

막장력 측정을 통한 막구조물의 장력 유지관리 시스템 검토

Review of Membrane Tension Maintenance System for Membrane Structures through Membrane Tension Measurement

진 상 욱*
Jin, Sang-Wook

손 수 덕**
Shon, Su-Deok

이 승 재***
Lee, Seung-Jae

Abstract

Membrane structure is a system that is stabilized by maintaining a tensile state of the membrane material that originally cannot resist the bending or pressure. Also, it is a system that allows the whole membrane structure to bear external loads caused by wind or precipitation such as snow, rain and etc. Tension relaxation phenomenon can transpire to the tension that is introduced to the fabric over time, due to the innate characteristics of the membrane material. Thus, it is important to accurately understand the size of the membrane tension after the completion of the structures, for maintenance and management purposes. The authors have proposed the principle of theoretically and indirectly measuring the tension by vibrating the membrane surface with sound waves exposures against the surface, which is compartmentalized by a rectangular boundary, and by measuring the natural frequency of the membrane surface that selectively resonates. The authors of this paper measured the tension of preexisting membrane structure for its maintenance by using the developed portable measurement equipment. Through analyzing the measurement data, the authors review the points that should be improved and the technical method for the new maintenance system of membrane tension.

Keywords : Membrane structure, Membrane tension, Tension measurement, Portable measurement equipment, Maintenance, Re-tensioning

1. 서론

막구조물은 본래 압축이나 휨에 대해서는 저항할 수 없는 막재를 적절한 인장상태로 유지함으로써 안정화되고, 막구조물 전체를 눈이나 비, 바람 등의 외부하중에 견디게 하는 구조물이다.

막재에 도입된 장력은 막재 고유의 특성으로 인해 시간의 경과에 따라 장력이 소실된다. 설계 시 이를 고려함에도 불구하고 장력 소실은 지속적인 관리가 없을 경우 강풍에 막면이 펄럭이는 플러터

링이나 눈이나 비가 막면의 한곳에 고이는 폰딩을 유발시켜 막을 파단에 이르게 할 수 있다. 따라서 준공 후 막구조물에 도입되어 있는 장력의 크기를 정확히 파악하는 것은 유지관리의 관점에서 매우 중요하다.

막장력 측정에 관한 기존의 방법은 막면을 기계로 빨아 당겨 그 흡인방향으로 당겨진 변위의 크기로부터 장력을 추정하는 방법¹⁾과, 막면을 특수한 모양의 금구로 누르고 그에 따른 반력을 검측해 장력을 추정하는 방법²⁾이 있다. 또 이들 소수의 방법들은 검증실험을 통해 실제로 현장에서 사용되는 장치로 개발된 것도 있다. 그러나 막장력 측정을 요하는 현장에서는 아직도 시공기술자의 직감이나 경험에 의존하고 있는 것이 현실이다. 현장에서는 측정 장치로서의 정확도와 안정성 등의 성능 외에도 휴대성과 사용성 등 실용성을 요구하는데, 이를 만족시키는 장치는 부재하다. 따라서 현장에서는 이를 가능케 하는 기술에 큰 기대를 걸고 있다.

* 주저자·교신저자, 정회원, 한국기술교육대학교 디자인·건축공학부 연구교수, 박사(공학)

School of Arch. Eng., Korea Univ. of Tech. & Education

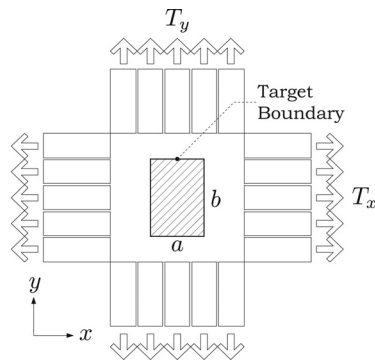
Tel: 041-560-1334 Fax: 041-560-1224

E-mail: swjin@koreatech.ac.kr, drjinsw@gmail.com

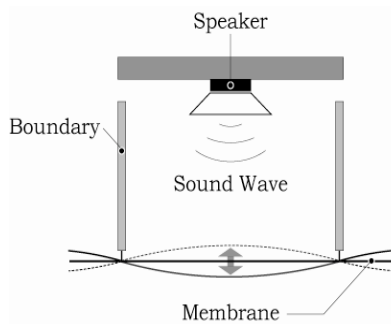
** 정회원, 한국기술교육대학교 디자인·건축공학부 연구교수, 공학박사

School of Arch. Eng., Korea Univ. of Tech. & Education

*** 정회원, 한국기술교육대학교 디자인·건축공학부 교수, 공학박사
School of Arch. Eng., Korea Univ. of Tech. & Education



〈Fig. 1〉 Boundary of the membrane material



〈Fig. 2〉 Equipment schematic

저자는 음파를 이용해 막재에 도입된 장력을 이론적이고 과학적으로 측정할 수 있는 새로운 이론을 제안했다³⁾. 측정원리는 〈Fig. 1〉에 나타내는 직사각형의 각 변 a, b를 경계로 구획된 막면에 〈Fig. 2〉에 나타내는 바와 같이 그 상부에서 가청역의 음파를 쬐어 막면을 진동시키고, 그로 인해 선택적으로 공진하는 막면의 고유진동수를 측정함으로써 장력을 검출하는 것이다. 이 새로운 이론은 장치를 시험제작하고, 막재에 실시간 장력도입이 가능한 두축 인장장치를 이용한 실험을 통해 검증하고, 측정정확도 또한 확인했다³⁾.

음파를 이용한 막장력 측정장치 개발을 위한 오랜 연구과정에서 저자는 음파진동으로 안정적인 막장력 측정이 가능함을 확인함과 동시에, 막의 고유진동수를 정확히 예측하기 위해서는 막진동체 주위 공기로 인해 발생하는 부가질량의 영향을 무시할 수 없음을 이론적으로 검토하고, 이를 통해 측정정확도를 현격히 향상시켰다^{4),5)}.

또, 시험제작한 막장력 측정장치를 이용해 현장에서 사용되는 다양한 막재를 적용한 반복적이고 실

험적인 검증을 통해 측정정확도를 향상시키고, 다양한 막구조 형식을 갖는 구조물을 대상으로 현장 측정함으로써 이 측정장치가 확장성을 보유함과 동시에 실용적인 장치임도 확인했다⁶⁻⁸⁾.

최근에는 현장에서 보다 쉽게 사용될 수 있도록 장치를 소형, 경량화하는 연구가 수행되었는데, 그 과정에서 발생하는 제반 문제를 실험을 통해 해결하고, 측정장치가 준공 후 막구조물의 막면에 생길 수 있는 다양한 형태의 장력 비에 대응 가능할 뿐 아니라, 현장에서 쉽게 이용할 수 있는 고성능 장치임을 검증하기 위한 다양한 시도가 포함되었다⁹⁾.

이 논문에서는 저자가 개발한 포터블 막장력 측정장치로 실재하는 막구조물의 구조적 안전성에 직접적으로 영향을 미치는 막장력을 측정하고, 그 결과를 토대로 현재 막장력 유지관리 시스템의 문제점에 대해 논의한다.

2. 음파를 이용한 막장력 측정장치

2.1 음파를 이용한 막장력 측정이론

저자는 막의 진동방정식으로부터 직교하는 막재 섬유 2축 방향의 장력을 제각각으로 분리하여 산출할 수 있는 식을 다음과 같이 제안했다³⁾.

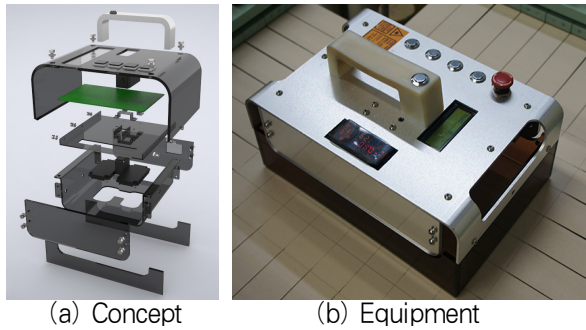
$$\{T\} = [A]^{-1}\{f\} \tag{1}$$

여기서,

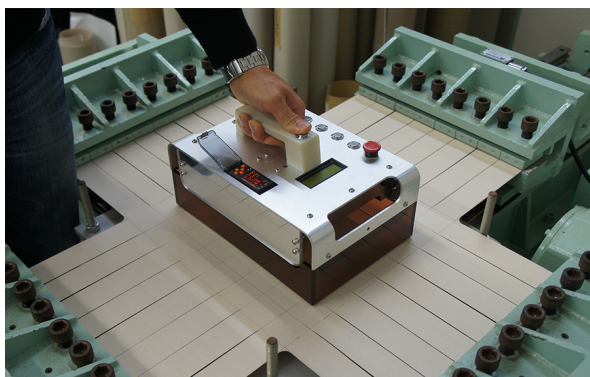
$$\{T\} = \begin{Bmatrix} T_x \\ T_y \end{Bmatrix}, \quad [A] = \begin{bmatrix} \frac{m_1^2}{a_1^2} & \frac{n_1^2}{b_1^2} \\ \frac{m_2^2}{a_2^2} & \frac{n_2^2}{b_2^2} \end{bmatrix}, \quad \{f\} = 4\rho_k \begin{Bmatrix} f_1^2 \\ f_2^2 \end{Bmatrix} \tag{2}$$

식 (2)의 T_x, T_y 는 x, y 방향의 단위길이 당 장력을, m_1, n_1 과 m_2, n_2 는 막재 진동모드의 파의 수를 나타내고, ρ_k 는 막재의 단위 면적당 질량을 나타낸다. 또, a_1, b_1 은 진동수 f_1 의, a_2, b_2 는 진동수 f_2 의 가진(加振) 음원으로 진동하는 경계막의 각 변의 길이를 나타낸다.

식 (1)로부터, 구획된 막이 공진할 때 막면의 고유모드와 그 때의 고유진동수를 검출하면 직교하는



〈Fig. 3〉 All-in-one portable measurement equipment



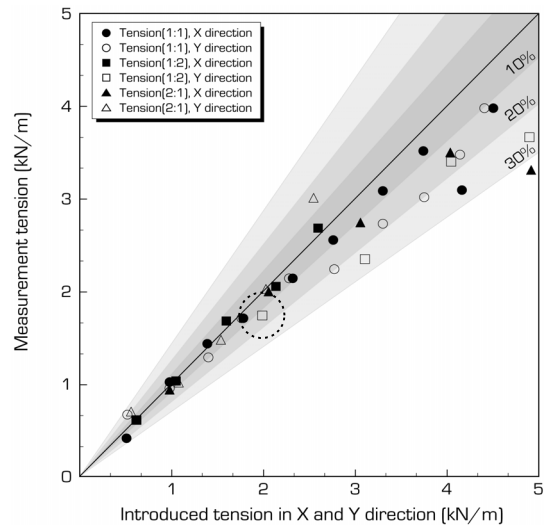
〈Fig. 4〉 Photo of experimental test

두 방향의 서로 다른 막장력 T_x, T_y 를 각각 구해낼 수 있다.

2.2 All-in-one 포터블 막장력 측정장치

저자는 <Fig. 3>에 보이는 바와 같이, 막장력을 높은 측정정확도로 정량적으로 계측 가능할 뿐 아니라, 2.25kg의 장치 총 중량과 배터리 구동으로 현장에서 휴대가 가능한 All-in-one 포터블 막장력 측정장치를 개발했다.

개발한 측정장치의 측정정확도와 안정성은 <Fig. 4>에 나타내는 바와 같이 2축 인장장치를 이용한 막장력 측정을 통해 검증했다. 검증 결과를 <Fig. 5>에 나타낸다. <Fig. 5>의 횡축은 막재 섬유 2축의 도입장력의 크기를 나타내고, 종축은 포터블 막장력 측정장치를 이용해 측정한 장력을 나타낸다. 따라서 그래프 상의 대각선은 측정정확도 100%를 나타내고, 대각선 주위의 회색 구역은 측정오차 10~30%의



〈Fig. 5〉 Result of experimental test

영역을 나타내고 있다. 또, 동 그림의 기호 ‘●, ○’ 등은 X, Y방향으로 도입한 장력 비에 따른 X, Y방향의 측정장력을 나타낸다. 예를 들어, 횡축 도입장력 2kN/m의 상부에 위치한 기호 ‘□’는 X방향으로 1kN/m, Y방향으로 2kN/m를 막재에 도입한 후, 막장력 측정장치로 측정한 Y방향의 측정장력을 나타낸다. 이 경우에는 도입장력과 측정장력 사이에 약 13%의 오차가 발생함을 알 수 있다.

유리섬유 직포의 A종 막재로 덮여있는 막구조물의 경우, 초기장력으로 2kN/m 이상을 도입하고, 막재의 초기 클리프를 고려한 활중장력이 3kN/m 임을 감안하면 <Fig. 5>로부터 개발한 포터블 막장력 측정장치가 80% 이상의 측정정확도를 확보하고 있음을 알 수 있다.

3. 막구조물 점검에서의 막장력 측정

막구조물은 막재 고유의 특성으로 인해 준공 후 꾸준하고 세심한 유지관리 의무를 동반한다. 막구조물의 유지관리는 일반적으로 점검을 통해 이루어지는데, 통상 일상점검과 정기점검, 그리고 임시점검으로 나뉘어진다.

점검은 일상점검을 제외하고 막구조부, 막재료, 정착부, 배수구, 막장력 측정, 케이블이 사용된 경우에는 케이블 본체, 케이블장력 측정 등으로 이루어



〈Fig. 6〉 Goyang Stadium

지고, 각각의 항목은 다시 상세하게 세분된다. 또, 점검대상이 되는 구조물의 형상이나 구조 특성에 따라 필요한 항목들이 추가된다.

유지관리의 여러 점검항목 중에서도 막장력 측정은 막재에 도입된 설계장력의 완화정도를 파악할 수 있어 플러터링이나 폰딩 발생의 가능성을 예상할 수 있는 가장 중요한 자료가 되므로 필수 점검항목이 된다. 그럼에도 불구하고 검증된 막장력 측정장치의 부재로 인한 데이터의 신뢰도 부족과 데이터 비공개로 준공된 막구조물의 장력 도입실태를 파악하기는 매우 어려운 실정이었다.

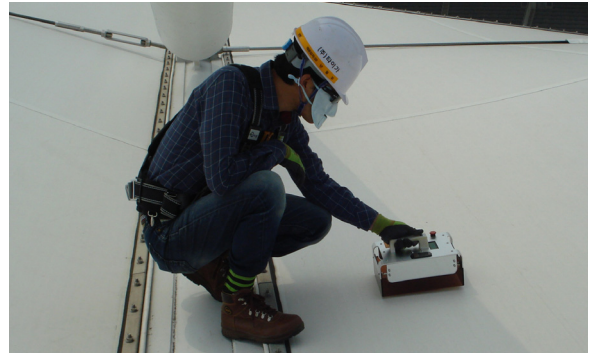
따라서 이 논문에서는 개발된 측정장치로 실재하는 고양운동장의 막장력 측정을 통해 준공 후 시간이 경과한 막구조물의 막장력 도입 실태를 파악하고자 한다.

4. 고양운동장 막장력 측정

4.1 고양운동장의 개요

고양운동장 지붕은 2003년 준공되어 측정당시 12년이 경과한 막구조물로서, <Fig. 6>에 보이는 바와 같이 강성을 가진 2차원 트러스 골조 위에 막구조용 플레이트를 설치하고, 그 위에 PTFE 막재를 고무재와 알루미늄 바, 스테드 볼트로 고정된 강성 골조막 구조로 분류된다.

저자가 개발한 측정장치는 실험실에서의 보정 없이 막재의 질량 구분만으로 모든 막재에 대응 가능하다. 해당 구조물의 지붕을 덮고 있는 막재는 일본의 막재 생산업체인 큐코카세이코우교(주)에서 생산



〈Fig. 8〉 Measurement display; on the membrane



〈Fig. 9〉 Measurement display; under the membrane

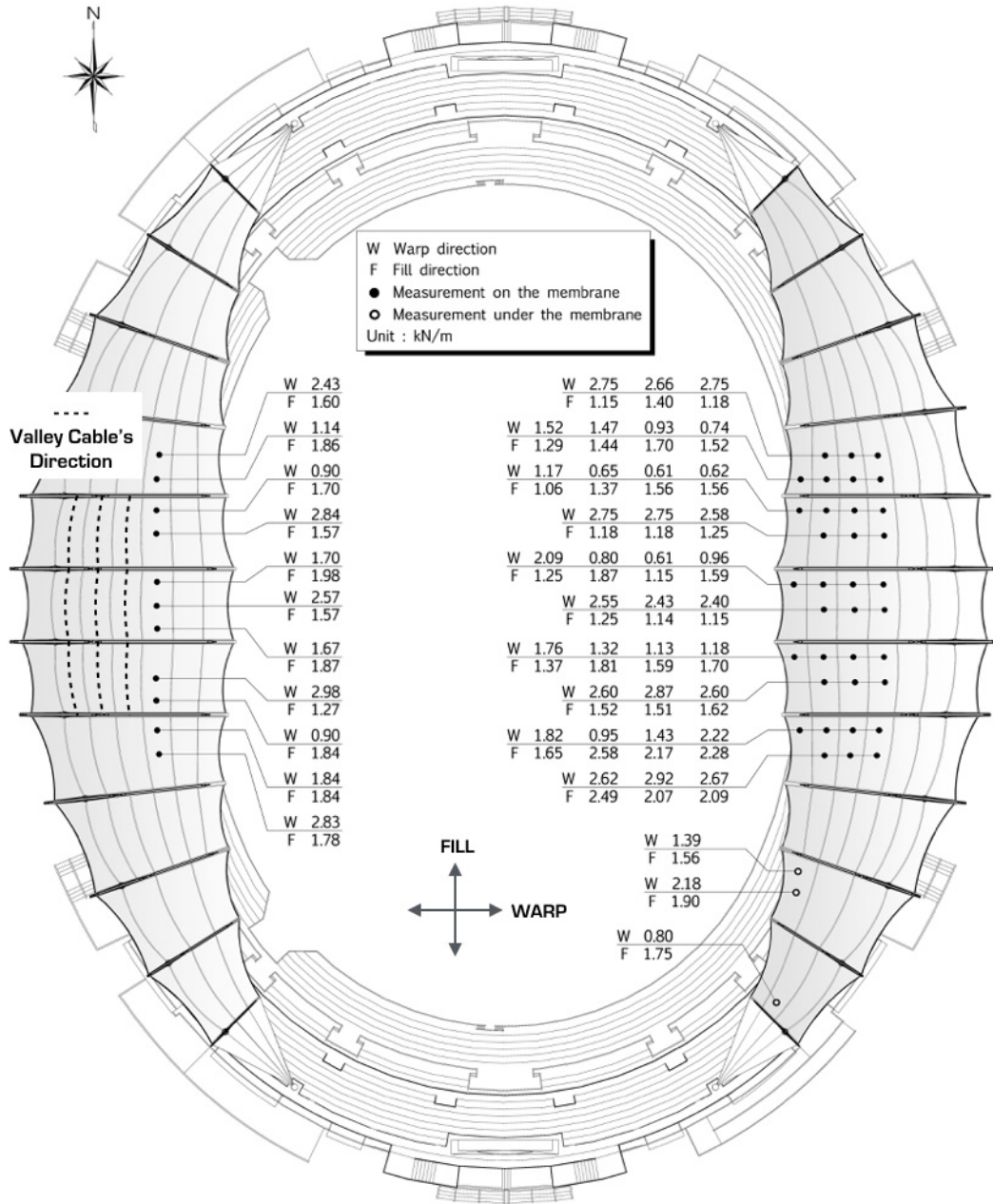
한 PTFE로, 1.3kg/m^2 의 질량을 갖는다.

4.2 막장력 측정 개요

막장력 측정은 <Fig. 7>에 나타내는 바와 같이, 동, 서편지붕 각 5개의 베이를 지정해 동편지붕은 한 베이 당 7곳을, 서편지붕은 한 베이 당 2곳을 측정했다. 또, 동편지붕은 지붕 날개 끝 2개 베이에서도 측정을 수행했다.

측점을 지정해 놓은 기준이나 해설은 없으나, 일반적으로 골조나 케이블로 구획된 모든 판넬에서 중앙과 단부 각각 한 곳 이상을 측정한다. 경우에 따라서는 풍하중이나 눈하중의 수압 면적이 가장 크거나, 가장 취약할 것으로 판단되는 판넬을 지정해서 정밀하게 측정을 수행하기도 한다.

측정은 일반적으로 막면 위에서 수행하나, 저자가 개발한 측정장치는 막면의 하부에서도 동일한 성능이 확보되므로, 접근이 용이한 루트를 골라 측정했



<Fig. 7> Measurement points and measurement result on Goyang Stadium

다. <Fig. 7>의 '●'는 막면 상부에서 측정을 수행한 측정점, '○'는 막면의 하부에서 측정을 수행한 측정점을 나타낸다. 한 측정점에서 3회 측정해 평균값을 취함으로써 측정실책을 방지했다. 막재 섬유에 Warp와 Fill 방향은 <Fig. 7>의 수평, 수직축과 동일하다. <Fig. 8>과 <Fig. 9>는 각각 막면의 상, 하부에서 수행한 막장력 측정모습을 나타내고 있다.

4.3 막장력 측정 결과

고양운동장의 측정결과를 <Fig. 7>에 나타낸다. 고양운동장은 아치 구조재 방향과 평행하게 막면의 상부에 누름케이블을 설치하고, 누름케이블에 장력을 도입함으로써 막재에 2차 장력을 도입하는 시스템을 갖추고 있다. 측정결과 해당 구조물의 누름케이블과 직교하는 Warp 방향의 판넬 중앙 측정 장력은 모든 측정에서 막구조 설계기준 및 해설서의

권고 장력인 2kN/m을 초과하는 장력이 도입되어 있는 것으로 확인되었다.

반면 누름케이블과 평행한 방향인 Fill 방향 장력은 누름케이블의 장력이 막면의 길이를 줄이는 역할을 하므로 오히려 소실된다. 측정장치의 오차범위를 고려하더라도 Warp 방향보다 Fill 방향의 장력 소실이 현격하고, 누름케이블이 막면에 닿지 않는 단부에서 Warp 방향보다 Fill 방향의 장력이 더 크게 검출되는 것이 이를 뒷받침한다. 누름케이블로 막면에 장력을 도입하는 시스템에서는 비교적 빈번히 발생하는 현상으로 설계 시 주의를 요한다.

막구조물은 섬유 축 2방향의 장력이 동일하게 도입될 때 가장 효율적으로 외부 하중에 저항할 수 있다. 해당 구조물의 Warp 방향 장력은 누름 케이블의 길이를 조절하여 비교적 쉽게 조절할 수 있으나, Fill 방향은 장력을 재도입할 수 있는 효율적인 시스템이 설계되어 있지 않아 현 시점에서 권고 장력을 유지시키는 어렵다고 판단된다.

5. 막구조물의 막장력 유지관리

막구조물의 유지관리를 법적으로 구속하는 기준은 아직 정비되어 있지 않다. 현재 막구조물의 설계나 유지관리는 2010년 한국공간구조학회에서 발행한 막구조 설계기준 및 해설¹⁰⁾의 권고를 따른다.

여기에는 형상해석 시 막재의 2축에 도입하는 초기 장력으로 A, B종은 2kN/m 이상, C종은 1kN/m 이상으로 적시하고 있다. 또, 유지관리 시 요구되는 막장력 측정에 관해서는 '시공 후에 막의 인장값이 설계치를 만족하는 지 검사해야한다'고 명시하고 있다. 그러나 해설에서는 '지금까지 막의 인장을 정확하게 측정하는 기계는 국내외적으로 없고, 이 기준에서는 강제하지 않지만 경험에 의한 판단이 필요하다'라고 해설하고 있어, 막장력 측정에 관한 한 과학적이거나 정량적 관리와는 거리가 멀어 보인다.

이 연구를 포함해 음파를 이용한 막장력 측정장치 개발에 관한 저자의 오랜 연구와 검증으로 측정장치의 유효성은 충분히 검증되어, 측정장치 자체의 부재에서 비롯된 막장력 측정의 어려움은 해소되었다고 볼 수 있다. 이론적이고 과학적인 측정장치의 개발로

지금까지 직관적 경험에 의존해 왔던 방식에서 탈피해, 막장력을 정확하고 정량적으로 관리할 수 있다.

고양운동장의 막장력 측정결과는 적어도 한 방향의 잔존장력이 초기장력에도 미치지 못할 정도로 소실되어 있음을 보여준다. 이는 비단 고양운동장뿐만만의 문제가 아니라, 저자가 점검에서 막장력을 측정한 대부분의 골조막 구조물에서 공통적으로 나타나는 현상으로, 막재 섬유 2축의 적어도 어느 한 방향에서 초기장력을 큰 폭으로 하회하는 응력완화가 진행되어 있다는 점이다.

이러한 경우에 우리는 막장력의 유지와 관리를 위해 어떤 조치를 취해야 하며, 어떤 조치를 취할 수 있는지, 또 한편으로 막장력이 소실되었다고 해서 어떤 문제가 발생할 수 있는가에 대한 충분한 논의가 있어야 한다.

막장력 소실이 구조물에 미치는 영향에 대한 평가는 차치하더라도, 효율적이고 체계적인 막장력 유지관리를 위해서는 현재의 권고 기준에 맞게 재인장 등을 통해 권고 안대로 복구시키는 방법이 있다.

그러나 준공된 대부분의 막구조물은 막재를 주요구조부에 고착시키는 클램핑 방식을 채택하고 있어 장력완화를 숙지하고도 이를 설계 상태로 복구하기가 어렵다.

따라서 막재 섬유 2축의 효율적인 장력 유지관리를 위해서는 장력조절이 가능한 재인장 시스템 등이 설계단계에서부터 검토되어야 하고, 구조 형식에 적합한 시스템 도입이 권고되어야 할 것으로 판단된다.

6. 결론

이 논문에서는 저자가 개발한 포터블 막장력 측정장치로 고양운동장 지붕막의 유지관리를 위해 막장력을 측정하고, 결과를 통해 고양운동장의 잔존장력을 파악했다.

해당 구조물의 Warp 방향 장력은 판넬 중앙의 모든 측정점에서 권고 장력 2kN/m를 초과하는 장력이 도입되어 있는 것으로 확인되었다. 반면 누름케이블과 평행한 방향인 Fill 방향은 초기장력에도 미치지 못할 정도로 장력소실이 진행되어 있음을 확인했다.

막구조물은 섬유 축 2방향의 장력이 동일하게 유지

될 때 가장 효율적으로 외부하중에 저항할 수 있다. 고양운동장의 Warp 방향 장력은 누름 케이블의 길이를 조절하여 비교적 쉽게 조절할 수 있으나, Fill 방향은 장력을 재도입할 수 있는 효율적인 시스템이 구축되어 있지 않다.

막구조물의 효율적인 하중 전달기구를 형성하고 현재의 권고 기준에 맞게 막장력을 관리하기 위해서는 설계단계에서부터 두 방향의 장력을 조절할 수 있는 재인장 시스템 도입이 고려되어야 한다.

향후에는 다양한 막구조물의 장력측정을 통해 응력완화의 실태를 파악해 막구조물의 유지관리 기준 정비를 위한 데이터베이스를 구축할 계획이다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원 (과제번호: #12기술혁신E06)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Sasaki N. and Tsubota H., Development of measurement system of membrane stress Summaries of Technical Papers of Annu. Meeting of AIJ, pp. 1389-90, 1993.
 2. Tanizawa K., Measurement device of membrane stress, Bulletin of Patent and Utility Model in Japan Patent Office, 1992.
 3. Jin, S.W. and Ohmori H., Development of membrane stress measurement equipment for membrane structures: proposal of measuring method and its experimental verification, Measurement Science and Technology, Vol. 22, 10 pages, 2011.
 4. Jin, S.W. and Ohmori H., Development of Measurement Equipment of Membrane Stress -Evaluation of Added Mass of Air, in IASS 2005. Theory, Technique, Valuation, Maintenance, Mircea M (ed.), Editura Mediamira, pp.29-36, 2005.
 5. Jin, S.W. and Ohmori H., Development of Measurement Equipment of Membrane Stress for Membrane Structures by Using White Noise Sound Wave, in IASS-APCS 2006. New Olympics New Shell and Spatial Structures, Tien T L (ed.), pp.170-171, 2006.
 6. Jin, S.W. and Ohmori H., Evaluation of Effect of Added Mass of Air on Measuring Method of Membrane Stress Using Sound Wave, Journal of Structural and Construction Engineering, Trans. AIJ (in Japanese), Vol. 612, pp.111-116, 2007.
 7. Jin, S.W. and Ohmori H., Development of Measurement Equipment of Membrane Stress for Membrane Structures Using White Noise Sound Wave - Improvement of Measurement Equipment, Verification Experiment and Practical Measurement of Actual Suspension Membrane Structure, in IASS-APCS 2007. Structural Architecture - Towards the future looking to the past, M. Majowiecki (ed.), pp.175-176, 2007.
 8. Jin, S.W. and Ohmori H., Practical Use of Membrane Stress Measurement Equipment through Its Downsizing, in IASS-APCS 2013. Beyond the Limits of Man, J. B. Obreński and R. Tarczewski (eds.), pp.110, 2013.
 9. Jin, S.W., Verification for Reduction of Membrane Stress Measurement Equipment Size Using White Noise Sound Wave, Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol. 14(3), pp.67-74, 2014.
 10. Korean Association for Spatial Structures, Design Code and Commentary for Membrane Structures, Kimoondang, 2010.
- Received : February 02, 2016
 - Revised : February 24, 2016
 - Accepted : February 25, 2016