

막구조물의 막장력 측정장치 개발에 관한 연구

Development of Measuring System of Membrane Stress for Membrane Structure

정 환 목*
Hwan-Mok Jung

우 재 원**
Jaewon Woo

조 병 욱***
Byung-Wook Cho

이 성 연****
Seong-Yeun Lee

요 약

본 연구는 막구조물의 장력 측정을 위한 휴대용 막장력측정기기의 개발을 목적으로 한다. 2축시험기에 장착된 막의 장력을 간이 측정기에 의해 측정하여 구한 실험 데이터를 근거로 효율적인 2축방향 막 장력측정기기를 개발하는데 그 목적이 있다. 연구결과 개발된 휴대용 간이 장력측정기기는 정량적이고 정성적인 측면에서 데이터의 정밀도가 매우 높아 향후 상용제품으로도 개발이 가능함을 알 수 있었다.

Abstract

This paper is concerned with the development of a measurement system using field measuring device which will give the membrane stress of the membrane structures.

Up to this point, several techniques on measurement of membrane stresses has been proposed and some have been used in the fields, but accuracy of the measured stresses to be far from reliable one. Such situation has not been changed until recent days, we do not have the measurement device on which we can depend. On top of that, due to the different properties in cross directions for material of the membrane, the stress in the warp direction is different from that in the fill one.

키워드 : 막구조, 2방향 장력측정, 휴대용 장력 측정기

Keywords : membrane structure, two dimensional tension test, portable tension measuring device

1. 서 론

1.1 배경 및 연구 목적

건축가와 구조기술자는 최적의 공간을 창출하기 위하여 많은 노력을 기울여왔고, 특히 현대 사회는 경제력의 향상으로 인하여 다양한 형태와 목적을 가진 건축물을 요구하고 있으며, 인간의 많은 활동이 실외에서 실내로 옮겨가고 있고 규모도 대형화되면서 무주대공간 구조물의 수요가 증가하고 있다. 대공간 구조물중에서도 연성구조물인 막구조는 시

각적인 아름다움을 제공하면서도 친환경적인 구조 시스템이다. 또한 방수성이 우수하며, 경량이어서 건설 비용이 적게 들기 때문에 그 활용성이 증가하는 추세이다.

막구조물은 모든 하중을 막의 장력에 의존하고 있기 때문에 적정막의 장력을 항상 유지하는 것이 가장 중요하다. 막의 장력은 시공시에는 막 재료의 신율을 고려하여 실제의 소요길이보다 0.5~5% 적게 재단하여서 레버호이스트(Lever Hoist) 혹은 체인블록(Chain Block)과 같은 장치를 이용하여 설계장력을 도입한다. 이 때에 로드셀 등의 장력측정장치를 사용하여 실제 적용된 장력을 측정하기도 한다. 그러나 막구조물은 설치후에는 막의 실제 장력을 측정하기가 용이하지 않다. 강한 바람에 의한 막의 떨림(Fluttering)현상이나 비나 눈에 의한 폰딩(Ponding)

* 교신저자, 경동대 건축토목공학부 교수, 공학박사
Tel: 033-639-0216 E-mail: hmjung@kl.ac.kr

** 경동대 건설산업연구소, 객원연구원, 공학박사

*** (주) 타이가, 부사장

**** (주) 두산건설, 상무, 시공기술사

현상으로 인하여 막은 심하게 손상을 입을수 있기 때문에 막의 장력을 측정하여 유지 보수할 수 있도록 데이터 베이스 구축 및 유지관리가 필요한 실정이다. 그러나 국내에는 현재 이와 같은 막장력 측정 방법이나 기기가 거의 없는 상태이다.

따라서 본 연구의 목적은 기시공된 막구조물의 장력 측정을 위한 휴대용 막장력측정기기를 개발하는 것이다. 연구방법은 2축시험기에 장착된 막의 장력을 간이 측정기에 의해 먼저 측정하며, 측정된 실험 데이터를 분석하여 효율적인 막 장력측정기기를 개발하는 것이다.

1.2 기왕의 연구

막장력 측정 및 유지관리는 막구조물에 있어서 가장 중요한 요소 등이기 때문에 학계나 설계사, 시공사 등에 의해 그 기술이 꾸준히 개발 되어 왔다.¹⁻⁴⁾ 특히, 일본의 경우 장력측정에 대한 특허가 수건이있으며, 유럽에서는 막 생산업체인 FERRARI사에서 TENSIONOMETER 라는 막측정기기를 개발하여 보급하고 있으나 상대적인 막장력 만을 측정할 수 있기 때문에 실제 막장력을 예측하는 데는 어려움이 있다. 현재는 각 시공사마다 경험이 많은 전문가의 주관적인 검사에 의존하거나 자체에서 개발된 범용성이 낮은 측정기기를 사용하여 막의 장력을 측정하고 있는 실정이다.

막의 장력 측정방법에는 경험에 의한 방법, 막의 반력을 이용한 방법, 막의 진동을 이용하는 방법 등

많은 연구가 진행되고 있으며, 개발된 장력측정기기는 기존의 막구조물 현장에 적용하기에는 휴대성이 용이하지 않거나, 그 측정 정밀도가 떨어지는 제품 등이 대부분이다. 특히 막의 진동을 이용하는 방법으로 제작된 측정기는 막면의 감쇠가 크기 때문에 타격에 의한 자유진동으로는 막의 고유진동 모드를 정확하게 구하기가 용이하지 않아 그 정밀도가 떨어지는 경향이 있어, 현재는 음파에 의한 장력측정기기의 개발 등이 시도되고 있다.⁵⁾

막장력 측정에 관한 연구는 의학계에서도 활발히 진행되고 있으며, 고막 압력을 측정하는 기기와 눈의 안압 등을 측정하는TONOMETER 라는 기기 등이 개발되어 활용되고 있는 것으로 알려지고 있다.

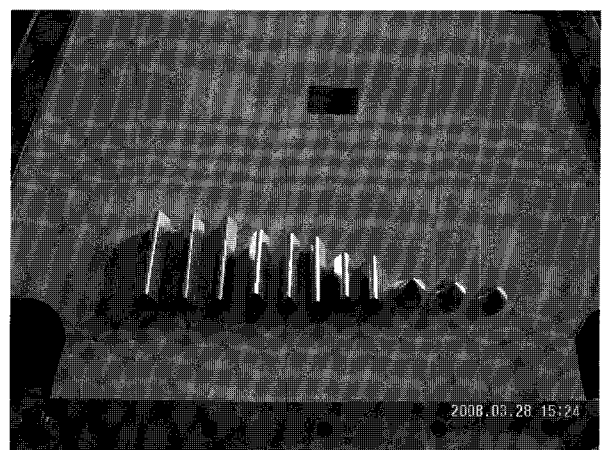
2. 장력측정기기 모델

2.1 측정기기의 형상모델 및 제원

<그림 1>은 휴대용 간이 장력측정기기(PTMM이라 칭함)의 형상과 장력측정기에 사용하는 Push-Pull 게이지를 나타내고 있다. 이 기기의 형상은 휴대의 용이성과 측정의 용이성을 위하여 2개의 손잡이를 두었으며, 경량성의 확보와 측정값의 오차를 최소화하고 경계부의 경계조건 확보하기 위하여 300mm 알루미늄 원형판을 사용하여 그 내부를 15mm 절삭하여 무게를 경감시키면서 원형판 단부 경계부에 적절한 곡률을 확보하도록 하였다. 이는 연직방향 최대변위의 제어와 측정부의 경계 조건



<그림 1> 휴대용 막장력 측정기(PTMM) 형상



<그림 2> Tip의 종류

확보를 용이하도록 하기 위함이다. 간이 측정기기의 크기는 직경(D)과 높이(H)가 $D \times H = 30\text{cm} \times 40\text{cm}$ 이며, 총중량은 약 4.5kg 이다.

<그림 2>는 Tip(가압체)의 형상 및 종류를 나타낸다. Tip의 종류는 형상별로는 원형과 각형의 2종류, 길이별(TL)로는 50mm, 75mm, 100mm의 3종류, 높이별로는 5mm, 10mm, 15mm의 3종류이다. 이처럼 다양한 형상과 종류의 Tip을 사용하는 이유는 개발하고자 하는 장력측정기기의 장력 방향성 확보 및 보다 효율적인 막장력을 측정하기 위함이다.

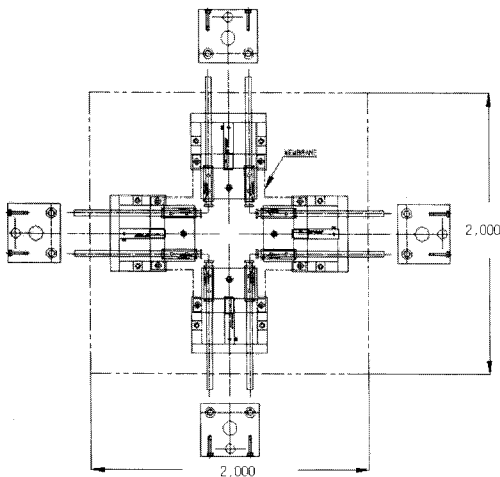
예비 실험을 통하여 Tip 높이가 5mm 미만과 15mm 를 초과하는 경우는 측정반응값이 실용성 범위를 크게 벗어나는 것을 알 수 있었으며, 국내의 경우 막의 초기장력이 300kg/m 정도 도입되는 것에 착안하여 본 모델에서는 10mm Tip을 도입한다.

장력측정기기에 사용하는 Push- Pull 게이지는 측정데이터가 USB 또는 컴퓨터에 직접 저장되는 DigiTec(주)의 모델명 DTZ-20(Digital Push-Pull Force Gauge)을 사용하였다.

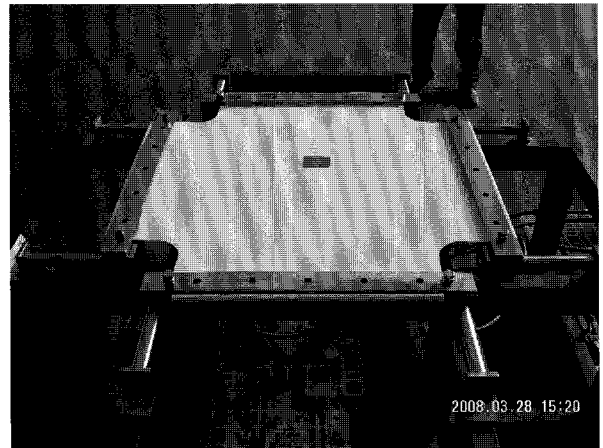
2.2 2축장력 시험기

<그림 3-4>는 본 측정기기(PTMM)의 장력측정을 위하여 별도로 제작한 2축 장력시험기 평면도 및 실물사진이며, 이 기기에 설치되는 시험용 막의 크기는 가로×세로가 500mm×500mm 이다.

이 측정기기는 로드셀에 의해 경계부 장력이 X축, Y축으로 컨트롤되며, 반복측정에 의한 막 손상



<그림 3> 2축 장력시험기 평면도



<그림 4> 2축 장력시험기 실물 사진

을 최소화하고, 막의 교환이 쉽고 또한 막의 설치 후 그 안전성이 최대로 확보되도록 경계부는 원형봉을 사용하여 고정하였다. 막 장력 도입 가능 용량은 최대 5tf/m이다.

3. 실험방법 및 실험

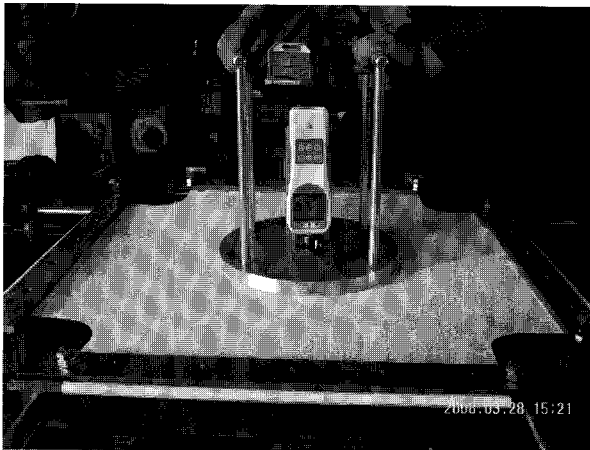
3.1 실험방법

실험은 간이 장력측정기의 실험 데이터의 정확성을 확보하기 위하여 충분한 폭의 2축막을 설치할 수 있는 2.2항에서 소개한 2축 장력시험기를 별도 제작하여 사용하였으며, 이 2축 장력 시험기에 막 장력이 균등하게 분포될 수 있도록 막을 세팅한다.

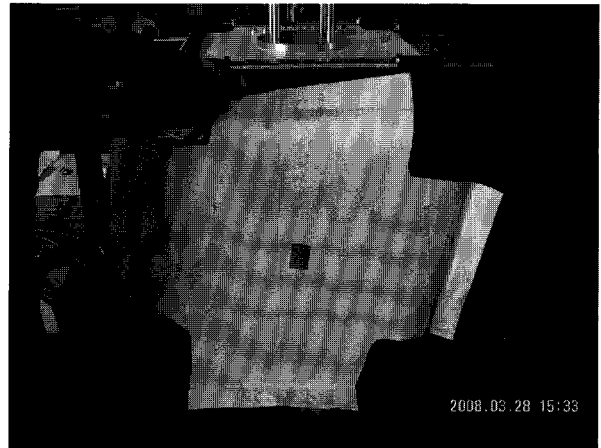
이때 X축(Warp방향)과 Y축 방향(Fill방향)으로 장력을 0kgf/m ~ 400 kgf/m의 범위까지 도입한다. X, Y축 장력을 변화시키면서 휴대용 막장력 측정기의 손잡이를 잡고 막의 평면과 수직방향으로 가압하여 측정기의 데이터값을 얻는다. 이때 Tip은 장력 측정기의 하부 원형판에서 10mm 돌출한 상태로 세팅이 되어 있으므로 일정한 막 장력이 설정된 상태에서는 연직방향의 작용하중에 다소 오차가 발생하더라도 측정기에 부착된 게이지 값에는 거의 변화가 없다.

3.2 실험

<그림 5>는 막장력이 도입된 막위에서 휴대용 막장력 측정기를 가압하는 사진이며, 가압에 따른 데이터값은 디지털로 표기되어 자동으로 저장된다.



〈그림 5〉 휴대용 막장력 측정기 가압중 사진



〈그림 6〉 실험 후의 막 사진

본 실험에서는 X방향으로 Warp을, Y방향으로 Fill을 세팅한 후 각각 장력값을 100 kgf/m 증가시키면서 실험을 실시한다. 반복실험에 의한 막의 이완을 고려하여 50회 측정시마다 막을 교환하였다. 〈그림 6〉은 실험후의 막 전경이다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 막 장력에 따른 Push-Pull 게이지 값

〈표 1〉은 막에 각각 2축 인장 조건을 두고 간이용 장력측정기기로 측정한 Push-Pull 게이지 값을

〈표 1〉 간이 측정기기에 의한 실험 결과

막장력(T) (kgf/m)		원형 Tip	Push-Pull 게이지 측정값 P (kg/cm)								
Tx	Ty		TL50			TL75			TL100		
			—		/	—		/	—		/
0	0	3.42	5.41	5.5	5.44	6.31	6.24	6.42	7.32	7.4	7.38
100	0	3.71	6.03	6.14	6.23	6.49	6.41	6.41	8.04	7.42	7.59
200	0	4.10	6.66	6.63	6.53	7.65	7.10	7.30	9.11	8.13	8.32
300	0	4.60	7.53	7.39	7.34	8.60	8.39	8.42	9.83	8.90	9.21
400	0	4.99	8.04	7.70	7.78	9.23	8.23	8.58	11.01	9.86	10.35
0	100	3.85	6.40	6.58	6.26	6.79	6.97	6.83	8.22	8.44	8.32
100	100	4.59	7.23	7.24	7.25	8.39	8.27	8.41	9.82	9.98	9.99
200	100	5.02	8.18	7.73	7.89	9.13	8.76	8.80	10.53	10.01	10.31
300	100	5.17	8.26	8.70	8.14	9.43	8.78	8.83	11.29	10.20	10.68
400	100	5.47	8.52	8.53	8.63	9.91	8.95	9.43	11.71	10.35	11.37
0	200	4.12	6.43	6.90	7.02	6.94	7.77	7.54	8.15	9.26	8.49
100	200	4.87	7.22	7.53	7.49	8.01	8.58	8.19	9.58	9.76	9.68
200	200	5.23	8.56	8.60	8.55	8.91	9.05	9.10	10.64	10.55	10.6
300	200	5.40	9.13	9.19	8.97	10.24	10.03	9.89	11.81	11.42	11.61
400	200	5.83	9.71	9.91	9.96	10.62	10.55	10.74	12.2	11.67	11.86
0	300	4.67	7.49	7.83	7.40	8.06	8.90	8.37	9.27	10.43	9.61
100	300	5.22	8.33	9.11	8.76	9.49	10.49	10.02	9.84	11.18	10.78
200	300	5.47	9.07	9.73	9.26	10.48	10.60	10.68	11.01	12.02	11.40
300	300	6.06	9.49	9.91	9.70	11.21	11.05	11.23	12.49	12.37	12.31
400	300	6.43	10.46	10.54	10.05	11.41	11.13	11.14	13.02	12.39	12.76
0	400	4.83	7.91	8.90	8.47	8.40	9.23	8.67	10.12	11.37	10.50
100	400	5.44	8.57	9.15	8.84	9.14	10.28	9.47	10.65	12.32	11.51
200	400	5.71	9.14	9.63	9.38	9.93	10.77	10.47	11.98	13.01	12.56
300	400	6.22	9.74	9.84	9.55	10.93	11.36	10.92	13.10	13.47	13.30
400	400	6.67	10.5	10.32	10.28	11.63	11.78	11.53	14.78	14.49	14.69

*단위표기는 기성품인 Push-Pull 게이지의 단위에 따름

표기한 실험 결과표이다

<표 1>에서 T는 막의 장력을 나타내며, Tx방향과 Ty방향으로 구분하여 장력을 도입하는 것을 나타내며, Tip 종류별에 따른 Push-Pull 게이지 측정값(P)을 나타내고 있다.

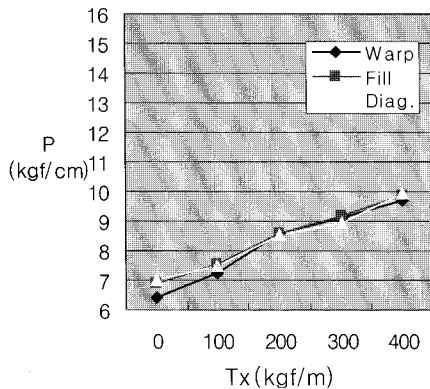
원형Tip은 한 종류의 결과만을 나타내고 있으며, 또한 표의 TL50에서 TL은 각형 Tip의 길이가 50mm인 것을 의미한다. —, |, /는 장력 측정기의 측정 방향이 각각 막의 Warp(Tx방향), Fill (Ty방향) 그리고 Diagonal 방향을 나타낸다.

<그림 7-10>은 TL=50mm와 TL= 75mm를 사용한 경우, 대표적인 Ty 값에 대하여 X축 막장력값(Tx)과 Push-Pull게이지 값(P)을 나타낸 것이다. 그림에서 횡축의 Tx는 Warp 방향의 막 장력을 나타내며, 종축의 P는 Push-Pull 게이지 측정값을 나타낸다. 횡축의 값은 단위 m당의 장력값으로 환산한 값이며, 종축은 Tip이 연직으로 10mm 변위시 발생

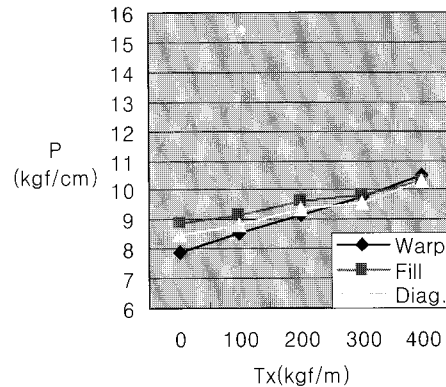
하는 게이지 값을 나타낸다.

<그림 7-10>에서 알 수 있는 것처럼 측정 방향에 관계없이 Tx값이 증가하면 측정기의 게이지 값 P가 증가하는 경향을 보이고 있으며, 이 경향은 전 모델에서 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 장력 측정 방향에 따른 장력 크기는 <그림 10>의 Ty=400kg/m, Tip=75mm의 경우의 결과 값을 제외하고는 전 모델에서 Warp, Diagonal 그리고 Fill 방향에 따른 장력값의 크기는 거의 구별이 어려운 결과를 나타내고 있다.

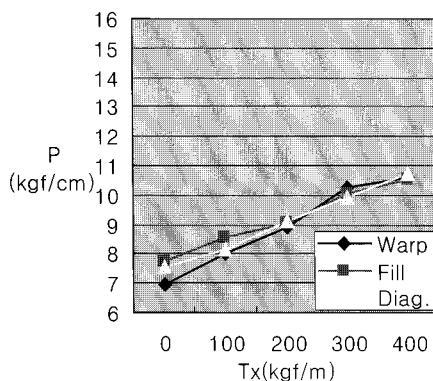
<그림 11-15>은 TL=100mm의 경우, Ty의 값이 0~400 kg/m까지 작용시 막장력값(Tx)과 Push-Pull 게이지값(P) 관계를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 Ty 값이 증가하면 Tx값이 일정하더라도 측정기의 게이지 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 이 경우는 Tip의 길이 TL=50mm와 75mm를 사용한 경우 보다 Warp, Diagonal 그리고 Fill 방향



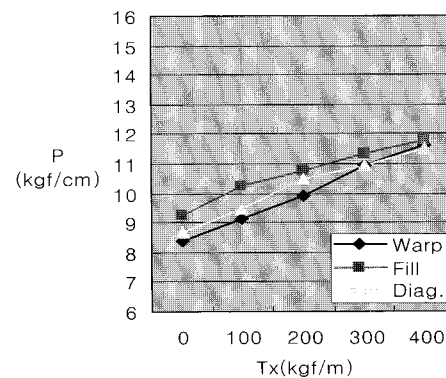
<그림 7> 막장력값(Tx)과 Push-Pull게이지값(P) 곡선 (Ty=200 kg/m, Tip=50mm의 경우)



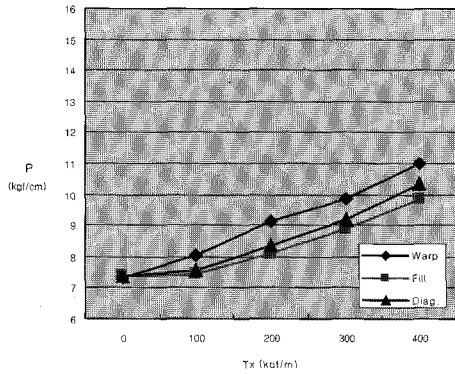
<그림 8> 막장력값(Tx)과 Push-Pull게이지값(P) 곡선 (Ty=400 kg/m, Tip=50mm의 경우)



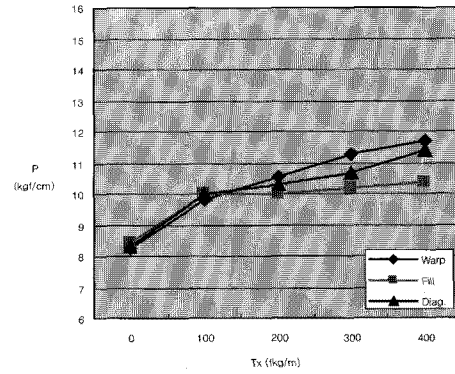
<그림 9> 막장력값(Tx)과 Push-Pull게이지값(P) 곡선 (Ty=200 kg/m, Tip=75mm의 경우)



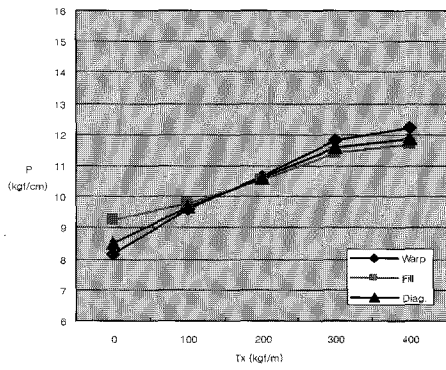
<그림 10> 막장력값(Tx)과 Push-Pull게이지값(P) 곡선 (Ty=400 kg/m, Tip=75mm의 경우)



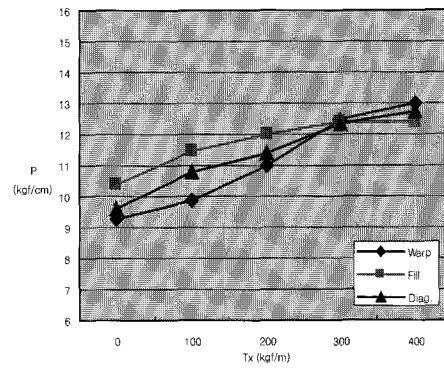
〈그림 11〉 막장력값(Tx)과 Push-Pull게이지값(P) 곡선 (Ty=0 kg/m, TL=100mm의 경우)



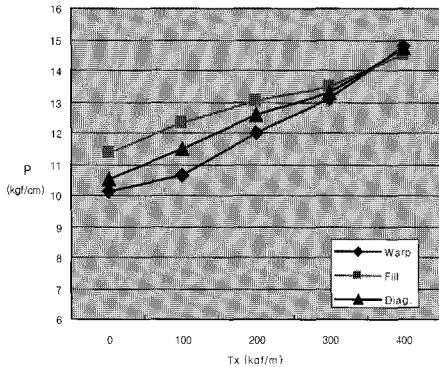
〈그림 12〉 막장력값(Tx)과 Push-Pull게이지값(P) 곡선 (Ty=100 kg/m, TL=100mm의 경우)



〈그림 13〉 막장력값(Tx)과 Push-Pull게이지값(P) 곡선 (Ty=200 kg/m, TL=100mm의 경우)



〈그림 14〉 막장력값(Tx)과 Push-Pull게이지값(P) 곡선 (Ty=300 kg/m, TL=100mm의 경우)



〈그림 15〉 막장력값(Tx)과 Push-Pull게이지값(P) 곡선 (Ty=400 kg/m, TL=100mm의 경우)

에 따른 P값의 구별이 명확하다. 특히 <그림 11>의 Ty=0 kg/m, TL=100mm의 경우, 막장력값(Tx)에 관계없이 P값은 Warp, Diagonal 그리고 Fill 방향으로 작아지는 것을 알 수 있다.

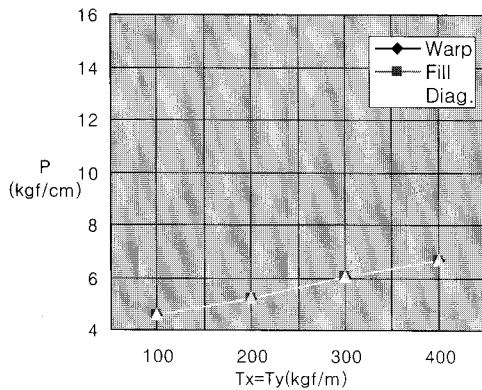
<그림 12-14>에서 보여지는 것처럼 Tx값이 Ty값과 동일한 기점을 기준으로 Tx값이 Ty값보다 큰 경우에는 P값이 Warp, Diagonal 그리고 Fill 방향 순

으로 작아지는 경향이 명확하게 나타나고 있다. 그러나 Tip의 길이가 50mm와 75mm의 경우에는 측정방향에 따른 P값의 규칙성이 Tip의 길이 100mm의 경우처럼 명확하게 나타나지 않고 그 값이 랜덤의 경향을 보이고 있다.

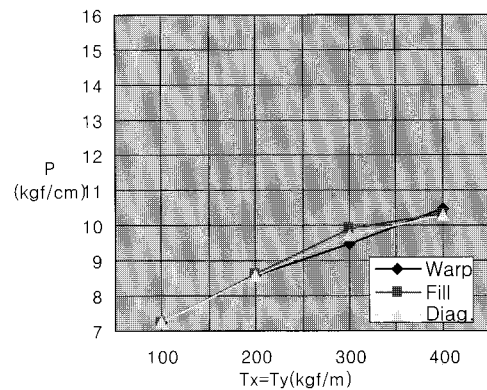
이 실험 데이터는 막의 장력에 따른 방향성을 구분하기 위해서는 Tip의 길이가 50mm와 75mm인 경우는 적절하지 않다는 결과를 보여주며, 반면에 Tip의 길이가 100mm 되는 막 장력 측정기의 경우는 막 장력의 방향성을 찾아내는데 이보다 유리한 결과를 보여주고 있다.

대부분의 실제 막 구조물은 초기 장력 상태가 X, Y방향으로 크게 차이가 나지 않는 거의 동일한 경우가 대부분이다. <그림 16-19>는 이처럼 Tx와 Ty가 같은 경우, Tip의 종류 및 길이에 따른 P값을 나타내고 있다.

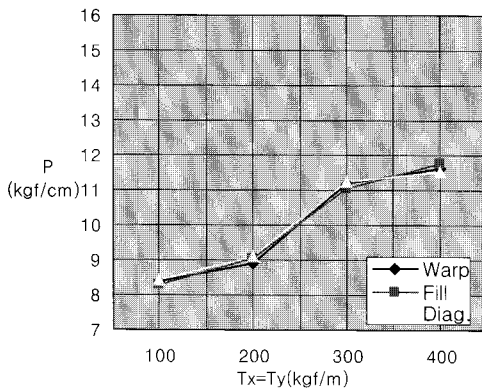
원형 Tip을 사용한 경우, <그림 16>에서 알 수 있



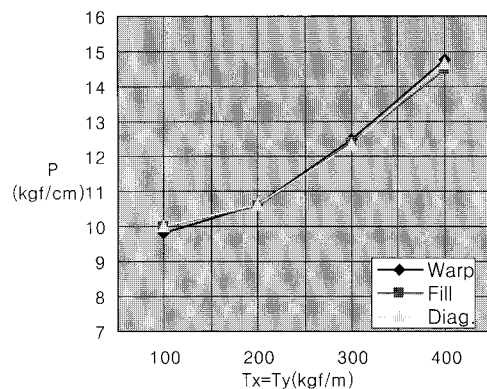
〈그림 16〉 Tx=Ty인 경우 Push-Pull게이지값(P) (원형 Tip 사용)



〈그림 17〉 Tx=Ty시의 Push-Pull게이지값(P) 곡선 (TL=50mm 사용)



〈그림 18〉 Tx=Ty시의 Push-Pull게이지값(P) 곡선 (TL=75mm 사용)



〈그림 19〉 Tx=Ty시의 Push-Pull게이지값(P) 곡선 (TL=100mm 사용)

는 것처럼 Tx=Ty 값이 증가하면 P의 값이 거의 선형으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 한편, 각형 Tip를 사용할 경우에는 장력의 증가에 따라 P의 값은 증가하는 경향을 나타내고 있으나 Tip의 길이에 따른 P 값의 증가 경향은 일정하지 않다. 이 결과로부터 Tip의 형상 및 길이는 막 장력 측정에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

4.2 PTMM 측정기기의 게이지 값(P)과 막장력(T) 관계 실험식

<식 1> 은 PTMM 기기의 게이지값(P)에 따른 막장력(T)을 추정하는 실험식을 나타낸다. 이 실험식에 사용한 데이터는 Tip의 길이 100mm인 5각 기둥형 Tip를 사용하여 Warp방향과 Fill방향의 장력이 동일하게 작용하는 Tx=Ty인 경우의 것이다. 이 실험식은 4차방정식으로 모델화하여 그 정밀도를 확

보하였다.

$$T = -1.13995P^4 + 59.031P^3 - 1143.27P^2 + 9859.61P - 31772.8 \quad \text{<식 1>}$$

이 <식 1> 에서 T는 막의 장력, P는 기기 게이지 측정값을 나타낸다. 이 실험식은 현상이 아닌 실험실에서 얻은 데이터에 의해 작성한 것으로 아직 완전히 검증되지 않은 식이다.

따라서 이 실험식이 완성되기 위해서는 현장 여건을 고려한 더 많은 실험 데이터가 필요할 것이며, 실험 데이터의 축적과 분석 및 검토가 더욱더 세밀하게 이루어진 후에야 완성된 실험식이 얻어질 것이다. 완성된 실험식이 구해지면 그 식에 의해 실무자들을 위한 조건표가 작성되고, 궁극적으로 PTMM 기기의 상용화가 가능하게 될 것이다.

5. 결 론

이상 막구조물의 장력 측정을 위한 휴대용 막 장력측정기기의 개발을 목적으로 2축시험기에 장착된 막의 장력을 휴대용 간이 측정기에 의해 구한 실험 데이터를 근거로 효율적인 막 장력측정기기를 개발하는데 그 목적을 두고 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) PUSH-PULL 케이지를 이용한 휴대용 막장력 측정기기의 개발을 위한 기초 데이터를 얻을 수 있었다.
- 2) 휴대용 측정기에 사용하는 가압장치인 Tip의 형상 및 길이는 막 장력측정에 있어서 중요한 요소임을 알 수 있었다.
- 3) 본 기초 연구에서 개발된 휴대용 간이 막 장력 측정기기는 정량적이고 정성적인 측면에서 데이터의 정밀도가 매우 높아 향후 상용제품으로도 개발이 가능함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호#06 R&D B03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 日本建築學會, ドーム構造の技術レビュー, 2004. 12
2. Jinping Ou, Hui Li (2005) "The stat-of-art and practice of structural heath monitoring for civil infrastructure in the mainland China". Proceedings of The 4th Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Shenzheng, 69-93
3. 安藤和秀, 三次仁, 膜面の張力測定方法, 公開特許公報(A), 1996年1月19日(公開日)
4. 佐佐木直也, 平田張二, 膜張力計測system開發, 日本建築學會學術講演梗概集, Vol.B-1, pp.1389-1390, 1993.
5. 陣商煜, 音波を用いた膜構造物の膜張力測定装置の開發, 古屋大學院環境學研究科, 博士學位論文, 2008.

접수일자 : 2008년 9월 16일

심사완료일자 : 2008년 10월 28일

게재확정일자 : 2008년 11월 6일