

## 화이트노이즈를 이용한 막장력 측정장치의 소형 · 경량화 검증

### Verification for Reduction of Membrane Stress Measurement Equipment Size Using White Noise Sound Wave

진 상 욱\*  
Jin, Sang-Wook

#### Abstract

The author has proposed and verified the accuracy through experiments on a method of measurement through the use of sound waves that not only can quantitatively measure each of the dual directions of the fiber axis with high accuracy of membrane tension created on the surface of the membrane structure, but also can be easily operated in the field of construction. This paper reports the solution for problems of variables caused in the process of downsizing of the measurement equipment in order for practical use, and verifies the correspondence possibility of various stress ratios.

**Keywords :** Membrane Structure, Membrane Stress, Stress Measurement, Measurement Equipment, Downsizing, Practical use

#### 1. 서 론

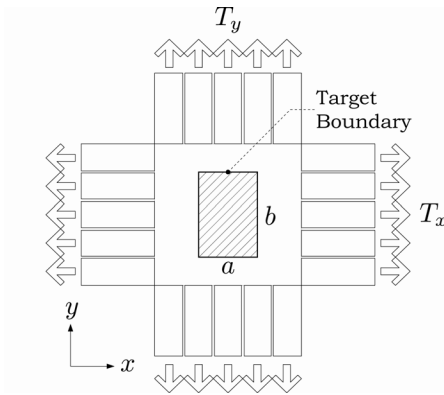
막구조물은 본래 압축이나 휨에 대해서는 저항할 수 없는 막재료를 적절한 인장상태로 유지함으로써 안정화되고, 막구조물 전체를 눈이나 비, 바람 등의 외부하중에 견디게 하는 구조물이다. 막재에 도입된 장력은 막재 고유의 특성으로 인해 시간의 경과에 따라 장력이 소실되는 응력완화가 일어난다. 설계 시 이를 고려하지만, 지속적인 관리가 없을 경우 막의 응력완화는 바람에 막이 펄럭이는 플러터링(Fluttering)이나, 눈이나 비가 막 패널의 한곳에 고이는 폰딩(Ponding) 등을 일으켜 결국에는 막을 파단에 이르게 할 수 있다. 그러므로 준공 후 막구조물에 존재하는 장력의 크기를 정확히 파악하는 것은 유지관리의 관점에서 매우 중요하다. 현장에서는 이를 가능케 하는 기술에 큰 기대를 걸고 있다.

저자는 음파를 이용해 막장력을 이론적이고 간접적으로 측정할 수 있는 새로운 이론을 제안했다 [1-3]. 측정 원리는 <Fig. 1>과 같이 직사각형 경계로 구획된 막면에, <Fig. 2>와 같이 그 상부에서 가청역의 음파를 쬐어 막면을 진동시키고, 그로 인해 선택적으로 공진하는 막면의 고유진동수를 측정함으로써 장력을 검출하는 것이다. 이 새로운 이론을 장치를 시험제작하고, 막재에 실시간 장력 도입이 가능한 2축 인장장치를 이용한 실험을 통해 검증했고, 시험제작한 장치의 측정 정확도 또한 확인했다[1-3].

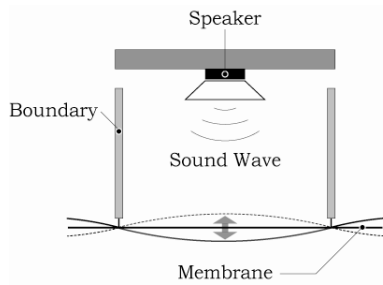
저자는 막장력 측정장치 개발을 위한 오랜 연구 과정에서, 음파 진동으로 막장력의 안정적 측정이 가능함을 확인함과 동시에, 막의 고유진동수를 정확히 예측하기 위해서는 막 진동체 주위 공기로 인해 발생하는 부가질량의 영향을 무시할 수 없음을 이론적으로 검토하고, 이를 통해 측정 정확도를 현격히 향상시켰다[4].

또, 시험제작한 막장력 측정장치를 이용해 현장에서 사용되는 다양한 막재로 반복적이고 실험적인 검증을 통해 측정 정확도를 향상시키고, 다양한 막구조 형식을 갖는 구조물을 대상으로 현장 측정함

\* 정희원, (주)타이가 막구조건축연구소, 수석연구원, 박사(공학)  
Head Researcher, Research Laboratory for Membrane Architecture, Tiger Corporation  
Tel: 02-584-9146, Fax: 02-584-7580  
E-mail: tiger68@tiger.co.kr



〈Fig. 1〉 Equipment schematic



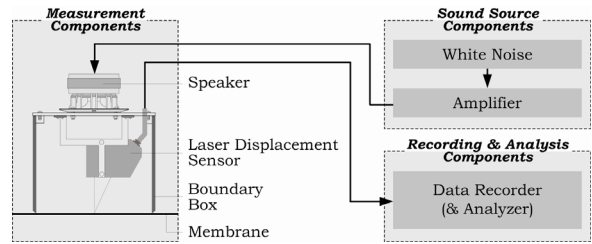
〈Fig. 2〉 Boundary of material

으로써, 이 측정장치가 확장성을 보유함과 동시에 실용적인 장치임을 확인했다[2, 5, 6].

이 논문은 저자가 제안한 막장력 측정이론을 검증하기 위해 시험제작한 20cm×30cm의 경계박스를 갖는 막장력 측정장치가 현장에서 보다 쉽게 사용될 수 있도록 소형, 경량화 하는 과정에서 발생하는 제반 문제를 실험을 통해 해결한다. 또, 시험제작한 소형의 측정장치가 준공 후 막구조물의 막면에 생길 수 있는 다양한 형태의 장력 비에 대응 가능할 뿐 아니라, 현장에서 쉽게 이용할 수 있는 고성능 장치임을 현장의 막구조물을 대상으로 존재 장력을 측정함으로써 검증한다.

## 2. 측정의 기본원리

저자는 막의 진동방정식으로부터 직교하는 막재 섬유 2축 방향의 장력을 제각각으로 분리하여 산출할 수 있는 식을 다음과 같이 제안했다[1-3].



〈Fig. 3〉 Composition of equipment

$$\{T\} = [A]^{-1}\{f\} \quad (1)$$

여기서,

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

식 (2)의  $T_x, T_y$ 는  $x, y$  방향의 단위길이 당 장력을,  $m_1, n_1$ 과  $m_2, n_2$ 는 막 진동모드의 파의 수를 나타내고,  $\rho_k$ 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 직교 이방향의 서로 다른 막장력  $T_x, T_y$ 를 제각각 구해낼 수 있다.

## 3. 시험장치 제작

### 3.1 시험장치의 구성

저자가 제안한 새로운 측정 이론을 검증하기 위해 시험 제작한 측정장치는 <Fig. 3>에 나타내는 바와 같이 크게 세 부분으로 구성되어 있다[1-3]. 측정부는 막면을 직사각형 경계박스로 구획해 진동경계를 만드는 아크릴 박스와 막면에 가청역의 음파를 방사해 막을 진동시키는 스피커, 그리고 방사된 음파로부터 진동하는 막의 진폭 데이터를 측정하는 레이저 변위계로 구성된다. 레이저 변위계의 성능

<Table 1> Capacity of laser displacement sensor

| Manufacturer  | Model No. | Resolution capability | Frequency range |
|---------------|-----------|-----------------------|-----------------|
| Keyence Corp. | LK-500    | 10 $\mu$ m            | 1024 $\mu$ s    |

및 사양은 <Table 1>에 보이는 바와 같다. 음원부는 음원을 만들어 내는 음원부와 스피커로 보내는 신호를 증폭시키는 증폭기로 구성된다. 기록 및 해석부는 레이저 변위계에서 검출한 막의 진폭 데이터를 기록하고 해석해 막의 고유진동수를 추출할 뿐 아니라, 이를 이용해 막의 장력을 구해낸다.

### 3.2 시험장치의 소형화

이 연구의 최종 목표는 높은 정확도와 안정성을 갖는 측정장치를 막구조물의 시공이나 유지관리 현장에 제공하는 것이다. 저자가 기존에 제작한 시험장치[1-3]는 측정이론의 검증을 위한 목적으로 제작되어, 밑변이 20cm×30cm, 높이가 20cm인 경계 박스로 구성되어 있고, 기술한 바와 같이 음원부와 기록 및 해석부로 분리되어 있을 뿐 아니라, 가정용 전압을 사용하므로 각 구성 파트는 긴 전선으로 서로 연결되어 있다.

현장에서는 가벼워 휴대가 가능하고, 조작이 간편할 뿐 아니라, 모든 장치가 일체화된 올인원 장치를 요구한다. 이러한 현장의 요구를 바탕으로, 우선 경계 박스의 소형화를 위해 양변의 길이를 막의 진동경계와 공진진동수의 관계로부터 찾아내고, 이를 바탕으로 시험 제작한 장치로 실험함으로써 소형화 가능성을 검증한다.

## 4. 검증실험

### 4.1 막의 진동경계와 공진진동수와의 관계

음파로 인해 1차 공진한 구획된 막의 공진진동수  $f_{11}$  과 막의 진동경계 간에는 저자가 제안한 막장력 측정 이론으로부터 다음 식이 성립한다[1].

<Table 2> Relationship between the size of vibration boundary and the natural frequency

| Increase rate of boundary length(%) | Increase rate of natural frequency(%) | Theoretical natural frequency of Type A membrane material with 1kgf/cm membrane stress(Hz) |
|-------------------------------------|---------------------------------------|--|
| -50                                 | 100.00                                | 165.05   |
| -40                                 | 66.67                                 | 137.54   |
| -30                                 | 42.86                                 | 117.89   |
| -20                                 | 25.00                                 | 103.15   |
| -10                                 | 11.11                                 | 91.69  |
| 0                                   | 0.00                                  | 82.52  |

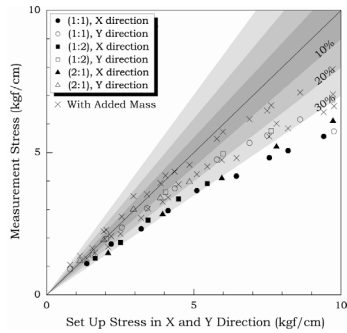
$$f_{11} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\rho_k}} \sqrt{T_x \frac{1^2}{a^2} + T_y \frac{1^2}{b^2}} \quad (3)$$

여기서,  $a, b$ 는 진동경계 각 변의 길이를 나타낸다.

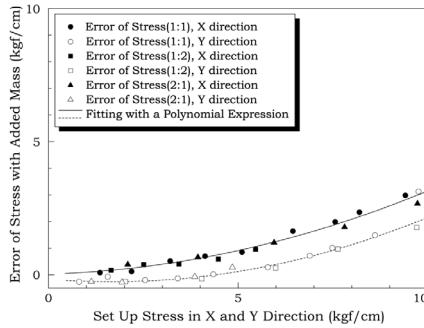
<Table 2>에 보이는 바와 같이 진동 경계막의 크기와 공진진동수의 관계로부터 경계 박스의 적정 사이즈를 책정했다. <Table 2>의 ‘공진진동수 증가율’은 기존 경계 박스의 밑변 길이인 20cm×30cm를 기준으로 각 변의 길이 단축에 따른 공진진동수의 증가율을 나타내고, ‘장력 1kgf/cm인 A종 막재의 이론적 공진진동수’는 막면 밀도 1.3kg/m<sup>2</sup>를 가지는 A종 막재의 X, Y방향에 1kgf/cm의 장력이 도입되었을 때의 이론적 공진진동수를 의미한다.

예를 들어, 회색으로 칠해진 ‘공진진동수 증가율 -30%’ 행은 기준의 20cm×30cm에 대해 각 변의 길이를 제 각각 30% 단축하는 것이 되므로, 각 변의 길이가 14cm×21cm로 되는 것을 의미한다. 또, 각 변의 길이가 감소함에 따라 막의 진동경계는 작아지고 이론적 공진진동수는 42.86% 증가하므로, A종 막재의 X, Y 양 방향으로 1kgf/cm의 장력을 도입한 경우는 이론적 공진진동수가 117.89Hz로 상승함을 나타내고 있다.

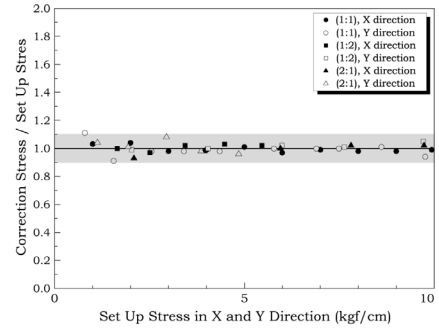
20cm×30cm의 경계박스와 A종 막재를 사용한 기존 실험에서는 X, Y방향 제 각각에 도입한 장력이 5kgf/cm 이내인 경우, 다시 말해 이론적 공진진동수가 200Hz를 넘지 않을 경우에는 실험 오차의 보



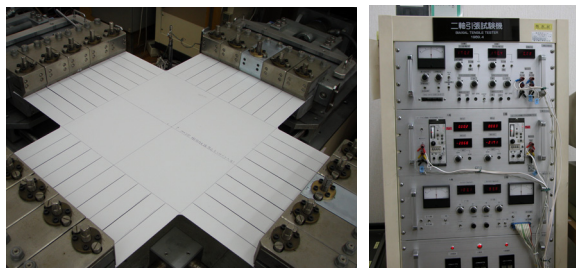
<Fig. 6> Result of Type A



<Fig. 7> Error regression analysis

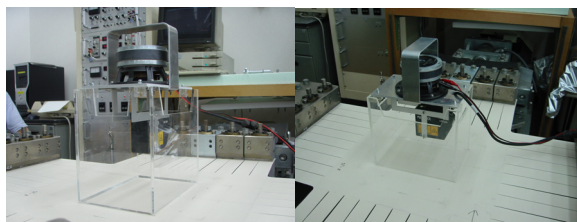


<Fig. 8> Error correction



<Fig. 4> Biaxial tensile machine

원하는 장력을 도입할 수 있을 뿐 아니라, 장력 도입 후 발생하는 응력완화를 실시간으로 모니터링할 수 있는 장치이다. 또, 장력 패턴은 X, Y방향의 장력 비가 1:1인 등장력과, 각 방향의 장력 비를 각각 2배로 하고 최대 도입장력이 10kgf/cm를 넘지 않도록 한 1:2와 2:1의 3가지 패턴으로 구성했다.



<Fig. 5> Downsized membrane stress measurement equipment

### 4.3 실험개요

실험 모습을 <Fig. 4, 5>에 나타낸다. 도입 장력은 측정장치를 2축 인장장치에 설치한 막면 위에 올리고 어느 정도 시간이 경과해 막의 응력 변화가 멈춘 상태에서 2축 인장장치로부터 읽은 값을 적용했다.

실험에는 PTFE A종 막재를 사용했다. 막장력 측정에서 막재의 구별에 중요한 역할을 하는 막의 면밀도는 10cm×10cm의 정사각형 막재료 중량을 5회 측정해 그 평균값을 취한 1.3kg/m<sup>2</sup>로 했다.

정 없이도 80% 이상의 정확도를 가진다는 것을 확인했다[1]. 따라서 각 변의 길이를 30% 줄인 14cm×21cm의 경계 박스를 사용하면, 도입장력 3kgf/cm(이론적 공진진동수: 204.19Hz) 범위 내에서 안정된 결과를 얻을 수 있는 것으로 예측할 수 있다.

### 4.2 도입장력

<Fig. 4>에 보이는 바와 같이, 실시간으로 장력 도입이 가능한 2축 인장장치를 이용해, X, Y방향 각각에 1kgf/cm에서 시작해 10kgf/cm까지 1kgf/cm씩 증분해 가면서 도입장력을 설정했다. 2축 인장장치는 구획된 막재 섬유 2축의 제 각각에 실험자가

### 4.4 검증실험 결과

측정 결과를 <Fig. 6>에 나타낸다. 종축은 도입장력을 나타내고, 횡축은 측정으로 얻은 측정장력을 나타낸다. 예를 들어, 종축의 설정장력 5kgf/cm의 기호 ‘•’는 X, Y방향의 도입 장력 비를 1:1로 했을 때, X방향에 도입된 장력 5kgf/cm에 대해 검증 실험으로 3.5kgf/cm의 장력이 측정되었음을 나타내고 있다. 또, 모든 측정값의 수직 상부에 있는 기호 ‘×’는 공기로 인한 막의 부가질량 효과[4]를 고려한 장력을 나타내고 있다.

그래프의 대각선상은 정확도 100%인 목표 장력을 나타내는데, 이 직선에 가까울수록 정확도가 높

<Table 3> Coefficients of the regression curve

$$y = A + B_1x + B_2x^2$$

*y*: error of measurement stress, *x*: measurement stress

| Parameter                 | Value     |        | Standard deviation |       |
|---------------------------|-----------|--------|--------------------|-------|
|                           | Direction |        |                    |       |
|                           | X         | Y      | X                  | Y     |
| <i>A</i>                  | 0.031     | -0.002 | 0.121              | 0.172 |
| <i>B</i> <sub>1</sub>     | 0.169     | -0.057 | 0.048              | 0.077 |
| <i>B</i> <sub>2</sub>     | 0.0223    | 0.041  | 0.004              | 0.007 |
| Determination coefficient | 0.990     | 0.966  | Number of data     |       |
| Standard deviation        | 0.127     | 0.220  | 20                 |       |

음을 의미한다. 또, 목표 장력을 중심으로 회색의 명암을 이용해 오차 ±10, 20, 30% 영역을 지정했다. 공기에 의한 막의 부가질량 효과를 고려함으로써 오차는 감소하고, 실험에서 도입한 모든 장력 조건에서 정확도가 약 15% 상승함을 확인했다.

한편, 목표 장력을 초과하는 장력이 측정된 경우, 공기에 의한 막의 부가질량 효과는 오히려 측정오차를 크게 해 과도 평가된 장력이 얻어질 가능성이 있다. 따라서 공기에 의한 영향뿐 아니라, 실험에서 발생할 수 있는 모든 오차를 고려할 필요가 있으므로, 회귀 분석을 통해 오차를 보정했다.

<Fig. 7>에 2차 회귀곡선을 이용한 오차 보정을 나타낸다. 횡축은 도입한 장력을 나타내고, 종축은 공기로 인한 막의 부가질량 효과를 고려한 측정오차(측정오차(kgf/cm)=도입장력-부가질량 고려 장력)을 나타내고 있다. X, Y방향의 오차는 장력 레벨의 증가에 따라 거의 2차 함수적으로 증가하고 있다. 그래프 속의 곡선은 실험에서 얻은 오차 데이터에 2차 회귀곡선을 이용해 피트(Fit)시킨 결과로, 실선이 X방향, 파선이 Y방향을 나타낸다.

실험으로부터 기존의 20cm×30cm 경계박스를 이용한 측정 실험에서는 볼 수 없었던 X, Y방향의 오차가 분리되는 결과를 얻었다. 이는 X방향에 비해 Y방향의 측정오차가 작은 것로부터 추론할 수 있는데, 막의 진동 경계 축소로 인해 Y방향의 측정에서 X방향의 장력이 정확히 분리 측정되지 않고 영향을 미쳐, 비교적 부드러운 Y방향(Fill Direction)의

<Table 4> Diverse combination of set-up membrane stresses

| Y \ X                                 | Set-up membrane stress (Unit: kgf/cm) |     |     |     |     |     |     |
|---------------------------------------|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                       | 1.0                                   | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 | 6.0 |     |
| Set-up membrane stress (Unit: kgf/cm) | 1.0                                   | 1:1 | 1:2 | 1:3 | 1:4 | 1:5 | 1:6 |
|                                       | 2.0                                   | 2:1 | 2:2 | 2:3 | 2:4 | 2:5 | 2:6 |
|                                       | 3.0                                   | 3:1 | 3:2 | 3:3 | 3:4 | 3:5 | 3:6 |
|                                       | 4.0                                   | 4:1 | 4:2 | 4:3 | 4:4 | 4:5 | 4:6 |
|                                       | 5.0                                   | 5:1 | 5:2 | 5:3 | 5:4 | 5:5 | 5:6 |
|                                       | 6.0                                   | 6:1 | 6:2 | 6:3 | 6:4 | 6:5 | 6:6 |

장력이 크게 측정되었을 가능성이 높다.

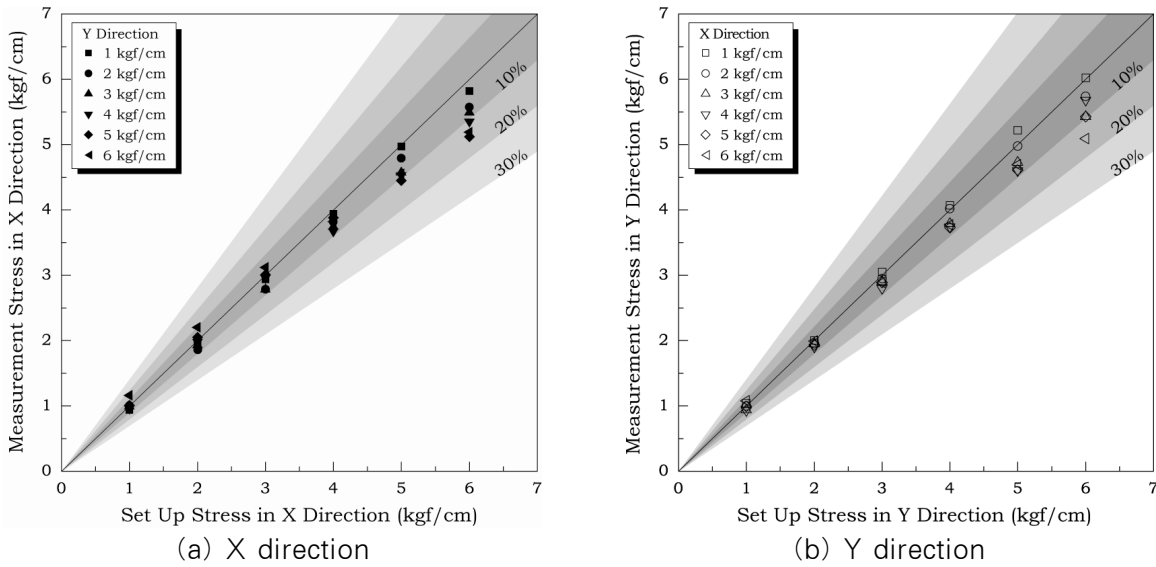
<Table 3>은 2차 회귀곡선으로 얻은 2차식의 계수를 나타내고 있다. <Table 3>의 '결정계수'는 회귀분석으로 얻어진 상관계수의 2승을 나타내고, 회귀곡선으로 총 변동을 어느 정도 설명할 수 있는지를 나타내는 수치이다. '표준오차'는 데이터로부터의 추정 결과가 참값에 대해 어느 정도의 오차를 가지는가를 나타낸다. 따라서 X방향의 결정계수 0.990은 그 회귀식으로 목적변수의 변동 전체에 대해 99.0% 설명할 수 있음을 나타낸다.

<Fig. 8>은 2차 회귀곡선으로 보정한 결과를 나타내고 있다. X축은 도입장력을, Y축은 보정 장력을 도입장력으로 나눈 값을 나타낸다. 그림 8에서 알 수 있듯이, 전체 데이터에 대해 X, Y방향을 각각 2차 함수로 보정함으로써 오차 ±10% 이내(회색영역)의 정확도를 얻을 수 있다.

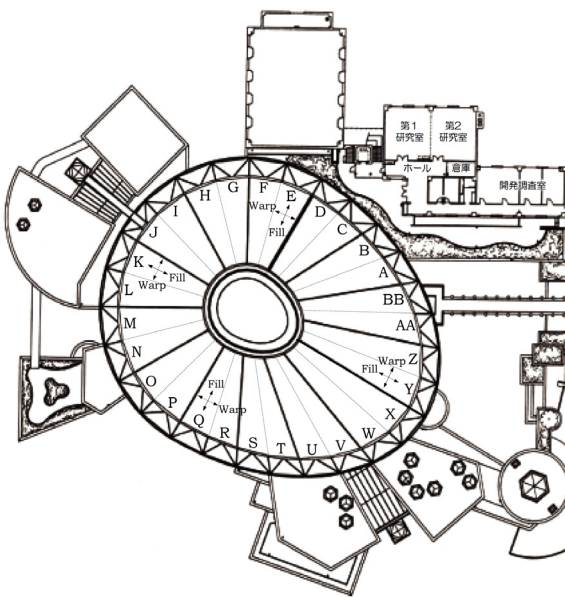
## 5. 다양한 장력 비에의 대응

막구조물의 막재 두 축의 섬유 방향에는 통상 등(等)장력을 도입하는 것이 일반적이다. 그러나 막재 고유의 성질로 인해 시간의 경과에 따라 일어나는 응력완화로 그 장력 비는 도입 시의 상태를 유지하는 경우가 적고, 다양한 비율을 가질 가능성이 높다. 따라서 준공 후 막면에 발생할 수 있는 다양한 장력 비를 실험실에서 설정하고 측정실험을 통해 개발 장치의 확장성을 검증한다.

설정장력은 <Table 4>에 나타내는 바와 같이, X, Y방향 각각에 1kgf/cm에서 6kgf/cm 사이를 1kgf/cm 간



<Fig. 9> Result of diverse combination of introduced membrane stresses



<Fig. 10> Measurement position of Aichi Children's Center

격으로 증가시켜 각각 조합한 36 케이스로 했다. 도입 장력은 2축 인장 장치의 설정에 의해 막의 응력 변화와 관계없이 실시간으로 설정 장력을 유지할 수 있도록 했다. 실험에는 면밀도 1.3kg/m<sup>2</sup>를 갖는 PTFE A종 막재를 사용했다.

<Table 3>의 계수값으로 오차 보정한 X, Y방향의 측정결과를 <Fig. 9>의 (a), (b)에 나타낸다. 그래프의 횡축은 도입장력을, 종축은 측정값을 나타낸다. 또, 그래프 내의 기호는 횡축에 나타내는 도입장력

과 쌍으로, 직교방향에 도입한 장력을 나타내고 있고, 그 값은 X, Y방향의 측정장력을 나타내고 있다. 예를 들어, <Fig. 9(a)>의 종축에 표시한 도입장력 5kgf/cm 위의 기호 '■'는 막면의 X방향에 5kgf/cm의 장력을 도입하고 Y방향에 1kgf/cm의 장력을 도입한 경우의, 실험으로 얻은 X방향 장력을 나타내고 있다.

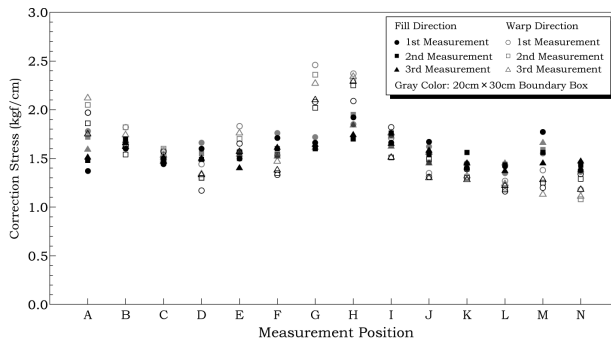
양 축 도입장력이 6kgf/cm인 경우 다소 오차가 큰 곳이 보이지만, 대체로 오차는 ±10%를 넘지 않는 범위에 있다. 또, 도입장력이 5kgf/cm 이하인 경우에는 모든 장력조합 하에서 오차 10% 이내의 정확도를 확보할 수 있음을 확인했다. 경계박스를 소형화한 측정장치로 다양한 장력 비에도 적용 가능함을 확인할 수 있다.

## 6. 실제 막구조물에 적용

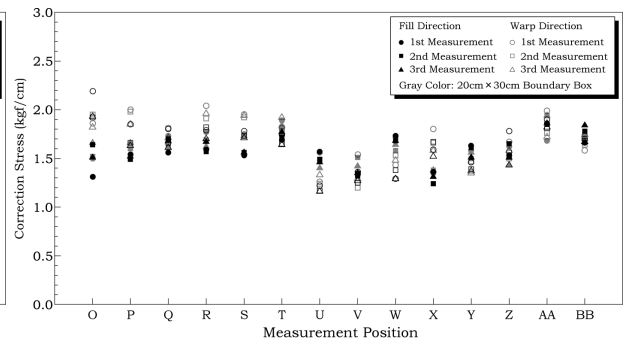
### 6.1 측정 대상 막구조물의 개요

이상의 검증결과를 바탕으로, <Fig. 10, 11>에 나타내는 일본 아이치 지구 박람회 기념 공원에 위치한 '아이치현 아동종합센터' 지붕막 구조물의 장력을 측정했다. 1996년 7월에 준공된 이 건물의 지붕에 사용된 막재는 1.3kg/m<sup>2</sup>의 면밀도를 갖는 PTFE A종 막재(SF-2)이다.

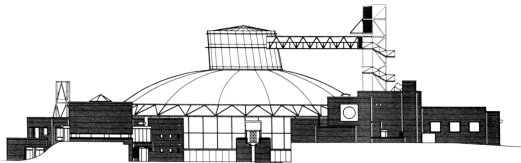
28개의 패널로 구성되어 있는 막 지붕은, 6장의



<Fig. 14> Result of Aichi Children's Center(A to N)



<Fig. 15> Result of Aichi Children's Center(O to BB)



<Fig. 11> Elevation of Aichi Children's Center



<Fig. 12> Measurement equipment



<Fig. 13> Appearance of measurement

막재가 접합되어 하나의 패널을 구성하고 있다. 측정에 사용한 막장력 측정장치는 경계박스를 소형화한 14cm×21cm와 기존 20cm×30cm의 경계박스를 바꾸어 가면서 측정함으로써 소형화 장치의 현장 적용성을 검증했다.

측정은 <Fig. 12, 13>에 나타내는 바와 같이, 막의 상부에서 측정자가 장치를 들고 측정자의 가압에 의한 영향을 최소화하면서, 경사진 막면에 장치가 안정될 수 있도록 접촉시키면서 실시했다. 각 측정 개소마다 3회 측정함으로써 안정성을 검토함과 동시에 측정 실책을 없애고자 했다.

## 6.2 측정 결과

<Fig. 14, 15>는 측정 결과를 나타내고 있다. 횡축은 <Fig. 10>의 측정위치를 나타내고, 종축은 측정값을 나타낸다. 그래프 상의 흑색 기호는 14cm×21cm의 경계박스로 측정한 3회분의 측정장력을 나타내고, 회색 기호는 기존의 20cm×30cm 경계박스로 측정한 결과를 나타내고 있다.

측정값은 측정위치에 따라 기존 20cm×30cm의

경계박스를 이용한 경우와 다소 차이는 부분이 있지만, 대부분의 측정위치에서 비교적 동일한 경향의 결과 값을 얻었다. <Fig. 14, 15>에서 알 수 있듯이, 소형화된 장치로도 3회분의 측정값에 편차가 적고 안정된 결과가 얻어짐을 알 수 있다.

한편, 기존의 경계박스를 이용한 측정에서는 G, H 패널의 측정값이 다른 패널에 비해 다소 높게 측정되었다. 측정은 대상 구조물의 규모로 인해 3일에 걸쳐 이루어졌다. G, H 패널은 2일째 측정한 최초 패널이었는데, 새벽까지 내린 비로 인해 측정 시 막이 완전히 건조돼 있지 않고 습기를 포함하고 있었던 탓에, 그 만큼 막재의 면밀도에 영향을 끼쳤을 가능성이 높다.

아이치현 아동종합센터의 막구조는 막재 두 축에 2kgf/cm의 장력이 도입되도록 설계되었다. 측정 결과로 1.3kgf/cm에서 2.3kgf/cm의 장력이 유지되고 있음을 알 수 있다. 설계장력을 약간 하회하는 곳이 많지만, 시공 후 16년이 경과한 것을 감안하면 비교적 양호한 장력이 유지되고 있다고 볼 수 있다.

## 7. 결 론

이 논문에서는 측정장치의 실용화를 위해 현장에서 쉽게 사용될 수 있도록 기존의 20cm×30cm의 경계박스 대신 박스 양변의 길이를 30% 줄인 소형의 14cm×21cm인 경계박스를 제안하고, 실험을 통해 정확도와 안정성을 검토했다.

검증실험에서 얻은 결과를 바탕으로 회귀분석을 통해 오차 보정함으로써 오차 ±10% 이내의, 기존의 경계박스과 동등한 정확도를 확보했다.

또, 막재 2축의 도입장력 비를 1:1에서 1:6까지 설정하고 장력 측정함으로써, 개발한 측정장치가 준공된 막구조물의 막면에 생길 수 있는 다양한 장력 비에 대응 가능성도 실험을 통해 검증했다.

소형화한 경계박스를 이용한 아이치현 아동종합센터의 현장 측정에서는 측정에 편차가 적고 안정된 결과를 얻었고, 장치의 현장 이용성과 소형화 가능성을 확인했다. 향후에는 구성 장치를 일체화시켜 실용화를 가속시킬 예정이다.

### 감사의 글

이 연구는 국토해양부 건설교통기술촉진연구사업의 연구비지원(과제번호: #12기술혁신E06)으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

### References

1. Sang-Wook Jin and Hiroshi Ohmori, Proposal of Measuring Method of Membrane Stress for Membrane Structures and Its Experimental Verification, AIJ Journal of Technology and Design (in Japanese), No. 24, pp. 105-108, 2006
2. Sang-Wook Jin, Hiroshi Ohmori and Jae-Yeol Kim, Development of Measurement Equipment of Membrane Stress Using White Noise Sound Wave, Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol. 8, No. 2, pp. 63-72, 2008
3. Sang-Wook Jin and Hiroshi Ohmori, Development of membrane stress measurement equipment for membrane structures: proposal of measuring method and its experimental verification, Measurement Science and Technology, 22(2011), 115704(10pp)
4. Sang-Wook Jin and Hiroshi Ohmori, 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), No. 612, pp. 111-116, 2007
5. Sang-Wook Jin and Hiroshi Ohmori, 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, AIJ Journal of Technology and Design (in Japanese), Vol. 13, No. 26, pp. 511-516, 2007
6. Sang-Wook Jin, Hiroshi Ohmori, Jun Fujiwara, Fumiyoshi Takeda and Tetsuya Yoshino, Development of Practical Measurement Equipment of Membrane Stress for Membrane Structures, AIJ Journal of Technology and Design (in Japanese), Vol. 17, No. 36, pp. 493-498, 2011

(접 수 일 자 : 2014년 06월 27일)

(심사완료일자 : 2014년 07월 22일)

(게재확정일자 : 2014년 07월 28일)