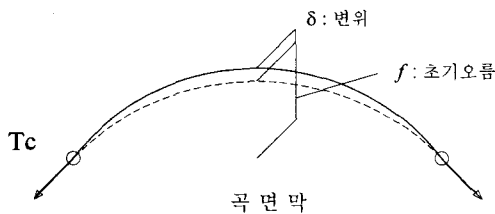
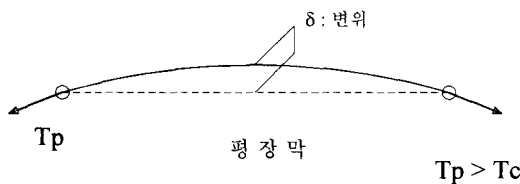


그림2 막형상과 막장력

대부분의 경기장 설계시 보강케이블을 사용하여 막면 그리드의 곡률을 가능한 크게 설계하고 있다. 그러나 지붕의 형상을 편평하게 설계할 경우에는 주로 평장막을 이용하였다.

디테일

막 단부 디테일은 간소한 알루미늄 패스너를 이용하는 것이 최근의 경향이나 경우에 따라서는 종래의 플랫폼 누름을 이용한다(그림3). 어느 디테일을 적용하더라도 몇 년후 재장력 작업이 가능하도록 설계하여야 한다. 또한 막 연결부의 빗물방수를 위해서 고무덮개 형태나 테프론막 현장용착 형태가 사용되고 있다(그림4).

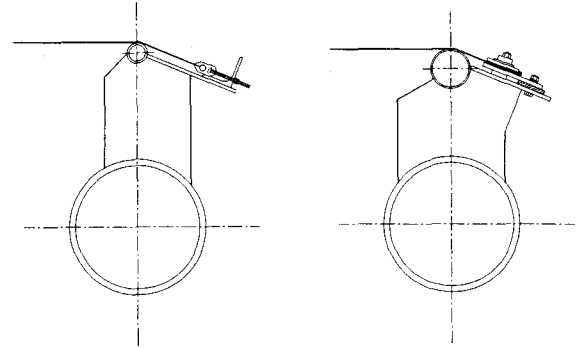


그림3. 막 단부 상세

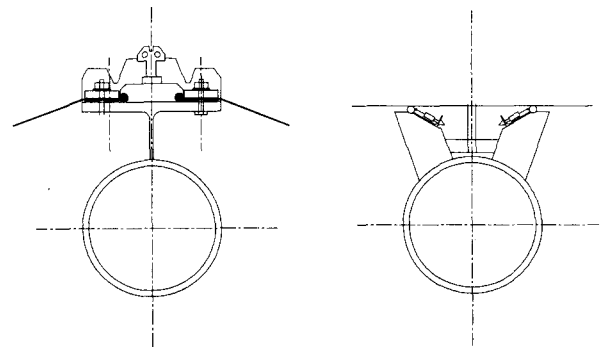


그림4. 막 연결부 상세

막패널의 크기

공장에서 제작되는 막패널의 크기는 적용되는 디테일을 고려하여 가능한 크게 하는 것이 경제적으로 유리하다. 그림5, 그림6에서 보는 바와 같이 롤 형태로 포장하고 현장에서 막을 펼치는 작업을 수행하기 위해서는 운반 트레일러와 양중장비 계획을 함께 계획할 필요성이 있다. 일반적으로 막재의 운반 및 시공을 위한 포장은 폭 12m, 롤반경 2m(길이 100m)와 전체면적 1,000m²을 기준으로 한다.

막의 제작

3차원 곡면을 적절한 다각형으로 구성하고 롤형상의 막재(원단폭은 3.8m)로 평면상의 전개도를 구성한 후, 해석-재단을 일괄적으로 할 수 있는 컴퓨터 시스템으로 막재를 정확히 자동재단한다. 그 다음 온도, 압력, 시간을 고려하여 열용착접합을 시행하고 외주부에는 단부로프를 용착하여 마무리 한다. 마지막으로 막재료인 유리섬유가 접혀서 재료에 손상이 가지 않도록 완충재를 사용하여 막패널을 포장하도록 한다.

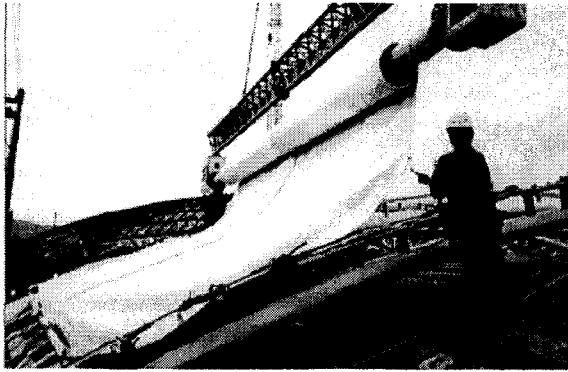


그림5. 막의 전개작업

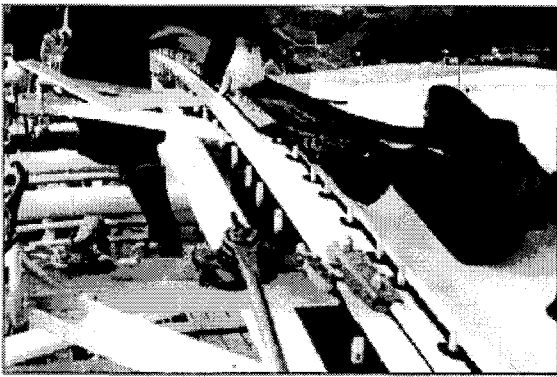


그림6. 막의 설치작업

시공

막의 시공은 단단하게 포장된 거대한 면적의 막재를 일시에 펼치기 때문에 시공시 바람과 눈에 의한 영향을 최소화하여 시공한다. 그리고 전용 양중장비에 대한 허용중량과 규모를 확인하여 시공하도록 한다. 일단 펼쳐진 막재는 초기 장력도입을 위해 수축되어 제작되어 있는데 인장용 장비에 의해 소정의 위치까지 당겨서 시공한다. 일반적인 마무리재와 같은 현장의 가공작업은 전혀 없고 넓은 면적을 짧은 기간에 시공할 수 있다(일주일에 1,000m² 시공 가능).

유지관리

막구조의 유지관리를 위해서는 일정기간 후에는 막면에 대한 재장력 작업이 필요하게 된다. 복합재인 막재료는 크리프에 의한 응력이완현상이 발생하게 된다. 따라서, 시간이 경과함에 따라 장력 값이 떨어져 Fluttering(바람에 의해 떨리는 현상)에 의해 유리섬유의 열화와 강성저하로 인한 Ponding(빗물과 눈이 국부적으로 모이는 현상)이 일어나지 않

도록 초기 장력을 통상적인 설계값보다 높게 적용하고 있으나 일정 기간이 지나면 재장력 작업이 필요하다. 일반적으로 볼트로 막정착부를 잡아당기는 방법과 벨리케이블에 장력을 주어 간접적으로 막장력을 증가시키는 방법이 사용되고 있다.

3. 일본 시즈오카 경기장 시공사례

개요

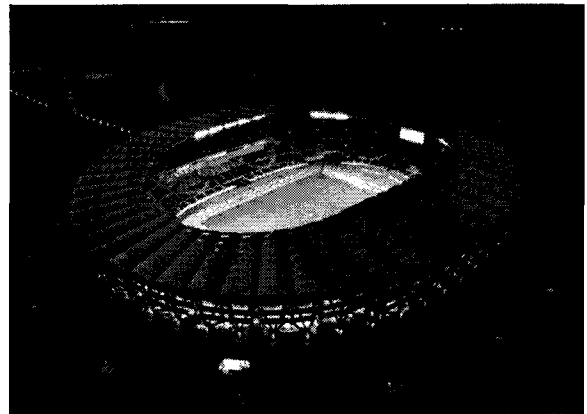


그림7. 일본 시즈오카 경기장

앞서 언급한 것처럼 막재는 유리섬유와 테프론수지로 이루어진 복합재료로 가공공정이 매우 복잡하며 크리프에 의한 응력이완의 특성을 가지고 있다. 그러므로 Fluttering과 Ponding현상을 피하기 위해서 어느 정도 시간이 경과하게 되면 막에 장력을 다시 주어야할 필요성이 있다.

시즈오카 경기장의 설계 및 시공에서는 막구조 설계시 발생하는 이러한 문제점을 분석하여 이를 해결할 수 있는 방안을 모색하였다.

막구조의 특징을 고려한 계획

시즈오카 경기장의 형태는 철골의 제작 및 시공을 고려한 주 트러스가 평단면 계획시 매우 중요한 의미를 가진다. 그러나 지붕전체에서 막면에 해당하는 부분을 보면 형상이 다소 불규칙하여, 막재 이외의 재료를 지붕에 사용할 경우에는 막대한 노력이 필요한 3차원적 가공을 통해 현장시공이 이루어져야 한다. 따라서, 이 부분에 설계 및 시공성이 우수한 막재를 이용하면 비틀림 거동 등의 복잡한 문제를 해결할 수 있다. 일반적으로 막구조는 복잡한 곡면을 다면으로 고려하여 롤 형태로 평면화 한

다. 이러한 해석 및 제조방법을 이용하여 경기장의 지붕을 시공하였다. 또한, 곡면으로 구성된 형상은 합리적인 형태를 통해 장력발생을 최소화하고 철골 및 디테일에 작용하는 하중을 감소시켜 완만한 경사의 산모양을 표현할 수 있었다(그림8).

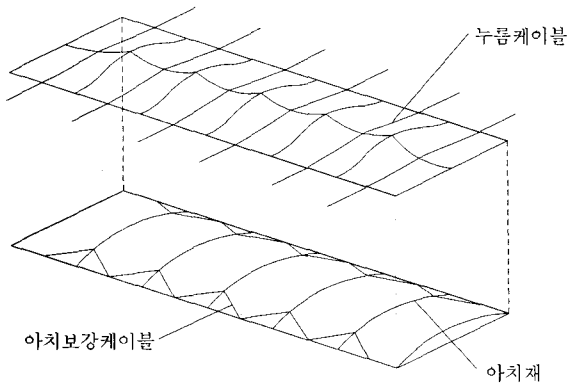


그림8. 단위 구조시스템

재장력 작업이 필요 없는 설계

현재 막구조물에 재장력 작업을 하기 위해서는 복잡한 디테일을 만들거나 누름케이블 등을 통해 막장력을 가하는 것이 일반적이다. 시즈오카 경기장에서는 다음과 같은 절차를 통해 시간이 경과하여도 재장력이 필요하지 않도록 하였다(그림9).

- 1) 실험에 의한 응력이완현상 파악
- 2) 목표 장력값 설정
- 3) 시공순서 확인
- 4) 새로운 디테일의 적용
- 5) 시공장비의 개발

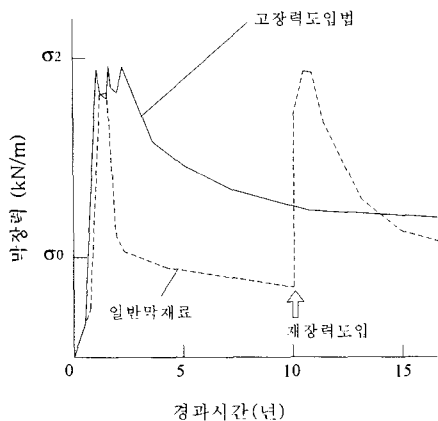


그림9. 초기장력 도입의 개념

막재의 2축시험에서 시간이 경과한 후의 크리프를 미리 발생시키기 위해 통상적인 값의 약2배가 되는 30kN/m의 힘으로 당겨 초기 크리프를 완전히 제거하고 종방향 0.5%, 횡방향 5.1%의 변형도를 기준으로 축소하였다. 일반적인 변형도와 비교하여 볼 때 횡방향쪽의 축소율이 1%정도 크다. 그리고 시험기에 의해 당겨지는 응력과 응력이완의 시간의존특성을 확인하면서 실제 시공순서를 기준으로 제작하여 현장에서 일어나는 상황을 사전에 파악하였다.

다음 시험단계에서는 응력이완현상을 중심으로 하여 실제 크기의 60%인 시험체의 제작으로 새로운 디테일과 시공장비를 이용하여 응력상태와 시공성을 확인하였다(그림10).

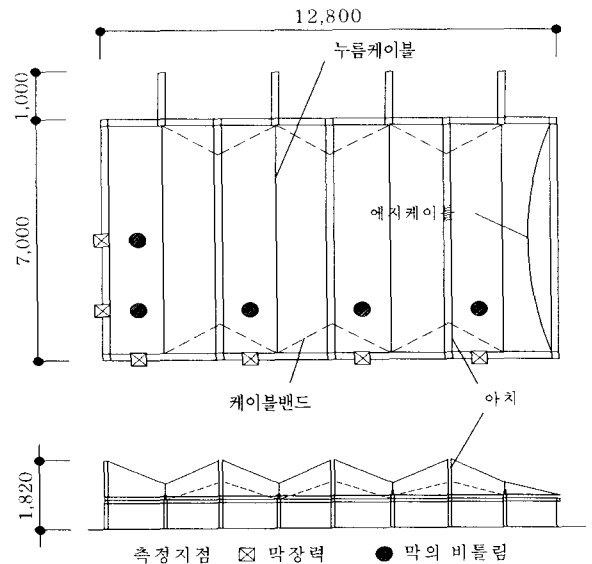
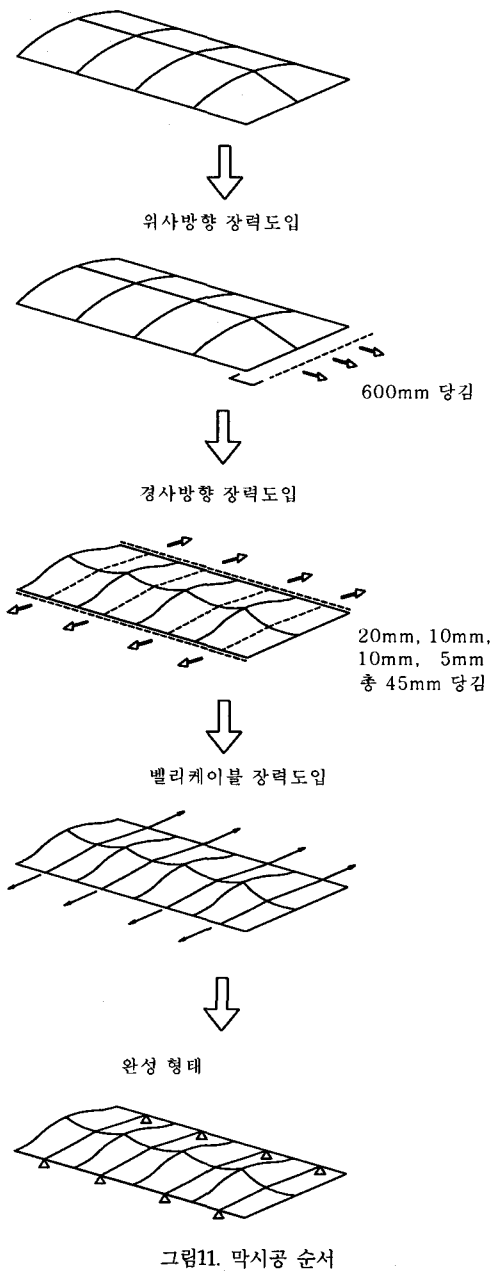


그림10. 실제 크기의 60% 모델

마지막으로 제작된 시험체를 이용하여 실제 시공 후에 발생하게 되는 하중을 산정하여 재하실험을 수행하였고 시간경과 후의 응력이완현상을 확인할 수 있었다.

이러한 일련의 실험을 통해 사전에 막시공에 대한 여러 가지 현상과 문제점을 파악하고 지금까지 명확하지 않았던 시공중의 막장력 거동을 분석하여 사전 대처방안을 확립할 수 있었던 것이 본 실험의 의의라고 할 수 있다(그림11).



경기장 시공직후에는 타이요코교에서 개발한 간이 막장력 측정기를 이용하여 실험결과와 실제 구조물의 장력값을 비교하였다. 그리고, 6개월후에는 2번째 계측을 실시하여 시공직후와 비교해 막장력이 종방향으로는 95%, 횡방향으로는 85%의 장력을 보유하고 있는 것을 확인하였다. 이 값은 사전 실험 결과보다 우수한 결과를 나타내었다(그림13).

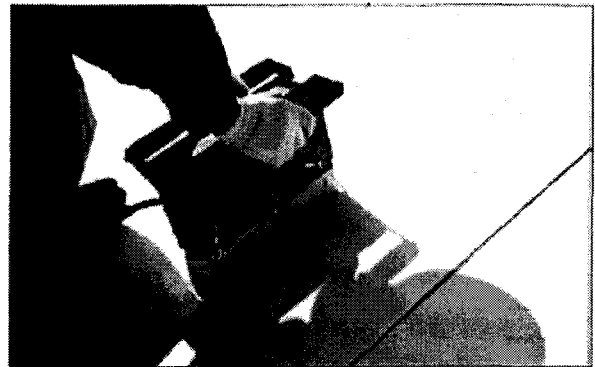


그림12. 막장력의 측정

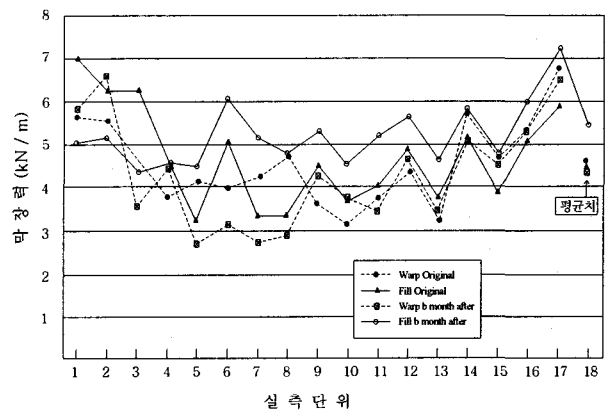


그림13. 시공시와 6개월후의 막장력 변화

아치부재의 처리

본 스타디움에서 주 트러스 사이에 계획된 아치부재의 접합부는 초기 설계당시 면외전도를 고려하여 강한 디테일을 계획하였으나 제조·시공을 고려하여 전도방지용 케이블을 설치하여 핀접합으로 설계하였다. 이를 통해 보다 세장한 아치부재와 간단한 디테일로 막구조 설계를 할 수 있었으며 보다 아름다운 공간을 만들 수 있었다.

디테일 및 시공방법의 개선

크리프 특성을 파악하여 재장력 작업이 필요 없게 되었고, 시공순서에 의한 검토를 통해 설계당초 플랫폼 누름이었던 막 단부의 디테일을 알루미늄 패스너로 변경하여 그 결과 간단한 마무리를 할 수 있었다.