R&D
12기술혁신 E06

국토교통기술촉진연구사업

R&D-12기술혁신 E06

발간등록번호
11-1613000-001000-01

음파를 이용한 막구조물의 장력 측정장치 개발 및 건전성 모니터링시스템 구축 최종보고서

20 15. 12

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관 / (주) 타이가
공동연구기관 / (재) 한국건설품질연구원

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

최 종 보 고 서
음파를 이용한 막구조물의 장력 측정장치 개발 및 건전성 모니터링시스템 구축
2015. 12
국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

BOOKK
93400
9 791158 117191
ISBN 979-11-5811-719-1

주 의 사 항

1. 이 보고서는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술 연구개발사업의 최종보고서입니다.
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.

제출문

국토교통부장관 귀하

이 보고서를 "음파를 이용한 막구조물의 장력 측정장치 개발 및 건전성 모니터링시스템 구축" 과제의 보고서로 제출합니다.

2015. 12. 18

주관연구기관명 : (주)타이가
주관연구책임자 : 진상욱
연 구 원 : 최진호
연 구 원 : 이용기
연 구 원 : 민강식
연 구 원 : 김동철
연 구 원 : 안종훈
연 구 원 : 서지은
연 구 원 : 홍민주

공동연구기관명 : (재)한국건설품질연구원
공동연구책임자 : 이성민
연 구 원 : 진남희
연 구 원 : 최정삼
연 구 원 : 김정호
연 구 원 : 김수영
연 구 원 : 전규식
연 구 원 : 최지희
연 구 원 : 최미화

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>12기술혁신
E06</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td colspan="2">2012.11.19~
2015.11.18</td><td>단 계 구 분</td><td>1,2,3/3</td></tr>
<tr><td>연 구 사 업 명</td><td colspan="6">국토교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td rowspan="3">연 구 과 제 명</td><td>최상위
과제명</td><td colspan="5">음파를 이용한 막구조물의 장력 측정장치 개발 및
건전성 모니터링시스템 구축</td></tr>
<tr><td rowspan="2">단위과제명</td><td colspan="5">주관: 포터블 막장력 측정장치 개발</td></tr>
<tr><td colspan="5">공동: 막장력 헬스모니터링 시스템 구축</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">진 상 욱</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 16명
내부 : 13명
외부 : 3명</td><td>해당
단계
연구비</td><td colspan="2">정부 : 359,000천원
기업 : 120,000천원
계 : 479,000천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 60명
내부 : 57명
외부 : 3명</td><td>총
연구비</td><td colspan="2">정부 : 860,000천원
기업 : 287,000천원
계 : 1,147,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">주관: (주)타이가
공동: (재)한국건설품질연구원</td><td>참여기업명</td><td colspan="3">㈜타이가, 디프리기술연구원㈜</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명 : 일본</td><td colspan="3">상대국연구기관명 : 나고야대학교</td></tr>
<tr><td colspan="5">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td>237</td></tr>
<tr><td colspan="7">▪ 포터블 막장력 측정장치 개발
- 막장력을 정확하고 정량적으로 막재섬유 2축 방향 각각 계측가능한 장치 개발
- 소형, 경량화로 현장에서 자유롭게 사용 가능한 포터블 막장력 측정장치
- 원격리모트 및 무선송수신 가능한 장치
- 실험실과 현장에서 반복적 성능 검증으로 성능 향상
▪ 막장력 헬스모니터링 시스템 구축
- 막의 진동데이터를 실시간으로 전송할 수 있는 무선 송수신 시스템 구축
- 막장력 측정 자동화 시스템 개발
- 막장력 측정 자동화 시스템의 막구조물 상시 설치 시스템 개발 및 Mock-up
- 막장력 헬스모니터링 시스템 현장 시범 적용
▪ 막장력 유지관리 기준/지침(안) 작성
- 기존 막구조물의 막장력 측정으로 막장력 유지관리에 관한 데이터베이스 구축
- 막장력 유지관리 기준/지침(안) 작성</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="5">막구조물, 막장력, 포터블 막장력 측정장치, 막장력 모니터링 시스템, 막장력 유지관리</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="5">Membrane Structure, Membrane Tension, Portable Membrane Tension Measurement Equipment, Membrane Tension Health-Monitoring, Membrane Tension Maintenance</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제목

음파를 이용한 막구조물의 장력 측정장치 개발 및 건전성 모니터링시스템 구축

Ⅱ. 연구개발과제 개요(목적, 필요성, 범위 등을 기술)

막구조물은 본래 압축 또는 휨에 대해서는 저항할 수 없는 막재료를 적절한 인장상태로 유지함으로써 안정화되고 막구조물 전체가 눈이나 바람에 의한 하중에 견딜 수 있게 되는 구조물이다. 따라서 막구조물은 시공 후 소요의 설계장력이 도입되었는지는 건전한 유지관리의 관점에서도 파악해야 할 중요한 사항이지만, 기존의 기술로는 이를 정확히 파악할 효과적인 방법이 없다. 이 연구는 음파를 이용해 막구조물의 막장력을 정확하고 안정적으로 측정할 수 있는 새로운 포터블 막장력 측정장치를 개발하고, 이를 토대로 막장력 측정 자동화 시스템을 구축함으로써 막장력을 실시간으로 모니터링할 수 있는 시스템을 완성한다. 이로 인해 준공 중인 막구조물뿐 아니라, 기존 막구조물의 장기적 이용을 실현하기 위해 필수 불가결 항목인 유지관리 도구 및 시스템이 구비되고, 막구조물의 설계, 시공, 유지관리의 성능확보와 그로 인한 막구조물의 장수명화를 위해 꼭 필요한 기술이 확보된다.

Ⅲ. 연구개발 수행내용 및 결과(연구수행과정, 연구수행결과 등을 기술)

이 연구는 소형, 경량화된 포터블 막장력 측정장치 개발과 막장력 측정 자동화 시스템 개발을 통한 막장력 헬스모니터링 시스템 구축하고, 이를 토대로 기존 막구조물의 장력 측정함으로 막구조물의 유지관리 기준/지침(안) 작성을 위한 데이터베이스 구축으로 진행되었다.

○ 주요 연구목표 Ⅰ - 포터블 막장력 측정장치 개발

음파를 구획된 막면에 방사하고 이로 인해 진동하는 막의 고유진동수를 레이저 변위계로 비접촉으로 계측해 냄으로써, 막면에 도입되어 있는 막장력을 섬유 2축 방향 각각 90% 이상의 높은 정확도를 가지면서 정량적이고 안정적으로 측정할 수 있는 소형, 경량의 포터블 막장력 측정장치를 개발한다.

○ 주요 연구목표 Ⅱ - 막장력 헬스모니터링 시스템 구축

개발한 소형, 경량의 막장력 측정장치를 막구조물에 상시 설치할 수 있는 시스템과, 측정

장치로부터 얻은 데이터를 지상 관제센터로 무선으로 송신하고 원격으로 리모트할 수 있는 막장력 측정 자동화 시스템을 탑재함으로써, 실시간으로 막의 장력을 모니터링할 수 있는 시스템을 구축한다.

○ 주요 연구목표 III - 막장력 유지관리 기준/지침(안) 작성

휴대할 수 있는 포터블 막장력 측정장치와 상시 설치된 막장력 헬스모니터링 시스템으로 시공 중의 막구조물뿐 아니라, 기존 막구조물을 대상으로 막장력을 직접 측정 또는 모니터링함으로써 대상 구조물의 장력 측정 데이터를 축적함으로써, 막구조물의 설계 및 시공, 유지관리에 가장 중요한 막장력과 유지관리에 관한 기준 및 지침을 작성한다.

Ⅳ. 최종 연구성과 및 적용실적

지금까지 막장력을 높은 정확도로 측정할 수 있는 기술이 없었으므로, 높은 정확도와 안정성을 확보하고 현장 적용이 가능한 포터블 막장력 측정장치와, 막장력을 실시간으로 모니터링할 수 있는 헬스모니터링 시스템을 완성해 막구조물의 시공 및 유지관리 업무에 폭 넓게 이용되어 막구조물의 건전한 유지관리를 가능케 했다. 막구조의 헬스모니터링 시스템은 세계적으로도 처음 시도되는 만큼 우리나라가 세계에서 막구조의 유지관리 분야를 리드해 나갈 수 있는 원천 기술을 확보했다.

○ 핵심성과명: 포터블 막장력 측정장치 개발

음파를 구획된 막면에 방사하고 이로 인해 진동하는 막의 고유진동수를 레이저 변위계로 비접촉으로 계측해 냄으로써, 막면에 도입되어 있는 막장력을 섬유 2축 방향 각각 90% 이상의 높은 정확도를 가지면서 정량적이고 안정적으로 측정할 수 있는 소형, 경량의 포터블 막장력 측정장치를 개발했다. 개발과정에서 2축 막 인장장치를 통해 막재를 세팅하고, 시험제작한 측정장치로 실험적이고 반복적인 검증 작업을 거침으로써 측정 오차요인을 분석하고, 그 결과를 지속적으로 피드백해 장치를 개량했다. 또, 측정장치 이외의 장력표시부와 연산장치를 마이크로컴퓨터에 탑재하고, 이를 구동할 수 있는 소프트웨어를 개발했을 뿐 아니라, 가정용 전원을 대신해 1.5V 교류전압의 휴대용 배터리 구동 환경을 구축해 장치를 일원화함으로써 전체 장치 중량 2.5kg 이내의 소형, 경량화를 이루었다.

○ 핵심성과명: 막장력 헬스모니터링 시스템 구축

막장력 헬스모니터링 시스템 구축에 있어, 앞서 개발한 막장력 측정장치를 원거리의 관리센터에서 리모트 컨트롤할 수 있는 시스템과, 음파로 인한 막의 진동 데이터를 실시간으로 전송할 수 있는 무선 송수신 시스템, 그리고 데이터를 분석하고 모니터링하는 소프트웨어를 개발해 모니터링 도구를 완성했다. 또, 완성된 장력 측정장치를 막구조물에 정착시킬 수 있는 요소기술개발을 비롯해, 구축된 헬스모니터링 시스템의 현장 가동으로 얻어지는 장력 데이터를 피드백하고, 문제점을 보완 개량함으로써 막장력을 리얼타임으로 모니터링할 수 있는 시스템을

완성했다.

○ 핵심성과명: 막장력 유지관리 기준/지침(안) 작성

개발한 포터블 막장력 측정장치와 상시 설치된 막장력 헬스모니터링 시스템으로 시공 중의 막구조물뿐 아니라, 기존 막구조물을 대상으로 막장력을 직접 측정 또는 지속적으로 모니터링함으로써 대상 구조물의 장력 측정 데이터를 축적했고, 막구조물의 설계 및 시공, 유지관리에 가장 중요한 막장력과 막구조물 유지관리에 관한 기준 및 지침(안)을 인천문학경기장을 대상으로 작성했다.

Ⅴ. 연구목표 달성 및 효과

연구목표 달성에 대한 핵심성과물인 포터블 막장력 측정장치 개발과 막장력 헬스모니터링 시스템 구축 및 막장력 유지관리 기준/지침(안) 작성에 대한 학술적, 기술적 연구목표 달성은 다음과 같다.

○ 포터블 막장력 측정장치 개발
음파를 이용해 90% 이상의 정확도로 막재섬유 2축 방향으로 측정가능한 장치
장치크기 20×30×20cm 이내이고 장치 중량 2.5kg 이내의 포터블 장치
마이크로컴퓨터 전자회로를 탑재해 막장력 산정이 가능한 올인원 장치
충전식 배터리로 구동되는 휴대형 장치
무선으로 데이터 송수신이 가능한 장치
원격으로 리모트 컨트롤 가능한 장치
막 인장장치와 기존 막구조물의 장력측정을 통한 실험적, 반복적 검증 및 개량

○ 막장력 헬스모니터링 시스템 구축
막구조 및 일반구조물의 헬스모니터링 수법조사로 본 연구의 위치 파악
막면 진동데이터 해석 및 축적 시스템 설계
막장력 측정 자동화 시스템 완성 및 Mock-up 테스트
막장력 측정 자동화 시스템 상시 설치 시스템 구축
막장력 피드백 시스템 설계
현장 시범 적용

○ 막장력 유지관리 기준/지침(안) 작성
기존 및 시공 중인 막구조물의 막장력 측정을 통한 데이터베이스 구축
막구조물의 장력 도입 실태 파악
막장력 및 막구조물의 유지관리 기준/지침(안) 작성

Ⅵ. 연구성과 활용계획

현재 국내 막구조물의 시공 및 유지관리 시장에서 막장력을 높은 정확도로 측정할 수 있는 기술은 이 연구로 개발한 음파를 이용하는 방법이 유일하다. 막장력을 높은 정확도와 안정적으로 측정가능한 장치가 개발되었고, 이를 막구조물에 상시 설치함으로써 막장력을 실시간으로 모니터링할 수 있는 헬스모니터링 시스템이 완성됨으로서 아래에 열거한 항목으로 활용 가능하다.

- 막구조물 시공 시 도입되어야 할 장력을 정확히 계측할 수 있으므로 설계에 반영 가능
- 시공된 막구조물의 막장력을 정확히 측정할 수 있으므로, 준공 후 시간 이력에 따른 막장력의 이완을 평가하고, 장력 재도입 및 막재 리모델링의 판단 기준이 명확해 지는 등 과학적 데이터에 의한 판단이 가능
- 시공된 막구조물의 막장력을 실시간으로 헬스모니터링 할 수 있으므로, 호우나 태풍시의 막장력 추이, 변동 폭 등을 파악해 설계에 반영함으로써, 각종 자연재해에 대처할 수 있는 재난예방 시스템으로 활용 가능
- 개발된 막장력 측정장치는 전 세계에 시공된 모든 막구조물의 과학적 막장력 유지관리 도구로 활용 가능
- 구축된 막장력 헬스모니터링은 전 세계에 시공된 막구조물의 막장력을 실시간으로 정확하게 파악해 장력 도입상태를 알려주는 헬스모니터링 시스템으로 활용 가능

SUMMARY

Ⅰ. Title

Development of tension membrane structures measuring devices and efficiency monitoring system by using acoustic wave

Ⅱ. R & D Projects Overview

The membrane structure is able to withstand the loads in terms of the snow or strong wind through an appropriate tension. Even thought required tension is essential for maintaining membrane structure, existing technologies are not an effective way to identify required tension accurately. This study has developed a new portable membrane measuring device and built up a auto membrane measuring system capable of monitoring in real time on the basis of acoustic wave. Acoustic device can provide maintenance tools and systems for achieving a long-term use of the existing membrane structures as well as being completed structures.

Ⅲ. Contents and Results of Research

The study invented lightweight portable measuring device and developed monitoring system through automatic system. This device can measure tension of the existed membrane structure; therefore, it proceeded to build a database for standards/guidelines of the maintenance of membrane structure.

○ The main research purpose Ⅰ - Portable membrane tension measurement device

Portable device radiates acoustic waves to any membrane surface, and it can measuring the number of the natural vibration membrane by a non-contact laser displacement meter. While having an accuracy of 90% and can be reliable measured in lightweight, small and potable device.

○ The main research purpose Ⅱ - Establish a health-monitoring system for membrane tension

Portable equipment can transmit the data wirelessly to the ground control center and hold

automatic membrane measurement system through remote control. It establishes a system capable of monitoring tension of membrane in real time.

○ The main research purpose Ⅲ - Making standards maintenance / guidelines

Tension is essential for membrane to design, construct and maintain; therefore, monitoring system has to check tension of membrane any time on the ground of accumulated tension measurements data.

Ⅳ. The Final Results of Research and Applied Results

There was no technology that is capable of measuring tension of membrane with high accuracy, stability and the field application as portable measuring device. Portable measuring device has just completed a health monitoring system which is widely used in construction and maintenance work of the structure, and it is possible to maintain membrane monitoring system is also the first attempt in the world, so this technology can lead the world in the field of membrane structure as well as maintenance.

○ Key Performance : Portable membrane tension measurement device

Portable device radiates acoustic waves to any membrane surface, and it can measure the number of the natural vibration membrane by a non-contact laser displacement meter. While having an accuracy of 90% and can be reliable measured in lightweight, small and potable device. Analysis of the measurement error factors by performing an iterative verification analysis, so continuously feed back made the device improved. The display unit and the operation unit have the microcomputer as well as have developed software that they can be operated. Portable battery of 1.5V AC voltage can achieve less than 2.5kg light and compact weight device.

○ Key Performance : Building health monitoring system of membrane

We completed tension measurement system for the remote control device from a management center and a radio transceiver system which developed a real-time transfer of data by acoustic vibration of the membrane. We also completed the system to monitor the membrane tension in real time.

○ Key Performance : Making standards maintenance / guideline

Tension is essential for membrane to design, construct and maintain; therefore, monitoring system has to check tension of membrane any time on the ground of accumulated tension measurements data. Standards maintenance and guidelines applied to Incheon Munhak Stadium.

Ⅴ. Research Objectives and Effects

Research objectives are as follows:

○ Portable membrane tension measurement device

- Device of over 90% accuracy by using acoustic waves
- Device size withing 20 × 30 × 20cm and portable device weight of less than 2.5kg
- All-in-one device with Microcomputers Electronic circuit capable of calculating tension of membrane
- A portable device operated with the 1.5V battery
- Device with wireless data transmission and receiving
- Remote control devices
- Repeated verification and upgrade by testing of membrane tension device and existing membrane structures

○ Establishing a health monitoring system of membrane

- Finding out the lab location by health monitoring techniques
- The data analysis of membrane surface vibration and tracking system design
- Completed automatic measurement systems and Mock-up test
- Building up constantly installation automatic measurement system of membrane tension
- Feedback system design of membrane tension
- Appling on-site demonstration

○ Making standards maintenance / guideline

- Building a database measuring membrane tension of the existed membrane structure and bing construction
- Identifying the tensile status of membrane structures
- Making standards maintenance / guideline of membrane tensile and membrane structure

Ⅵ. Research Utilization Plan

Real-time health monitoring system can be used as an entry listed below.

- This device can accurately predict the tensile strength of membrane during being construction
- It is possible to accurately measure the tensile strength of membrane structure, so we can evaluate the relaxation of membrane tension. Therefore, scientific data can determine to add tensile strength or remodeling of membrane structure.
- Real-time health monitoring system can forecast unexpected situation such as heavy rain,

hurricane by reflecting on big change of membrane fluctuations. It can be used as a disaster prevention system to cope with various natural disasters.

- Membrane measure device can be used as a scientific maintenance tool for all membrane structures around the world.
- The health monitoring system can grasp the real-time state of tensile strength of membrane around the world and inform how much tensile strength needed.

CONTENTS

[REPORT DOCUMENT] ····· i
[REPORT SUMMARY TABLE] ····· ii
[SUMMARY(Korean)] ····· iii
[SUMMARY(English)] ····· vii
[CONTENTS(English)] ····· xi
[CONTENTS(Korean)] ····· xii i

Chapter 1. R&D projects outline ····· 1
Paragraph 1. Purpose and need of R&D ····· 1
Paragraph 2. Domestic and international technology development condition of related area ····· 6
Paragraph 3. Position a result of research in the related fields ····· 10

Chapter 2. R&D performance contents and result ····· 14
Paragraph 1. Research performance strategy and methodology ····· 14
Paragraph 2. Research performance process and contents ····· 23
Paragraph 3. Research performance result and verification ····· 211

Chapter 3. Final research result and application result ····· 216
Paragraph 1. Each research result ····· 216
Paragraph 2. Explanation of each research result ····· 216
Paragraph 3. Main research result ····· 222
Paragraph 4. Technical enforcement & Practical application ····· 224
Paragraph 5. Market outlook for result of technical development ····· 226

Chapter 4. R&D goal achievement and effect ····· 227

Paragraph 1. R&D final goal achievement ····· 227
Paragraph 2. Descriptive effect analysis on R&D result ····· 230
Paragraph 3. Economic effect analysis on R&D result ····· 231
Paragraph 4. Political effect analysis on R&D result ····· 231

Chapter 5. Utilization of R&D result and need for additional research ····· 233
Paragraph 1. Research and future application plan ····· 233
Paragraph 2. Plan for research result practical use ····· 233
Paragraph 3. Need for additional research ····· 235

[REFERENCE] ····· 234
[APPENDIX] ····· 235

목 차

[제 출 문] ····· i
[보고서 요약서] ····· ii
[요 약 문] ····· iii
[SUMMARY] ····· vii
[CONTENTS] ····· xi
[목 차] ····· xii i

1장. 연구개발과제 개요 ····· 1
1절. 연구개발의 목적 및 필요성 ····· 1
1. 연구개발의 목적 ····· 1
2. 연구개발의 필요성 ····· 2
3. 연구개발의 중요성 ····· 3
4. 연구개발의 정의, 범위, 특징 ····· 5
2절. 관련분야의 국내외 기술개발 현황 ····· 6
1. 국내기술 및 산업동향 ····· 6
2. 국외기술 및 산업동향 ····· 7
3절. 연구개발결과의 관련분야 위치 ····· 10
1. 연구개발과제의 시기성 ····· 10
2. 연구개발과제의 차별성 ····· 11
3. 타 산업 및 연계협력 가능성 ····· 13

2장. 연구개발 수행내용 및 결과 ····· 14
1절. 연구수행 전략 및 방법론 ····· 14
1. 연구개발 최종목표 ····· 14
2. 연구개발 최종목표의 설정근거 ····· 15
3. 연차별 세부추진계획 및 방법 ····· 16
4. 연구개발 추진전략 ····· 18
2절. 연구수행과정 및 내용 ····· 23
1. 포터블 막장력 측정장치 개발 ····· 23
2. 막장력 헬스모니터링 시스템 구축 ····· 70
3. 막장력 유지관리 기준/지침(안) 작성 ····· 121

3절. 연구수행결과 및 검증 ····· 211
1. 연구수행 내용 및 결과 ····· 211
2. 목표성과 및 성과검증방법 ····· 213

3장. 최종 연구성과 및 적용실적 ····· 216
1절. 개별 연구성과 ····· 216
2절. 개별 연구성과 설명 ····· 216
1. 포터블 막장력 측정장치(장비·장치) ····· 216
2. 막장력 헬스모니터링 시스템 구축(시스템) ····· 218
3. 막장력 유지관리 기준/지침(안)(정책·제도) ····· 220
3절. 주요 연구성과 ····· 222
4절. 기술실시 및 현장적용 사례 ····· 224
5절. 기술개발 성과의 국내외 시장 전망 ····· 226

4장. 연구목표 달성 및 효과 ····· 227
1절. 연구개발 최종목표 달성도 ····· 227
2절. 연구개발성과의 기술적 효과분석 ····· 230
3절. 연구개발성과의 경제적 효과분석 ····· 231
4절. 연구개발성과의 정책적 효과분석 ····· 231

5장. 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성 ····· 233
1절. 연구성과 향후 활용방안 ····· 233
2절. 연구성과 실용화 방안 ····· 233
3절. 추가연구 필요성 ····· 234

[참고문헌] ····· 236
[부 록] ····· 237

제1장 연구개발과제 개요

1절. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

인천월드컵경기장으로 일반에 널리 알려진 막구조물은 본래 압축 또는 휨에 대해서는 저항할 수 없는 막재료를 적절한 인장상태로 유지함으로써 안정화되고 막구조물 전체가 눈이나 바람에 의한 하중에 견딜 수 있게 되는 구조물이다.

막재는 직포로 유리섬유가 사용되는 것이나 수지 코팅재의 역학적 성질로 인해 시공 시 도입장력 하에서 크립이나 응력완화를 일으키므로, 이러한 점탄성 거동 후의 상태를 미리 예측해, 초기 도입 장력을 경험적으로 할증해 설계장력이 확보되도록 시공하는 것이 통상적이다. 구조물의 시공 후, 점탄성 거동이 수렴된 후에 소요의 설계장력이 도입되었는지는 건전한 유지관리의 관점에서도 파악해 두어야 할 중요 사항이지만, 기존의 기술로는 이를 정확히 파악할 효과적인 방법이 없고, 지금껏 현장 경험이 풍부한 기술자나 현장 인부들의 직관이나 경험에 의존할 수밖에 없는 실정이었다.

그러나 이러한 막구조물은 시간 경과에 따른 응력완화로 강풍 시 펄럭이는 현상(플러터링)을 일으키는가 하면, 강우 시에는 막면에 빗물이 고이는 현상(폰딩)이 생길 위험성이 있으므로, 막구조물의 설계, 시공, 유지관리 시에는 이러한 현상의 발생을 미리 검토할 필요가 있다. 게다가, 20년에서 30년의 내구연한을 경과한 막구조물은 응력완화로 인한 막장력의 소실이 일어나므로, 정기적인 막장력의 모니터링은 구조물의 건강상태를 파악하고 구조물을 안전하게 유지관리 할 수 있는 필수요건이 된다.

막은 가볍고 채광이 좋아 에너지 효율이 좋고, 지진의 영향을 거의 받지 않아 공공성이 높은 대규모 구조물의 지붕으로 많이 사용되는, 대공간을 실현하기 위한 장래성이 풍부한 귀중한 구조형식이다. 이들 막구조물은 초기투자비로 볼 때 같은 규모의 스페이스 프레임보다 약 40% 저렴한 공사비로 실현할 수 있는 공간 구조이지만, 태풍이나 적설로 인한 파손이나 붕괴 사고가 일어나면 저비용 구조형식으로서 가지는 장점은 사라져 버릴 뿐 아니라, 막구조물에 대한 국민 인식 또한 나빠져 버리므로 붕괴나 파손을 막을 수 있는 유지관리가 더욱 중요해 진다.

막구조물의 막장력을 정확하고 안정적으로 측정할 수 있고 휴대가 가능한 장치와 막장력을 실시간으로 모니터링할 수 있는 시스템은 준공 중인 막구조물뿐 아니라, 기존 막구조물의 장기적 이용을 실현하기 위해 필수 불가결 항목인 유지관리 도구 및 시스템이 된다. 따라서 국내외에 건설되어온 사회적 자산으로서의 막구조물의 설계, 시공, 유지관리 시 성능 확보와 그로 인한 막구조물의 장수명화를 위해 꼭 필요한 기술로, 막구조물의 설계와 시공 분야에 크게 기여할 수 있는 기술력이 되리라 확신한다.

2. 연구개발의 필요성

가. 국내 막구조 시장의 성장

우리나라에서는 인천월드컵경기장으로 일반에 널리 알려진 막구조물은 본래 압축 또는 휨에 대해서는 저항할 수 없는 막재료를 적절한 인장상태로 유지함으로써 안정화되고 막구조물 전체가 눈이나 바람에 의한 하중에 견딜 수 있게 되는 구조물로써, 기본적으로 그림 1에 보이는 장력막, 골조막, 공기막의 세 가지 구조형식을 취한다.

항구 구조물로 우리나라에서 인정받고 있는 막구조물에는 주로 유리섬유로 짜인 직포에 테프론 수지로 코팅된 A종으로 분류되는 PTFE 막재료와, 코팅 수지 재료로 염화비닐을 이용한 B종 막재료가 이용된다. 그림 1-1-2-1의 (d)에 보인 ETFE막은 투광성과 디자인성이 우수한 신재료로 최근 그 수요가 증가하고 있는 새로운 막구조이다. 국내에서도 서울 신청사에 사용되는 등 시장 전망이 밝은 재료이다. ETFE막을 비롯해 국내외 막구조 시장은 막재가 가지는 채광성과 경량성의 특성뿐 아니라, 설계 및 시공기술의 개발로 매년 큰 폭으로 상승하고 있다.



(a) 장력막　　(b) 골조막　　(c) 공기막　　(d) ETFE막

그림 1-1-2-1. 막구조물

나. 시공 시 막장력 도입의 불확실성

애초에 막재료는 적절한 장력 도입으로 외부 하중에 견딜 수 있는 건설용 부재로 이용할 수 있게 된다. 그러나 직포로 유리섬유가 사용되는 것이나 수지 코팅재의 역학적 성질로 인해 시공 시 도입장력 하에서 크립이나 응력완화를 일으키므로, 이러한 점탄성 거동 후의 상태를 미리 예측해, 초기 도입 장력을 경험적으로 할증해 설계장력이 확보되도록 시공하는 것이 통상적인 예다.

다. 막장력 유지 및 관리의 원시성

막구조물의 시공 후, 점탄성 거동이 수렴된 후에 소요의 설계장력이 도입되었는지는 건전한 유지관리의 관점에서도 파악해 두어야 할 중요 사항이다. 하지만, 기존의 기술로는 이를 정확히 파악할 효과적인 방법이 없고, 지금껏 현장 경험이 풍부한 기술자나 현장 인부들의 직관이나 경험에 의존할 수밖에 없는 실정이었다.

라. 막구조물의 파손 사고

막구조물은 시간 경과에 따른 응력 완화로 강풍 시 펄럭이는 현상(플러터링)을 일으키는가 하면, 강우 시에는 막면에 빗물이 고이는 현상(폰딩)이 생길 위험성이 있으므로, 막구조물의 설계, 시공, 유지관리 시에는 이러한 현상의 발생을 미리 고려할 필요가 있다.



그림 1-1-2-1. 인천월드컵경기장



그림 1-1-2-2. 매트로 돔

플러터링으로 인한 막구조물의 사고 사례는 1990년대부터 전 세계에서 다수 보고되고 있다. 표 1-1에 나타내는 바와 같이, 우리나라에서도 2002년 태풍 펑셴과 루사로 제주월드컵경기장의 지붕막 6개 패널이 파손되었고, 그림 1-1-2-1에 보이듯이 2010년에는 태풍 콘파스로 인해 인천월드컵경기장의 지붕 막 7개의 패널이 파괴 또는 손상되었는데, 복구비용만 51억 원이 소요된 큰 파손 사고로 플러터링 현상이 하나의 원인으로 거론된다.

폰딩에 기인한 막구조물의 사용 장애도 규모의 대소가 있지만 예상외로 많은 것이 현실이다. 이러한 사고는 막장력의 정상적인 유지관리가 이루어져 있었더라면 충분히 예방 가능했을 것으로 생각된다. 또, 최근 적설에 의해 지붕막 파손 사고가 있었던 그림 1-1-2-2의 메트로돔처럼 막내부의 기압에 의해 그 형상을 유지하는 형식인 공기막 구조의 경우, 기상정보에 따라 태풍 등의 강풍이 예상될 때에는 미리 실내나 이중 막 속의 기압을 상승시켜 막면에 도입되는 장력을 평상시보다 높게 설정함으로써 플러터링이나 폰딩, 또는 적설에 의한 장해를 회피할 수 있도록 대책을 세우는 것이 일반적이다. 이러한 경우에도 통상 이루어지는 공기압의 관리뿐 아니라, 위험 부위의 막장력을 파악하는 기술이 있으면 이것을 유효하게 이용함으로써 위험을 회피할 수 있게 될 것이다. 게다가, 20년에서 30년의 내구연한을 경과한 막구조물은 응력완화로 인한 막장력의 소실(이완)이 일어나므로, 막장력을 정기적으로 모니터링함으로써 구조물의 건강상태가 파악 가능해지고 구조물의 적절한 유지관리로 이어질 수 있다.

표 1-1. 주요 막구조물의 파손사고 예

구조물 명칭	사고년도	사고원인	피해내용
제주월드컵경기장	2002년	태풍으로 인한 플러터링	지붕막 6면 완파
인천월드컵경기장	2010년	태풍, 집중호우	지붕막 6면 완파 및 1면 교체
올림픽 체조경기장	2001년	폭설로 인한 폰딩	지붕막 찢김, 내부 적설
메트로돔	2010년	폭설로 인한 폰딩	지붕막 찢김, 내부 적설

3. 연구개발의 중요성

가. 막구조물의 유지관리 필요성

막은 가볍고 채광이 좋아 에너지 효율이 좋고, 지진의 영향을 거의 받지 않아 공공성이 높은 대규모 구조물의 지붕으로 많이 사용되는, 대공간을 실현하기 위한 장래성이 풍부한 귀중한 구조형식이다. 이미 언급한대로, 한국에서는 2002년에 태풍으로 제주월드컵경기장의 지붕막 6면이 파손되었을 뿐 아니라, 2010년에도 태풍 콘파스로 인천월드컵경기장의 지붕막 7면이 손실되는 피해를 입었다. 또, 국외에서는 2010년 말에 미국 미네소타 주 미네아폴리스 시에 있는 공기막구조의 다목적 스타디움인 메트로돔의 지붕막 일부가 과도한 적설로 인해 파손되는 사고가 있었다.

이들 막구조물은 초기투자비로 볼 때 같은 규모의 스페이스 프레임 보다 약 40% 저렴한 공사비로 실현할 수 있는 공간 구조이지만, 태풍이나 적설로 인한 파손이나 붕괴 사고가 일어나면 저비용 구조형식으로서 가지는 장점은 사라져 버릴 뿐 아니라, 막구조물에 대한 국민 인식 또한 나빠져 버리므로 붕괴나 파손을 막을 수 있는 유지관리가 더욱 중요해 진다.

나. 유지관리 시스템 개발로 막구조물의 장수명화

막구조물의 막장력을 정확하고 안정적으로 측정할 수 있는 장치와 막장력을 실시간으로 모니터링할 수 있는 시스템은, 준공 중인 구조물 뿐 아니라, 기존 막구조물의 장기적 이용을 실현하기 위해 필수 불가결 항목인 유지관리 도구 및 시스템이 된다. 따라서 국내외에 건설되어온 사회적 자산으로서의 막구조물의 설계, 시공, 유지관리 시 성능확보와 그로 인한 막구조물의 장수명화를 위해 꼭 필요한 기술이다.

다. 국제화와 세계시장 경쟁력 확보

막장력을 정확하고 안정적으로 측정할 수 있는 장치는 전 세계적으로 공인되거나 상용화된 기술이 없어, 장력측정을 필요로 하는 막구조 시공회사나 유지관리업체는 자제 제작한 장치를 이론적 실험적 검증을 거치지 않고 사용하고 있는 실정이다. 그런 이유로 이들 회사가 유지관리를 위해 막의 장력을 측정하고도 데이터를 보고서나 논문으로 공개하기를 꺼려해 기존 막구조물의 초기장력 데이터나 시공 후 이완된 데이터 등의 정보가 턱없이 부족하다. 게다가, 막장력을 실시간으로 직접 모니터링할 수 있는 시스템은 아직 전 세계적으로 사용된 적이 없는 최초의 기술로, 음파를 이용한 막장력 측정기술로만 실현 가능한 원천 기술이다.

이 기술이 완성되면 국제적 막구조물의 유지관리 분야를 대한민국이 이끌어 갈 수 있는 교두보를 확보할 뿐 아니라, 세계시장에서 외국 유수의 막구조 설계, 시공회사를 상대로 경쟁력 우위를 확보할 수 있어 막구조물의 설계와 시공을 수주하는데 큰 역할을 할 수 있는 기술력이 되리라 확신한다.

4. 연구개발의 정의, 범위, 특징

가. 포터블 막장력 측정장치 완성

막면에 장방형의 경계를 만들고 화이트노이즈 음파를 방사해 얻어지는 막면의 변위 응답을 스펙트럼 해석을 통해 공진진동수를 특정짓는 공진진동수 탐색법과, 얻어진 공진진동수에 기초한 두 축 방향의 막장력 추출법, 막의 진동에 영향을 미치는 공기의 부가질량 효과의 이론적 평가법 등, 요소 기술에 관해서는 연구기반이 완성된 상태이다. 음파를 이용한 막장력 측정장치는 레이저 변위계와 스피커, 아크릴 박스로 구성되어 막장력을 측정하는 직접적 장치 이외에, 부속 장치인 음원 작성 및 증폭 장치와 데이터 해석 및 저장장치를 필요로 한다. 이 연구에서는 이들 모든 장치를 통합해 올인원 형식의 소형화되고 경량인 장치로 완성하고자 한다. 한편, 소형, 경량화 과정에서 발생할 수 있는 측정 오차는 실험을 통한 검증으로 해결하고, 장력 표시부의 전자회로 설계와 전원설계를 병행해 현장에서 쉽고 폭넓게 사용가능한 장치를 완성한다.

나. 막장력 헬스모니터링 시스템 구축

소형, 경량으로 휴대가 가능한 올인원 형식의 측정장치를 실재 막구조물에 장착함으로써 막장력 헬스모니터링을 위한 도구는 갖추어진다. 다만 여기에, 휴대를 위한 각종 장치와 편의기구를 배제시켜 중량을 줄이는 한편, 지상의 중앙 관제 센터에서 원격으로 리모트 컨트롤할 수 있는 시스템 개발이 병행되어야 한다. 이는 기존 케이블 구조물이나 교량, 초고층 구조물의 건전성 모니터링시스템에 적용돼 온 만큼 현재의 기술로 완성할 수 있는 단순 요소기술이다. 또, 자동으로 통재하고 모니터링할 수 있는 소프트웨어와 막구조물에 막장력 측정장치를 안정적으로 구동시킬 수 있는 자세 안정장치 기술 개발을 통해 막장력 헬스모니터링 시스템 및 이를 실현할 수 있는 장비가 구축 가능하다. 이 시스템은 현장적용에 앞서 실험실에서 모형 막구조물을 설치하고, Mock-Up을 통해 시스템의 구동 상태를 면밀히 검토한 후 실재하는 막구조물에 적용한다.

다. 막장력 유지관리 기준 및 지침(안) 작성

현재 우리나라는 준공된 막구조물의 장력을 높은 정확도로 정량적으로 측정할 수 있는 과학적 도구의 부재로, 유지 관리를 위한 과학적 기준 및 지침이 없는 상태이다. 시공회사나 감리 업체, 유지관리 회사는 경험적 측정수법으로 막장력을 측정하고도 정확도나 안정성에 대한 불안으로 데이터 공개를 꺼려해 막구조 성능과 안전을 위한 토론의 장으로 이끌지 못하고 있는 것이 현 실정이다. 이 연구 결과물로 얻어지는 포터블 막장력 측정장치와 모니터링시스템은 막장력의 과학적 측정과 데이터 축적으로 토론의 장을 형성시킬 수 있고, 막장력 유지 관리에 관한 기준 및 지침을 과학적 자료를 토대로 작성할 수 있으므로, 막구조물의 성능확보는 물론, 구조물의 안전성도 확보할 수 있도록 한다.

2절. 관련분야의 국내외 기술개발 현황

1. 국내기술 및 산업동향

가. 국내기술 현황

막장력을 높은 정확도를 유지하고, 측정장치로서 필수 요소인 안정성을 가지며 현장에서 손쉽게 이용 가능한 공개된 국내 기술은 아직 없다. 그러나 막구조 설계 및 시공 회사는 시공 중 또는 일정 시간이 경과한 후에 반드시 막장력을 확인해야 하므로, 자체 개발한 검증되지 않은 장비를 사용해 대략적인 파악에 그치는 경우가 대부분이고, 숙련된 현장 기술자가 손으로 만져 막의 팽팽함 정도를 경험이나 감에 의해 판단해 왔던 것이 현실이다.

한국공간구조학회에서 편찬한 막구조 설계기준 및 해설[1]에는 막의 인장 검사나 막장력의 유지관리에 관하여, “시공 후에 막의 인장 값이 설계치를 만족하는지 검사해야한다” 고 명시하고 있는데, 해설 부분에서는 “지금까지 막의 인장을 정확하게 측정하는 기계는 국·내외적으로 없고, 이 기준에서는 강제하지 않지만 경험에 의한 판단이 필요하다” 고 적시하고 있다.

이 해설 및 기준에서 나타내고 있듯이, 현재 막장력에 관한 전문가는 국내외를 통 털어 주관총괄책임자가 유일할 뿐 아니라, 높은 정확도와 안정성을 확보하고 현장에서 손쉽게 사용할 수 있는 포터블 막장력 측정장치와 막장력 헬스모니터링 시스템은 국내는 물론이거니와 전 세계적으로 그 유래를 찾을 수 없는 획기적인 아이템이다. 따라서 우리나라가 원천 기술을 확보함으로써 막구조물의 유지관리 분야를 선점할 수 있을 뿐 아니라, 국내 막구조 회사가 해외로 진출 할 수 있는 교두보를 마련할 수 있다.

나. 국내 산업동향

우리나라에서는 인천월드컵경기장으로 일반에 널리 알려진 막구조물은 본래 압축 또는 휨에 대해서는 저항할 수 없는 막재료를 적절한 인장상태로 유지함으로써 안정화되고 막구조물 전체가 눈이나 바람에 의한 하중에 견딜 수 있게 되는 구조물이다. 항구 구조물로 우리나라에서 인정받고 있는 막구조물에는 주로 유리섬유로 짜인 직포에 테프론 수지로 코팅된 A종으로 분류되는 PTFE 막재료와, 코팅 수지 재료로 염화비닐을 이용한 B종 막재료가 이용된다.

국내외의 막구조물의 최근 동향은 대형 스타디움의 경우에는 여전히 A종 막재가 주로 사용되고, 그림 1-2-1-1에 보이는 국내 최초의 돔구장으로 완공된 고척스카이돔에도 적용되었다. 또, 투광성과 디자인성이 우수한 신재료로 최근 세계적으로 그 수요가 증가하고 있는 ETFE막은, 국내에서도 서울 신청사와 대구 물문화관(그림 1-2-1-2, 3)에 사용되는 등 시장이 성장해 나가는 과정에 있다. 건축외의 산업분야에서는 특히 해외에서 제철소의 저탄장(그림 1-2-1-4)이나, 쓰레기 매립장등의 대형 산업시설의 덮개로 사용되는 사례가 늘고 있다. 새 재료인 ETFE막을 비롯해 국내외 막구조 시장은 막재가 가지는 채광성과 경량성의 특성뿐 아니라, 설계 및 시공기술의 개발로 여전히 매년 큰 폭으로 상승하고 있다.

---

1) 막구조 설계기준 및 해설, 한국공간구조학회, 기문당, 2010



그림 1-2-1-1. 고척스카이돔



그림 1-2-1-2. 대구물문화관



그림 1-2-1-3. 서울시 신청사



그림 1-2-1-4. 인도네시아 포스코 저탄장

2. 국외기술 및 산업동향

가. 국외기술 현황

막장력 측정에 관한 기존의 기술에 대해 미국, 일본 및 한국의 특허청 데이터베이스와 문헌에 근거해 제안 기술과의 유사성에 대해서 조사했다. 그 결과, 약 20건의 관련 기술이 특허 신청 및 등록되어 있음이 밝혀졌다. 이들 기존 기술은 막의 반력 계측에 의한 것과 막의 진동을 검출해 막의 장력을 추정하는 방법으로 크게 나누어진다. 요약하면 표 1-2로 간략하게 나타낼 수 있다.

(1) 막의 반력을 이용하는 방법

그림 1-2-2-1에 보이는 측정장치는 막의 반력을 이용하는 대표적인 방법이다. 기본적 측정원리는, 막면에 소정의 길이를 가지는 물체로 가압하고, 이로 인해 막면으로부터 가압 물체를 통해 지지 봉에 전달되는 반력을 로드셀로 검출한다. 이때 검출된 신호와, 도입 장력을

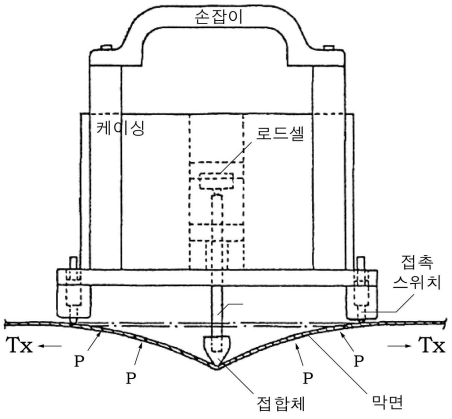


그림 1-2-2-1. 막의 반력을 이용한 장치

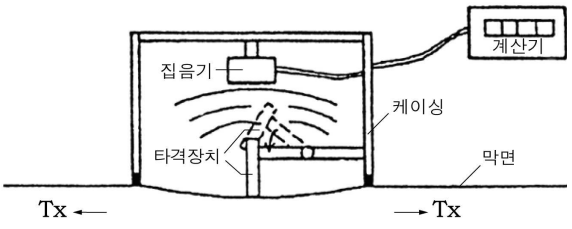


그림 1-2-2-2. 막의 진동을 이용한 장치

알고 있는 막면을 눌러 얻은 변위량 샘플을 미리 정보화한 것과 비교해 막면의 장력을 검출하는 측정장치이다.

표 1-2. 주요 막장력 측정장치

측정방식	기술 보유사	측정원리	특징
막의 반력을 이용한 장치	Taiyo Kogyo Corp.(일본)	막면을 가압물체로 눌러 물체를 통해 전달되는 반력을 로드셀로 검출	·막재마다 변위량 샘플 확보 필수 ·측정자에 의한 영향 매우 큼
막의 진동을 이용한 장치	Kajima Corp.(일본)	막면을 타격해 그로부터 발생하는 음을 측정, 분석	·막재마다 발생음 샘플 확보 필수 ·직접타격 시 고유진동수 추출 난해
음파를 이용한 장치	Nagoya Univ.(진상욱)	음파로 막면을 진동시키고 레이저 변위계로 비접촉 계측	·모든 막재에 간편 적용 ·정확성, 안정성, 휴대성 매우 우수

(2) 막의 진동을 이용하는 방법

그림 1-2-2-2는 막의 진동을 이용하는 방법으로, 구획된 막면을 타격해 막면에 진동을 일으켜 발생하는 소리를 계측하고, 이미 알고 있는 장력 샘플의 발생 음원 데이터와 비교함으로써 막장력을 추정하는 방법이다. 이외에도 막면을 망치 등의 도구로 두들겨 자유진동 시킨 후, 막의 고유진동수를 측정해 스펙트럼 해석으로 특정해 냄으로써 막장력을 추정하는 방법이나, 막면을 부압으로 빨아 당겨 그 변위량을 계측함으로써 막장력을 추정하는 방법 등이 있는데, 모두 특허 공보에 공개되어 있는 것들이다.

(3) 기존 막장력 측정장치의 한계성

그림 1-2-2-1의 누름방식에서는 막장력이 접합체 부분의 크기에 크게 의존해 불안정하게 변화하는 것과, 측정하는 사람의 누르는 힘에 의한 영향이 매우 크다는 것을 쉽게 예측할 수 있다. 또, 그림 1-2-2-2의 충격력으로 막면을 타격하는 방법으로는 안정된 자유진동 데이터를 얻을 수 없음을 실험을 통해 확인했고, 본 연구에 적용한 음파진동의 우수성도 확인했다.

이들 기존의 막장력 측정장치는 현장에서 요구하는 성능이나 사용성 등을 만족시키기에는 부족함이 있다. 더욱이, 대부분의 장치는 시중에 유통되고 있는 각각의 막재료마다 실험을 통한 샘플 데이터를 미리 확보해 놓아야 하는 등, 경험적 측정의 영역을 벗어나지 못하고 있고, 적절한 정확도와 안정성 및 실용성을 확보하지 못하고 있는 실정이다.

나. 국외 산업동향

해외의 막구조 시장은 크게 A종 항구막재인 PTFE와 최근 새로 등장한 신재료인 ETFE를 전문으로 설계 시공하는 업체로 나눠진다. 이 양대 산맥은 도쿄돔을 설계 시공한 일본계 기업인 마크막스(太陽工業)와 에덴프로젝트로 유명한 독일계 기업인 벡터포일텍(Vector foiltec)이 형성하고 있다. 최근은 마크막스도 ETFE의 설계와 시공을 하는 사례가 보이지만, 실적 면에서나 시공된 구조물의 규모에서 벡터포일텍에 주도권을 내주고 있다.

국내외 막구조 시장은 막재가 가지는 채광성과 경량성의 특성뿐 아니라, 설계 및 시공기술의 개발로 매년 큰 폭으로 상승하고 있다. 특히, 지진이 많은 일본은 지진력을 줄이기 위해 지붕 중량을 줄이는데 집중하고 있는데, 피난시설로 이용되는 체육관의 지붕을 막재로 교체하는 작업이 추진되고 있으며, 지진 시 낙하 물에 의한 위험을 방지하기 위해 천장재로 이용되는 텍스를 막재로 교체하는 등의 시험이 진행되고 있는 등, 막구조의 가능성은 날로 증가하고 있다.

그러나 앞서 설명했듯이, 막장력에 관한 전문 기술이 없어 설계장력이 시공 시에 정확히 도입되었는지의 파악이 어려운 상태고, 유지관리 또한 육안으로 확인하거나, 손으로 눌러보는 수지법이 이용되는 실정으로 국내와 크게 다르지 않다. 향후 막구조 시장의 성장과 더불어 정량적인 과학적 데이터에 근거한 구조물의 정성적인 성능평가에 대한 요구는 강화될 것이므로 막장력 측정장치와 헬스모니터링 시스템의 해외 시장 진출은 쉽게 예견할 수 있다.

3절. 연구개발결과의 관련분야 위치

1. 연구개발과제의 시기성

현재 막구조물의 시장 수요가 증가함에 따라 새로 건설되는 막구조물뿐 아니라, 기존 구조물의 안전성 확보가 필요하므로, 막구조물 구성요소 중에서 제일 중요시 되는 막장력 측정을 통한 막구조물의 성능평가를 위해 막장력 헬스모니터링은 필수요소가 된다. 따라서 이 연구를 통해 개발될 포터블 막장력 측정장치와 막장력 헬스모니터링 시스템은 실제 구조물에 바로 적용 가능한 실용화 연구로 진행되므로, 태풍이나 폭우 등의 비교적 발생 빈도가 높은 자연재해에 대해 막구조물의 안정성 확보가 가능해 질 뿐 아니라, 해외 시장에서도 막구조물의 유지관리 분야에 경쟁력을 갖춘 국산 기술력 확보가 가능하다.

막구조물은 시간 경과에 따른 응력완화로 강풍 시 펄럭이는 현상(플러터링)을 일으키는가 하면, 강우 시에는 막면에 빗물이 고이는 현상(폰딩)이 생길 위험성이 있으므로, 막구조물의 설계, 시공, 유지관리 시에는 이러한 현상의 발생을 미리 고려할 필요가 있다.

플러터링으로 인한 막구조물의 사고 사례는 1990년대부터 전 세계에서 다수 보고되고 있다. 우리나라에서도 2002년 태풍 펑셴과 루사로 제주월드컵경기장의 지붕막 6개 패널이 파손되었고, 그림 1-1-2-1에 보이듯이 2010년에는 태풍 콘파스로 인해 인천월드컵경기장의 지붕막 7개의 패널이 파괴 또는 손상되었는데, 복구비용만 51억 원이 소요된 큰 파손 사고로 플러터링 현상이 하나의 원인으로 거론된다.

폰딩에 기인한 막구조물의 사용 장애도 규모의 대소가 있지만 예상외로 많은 것이 현실이다. 이러한 사고는 막장력의 정상적인 유지관리가 이루어져 있었더라면 충분히 예방 가능하다. 최근 적설에 의해 지붕막 파손 사고가 있었던 메트로돔처럼 막내부의 기압에 의해 그 형상을 유지하는 형식인 공기막 구조의 경우, 기상정보에 따라 태풍 등의 강풍이 예상될 때에는 미리 실내나 이중 막 속의 기압을 상승시켜 막면에 도입되는 장력을 평상시보다 높게 설정함으로써 플러터링이나 폰딩, 또는 적설에 의한 장해를 회피할 수 있도록 대책을 세우는 것이 일반적이다. 이러한 경우에도 통상 이루어지는 공기압의 관리뿐 아니라, 위험 부위의 막장력을 파악하는 기술이 있다면 이것을 유효하게 이용함으로써 위험을 회피할 수 있다.

게다가, 20년에서 30년의 내구연한을 경과한 막구조물은 응력완화로 인한 막장력의 소실이 일어나므로, 막장력을 정기적으로 모니터링함으로써 구조물의 건강상태가 파악 가능해지고 구조물의 적절한 유지관리로 이어질 수 있으나, 이 기술은 전 세계적으로 전무한 상태이다.

막구조 설계 및 유지관리와 관련하여 국내의 현재 관계 법령은 한국공간구조학회에서 발행한 막구조 설계 기준 및 해설1)에서 막구조의 설계 기준을 제시하고 있으며 막장력 측정 및 유지관리에 대한 내용은 특별히 마련되어 있지 않다. 2002년 월드컵을 기점으로 막구조를 적용한 여러 개의 경기장이 건설되었으나 태풍 등의 영향으로 막이 파손되는 경험을 하였고, 최근 강력한 태풍이 국내에 빈도 높게 상륙함에 따라 막구조물의 안전에 관한 사회적인 관심이 증대되었다. 따라서 막장력을 포함한 막구조물 유지관리 분야의 관계 법령이 머지않아 제정될 것이라 판단된다.

전술한 바와 같이 막장력에 관한 전문 기술은 전 세계적으로 전무한 상태로, 설계장력이

시공 시에 정확히 도입되었는지의 파악이 어려운 상태이다. 또 막장력의 유지관리도 육안으로 확인하거나, 손으로 눌러보는 수지법이 이용되는 실정으로 국내외 상황이 크게 다르지 않다. 향후 막구조 시장의 성장과 더불어 정량적인 과학적 데이터에 근거한 구조물의 정성적인 성능평가에 대한 요구는 강화될 것이므로 막장력 측정장치와 헬스모니터링 시스템은 전 세계의 막구조물이 필요로 하는 요소 기술이 될 것으로 판단된다.

2. 연구개발과제의 차별성

가. 포터블 막장력 측정장치 개발

막구조물은 본래 압축 또는 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 장력을 소실하는 응력완화가 일어난다. 설계 시 이를 고려하지만 지속적인 관리가 없을 경우, 플러터링이나 폰딩 등 막을 파단에 이르게 할 수 있다. 그러므로 준공 후 막구조물에 생기는 장력의 크기를 정확히 파악하는 것은 유지관리의 관점에서도 매우 중요하다. 현장에서는 이를 가능케 하는 기술에 큰 기대를 걸고 있다.

음파를 이용한 막장력 측정 원리는 그림 1-3-2-2와 같이 직사각형 경계로 구획된 막면에 그림 1-3-2-1과 같이 그 상부에서 가청역의 음파를 쬐어 막면을 진동시키고, 그로 인해 선택적으로 공진하는 막면의 고유진동수를 측정함으로써 장력을 추출하는 것이다. 지금까지 막장력을 2축 방향에 자유로이 도입할 수 있는 2축 인장 장치를 이용해 막에 기지의 2축 장력을 도입하여 장치 개발을 지속해 왔다. 경계 박스의 크기, 막면 접촉 부분의 면적, 박스 상부의 개구부 유무, 화이트노이즈 음원의 채용 등, 검토는 다양하게 이루어졌다. 그 결과, 1) 음파 진동을 이용해 막의 고유진동수 측정이 가능하다는 것2,[2)], 2) 박스는 개방형으로 상부 개구부가 필요할 것[3,4)], 3) 공기에 의한 부가질량 효과의 고려가 필수적일 것[4)], 4) 화이트 노이즈 음원이 유효하다는 것[5-7)], 5) 막재료의 상이에 대한 고려는 단순히 막의 밀도를 변화시키는 것으로 충분한 정확도로 계측 가능하다는 것[7,8)], 6) 박스 경계의 크기는 20cm×30cm이 적절하다는 것[9)], 7) 계측 오차는 약 10% 이내[10,11)], 등이 밝혀져 있다.

시험 제작한 측정장치는 막면을 구획 짓는 경계박스와 구획된 막면에 화이트노이즈 음파를 쐬어 막면을 진동시키는 스피커, 그로 인해 고유진동수를 갖고 진동하는 막면의 진폭을 측정하는 레이저 변위계로 구성되었다. 부속 장치로, 화이트 노이즈 음원을 만들어 내는 컴퓨터와 음원을 증폭시켜 스피커로 전송하는 앰프로 이루어진 음원파트와, 레이저 변위계로부터 막의 진폭 데이터를 공급받아 스펙트럼 분석 및 해석하는 데이터 리코더로 구성되어 있다. 더욱이, 현재 이들 모든 장치는 가정용 전압으로 구동되므로 현장에서 사용하기 위해서는 긴 전선으로 측정장치와 음원 및 해석장치를 연결시켜야 하며, 해석에 있어서는 일정 부분 기술자의 수동 개입 등, 불편을 감수해야 했다.

막장력 측정 시 캐노피나 창고, 체육관 등 비교적 낮은 높이의 구조물은 문제가 없다 하더라도, 대형경기장을 비롯해 현장 접근이 쉽지 않거나, 현장 관리자 등이 손쉽게 이용할 수 있는 장치가 되기 위해서는 측정장치와 구성장치가 하나로 통합된 올인원 형식의 장치로 완

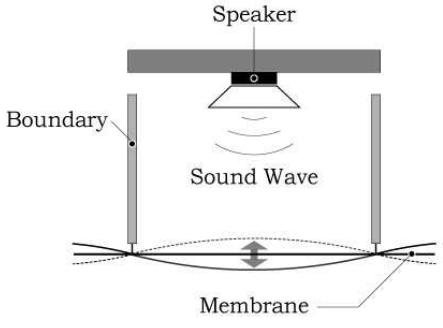


그림 1-3-2-1. 음파를 이용한 막장력 측정 개념도

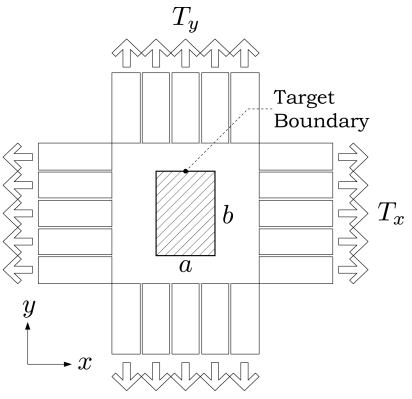


그림 1-3-2-2. 막재의 경계

성되어야 하고, 측정값을 현장에서 바로 확인할 수 있는 인터페이스 환경도 구축되어야 함은 자명한 사실이다. 앞서 기술한 대로 이 연구는 요소별 연구가 완성된 상태로, 소형, 경량화 설계로 요소기술을 통합함으로써 첫 번째 목표를 완성한다.

나. 막장력 헬스모니터링 시스템 구축

소형, 경량으로 휴대가 가능한 올인원 형식의 측정장치를 완성함으로써 막장력 헬스모니터링을 위한 기초 도구가 갖추어진다. 다만 여기에, 휴대를 위한 각종 장치와 편의기구를 배제시켜 중량을 줄이는 한편, 지상의 중앙 관제센터에서 원격으로 리모트 컨트롤할 수 있는 장치와 막의 진폭데이터를 무선으로 송수신하는 장치를 탑재한다. 이것은 현재의 타 산업 기술로 완성할 수 있는 단순 기술 요소이다. 또, 자동으로 통재하고 모니터링할 수 있는 소프트웨어와 막구조물의 복수 장소에 상치 설치할 수 있는 상시설치 시스템 개발을 통해 막장력 헬스모니터링 시스템 및 이를 실현할 수 있는 장비를 구축한다.

다. 막장력 유지관리 기준/지침(안) 작성

현재 우리나라는 준공된 막구조물의 장력을 높은 정확도로 정량적으로 측정할 수 있는 과학적 도구의 부재로, 유지관리를 위한 과학적 기준 및 지침이 없는 상태이다. 시공회사나 감리 업체, 유지관리 회사는 경험적 측정수법으로 막장력을 측정하고도 정확도나 안정성에 대한 불안으로 데이터 공개를 꺼려해 막구조 성능과 안전을 위한 토론의 장으로 이끌지 못하고 있는 것이 현 실정이다. 이 연구 결과물로 얻어지는 측정장치와 모니터링시스템은 막장력의 과학적 측정과 데이터 축적으로 토론의 장을 형성시킬 수 있고, 막장력 유지관리에 관한 기준 및 지침을 과학적 자료를 토대로 작성할 수 있으므로, 막구조물의 성능확보는 물론, 구조물의 안전성도 확보한다.

3. 타 산업 및 연계협력 가능성

막장력 측정기술에서 음파를 이용해 그 진동 변위를 계측해 고유진동수를 특정짓는 요소기술과 그 기술을 도입한 헬스모니터링 시스템은 막구조뿐 아니라, 현수·사장 교량이나 대형 및 초고층 구조물의 고유진동수 측정에도 이용가능하다. 이 기술을 바탕으로 국내 막구조 업체가 해외의 막구조 설계, 시공업체와 연계, 협력해 입찰에 참가할 수 있다. 원천 기술을 확보할 수 있으므로, 설계, 시공에 독자적인 유지관리 기술을 보탬으로써 해외시장에서 경쟁력 우위를 점할 수 있다.

제2장 연구개발 수행내용 및 결과

1절. 연구수행 전략 및 방법론

1. 연구개발 최종목표

가. 소형, 경량화된 포터블 막장력 측정장치 개발

막면에 장방형의 경계를 만들고 화이트노이즈 음파를 방사해 얻어지는 막면의 변위 응답을 스펙트럼 해석을 통해 공진진동수를 특정짓는 공진진동수 탐색법과, 얻어진 공진진동수에 기초한 두 축 방향의 막장력 추출법, 막의 진동에 영향을 미치는 공기의 부가질량 효과의 이론적 평가법 등, 요소 기술에 관해서는 이미 연구기반이 완성된 상태이다. 지금까지 실재하는 막구조를 대상으로 막장력 측정 실험도 이미 수차례 경험했고, 실재 구조물 상대로도 목표한 정확도로 막장력을 막재 섬유 두 축 방향 따로따로 측정할 수 있다는 것을 확인한바 있다. 이 연구에서는 레이저 변위계와 스피커, 아크릴 박스로 구성되어 막장력을 측정하는 직접적 장치 이외에, 부속 장치인 음원 작성 및 증폭 장치와 데이터 해석 및 저장장치를 필요로 한다. 이들 모든 장치를 통합해 올인원 형식의 소형 경량 장치로 완성하고자 한다. 한편, 소형, 경량화 과정에서 발생할 수 있는 측정 오차는 실험을 통한 검증으로 해결하고, 장력 표시부의 전자회로 설계와 전원설계를 병행해 현장에서 쉽고 폭넓게 사용가능한 장치를 완성하는 것이 궁극적인 목표이다.

나. 막장력 헬스모니터링 시스템 구축

소형, 경량화 막장력 측정장치의 개발과정에서 장치를 원거리에서 리모트 컨트롤할 수 있는 시스템과, 음파로 인한 막의 진동 데이터를 실시간으로 전송할 수 있는 무선 송수신 시스템을 탑재해 모니터링 도구를 완성한다. 한편, 완성된 도구를 막구조물에 정착시킬 수 있는 기술개발을 비롯해, 중앙 관리 시스템 상에서 이 데이터들을 해석하고 기록할 수 있는 소프트웨어를 개발함으로써 막구조물에 도입되어 있는 장력을 리얼타임으로 모니터링할 수 있는 시스템을 완성한다. 측정자가 휴대할 수 있는 막장력 측정장치와 상시 설치의 막장력 헬스모니터링 시스템으로 기존 막구조물을 대상으로 막장력을 직접 측정 또는 모니터링함으로써 대상 구조물의 장력 측정 데이터가 축적되어 설계장력의 도입 상태가 확인되면, 막구조물의 성능은 물론 구조물의 안전이 파악 가능해 진다. 이를 근거로 막구조물의 설계 및 시공, 유지관리에 이르기까지 막장력 도입과 유지관리에 관한 기준 및 지침을 작성한다.

다. 막장력 유지관리 기준 및 지침(안) 작성

현재 우리나라는 준공된 막구조물의 장력을 높은 정확도로 정량적으로 측정할 수 있는 과학적 도구의 부재로, 유지관리를 위한 과학적 기준 및 지침이 없는 상태이다. 시공회사나 감리 업체, 유지관리 회사는 경험적 측정수법으로 막장력을 측정하고도 정확도나 안정성에 대한 불안으로 데이터 공개를 꺼려해 막구조 성능과 안전을 위한 토론의 장으로 이끌지 못하

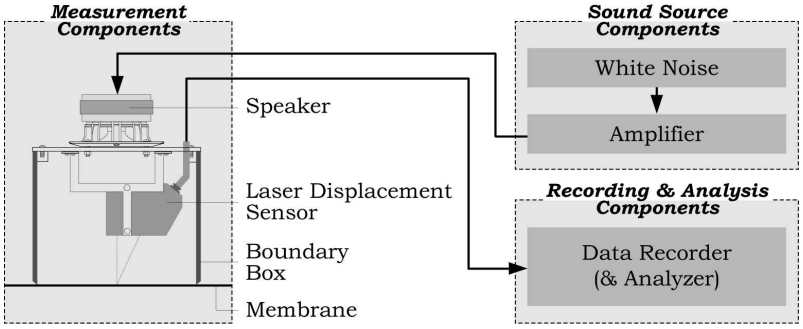


그림 2-1-1-1. 막장력 측정장치 구성도

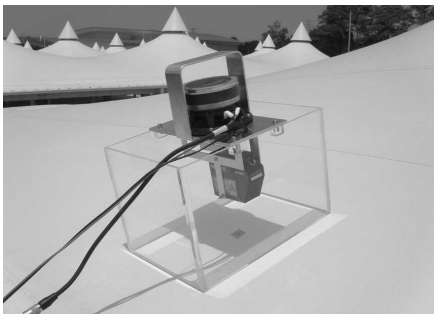


그림 2-1-1-2. 막장력 측정기

고 있는 것이 현 실정이다. 이 연구 결과물로 얻어지는 포터블 막장력 측정장치와 모니터링 시스템은 막장력의 과학적 측정과 데이터 축적으로 토론의 장을 형성시킬 수 있고, 막장력 유지관리에 관한 기준 및 지침을 과학적 자료를 토대로 작성할 수 있으므로, 막구조물의 성능확보는 물론, 구조물의 안전성도 확보할 수 있도록 한다.

2. 연구개발 최종목표의 설정근거

가. 소형, 경량화된 포터블 막장력 측정장치 개발

막구조물의 막장력 측정장치 개발을 위한 이 연구는 현재, 측정기술의 이론적, 실험적 검증을 거쳐, 실재하는 막구조물의 현장 측정으로 현장 적용 가능성 및 확장성을 확인한 상태이다. 그러나 그림 2-1-1-1과 2-1-1-2에 보이는 바와 같이 막장력 측정을 위한 전체 장치는 세 부분으로 나뉘어 구성되어 있다.

그 첫 번째는 막면을 구획 짓는 경계박스와 구획된 막면에 화이트노이즈 음파를 쐬어 막면을 진동시키는 스피커, 그로 인해 고유진동수를 갖고 진동하는 막면의 진폭을 측정하는 레이저 변위계로 구성된 측정장치이다. 부속 장치로, 화이트 노이즈 음원을 만들어 내는 컴퓨터와 음원을 증폭시켜 스피커로 전송하는 앰프로 이루어진 음원파트와, 레이저 변위계로부터 막의 진폭 데이터를 공급받아 스펙트럼 분석 및 해석하는 데이터 리코더로 구성되어 있다. 더욱이, 현재 이들 모든 장치는 가정용 전압으로 구동되므로 현장에서 사용하기 위해서는 긴 전선으로 측정장치와 음원 및 해석장치를 연결시켜야 하며, 해석에 있어서는 일정 부분 기술자의 수동 개입 등, 불편을 감수해야 했다.

막장력 측정 시 캐노피나 창고, 체육관 등 비교적 낮은 높이의 구조물은 문제가 없다 하더라도, 스타디움을 비롯해 현장 접근이 쉽지 않거나, 현장 관리자 등이 손쉽게 이용할 수 있는 장치가 되기 위해서는 측정장치와 구성장치가 하나로 통합된 올인원 형식의 장치로 완성되어야 하고, 측정값을 현장에서 바로 확인할 수 있는 인터페이스 환경도 구축되어야 함은 자명한 사실이다. 앞서 기술한 대로 이 연구는 요소별 연구가 완성된 상태로, 소형, 경량화 설계로 요소기술을 통합함으로써 첫 번째 목표를 완성할 수 있다.

나. 막장력 헬스모니터링 시스템 구축

소형, 경량으로 휴대가 가능한 올인원 형식의 측정장치를 완성함으로써 막장력 헬스모니터링을 위한 도구는 갖추어진다. 다만 여기에, 휴대를 위한 각종 장치와 편의기구를 배제시켜 중량을 줄이는 한편, 지상의 중앙 관제 센터에서 원격으로 리모트 컨트롤할 수 있는 장치와 막의 진폭 데이터를 무선으로 송수신하는 장치를 탑재한다. 이것은 현재의 타 산업 기술로 완성할 수 있는 단순 기술 요소이다. 또, 자동으로 통재하고 모니터링할 수 있는 소프트웨어와 막구조물의 복수 장소에 상치 설치할 수 있는 기술 개발을 통해 막장력 헬스모니터링 시스템 및 이를 실현할 수 있는 장비가 구축 가능하다.

다. 막장력 유지관리 기준 및 지침(안) 작성

현재 우리나라는 준공된 막구조물의 장력을 높은 정확도로 정량적으로 측정할 수 있는 과학적 도구의 부재로, 유지관리를 위한 과학적 기준 및 지침이 없는 상태이다. 시공회사나 감리 업체, 유지관리 회사는 경험적 측정수법으로 막장력을 측정하고도 정확도나 안정성에 대한 불안으로 데이터 공개를 꺼려해 막구조 성능과 안전을 위한 토론의 장으로 이끌지 못하고 있는 것이 현 실정이다. 이 연구 결과물로 얻어지는 측정장치와 모니터링시스템은 막장력의 과학적 측정과 데이터 축적으로 토론의 장을 형성시킬 수 있고, 막장력 유지관리에 관한 기준 및 지침을 과학적 자료를 토대로 작성할 수 있으므로, 막구조물의 성능확보는 물론, 구조물의 안전성도 확보할 수 있다.

3. 연차별 세부추진계획 및 방법

각 연차별 연구수행 목표와 그 세부 사항은 다음과 같다.

가. 1차년

○ 포터블 막장력 측정장치 개발

측정장치의 소형, 경량화
측정장치의 전자회로 및 전원설계
장력 산정 시스템 설계
실험실 및 현장에서 측정정확도 및 현장 적용성 검증

○ 막장력 헬스모니터링 시스템 구축

막구조 및 일반구조물의 헬스모니터링 수법조사
막면 진동데이터 해석 및 축적 시스템 설계
헬스모니터링 소프트웨어 개발

○ 막장력 유지관리 기준/지침(안) 작성

기존 및 시공 중인 막구조물의 막장력 측정을 통한 데이터베이스 구축

나. 2차년

○ 포터블 막장력 측정장치 개발

막장력 측정장치 개량, 개선

원격 리모트 및 무선 송수신 기술 개발

실험실 및 현장에서 측정정확도 및 현장 적용성 검증

○ 막장력 헬스모니터링 시스템 구축

중계기 데이터 무선 송수신 시스템 개발

막장력 측정 자동화 시스템 개발

막장력 측정 자동화 시스템 Mock-up 테스트

막장력과 누름케이블 장력과의 상관관계 도출 실험

○ 막장력 유지관리 기준/지침(안) 작성

기존 및 시공 중인 막구조물의 막장력 측정을 통한 데이터베이스 구축

다. 3차년

○ 포터블 막장력 측정장치 개발

막장력 측정장치 개량, 개선

실험실 및 현장에서 측정정확도 및 현장 적용성 검증

○ 막장력 헬스모니터링 시스템 구축

막장력 측정 자동화 시스템의 막구조물 상시설치 시스템 개발

자동화 시스템과 관제센터 서버와의 무선 송수신 상태 점검

현장 시범 적용

○ 막장력 유지관리 기준/지침(안) 작성

기존 및 시공 중인 막구조물의 막장력 측정을 통한 데이터베이스 구축

막장력 유지관리/지침(안) 작성

4. 연구개발 추진전략

가. 연구목표별 연구개발 추진체계

분	주관연구기관 (주)타이가	공동연구기관 ( )한국건설품질연구원	국제공동연구기관 나고야대학교대학원 환경학연구과	참여기업 디프리기술연구원(주)
포터블막장력측정장치개발	▪ 소형, 경량화 ▪ 국제공동연구기관과 연계해 측정장치의 전자회로 및 전원 설계 ▪ 데이터 무선송수신 시스템 설계 ▪ 실험실 및 현장 검증 ▪ 장치 개량, 개선	▪ 실험실 및 현장 검증 ▪ 장치 개량, 개선	▪ 장력산정 시스템 설계 및 헬스모니터링 소프트웨어 개발로 주관연구기관 및 공동연구기관 지원	▪ 막구조 헬스모니터링 수법 조사 등으로 공동연구기관 지원 ▪ 주관연구기관의 측정장치의 전자회로 및 전원 설계 지원
막장력헬스모니터링시스템구축	▪ 국내외 전문가 활용으로 원격 리모트 컨트롤 시스템 설계 ▪ 막장력 측정장치의 막구조물 상실 설치 시스템 개발 ▪ 현장 시범 적용	▪ 막면 데이터 해석 및 축적 시스템 설계 ▪ 막장력 측정 자동화 시스템 개발 ▪ 막장력 측정 자동화 장치의 막구조물 상실 설치 시스템 Mock-Up 테스트 ▪ 막장력과 누름케이블 장력과의 상관관계 도출실험	-	▪ 주관연구기관의 원격 리모트 및 송수신 기술개발 지원
막장력유지관리기준/지침(안)작성	▪ 기존 및 시공 중 막구조물의 장력 측정으로 데이터베이스 구축 ▪ 막장력 유지관리 기준/지침(안) 작성 ▪ 공동연구기관, 참여기업과 연계해 막재 리모델링 시장 개척	▪ 기존 및 시공 중 막구조물의 장력 측정으로 데이터베이스 구축 ▪ 주관연구기관, 참여기업과 연계해 막장력 유지관리 기준/지침(안) 작성	-	▪ 주관연구기관, 공동연구기관과 연계해 막장력 유지관리 기준/지침(안) 작성 ▪ 주관연구기관, 공동연구기관과 연계해 막재 리모델링 시장 개척

나. 연구개발 추진계획 및 방법

구분	연구내용	세부추진 계획 및 방법	수행기간	해당기관
1차년	▪ 막장력 측정장치 개발 - 측정장치의 소형, 경량화 - 측정장치의 전자회로 및 전원 설계 - 데이터 무선 송수신 시스템 개발 - 실용화 검증	▪ 막장력을 높은 정확도와 안정성으로 현장에서 손쉽게 사용할 수 있는 소형, 경량화된 막장력 측정장치 개발 ▪ 측정장치 이외의 부속 장치를 통합하고, 태양열 또는 배터리 구동이 가능한 막장력 장치를 위한 전자회로 및 전원설계 ▪ 막장력 측정 데이터를 지상의 관제시스템에 실시간으로 보낼 수 있는 무선 송수신 기술 개발 및 장치에 탑재 ▪ 소형, 경량화 장치 개발과정에서 개량된 장치의 정확도 및 안정성 검증	2012.11~ 2013.10	( )타이가 나고야대학교
	▪ 막장력 헬스모니터링 시스템 구축 - 막구조 및 일반구조물의 헬스모니터링 수법 조사 - 데이터 해석 및 축적 시스템 설계	▪ 막구조 및 일반구조물의 헬스모니터링 수법 조사 ▪ 측정한 막장력의 고유진동수 데이터를 해석해 막장력을 추출하고 해당 데이터를 축적하는 시스템 설계	2012.11~ 2013.10	(재)한국건설 품질연구원
	▪ 막장력 측정 및 헬스모니터링 최적 시스템 소프트웨어 개발 - 장력 산정 시스템 설계 - 헬스모니터링 소프트웨어 개발	▪ 막장력 측정장치 상의 액정화면에 측정 고유진동수를 변환하여 장력을 표시할 수 있는 시스템 설계 ▪ 상시 설치된 막장력 측정장치가 보내오는 측정신호를 분석하고, 이상 데이터를 캐치해 낼 수 있는 헬스모니터링 소프트웨어 개발	2012.11~ 2013.10	나고야대학교
	▪ 막장력 유지관리 기준 작성 - 기존 및 시공 중인 막구조물의 장력 측정, 파악	▪ 기존 및 시공 중인 막구조물의 장력을 파악해 분석함으로써 유지관리 기준/지침(안) 작성을 위한 토대 마련	2013.01~ 2013.10	(주)타이가 (재)한국건설 품질연구원
2차년	▪ 포터블 막장력 측정장치 개발 - 원격 리모트 컨트롤 시스템 설계 - 실용화 검증 및 개량	▪ 소형, 경량화 장치 개발과정에서 개량된 장치의 정확도 및 안정성 검증 및 개량 ▪ 원거리에서 막장력 측정장치를 미세 조정하는 등 컨트롤 할 수 있는 시스템 설계	2013.11~ 2014.7	(주)타이가 (재)한국건설 품질연구원
	▪ 막장력 헬스모니터링 시스템 구축 - 막장력 측정 자동화 시스템 개발 - 막장력 측정 자동화 시스템 Mock-Up 테스트 - 막장력과 누름케이블 장력과의 상관관계 도출실험	▪ 막장력 측정 자동화 시스템 개발 ▪ 개발된 막장력 측정 자동화 시스템을 실험실 Mock-up을 통해 측정성능 및 구동성능 검증 ▪ Mock-up 실험체를 이용해 막장력과 누름케이블 장력과의 상관관계 도출을 위한 실험 수행	2013.11~ 2014.7	(주)타이가 (재)한국건설 품질연구원
	▪ 막장력 유지관리 기준 작성 - 기존 및 시공 중인 막구조물의 장력 측정, 파악	▪ 기존 및 시공 중인 막구조물의 장력을 파악해 분석함으로써 유지관리 기준/지침(안) 작성을 위한 토대 마련	2013.11~ 2014.7	(주)타이가 (재)한국건설 품질연구원

3차년	▪ 막장력 측정장치 개발 - 실용화 검증 및 개량	▪ 소형, 경량화 장치 개발과정에서 개량된 장치의 정확도 및 안정성 검증 및 장치 개량	2014.8 ~2015.05	( )타이가 (재)한국건설품질연구원
	▪ 막장력 헬스모니터링 시스템 구축 - 막장력 측정 자동화 시스템 현장 설치 시스템 개발 - 현장 시범 적용	▪ 막장력 측정 자동화 시스템을 기존 막구조물에 상시 설치할 수 있는 설치 시스템 개발 ▪ 자동화 시스템과 관제센터 서버와의 무선송수신 상태 점검 ▪ 막장력 헬스모니터링 시스템을 현장에 시범 설치	2014.8 ~2015.05	(주)타이가 (재)한국건설품질연구원
	▪ 막장력 유지관리 기준 작성 - 기존 및 시공 중인 막구조물의 장력 측정, 파악 - 막장력 유지관리 지침 및 기준 작성 - 막재 리모델링 등 시장 개척	▪ 기존 및 시공 중인 막구조물의 장력을 파악해 분석함으로써 유지관리 기준 작성의 토대 마련 ▪ 기존 및 시공 중인 막구조물의 장력 분석을 통해 막장력의 유지관리 지침 및 기준 작성 ▪ 유지관리 기준을 근거로 기존 막구조물의 성능평가를 행하고, 부적합 구조물은 리모델링 등의 조치	2014.8 ~2015.10	(주)타이가 (재)한국건설품질연구원

다. 연구추진역량

(1) 연구진의 인적능력

주관연구기관 (주)타이가의 주관연구책임자 진상욱은 나고야대학교 환경학연구과에서 막장력 측정장치 개발에 관한 연구로 석, 박사학위를 받았고, 일본학술진흥회 특별연구원 PD로 박사 후 과정을 거치는 동안에는 막구조물의 유지관리 기술과 지침 및 기준에 관한 조사 연구도 병행한 경험이 있다. 화이트노이즈 음원 방사로 인한 막면의 공진현상을 이용하는 새로운 막장력 측정법을 제안하고, 기초 원리를 이론적으로 전개해 확립했을 뿐 아니라, 기초 시작품을 구성해 측정이론과 방법의 타당성도 검증했다. 측정장치의 정확도 향상을 위해 막의 진동에 미치는 공기의 영향을 막의 부가질량 효과로 이론적으로 평가해 측정 정확도를 현저히 향상시켰으며, 개발 과정에서 생기는 여러 문제점을 이론적, 실험적으로 검토함과 동시에, 다양한 관점에서 측정장치를 개량하고 실험을 거듭해 현장에서 이용 가능한 제1세대 막장력 측정장치를 완성했다. 이 연구의 목표인 막장력 측정장치의 소형, 경량화와 헬스모니터링 시스템 구축 전반을 총괄할 수 있는 충분한 지식과 경험을 갖고 있다고 할 수 있다.

주관연구기관 (주)타이가의 참여연구원은 책임자를 제외하고 6명으로 구성되어 있는데, 막장력 측정장치를 이용해 현장에서 장력 측정을 담당할 사업부 및 공사부서 직원 4명과, 장력 데이터를 해석하고 분석할 기술연구소 직원 2명으로, 장치 개발 및 적용에 필요한 최소한의 인원으로 구성되어 있다.

공동연구책임자 이성민은 (재)한국건설품질연구원에 재직하고 있으며, 현재 대공간구조물 전문학회인 (사)한국공간구조학회 부회장을 맡고 있다. 2007년부터 2012년까지 진행된 '대공간 건축물 건설기술개발'연구의 제 1세부 책임자로서 대공간구조물 접합부에 관한 연구를 수행해 왔으며, 연구결과물로 개발된'유압식 장력조절 시스템을 이용한 대공간 건축물용 케이블 시공 및 유지관리 공법'이 신기술 제 667호로 지정되어 고척스카이돔에 실제 적용하는 등, 본 연구의 장력 측정장치 개발과 헬스모니터링 시스템 개발에 기존 기술 개발의 노하우

가 가미될 것으로 기대된다.

(재)한국건설품질연구원은 공동연구책임자를 제외하고 참여기업 디프리기술연구원(주) 직원 5명을 포함해 10명으로 구성되어 있다. 참여기업 디프리기술연구원(주)는 지진에 대비한 각종 내진보강 및 면진·제진 기술을 연구하는 기업으로 건물의 안전에 관한 기술력을 보유하고 있다. 공동연구기관 (재)한국건설품질연구원은 구조물의 안전진단 및 유지관리에 특화된 기업으로, 참여연구원의 다수가 케이블 구조의 유지관리 공법 연구에 참여한 경험이 있고, 건물의 안전과 유지관리에 관한 기술을 갖고 있어 헬스모니터링 시스템 구축에 관한 연구를 수행하기에 충분한 역량을 확보하고 있다고 본다.

(2) 주관연구기관 연구책임자의 주요 실적

	연구내용	연구 기간	발표서적 또는 학술지명	당시의 소속기관	역할	연구비 지급기관
강구조물의 구조창생법 개발	강구조 구조설계에서 기둥 보 접합부와 그 시공성을 고려하면서 구조물의 안전성과 경제성을 동시에 만족시키는 다목적 최적 설계가 가능한 구조창생 소프트웨어 개발	2010~ 2012	· 일본건축학회구조계 논문집, Vol. 77, No. 673 · 일본건축학회 구조공학논문집, Vol. 58B	나고야대학교	분담 연구원	일본학술진흥회
막장력측정장치 개발	막구조물의 막장력을 정확하고 안정적으로 측정가능하고, 현장에서 쉽게 사용할 수 있는 콤팩트한 막장력 측정장치 개발	2009~ 2010.	· Measurement Science and Technology, 22, 115704 · 일본건축학회기술보고집, Vol. 17, No. 36	나고야대학교	분담 연구원	일본국토교통성
막구조물의 막장력 측정장치 개발에 기초한 막장력 유지관리 시스템 제안	현장에서 사용가능한 막장력 측정장치 개발해 이미 준공된 막구조물의 장력을 파악함으로써 막장력을 건강하게 유지관리할 수 있는 시스템 제안	2008~ 2010	· 일본막구조협회연구논문집, No. 22 · 한국공간구조학회, Vol. 8, No. 2	나고야대학교	연구 책임자	일본학술진흥회
Atibaia시 에코타운 건립사업 타당성 조사	브라질 Atibaia시 에코타운 건립사업에 필요한 산업폐기물 매립용 에어돔 제안	2013~ 2014	-	(주)타이가	사업 담당자	한국플랜트산업협회

(3) 공동연구기관 연구책임자의 주요 실적

	연구내용	연구 기간	발표서적 또는 학술지명	연구수행 당시의 소속기관	역할	연구비 지급기관
지구온난화에 대비한 지속가능형 구조시스템 개발	지구온난화를 방지하고 환경부하를 최소할 수 있는 에너지절약형/지속가능형 건축구조시스템 개발	2003~ 2006	-	(재)한국건설품질연구원	연구책임자	건설교통부
장수명화 되고 재사용 및 재활용이 가능한 철골구조시스템 개발	구조부재의 재사용과 설치, 해체 및 재활이 용이하고 장수명화 된 파괴모드 제어형 건축구조시스템을 개발	2004~ 2007	-	(재)한국건설품질연구원	연구책임자	건설교통부
대공간 건축물 건설기술	케이블 장력조절시스템 개발 및 케이블 장력 헬스모니터링 시스템 개발	2006 ~ 2011	· 한국공간구조학회, Vol. 11, No. 2	(재)한국건설품질연구원	연구책임자	국토해양부

(4) 국제공동연구기관 연구책임자의 주요 실적

연구제목	연구내용	연구 기간	발표서적 또는 학술지명	연구수행 당시의 소속기관	역할	연구비 지급기관
강구조물의 구조창생법 개발	강구조 구조설계에서 기둥보 접합부의 시공성을 고려하면서 구조물의 안전성과 경제성을 동시에 고려하는 다목적구조창생 소프트웨어 개발	2010~ 2012	· 일본건축학회구조계 논문집, Vol.77, No.673 · 일본건축학회 구조공학논문집, Vol.58B	나고야대학교	연구책임자	일본학술진흥회
막장력측정장치 개발	막구조물의 막장력을 정확하고 안정적으로 측정가능하고, 현장에서 쉽게 사용할 수 있는 콤팩트 막장력 측정장치 개발	2009~ 2010	· Measurement Science and Technology, 22, 115704 · 일본건축학회기술보고집, Vol.17, No.36	나고야대학교	연구책임자	일본국토교통성
구조 최적화 수법을 이용한 건축구조 창생지원 소프트웨어 개발	강구조물의 구조설계에 다목적최적화 수법을 적용해 안전성과 경제성의 두 목적함수를 동시에 만족하는 구조물 설계를 가능하게 하는 구조창생 소프트웨어 개발	2007	· 일본건축학회구조계 논문집, No.628 · 일본건축학회구조계 논문집, No.643 · 일본건축학회 구조공학논문집, Vol.54B	나고야대학교	연구책임자	스미토모재단
장스팬 공간구조물의 내진성능진단법과 개수, 보강법에 관한 조사연구	체육관이나 스타디움 같은 장스팬 공간 구조물의 내진성능을 평가할 수 있는 내진 성능 진단법을 개발하고, 내진 진단에 따른 내진 개보수법을 개발	2006	· 일본건축학회기술보고집, Vol.13, No.26 · 일본건축학회 구조공학논문집, Vol.53B	나고야대학교	연구책임자	일본학술진흥회
환경부하저감형 건축구조창생지원 통합 환경구축에 관한 연구	강구조물의 구조설계에 구조물의 라이프사이클을 도입하고 안전성, 경제성에 환경성을 더한 세 가지 목적함수를 동시에 만족시키는 구조창생 통합 환경 구축	2005~ 2007	· 일본건축학회구조계 논문집, No.601 · 일본건축학회구조계 논문집, No.618 · 일본건축학회구조계 논문집, No.627	나고야대학교	연구책임자	일본학술진흥회

2절. 연구수행과정 및 내용

1. 포터블 막장력 측정장치 개발

가. 음파를 이용한 막장력 측정의 기본 원리

막구조물은 본래 압축 또는 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 장력을 소실하는 응력완화가 일어난다. 설계 시 이를 고려하지만 지속적인 관리가 없을 경우, 플러터링이나 폰딩 등 막을 파단에 이르게 할 수 있다. 그러므로 준공 후 막구조물에 생기는 장력의 크기를 정확히 파악하는 것은 유지관리의 관점에서도 매우 중요하다. 현장에서는 이를 가능케 하는 기술에 큰 기대를 걸고 있다.

이 연구는 막장력을 이론적이고 간접적으로 측정할 수 있는 새로운 이론을 제안했다. 그 측정 원리는 그림 2-2-1-2와 같이 직사각형 경계로 구획된 막면에 그림 2-2-1-1과 같이 그 상부에서 가청역의 음파를 쬐어 막면을 진동시키고, 그로 인해 선택적으로 공진하는 막면의 고유진동수를 측정함으로써 장력을 추출하는 것이다. 이 새로운 이론은 장치를 시험제작하고, 막재에 실시간 장력 도입이 가능한 2축 인장장치를 이용한 실험을 통해 검증되었고, 시험제작한 장치의 측정 정확도 또한 확인했다.

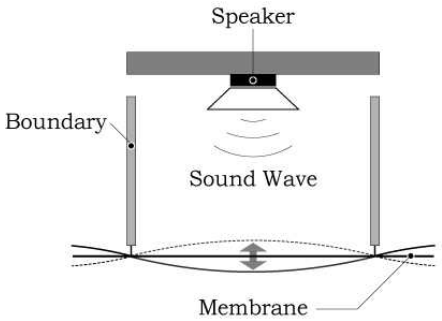


그림 2-2-1-1. 음파를 이용한 막장력 측정 개념도

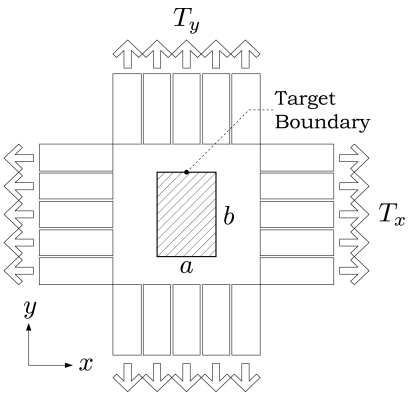


그림 2-2-1-2. 막재의 경계

나. 막장력 측정을 위한 기초 이론

외부 압력 가 작용하는 막의 선형 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$-\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t} = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}_{x} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} T_y \Big) = p \qquad (1)$$

여기서, ρ_k는 막재의 단위 면적당 질량, $w = w(x, y, t)$은 막면의 면외 변위, t는 시간,

T_y는 x, y방향의 길이 당 장력, p는 외압을 나타낸다.

식 (1)을 만족하는 w, p로서 다음과 같은 변수 분리형의 함수를 도입한다.

$$w(x,y,t) = W(x,y)e^{i\omega t}, p(x,y,t) = P(x,y)e^{i\omega t} \quad (2)$$

식(2)를 식(1)에 대입하면 다음 식이 얻어진다.

$$\rho_k \omega^2 W + \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} T_x + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} T_y \right) = P \quad (3)$$

주변 고정의 구획된 막을 고려하면 진동형 $W(x,y)$는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$W = \sum_m \sum_n C_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}, \; m,n = 1,2, \cdots \quad (4)$$

자유진동을 고려하기 위해 $P=0$로 하고, 식(4)를 식(3)에 대입하여 고유진동수 ω_{mn}를 구하면 다음과 같이 된다.

$$\omega_{mn} = \pi \frac{1}{\rho_k} \left(T_x \frac{m^2}{a^2} + T_y \frac{n^2}{b^2} \right), \; m,n = 1,2, \cdots \quad (5)$$

여기서, m, n은 진동 모드의 배수를 나타내고, $a=b$일 때의 정방형 막이 고유진동 모드를 그림 2-2-1-3에 나타낸다.

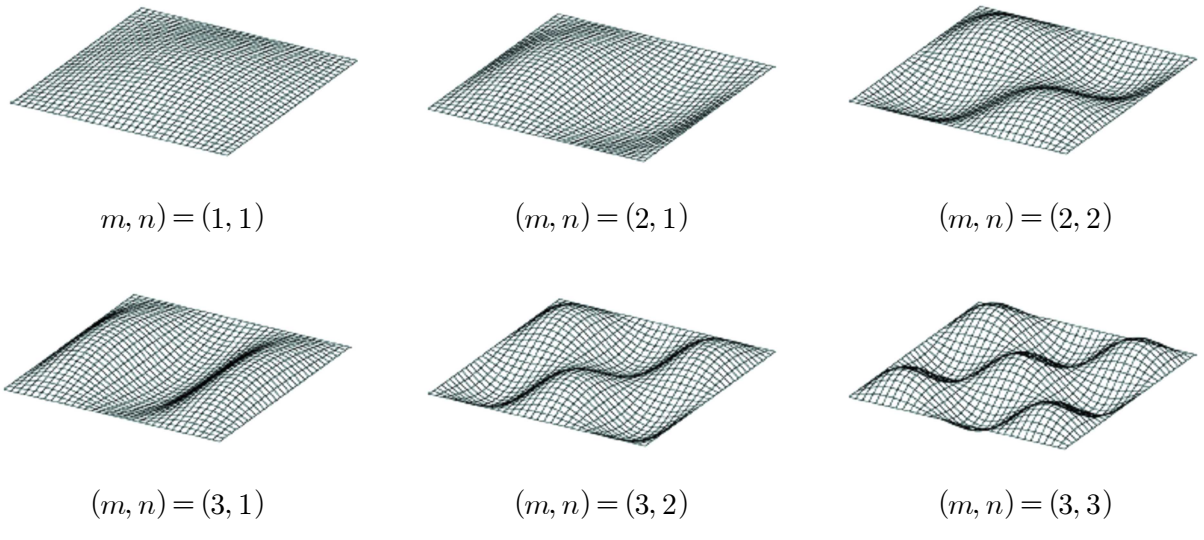


그림 2-2-1-3. 고유진동 모드

막면의 고유진동수로부터 직교 이방향의 장력 추정을 생각한다. $2\pi f = \omega$의 관계식을 이용하면 고유진동수 f_{mn}은 다음과 같이 얻어진다.

$$f_n = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{1}{\rho_k}\left(T_x\frac{m^2}{a^2}+T_y\frac{n^2}{b^2}\right)} \tag{6}$$

지금 2종류의 서로 다른 가진 음원의 진동수 f_1, f_2에 대해 막면이 공진했을 때 이들의 진동수는 고유진동수로 볼 수 있으므로, 식(6)으로부터 다음 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} T_x\frac{m_1^2}{a_1^2}+T_y\frac{n_1^2}{b_1^2} &= 4\rho_k f_1^2 \\ T_x\frac{m_2^2}{a_2^2}+T_y\frac{n_2^2}{b_2^2} &= 4\rho_k f_2^2 \end{aligned} \tag{7}$$

여기서, a_1, b_1은 진동수 f_1의, a_2, b_2는 진동수 f_2 각각의 가진 음원 경계의 각변의 길이를 나타낸다.

식(7)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[A]\{T\} = \{f\} \tag{8}$$

여기서,

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{m_1^2}{a_1^2} & \frac{n_1^2}{b_1^2} \\ \frac{m_2^2}{a_2^2} & \frac{n_2^2}{b_2^2} \end{bmatrix}, \qquad \{T\} = \begin{Bmatrix} T_x \\ T_y \end{Bmatrix}, \qquad \{f\} = 4\rho_k \begin{Bmatrix} f_1^2 \\ f_2^2 \end{Bmatrix} \tag{9}$$

식(8)로부터 막장력 $\{T\}$는 다음 식에 의해 구해진다.

$$\{T\} = [A]^{-1}\{f\} \tag{10}$$

식(10)으로부터 구획된 막이 공진할 때 막면의 고유모드와 그 때의 고유진동수를 측정하면 이 식을 풀어 직교 이방향의 막장력 T_x, T_y를 제 각각 구해 낼 수 있다.

다. 이론 검증을 위한 기존의 장치 구성

과제 총괄 책임자는 제안한 새로운 측정 이론을 검증하기 위해 장치를 시험 제작하고, 2축 인장장치를 이용해 실험했다. 측정장치는 그림 2-2-1-4에 나타내는 바와 같이 크게 세 부분으로 구성되어 있다. 그림 2-2-1-5에 보이는 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. 그림 2-2-1-6에 나타내는 음원부는 음원소스를 만들어 내는 음원부와 스피커로 보내는 신호를 증폭시키는 증폭기로 구성된다.

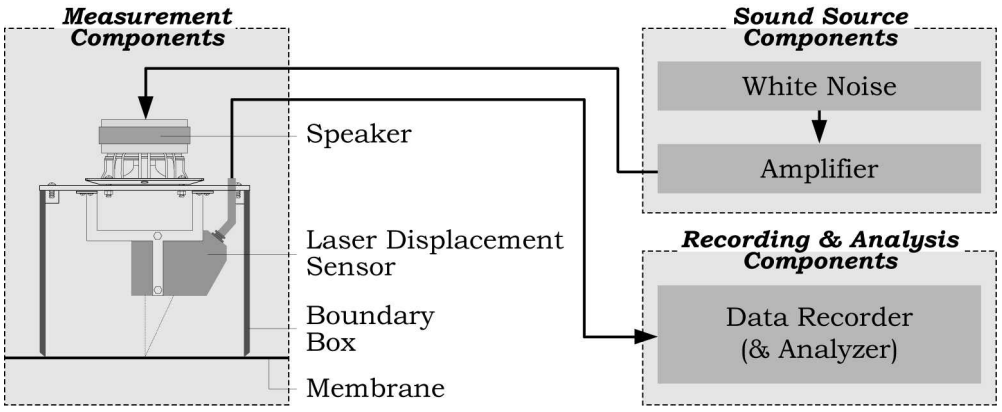


그림 2-2-1-4. 막장력 측정장치 구성도

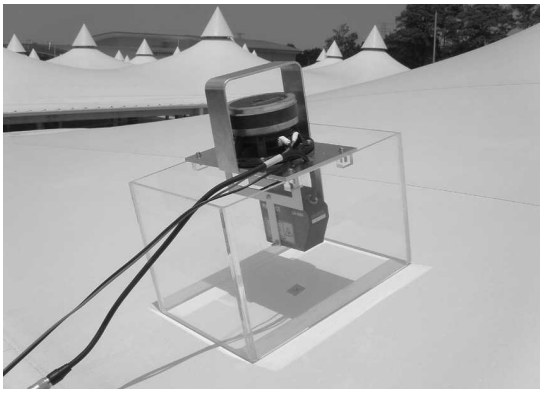


그림 2-2-1-5. 측정 장치부

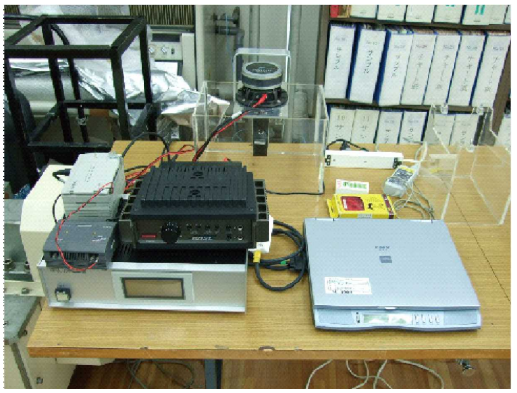


그림 2-2-1-6. 음원부 및 데이터 해석부

동일 그림 2-2-1-6의 기록 및 해석부는 레이저변위계에서 검출한 막의 진폭 데이터를 기록하고 해석해 막의 고유진동수를 추출할 뿐 아니라, 이를 이용해 막의 장력을 구해낸다.

라. 장치의 소형, 경량화

앞서 서술한 바와 같이 기존의 막장력 측정장치는 레이저변위계와 스피커, 아크릴 진동경계박스로 구성되어 막장력을 측정하는 직접적 장치 이외에도, 부속 장치로 음원을 생산하고 증폭하는 장치와 데이터를 해석하고 저장장치 또한 필요로 한다. 이들 모든 장치가 하나로 통합된 제 1세대 올인원 형식의 소형, 경량 장치 시제품을 그림 2-2-1-7, 8과 같이 완성했다. 한편, 소형, 경량화 과정에서 발생할 수 있는 측정 오차는 실험을 통한 검증으로 해결하고, 마이크로컴퓨터의 전자회로 설계와 포터블 장치로서의 전원설계를 병행한다. 또, 측정시간의 비약적 단축을 위해 진동 음원으로 화이트노이즈 음원을 제작해 도입함으로써 현장에서 쉽고 폭넓게 사용 가능한 장치를 완성한다.

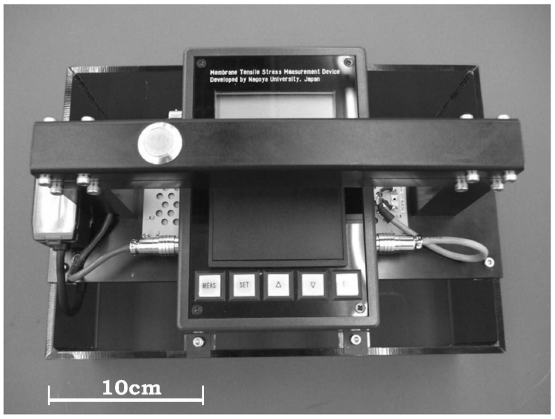


그림 2-2-1-7. 포터블 막장력측정장치(윗면)

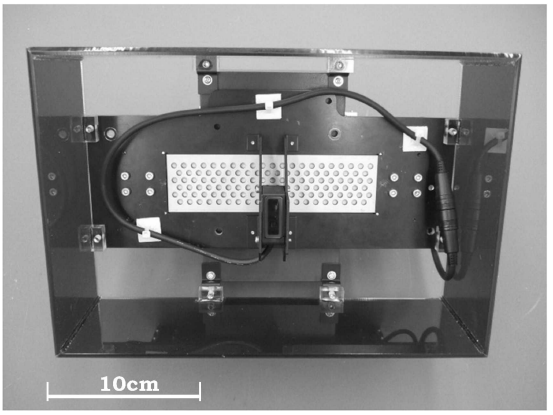


그림 2-2-1-8. 포터블 막장력측정장치(아랫면)

(1) 소형, 경량화 범위 설정

- 장치크기: 20×30×20㎝ 이내로 제작
- 장치중량: 총 중량 2.5kg 이내로 제작
- 음원생산부 및 데이터 해석부를 마이크로컴퓨터에 탑재

마. 1차년 최종 시제품 장치의 사양

(1) 본체사양

- 아크릴 프레임 일체형 측정장치: 아크릴 프레임, 스피커, 레이저변위계, 마이크로컴퓨터
- 아크릴 프레임 내부 치수: 단변20cm×장변30cm×높이20cm
- 전체중량: 2.2kg

(2) 스피커사양

- 메이커 FPS
- 형식 DCFR(플랫패널 스피커)
- 임피던스 4Ω
- 실효주파수대역 170Hz-20kHz
- 음압레벨 82dB±3dB
- 정격입력 5W(최대 20W)
- 중량 55g
- 외부치수 W46mm x H85mm x D9.2mm



그림 2-2-1-9. 플랫패널 스피커

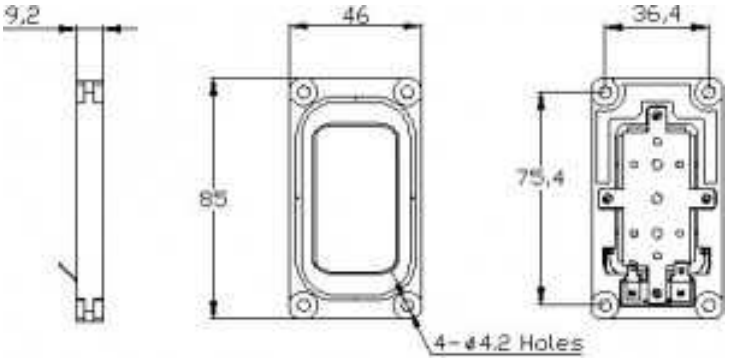


그림 2-2-1-10. 플랫패널 스피커 도면

(3) 레이저변위계 사양

- 메이커 Omron
- 형식 센스헤드: ZX-LD40 앰프유닛: ZX-LDA11-N
- 기준거리 40mm
- 측정범위 ±10mm
- 광원 가시광 반도체 레이저, 파장 65nm, 1mW이하, Class 2
- 빔형상 ϕ50μm 스폿
- 분해능 2μm
- 직선성 ±0.2% F.S.
- 측정주기 150μS
- 설정가능 평균회수 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096회
- 아날로그 출력 4~20mA, ±4V
- DO출력 HIGH/PASS/LOW NPN 오픈레코더 출력
- 습도특성 0.01% F.S./℃
- 환경특성 사용 주위 조도 3000lx 이하
  사용 주위 습도 30~85% RH(결로 없을 것)
  사용 주위 온도 0~50℃
  내진동 10~150Hz
  보호구조 IP40
- 중량 센스헤드 150g
  앰프유닛 150g

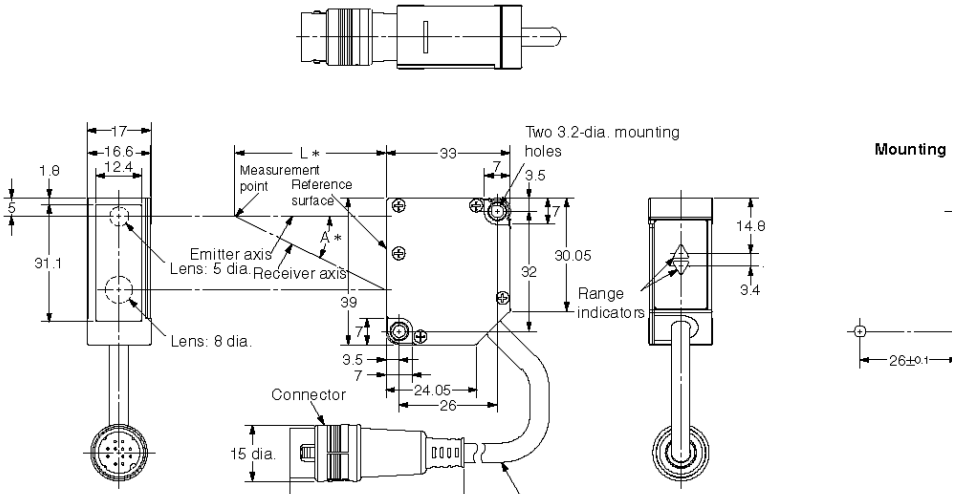


그림 2-2-1-11. 레이저 변위계 도면

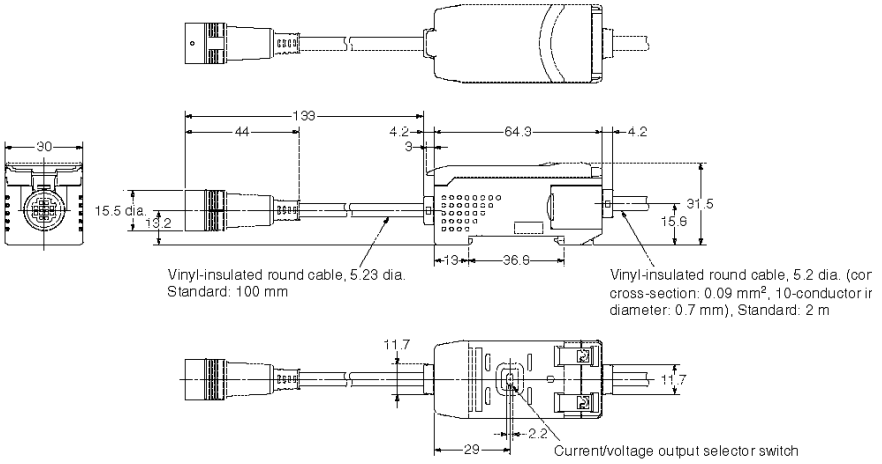


그림 2-2-1-12. 레이저 변위계 앰프 도면



그림 2-2-1-13. 레이저변위계 및 앰프 사진

(4) 계측부 사양

- 파워앰프 D급 앰프
  - 적용 스피커 4~8Ω
  - 출력 10W 이하 가변
- D/A 변환기 CPU의 ROM에 기억된 화이트노이즈 파형을 앰프에 공급
- 분해능 12 BIT
- Sampling 0.1mmSEC
- 버퍼앰프 입력전압 ±1, 2, 4V
- 로패스 필터 차단주파수 약 1kHz
  - 차단특성 약 -24dB/oct
- A/D 변환기 분해능 12 BIT
  - Sampling 0.1mmSEC
- CPU SH-2 시리즈
  - ROM 512KB
  - RAM 16KB
  - EEROM 2MB
  - 외부 RAM 512KB
  - 막재계수 0.5~1.5(100 패턴)
- 액정표시부 20문자×4행, 설정항목, 측정일표시, FFT연산결과표시, 변위데이터 표시, 막장력 연산결과 표시
- 조작 스위치 측정, 화이트노이즈 파워 설정, 진동경계크기 설정, 막재 선택의 4종류
- 전원 AAA 니켈 전지 1.5V 4개
  - AC 220V도 가능

(5) 데이터 송수신 유닛 사양

- 송수신 주파수 429MHz 대
- 인터페이스 USB
- 전원 USB 파워

바. 설계도면

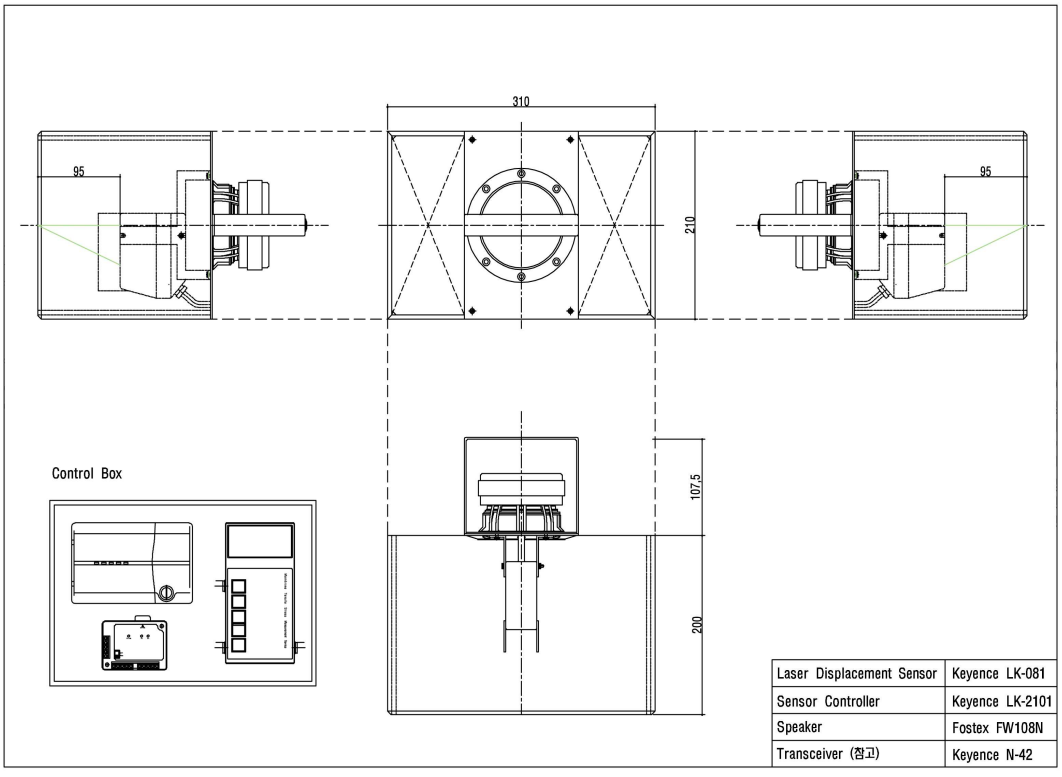


그림 2-2-1-14. 포터블 막장력 측정장치 시제품 도면1

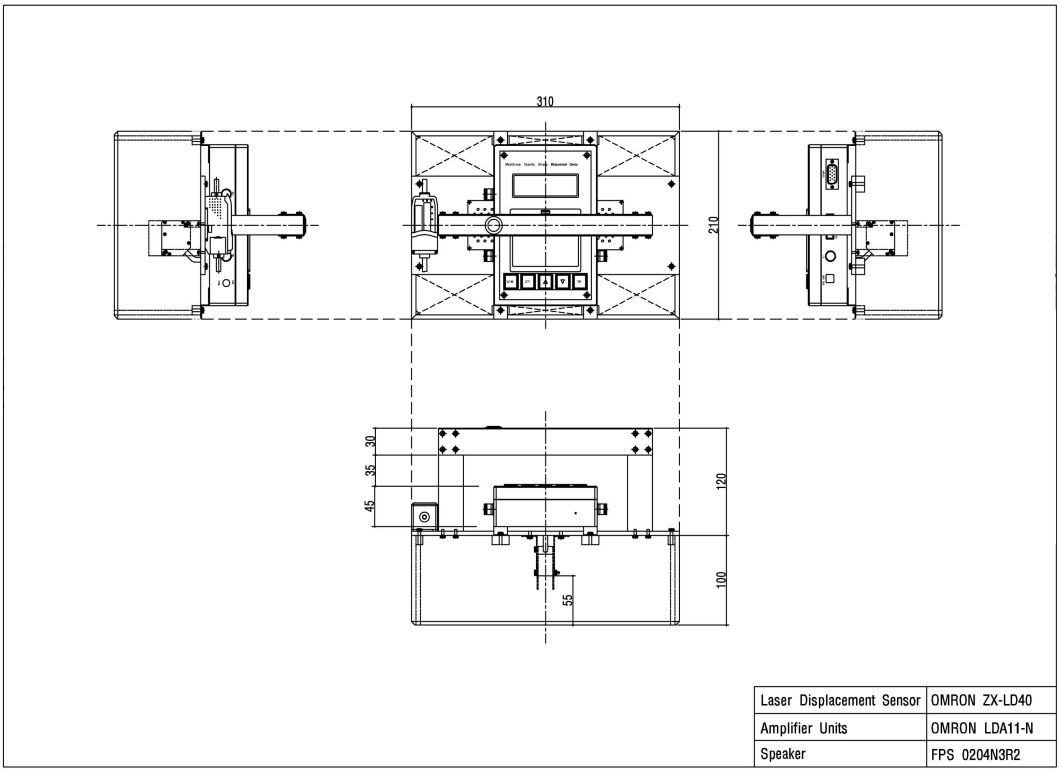


그림 2-2-1-15. 포터블 막장력 측정장치 시제품 도면2

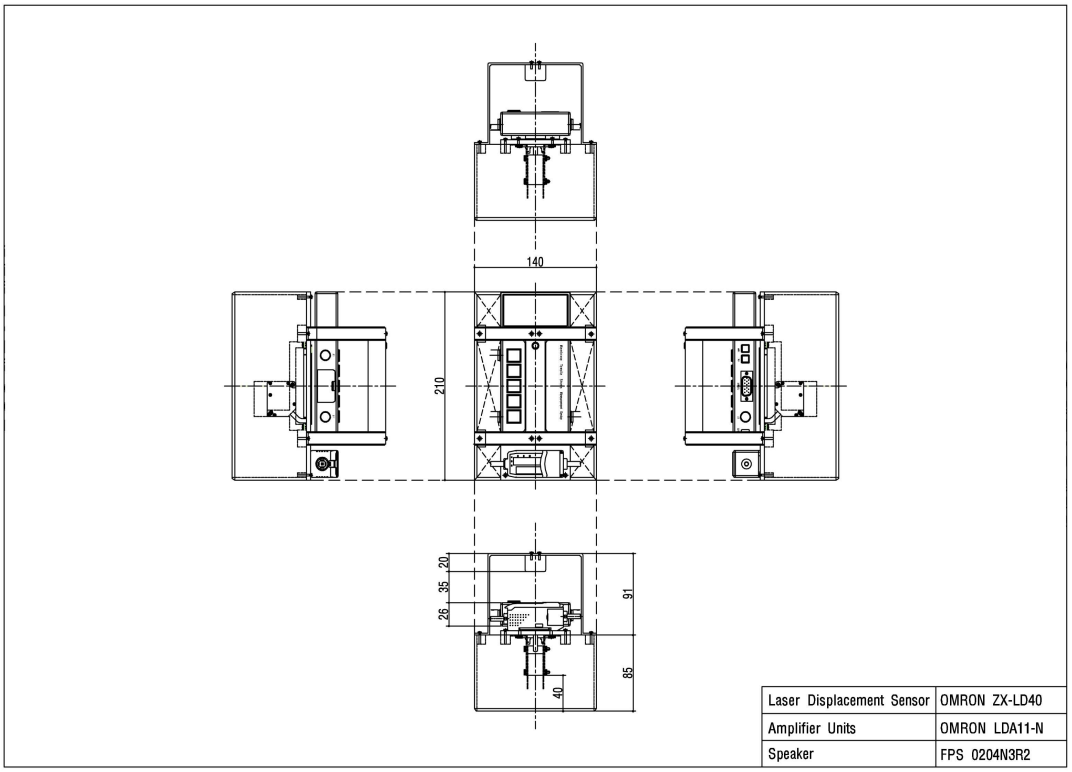


그림 2-2-1-16. 포터블 막장력 측정장치 시제품 도면3

사. 마이크로컴퓨터 회로설계

(1) 전체 플로

측정장치에는 측정스위치, 화이트노이즈 파워 설정, 막 진동경계 크기설정, 막재 선택의 4종류 버튼이 있다. 본체에는 20문자×2행을 표시할 수 있는 액정이 탑재되어 있고 이 화면을 보면서 스위치 조작으로 각종 설정 화면으로 이동 가능하다. 그림 2-2-1-17에 마이크로컴퓨터의 전체 플로차트를 나타내고 있다.

(2) 측정모드

이 장치의 본래 목적인 막장력 측정을 행하는 모드이다. 그림 2-2-1-18에 나타내는 바와 같이, 초기화면에서 손잡이 상의 측정 스위치를 누르면 T1초간 레이저변위계의 앰프가 자동으로 레이저 영점 조정을 하고 막의 진동 변위 측정을 준비한다. T1초 후에는 화이트노이즈가 스피커로부터 막면에 방사되고 이에 따라 막은 진동을 시작한다. T2초 후에 레이저변위계는 T3초 동안 막의 진동 변위를 샘플링한다. T3초 후에 레이저변위계는 샘플링을 중지하고 샘플링 데이터를 앰프를 통해 마이크로컴퓨터로 전송한다. 샘플링된 막의 진동 데이터를 토대로 FFT(Fast Fourier Transform)해석을 시작하고 0.5 초 후에는 화이트노이즈의 방사를 정지한다. 액정 상에서 다른 방향의 측정을 유도하는 메시지가 나오면, 막장력 측정장치를 수직 축으로 90도 회전시켜 위 과정을 반복한다.

FFT해석으로 얻어진 특정 장력 하의 2개의 서로 다른 공진진동수는 마이크로컴퓨터 상의 막장력 산정 프로그램으로 막 섬유 2축의 장력을 따로 따로 계산하여 액정 상에 나타낸

다. 이 모든 과정을 수행하면 한 지점에서의 장력측정은 완료되고, 측정값은 마이크로컴퓨터의 RAM에 저장된다. 또, 지정 막구조물의 모든 측정지점에서의 측정이 완료되면 무선으로 지정된 곳으로 데이터를 전송할 수도 있다.

제작된 마이크로컴퓨터의 전자 회로도를 그림 2-2-1-19에, 전자회로 기판 회로 및 실재 제작된 마이크로컴퓨터를 그림 2-2-1-20, 21에 나타낸다.

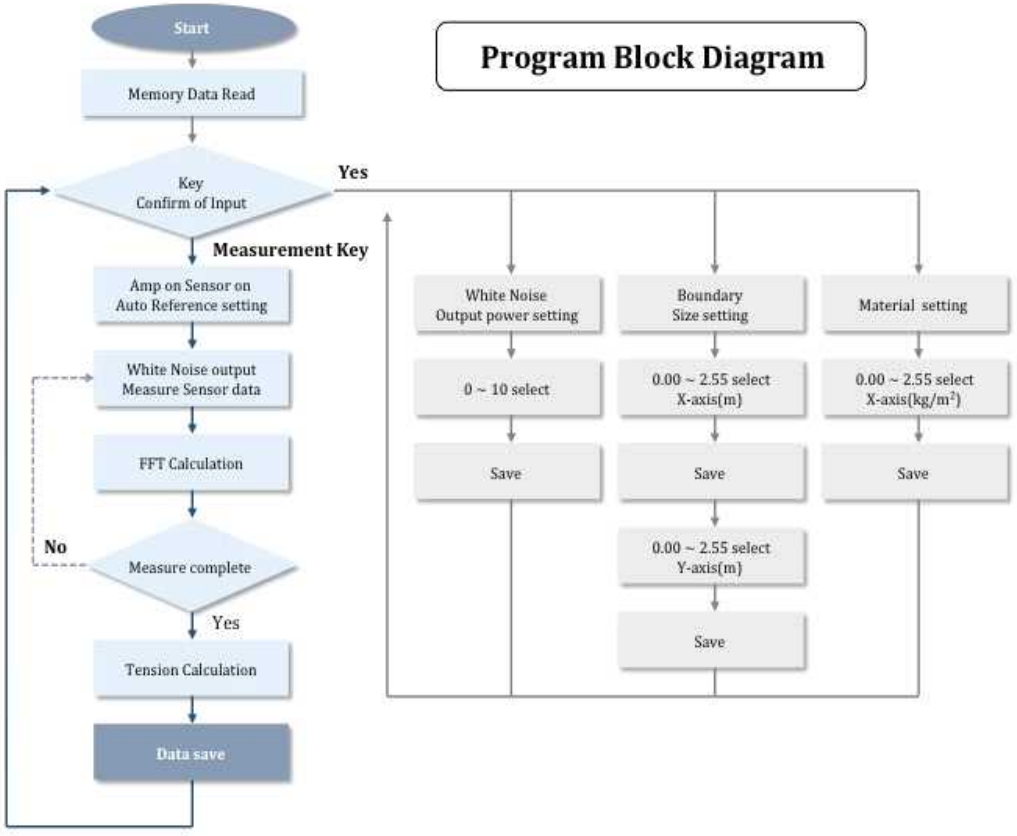


그림 2-2-1-17. 막장력 측정장치의 플로차트

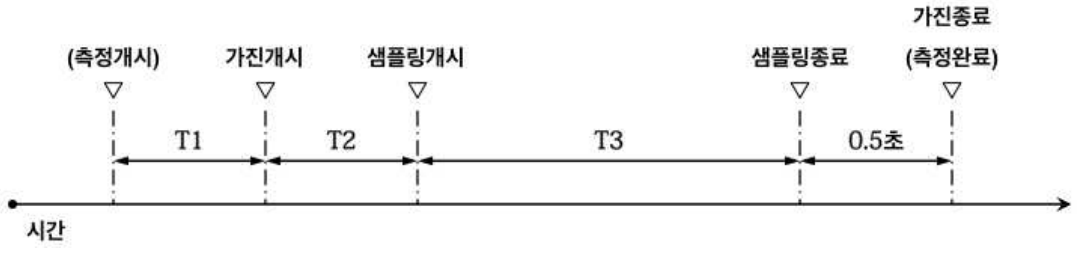


그림 2-2-1-18. 측정개시부터 완료까지의 타이밍 차트

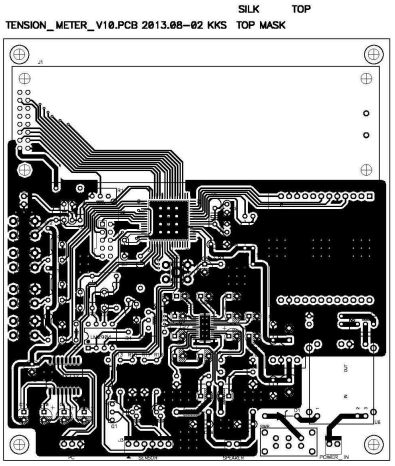


그림 2-2-1-19. 전자회로 기판

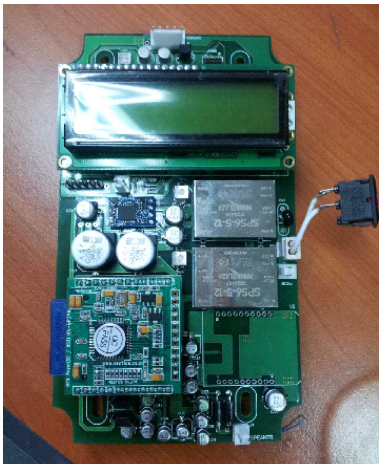


그림 2-2-1-20. 제작된 전자회로 기판

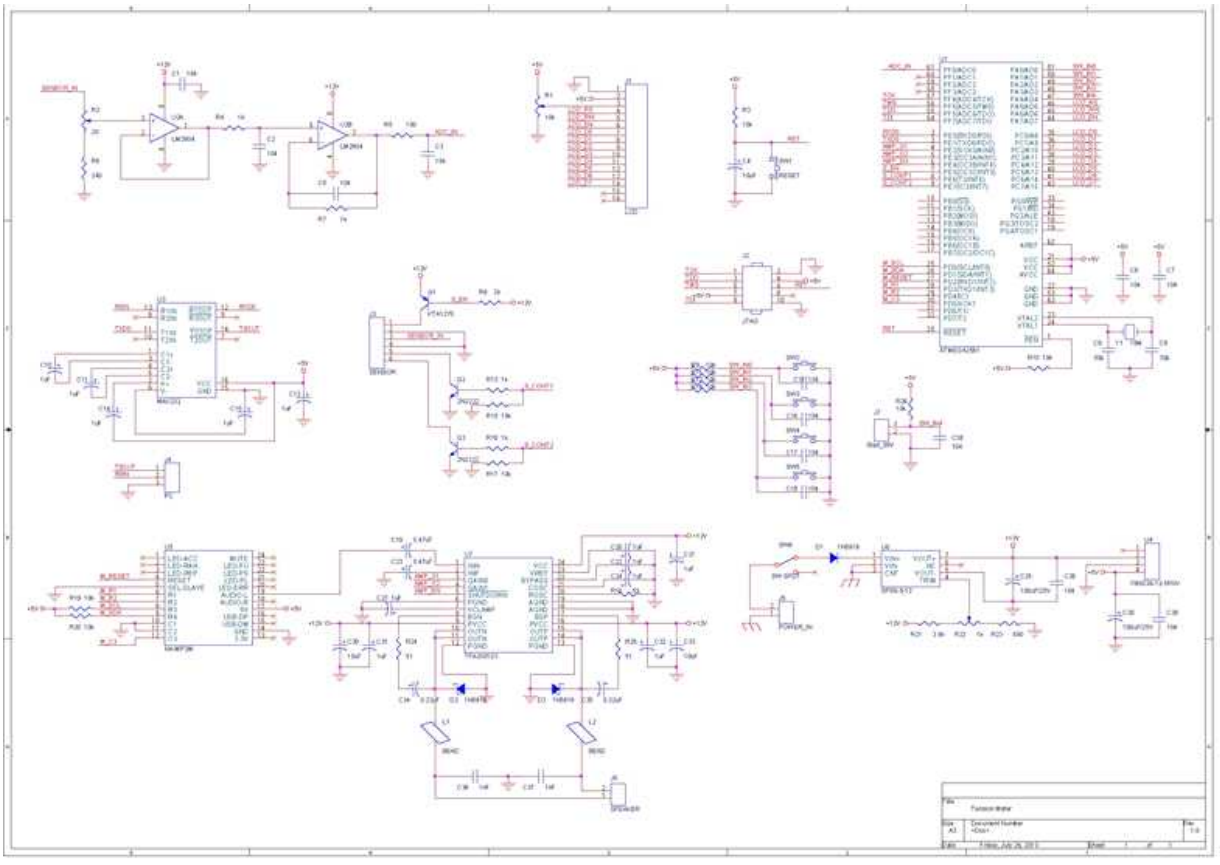


그림 2-2-1-21. 전자회로도

(3) 설정모드

설정모드는 음파의 강도와 막재, 그리고 진동경계 사이즈를 측정 대상 구조물에 따라 적절히 선택할 수 있게 하는 모드로, 측정의 정확도와 안정성을 확보하고 장치 사용성을 확장하기 위함이다. 음파의 강도는 0에서부터 25까지 선택할 수 있다. 비교적 높은 장력이 도입되어 있는 막면은 진동에 따른 진폭이 상대적으로 작으므로, 화이트노이즈의 파워를 높여 보다 큰 진폭을 측정해야 할 경우가 있다. 다만, 배터리 출력 또한 높아지므로 측정에 있어 적절한 안배가 필요하다.

진동경계 사이즈는 0.00m에서 2.55m까지 선택가능하다. 초기 설정은 현재 제작된 아크릴 경계박스 사이즈; 단변 0.14m, 장변 0.21m로 고정되어 있다. 음파의 강도와 마찬가지로 비교적 높은 장력이 도입되어 있는 경우는 넓은 경계면에서 더 큰 진폭을 가지므로 필요에 따라 경계박스 사이즈를 교환할 수 있다.

막재는 측정 대상 막구조물에 맞게 설정해야 한다. 이 연구에서 개발된 막장력 측정장치는 기초이론에서 언급했듯이 막재 고유의 물리적 특성인 막면밀도(단위면적당 질량)만으로 모든 막재에 적용가능하다. 통상의 막재료는 1.0kgf/cm 전후이므로 그 범위를 0.00kg/㎡에서 2.55kg/㎡까지로 했다.

아. 전원설계

기존의 막장력 측정장치는 220V 가정용 전압으로 구동되므로 현장에서 사용하기 위해서는 긴 전선으로 측정장치와 음원 및 해석장치를 연결시켜야 하며, 해석에 있어서는 일정 부분 기술자의 수동 개입이 요구되는 등 현장에서 사용하기에는 부적절했다.

막장력 측정은 다양한 종류의 막구조물이 그 대상이 된다. 작은 규모의 캐노피나 창고, 체육관 등 비교적 낮은 높이에 지붕 구조물을 갖는 막구조물의 경우에는 측정에 문제가 없다. 그러나 대형 스타디움을 비롯해 현장 접근이 쉽지 않거나, 전원 공급이 어려운 현장, 경사가 급해 전선을 달고 이동할 수 없는 현장 등, 가정용 전압을 이용하는 것은 상상만으로도 불편이 그려진다. 따라서 현장에서 장치가 손쉽게 이용되기 위해서는 이를 극복해야 한다. 이 연구에서는 태양광이나 배터리 구동으로 이 현장 관리자 등이 손쉽게 이용할 수 있는 장치가 되도록 태양광 구동과 배터리 구동이라는 두 가지 패턴을 고려하고, 먼저 태양광으로 구동되는 기기를 검색했다.

(1) 태양광 구동 기기 자료 조사

- 태양광 노트북 (Solar Laptop Computer)



- AUO사는 FPD International 2010 전시회에서 태양전지 노트북 패널 공개
- 일반노트북과 달리 태양광 패널이 노트북 컴퓨터와 키보드에 장착되어 있어 햇빛을 받으면서 전기를 발생시켜 리튬이온 배터리에 충전
- 전기효율성 문제 때문에 배터리나 전기 파워를 모두 대체하지는 못하고, 소비되는 전력의 약 20%만 태양광으로 대체

• 태양광 캠코더 (Solar Camcorder)



- Jetyo(중국) 발표한 태양광 캠코더로 일반 캠코더와 비슷한 사양 갖춤
- 스크린 뒤편에 부착되어 있는 접이식인 두 개의 태양광 패널을 이용하여 태양광 발전이 시작되고 생산된 전기는 캠코더에 부착된 리튬이온 배터리를 충전
- 태양이 없어 충전 불가능 시 AAA배터리 사용가능
- 캠코더용 배터리 충전 시간이 25시간으로 태양광 충전 효율성이 떨어짐

• 무선태양광 키보드 (Wireless Solar Keyboard)



- Logitech 제품
- 상단 좌우의 태양전지 패널을 이용하기 때문에 건전지 교체의 불편함을 제거
- 태양광 뿐만 아니라 실내전등과 같은 빛에서도 충전가능
- 충전된 키보드는 약 3개월간 빛이 없는 곳에서 사용가능

• 태양광 스피커 (Solar Powered Sound System)



- CES 전시회에서 Eton사가 발표한 아이폰이나 아이패드 전용 스피커 시스템
- 456㎠의 대형 단결정 태양광 패널 장착
- 음악 재생시 아이폰과 아이팟도 충전가능: 광전효율이 높은 단결정 패널로 5시간 안에 내장된 2000mAh 리튬이온 배터리 완전 충전 가능

• 태양광 리모컨 (Solar Remote)



- 필립스가 내놓은 LED TV 리모컨
- 태양광을 전기로 바꿀 수 있는 패널을 장착하여 배터리 교환의 불편함 제거

(2) 태양광 구동의 문제점과 배터리 구동 채택

이 연구에서 목표로 하는 막장력 측정장치는 음원을 스피커를 통해 방사해 막을 진동시키고, 그 진동을 레이저변위계가 채집하고, 채집된 데이터를 마이크로컴퓨터가 해석하는 시스템이다. 전원을 필요로 하는 장치로는 스피커, 레이저변위계 및 앰프, 마이크로컴퓨터로 장치의 모든 부분이 전원을 필요로 하고 있다.

향후 추진할 막장력 헬스모니터링 시스템을 고려한다면 태양광으로 모든 시스템을 구동시키는 것이 바람직하나, 일조량에 따라 시스템이 구동되지 않을 수 있는 점, 장치 제 각각의 기기가 비교적 많은 양의 전력을 필요로 하는 점, 배터리가 현장에서는 더욱 친숙한 점, 태양광 시스템의 불안정성 등의 이유로 포터블 막장력 측정장치에는 AAA 배터리 구동을 채택하기로 했다. 또, 실험실이나 사무실 등 필요에 따라서는 가정용 전원 공급도 가능하도록 단자를 비치하기로 한다.

자. 화이트노이즈 음원 제작

노이즈에는 화이트, 핑크, 블루 등 특정 색으로 정해진 명칭을 가지는 특성이 있다. 화이트노이즈는 주파수에 의존하지 않는 일정의 연속 스펙트럼을 가지는 잡음을 의미하는데, 빛의 파장에 치환하면 백색을 나타내는 주파수 특성에 일치해 화이트노이즈라 불리고 있다.

그림 2-2-1-22와 2-2-1-23에 나타내듯이 화이트노이즈의 파형은 톱니 모양처럼 불규칙한 파로, 그림 35과 같이 주파수를 횡축에 에너지를 종축으로 취해 화이트노이즈를 그래프화하면 평평한 그래프가 된다. 화이트노이즈의 횡축은 정규분포를 따르고, 가우시안노이즈로 되어 있다.

전술한 바와 같이, 화이트노이즈는 모든 주파수역에서 동일한 강도를 가지는데 이는 자기상관함수가 델타함수로 되는 것과 같은 의미이다. 또 엄밀하게는 자기상관함수에 델타함수라는 무한을 포함하는 것은 실재하기 힘들므로 이상적인 화이트노이즈는 존재하지 않는다. 그러나 실용 상 유한값의 화이트노이즈에 근접하는 것을 화이트노이즈로 취급한다. 일상적인 예로는 텔레비전이나 라디오의 수신할 수 없는 채널 등에 튜닝 했을 경우 '쏴아'하는 음이 음향에서 말하는 화이트노이즈이다.

정현파 Sweep 가진은 Sweep의 속도나 시간에 응답진폭이 의존할 가능성이 있어 어느 정도의 시간 간격으로 Sweep할 것인 가를 고려해야 한다. 게다가 가진 시간에서도 가진을 행하고 진동 데이터를 얻을 때까지 긴 시간을 요한다.

이에 비해 화이트노이즈를 가진 음원으로 하는 가장 큰 장점은 가진 시간을 대폭 줄일 수 있다는 것이다. 이 연구에서는 화이트노이즈를 이용함으로써 가진 시간을 약 3초로 한정할 수 있었고, 이 연구의 포터블 막장력 측정장치가 현장에서 쉽게 사용될 수 있게 견인한 가장 큰 요소이다.

그림 2-2-1-24는 막장력 측정장치 및 막장력 측정 자동화 시스템에 실재로 도입한 화이트노이즈 파형과 스펙트럼을 나타낸다. 앞서 설명한대로, 화이트노이즈는 지정한 주파수 영역에서 동일한 파워를 가지는 각 주파수의 조합으로 이루어진 노이즈이므로, 이 연구에서 요구하는 막의 고유진동수 측정에 있어서는 방사시간 의존성이 존재하지 않는 것이 가장 큰 특징이다.



그림 2-2-1-22. 화이트노이즈 파형

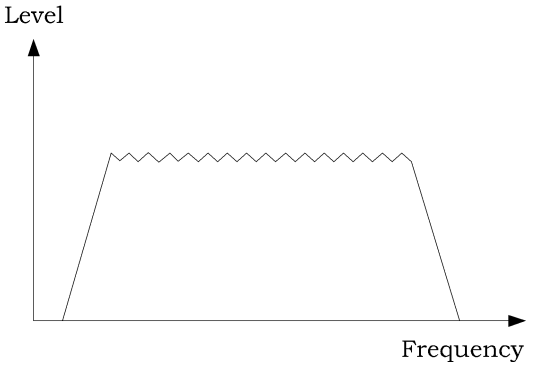


그림 2-2-1-23. 화이트노이즈 스펙트럼

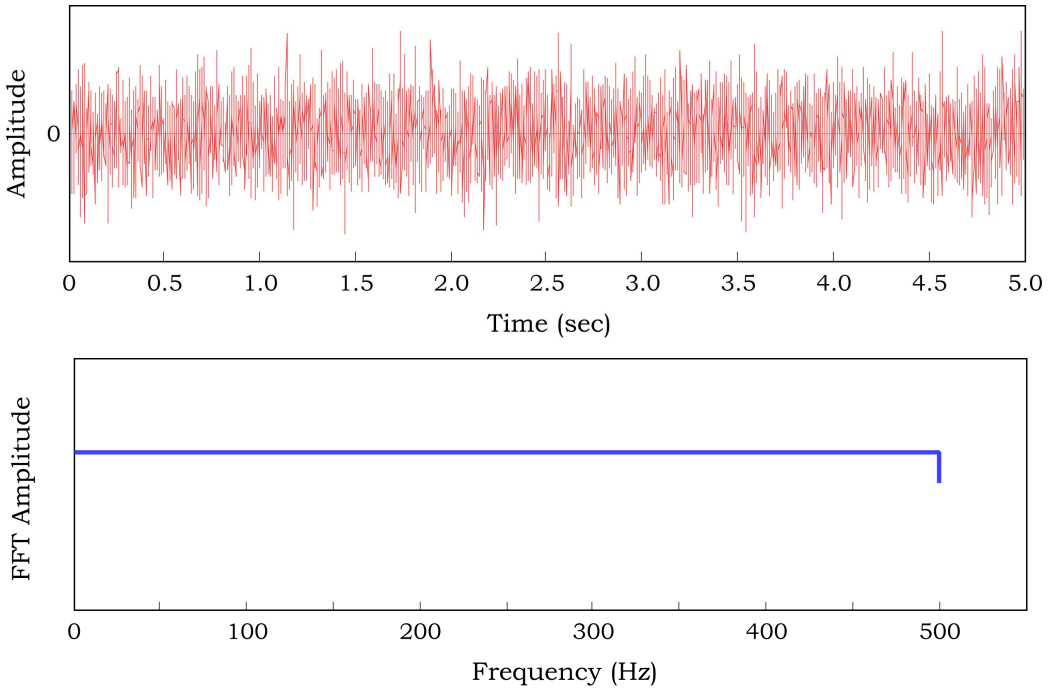


그림 2-2-1-24. 막장력 측정장치에 도입한 화이트노이즈 파형과 스펙트럼

차. 검증실험

(1) 실험 개요

이 연구로 개발한 포터블 막장력 측정장치 시제품의 측정정확도와 안정성을 2축 인장장치를 이용해 검증한다. 사용 막재는 그림 2-2-1-24, 25에 보이는 바와 같이 막면밀도 1.35kg/㎡을 갖는 국내 생산 PVDF로 현재 국내에서 가장 일반적으로 사용되는 C종 PVC막재이다. 그림 2-2-1-26, 27에 나타내는 2축 인장장치는 실험 막재에 실시간으로 원하는 장력 도입이 가능하다. 장력은 유압펌프로 도입하며, 각 축에 설치된 로드셀의 수치를 읽어 설정장력 값을 기록한다. 막의 진동범위를 결정할 아크릴 경계박스의 크기는 최종 시제품의 경우는 14cm×21cm이나, 실험에서는 먼저 20cm×30cm로 검증한다.

(2) 도입 장력

도입 장력은 표 2-1에 나타내는 바와 같이 X, Y축의 장력비가 1:1, 1:2, 2:1의 세 패턴으로 0.5kgf/cm에서 5kgf/cm까지 0.5kgf/cm 간격으로 증가시켜 가면서 총 20가지의 장력 값을 도입해 검증 실험했다. 막재가 인열되는 것을 방지하기 위해 모든 실험에서 최대 장력이 5kgf/cm을 넘기지 않도록 했다. 설정 장력은 그림 2-2-1-27, 28에 보이는 바와 같이 유압펌프로 막재에 장력을 도입한 후 막장력 측정장치를 막면 위에 올리고, 막의 장력이 일정부분 완화되어 그림 2-2-1-29의 로드셀 센스 상에서 장력의 변화가 일어나지 않을 때의 값으로 기록했다.

표 2-1. 설정장력 패턴(단위: kgf/cm)

구 분		T_y	T_x	T_y	T_x	T_y	T_x	T_y	T_x	T_y
T_x T_y	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
$T_x/T_y = C_0$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
1/2or 2/1	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5

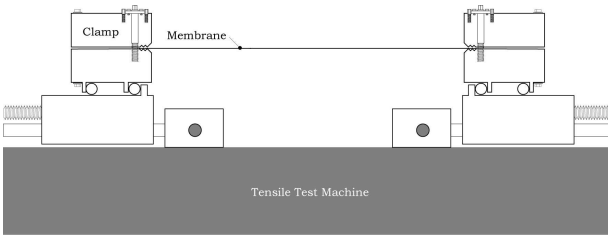


그림 2-2-1-26. 2축 인장장치 이미지

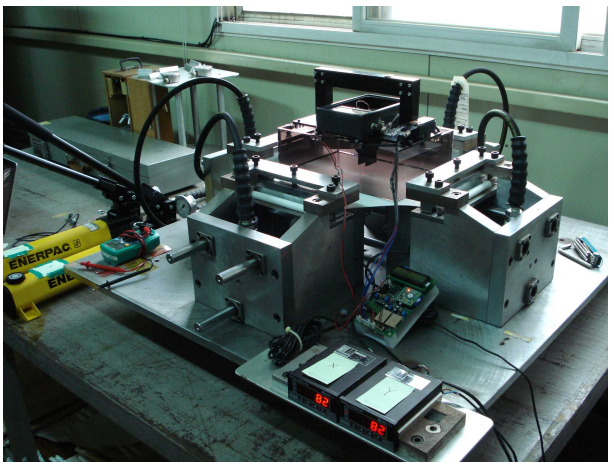


그림 2-2-1-27. 2축 인장장치 사진



그림 2-2-1-24. 세팅 막재 중량



그림 2-2-1-25. 2축 인장장치에 막재 세팅

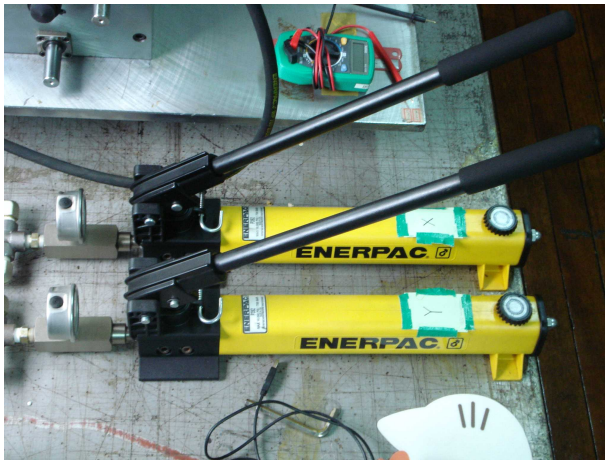


그림 2-2-1-28. 장력 도입용 유압펌프

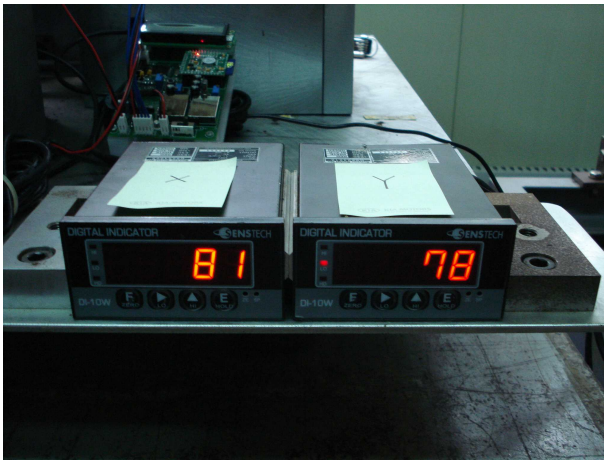


그림 2-2-1-29. 로드셀 센서

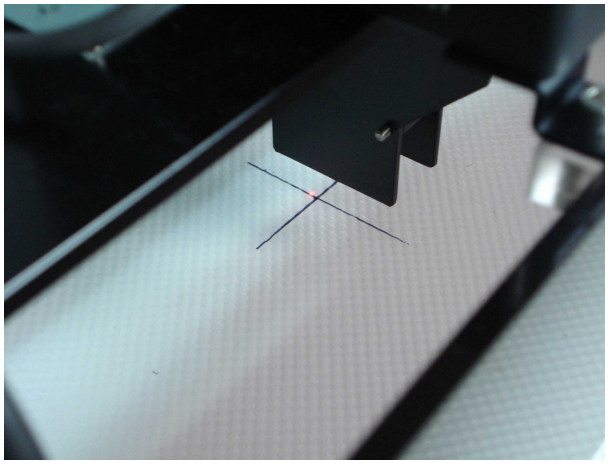


그림 2-2-1-30. 레이저 변위계 포인트 고정



그림 2-2-1-31. 레이저변위계 영점 조정

(3) 측정 방법

막면에 장력을 도입한 후, 길이 $\times b_1$의 아크릴 경계박스의 단변, 장변 방향을 막면의 2축 방향에 맞추어 그림 2-2-1-30에 보이는 바와 같이 레이저변위계의 계측점이 막면의 중앙에 오도록 측정장치를 설치하고, 그림 2-2-1-31과 같이 레이저 변위계의 영점을 조정한다.

전술한 화이트노이즈 음파를 이용해 막면을 가진하고, 일련의 측정이 종료한 후, 경계박스를 수직 축으로 90도 회전시켜 단변, 장변을 바꾸어 동일과정으로 측정을 한다. 즉, 설정된 한 장력패턴을 대상으로 경계박스의 설치 방향은 2종류로 모든 설정 장력 패턴에 대해 이상의 실험을 행한다. 2회째의 측정이 종료한 후 막의 진동변위 데이터를 이용해 마이크로컴퓨터 상에서 퓨리에 해석함으로써 설정 장력 하의 공진진동수가 구해진다.

통상 자연현상으로 1차 모드가 탁월하므로 막장력 측정을 위한 기초이론에서 도출한 막장력과 고유진동수와의 관계식(식(10))의 고유모드 m_1, n_1, m_2, n_2는 '1'로 되고, $a_1 = 20cm$, $b_1 = 30cm$때의 막면의 1차 공진진동수 f_1과, 장치를 90도 회전시킨 $a_2 = 30cm$, $b_2 = 20cm$의 막면의 1차 공진진동수 f_2를 측정함으로써 2축의 막장력이 각각 구해진다.

(4) 공진진동수 검출

공진진동수의 검출은 막장력 측정에 있어 가장 중요한 부분으로, 기존의 사인파 음원을 가진 음원으로 사용할 경우에는, 막면의 진폭 값과 입력 음원의 진동수를 동기 설정하고 막면의 진폭 값이 최대치를 취할 때의 시간을 특정해 그 때 막면에 입력한 음파의 진동수를 공진 진동수로 검출했다. 이 연구에서는 0에서 500Hz의 주파수 영역을 갖는 화이트노이즈를 가진(진동) 음원으로 사용한다. 화이트노이즈 가진에서는 모든 주파수가 동일한 크기로 동일 시간동안 방사되므로, 막면의 진폭을 측정해 퓨리에 변환함으로써, 막면이 어느 진동수에서 가장 탁월하게 진동했는가를 알 수 있다. 따라서 해석상의 탁월 혹은 피크 진동수가 특정한 장력 하의 공진진동수가 된다.

그림 2-2-1-32는 X축 방향으로 0.5kgf/cm, Y축 방향으로 0.5kgf/cm의 장력을 설정했을 때 측정으로부터 얻어진 파형 일부와 공진진동수를 각각 나타내고 있다. 이 경우 설정장력 X: 0.5kgf/cm, Y:0.5kgf/cm 하에서의 막면 공진진동수의 이론값 60.74Hz에 대해, 54.00Hz가 얻어짐을 나타내고 있다. 그림 2-2-1-33의 결과로부터 막 진동의 피크치가 완벽하게 얻어짐을 알 수 있다.

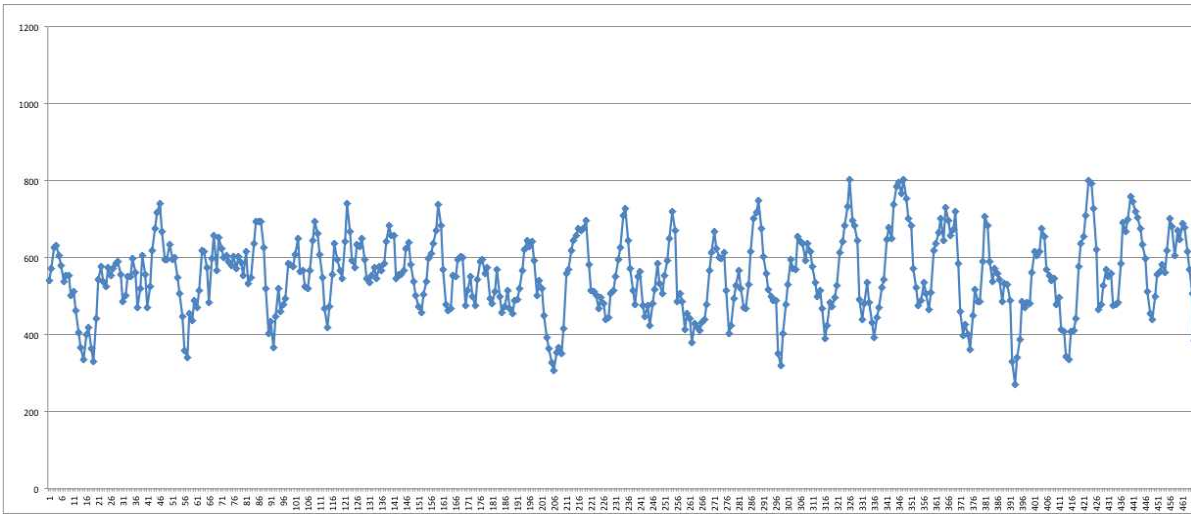


그림 2-2-1-32. 도입장력; X: 0.5kgf/cm, Y: 0.5kgf/cm 하에서의 막 진동 파형

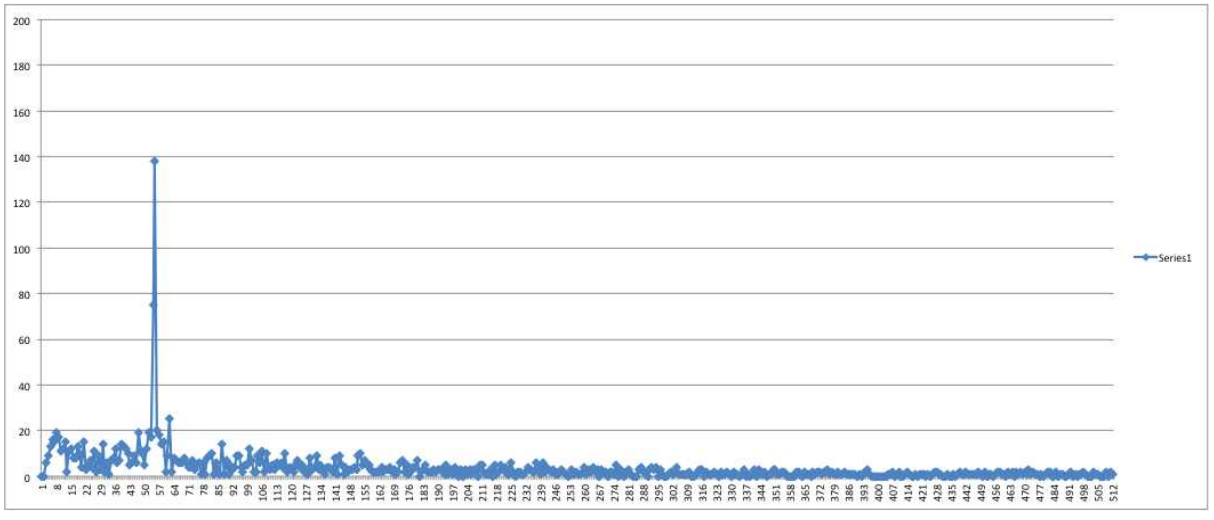


그림 2-2-1-33. 공진진동수 검출
(도입장력; X: 0.5kgf/cm, Y: 0.5kgf/cm, 이론적 공진진동수: 60.74Hz)

(5) 실험 모습

그림 2-2-1-34에서 39는 막장력 측정장치의 측정정확도 검증실험의 모습을 나타낸다.

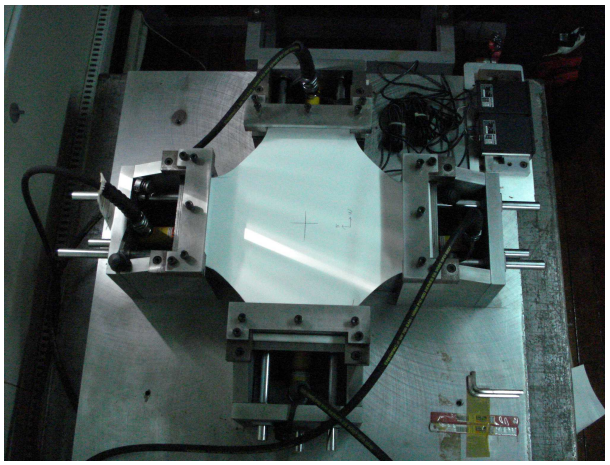


그림 2-2-1-34. 장력이 도입된 막재

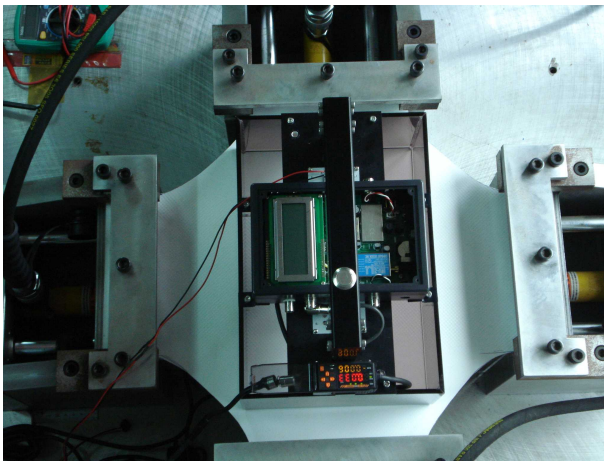


그림 2-2-1-35. 막장력 측정장치 세팅

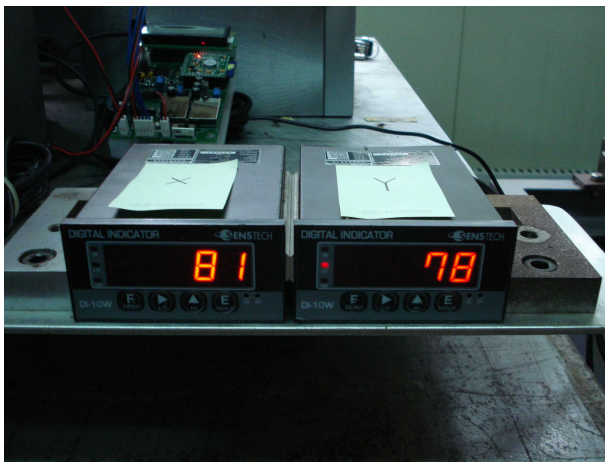


그림 2-2-1-36. 설정 장력 기록

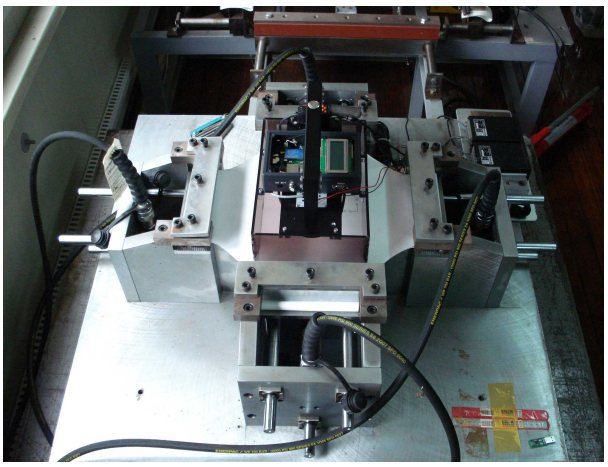


그림 2-2-1-37. 장력 측정 1

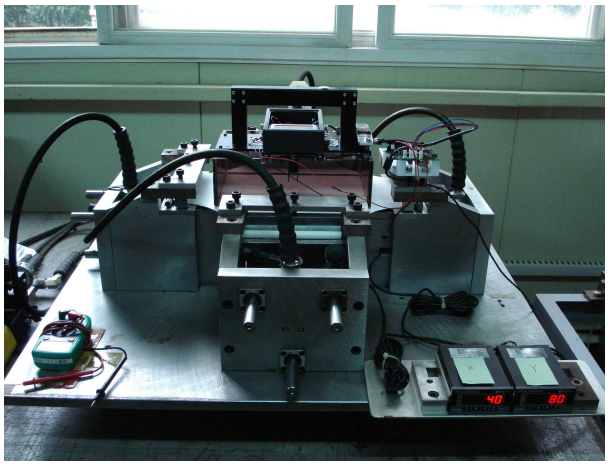


그림 2-2-1-38. 장력 측정 2



그림 2-2-1-39. 해석으로 공진진동수 검증

타. 검증실험 결과

검증결과를 표2-2에 나타낸다. 이 표의 $_x\ cm, T_{ty}/cm$은 2축 인장장치의 설정장력을, T_f는 특정 장력 하에서 막면이 가지는 이론적 공진진동수를, E_f는 실험으로 얻어진 공진진동수를, $T_{ex}/cm, T_{ey}/cm$는 실험으로 얻어진 측정장력을 각각 나타낸다. 또, $T_{ex}^{'}/cm, T_{ey}^{'}/cm$는 오차보정 계수로 얻어진 보정 장력을 나타낸다.

그림 2-2-1-40, 41, 42는 각각 X, Y방향의 설정장력 비가 1:1, 1:2, 2:1일 때의 장력을 나타낸 그래프이다. 동일하게 X축은 설정장력을, Y축은 실험으로 얻은 측정장력을 보정계수로 보정한 장력을 나타내고 있다. 또, 대각선은 정확도 100%를 나타내는 선으로 그 양옆으로 각각 오차 10, 20, 30%의 영역을 사선으로 나타내고 있다. 이 결과로부터 개발한 막장력 측정장치는 오차범위 10%를 약간 벗어나는 데이터도 있으나 거의 모든 설정장력과 장력 비에서 ±90% 이상의 정확도를 가짐을 알 수 있다.

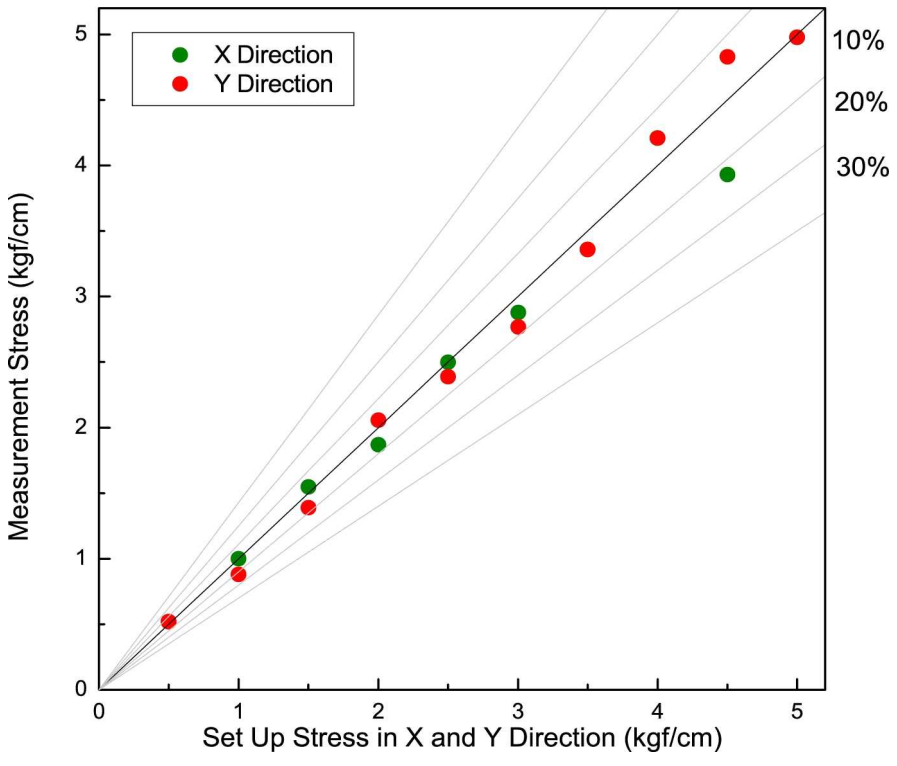


그림 2-2-1-40. X, Y방향의 설정장력비 1:1의 결과

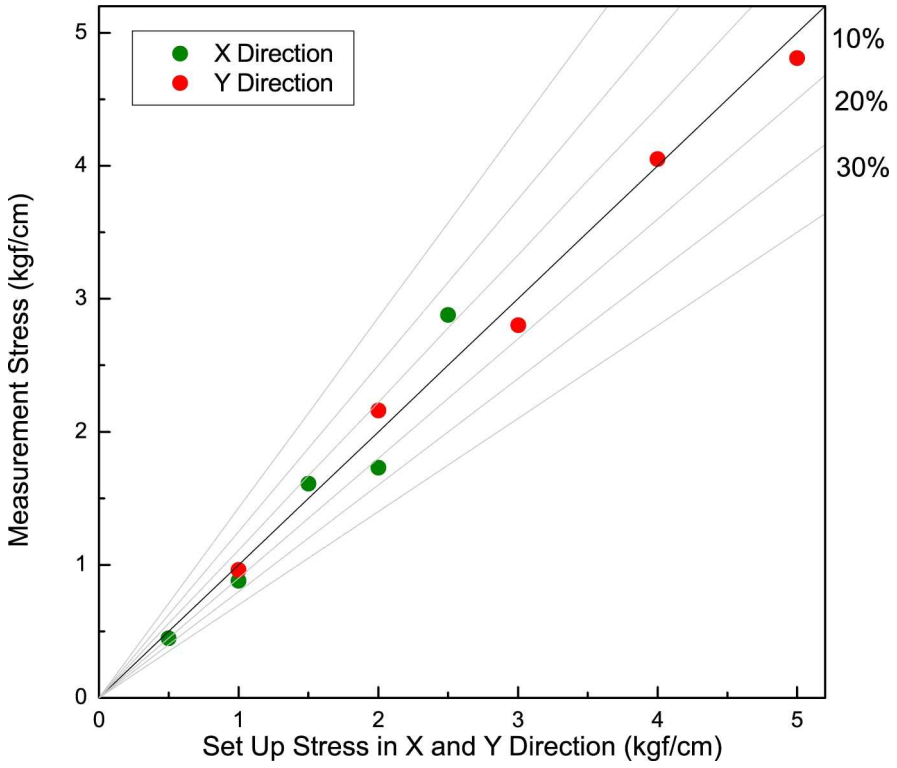


그림 2-2-1-41. X, Y방향의 설정장력비 1:2의 결과

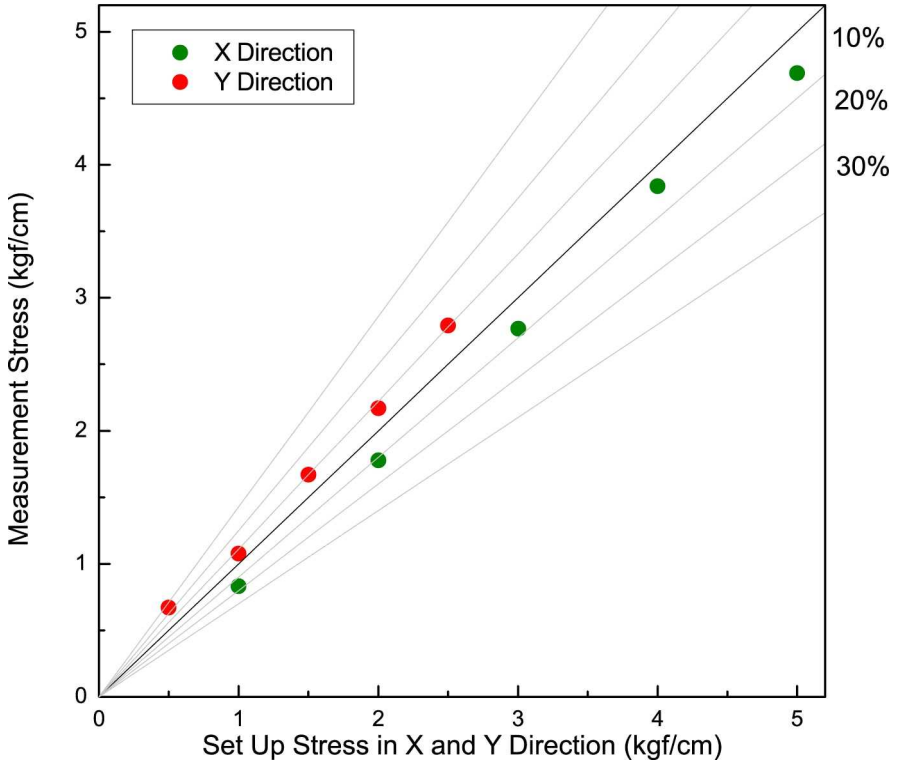


그림 2-2-1-42. X, Y방향의 설정장력비 2:1의 결과

표 2-2. 검증실험 결과

구분	번호		T_x	T_{ty}	T_{tx} cm	T_{ty}/cm	T_f	E_f	E_f/T_f	T_{ex}/cm	T_{ey}/cm	T_{ex}'/cm	T_{ey}'/cm	T_{ex}/T_{tx}	T_{ey}/T_{ty}	T_{ex}'/T_{tx}	T_{ey}'/T_{ty}
1:1	1	1	15	15	0.5	0.5	57.26	54.00	0.94	0.44	0.44	**0.52**	**0.52**	0.89	0.89	**1.04**	**1.04**
	2		15	15	0.5	0.5	57.26	54.00	0.94								
	3	2	30	30	1	1	80.98	76.00	0.94	0.92	0.80	**1.00**	**0.88**	0.92	0.80	**1.00**	**0.88**
	4		30	30	1	1	80.98	74.00	0.91								
	5	3	45	45	1.5	1.5	99.18	96.00	0.97	1.45	1.30	**1.55**	**1.39**	0.97	0.87	**1.03**	**0.93**
	6		45	45	1.5	1.5	99.18	94.00	0.95								
	7	4	60	60	2	2	114.52	109.00	0.95	1.76	1.93	**1.87**	**2.06**	0.88	0.97	**0.94**	**1.03**
	8		60	60	2	2	114.52	111.00	0.97								
	9	5	75	75	2.5	2.5	128.04	123.00	0.96	2.34	2.24	**2.50**	**2.39**	0.93	0.90	**1.00**	**0.96**
	10		75	75	2.5	2.5	128.04	122.00	0.95								
	11	6	90	90	3	3	140.26	132.00	0.94	2.69	2.58	**2.88**	**2.77**	0.90	0.86	**0.96**	**0.92**
	12		90	90	3	3	140.26	131.00	0.93								
	13	7	105	105	3.5	3.5	151.50	143.00	0.94	3.12	3.12	**3.36**	**3.36**	0.89	0.89	**0.96**	**0.96**
	14		105	105	3.5	3.5	151.50	143.00	0.94								
	15	8	120	120	4	4	161.96	159.00	0.98	3.86	3.86	**4.21**	**4.21**	0.96	0.96	**1.05**	**1.05**
	16		120	120	4	4	161.96	159.00	0.98								
	17	9	135	135	4.5	4.5	171.79	159.00	0.93	3.62	4.39	**3.93**	**4.83**	0.80	0.98	**0.87**	**1.07**
	18		135	135	4.5	4.5	171.79	165.00	0.96								
	19	10	150	150	5	5	181.08	172.00	0.95	4.51	4.51	**4.98**	**4.98**	0.90	0.90	**1.00**	**1.00**
	20		150	150	5	5	181.08	172.00	0.95								

표 2-2. 계속

구분	번호		T_x	T_{ty}	T_{tx} cm	T_{ty}/cm	T_f	E_f	E_f/T_f	T_{ex}/cm	T_{ey}/cm	T_{ex}'/cm	T_{ey}'/cm	T_{ex}/T_{tx}	T_{ey}/T_{ty}	T_{ex}'/T_{tx}	T_{ey}'/T_{ty}
1:2	21	11	15	30	0.5	1	65.48	59.00	0.90	0.37	0.88	**0.45**	**0.96**	0.75	0.88	**0.90**	**0.96**
	22		30	15	1	0.5	74.49	69.00	0.93								
	23	12	30	60	1	2	92.61	88.00	0.95	0.81	2.02	**0.88**	**2.16**	0.81	1.01	**0.88**	**1.08**
	24		60	30	2	1	105.35	104.00	0.99								
	25	13	45	90	1.5	3	113.42	110.00	0.97	1.51	2.61	**1.61**	**2.80**	1.00	0.87	**1.07**	**0.93**
	26		90	45	3	1.5	129.02	122.00	0.95								
	27	14	60	120	2	4	130.96	122.00	0.93	1.63	3.72	**1.73**	**4.05**	0.81	0.93	**0.87**	**1.01**
	28		120	60	4	2	148.98	142.00	0.95								
	29	15	75	150	2.5	5	146.42	145.00	0.99	2.69	4.37	**2.88**	**4.81**	1.07	0.87	**1.15**	**0.96**
	30		150	75	5	2.5	166.57	159.00	0.95								
2:1	31	16	30	15	1	0.5	74.49	68.00	0.91	0.75	0.60	**0.83**	**0.67**	0.75	1.19	**0.83**	**1.34**
	32		15	30	0.5	1	65.48	65.00	0.99								
	33	17	60	30	2	1	105.35	98.00	0.93	1.67	1.00	**1.78**	**1.08**	0.83	1.00	**0.89**	**1.08**
	34		30	60	1	2	92.61	89.00	0.96								
	35	18	90	45	3	1.5	129.02	122.00	0.95	2.58	1.57	**2.77**	**1.67**	0.86	1.04	**0.92**	**1.11**
	36		45	90	1.5	3	113.42	111.00	0.98								
	37	19	120	60	4	2	148.98	142.00	0.95	3.54	2.04	**3.84**	**2.17**	0.88	1.02	**0.96**	**1.09**
	38		60	120	2	4	130.96	128.00	0.98								
	39	20	150	75	5	2.5	166.57	157.00	0.94	4.27	2.61	**4.69**	**2.79**	0.85	1.04	**0.94**	**1.12**
	40		75	150	2.5	5	146.42	143.00	0.98								

카. 데이터 해석 및 축적 시스템 설계

(1) 무선 송수신 툴 자료조사

현재 국내에서 사용되는 무선 송수신 툴은 보통 1초당 10개(10Hz)의 데이터 송신 가능하고 최대 0.1초 간격으로 데이터 송신 가능하다. 또 이 데이터들의 압축을 통해 4,000개 정도의 데이터를 송수신하는데 있어 큰 문제는 없다. 고척스카이돔의 경우는 누름케이블에 케이블 장력 모니터링시스템이 도입되어 있다. 금액은 무선 송수신 장치를 포함한 중계기 14대의 총금액 4,000만 원 정도이다. 데이터의 무선 송수신 시스템에는 장력을 모니터링할 수 있는 하드웨어 뿐 아니라, 아웃풋 되는 데이터를 알기 쉽게 보여주는 인터페이스 또한 필요하고, 프로그램 작성에만 최소 1,000만 원 이상이 필요하다. 보통 무선 송수신 시스템은 무선 송수신 장치에 GPS를 포함하는데, 정밀 GPS일 경우에는 3,000에서 4,000만 원 이상이 필요할 뿐 아니라, 국가 승인이 요구된다. 무선 송수신 방식에는 지그비, 블루투스, CDMA 등이 있고, 그 중에서 CDMA방식이 안전성이 가장 뛰어나 막구조물의 헬스모니터링 시스템에는 CDMA 방식의 데이터 송수신이 유리하다고 판단되며 이용료도 월 23000원으로 저렴하게 이용할 수 있다. 근거리 방식(485방식)은 1,100m이내에서만 작동하고, 랜 방식은 최대 5km 반경 내에서도 사용가능하다. 최근에는 4G방식으로 동영상까지 전송 가능한 연구가 진행 중에 있다.

(2) 막장력 측정장치의 무선 송수신 시스템 제작

현재 국내에서 시판되는 무선 송수신 툴은 하나의 장치로 제품화되어 있고, 회사 제 각각의 특성을 지니고 있다. 따라서 기성 툴을 막장력 측정장치에 사용하고자 하면 툴 자체를 막장력 측정장치의 외부에 따로 부착해서 사용할 수는 있다. 그러나 막장력 측정은 스타디움 등, 층높이가 매우 높은 지붕 위에서 이뤄지므로 가능한 한 소형, 경량화되어야 한다. 따라서 이 연구에서는 기성의 무선 송수신 툴을 이용하지 않고, 마이크로컴퓨터 제작 시 전자회로에 내포시켜 일체화함으로써 목표 성능은 확보하고 장치의 크기는 줄이는 효과를 거두고자 했다.

연구계획서 상 원격 리모트 컨트롤 및 데이터 무선 송수신 시스템 개발은 2차년 과제로 책정되어 있다. 전자회로 설계의 특성 상 송수신 시스템을 따로 분리해 개발하고 추후에 작은 메인보드에 통합하기 어려울 뿐 아니라, 마이크로컴퓨터 전체를 구동할 로직을 다시 제작해야 하므로 개발비용이나 재료비가 이중으로 투입되어야 하는 모순이 있다. 따라서 2차년 연구개발 과제이나 당해 연도에서 개발하는 것이 합리적이라 판단해 개발을 진행했다. 그림 2-2-1-43, 44에 보이는 바와 같이 송수신 안테나를 이용해 최대 1km 범위 안에서 데이터를 받을 수 있도록 설계하고 제작했다.

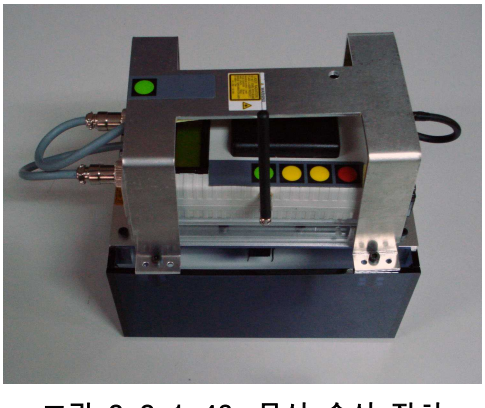


그림 2-2-1-43. 무선 송신 장치



그림 2-2-1-44. 무선 수신 장치

하. 2세대 막장력 측정장치

2세대 막장력 측정장치는 1차년에 개발된 시제품의 문제점을 찾아내고, 반복적 실험적 검증을 통해 측정 정확도를 향상시킬 뿐 아니라, 현장에서 사용하기 쉽게 휴대성, 사용성을 고려한 새로운 디자인의 올인원 측정장치로 성능 향상시킴으로써 포터블 막장력 측정장치의 완성도를 높였다.

(1) 포터블 막장력 측정장치의 새로운 디자인

전술한 바와 같이 1세대 막장력 측정장치는 측정이론을 검증함과 동시에 실용화를 위한 시제품으로 제작되었다. 시제품으로 측정이론의 검증과 요구되는 측정정확도를 실험을 통해 검증하고, 실용화의 가능성을 확인할 수 있었다. 그러나 1세대 측정장치는 측정을 담당하는 측정부와 측정 데이터를 해석하는 마이크로컴퓨터를 단순히 연결해 놓은 정도로, 구성 장치와 그들을 연결하는 전선이 노출되어 있고, 비효율적 버튼 배치 등 외관 상 측정장치로서 미흡했다. 따라서 당해연차에는 세련된 올인원 장치로 디자인함으로써 휴대성과 사용성을 향상시키고자 했다.

그림 2-2-1-45, 46는 새로 디자인한 포터블 측정장치를 나타낸다. 특히, 2세대 포터블 막장력 측정장치는 분해가 가능하도록 디자인함으로써 쉬운 관리가 가능하도록 했다. 새로 제작한 2세대 포터블 막장력 측정장치의 실재 사진을 그림 2-2-1-47에 나타낸다.



그림 2-2-1-45. 2세대 포터블 막장력 측정장치 투시도

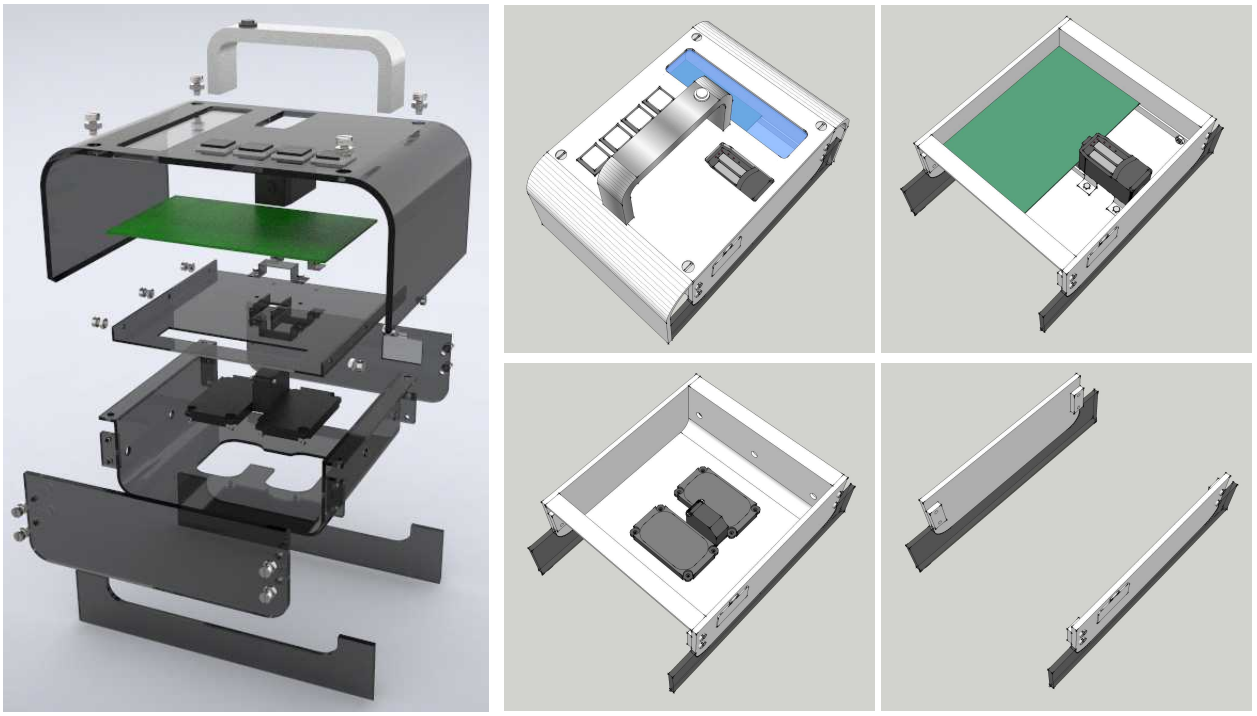


그림 2-2-1-46. 2세대 포터블 막장력 측정장치 디자인



그림 2-2-1-47. 2세대 포터블 막장력 측정장치

(2) 배터리 성능개선

1세대 막장력 측정장치 시제품에 적용된 전원 구동력은 일반 가정용 전원과 일반 시중에서 쉽게 구할 수 있는 AA 배터리 4개이다. 실험실 검증에는 상설된 가정용 전압을 사용하고, 현장측정은 AA 배터리로 구동되게 하는 2-Way 구동 시스템이다. 그림 2-2-1-48에 보이는 바와 같이 AA 배터리는 시중에서 쉽게 구매가 가능한 장점이 있으나, 현장측정에는 부적합하다는 것을 확인했다. 일반적인 막구조물은 몇 판의 막재의 접합으로 이루어진 패널로 구성되는데, 통상 한 패널에서 2-3곳을 측점으로 삼는다. 20개의 패널로 구성된 작은 막구조물을 상정하더라도 50곳 이상의 측점이 발생하고, 한 측점에서 2회의 측정으로 장력을 검출하므로, 100회 이

상의 측정을 요한다.

그러나 AA 배터리는 경험 상 평균 20회의 측정으로 소진되므로, 높은 막구조물의 상부에서 배터리를 갈아 끼워야 하는 불편이 있어 현장 측정 효율을 크게 저해하는 요소가 되었다. 따라서 2세대 측정장치는 기존의 AA 배터리 구동 시스템 대신, 충전식 배터리를 채용해 구동 효율을 높이고자 했다. 그림 2-2-1-49에 나타내는 충전식 배터리는 1회 충전으로 100회 이상의 측정이 가능하므로, 현장 사용성을 크게 개선시켰다.

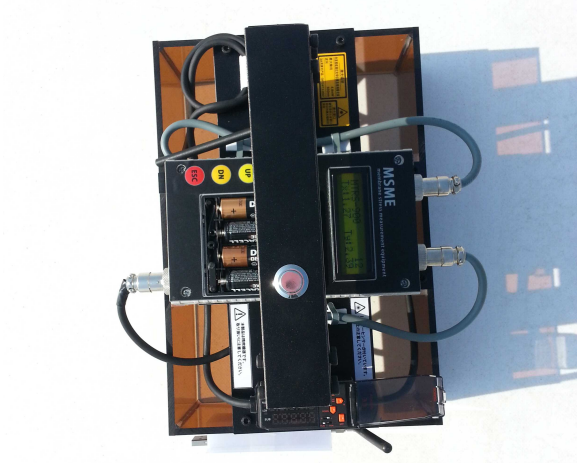


그림 2-2-1-48. 기존 AA 배터리



그림 2-2-1-49. 충전식 배터리

(3) 해석시간 단축

1세대 측정장치가 막의 진동 데이터를 레이저 변위계로부터 받아 FFT해석을 거쳐 공진진동수를 액정에 표시하는데 걸리는 시간은 대략 15초 내외이다. 이 시간은 현장에서 불안정한 자세로 측정을 행해야 할 때에는 매우 긴 시간으로, 측정자의 안전을 위협할 수도 있다.

2세대 측정장치는 그림 2-2-1-50과 같이 측정 플로차트를 개선하고, 그림 2-2-1-51에 나타내는 바와 같이 회로도를 구성해 소프트웨어적으로 성능향상을 꾀함과 동시에, 마이크로컴퓨터의 메인보드 교체, RAM 성능 향상 등의 하드웨어를 새로 설계·제작함으로써 측정시간을 대폭 줄여 1초 이내의 해석결과 표시를 가능케 했다.

(4) FFT 해석결과 액정 표시

음파를 이용한 막장력 측정장치는 막의 진동변위를 레이저 변위계로 샘플링하고, 그 데이터를 FFT 변환함으로써 일정 장력 하에서 막재의 고유진동수를 검출한다. 이 때 FFT의 Power Spectrum의 크기와 그 형태가 측정오류를 판단하는 중요한 요소가 된다.

1세대 측정장치는 FFT 해석 결과를 저장장치에 저장하고, 단순히 Power Spectrum의 크기만을 액정에 표시했다. Power Spectrum의 크기만으로도 숙련자는 일정 부분 오류를 파악할 수 있으나, 높은 장력 하에서 막의 진동 변위가 작아 어느 주파수가 탁월했는지를 해석으로 찾아내기 어려울 때에는 크기 이외에도 그 형태를 보고 판단할 필요가 있다. 2세대 측정장치는 장치 사용에 미숙한 초보자도 측정 오류를 판단할 수 있도록 FFT 해석으로 얻어지는 Power Spectrum을 그림 2-2-1-51과 같이 표시하고, 지정한 Power이하일 경우에는 오류메시지를 전송함과 동시에 재측정을 유도함으로써, 측정오류를 시스템 상에서 차단하고자 했다.

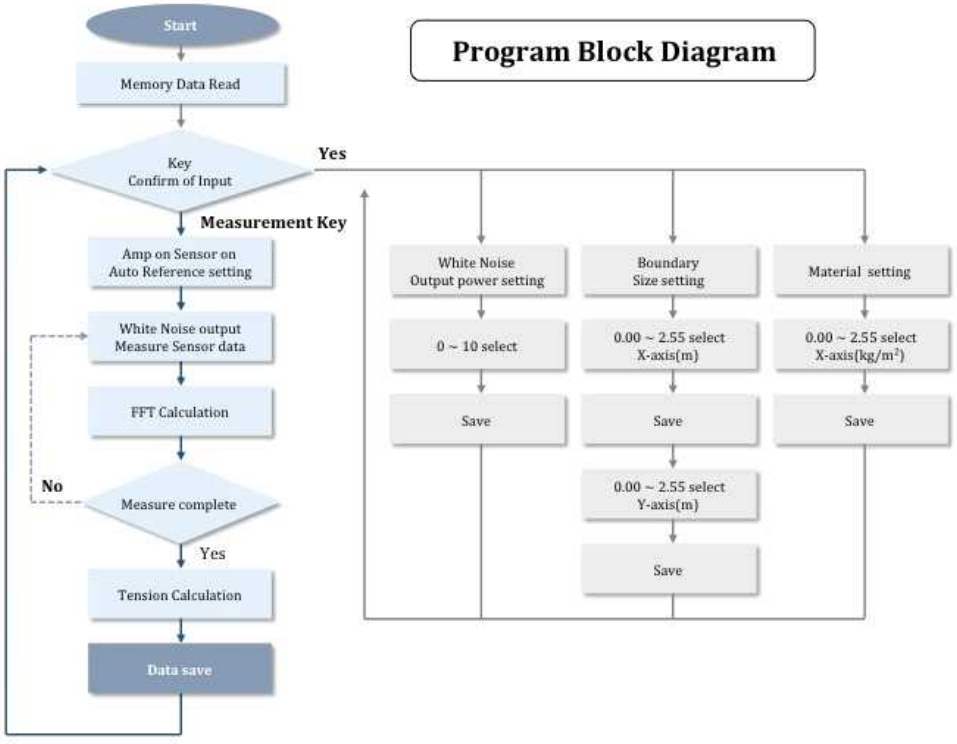


그림 2-2-1-50. 2세대 포터블 막장력 측정장치의 플로차트

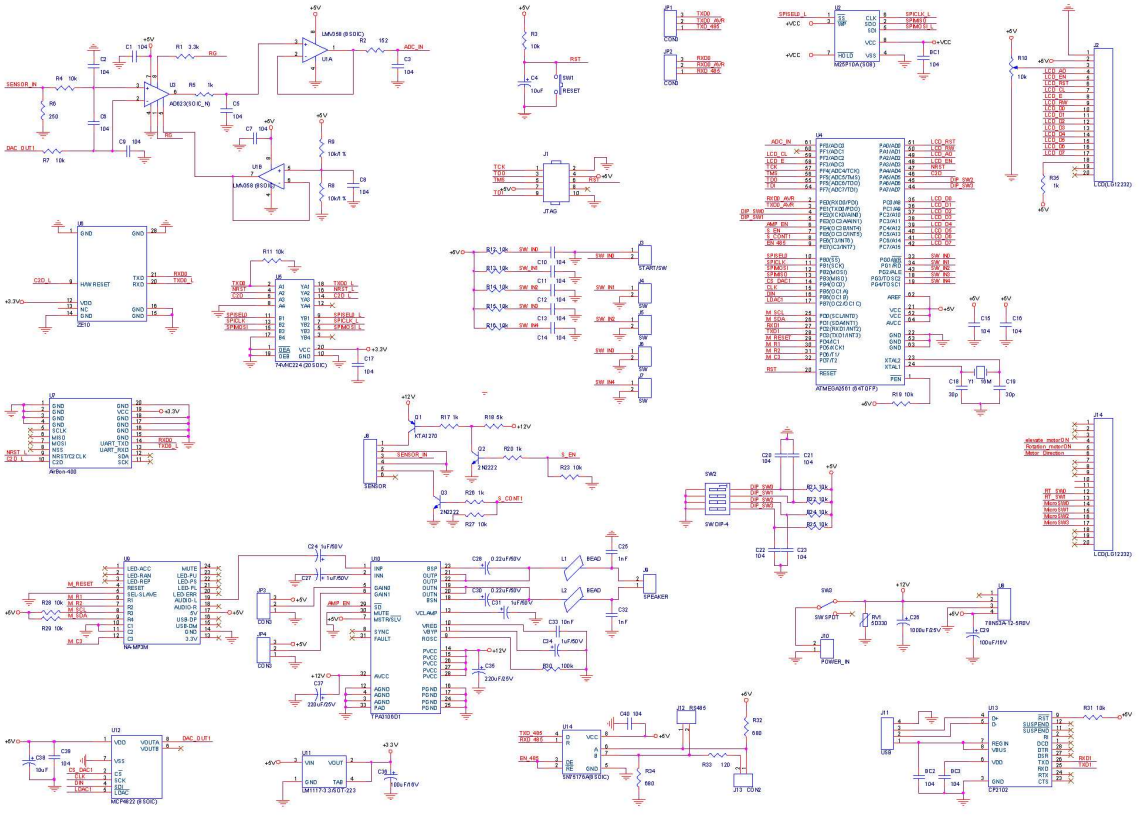


그림 2-2-1-51. 2세대 포터블 막장력 측정장치의 회로도

(5) (주)타이가 충주공장 검증 실험

2세대 포터블 막장력 측정장치의 측정정확도와 안정성을 2축 인장장치를 이용해 검증했다. 사용 막재는 막면밀도 1.35kg/㎡을 갖는 국내 생산 PVDF로 현재 국내에서 가장 일반적으로 사용되는 C종 PVC막재이다. 2축 인장장치는 실험 막재에 실시간으로 원하는 장력 도입이 가능하다. 장력은 유압펌프로 도입하며, 각 축에 설치된 로드셀의 수치를 읽어 설정 장력을 기록한다. 막의 진동범위를 결정할 아크릴 경계박스의 크기는 18cm×27cm이다.

도입 장력은 X, Y축의 장력비가 1:1인 등장력으로 0.5kgf/cm에서 7.0kgf/cm까지 0.5kgf/cm 간격으로 증가시켜 가면서 총 14가지의 장력을 도입해 검증 실험했다. 설정 장력은 그림 2-2-1-53에 보이는 바와 같이 유압펌프로 막재에 장력을 도입한 후 막장력 측정장치를 막면 위에 올리고, 막의 장력이 일정 부분 완화되어 그림 2-2-1-54의 로드셀 센스 상에서 장력의 변화가 일어나지 않을 때의 값으로 기록했다. 검증실험 모습을 그림 2-2-1-55에서 2-2-1-60에 나타낸다.

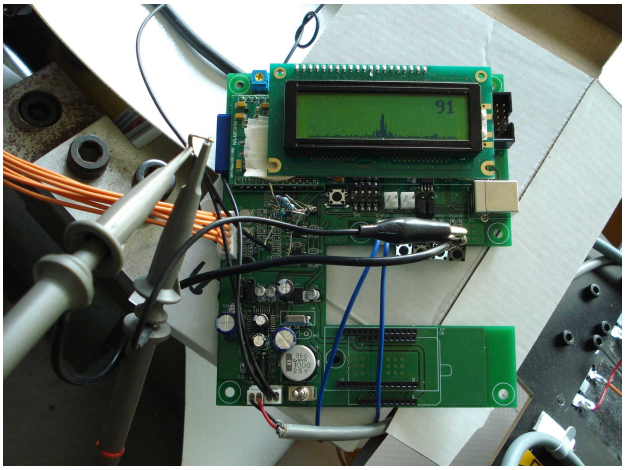
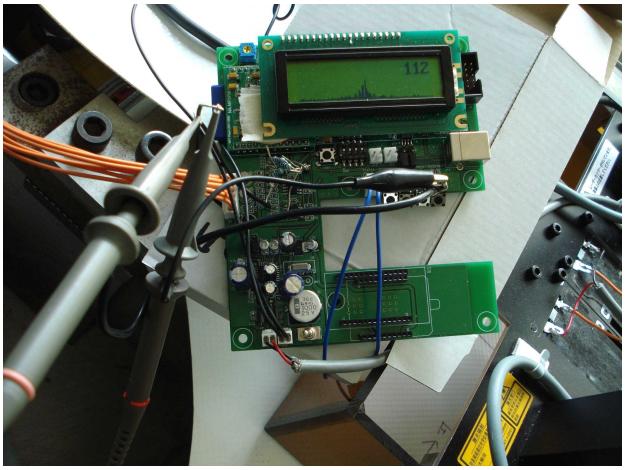



그림 2-2-1-52. FFT 해석결과의 액정표시

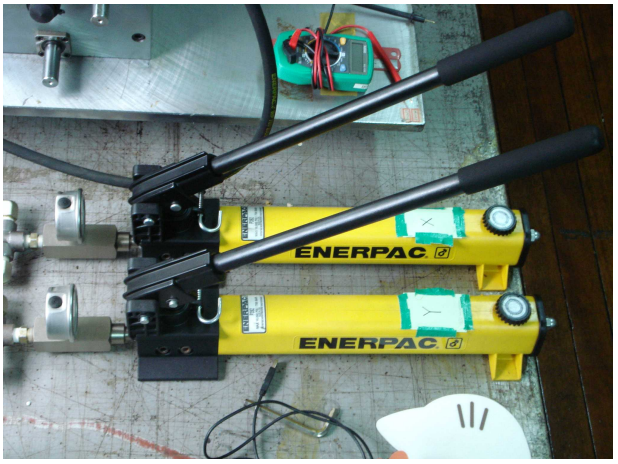


그림 2-2-1-53. 장력 도입용 유압펌프

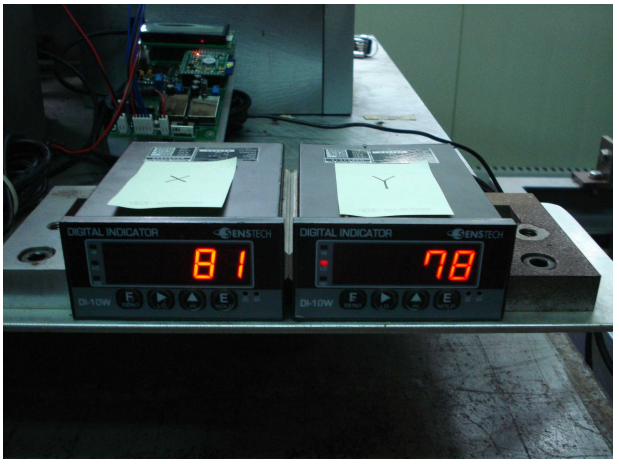


그림 2-2-1-54. 로드셀 센서

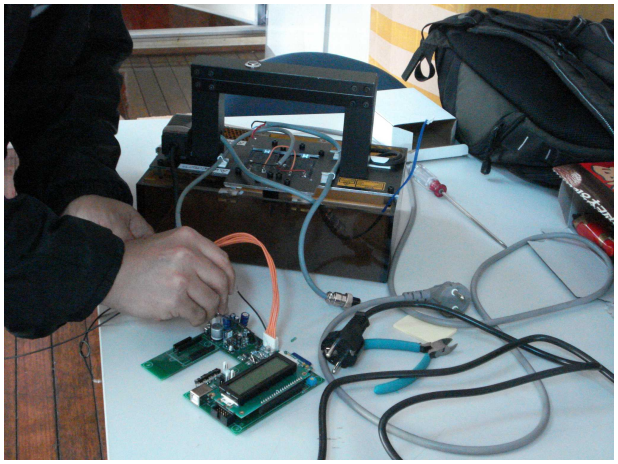


그림 2-2-1-55. 막장력 측정장치 세팅

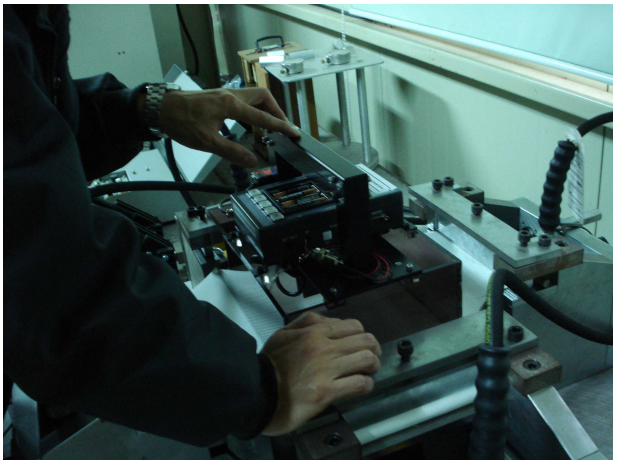


그림 2-2-1-56. 측정 시작

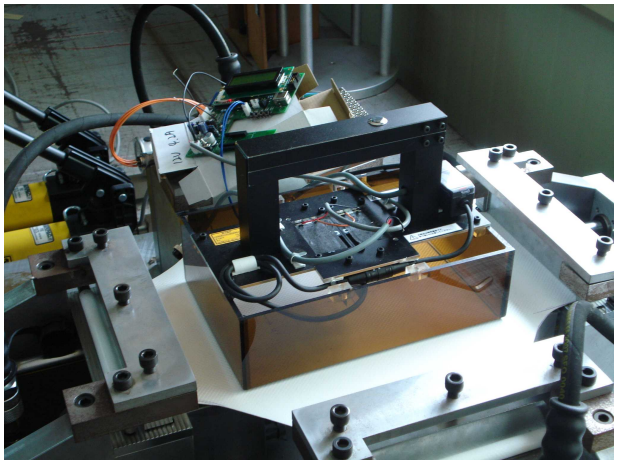


그림 2-2-1-57. 막장력 측정

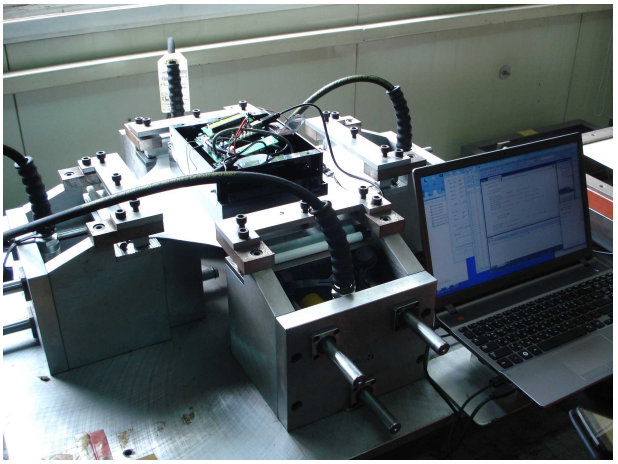


그림 2-2-1-58. PC 해석

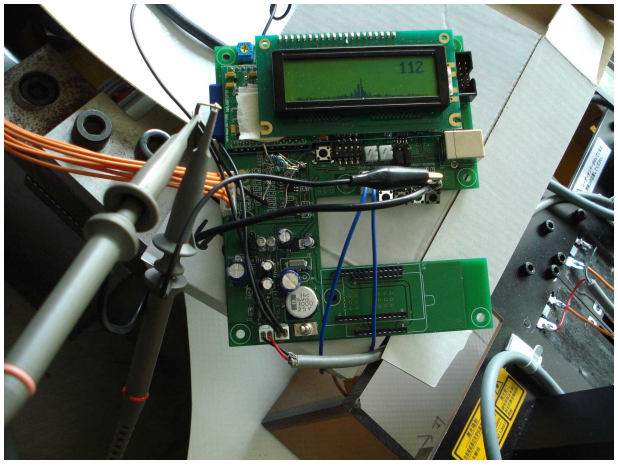


그림 2-2-1-59. FFT 해석결과 액정표시

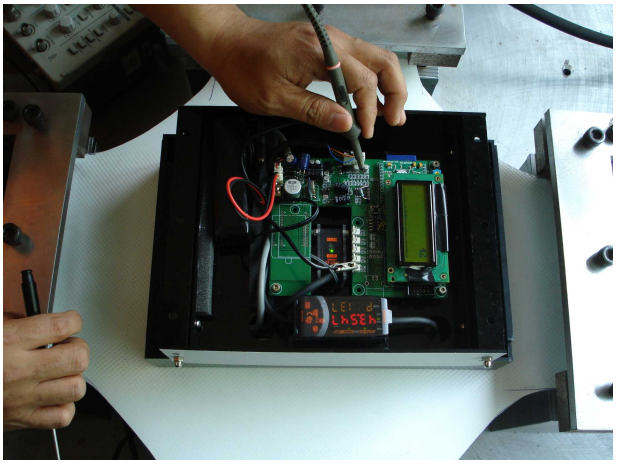


그림 2-2-1-60. 측정장치 수정

(6) (주)타이가 충주공장 검증 실험

검증결과를 표 2-3에 나타낸다. 이 표의 $_x\ cm, T_{ty}/cm$은 2축 인장장치의 도입장력을 나타내고, T_f는 특정 장력 하에서 막면이 가지는 이론적 공진진동수를 나타낸다. 또, E_f는 실험으로 얻어진 공진진동수를 나타내고, $T_{ex}/cm, T_{ey}/cm$는 각각 실험으로 얻어진 측정장력을 나타낸다. 더욱이 $T_{ex}^{'}/cm, T_{ey}^{'}/cm$는 오차보정 계수로 얻어진 보정장력을 나타낸다.

그림 2-2-1-61은 각각 X, Y방향의 설정장력 비가 1:1일 때의 측정장력을 나타낸 그래프이다. X축은 설정장력을 나타내고, Y축은 실험으로 얻은 측정장력을 보정계수로 보정한 장력을 나타내고 있다. 또, 대각선은 정확도 100%를 나타내는 선으로 그 양옆으로 각각 오차 10, 20, 30%의 영역을 사선으로 나타내고 있다. 검증 실험 결과로부터 오차범위 10%를 약간 벗어나는 데이터도 있으나, 2세대 포터블 막장력 측정장치 또한 대부분의 설정장력에서 ±90% 이상의 정확도를 가짐을 확인했다.

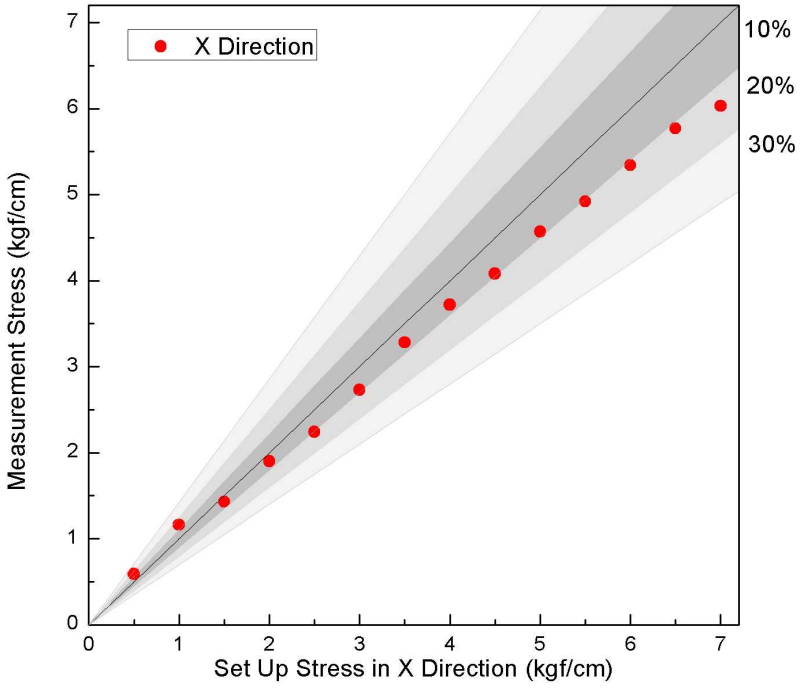


그림 2-2-1-61. X 방향의 측정 결과

표 2-3. (주)타이가 충주공장 검증실험 결과

구분	번호		T_x	T_{ty}	T_{tx} cm	T_{ty}/cm	T_f	E_f	E_f/T_f	T_{ex}/cm	T_{ey}/cm	T_{ex}'/cm	T_{ey}'/cm	T_{ex}/T_{tx}	T_{ey}/T_{ty}	T_{ex}'/T_{tx}	T_{ey}'/T_{ty}
1:1	1	1	15	15	0.5	0.5	63.62	70.00	1.10	0.61	0.61	**0.59**	**0.59**	1.21	1.21	**1.18**	**1.18**
	2		15	15	0.5	0.5	63.62	70.00	1.10								
	3	2	30	30	1	1	89.98	93.00	1.03	1.07	1.07	**1.16**	**1.16**	1.07	1.07	**1.16**	**1.16**
	4		30	30	1	1	89.98	93.00	1.03								
	5	3	45	45	1.5	1.5	110.20	102.00	0.93	1.29	1.29	**1.43**	**1.43**	0.86	0.86	**0.95**	**0.95**
	6		45	45	1.5	1.5	110.20	102.00	0.93								
	7	4	60	60	2	2	127.25	116.00	0.91	1.66	1.66	**1.90**	**1.90**	0.83	0.83	**0.95**	**0.95**
	8		60	60	2	2	127.25	116.00	0.91								
	9	5	75	75	2.5	2.5	142.27	125.00	0.88	1.93	1.93	**2.24**	**2.24**	0.77	0.77	**0.90**	**0.90**
	10		75	75	2.5	2.5	142.27	125.00	0.88								
	11	6	90	90	3	3	155.85	137.00	0.88	2.32	2.32	**2.73**	**2.73**	0.77	0.77	**0.91**	**0.91**
	12		90	90	3	3	155.85	137.00	0.88								
	13	7	105	105	3.5	3.5	168.34	149.00	0.89	2.74	2.74	**3.28**	**3.28**	0.78	0.78	**0.94**	**0.94**
	14		105	105	3.5	3.5	168.34	149.00	0.89								
	15	8	120	120	4	4	179.96	158.00	0.88	3.08	3.08	**3.72**	**3.72**	0.77	0.77	**0.93**	**0.93**
	16		120	120	4	4	179.96	158.00	0.88								
	17	9	135	135	4.5	4.5	190.87	165.00	0.86	3.36	3.36	**4.08**	**4.08**	0.75	0.75	**0.91**	**0.91**
	18		135	135	4.5	4.5	190.87	165.00	0.86								
	19	10	150	150	5	5	201.20	174.00	0.86	3.74	3.74	**4.57**	**4.57**	0.75	0.75	**0.91**	**0.91**
	20		150	150	5	5	201.20	174.00	0.86								
	21	11	165	165	5.5	5.5	211.02	180.00	0.85	4.00	4.00	**4.92**	**4.92**	0.73	0.73	**0.89**	**0.89**
	22		165	165	5.5	5.5	211.02	180.00	0.85								
	23	12	180	180	6.0	6.0	220.40	187.00	0.85	4.32	4.32	**5.34**	**5.34**	0.72	0.72	**0.89**	**0.89**
	24		180	180	6.0	6.0	220.40	187.00	0.85								
	25	13	195	195	6.5	6.5	229.40	194.00	0.85	4.65	4.65	**5.77**	**5.77**	0.72	0.72	**0.89**	**0.89**
	26		195	195	6.5	6.5	229.40	194.00	0.85								
	27	14	210	210	7.0	7.0	238.06	198.00	0.83	4.84	4.84	**6.03**	**6.03**	0.69	0.69	**0.86**	**0.86**
	28		210	210	7.0	7.0	238.06	198.00	0.83								

(7) 일본 츄코(CHUKOH)공장 검증 실험

1차년에 연구를 통해 개발된 1세대 포터블 막장력 측정장치의 측정정확도는 (주)타이가의 2축 인장장치로 검증되었다. 그러나 측정정확도의 현장 신뢰성 확보와 해외시장 진출을 위한 글로블 신뢰성 검증을 위해, 그림 2-2-1-62에 보이는 바와 같이, 일본 국내 막재 생산 1위 업체인 츄코공장의 2축 인장장치를 임대하여 추가 검증을 수행하였다.

검증실험에 사용된 막재는 현재 국내에서 일반적으로 사용되는 A종 PTFE 막재로, 막면밀도 1.00kg/㎡을 갖는 것을 사용하였다. 도입장력은 표 2-4와 같이 X, Y축의 장력비가 1:1, 1:2, 2:1의 세 가지 패턴으로 0.5kgf/cm에서 5.0kgf/cm까지 0.5kgf/cm 간격으로 증가시키면서 총 20가지의 장력을 적용하여 실험했다. 막재가 파손되는 것을 방지하기 위해 모든 실험에서 최대 장력이 5.0kgf/cm를 초과하지 않도록 했다.

표 2-4. 설정장력 패턴(단위:kgf/cm)

구 분		T_y	T_x	T_y	T_x	T_y	T_x	T_y	T_x	T_y
T_x T_y	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
T_x $T_y = C_0$ (1/2 또는 2/1)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5

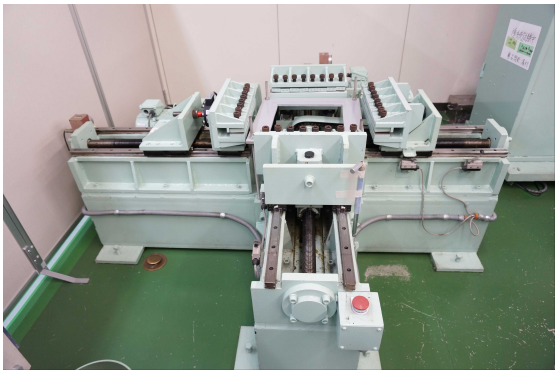


그림 2-2-1-62. 일본 츄코공장의 2축 인장 장치



그림 2-2-1-63. 2축 인장 장치 장력 표시부

도입장력은 그림 2-2-1-63과 같이 인장장치 도입장력 표시부의 수치를 읽어 기록하였다. 막의 진동범위를 결정할 아크릴 경계박스의 크기는 18cm×27cm로 고정하고 개발한 1세대 막장력 측정장치의 신뢰성 검증실험을 수행하였다. 그림 2-2-1-64에서 그림 2-2-1-71은 검증실험 모습을 나타낸다.

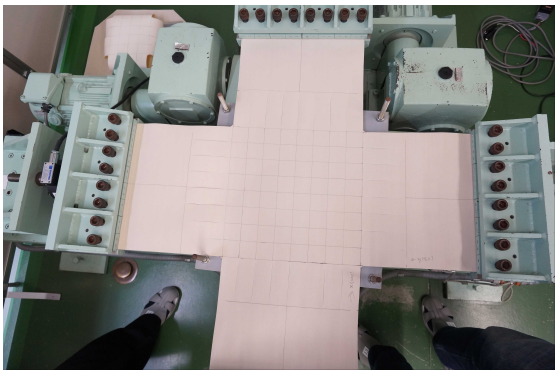


그림 2-2-1-64. 2축 인장장치에 막재 세팅



그림 2-2-1-65. 막장력 측정장치 준비

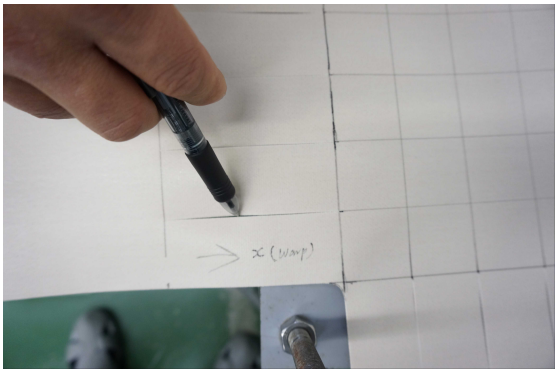


그림 2-2-1-66. 막재 세팅 후 방향 확인(X방향)

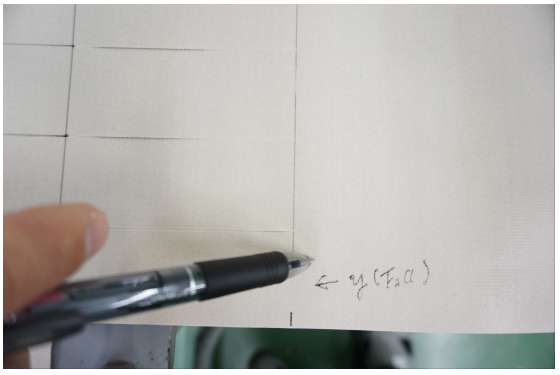


그림 2-2-1-67. 막재 세팅 후 방향 확인(Y방향)

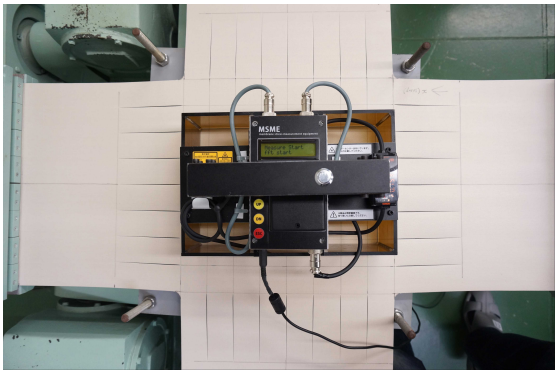


그림 2-2-1-68. 막장력 측정 (1)

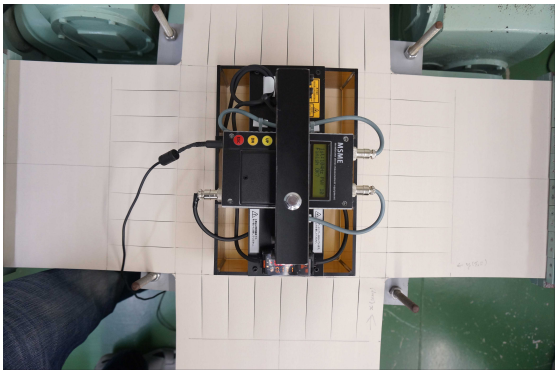


그림 2-2-1-69. 막장력 측정 (2)



그림 2-2-1-70. 고유진동수 확인



그림 2-2-1-71. 막장력 확인

(8) 일본 츄코(CHUKOH)공장 검증 실험

검증결과를 표 2-5에 나타낸다. 여기서, $_x\ cm, T_{ty}/cm$은 2축 인장장치의 도입장력을 나타내고, T_f는 특정 장력 하에서 막면이 가지는 이론적 공진진동수를 나타낸다. 또, E_f는 실험으로 얻어진 공진진동수를 나타내고, $T_{ex}/cm, T_{ey}/cm$는 각각 실험으로 얻어진 측정장력을 나타낸다. 더욱이 $T_{ex}^{'}/cm, T_{ey}^{'}/cm$는 오차보정 계수로 얻어진 보정장력을 나타낸다.

그림 2-2-1-72, 73, 74는 각각 X, Y방향의 도입장력 비가 1:1, 1:2, 2:1일 때의 측정장력을 나타낸 그래프이다. X축은 도입장력을 나타내고, Y축은 실험으로 얻은 측정장력을 보정계수로 보정한 보정장력을 나타내고 있다. 또한 그래프를 가로지르는 사선은 결과의 정확도를 보여주는 목표장력을 나타내고, 그 주위의 회색은 오차 10%, 20%, 30%의 영역을 표시하고 있다. 실험결과로부터 1차년에 개발된 1세대 포터블 막장력 측정장치는 오차범위 10%를 약간 벗어나는 데이터도 있으나, 거의 모든 도입장력과 장력 비에서 ±85%이상의 정확도를 가짐을 알 수 있다. 이 결과는 (주)타이가 충주공장의 검증결과와 동일하다고 판단할 수 있다.

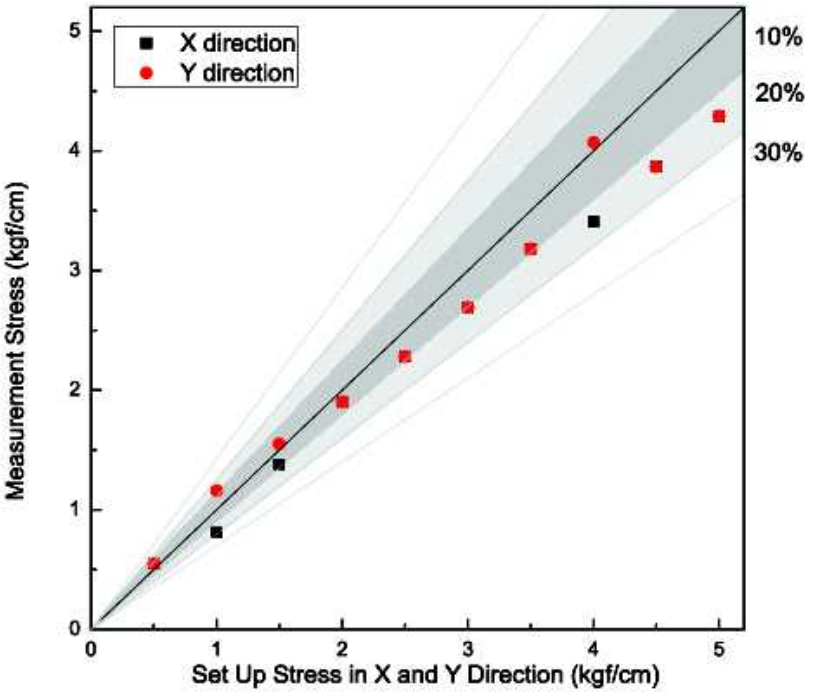


그림 2-2-1-72. X, Y방향의 도입장력 비 1:1의 결과

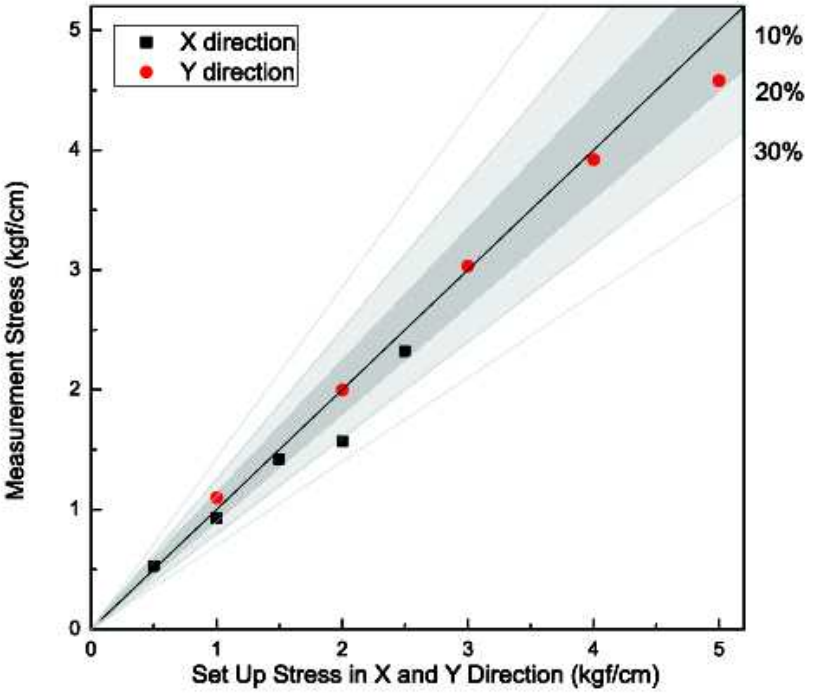


그림 2-2-1-73. X, Y방향의 도입장력 비 1:2의 결과

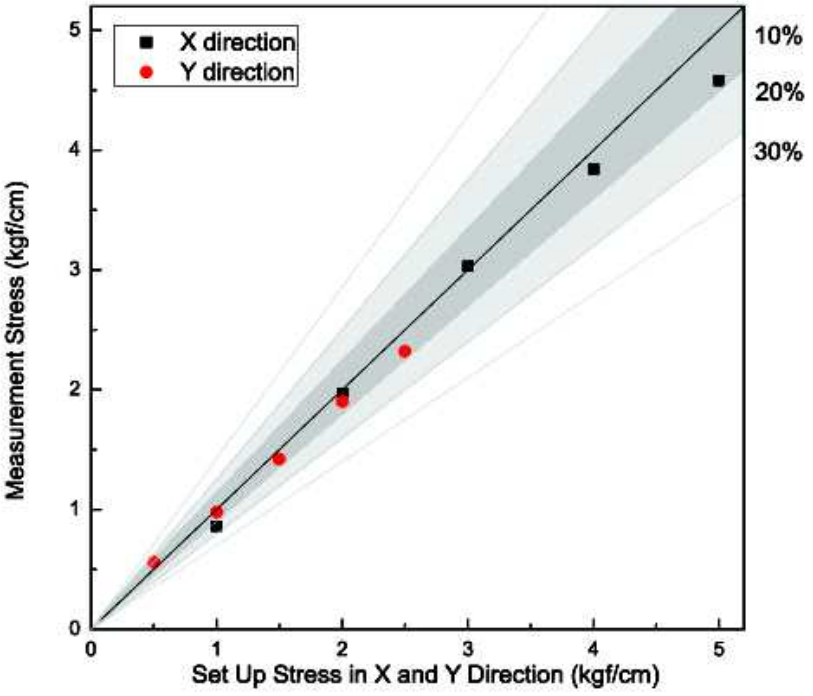


그림 2-2-1-74. X, Y방향의 도입장력 비 2:1의 결과

표 2-5. 일본 츄코공장 검증실험 결과(장력 비 1:1)

구분	번호		T_x	T_{ty}	T_{tx} cm	T_{ty}/cm	T_f	E_f	E_f/T_f	T_{ex}/cm	T_{ey}/cm	T_{ex}'/cm	T_{ey}'/cm	T_{ex}/T_{tx}	T_{ey}/T_{ty}	T_{ex}'/T_{tx}	T_{ey}'/T_{ty}
1:1	1	1	15	15	0.5	0.5	63.62	68.00	1.07	0.57	0.57	**0.55**	**0.55**	1.14	1.14	**1.10**	**1.10**
	2		15	15	0.5	0.5	63.62	68.00	1.07								
	3	2	30	30	1	1	89.98	84.00	0.93	0.79	1.06	**0.81**	**1.16**	0.79	1.06	**0.81**	**1.16**
	4		30	30	1	1	89.98	89.00	0.99								
	5	3	45	45	1.5	1.5	110.20	102.00	0.93	1.24	1.38	**1.38**	**1.55**	0.83	0.92	**0.92**	**1.03**
	6		45	45	1.5	1.5	110.20	104.00	0.94								
	7	4	60	60	2	2	127.25	116.00	0.91	1.66	1.66	**1.90**	**1.90**	0.83	0.83	**0.95**	**0.95**
	8		60	60	2	2	127.25	116.00	0.91								
	9	5	75	75	2.5	2.5	142.27	126.00	0.89	1.96	1.96	**2.28**	**2.28**	0.78	0.78	**0.91**	**0.91**
	10		75	75	2.5	2.5	142.27	126.00	0.89								
	11	6	90	90	3	3	155.85	136.00	0.87	2.28	2.28	**2.69**	**2.69**	0.76	0.76	**0.90**	**0.90**
	12		90	90	3	3	155.85	136.00	0.87								
	13	7	105	105	3.5	3.5	168.34	147.00	0.87	2.67	2.67	**3.18**	**3.18**	0.76	0.76	**0.91**	**0.91**
	14		105	105	3.5	3.5	168.34	147.00	0.87								
	15	8	120	120	4	4	179.96	156.00	0.87	2.85	3.36	**3.41**	**4.07**	0.71	0.84	**0.85**	**1.02**
	16		120	120	4	4	179.96	161.00	0.89								
	17	9	135	135	4.5	4.5	190.87	161.00	0.84	3.20	3.20	**3.87**	**3.87**	0.71	0.71	**0.86**	**0.86**
	18		135	135	4.5	4.5	190.87	161.00	0.84								
	19	10	150	150	5	5	201.20	169.00	0.84	3.53	3.53	**4.29**	**4.29**	0.71	0.71	**0.86**	**0.86**
	20		150	150	5	5	201.20	169.00	0.84								

표 2-5. 계속 (장력 비 1:2, 2:1)

구분	번호		T_x	T_{ty}	T_{tx} cm	T_{ty}/cm	T_f	E_f	E_f/T_f	T_{ex}/cm	T_{ey}/cm	T_{ex}'/cm	T_{ey}'/cm	T_{ex}/T_{tx}	T_{ey}/T_{ty}	T_{ex}'/T_{tx}	T_{ey}'/T_{ty}
1:2	21	11	15	30	0.5	1	72.76	75.00	1.03	0.55	1.01	**0.53**	**1.09**	1.11	1.01	**1.05**	**1.09**
	22		30	15	1	0.5	82.77	84.00	1.01								
	23	12	30	60	1	2	102.89	96.00	0.93	0.87	1.73	**0.92**	**1.99**	0.87	0.87	**0.92**	**1.00**
	24		60	30	2	1	117.05	109.00	0.93								
	25	13	45	90	1.5	3	126.02	116.00	0.92	1.27	2.54	**1.41**	**3.02**	0.85	0.85	**0.94**	**1.01**
	26		90	45	3	1.5	143.36	132.00	0.92								
	27	14	60	120	2	4	145.52	126.00	0.87	1.39	3.24	**1.57**	**3.91**	0.70	0.81	**0.78**	**0.98**
	28		120	60	4	2	165.54	147.00	0.89								
	29	15	75	150	2.5	5	162.69	143.00	0.88	1.99	3.74	**2.31**	**4.57**	0.79	0.75	**0.92**	**0.91**
	30		150	75	5	2.5	185.08	161.00	0.87								
2:1	31	16	30	15	1	0.5	82.77	84.00	1.01	1.04	0.49	**1.13**	**0.45**	1.04	0.98	**1.13**	**0.89**
	32		15	30	0.5	1	72.76	73.00	1.00								
	33	17	60	30	2	1	117.05	109.00	0.93	1.71	0.92	**1.97**	**0.98**	0.86	0.92	**0.98**	**0.98**
	34		30	60	1	2	102.89	97.00	0.94								
	35	18	90	45	3	1.5	143.36	132.00	0.92	2.54	1.27	**3.02**	**1.41**	0.85	0.85	**1.01**	**0.94**
	36		45	90	1.5	3	126.02	116.00	0.92								
	37	19	120	60	4	2	165.54	148.00	0.89	3.15	1.71	**3.80**	**1.96**	0.79	0.85	**0.95**	**0.98**
	38		60	120	2	4	145.52	132.00	0.91								
	39	20	150	75	5	2.5	185.08	161.00	0.87	3.74	1.99	**4.57**	**2.31**	0.75	0.79	**0.91**	**0.92**
	40		75	150	2.5	5	162.69	143.00	0.88								

가가. 3세대 막장력 측정장치

3세대 막장력 측정장치는 2세대 시제품의 문제점을 찾아내고, 반복적 실험적 검증을 통해 측정 정확도를 향상시킬 뿐 아니라, 현장에서 사용하기 쉽게 휴대성, 사용성을 고려한 새로운 디자인의 올인원 측정장치로 성능 향상시킴으로써 포터블 막장력 측정장치의 완성도를 높였다.

(1) 고분해능의 레이저 변위계 및 앰프

포터블 막장력 측정장치에서 레이저 변위계와 변위 해석 앰프는 막의 진동 데이터를 계측해 아날로그 신호로 전환하는 중요한 역할을 하는 부품이다. 제 2세대까지 사용했던 Omron 제 레이저 변위계는 가격에 비해서는 고성능을 발휘하지만, 분해능이 비교적 약하고 레이저광의 직진성이 떨어지는 한편 사용 환경의 조도에 따라 측정이 불가능한 경우가 발생하는 등의 단점이 있었다.

3세대 측정장치에는 이러한 단점을 보완하고 측정정확도와 측정안정성을 높일 뿐 아니라, 측정장치의 전체 중량도 줄일 수 있는 Keyence제 IL-S025 레이저 변위계와 IL-1500 앰프를 채용했다. 레이저 변위계와 앰프의 상세 사양은 다음과 같다. 또 레이저 변위계 및 앰프의 도면과 실제 사진을 그림 2-2-1-75에서 2-2-1-77에 나타낸다.

- 메이커 Keyence
- 형식 센스헤드: IL-S025 앰프유닛: IL-1500
- **기준거리** **25mm**
- 측정범위 ±5mm
- 광원 적색 반도체 레이저, 파장 655nm(가시광), Class 2
- 빔형상 ϕ25×1200μm 스폿
- **분해능** **1μm: 기존 Omron제 레이저 변위계의 2배 성능**
- **직선성** **±0.075%** of F.S.
- **측정주기** **0.33/1/2/5ms(4단계 가변)**
- 아날로그 출력 4~20mA, ±5V
- DO출력 HIGH/PASS/LOW NPN 오픈레코더 출력
- 습도특성 0.01% F.S./℃
- **환경특성**
  - **사용 주위 조도 10000lx 이하**
  - 사용 주위 습도 35~85% RH(결로 없을 것)
  - 사용 주위 온도 -10~+50℃
  - 내진동 10~55Hz 복진폭 1.5mm
  - 보호구조 PBT
- **중량**
  - 센스헤드 **60g: 기존 Omron제의 1/3**
  - 앰프유닛 170g

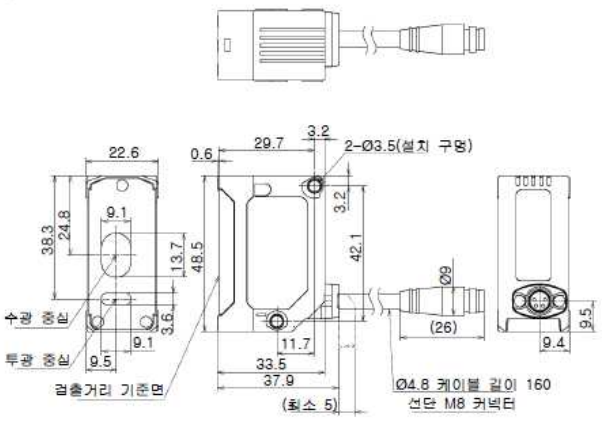


그림 2-2-1-75. 레이저 변위계 도면

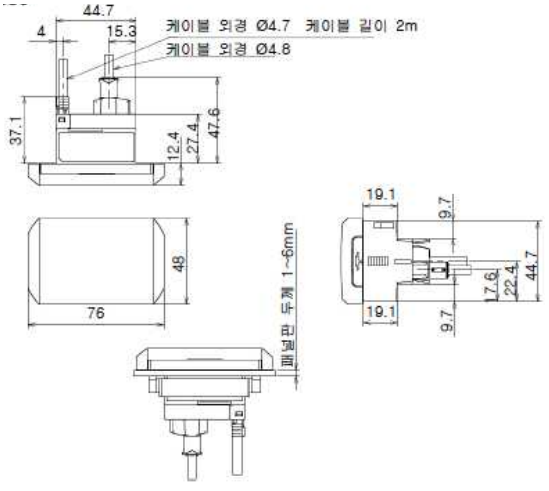


그림 2-2-1-76. 레이저 변위계 앰프 도면



그림 2-2-1-77. 레이저 변위계 및 앰프 사진

(2) 플랫 스피커 교체 : FPS 0105HY-02으로 교체

2세대까지 막장력 측정장치에 적용한 플랫 스피커는 FPS제 FPS0204N3R2이다. 이 스피커는 실효주파수 대역이 170Hz부터 시작되어 막장력 측정 시 유효한 최소진동수 대역인 70Hz를 크게 넘어설 뿐 아니라, 방사하는 음압이 낮아 비교적 높은 장력 하에서는 구획된 막을 진동시킬 수 있는 충분한 파워를 확보하지 못하는 것으로 드러났다. 따라서 3세대 막장력 측정장치에는 그림 2-2-1-78에 나타낸 바와 같이 가능한 한 저주파수 대역에서도 스피커의 최소공진진동수를 재현할 수 있는 50Hz 대역의 충분한 음압을 발생시키는 스피커로 교체해 적용했다.

- 메이커 FPS
- 형식 DCFR(플랫패널 스피커)
- 임피던스 4Ω
- 실효주파수대역 50Hz-20kHz
- 음압레벨 82dB±3dB
- 정격입력 15W(최대 20W)
- 중량 75g



그림 2-2-1-78. 플랫 패널 스피커

(3) 현장 적용성이 고려된 포터블 막장력 측정장치

2차년에 개발된 막장력 측정장치는 측정이론을 검증함과 동시에 실용화를 위한 시제품으로 제작되었다. 시제품으로 측정이론의 검증과 요구되는 측정정확도를 실험을 통해 검증하고, 실용화의 가능성을 확인할 수 있었다. 그러나 2세대 측정장치는 마이크로컴퓨터의 메인보드가 모든 기능을 수행하고 있어서, 작은 부분의 개량이나 개선이 필요한 경우에도 관련 모든 부속을 분리해야 하는 등, 개발 단계에서 필요한 디자인 성능에 미치지 못했다. 따라서 3세대 측정장치는 세련된 올인원 장치로 디자인함과 동시에, 그림 2-2-1-79와 80에 보이는 바와 같이 마이크로컴퓨터 상에서 메인보드와 측정키트로 분리할 수 있게 설계함으로써 휴대성과 사용성을 향상시키는 동시에, 관리의 편의성도 증대시키고자 했다. 요약하면 다음과 같다.

- 메인보드 kit 제작을 적용하여 소프트웨어 업데이트 및 유지관리보수에 편리함을 도모
- 메인보드 kit 크기 : 가로 20mm × 세로 140mm × 높이 85mm

그림 2-2-1-81은 새로 디자인한 포터블 측정장치를 나타낸다. 특히, 2세대 포터블 막장력 측정장치는 분해가 가능하도록 디자인함으로써 쉬운 관리가 가능하도록 했다. 2세대 포터블 막장력 측정장치의 단점을 보완해 완성한 중량 2.5kg 이하의 3세대 막장력 측정장치의 실재 사진을 그림 2-2-1-81에 나타낸다.



그림 2-2-1-79. 메인보드 Kit 형식 예시



그림 2-2-1-80. 메인보드 Kit와 보드 결합방식 예시

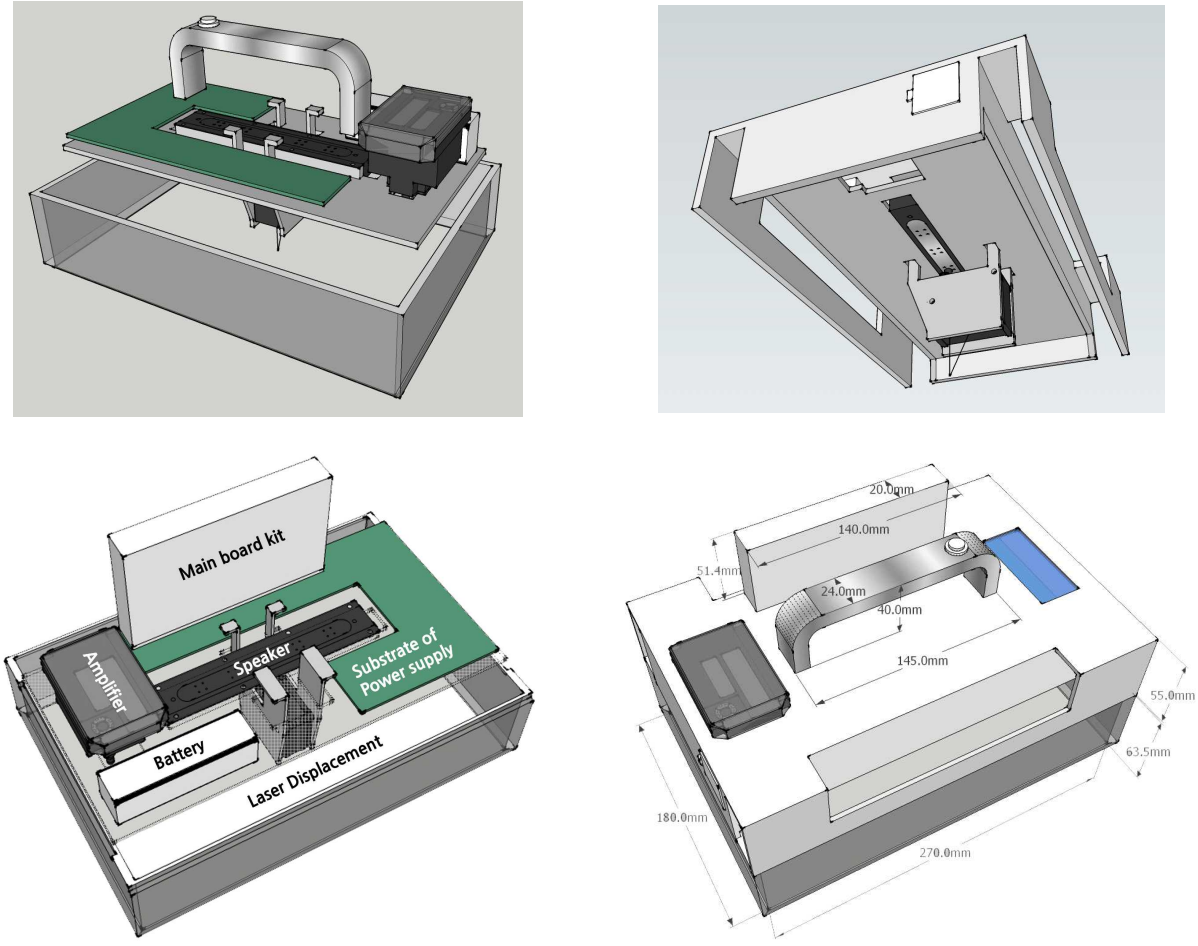


그림 2-2-1-81. 메인보드와 측정부를 분리한 3세대 포터블 막장력측정장치

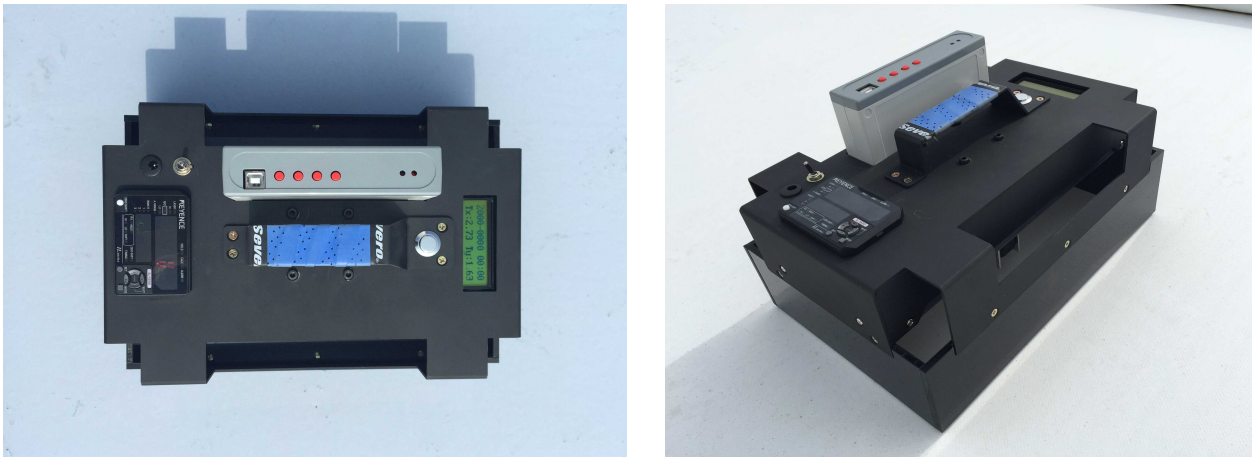


그림 2-2-1-82. 제 3세대 포터블 막장력측정장치

나나. 3세대 막장력 측정장치 현장검증

제 3세대 포터블 막장력 측정장치의 현장 검증을 위해, 그림 2-2-1-83에 나타내는 바와 같이 (주)타이가의 충주공장에서 정상 작동을 확인한 후, 현장 검증 대상 막구조물의 막장력 측정을 수행했다. 막장력 측정은 그림 2-2-1-84에 나타내는 대상 구조물의 19개 Bay 중 접근 가능한 중앙부 3A, 1, 3 Bay의 A 판넬과 B 판넬을 대상으로 측정하였으며, 측정 위치는 각 판넬에서 주 케이블과 누름케이블로 나뉘는 3구역의 가장자리와 중앙부 3곳을 지정하여 측정하였다. 또, 측정 실책을 방지하기 위해 한 측점에서 동일한 측정을 3회 실시하여 평균값을 해당 측점의 장력으로 특정했다. 그림 2-2-1-85는 측정 모습을 나타내고 있다. 그림 2-2-1-86은 제 3세대 포터블 막장력 측정장치로 검출한 공진진동수를 나타내고 있는데, 피크가 매우 탁월하게 특정됨을 알 수 있다. 또, 그림 2-2-1-87은 3세대 측정장치가 목표지표인 중량 2.5kg 이하임을 나타내는 사진이다.

검증결과를 표 2-6에 나타낸다. 검증결과, 막의 고유진동수를 높은 파워스펙트럼으로 특정 가능하고, 그로 인해 막장력을 높은 정확도로 확보하고 안정적으로 측정가능한 장치임을 확인했다.

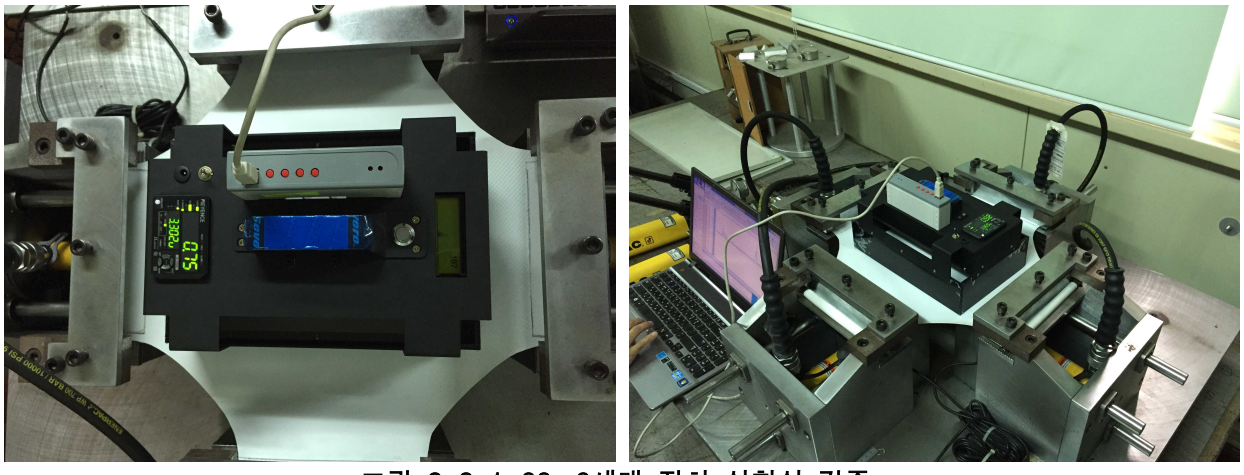


그림 2-2-1-83. 3세대 장치 실험실 검증

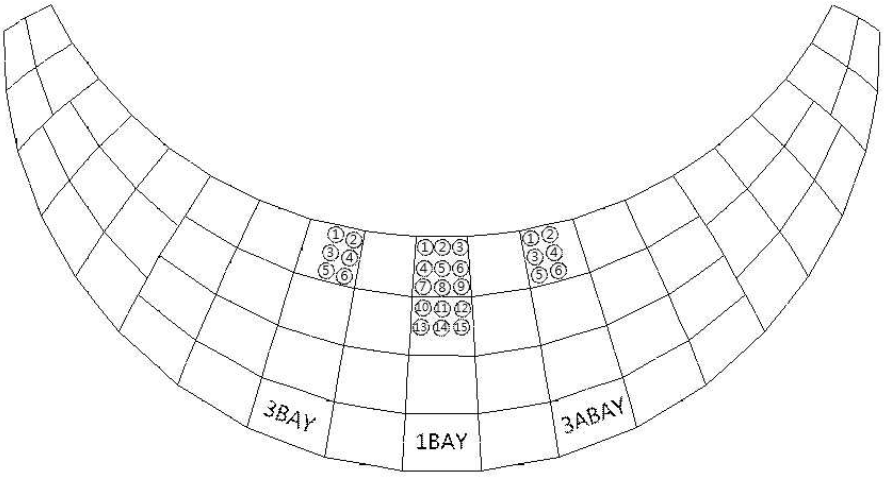


그림 2-2-1-84. 현장 막장력 검증 위치



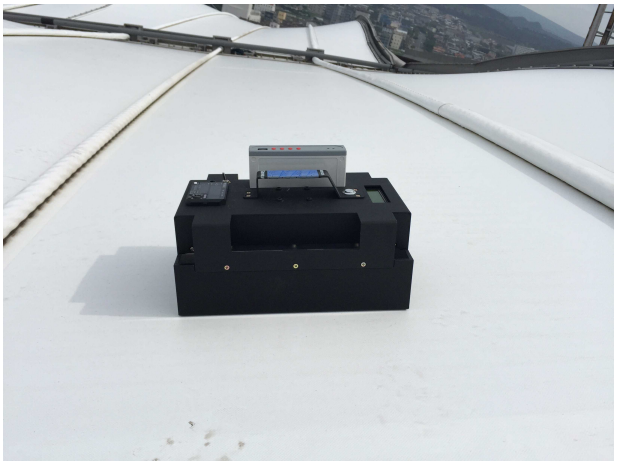


그림 2-2-1-85. 현장검증 모습



그림 2-2-1-86. 측정 공진진동수



그림 2-2-1-87. 중량 2.33kg

표 2-6. 3세대 포터블 막장력 측정장치 현장검증 결과

구역	측정 위치	측정 진동수(Hz)		막장력 검증값(kgf/cm)		비고
		WARP	FILL	WARP	FILL	
1 BAY	①	93	87.7	1.70	1.26	
	②	121	101.5	3.31	1.24	
	③	76.8	81.1	0.99	1.29	
	④	71.4	75.9	0.85	1.15	
	⑤	123	101	3.49	1.14	
	⑥	75.6	78.9	0.98	1.21	
	⑦	75.4	78.7	0.97	1.20	
	⑧	123.2	100.3	3.53	1.09	
	⑨	73.2	80.7	0.83	1.35	
	⑩	96.1	95.8	1.68	1.65	
	⑪	114.3	101.0	2.79	1.43	
	⑫	89.3	90.8	1.41	1.53	
	⑬	84.4	87.0	1.23	1.44	
	⑭	134.2	114.3	4.05	1.65	
	⑮	75.6	82.5	0.90	1.39	
3 BAY	①	123.0	107.4	3.29	1.57	
	②	108.4	106.1	2.19	1.96	
	③	122.5	110.3	3.15	1.79	
	④	107.6	105.1	2.17	1.92	
	⑤	87.0	87.0	1.37	1.37	
	⑥	122.3	105.7	3.28	1.48	
3A BAY	①	90.9	91.7	1.48	1.54	
	②	132.3	110.1	4.02	1.42	
	③	83.4	86.4	1.19	1.43	
	④	123.5	104.9	3.41	1.38	
	⑤	77.9	86.4	0.92	1.55	
	⑥	121.6	109.8	3.09	1.78	

2. 막장력 헬스모니터링 시스템 구축

가. 전 세계 막구조 및 일반 구조물의 헬스모니터링 수법 조사

(1) 국내 현황

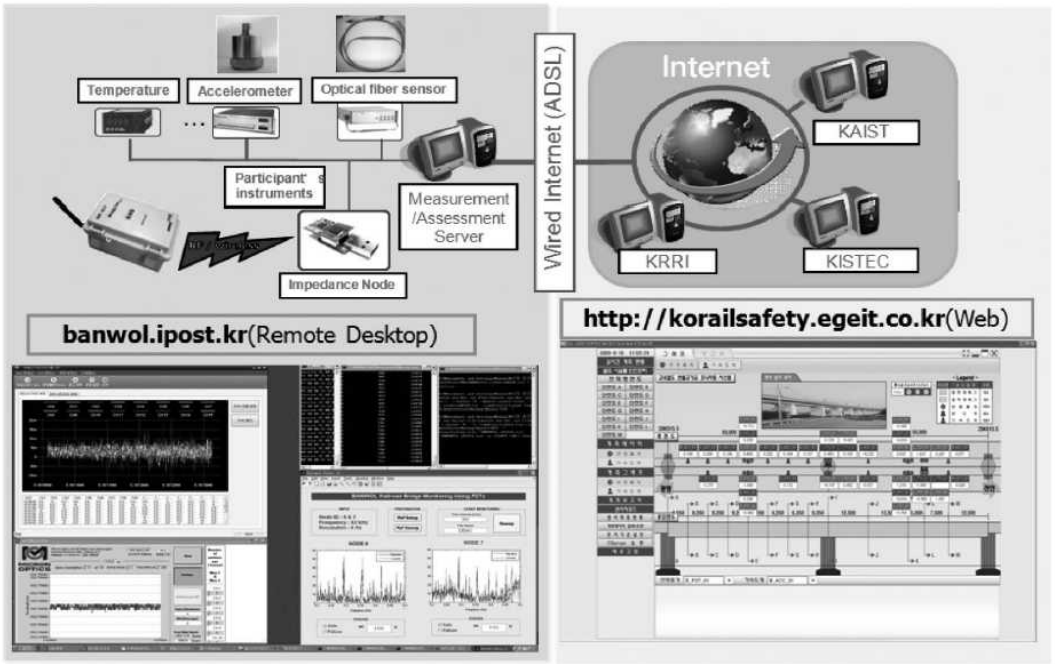
구조물의 건전성 모니터링에 대한 연구는 국내에서도 활발하게 이루어지고 있으나 아직 국내의 건설정책은 구조물의 완공자체에만 치중하고 있으며, 완성된 구조물의 유지관리에 대해서는 미흡하다고 할 수 있다. 국내에는 몇몇 교량에 유선 방식을 이용한 상시 모니터링 시스템을 구축 운영하고 있으며 교량 외에는 제주월드컵 경기장에 구조건전성 모니터링 시스템이 구축되어 운영 중이다. 세계적으로도 초고층빌딩이나 스타디움 등의 대형구조물이나 교량 등에는 모니터링 시스템이 운영되고 있지만 막구조물의 막장력과 관련된 사례는 조사되지 않았다. 따라서 막장력 모니터링을 구축하기 위해 현재 연구개발 혹은 구조물에 적용된 모니터링 시스템의 수법을 조사하였다.

제목	무선 센서망을 이용한 교량 관리 시스템
저널	한국통신학회논문지 35권 5호
저자	박찬흠, 김영락, 김근덕, 박희주, 김종근
내용	구조물의 관리에서 전문 관리 인력이 직접 조사하는 방식은 예산이나 검사 방법 및 주기에 따라 그 효과가 달라진다. 따라서 효과적이며 자동화된 구조물의 유지관리 방안이 필요하다. 교량 관리에서 자동화된 관리 방안으로는 몇몇 교량에 유선통신 방식을 이용한 상시 감시 시스템을 구축 운영하고 있으나 교량 통합관리 시스템으로서의 성능은 초보적인 수준에 머물과 있다. 본 논문에서는 센서 네트워크를 적용한 교량의 통합관제 시스템을 구현한다. 교량에 설치된 센서를 무선망으로 구성하고 수집된 정보의 상시 모니터링을 위해 교량 관리자가를 위한 기능과 관리시스템 관리용 기능, 그리고 비전문가용 웹 기반 모니터링 시스템을 구축하였다.
분석 평가	본 논문에서 설계한 교량 관리 시스템은 무선 센서 노드를 이용하여 교량의 상태와 정보를 취합하여 관리자에게 교량의 상태 및 관리정보를 GUI 형태로 제공하여 실시간 관리가 용이하게 하였다. 또 웹 조희 시스템을 활용하여 관리자에게 언제 어디서나 교량의 상태 정보를 파악할 수 있게 하였으며, 이상 징후 시 SMS를 활용하여 관리자에게 상태정보를 전송함으로써 관리자의 빠른 대처가 가능토록 구성되어 있었다. 본 연구에서도 막장력 모니터링 시스템 구축 시 필요한 구성요소라 판단된다.

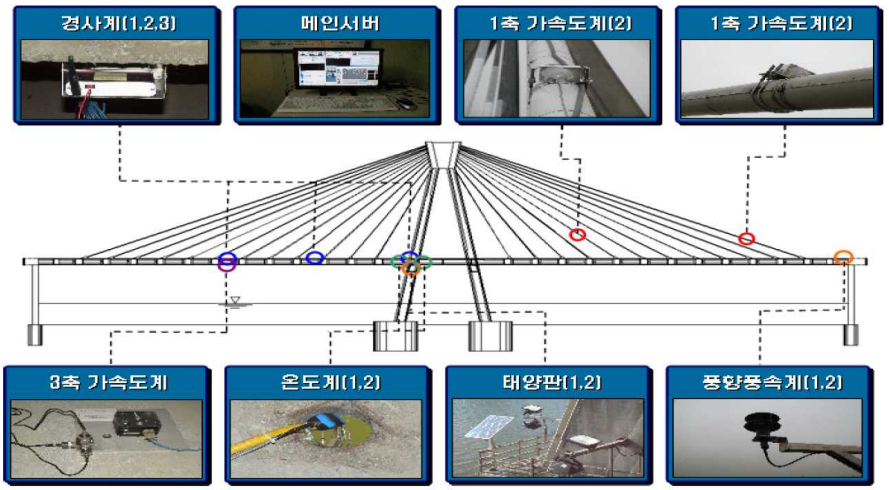
제목	구조안전성 평가를 위한 무선 진동 모니터링 시스템 개발
저널	한국소음진동공학회논문집 20권 2호
저자	심보군, 이시복, 채민성
내용	안전성 평가를 위해 실시간 모니터링을 적용한 사례로는 남해대교, 진도대교, 영종대교 등이 있다. 영종대교의 경우 광케이블을 이용하여 모니터링이 되고 있으며 이렇게 유선을 사용한

	방법은 많은 수의 센서를 데이터 수집 장치와 연결하기 위하여 많은 시간과 비용이 소요되는데 전체 비용의 약 25 %가량이 케이블 설치비용으로 소요되며 전체 설치시간의 약 75 %가 케이블 가설 시간으로 소요되는 것으로 알려져 있다. 또한 센서와 데이터 수집 장치의 길이가 길어짐에 따라 외부로부터의 전파 간섭 및 신호 왜곡의 문제가 발생하게 되어 측정의 신뢰성에 악 영향을 미친다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 무선 센서 네트워크를 이용한 무선 모니터링 시스템이 연구되고 있으며, 무선 측정 장치에서 고려해야 할 중요한 요소는 무선 도달 거리 및 데이터 전송용량, 각 측정 장치간의 시간동기화 등이다. 무선 측정 장치의 개발에 있어서 사용할 수 있는 무선 통신 방식은 제한적이며 사용 목적에 따라 적합한 무선 통신 방식이 선정되어야 한다. 근거리이며 낮은 데이터 전송용량이 필요한 경우에는 지그비(zigbee)나 블루투스(bluetooth) 등을 적용하는 것이 효과적이며 저 전력 소자를 활용한 많은 종류의 장치들이 연구 및 개발되어 있다. 하지만 이러한 방식은 진동 측정과 같이 많은 데이터량을 실시간으로 전송해야 하고 센서의 수가 많은 경우에는 적합하지 않다. 대형 구조물의 경우에는 측정 장치간의 거리가 넓어서 지그비나 블루투스의 통신 도달 거리로는 한계가 있다. 또한 진동의 크기가 크지 않기 때문에 A/D변환기의 성능이 높은 것을 사용해야 하므로 단위시간당 전송해야 할 데이터의 량이 커지기 때문에 충분한 데이터 전송용량이 보장되어야만 한다. 이 논문에서는 충분한 무선 전송 거리를 가지며 다수의 측정장치를 수용할 수 있는 넓은 데이터 전송용량을 가진 무선 방식으로 무선 LAN(IEEE 802.11 a, b, g)을 선택하였고 무선 영역 확장이 용이한 무선 메쉬 네트워크를 적용하였다. 무선을 이용하여 구조물의 동적 거동을 파악할 경우에 있어서 가장 중요한 것은 각 측정 장치간의 시간동기화이다. 기존의 프로토콜을 이용한 시간동기화 방법으로 NTP(network time protocol)을 근간으로 하는 여러 방식들이 있는데 이것들은 주로 서버와 측정 장치간의 상호 통신을 통하여 측정 시간오차를 줄이는 방법이다. 그러나 이러한 방식은 측정 장치가 많아질수록 제한적인 데이터 전송용량을 잠식하여 실제 측정된 데이터를 보낼 때 장애를 유발시킨다. 또한 지속적으로 상호 통신해야 하므로 측정장치의 CPU에 부하를 주게 되는 단점이 있다. 다른 방식으로는 중앙의 타임 서버가 비콘(beacon)을 브로드캐스팅하는 방식이다. 이 방식은 네트워크의 상황에 따라서 비콘의 전달이 안될 경우도 있는데 이를 방지하기 위해서 측정 장치는 자신이 브로드캐스팅된 비콘을 받았는지의 여부를 중앙의 타임 서버에 응답하도록 되어있다. 이 방식은 센서의 수량이 많아지더라도 데이터 전송용량에 영향이 없고 각 측정장치의 CPU에 부하를 주지 않는다. 시간동기화에 있어서 스위칭 허브(switching hub)나 액세스 포인터(access pointer), 브릿지(bridge) 간의 호핑(hopping)상에서도 시간 지연이 발생하며 CPU에서도 시간 지연이 발생할 수 있다. CPU에서의 시간지연을 최소화하기 위해서는 동작 속도가 높은 CPU를 사용하고 프로그램을 최적화해야 한다. 이 논문에서는 리눅스(Linux)를 측정 장치의 운영체제로 사용하여 TCP/IP 통신상의 브로드캐스팅신호를 커널(kernel)에서 감시하도록 하여 CPU상에서의 시간 지연을 최소화 하도록 구현하였으며 하드웨어적으로 별도의 시간동기화를 위한 RF 모듈을사용하여 측정 테이터의 전송용량에 전혀 영향을 주지 않는 방식을 구현하여 각 각의 시간동기화 성능을 비교하였다. 실험결과 무선 LAN의 경우에는 최대 128 μsec, 평균 45 μsec의 측정 장치간 시간오차가 발생하였고 RF 모듈을 사용하였을 경우에는 최대 94 μsec, 평균 28 μsec의 시간오차가 있음을 알 수 있었다. 무선 LAN의 경우보다 RF모듈에서의 시간오차가 더 작게 나타났으나 그 차이가 크지 않음을 알 수 있었으며 대형 구조물의 경우에는 그 고유진동수가 크지 않기 때문에 대략 200 μsec의 시간오차라면 진동 해석 시의 위상 오차가 크지 않고 모드형상을 정확히 표현할 수 있을 것으로 예상되었다.
분석	무선 측정 장치에서 고려해야 할 중요한 요소는

평가	1. 무선 도달 거리 2. 데이터 전송용량 3. 각 측정 장치간의 시간동기화 이며 본 연구에서는 지붕막구조가 적용된 스테디움에 포커를 맞춤으로 충분한 무선 전송 거리 및 모니터링 범위 확장이 용이한 다수의 측정장치를 수용할 수 있는 넓은 데이터 전송용량을 가진 무선 방식으로 무선 LAN 방식이 효과적일 것으로 판단된다. 또한 측정 장치간의 시간동기화에서는 오차범위가 200μsec 이내인 무선 LAN 방식이 적합하다 판단된다.

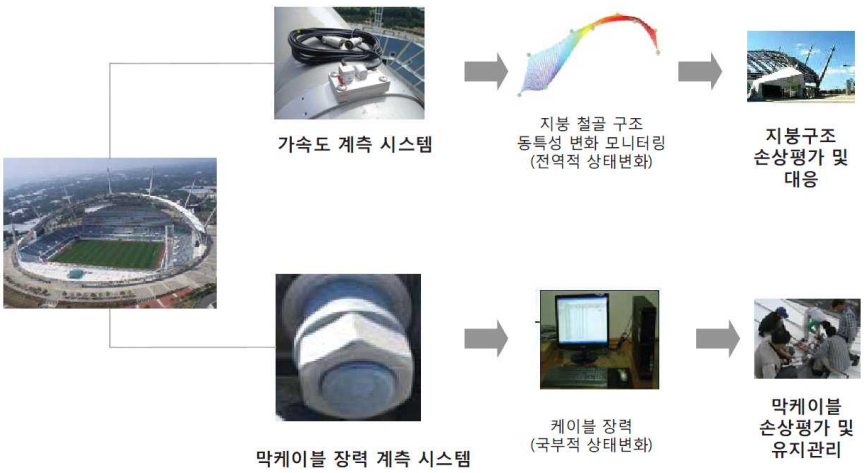
제목	철도교량의 구조건전성 모니터링 시스템 개발
저널	한국방재학회논문집 11권 1호
저자	윤정방, 박현준
내용	 그림 A. 웹 기반 모니터링 시스템 본 논문에서는 철도교량의 구조건전성 모니터링 시스템 구축 및 운용에 대하여 기술하였다. 효율적인 철도교량 모니터링 시스템 구축을 위하여 다양한 종류의 스마트센서가 적용되었으며, 웹 기반의 네트워킹을 통해 외부에서 모니터링 시스템을 원격으로 접속, 제어 할 수 있도록 하였다. 철도교량의 국부 손상을 모니터링 하기 위해 압전센서를 활용한 무선 임피던스 노드를 적용하였고, 구조물 전체의 거동 분석을 위하여 가속도 센서 및 광섬유 센서를 적용하였다. 구조물의 장기 계측을 통한 철도 주행 및 외부 환경에 따른 거동 분석을 수행하였으며, 손상 평가를 위한 신호처리 알고리즘이 적용되었다.
분석 평가	접근 및 제어 등의 관리를 용이하게 하기 위해 웹 기반의 네트워크 시스템을 활용하였다. 우선 로컬 서버에 저장된 데이터는 wired internet service(ADSL)를 통해 접근, 관리권한을 가지고 있는 해당 책임 기관 및 해당 권한자 등이 웹을 통해 접근, 분석, 활용할 수 있도록 하였으며 원격 제어 프로그램을 활용하여 로컬 서버로 접속하여 계측을 위한 단위 센서 시스템

	의 제어 및 관리가 가능하도록 되어 있어 본 연구에서도 인터넷을 통해 로컬서버의 상황 및 웹을 통해 표출되는 구조물의 상황을 확인할 수 있는 시스템 구축이 필요하다 판단된다.

제목	무선 센서 네트워크의 효용성 검증을 위한 올림픽대교 USN 시스템 구축에 관한 연구
저널	2010 한국전산구조공학회 정기학술대회
저자	장정희, 안승주, 한상주, 조용준
내용	 그림 B. 올림픽대교의 첨단 무선센서 본 논문은 한강 상 교량인 올림픽대교를 대상으로 첨단 무선센서를 구조물 주요 부재에 설치하고 본 센서를 통해 취득되는 데이터를 활용하여 실시간 구조 건전도 모니터링 시스템을 구축하는 것을 목적으로 하였다. 본 시스템은 유비쿼터스 센서 네트워크(USN, Ubiquitous Sensor Network)기술을 적용하여 올림픽대교 주요 구조 부재 모니터링을 위한 센서 및 데이터 로깅 시스템으로 구성되어 운영된다. 본 연구에서는 1축 가속도계, 3축가속도계, 온도계, 경사계, 풍향풍속계 5종의 무선 센서를 총 10개 설치하였으며, 센서의 전원은 태양광 자가 전원공급 시스템으로 하였다. 데이터는 시스템 구축완료 후 9월1일부터 9월 7일까지의 일주일간의 데이터를 활용하여, 기존에 설치되어 있던 유선시스템으로부터 취득된 데이터와 비교 분석하였으며, 이를 통행 USN 기반의 교량 계측시스템에 대한 실용성을 검증하였다. 검증결과 사회기반시설물 USN 모니터링 시스템적용 가능성을 긍정적으로 보았으며, 향후, 시설물 관리 분야에 USN 모니터링 시스템이 도입됨으로써 건설분 야에 특화된 기술개발을 도모할 수 있을 것으로 사료되어진다.
분석 평가	무선 모니터링 시스템의 현장 실용성 검증을 확인할 수 있었으며 완벽한 무선 설치를 위한 전원공급 문제를 태양광 자가 전원공급 시스템으로 해결 및 실용성도 검증되었으므로 본 연구에서도 태양광 전원공급 시스템이 필요할 것으로 분석되었다.

제목	사장교의 구조 건전성 모니터링을 위한 USN 시스템 구축
저널	한국전산구조공학회 2011년도 정기 학술대회

저자	조병완, 김헌, 박정훈, 윤광원, 박철, 송성근
내용	최근 재료 및 시공 기술의 지속적 발전으로 인하여, 사장교, 현수교 등 장대교량의 건설이 증가하고 있다. 이러한 장대교량들은 사회적 및 경제적인 중요성이 매우 크므로 교량 완공 후 유지관리 및 구조적 건전성을 모니터링하기 위하여 교량 각 주요 구조부재에 다양한 센서를 설치함으로써 교량모니터링시스템을 구축하여 외부하중에 의한 교량구조물의 거동을 감지, 수집, 분석하여 교량의 건전성을 파악하기 위하여 장대교량의 공용성과 안전성 확보에 많은 연구가 진행 되고 있으며 현재 국내외 다수의 장대교량들에는 다양한 센서로 이루어진 구조 건전성 모니터링 시스템이 설치, 운용되고 있다. 실제로 서해대교, 광안대교, 홍콩 TsingMa Bridge, 미국 Bill Emerson Memorial Bridge와 같은 실제 교량에도 적용된 바 있다. 하지만, 이상의 구조 건전성 모니터링 시스템 기술이 널리 활용되는 데는 여러 가지 장애물이 있는데, 그 중에서 가장 큰 것이 시스템을 구축하는 데 과다한 비용이 소요된다는 점이다. 예로 홍콩의 Tsing Ma 대교의 경우 350개의 센서를 설치하는데 약 8백만불이 넘는 금액이 들었으며(Farrar 등, 2004), Celeby(2002)의 보고에 의하면 각 센서의 채널 당 케이블의 설치비용으로 약 5000불의 비용이 소모되고 있다. 이에 본 연구에서는 이러한 불편함을 극복하기 위하여 무선 센서를 개발하고, 이를 한강 상 교량 중 올림픽대교에 적용, 사장교의 구조 건전성을 저비용 및 높은 편의성으로 모니터링 하기 위한 테스트베드를 구축하여 무선 계측 시스템의 정확성 및 적용성을 확인하였다.  모니터링 프로그램 로그인 화면 상시모니터링 화면 모니터링 위험 경보 화면 그림 C. USN 올림픽대교 모니터링 시스템 확인결과 유선 모니터링 시스템의 경우 유선 센서 하나만 사용하는 것이 아니라 다량의 유선센서를 사용하고 있다. 유선센서 케이블 길이가 일정하지 않기 때문에 동 시점에 대한 데이터 수집이 힘들다. 즉, 각 센서마다의 케이블 길이에 대한 지연현상에 대한 보정이 필요하다는 것이다. 반면, 무선 시스템의 경우 전파로서 전달되므로 센서와 로거의 거리에 구애 받지 않고 동 시점에 대한 데이터를 받는 것이 용이하다. 따라서 구조물 모니터링에 있어서 USN 모니터링 시스템을 적용하는 것이 현 유선시스템보다 구조물의 상태를 미리 파악하고 손상의 위치를 조기발견 함으로서 대형 사고를 미연에 방지할 수 있으며, 보수/보강에 소요되는 시간과 유지관리 비용도 절감할 수 있을 것으로 기대되며, 실제 사장교의 건전성을 모니터링하기에 충분한 성능을 보유하고 매우 효과적임을 입증 하고 있는 것으로 판단된다.
분석 평가	다수의 유선센서 구축 시 데이터 케이블 길이에 따른 저항의 발생으로 인하여 데이터 수집에 시간 오차가 발생함으로 확인 할 수 있었으며 무선으로 데이터 측정 시 시간동기화의 오차범위를 줄인다면 경제적으로 우수한 시스템 구축이 될 수 있으리라 판단된다.

제목	건축구조물에 대한 구조건전성 모니터링의 적용
저널	전산구조공학 24권 3호
저자	김지영(대우건설 방재연구팀)
내용	제주경기장의 구조건정성 모니터링 시스템은 주 구조시스템(철골지붕)을 감시하는 가속도 계측시스템과 2차 구조부재(지붕막)를 감시하는 막장력 계측시스템으로 구성되어 있으며, 실제 작용하는 풍하중의 규모를 계측하기 위해 풍향풍속계를 설치하여 운영하고 있다.  그림 D. 제주경기장 구조건전성 모니터링 시스템 가속도 계측유지관리 시스템은 철골 지붕 구조물의 진동을 측정하여 고유한 동적특성을 분석함으로써 철골지붕에 대한 전역적인 구조안정성을 감시하도록 구성되어 있다. 그리고 막케이블 장력계측시스템은 막구조를 지지하는 국부적인 케이블의 장력 변화를 상시 모니터링함으로써 관리한계치 이상의 장력손실 또는 증가가 발생할 경우 관리자에게 통보하여 대응이 이루어질 수 있도록 구축되어 있다. 이와 같은 서귀포경기장의 계측 시스템 및 상황별 대응체계의 구축을 위해 풍동실험의 결과를 이용하여 풍하중에 대한 구조물의 동적해석을 실시하고 풍진동 및 풍하중에 대한 구조물의 손상도를 평가하였다. 또한 구조해석을 통해 풍진동 및 막케이블 장력을 효과적으로 계측할 수 있는 위치를 선정하여 계측시스템을 설계하였다.
분석 평가	막구조를 지지하는 케이블 장력변화와 함께 막장력을 변화까지 모니터링이 가능하다면 막재 손상 등과 같은 막구조물의 파손에 보다 능동적인 대처가 능할 것으로 판단되며 본 연구에서 막케이블의 장력변화가 막장력에 미치는 영향을 규명한다면 막구조물의 유지관리에 있어 매우 실용적인 기술이 될 것으로 분석하였다.

(2) 해외

건설구조물의 헬스모니터링은 주로 스마트 센서 기술을 이용하여 소형화된 장치 내에 센서를 통해 CPU 내장, 데이터의 무선 전송이라는 특징이 건설 구조물의 계측에 사용되는 것이다. Straser(1996)는 처음으로 유선 계측 시스템의 케이블 작업으로 인한 높은 초기 설치비용과 유지관리 비용을 줄이기 위한 방법으로 무선 통신에 의한 계측 시스템을 제안하였다. 이와 같은 연구를 바탕으로 1999년 캘리포니아대학과 록웰과학센터(Rockwell Science Center)에서 공동으로 개발한 AWAIRS-I와 미주리 대학의 Rolla 시스템이 개발되었다. 2002년에는 Lynch등에 의하여 다양한 스마트 센서 기술들인 마이크로프로세서와 MEMS 센서, 무선 모뎀으로 구성된 WiMMS(Wireless Modular Monitoring System)가 개발되었다. 이외에도 최근에는 센서들 간의 무선 네트워크구성이 가능하고 전력 소모가 적고, 소형인 차세대 스마트 센서 시스템에 대한 연구가 진행되고 있는데 대표적인 시스템이 버클리 대학의 MICA Mote 시스템이다. 그리고 이와 같이 개발된 스마트 센서를 토목 구조물의 계측에 적용하기 위한 다양한 연구가 수행되었다. Lynch등(2003)은 WiMMS을 이용하여 콘크리트 슬래브 교량의 동특성 획득을 위한 계측 실험을 실시하여 유선 계측 시스템의 결과와 비교하여 스마트센서가 토목 구조물의 계측에 사용될 수 있다는 가능성을 제시하였다. 또한 각각의 센서에 내장된 CPU을 활용하여 독립적인 데이터 획득과 처리가 가능함을 보였다.

또한 Shinozuka등(2004)은 UCI에서 개발한 DuraNode을 이용하여 강 트러스 육교의 동특성을 분석하고 다양한 종류의 MEMS 센서의 성능 비교를 실시하여 MEMS 센서를 구조물의 모니터링에 활용이 가능함을 제시하였다. Kurata(2003) 등은 MICA Mote를 이용하여 인위적인 가진을 받는 모형 구조물의 위험감시(Risk Monitoring)실험을 실시하였다. 실험에서 건물이 붕괴되는 극한 상황에서는 무선에 의한 데이터송수신 방법이 유선에 의한 방법보다 더 효과적으로 위험 상황을 알려 준다는 연구 결과를 발표하였다. 주요 사회 기반 시설물의 사회적 중요성이 대두되면서 외부의 위험요소(바람, 지진, 기타의 사고)로부터 구조물의 안전성을 확보하고자 하는 방안으로 구조물을 장시간 상시 감시하기 위한 많은 연구가 진행되었다.(Farrar, 1994; Doebling, 1997;Johnson; 2000). 특히, 현대에 들어서는 이러한 모니터링 시스템의 환경을 자동화하여 스마트한 개념이 도입된 지능형 감시 시스템의 연구가 진행되고 있다.

구조물의 장시간 유지관리를 위한 지능형 모니터링 시스템은 주로 구조물에 발생하는 가진력과 대응되는 응답에 의해 측정된 주파수응답함수(Frequency response function, FRF)의 분석을 통해 획득한 동적 파라미터(고유주파수, 감쇠계수, 모드형상 등)의 변화를 이용하고 있다(Ewins, 2000). 이러한 시스템은 구조물을 가진시키기 위한 인위적인 입력 가진을 구조물에 발생시켜야하고, 가진된 입력 신호의 측정이 필요하기 때문에 가진을 위한 특별한 장치가 필요하다. 그리고 구조물에 진동을 발생시키기 위한 가진력에 의해 손상을 유발하게 되는 결과를 초래할 수 있고(Salawu,1995), 측정의 복잡성과 위험성뿐만 아니라 방대한 데이터 처리량과 구조적 동적 특성 분석의 복잡성 등으로 인해 조건부에 근거한 건전도 모니터링에 그치고 있다.

이러한 문제들을 해결하고 스마트 시스템을 통해 구조물의 건전도를 모니터하기 위한 다양한 연구들이 보고되고 있다. (Doebling, 1997; Peeters, 1998, 1999). 이들 중 James(1993) 등은 wind turbine의 동적인 특성을 분석하기 위해 주변가진에 의한 자연가진기법(Natural excitation techniques, NExT)을 이용하여 입력 신호의 측정 문제를 해결할 수 있는 가능성을 제시하였다. 이후 많은 연구자들에 의해 자연가진 기법이 연구되었으며(Beck, 1994), 특히, Farrar(1997)는 뉴멕시코 주에 위치한 I-40교량의 고유 주파수와 모드 형상 등의 동적 변수를

분석하는데 이를 성공적으로 활용하였다. 그리고 Caicedo(2002) 등은 다중 입출력을 갖는 시스템에 적합한 시간 영역의 동특성 분석 알고리즘인 고유계 구현기법(Eigensystem realization algorithm)(Juang, 1985; Pappa, 1988)과 자연가진기법을 이용하여 사장교의 모의실험(Dynamic simulation)에 적용하고, 구조물의 건전도 모니터링에 유용하게 활용될 수 있는 가능성을 제시하였다. 이 분야의 대표적인 연구의 예를 보면 Kammer와 Kim등이 인공위성 구조물에 손상평가, 건전도 모니터링, 최적 계측기의 위치 등에 관한 연구를 활발하게 수행하여 왔고, 그 후 Virlogeux과 Abdel-Ghaffar 등은 교량 구조물에 진동 특성을 이용한 모니터링 시스템과 손상평가법에 관한 연구가 수행되었다. 그 이후 최근까지 국외는 물론이고 국내에서도 상당히 많은 연구자들이 다양한 연구를 수행하고 있다. 특히 최근에는 인터넷과 유비쿼터스를 이용한 안전관리 Network 구축, GPS의 활용 등 다양한 연구가 활발히 진행 중이고, 일부 이들을 제한적이지만 현장에 적용한 조건부 모니터링 시스템의 예를 살펴보면 표 3과 같다.

이와 같은 연구는 주로 교량 구조물의 거동 특성을 나타내는 구조물의 물리적인 량(데이터, 계측된 신호 등)을 측정하는 기술과 획득된 물리량으로부터 구조물을 유지 관리하기 위한 손상 평가기법 및 구조물의 관리 기준을 위한 모델 업데이팅 기술들이 주로 연구되어 왔다 이들의 연구는 대부분 구조물이 가지고 있는 동적 특성치의 변화로부터 구조물의 강성의 변화를 모니터링에 활용하는 연구이며 다른 방법으로는 Wavelet, 인공 신경망 이론, 동적 변형률을 이용한 신뢰성이론 등으로부터 구조물의 강성과의 상관관계를 이용하는 연구들이다. 또한 기타 방법으로는 교량 구조물의 내하력을 측정하여 건전도를 평가하기도 한다.

이러한 계측 모니터링에 사용되거나 독립적으로 연구되고 있는 전반적인 손상 평가 법을 분석 평가를 해보면 표 3과 같다. 진동에 의한 안전성 평가 법은 계측비용이 고가이며 계측과 신호처리 문제로 실시간 유지 관리에 문제점이 있음이 이미 문헌을 통하여 수차례 지적되어 왔다. 그럼에도 불구하고 이 방법은 구조물의 전체적인 거동 및 내구성 평가 그리고 불특정하중으로부터 구조물을 제어할 수 있다는 장점을 갖고 있어 아직도 많은 연구자들이 지속적인 관심을 갖고 연구에 몰두하고 있다. 최근 우리나라에서도 건설 구조물의 이와 관련된 표 4의 국가연구개발 사업을 보면 많은 연구가 진행되고 있다.

표 3. 진동을 이용하는 손상평가기법의 따른 분류

접근방법	내용		대표 연구자
고유진동수의 변화에 의한 방법	교유 진동수의 변화를 이용함. 가장 많은 연구가 있어왔음.	Direct 문제	Penny, et. al, 외 다수
		Inverse 문제	Nakis 외 다수
모드형상의 변화에 의한 방법	모드형상의 변화를 이용함. 많은 연구가 있어왔음.		Ko, et. at. 외 다수
모드형상의 곡률 변화에 의한 방법	$= {}^{y} = ky\ \epsilon$은 변형률 그리고 R과 k는 각각 곡률반경과 곡률.		Pandey, et. al. 외 다수
측정된 유연도에 의한 방법	$G] = [\Phi][\Lambda]\ {}^{1}[\Phi]$ G: 측정된 유연도 매트릭스 Φ: 모드형상 Λ: 고유진동수	유연도변화의 비교	Peterson, et. al. 외 다수
		Unity 확인법	Lin, 외 다수
		강성 에러법	Park, 외 다수
		잉여 유연도의 영향	Doebling, et. al. 외 다수
		측정 강성도의 변화	Peterson 외 다수
매트릭스의 Update에 의한 방법	구조물의 강성도, 질량, 또는 감쇠도 등과 같은 특성의 매트릭스를 Update하는 방법	목적함수나 구속	Baruch 외 다수
		최적 매트릭스	Smith 외 다수
		혼합법	Baruh 외 다수
비선형법	모달 시험을 통한 비선형성 측정		Lin과 Ewins 외 다수
민감도법	부재 강성도와 고유진동수의 변환 관계		Stubbs, et. al. 외 다수
신경회로망을 도입	구조물이 동적 고유한 특성치를 신경회로망에 적용		Wu, et. al. 외 다수
Wavelet 해석법	파동 변환을 통한 분석		Rajasekara 외 다수
유전알고리즘법	유전 알고리즘을 손상 위치 검출에 이용		Moslem 외 다수
GPS 모니터링	GPS를 이용한 위치 데이터를 이용		Kijewski-Correa 외 다수
기타 방법	기타		Yang, et. al. 외 다수

표 4. 최근 안전성 평가기술 관련 국가 연구개발 사업

부 처	과제명	연구기간
과학재단	토목구조물을 위한 Active Wireless 센서 및 모니터링 시스템 개발	2004-2006
	스마트 지반구조물의 해석, 설계, 시공 및 유지관리 시스템 구축	2002-2008
	사면 지반구조물의 정보화 설계 및 유지관리 시스템 구축	2002-2008
	사회기반 시설물의 스마트 모니터링, 평가, 제어, 및 유지관리 통합 시스템 구축	2002-2008
	광섬유 FBG 센서시스템 및 대형 구조물에 대한 응용기술 개발	2002-2005
	LWS와 UbC 기술을 이용한 스마트 인간형 자정식현수교의 구조적 기능 개선 및 유지관리 기술 개발	2005-2008
	불포화 사면의 안정성 평가를 위한 웹 기반 계측 자동화 및 상시 모니터링 시스템 개발	2005-2008
건설교통부	고층건축물 구조안정성 및 사용성 장기계측시스템을 이용한 상시 안전진단기술 개발	1999-2001
	교량의 건전성 평가를 위한 IT기반 스마트 계측 및 모니터링 시스템의 개발	2003-2006
	교량유지관리 자동화를 위한 첨단 로봇 시스템 개발(BIRDI)	2005-2008
	상기 과제 외 18건	1995-2008
한국과학기술평가원	상시계측 시스템을 이용한 교량원격감시기술	2001-2002
	정밀계측에 의한 교량안전감시 시스템개발	-
	상기 과제 외 3건	1995-2003
기타(농림부, 정통부 등)	30여건의 과제 수행	2001-2007

나. 마이크로컴퓨터 내의 데이터 해석 및 축적 시스템 설계

(1) 데이터 해석

음파를 이용한 막장력 측정은 그림 2-2-2-1의 로직으로 막의 진동 변위를 레이저변위계가 T초 동안 막의 진동 변위를 샘플링한다. T3초 후에 레이저변위계는 샘플링을 중지하고 샘플링 데이터를 앰프를 통해 마이크로컴퓨터로 전송한다. 전송된 데이터는 그림 2-2-2-2와 같이 막의 진동 변위를 계측한 샘플링 데이터로, 이 진동 데이터를 토대로 FFT(Fast Fourier Transform)해석을 시작한다. FFT해석으로 그림 2-2-2-3에 보이는 바와 같이 특정 장력 하의 2개의 서로 다른 공진진동수를 검출한다. 한 측점에서 축 방향을 달리해 동일 과정을 수행하면 한 지점에서의 장력측정은 완료된다.

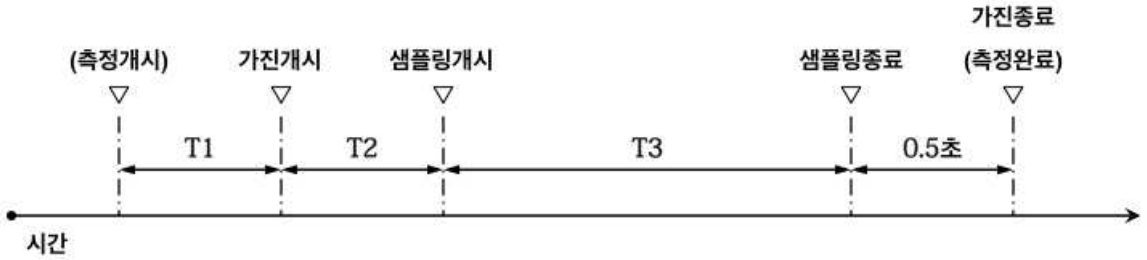


그림 2-2-2-1. 측정개시부터 완료까지의 타이밍 차트

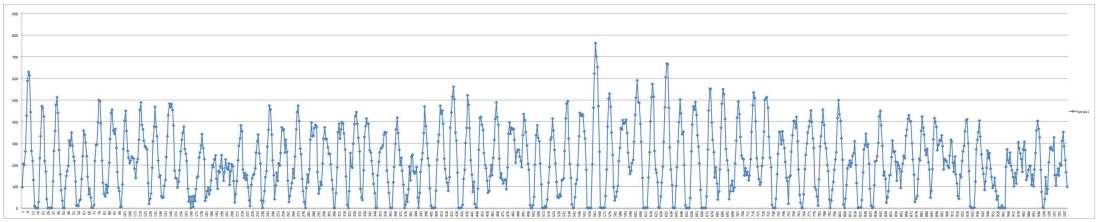


그림 2-2-2-2. 측정 진동 데이터

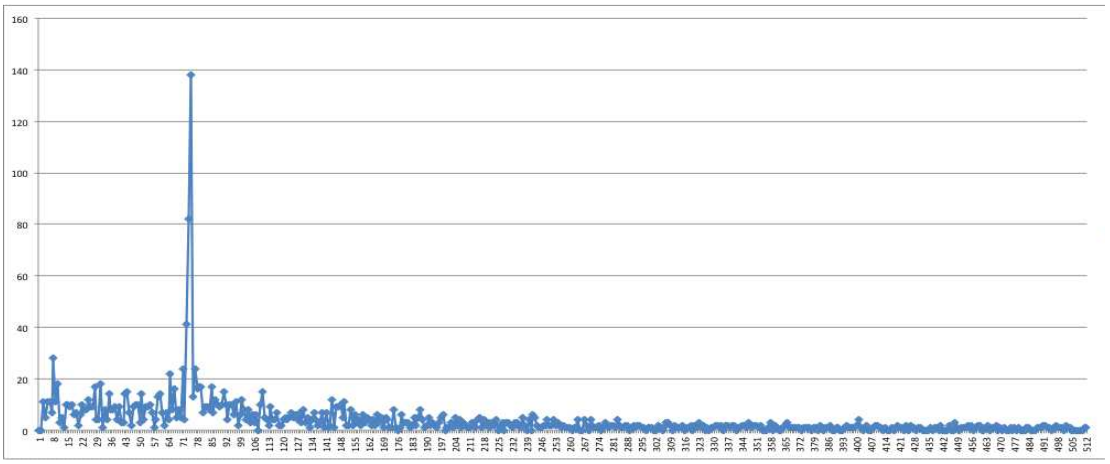


그림 2-2-2-3. 해석 데이터

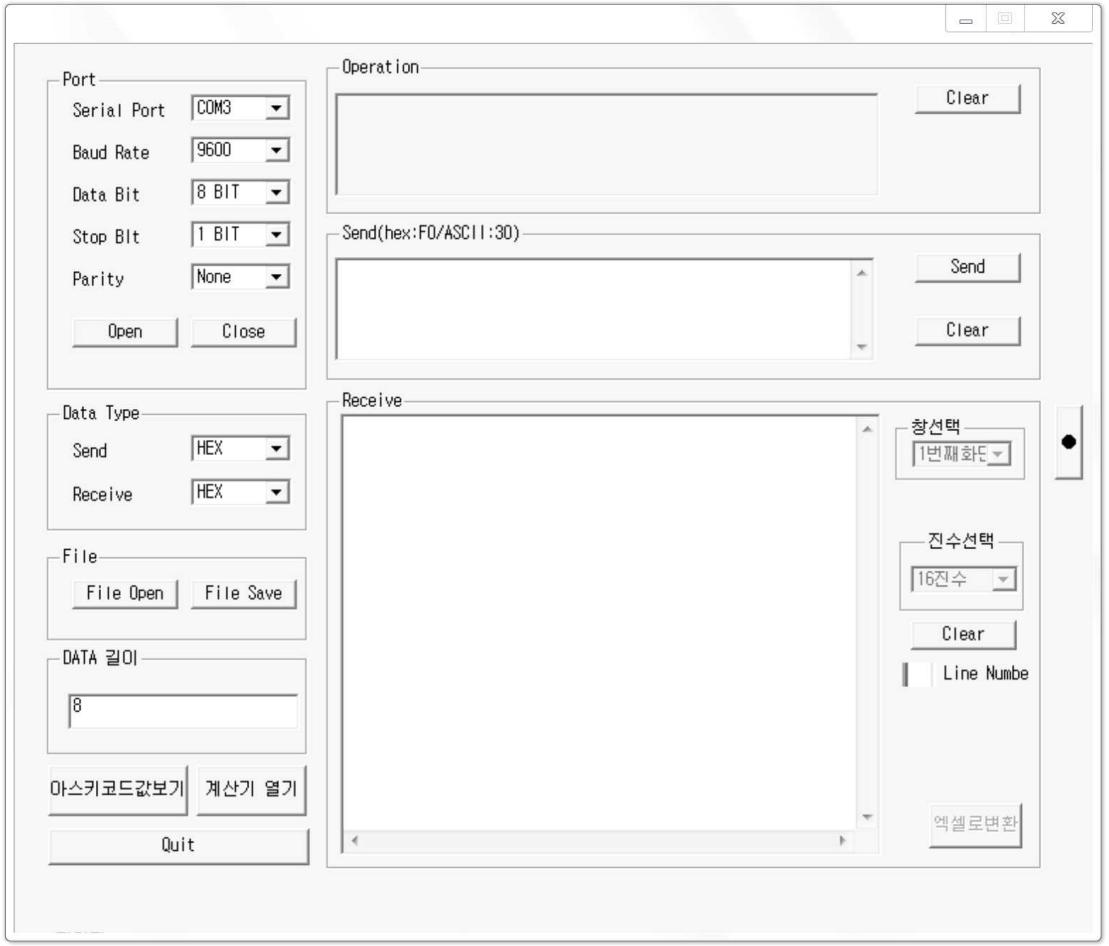


그림 2-2-2-4. 데이터 해석 및 축적 시스템 인터페이스

그림 2-2-2-4는 데이터 해석 및 축적 시스템의 인터페이스를 나타낸다. 마이크로컴퓨터 내에 내장되어 막장력 측정장치가 현장에서 구동되게 할 뿐 아니라, 현장에서 멀리 떨어진 지상의 노트컴퓨터에서도 데이터를 받아 더욱 정교한 데이터 해석이 가능하게 소프트웨어로도 구현되어 있다.

(2) 데이터 축적 시스템

측정값은 마이크로컴퓨터의 RAM에 저장된다. 또, 헬스모니터링 시스템 상에서는 지정 막 구조물의 모든 측점에서 측정값이 무선으로 지정된 관제센터로 데이터를 전송한다. 그림 2-2-2-5는 전송된 데이터를 해석하고 저장하는 일련의 과정을 나타내는 그림으로, 하나하나의 데이터가 측정 대상 구조물, 측점, 측정시간의 데이터를 가짐으로써 실시간으로 어느 구조물 어느 측점의 데이터 값인지를 확인할 수 있어 실시간으로 막의 장력을 감시할 수 있는 시스템이 완성된다. 그림의 데이터는 지정한 폴더에 자동으로 저장된다.

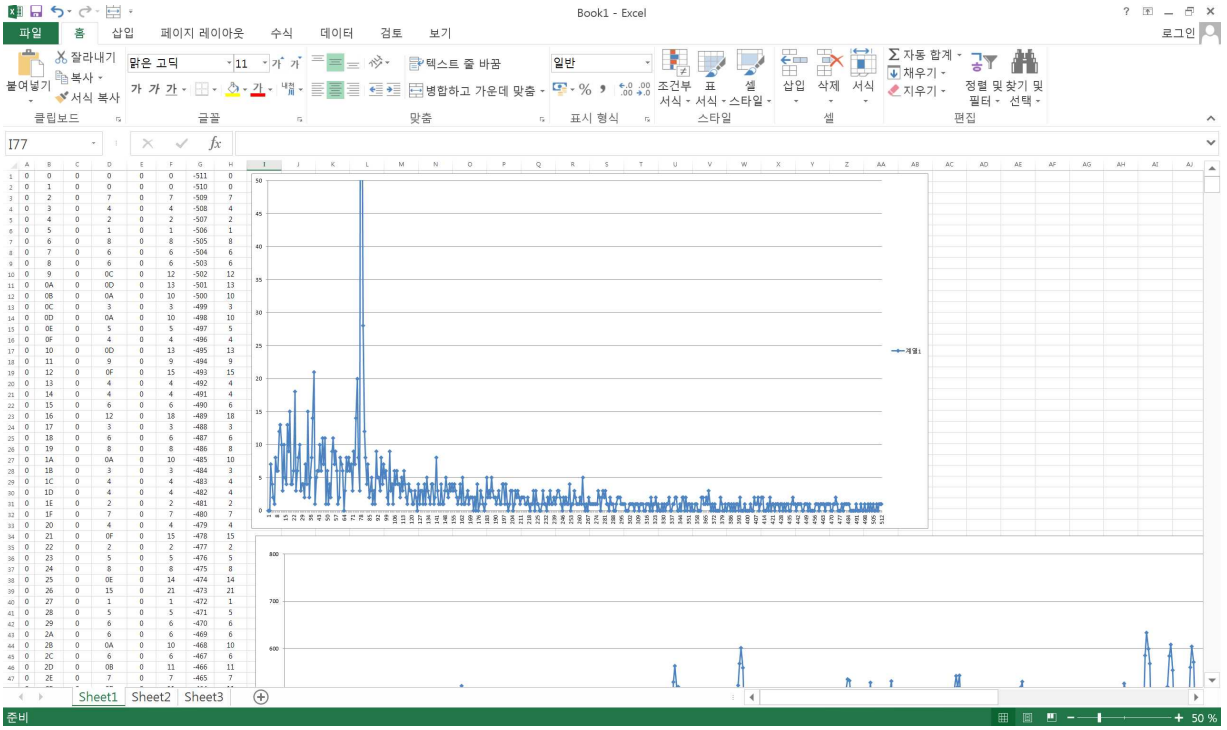


그림 2-2-2-5. 측정데이터 축적 시스템

다. 막장력 측정 및 헬스모니터링 최적 시스템 소프트웨어

막장력 측정 및 헬스모니터링 최적 시스템 소프트웨어 개발은 막장력 측정장치와 헬스모니터링 시스템 상에서 구동될 장력 산정 시스템을 설계하고, 특히 상시 설치될 막장력 측정장치가 보내오는 측정 신호를 분석하고, 이상 데이터를 캐치해 낼 수 있는 헬스모니터링 소프트웨어를 개발하는 것이다.

(1) 막장력 산정 시스템

장력이 도입된 얇은 평판의 진동은 도입된 장력의 영향을 받아 장력이 높을수록 진동의 주파수가 커지는 것으로 알려져 있다. 이 연구의 막장력 측정장치는 긴장 상태에 있는 막면에 음파(이 측정장치에서는 화이트 노이즈)를 쬐어 막면을 진동시키고, 막면의 진동을 레이저변위계로 비 접촉으로 측정한다. 그리고 측정한 레이저변위계의 아날로그 출력 데이터를 고속 AD 변환과 FFT해석을 통해 막면의 주파수를 구해내고, 주파수를 장력으로 환산한다.

X, Y축 방향 제 각각에 , T_y의 장력이 도입된 막면을 생각한다. 우선 경계박스에서 막면의 진동 범위를 변이 길이 , b(, $a \neq b$)의 장방형으로 한정하고 음파로 진동을 주어 공진진동수 f_1을 구한다. 다음으로, 이 경계박스를 90도 회전시켜 같은 방법으로 가진해 공진진동수 f_2를 구한다. 여기서 막재의 단위 체적 당 질량을 ρ_k, f_1측정시의 X, Y축 방향 변의 길이를 a_1, b_1, f_2측정시의 X, Y축 방향 변의 길이를 a_2, b_2 (즉 $a_1 = b_2, b_1 = a_2$), f_1, f_2가 공진진동수라 한다면, T_x, T_y와 f_1, f_2 사이에는 기초이론에서 제시했듯이 아래와 같은 관계식이 성립한다.

$$
\begin{aligned}
m_1^2 + T_y n_1^2 &= 4\rho_k f_1^2 \\
T_x \frac{m_2^2}{a_2^2} + T_y \frac{n_2^2}{b_2^2} &= 4\rho_k f_2^2
\end{aligned}
\qquad (7)
$$

이 장치에서는 가진된 막면의 중앙 변위를 시간이력으로 계측하고 시간이력 변위 데이터로 FFT해석을 진행한다. FFT해석의 결과로부터 파워스펙트럼이 가장 큰 주파수를 1차의 공진진동수로서 장력 치환에 사용한다. 식(7)을 막장력 T_x, T_y에 대해 정리하면 다음 식이 얻어진다.

$$
\begin{aligned}
T_x &= 4\rho_k a_1^2 a_2^2 \frac{b_1^2 f_1^2 - b_2^2 f_2^2}{a_2^2 b_1^2 - a_1^2 b_2^2} \\
T_y &= 4\rho_k b_1^2 b_2^2 \frac{a_2^2 f_2^2 - a_1^2 f_1^2}{a_2^2 b_1^2 - a_1^2 b_2^2}
\end{aligned}
\qquad (11)
$$

여기서,

(kgf/m^2)	: 측정 대상 막면의 단위면적당 질량(면밀도)
f_1(Hz)	: 1회 째 측정된 막의 1차 공진진동수
f_2(Hz)	: 2회 째 측정된 막의 1차 공진진동수
a_1(cm)	: f_1측정시의 막 진동영역(장방형)의 X축 방향 길이(이 연구의 경우 14cm)
b_1(cm)	: f_1측정시의 막 진동영역(장방형)의 Y축 방향 길이(이 연구의 경우 21cm)
a_2(cm)	: f_2측정시의 막 진동영역(장방형)의 X축 방향 길이(이 연구의 경우 21cm)
b_2(cm)	: f_2측정시의 막 진동영역(장방형)의 Y축 방향 길이(이 연구의 경우 14cm)
$_x$(kgf/cm)	: f_1, f_2를 식(11)에 대입해 얻어진 Warp방향의 단위 길이 당 장력
T_y(kgf/cm)	: f_1, f_2를 식(11)에 대입해 얻어진 Fill방향의 단위 길이 당 장력
α_1	: T_x, T_y를 보정할 때의 회귀계수 1
α_2	: T_x, T_y를 보정할 때의 회귀계수 2
α_3	: T_x, T_y를 보정할 때의 회귀계수 3
$T_x^{'}$(kgf/cm)	: 이 측정장치가 산출할 Warp방향의 단위 길이 당 장력
$T_y^{'}$(kgf/cm)	: 이 측정장치가 산출할 Fill방향의 단위 길이 당 장력

2축 인장 시험기를 이용해 소정의 장력이 도입된 막면의 f_1, f_2를 계측해 식(11)을 이용해 장력을 산출한 예를 그림 2-2-2-6에 나타낸다. 그림 2-2-2-6으로부터 장력이 높은 범위에서는 2축 인장장치로 설정한 장력과 식(11)로 구한 장력과의 오차가 커짐을 알 수 있다. 따라서 이 측정장치는 아래의 식을 이용하여 장력 T_x, T_y를 $T_x^{'}, T_y^{'}$로 보정한다.

$$T_x' = \alpha_1 + \alpha_2 T_x + \alpha_3 T_x^2$$
$$T_y' = \alpha_1 + \alpha_2 T_y + \alpha_3 T_y^2 \quad (12)$$

여기서, 식(12)의 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$는 보정에 사용할 계수로, 중회귀 분석으로 구해진다. 그림 2-2-2-6에 2축 인장장치로 설정한 장력과 T_x, T_y의 오차를 기호로 나타내고, 중회귀 분석으로 얻어진 2차 곡선을 실선으로 나타낸다. 그림 2-2-2-7에 나타내듯이 실제의 오차와 회귀 분석으로 인한 피팅 곡선이 잘 일치함을 알 수 있다. 오차보정으로 얻어진 계수값을 표 2-7에 나타낸다.

이 표에서 결정계수는 회귀분석에서 얻어진 상관함수의 2승을 나타내고, 회귀곡선으로 목적함수를 어느 정도 표현하고 있는가를 나타내는 수치이다. 또 표준오차는 데이터로부터 추정결과가 진값에 대해 어느 정도의 오차를 가지고 있는가를 나타내는 지표이다. 따라서 결정계수 0.99662는 이 회귀식으로 목적함수 변동의 전체를 99.662%를 설명하고 있다고 이해할 수 있다. 또, 보정 후 장력 T_x', T_y'의 실제 도입 장력으로 나눈 값을 그림 54에 나타낸다. 그림 2-2-2-8로부터 보정후의 오차는 ±10%내에 수용됨을 알 수 있다.

표 2-7. 측정오차의 중회귀 분석 계수

$y = A + B_1 x + B_2 x^2$ $\quad y$=측정장력의 오차, x=측정장력		
파라미터	**값**	**표준오차**
A	0.03845	0.07636
B_1	0.12371	0.01766
B_2	0.02475	8.37855×10^{-4}
결정계수	표준오차	N(데이터 수)
0.99662	0.21089	80

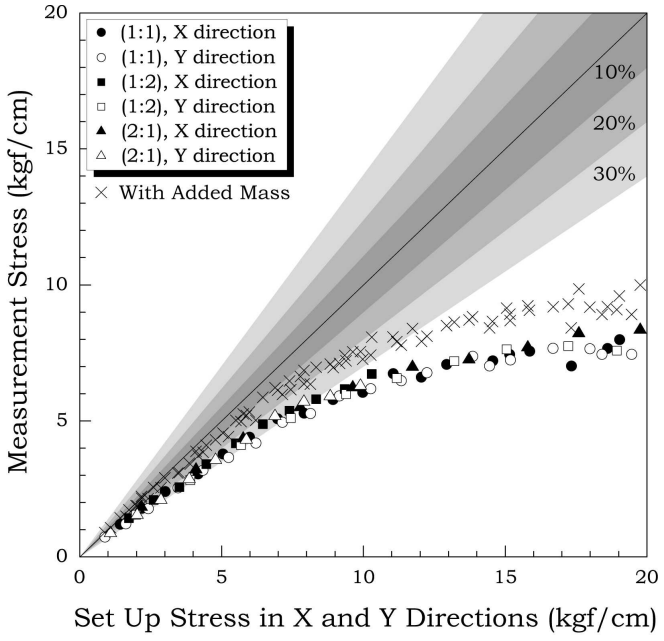


그림 2-2-2-6. 도입장력과 식(11)로부터 구한 장력값의 비교

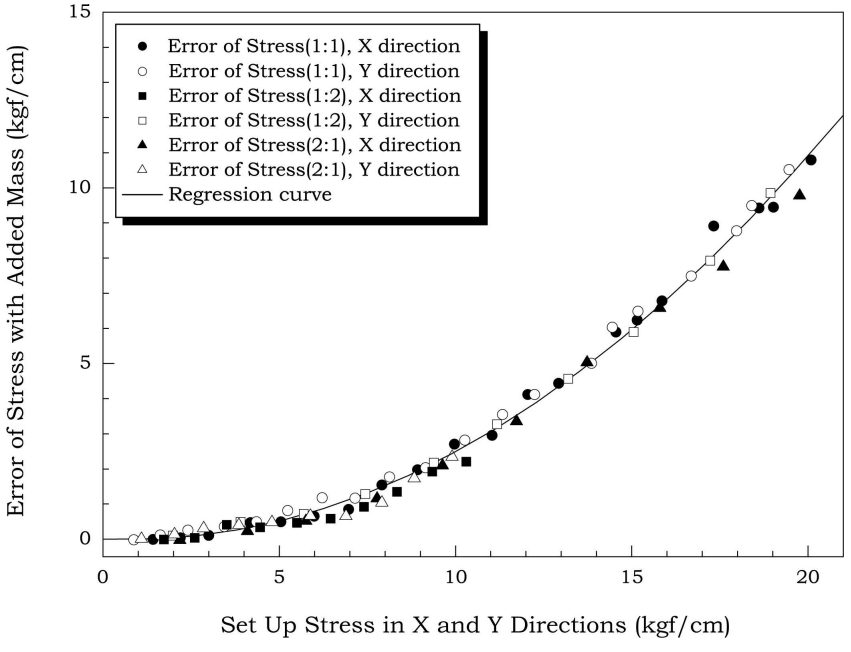


그림 2-2-2-7. 측정오차의 중회귀 분석

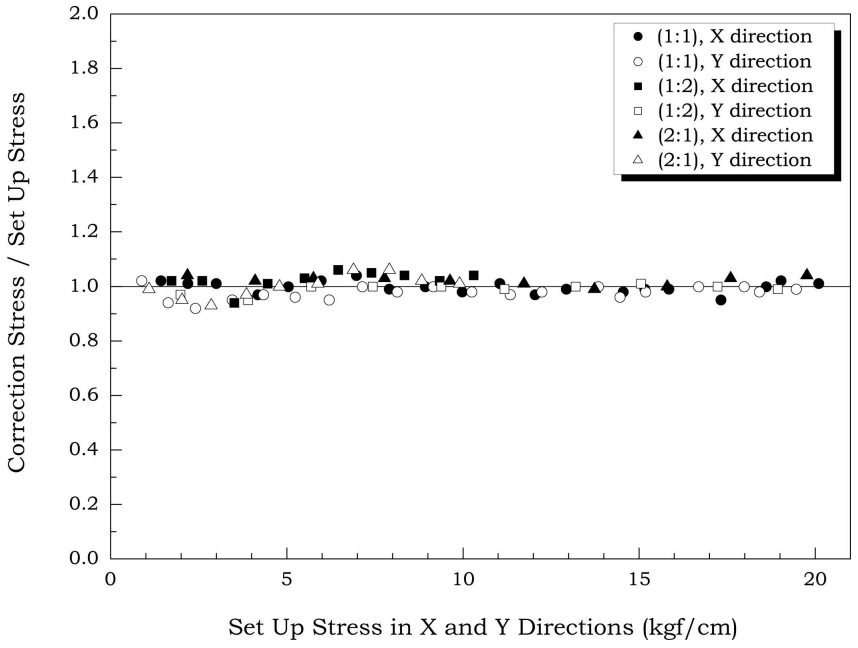


그림 2-2-2-8. 오차 보정후의 장치 정확도

라. 헬스모니터링 최적 시스템 소프트웨어

개발한 막장력 측정장치를 막구조물에 상시 설치함으로써 막구조물의 장력을 실시간으로 감시할 수 있는 헬스모니터링 시스템은 완성된다. 이 시스템은 1년차 연구개발로 완성했다. 측정된 막의 진동변위 데이터나 막장력을 관리하는 시스템을 구축함에 있어, 막장력 측정장치 부분에서 해결해야할 불필요 진동 데이터의 필터링 시스템을 개발하는데 주력했다.

이 연구에서 개발한 측정장치는 계측한 진동에 포함되는 주파수 성분의 스펙트럼을 FFT해석으로 구하고 스펙트럼이 가장 큰 주파수를 장력 산출에 이용하는 공진진동수로 지정한다. 이때 그림 2-2-2-9와 같이 주파수의 상, 하한치를 설정해 범위를 한정함으로써 손 떨림이나 장치 자체의 흔들림 등의 영향을 배제시켜 측정 정확도를 높였다. 설정범위는 보통 사람의 손 떨림이 10Hz이하에서 일어나는 것과 장치 자체의 진동수가 30Hz 미만인 점을 감안해, 하한치를 30Hz로 산정했다. 상한치는 통상적으로 도입되는 막구조물의 설계장력을 근거로 정했다. 현장에서는 설계장력으로 보통 3kgf/cm 이하가 도입되고, 시공에 있어서는 막의 이완 등을 고려해 5kgf/cm 안팎으로 설계장력에 할증한 장력을 도입한다. 따라서 막구조물에 도입되는 최대 장력이 5kgf/cm일 때 막의 고유진동수가 200Hz를 넘지 않으므로 주파수 필터링의 상한치는 300Hz로 설정했다.

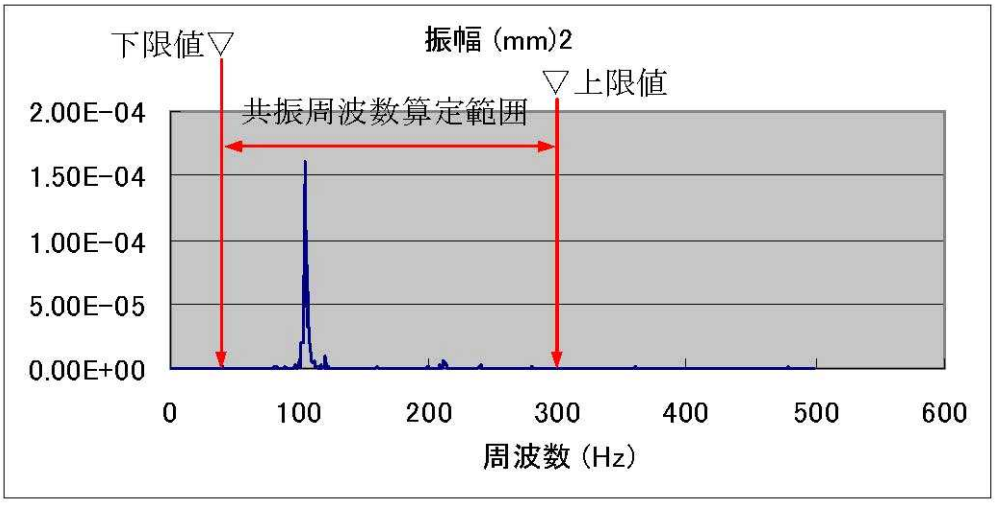


그림 2-2-2-9. 해석 주파수의 상, 하한치 필터링

마. 막장력 측정 자동화 시스템

막장력 헬스모니터링 시스템 구축은 이 연구과제의 양대 목표이다. 1, 2차년 연구개발로 완성한 포터블 막장력 측정장치를 원거리에서 리모트 컨트롤할 수 있는 시스템과, 1차년 연구개발로 완성한 음파로 인한 막의 진동 데이터를 실시간으로 전송할 수 있는 무선 송수신 시스템을 결합해 막장력 측정 자동화 시스템을 완성했다. 한편, 완성된 자동화 시스템을 막구조물에 정착시킬 수 있는 기술개발을 비롯해, 막구조물에 설치되어 전송되는 데이터들을 해석하고 기록할 수 있는 중계기의 소프트웨어를 개발함으로써 막구조물에 도입되어 있는 장력을 원하는 시기에 자동으로 측정할 수 있는 헬스모니터링 구성 도구를 개발했다.

(1) 막장력 측정장치의 막구조물 상시 설치 시스템

당해연차 연구목표의 핵심은 1차년에 개발된 포터블 막장력 측정장치를 기존 막구조물에 상시 설치함으로써 막장력 자동화 시스템을 구축하는 것이다. 따라서 필연적으로 막구조물에 상시 설치할 수 있는 시스템이 요구되므로, 그림 2-2-2-10의 개념도에서 나타내는 바와 같이, 비나 눈, 바람 등의 외부환경에 영향을 받지 않도록 막구조물의 내부 또는 하면에 막장력 측정장치를 고정하는 시스템을 개발했다.

막지붕의 막재는 강풍이나 태풍, 폭설 등으로 큰 수직 변위을 일으킬 수 있으므로, 단순히 막장력 측정장치를 막의 하면에 고정 또는 부착할 수 없다. 필요시에는 장치를 막재로부터 분리해 외부 하중으로 인한 변위에서 자유로울 수 있어야 하고, 단기 외력이 소거된 후에는 다시 막면에 가볍게 부착되어 막의 장력을 측정할 수 있는 시스템이어야 한다.

그림 2-2-2-10의 상시설치 개념도에 나타내는 바와 같이, 막구조물의 하부에 프레임을 설치하여 고정하거나, 막구조물의 골조 프레임에 보조 프레임을 구성하고, 그 위에 자동으로 수직 길이 조절이 가능한 유압이나 나사, 에어로 구동하는 실린더를 장착해 막장력 측정장치를 막면에 부드럽게 부착시킬 수 있는 시스템을 개발했다. 물론 과잉 수직 상승으로 막의 손상을 막기 위해 측정장치의 경계박스 여러 곳에 감지 센스가 부착되어야 하고, 정상 작동 여부를 감

시할 수 있는 카메라가 장착된다면 시스템은 보다 안정적이다.

막장력 측정 자동화를 위한 시스템은 크게 기계적 시스템과 컨트롤 시스템으로 분류할 수 있는데, 기존 막구조물에 탈부착 가능한 기계적 시스템을 그림 2-2-2-11과 같이 설계하고, 그림 2-2-2-12에 보이는 바와 같이 제작했다. 기계적 시스템은 직사각형의 밑변을 갖는 막장력 측정장치가 장착된 실린더를 30cm 거리의 유격으로 자유롭게 수직 이동이 가능하고, 장력 측정장치가 막면에 부착되는 압력을 인지하여 적정 압력일 때 자동으로 정지할 수 있다.

측정장치에 부착된 접촉 센서는 측정장치의 4면이 막면에 부착된 후 0.5초간 측정장치를 수직으로 더 상승시켜 장치를 막면에 밀착시킨다. 또, 측정장치와 수직 하강 운동하는 Arm 사이에는 에어스프링을 장착함으로써, 경사나 곡면진 막면에 자유롭게 부착시킬 뿐 아니라, 일정 압력 이상으로 장치가 막면에 부착하는 것을 방지해 측정장치로 인한 막구조물의 손상을 방지할 수 있다.

막장력 측정장치 막면에 부착한 후에는 자동으로 막장력 측정 작업 수행(화이트노이즈 방사 -> 레이저변위계 작동으로 변위검출 -> 막장력 산정 식에 대입해 장력 산출 -> 장치 90도 회전 후 동일 작업 수행)을 수행하고, 유저 지정에 의해 전술한 작업을 지정 시간 간격으로 수행한다.

Membrane Stress

그림 2-2-2-10. 막장력 측정장치 상시 설치 시스템 개념도

(2) 막장력 측정 자동화 장치 컨트롤 시스템

막장력 측정 자동화 장치는 현장에 상시 설치되므로, 이를 원격에서 컨트롤할 수 있는 시스템도 동반 개발되어야 한다. 막장력 측정 자동화 장치는 접근성이 제한되므로, 지정된 장소의 모니터 상에서 무선으로 컨트롤되어야 한다. 막장력 측정장치 자체에는 1차년 연구성과로 이미 무선으로 기록된 데이터를 전송할 수 있는 시스템이 내장되어 있다. 역으로 막장력 측정 자동화 장치는 막구조물에 장착된 중계기에서 원격 리모트 컨트롤이 가능해야 한다.

2차년에는 막장력 측정 자동화 장치의 기계시스템을 원격에서 제어가 가능하고, 막장력 측정을 수행할 수 있도록 막장력 측정장치 또한 원격 제어할 수 있을 뿐 아니라, 측정한 막장력

데이터를 지정 장소로 무선 송수신 가능한 자동화 장치 컨트롤 시스템을 개발했다. 막장력 자동화 시스템은 그림 2-2-2-15에 나타내는 10채널 통합제어용 다채널 컨트롤 시스템에 수납되어 그림 2-2-2-13에 보이는 플로 차트에 따라 원하는 시기에 자동화 기계시스템을 리모트 컨트롤 한다. 그림 2-2-2-14는 컨트롤 시스템의 회로도를 나타내고 있다.

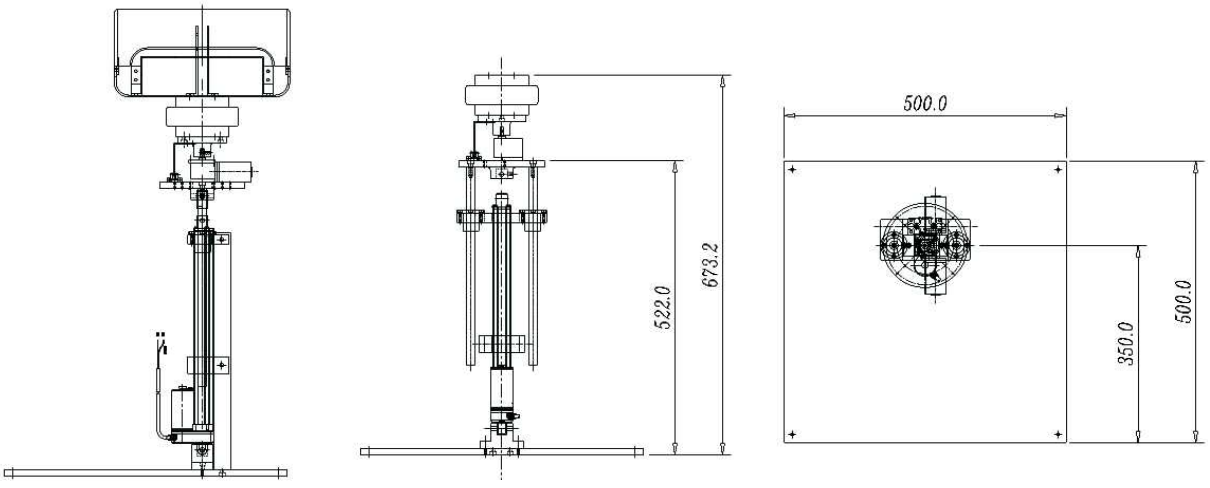


그림 2-2-2-11. 막장력 측정 자동화 장치 및 상시 설치 시스템



그림 2-2-2-12. 막장력 측정 자동화 장치와 컨트롤 시스템

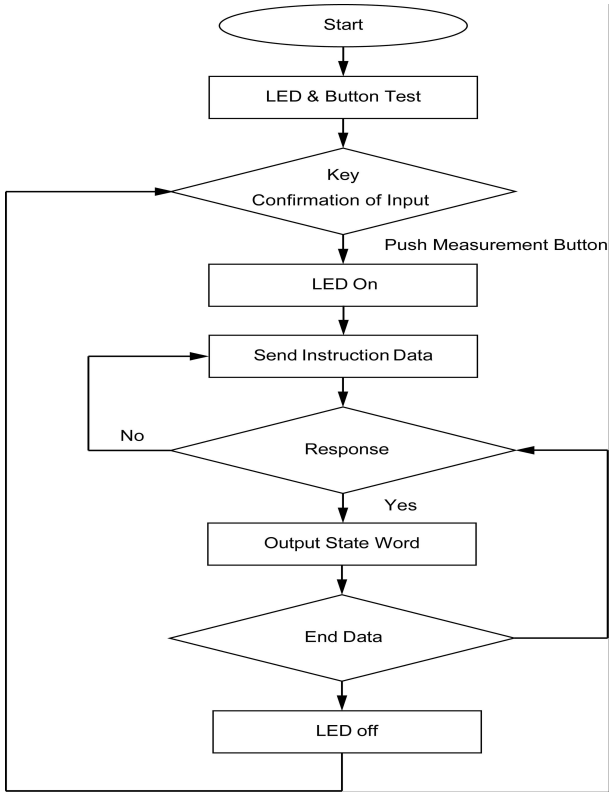


그림 2-2-2-13. 자동화 장치 컨트롤 시스템 플로 차트

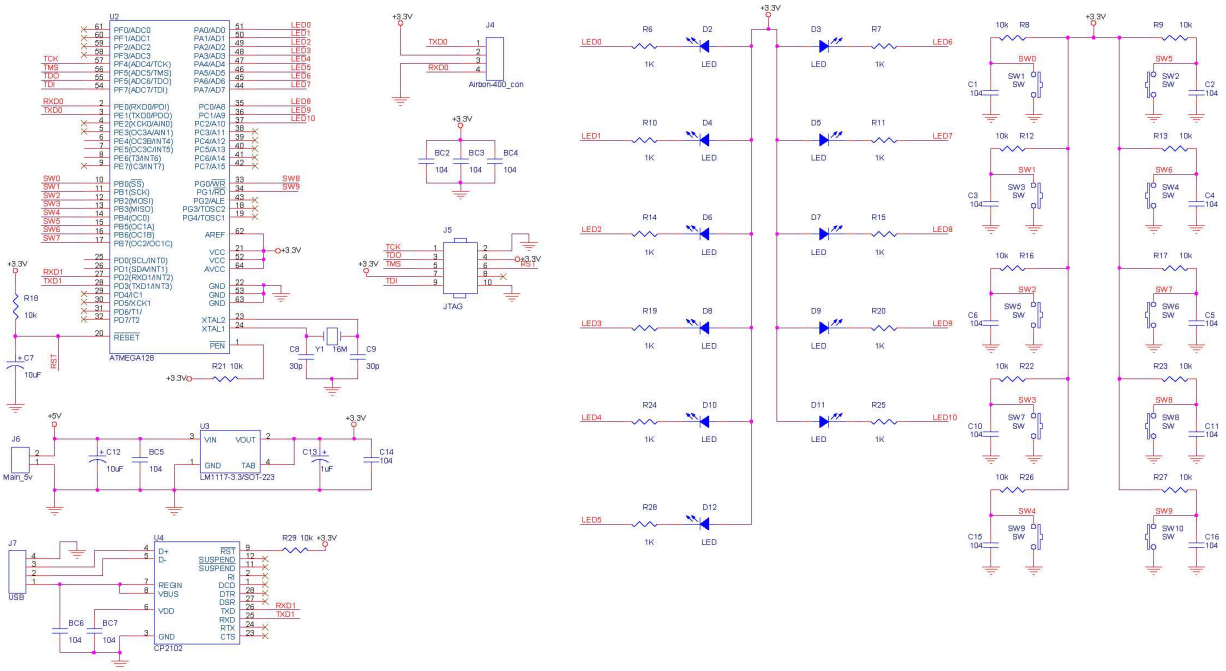


그림 2-2-2-14. 자동화 장치 컨트롤 시스템 회로도

(3) 자동화 시스템의 데이터 해석 및 축적 시스템 설계

이 연구과제의 2차년은 연구기간의 단축으로 전체 막장력 헬스모니터링 시스템 구축에 있어서, 막장력 자동화 장치 개발과 그 장치를 막구조물 자체에 설치될 중계기제에서 컨트롤할 수 있는 시스템 개발까지 연구범위를 정했다. 그림 2-2-2-15에 나타내는 무선 송수신 장치는 중계기 컨트롤 시스템의 자동화 장치 컨트롤 뿐 아니라, 막장력 측정 자동화 장치에서 보내오는 데이터를 중계기에서 받아 그림 2-2-2-16에 보이는 바와 같이 화면에 출력하고, 저장하는 역할을 담당한다. 컨트롤 시스템의 중계기에는 자동화 장치 컨트롤과 데이터 저장을 위한 프로그램이 내장되어 있다.



그림 2-2-2-15. 중계기의 데이터 송수신 장치

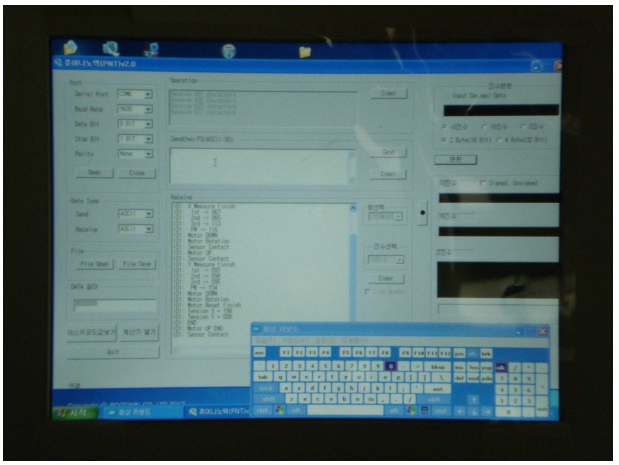


그림 2-2-2-16. 중계기의 장력 표시

바. 막장력 측정 자동화 시스템 Mock-up 및 테스트

개발한 막장력 측정 자동화 장치 및 컨트롤 시스템을 세종대학교 구조실험실에 설치한 막구조물 시험체에 Mock-up하고, 막장력 측정 자동화 시스템의 정상 작동 유무를 파악함과 동시에 시스템의 오류나 문제점을 파악했다.

그림 2-2-2-17, 18은 막장력 측정 자동화 시스템의 Mock-up 테스트를 위한 실험실 막구조물 도면을 나타낸다. 실험용 막구조물의 막재는 2.0m×2.0m의 정방형 형태이나, 구조물의 한 변이 아치형상을 이루는 서울돔구장의 곡률을 적용하여 막장력 도입으로 안장형의 곡면을 형성하고 있다. 그림 2-2-2-19부터 그림 2-2-2-24는 Mock-up 테스트를 위한 막구조물 시험체 설치모습을 나타낸다. 또, 그림 2-2-2-25는 막장력 측정 자동화 Mock-up 테스트의 모습을 나타내고 있다.

(1) 막장력 측정 자동화 시스템 Mock-up

막장력 측정 자동화 시스템은 세종대학교 구조실험실에서 막구조물 Mock-Up을 통해 테스트를 거쳤다. 막면 하부에서 구조물 고정 암에 장착된 장치가 수직 상승하여 막 하면에 접착하고, 음파를 방사해 한 축 방향의 막재 고유진동수를 측정한 다음, 다시 수직 강하해 90도 회전한 후, 또 다시 수직 상승하여 다른 한 축의 고유진동수를 측정하고 하강하는 시스템은 성공적으로 완성했다. 그리고 중계기에서 연산을 통해 두 축의 막장력을 정확히 산출해 내는 것 또한

확인했다.

(2) 막장력 측정 자동화 시스템 개선 사항

2차년에 개발한 막장력 자동화 시스템은 측정장치의 경계박스 네 모서리에 부착된 접촉 감지기가 막재에 부착한 것을 감지한 후, 0.5초 강제 수직 상승함으로써 막면과 측정장치를 접촉시키고 있다. 실재 막구조물의 막면이 곡률을 가지더라도 그 규모가 커서, 막장력 자동화 시스템의 막장력 측정장치의 밑변 크기인 18cm×27cm을 고려하면 거의 평면으로 간주할 수 있다.

그럼에도 불구하고 이 연구과제는 막장력 헬스모니터링을 완성해 실용화를 고려해야 하므로 기존 막구조물의 잔존 장력이 천차만별임과, 큰 곡률로 인해 측정장치의 밑변이 막면에 정확히 부착되지 않을 위험이 있으므로 이를 해소하고자 기존의 측정장치 각 모서리뿐만 아니라, 장변의 중앙에 2개의 접촉 감지 센서를 부착해 6개의 센서로 장치의 막면 부착을 감지하도록 개선했다.

또, 한 방향의 장력 측정이 종료되면 막장력 측정장치는 출발점으로 원 위치되고, 90도 회전한 후 다시 수직 상승해 막면에 부착한다. 현장에서 막의 수직 변위 등을 고려해 부부재로 길이를 조절할 수 있지만, 30cm의 스트로크를 모두 사용하는 구조물에서는 불합리하다. 따라서 한 방향 측정 후에 일어나는 수직 강하는 회전이 가능한 범위 내인 5cm으로 조정함으로써 전체 측정에 걸리는 시간과 구동 부하를 줄였다.

사. 막장력 측정 자동화 시스템의 향후 고도화 방안

이 연구과제에서 막장력 측정 자동화 시스템은 시제품 제작으로 그 사용성을 검증한 단계로 향후 실용화를 위해서는 아래와 같은 기술 보완이 있어야 할 것으로 판단된다.

- 막장력 측정 자동화 시스템을 막구조물에 자유롭게 탈착할 수 있는 보편화된 시스템 개발이 필요
- 기계적 시스템의 정밀도 향상
- 실시간 측정이 가능하도록 막구조물에 영구 설치 방안 필요
- 측정 시스템의 정상 작동 여부를 판단할 수 있는 감시 시스템 필요
- 다양한 구조형식의 막구조물에 임시 설치하여 일정 기간 시스템을 운용하면서 문제점을 찾아 시스템에 피드백 적용 필요
- 태풍, 고온 등의 외부환경 변화에 의존하지 않는 유연한 시스템으로 개선 필요

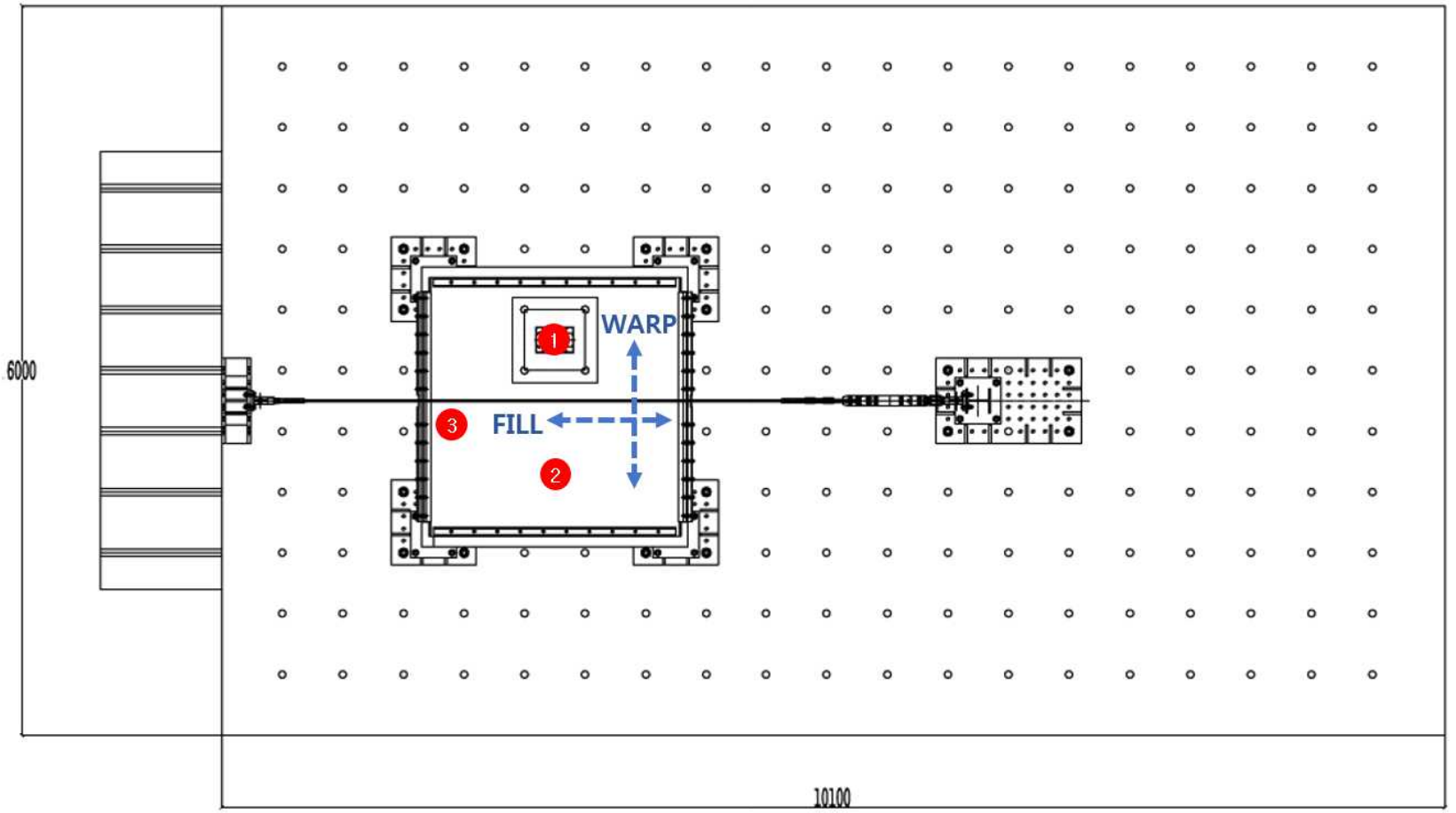


그림 2-2-2-17. 막장력 측정 자동화 시스템 Mock-up 테스트 평면

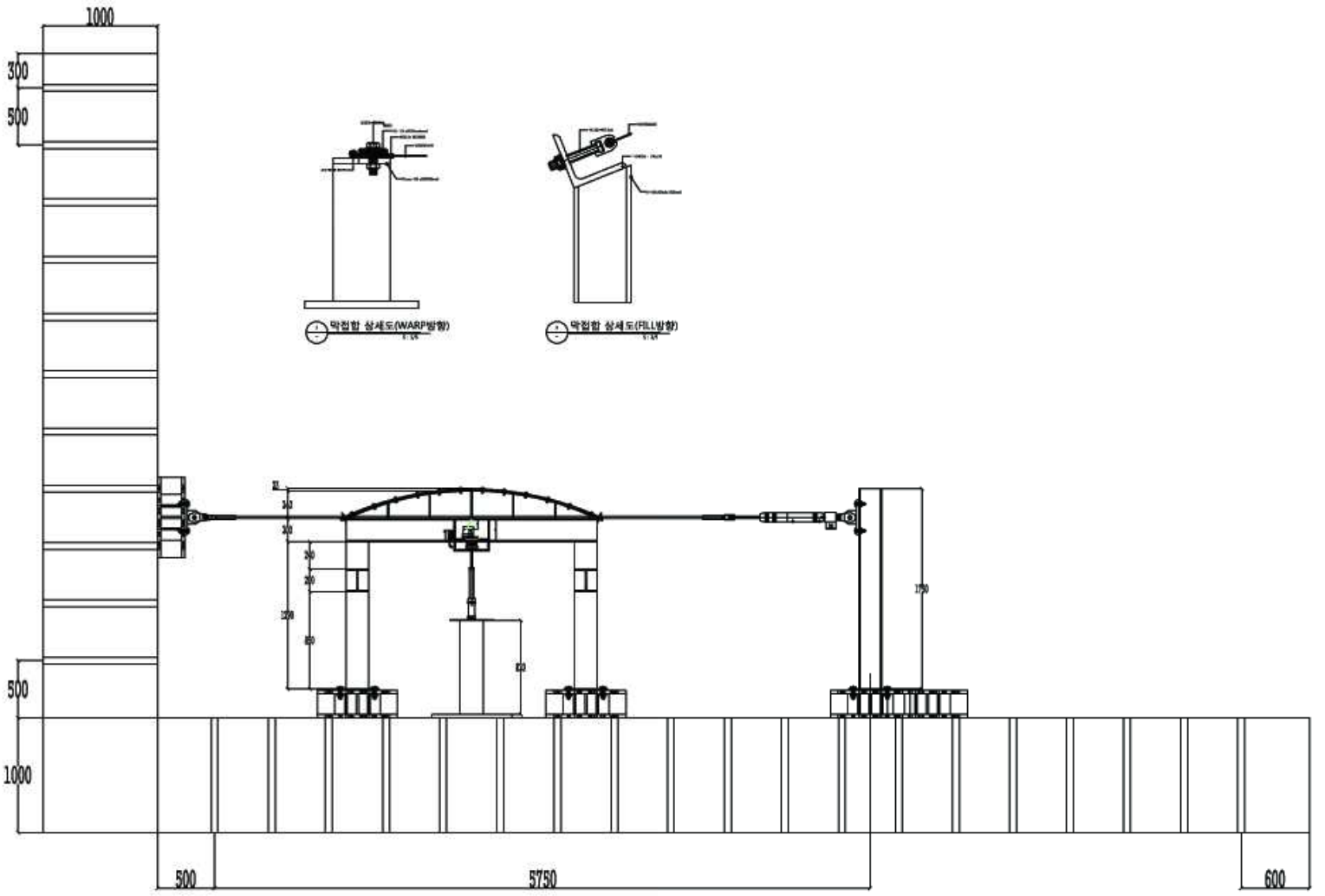


그림 2-2-2-18. 막장력 측정 자동화 시스템 Mock-up 테스트 입면

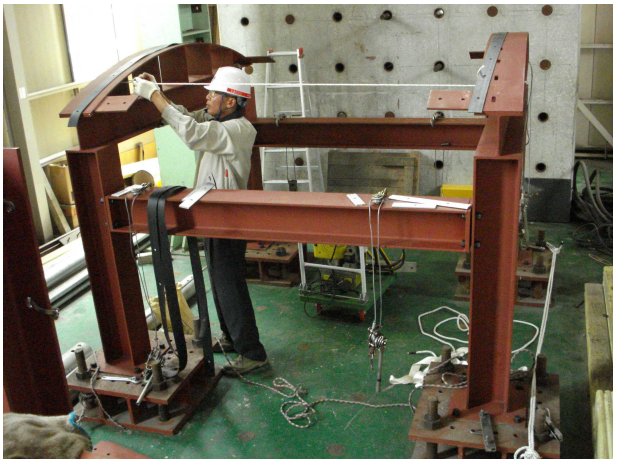


그림 2-2-2-19. 막구조물 시험체 설치

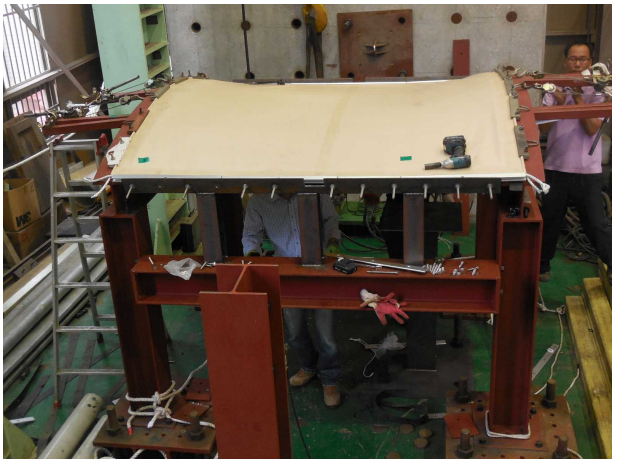


그림 2-2-2-20. 막재 설치



그림 2-2-2-21. 한 방향 장력 재도입 기구



그림 2-2-2-22. 아치 방향 막재 클램핑



그림 2-2-2-23. 누름케이블 설치



그림 2-2-2-24. 막구조물 시험체



그림 2-2-2-25. 막장력 측정 자동화 장치 Mock-up 테스트

사. 막장력과 누름 케이블 장력과의 상관관계 도출 실험

(1) 상관관계 실험 개요

막구조물은 압축 또는 휨에 대해서는 저항할 수 없는 막재료를 적절한 인장상태로 유지함으로써 안정화되는 구조이다. 막재료 자체에 도입되는 인장력 외에도 경기장과 같이 막면이 큰 경우는 바람에 의한 막재의 상부 변위를 억제하기 위해 누름케이블 등을 설치하여 부압에 저항하게 된다.

현재 국내에 시공된 월드컵경기장을 비롯하여 대형 경기장 등 막구조를 지붕구조 시스템으로 적용한 대부분의 막구조물에는, 막재가 응력완화를 일으켰을 경우 다시 장력을 도입하는 재인장 기구가 도입되어 있지 않은 것이 현실이다. 그러나 재인장 시스템이 부재하더라도, 골조 막구조물의 경우에는 부압에 함께 저항하는 누름케이블의 장력조절로 시스템을 안정화시킬 수 있다.

외력이나 시간 경과에 따른 막재의 응력완화는 플러터링이나 폰딩, 주름 등의 구조 안전상의 문제를 일으킬 수 있다. 이를 보강하기 위해서는 막구조물의 부분 혹은 전체를 재시공해야 하는 문제점을 안고 있다. 그러나 누름 케이블이 시공된 막구조물 또는 새로이 시공 가능한 막구조물의 경우는, 누름 케이블의 길이 조절이나 재설치에 따른 장력 조절을 통해 필요시 막면에 추가 장력을 도입이 가능하고, 이로 인해 막구조를 안정화시킬 수 있다면 경제적인 장력 유지와 보강이 가능해진다.

막재 자체에 재장력을 도입하기는 어려우나, 누름 케이블을 재인장함으로써 2차적으로 막면에 장력을 재도입할 수 있다면 유지보수에서 큰 효과를 발휘할 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 당해연차에는 누름 케이블의 장력조절에 따라 막장력이 어떻게 변화하는지, 또 막장력이 누름 케이블의 장력과는 어떤 관계가 있는지를 파악하기 위해 실험했다.

실험은 막장력 측정 자동화 시스템 Mock-up 테스트를 위해 설치한 막구조물 시험체의 막면 중앙부에, 누름케이블 역할을 할 수 있는 케이블을 설치해 막면을 누름으로써 막면에 장력

을 도입할 수 있도록 했다.

누름케이블 단부에는 공동연구기관인 (재)한국건설품질연구원에서 개발해 현재 고척스카이돔에 도입된 케이블 장력조절장치를 설치하고, 케이블에 장력을 단계적으로 도입한다. 케이블에 도입하는 인장력을 높일수록 케이블이 막면을 눌러 막장력도 도입되는 실험체를 구성했다. 또, 누름케이블과 직각 방향의 막장력은 구조물에 재인장 시스템을 설치하여 자유로이 장력 도입 가능하도록 했다.

누름케이블에 의해 막장력이 도입되면 막재의 측점 포인트에서 포터블 막장력 측정장치를 이용하여 막면 위에서 막장력을 측정했다. 또, 자동화 장치의 장력 측정 정확도를 검증하기 위해 막면 하부에서는 자동화 장치로 막장력을 측정했다. 그림 2-2-2-26은 막면 상부에서 포터블 측정장치로, 그림 2-2-2-27은 막면 하부에서 자동화 장치로 막장력을 측정하는 모습을 나타내고 있다.



그림 2-2-2-26. 포터블 장치로 장력 측정



그림 2-2-2-27. 자동화 장치로 장력 측정

(1) 상관관계 실험 결과

표 2-8과 2-9에 막장력과 누름케이블 장력의 상관관계 도출을 위해 실시한 결과를 나타낸다. 표 2-8은 누름케이블의 장력을 순차적으로 증가시키면서 포터블 막장력 측정장치로 막면 위의 측점 3곳에서 측정한 결과를 나타내고 있다. 한편, 표 2-9는 동일하게 누름케이블의 장력을 순차적으로 증가시키면서, 측점 1과 2의 두 곳에서, 막 상면은 포터블 막장력 측정장치로, 막 하면은 자동화 장치로 측정한 결과를 나타내고 있다. 또, 그림 2-2-2-28, 29는 표 2-8을 도시한 것이다.

그림 2-2-2-28, 29의 결과로부터, 누름케이블이 막재에 직접적으로 영향을 주는 측점은, 케이블 장력이 증가할수록 Warp 방향의 막장력이 증가하고 있음을 보여주고 있다. 게다가, 누름케이블과 직각 방향인 Fill 방향으로는 누름케이블이 막장력에 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 한편, 누름케이블이 직접 닿지 않는 측점 3에서는 Warp, Fill의 양 방향 모두에게 누름케이블의 장력 증가가 막장력에 영향을 미치지 못함을 확인했다.

이 결과는 실험 전에 충분히 예상할 수 있었던 결과이나, 막장력 측정장치로 확인되었다는 데 매우 큰 가치가 있다. 누구나 예상할 수 있었지만, 누구도 검증하지 못했던 결과다. 또, 지금까지 막구조물의 설계에서는 누름 케이블이 닿지 않는 곳 또한 동일한 누름 케이블 효과가 있다고 가정하고 설계해 왔다. 이 결과를 바탕으로 골조막 구조물의 누름 케이블의 설계에 있어서는 재고되어야 할 것으로 판단된다.

그림 2-2-2-30, 31은 동일 측점에서 상면의 포터블 장치와 하면의 자동화 장치 결과를 도시한 것이다. 그림 2-2-2-30과 31의 결과로부터 막면의 상면과 하면의 결과가 확연히 다름을 확인할 수 있다. 이 결과는 막구조물의 시험체 특성에서 찾을 수 있는데, 상면에서는 측정자가 측정장치로 막면에 접촉 압력을 발생시키면 막재에 장력을 증가시키는 역할을 하는 반면, 자동화 장치로 인한 하면에서의 측정은 상승 압력이 막재에 막장력을 소실시키는 역할을 하는 것이 1차적인 이유라 할 수 있다. 또, 기계적인 이유로는 막 하면에서 측정을 담당하는 자동화 장치는 막면의 높은 곡률로 인해 측정장치가 막의 4면에 일정하게 접촉하지 못하고, 장변 방향으로는 막면과 일체화 되지 못하는 부분에서 오차가 발생한 것으로 사료된다.

이 결과를 바탕으로, 현장적용 시에는 막재의 상부와 하부의 장력 차이를 충분히 반영해야 하고, 곡률이 큰 막구조물에는 접촉면에 고무 등의 부드러운 소재를 밀착시키는 것도 고려해야 함을 알 수 있었다.

표 2-8. 막장력과 누름케이블 장력과의 상관관계 실험결과

실험 번호	케이블장력 (kgf)	측정위치 (1)				측정위치 (2)				측정위치 (3)			
		공진진동수(HZ)		측정장력(kgf/cm)		공진진동수(HZ)		측정장력(kgf/cm)		공진진동수(HZ)		측정장력(kgf/cm)	
		WARP	FILL	WARP	FILL	WARP	FILL	WARP	FILL	WARP	FILL	WARP	FILL
1	0	83.4	63.9	0.99	0.19	94.2	78.6	1.18	0.43	96.6	88.3	1.13	0.70
2	100	96.6	76.6	1.30	0.33	106.9	83.0	1.62	0.35	95.2	88.3	1.08	0.73
3	200	104.9	78.6	1.60	0.25	108.8	88.3	1.62	0.49	95.2	86.4	1.11	0.66
4	300	111.8	83.4	1.82	0.27	121.0	88.3	2.16	0.25	95.2	86.4	1.11	0.66
5	400	116.6	82.4	2.04	0.14	121.0	86.4	2.19	0.19	93.2	86.4	1.04	0.70
6	500	121.5	93.2	2.11	0.41	124.0	88.3	2.30	0.19	93.7	86.4	1.05	0.69
7	600	123.0	93.2	2.18	0.38	134.7	100.0	2.65	0.37	93.2	83.4	1.08	0.60
8	700	126.9	93.7	2.36	0.31	135.7	101.0	2.68	0.39	93.2	83.4	1.08	0.60
9	800	132.3	96.6	2.58	0.30	137.6	101.0	2.78	0.34	92.2	83.4	1.04	0.61
10	900	135.2	100.0	2.67	0.36	142.5	101.0	3.05	0.23	93.2	83.4	1.08	0.60
11	1000	139.6	100.0	2.91	0.26	146.4	99.6	3.29	0.08	93.7	83.4	1.10	0.59
12	1100	142.5	103.5	3.00	0.33	147.9	104.9	3.28	0.25	92.2	83.4	1.04	0.61
13	1200	146.9	105.9	3.21	0.31	151.3	105.9	3.46	0.20	93.2	83.4	1.08	0.60
14	1300	151.8	107.4	3.46	0.25	152.3	107.4	3.49	0.24	90.8	83.4	1.00	0.64
15	1400	153.8	111.8	3.50	0.38	154.2	107.9	3.59	0.21	89.8	82.0	0.98	0.61
16	1500	154.7	111.8	3.55	0.36	157.2	107.9	3.77	0.13	89.8	82.0	0.98	0.61

표 2-9. 막장력측정 자동화 장치 Mock-up Test 결과

실험 번호	케이블장력 (kgf)	측정위치 (1)								측정위치 (2)							
		포터블장치				자동화장치				포터블장치				자동화장치 2차			
		공진진동수(HZ)		측정장력(kgf/cm)		공진진동수(HZ)		측정장력(kgf/cm)		공진진동수(HZ)		측정장력(kgf/cm)		공진진동수(HZ)		측정장력(kgf/cm)	
		WARP	FILL	WARP	FILL	WARP	FILL	WARP	FILL	WARP	FILL	WARP	FILL	WARP	FILL	WARP	FILL
1	0	83.4	63.9	0.99	0.19	102	85	1.39	0.5	94.2	75.6	1.22	0.34	94.0	89.0	1.03	0.77
2	100	96.6	76.6	1.30	0.33	107	90	1.52	0.58	104.9	86.4	1.48	0.50	97.0	93.0	1.07	0.86
3	200	104.9	78.6	1.60	0.25	105	95	1.40	0.69	107.4	86.4	1.59	0.45	100.0	100.0	1.07	1.07
4	300	111.8	83.4	1.82	0.27	113	93	1.72	0.57	118.10	88.3	2.02	0.31	107.0	101.0	1.34	0.99
5	400	116.6	82.4	2.04	0.14	113	97	1.66	0.72	121.5	92.7	2.11	0.39	113.0	103.0	1.56	0.95
6	500	121.5	93.2	2.11	0.41	113	97	1.66	0.72	124.5	87.4	2.34	0.14	117.0	106.0	1.68	1.00
7	600	123.0	93.2	2.18	0.38	117	97	1.84	0.64	126.9	90.8	2.40	0.21	115.0	106.0	1.59	1.03
8	700	126.9	93.7	2.36	0.31	117	98	1.82	0.68	132.3	100.0	2.52	0.43	117.0	107.0	1.66	1.04
9	800	132.3	96.6	2.58	0.30	113	98	1.64	0.76	132.3	101.0	2.51	0.47	124.0	103.0	2.06	0.73
10	900	135.2	100.0	2.67	0.36	113	99	1.62	0.80	134.2	101.0	2.60	0.42	113.0	113.0	1.37	1.37
11	1000	139.6	100.0	2.91	0.26	113	101	1.59	0.87	138.1	101.0	2.81	0.33	113.0	113.0	1.37	1.37
12	1100	142.5	103.5	3.00	0.33	124	107	1.99	0.89	142.5	98.6	3.09	0.13	115.0	113.0	1.46	1.33
13	1200	146.9	105.9	3.21	0.31	125	107	2.04	0.87	148.4	104.9	3.31	0.23	113.0	113.0	1.37	1.37
14	1300	151.8	107.4	3.46	0.25	125	107	2.04	0.87	146.4	104.9	3.20	0.29	113.0	113.0	1.37	1.37
15	1400	153.8	111.8	3.50	0.38	125	107	2.04	0.87	151.5	107.9	3.43	0.28	113.0	113.0	1.37	1.37
16	1500	154.7	111.8	3.55	0.36	130	113	2.17	1.02	151.8	105.9	3.49	0.19	112.0	113.0	1.33	1.39

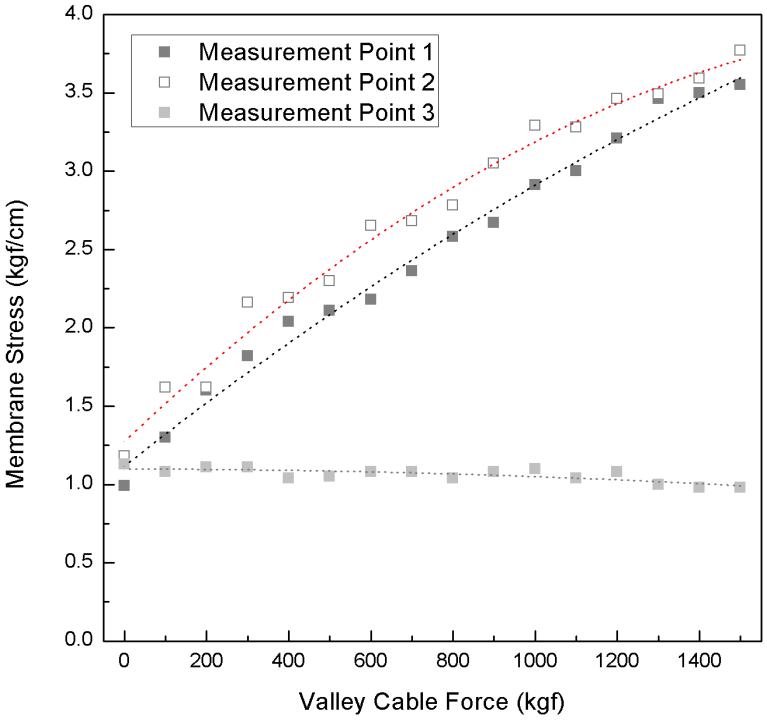


그림 2-2-2-28. 측정위치별 막장력과 누름케이블 장력과의 상관관계 (WARP 방향)

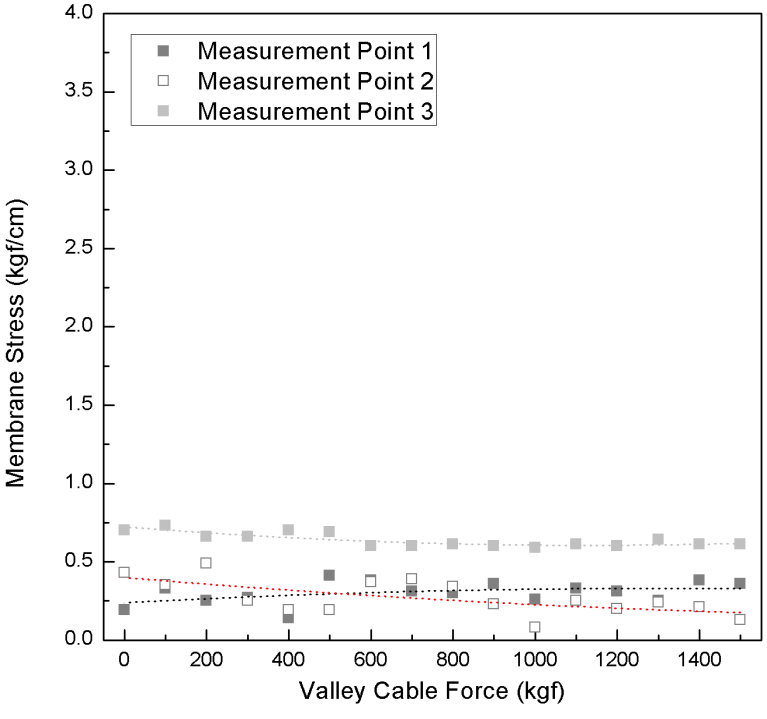


그림 2-2-2-29. 측정위치별 막장력과 누름케이블 장력과의 상관관계 (FILL 방향)

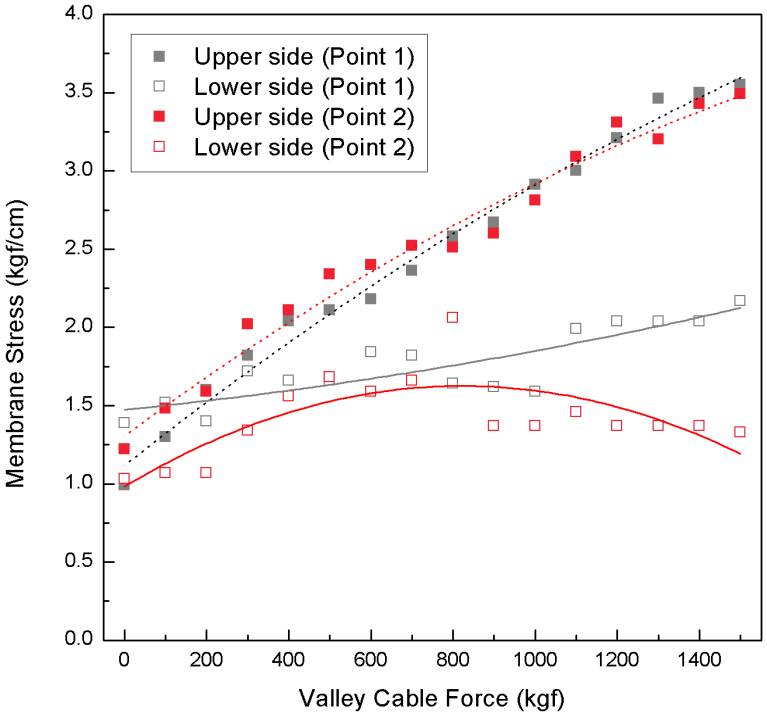


그림 2-2-2-30. 측정위치별 누름케이블 장력에 따른 상하부 막장력 상관관계 (WARP 방향)

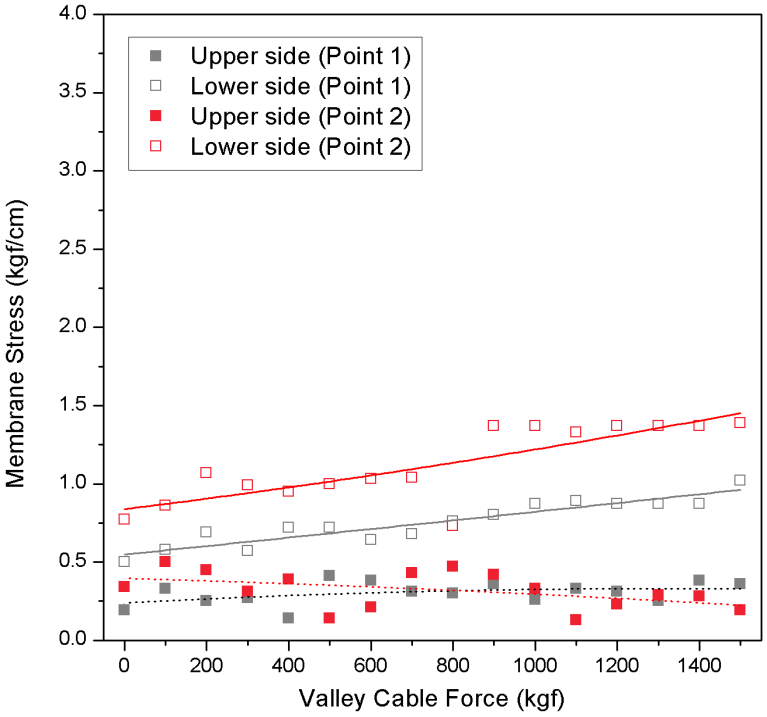


그림 2-2-2-31. 측정위치별 누름케이블 장력에 따른 상하부 막장력 상관관계 (FILL 방향)

아. 막장력 헬스모니터링 시스템

(1) 막장력 헬스모니터링 개념도

막장력 측정 자동화 시스템은 무선으로 데이터 송수신이 가능한 포터블 막장력 측정장치의 전자회로를 베이스로 구성된다. 막장력 자동화 시스템을 컨트롤 할 수 있는 시스템이 구축되면 막장력 헬스모니터링 시스템은 완성된다.

그림 2-2-2-32는 막구조물의 막장력 헬스모니터링 시스템의 개념도를 나타내고 있다. 즉, 실재하는 막구조물의 지붕 판넬 중에서 막장력의 응력완화나, 바람 등의 외부하중에 가장 취약하다고 판단되는 측점을 지정하고, 막장력 자동화 시스템을 설치 및 컨트롤함으로써 막장력을 모니터링할 수 있는 시스템이 구축된다. 그림 2-2-2-33는 막장력 헬스모니터링 시스템의 회로 개념도를 나타내고 있다.

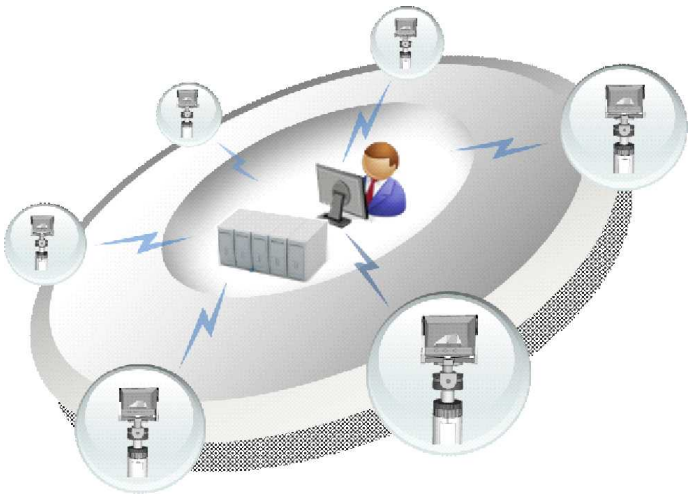


그림 2-2-2-32. 막장력 헬스모니터링 시스템 개념도

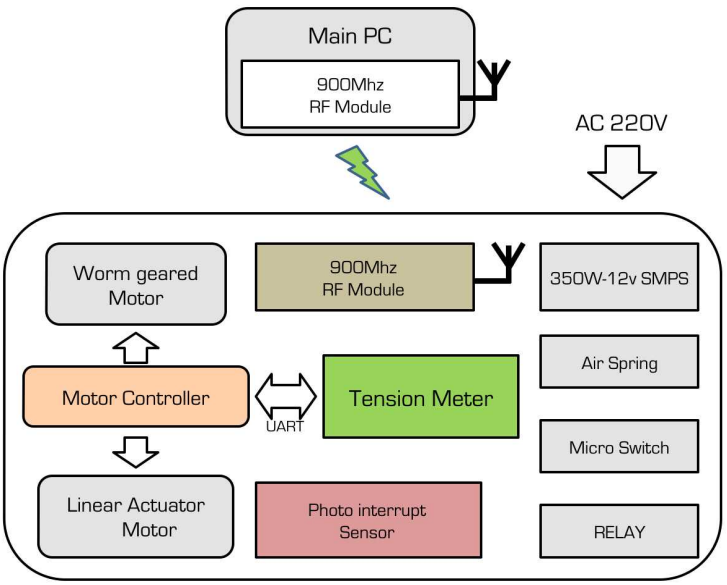


그림 2-2-2-33. 막장력 헬스모니터링 시스템 회로 개념도

(2) 막장력 헬스모니터링 시스템 인터페이스

막장력 헬스모니터링 시스템은 크게 막장력 측정부와 막장력 측정 자동화 부, 그리고 관제센터 내부에 설치되는 컨트롤 시스템으로 구성된다. 관제센터에 설치되어 관리자에게 막장력의 상태를 표시하는 헬스모니터링 시스템의 인터페이스는 그림 2-2-2-34와 같이 전문가가 아니더라도 이해하기 쉽게 구성했다.

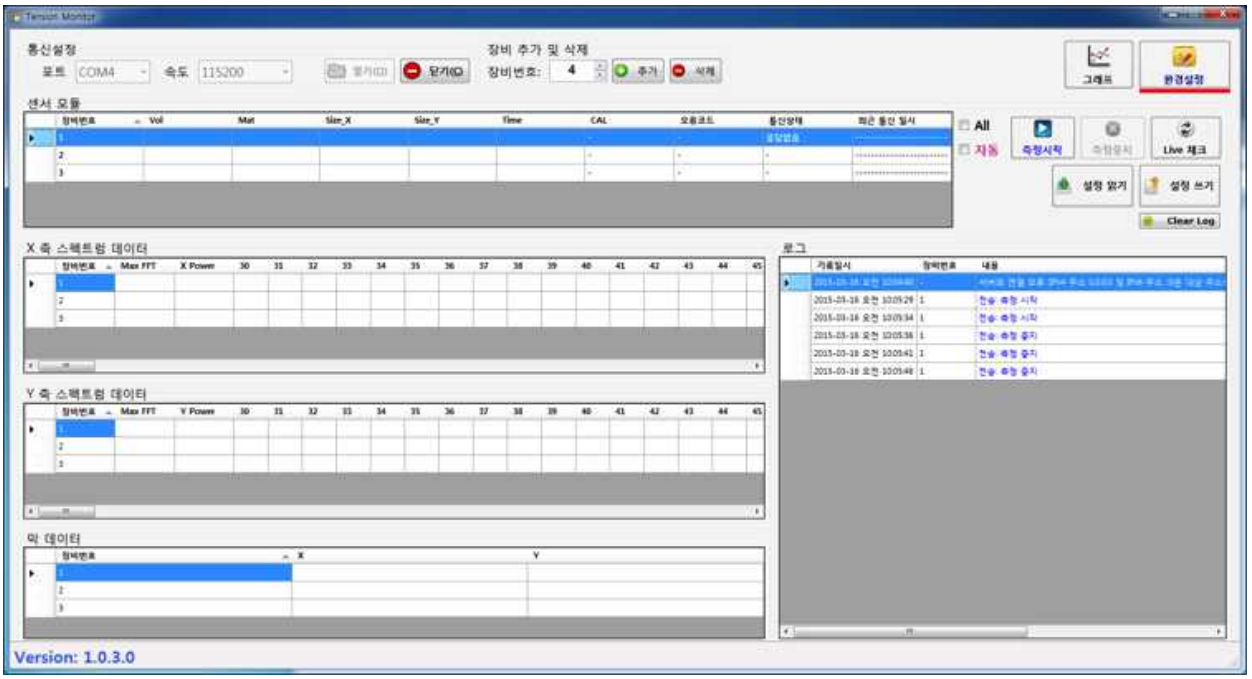


그림 2-2-2-34. 막장력 헬스모니터링 시스템 인터페이스

(3) 막장력 헬스모니터링 시스템 회로도

그림 2-2-2-35는 막장력 헬스모니터링 시스템의 회로도를 나타내고 있다.

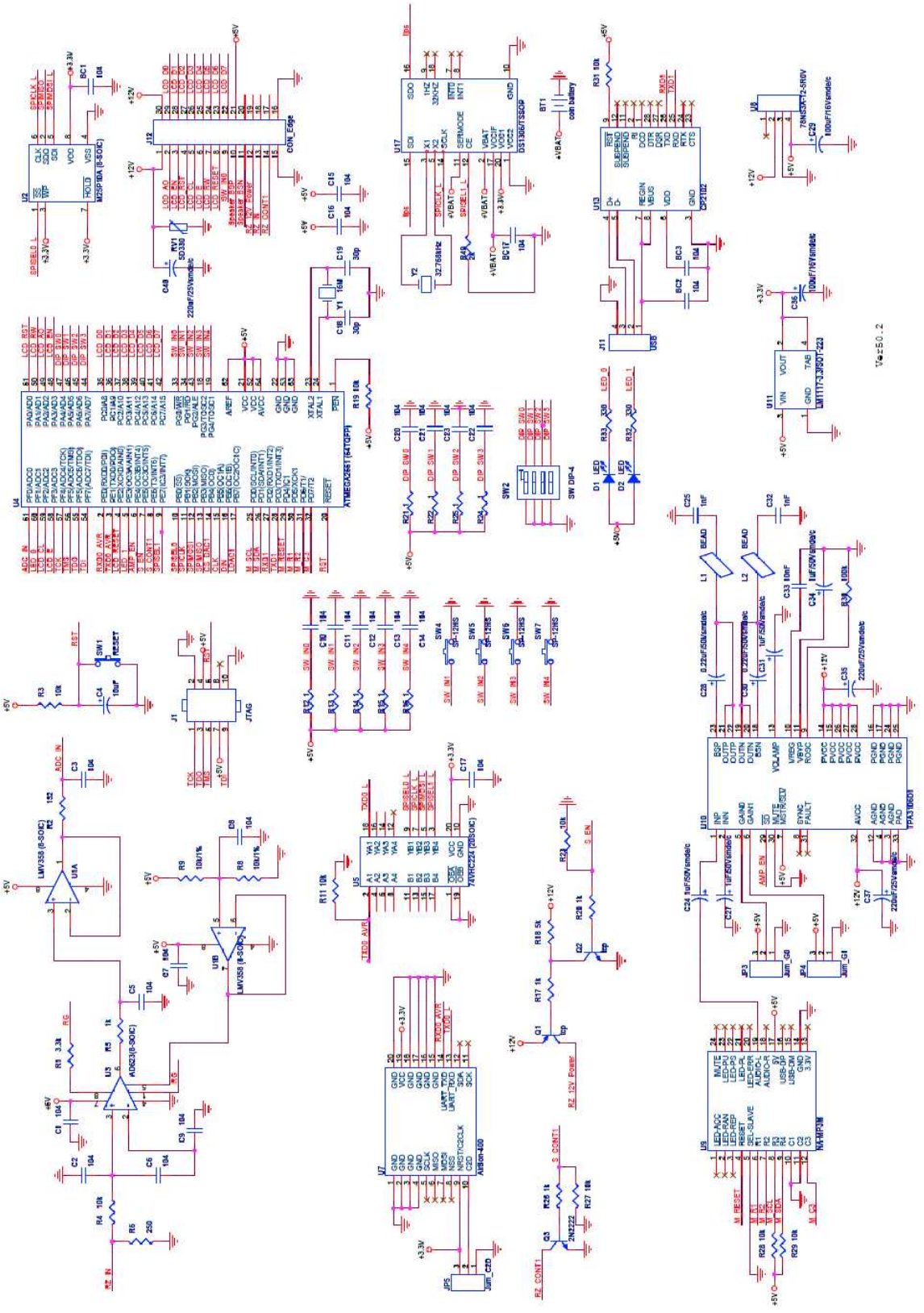


그림 2-2-2-35. 막장력 헬스모니터링 시스템 회로도

자. 막장력 헬스모니터링 시스템 매뉴얼

막장력 헬스모니터링 시스템이 관리자에 의해 적확하게 관리될 수 있도록 운용매뉴얼을 아래와 같이 작성했다.

(1) 설치

배포한 압축 파일을 해제 하여 주십시오. 압축해제한 위치에서 “setup.exe”± 를 실행 후, 화면에 표시에 따라 진행 하여 주시면 됩니다. 만약, 이전 파일이 설치되어 있다면 제거를 먼저 실행 후 설치하여 주십시오.

(2) 운영

(가) 통신 포트 설정

그림 2-2-2-36 화면의 통신 설정에서 통신 모듈이 연결된 포트를 지정하고 속도를 설정한 후 “열기” 버튼을 눌러 주십시오. 통신을 포트를 닫을 때에는 “닫기” 버튼을 눌러 주십시오.

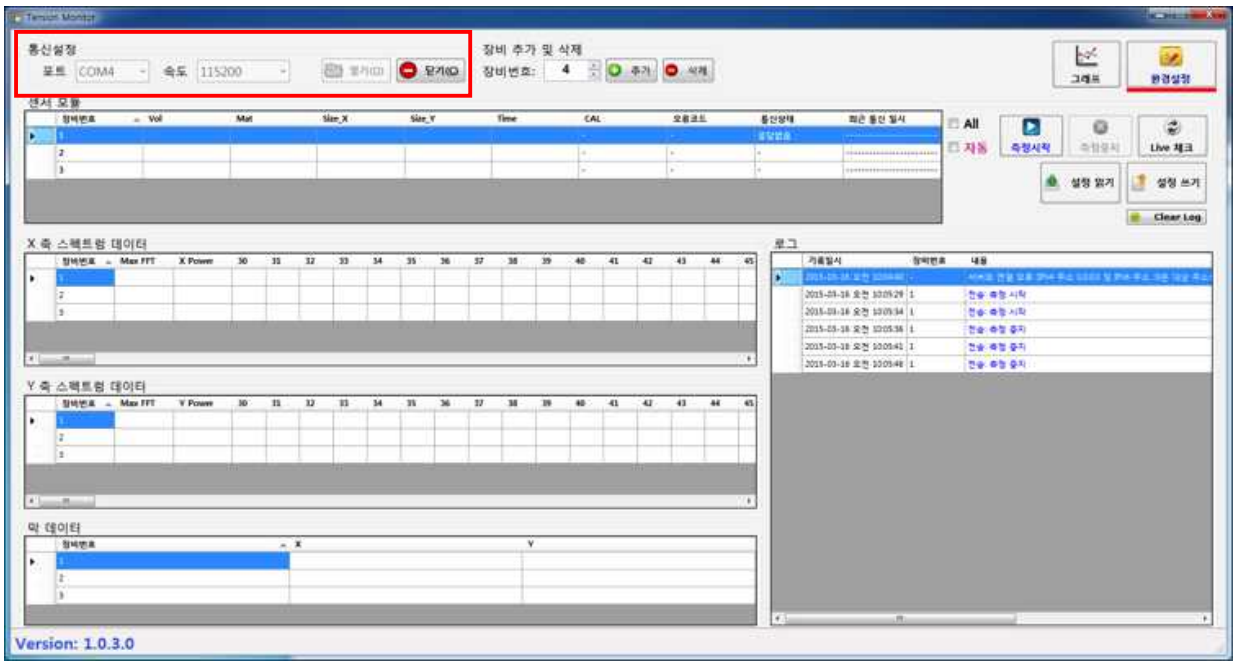


그림 2-2-2-36. 통신포트 설정

(나) 센서 모듈 추가, 삭제

그림 2-2-2-37에서 장력 데이터를 수집하려는 센서 모듈을 추가하여 주십시오. 장비 번호에 추가 할 장비 번호를 입력 후 “추가” 버튼을 눌러 주세요. 잘못 입력 하였거나, 더 이상 통신 하지 않을 장비는 센서 모듈 그리드 상에서 마우스 왼쪽 버튼을 클릭하여 선택 한 후 “삭제” 버튼을 눌러 삭제하시면 됩니다.

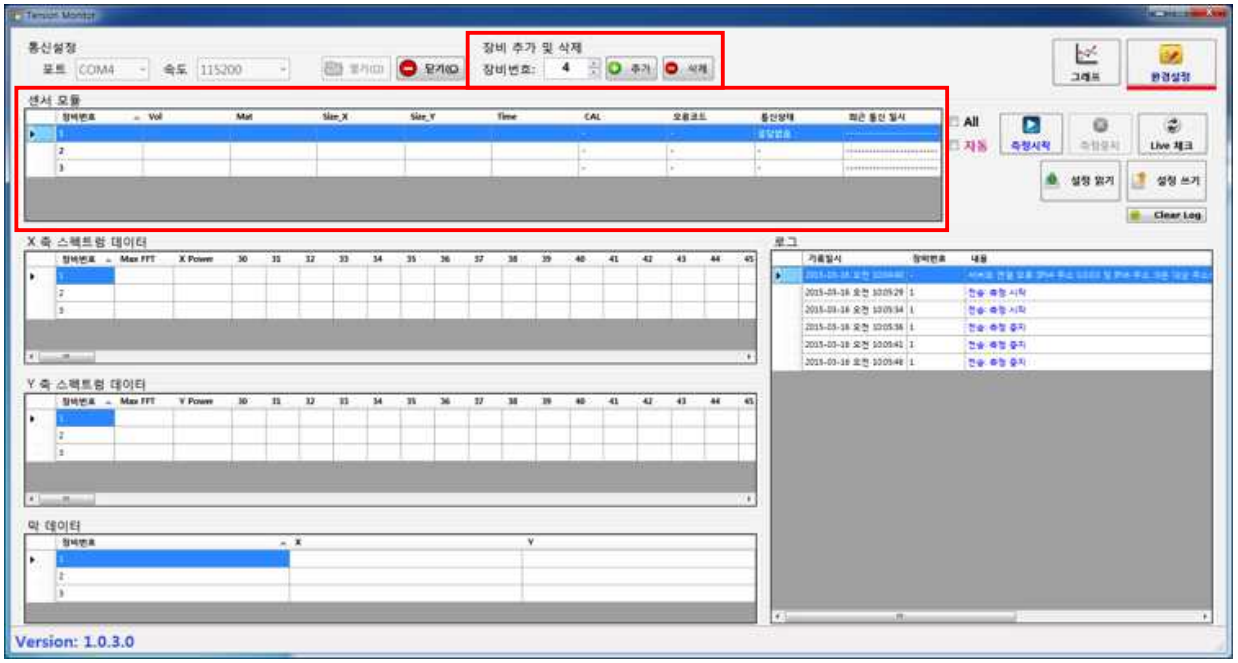


그림 2-2-2-37. 센서 모듈 추가, 삭제

(다) 수동 측정

센서 모듈의 통신 시험을 하거나 데이터를 확인 할 경우 수동으로 측정 할 수 있습니다. 특정 센서모듈과 통신을 하고자 할 때에는 센서 모듈 그리드에서 마우스 왼쪽 버턴을 눌러 선택합니다. ☐ All 을 선택 해제 한 후 측정시작 을 클릭하면 선택된 센서 모듈과 통신을 시도 합니다. 통신 진행 상황은 그림 2-2-2-38과 같이 로그 창에 표시됩니다.

로그

기록일시	장비번호	내용
2015-03-16 오전 10:04:40	-	서버와 연결 오류 (IPv4 주소 0.0.0.0 및 IPv6 주소 ::0은 대상 주소
2015-03-16 오전 10:05:29	1	전송: 측정 시작
2015-03-16 오전 10:05:34	1	전송: 측정 시작
2015-03-16 오전 10:05:36	1	전송: 측정 중지
2015-03-16 오전 10:05:41	1	전송: 측정 중지
2015-03-16 오전 10:05:46	1	전송: 측정 중지

그림 2-2-2-38. 센서 통신

☑ All을 선택한 후 측정시작을 클릭하면 센서 모듈 그리드 상에 추가된 모든 센서 모듈과 순서대로 통신을 시도합니다. 통신이 정상적으로 이루어지면 X축 스펙트럼 데이터, Y축 스펙트럼 데이터 및 막 데이터가 각각의 그리드 상에 표시됩니다.

(라) 자동 측정

☑ 자동을 선택 후 측정시작을 클릭하면 설정된 시간에 자동으로 통신을 시도합니다. 자동 측정 시에도 특정 센서 모듈만 할 것인지 전체 센서 모듈과 통신 할 것인지를 선책 할 수 있습니다.

(마) 센서 모듈 설정값 읽기

센서 모듈 그리드 상에서 설정 값을 읽고자 하는 센서 모듈을 선택하거나, “All”을 선택 한 후 설정 읽기을 클릭하면 센서 모듈에 설정 값을 읽어 옵니다. 읽어 들인 값은 센서 모듈 그리드 상에 표시됩니다

.

(바) 센서 모듈 설정값 쓰기

센서 모듈 그리상에서 설정 값을 변경 후 설정 쓰기을 클릭하면 설정 값을 전송합니다.

※센서 모듈에 설정값 쓰기를 할 때 센서 모듈 그리등의 각 설정값이 빈 칸으로 되어 있으면 오류가 발생할 수 있습니다.

(사)통신 주기 설정

자동 측정일 때 통신 주기를 설정 할 수 있습니다. 환경설정을 클릭하여 그림 2-2-2-39와 같이 환경설정 창을 엽니다. 측정 일정 그리드의 값을 설정합니다.

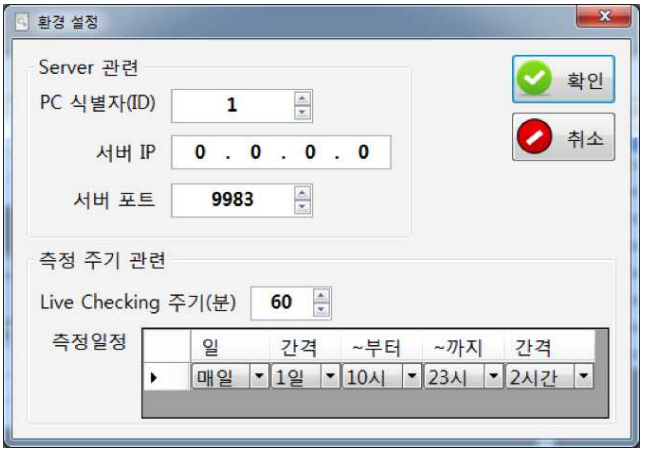


그림 2-2-2-39. 센서 통신

설정 예제)



매월 1일부터 1일 간격으로 10시부터 23시까지 2시간 간격으로 측정(1일,2일,3일, 4일…)



매월 1일부터 2일 간격으로 10시부터 23시까지 2시간 간격으로 측정(1일, 3일, 5일,7일…)



매월 1일부터 15일 간격으로 10시부터 23시까지 2시간으로 측정(1일, 16일, 31일)



매월 10일 10시부터 23시까지 2시간 간격으로 측정(1월10일, 2월10일, 3월10일…)

(3) 환경 설정

(가) PC식별자



측정된 데이터를 서버에서 조회 할 때 필요합니다. 데이터를 수집하는 PC마다 중복되지 않는 번호로 설정하여 주십시오.

(나) 서버IP



측정된 데이터를 전송 할 서버의 IP 주소입니다.

(다) 서버포트



측정된 데이터를 전송 할 서버의 포트 번호입니다. 특별한 이유가 없는 한 기본 설정 값을 변경하지 마십시오.

(라) Live Checking 주기



설정된 시간마다 센서 통신 모듈과 통신 상태를 확인 합니다.

(4) 로그 파일

그림 2-2-2-41과 같이 프로그램이 설치 된 폴더에 “screen_data”±와 “spectrum_data” 의

하위 폴더가 만들어지며, 이 폴더에 각 센서 모듈의 데이터 생성됩니다.

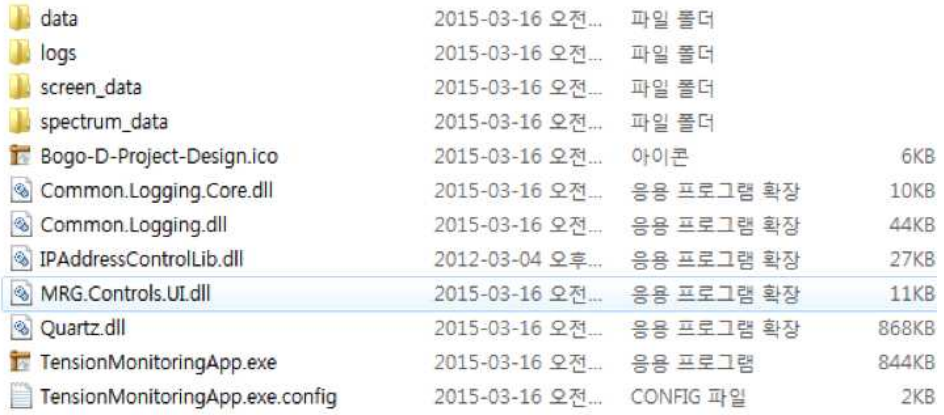


그림 2-2-2-41. 센서 모듈 데이터 생성

(5) IP 설정

IP 설정은 다음과 같은 순서로 진행합니다.

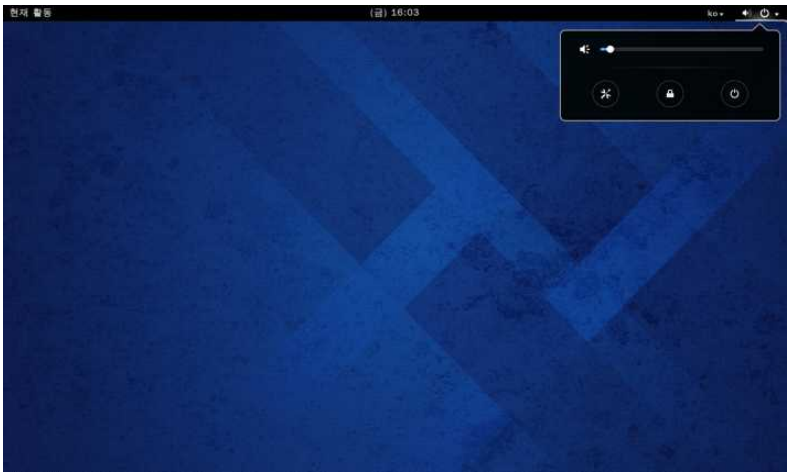
(가) 계정선택



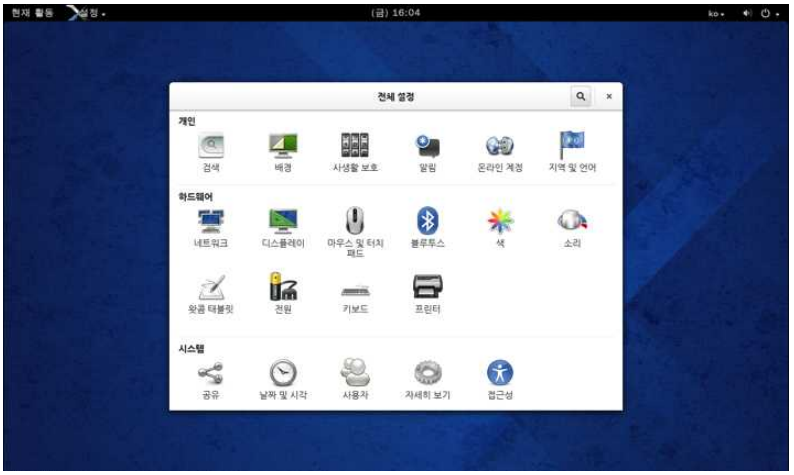
(나) 비밀번호 입력



(다) 전체설정 메뉴 열기



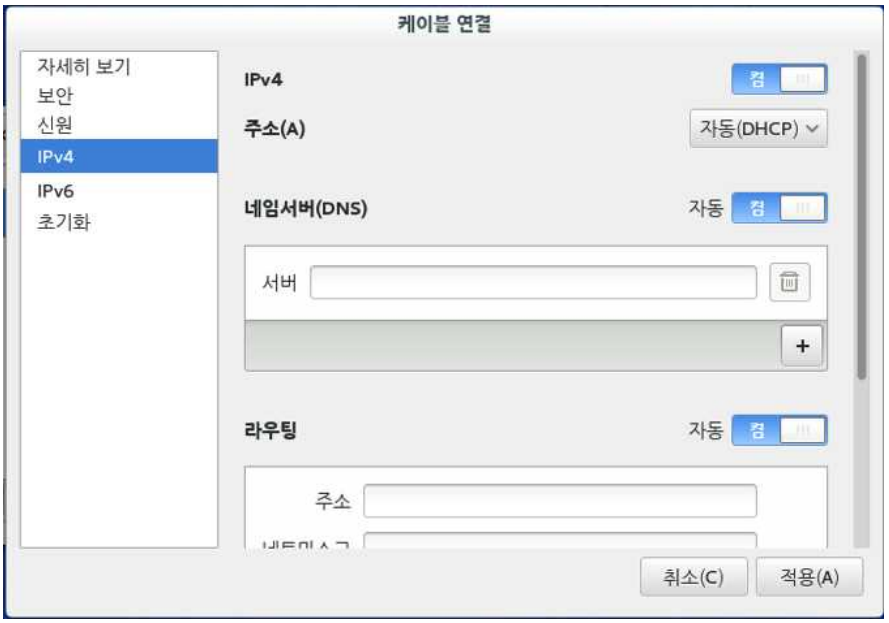
(라) 네트워크 설정 메뉴 열기



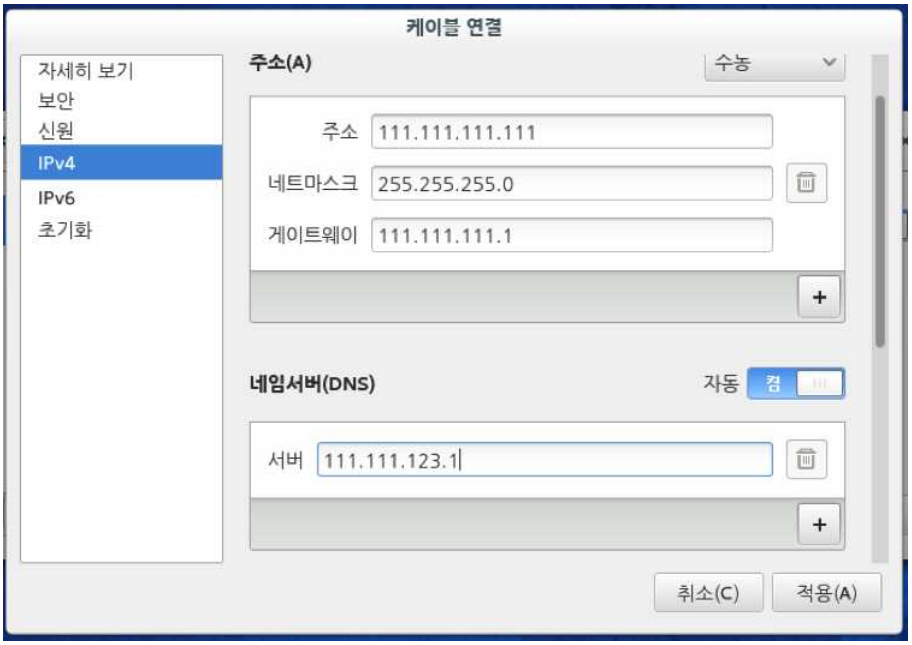
(마) IP 설정 메뉴 열기



(바) IP 설정 메뉴 열기



(사) IP, 넷마스크, 게이트웨이, DNS를 수동 입력



차. 막장력 헬스모니터링 시스템 현장 시범적용

연구 개발로 완성된 막장력 헬스모니터링 시스템을 현장에 시범 설치해 운영함으로써 개발 시스템의 오류를 찾아내고, 피드백과정을 거쳐 개선하기 위해 국내 최초의 돔구장인 고척스카이돔에 시범 설치했다.

그림 2-2-2-40은 고척스카이돔 지붕막 구조물에 막장력 측정 자동화 시스템이 설치된 위치를 나타내고 있다. 막장력 헬스모니터링에서 막장력 측정부와 자동화 부는 해당 구조물의 하부에 설치된다. 그림 2-2-2-41과 42는 막장력 측정 자동화 시스템을 해당 구조물에 상시 설치하

기 위해 제작한 상시설치 보조물의 도면 및 상세를 나타내고 있다. 또, 그림 2-2-43에서 46은 설치 모습을 나타낸다.

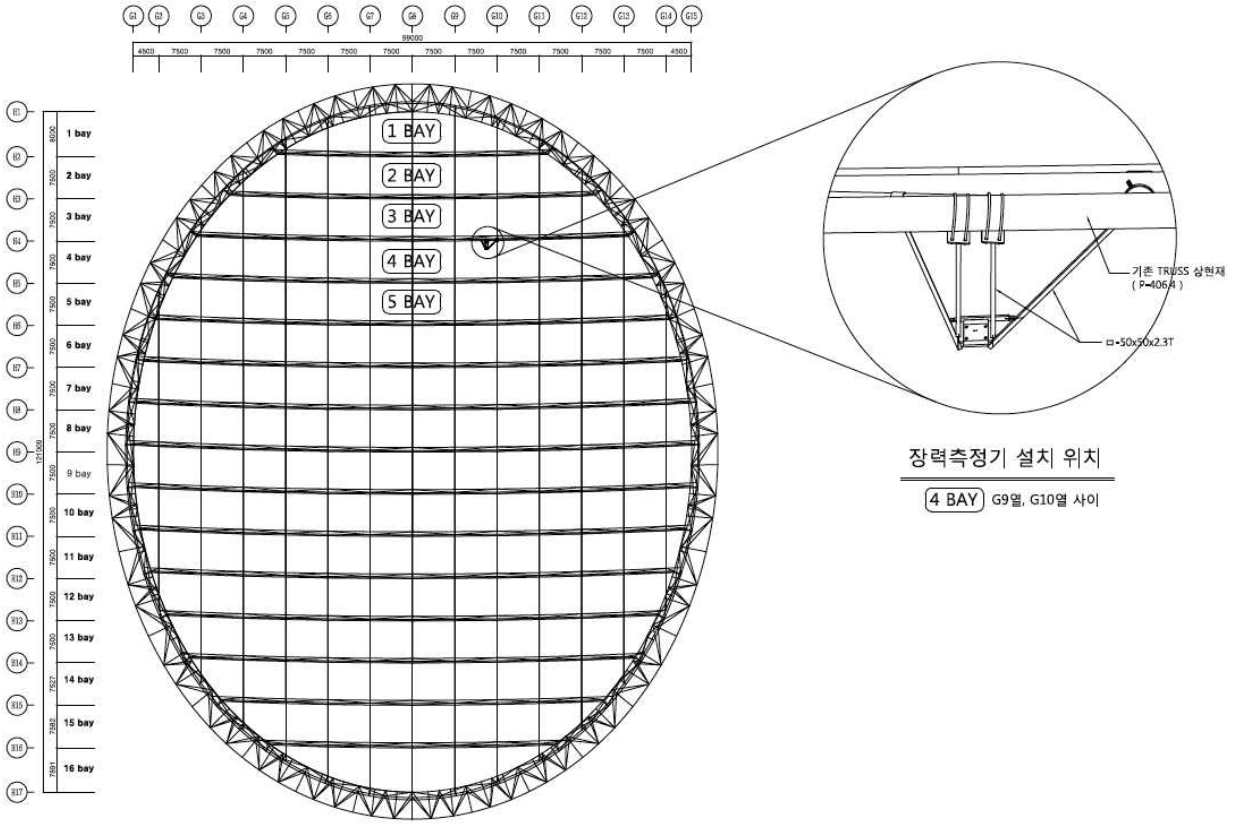


그림 2-2-2-40. 고척스카이돔 막장력측정 자동화 시스템 설치 위치

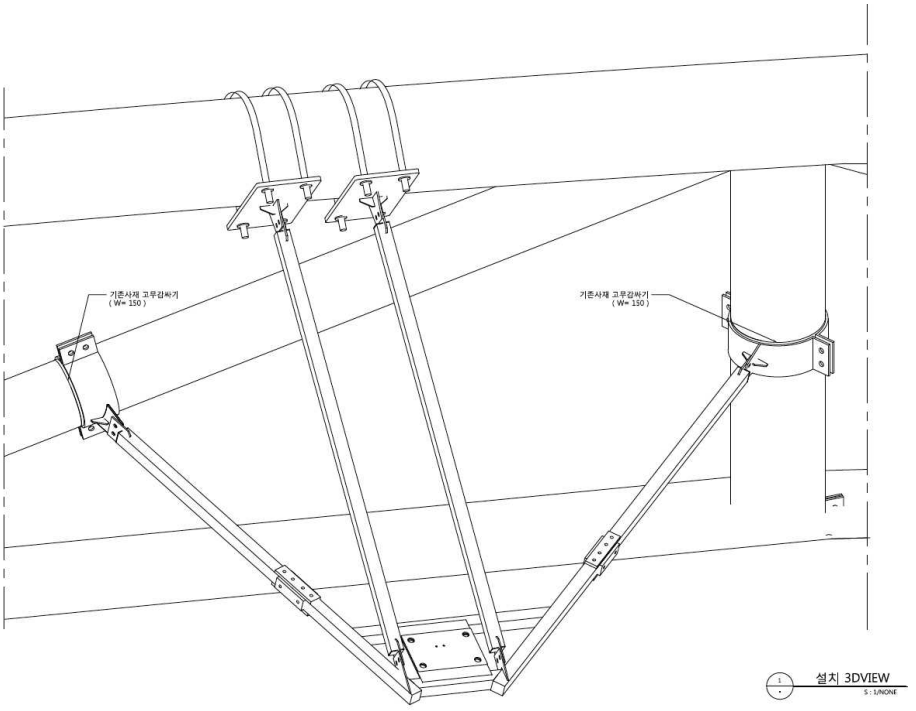


그림 2-2-2-41. 막장력측정 자동화 시스템 설치도

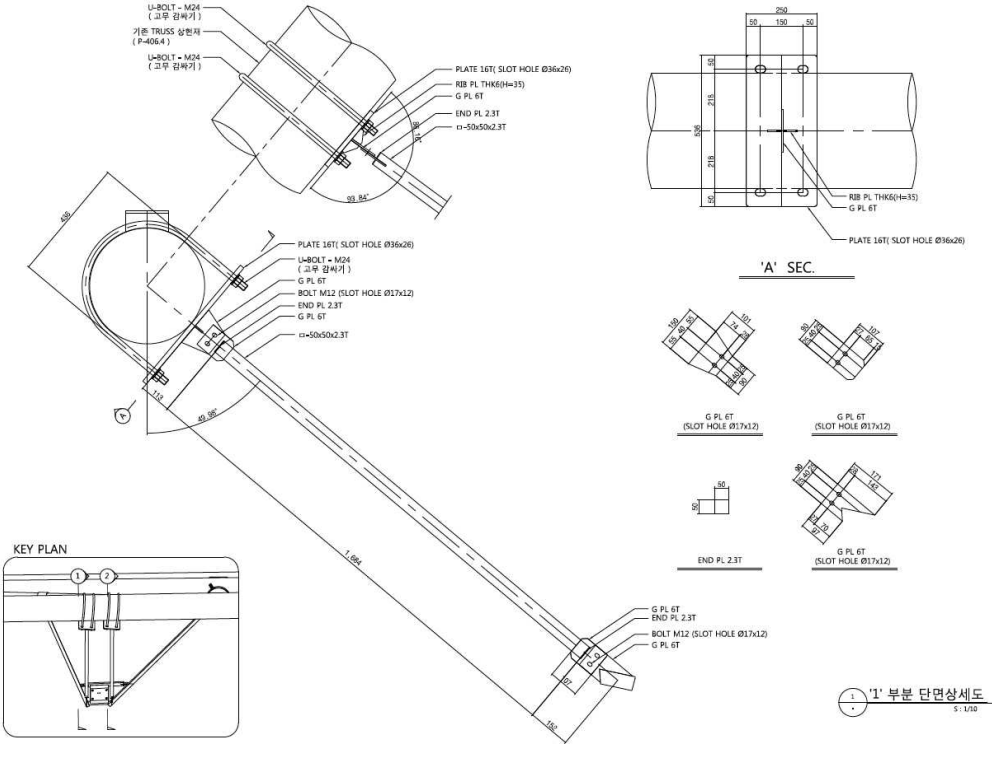


그림 2-2-2-42. 막장력측정 자동화 시스템 설치 디테일

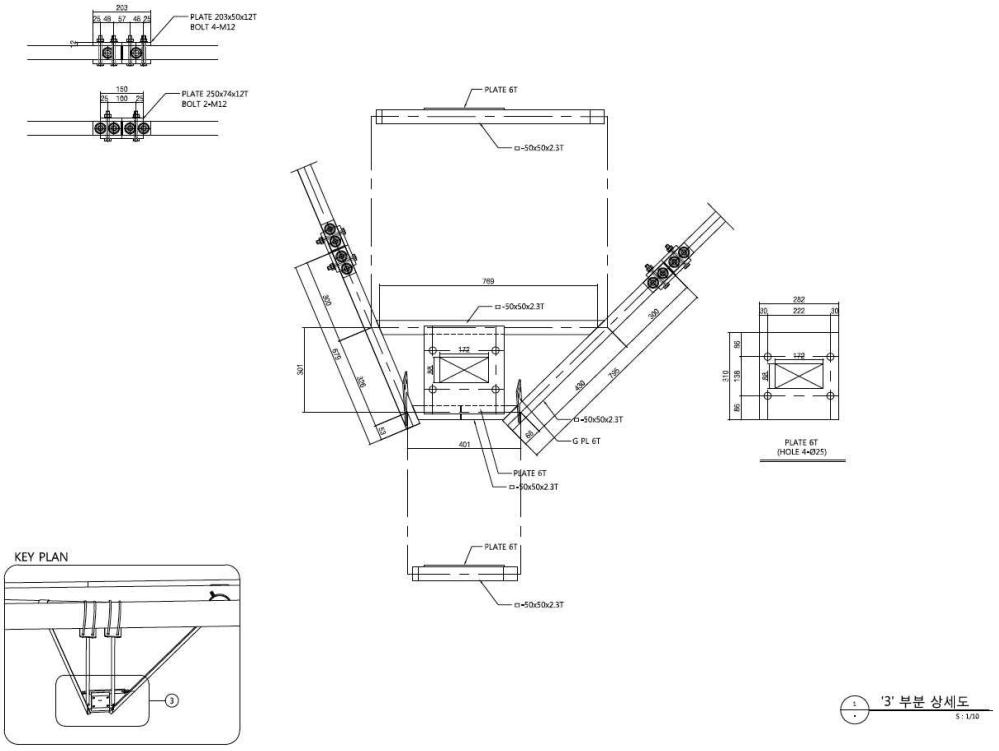


그림 2-2-2-42. 계속

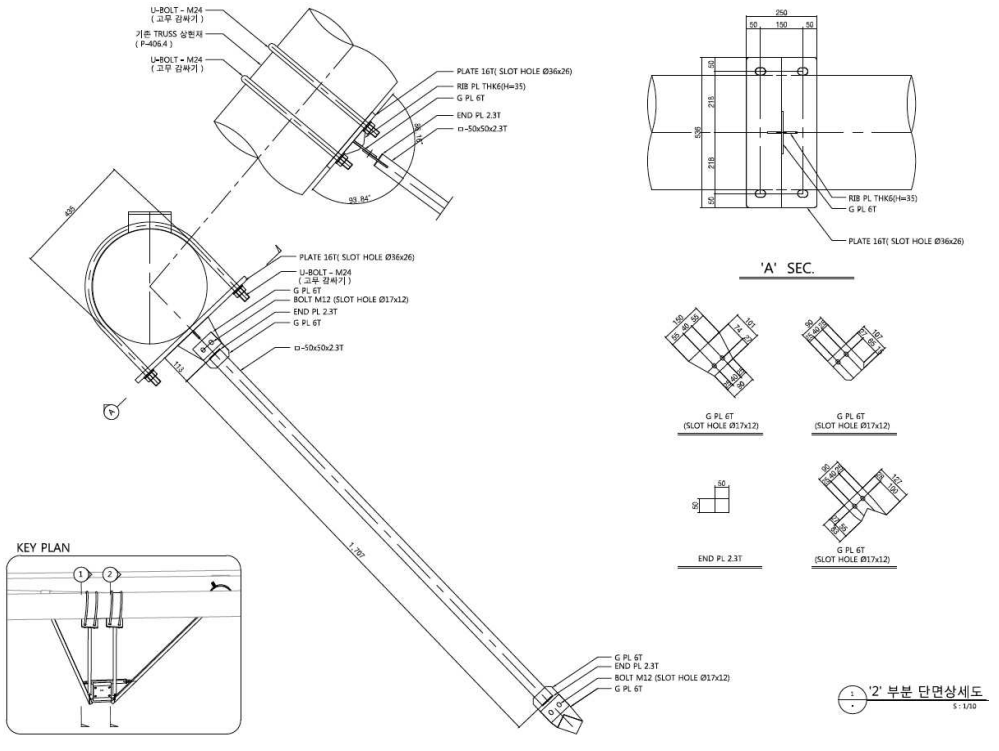


그림 2-2-2-42. 계속

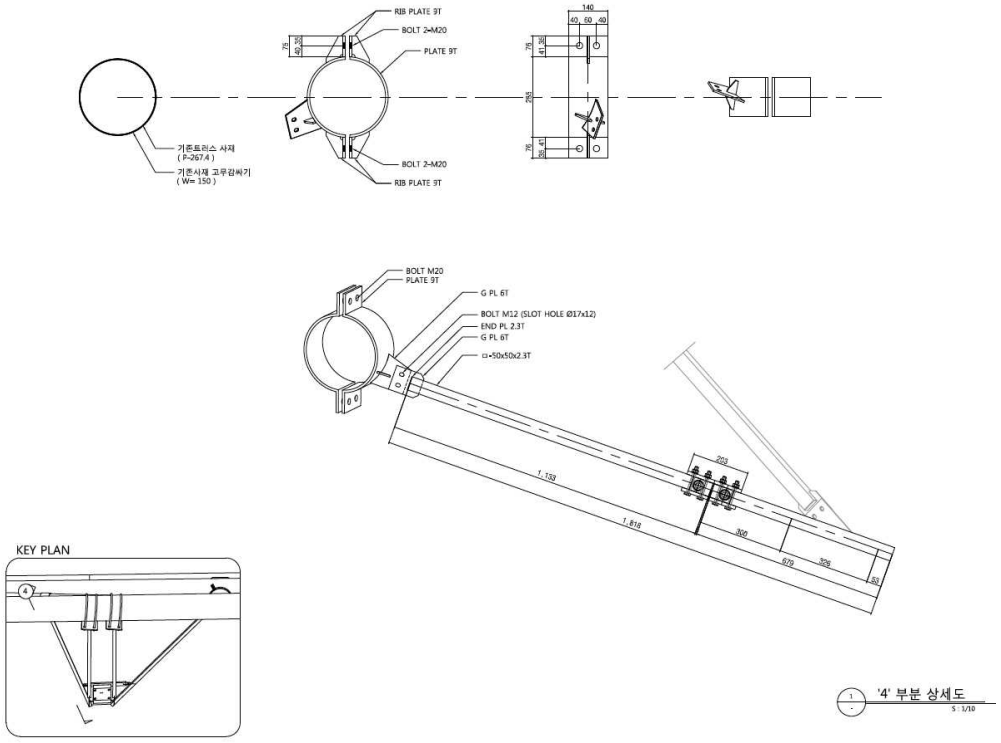


그림 2-2-2-42. 계속

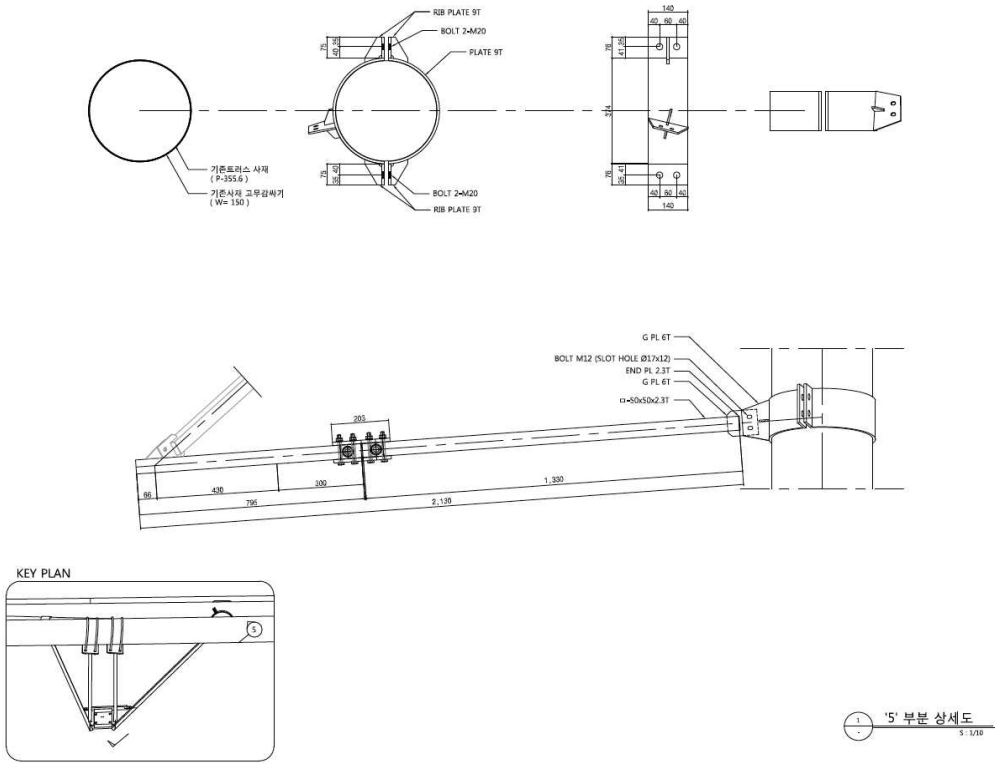


그림 2-2-2-42. 계속




그림 2-2-2-43. 자동화시스템 설치대 조립모습

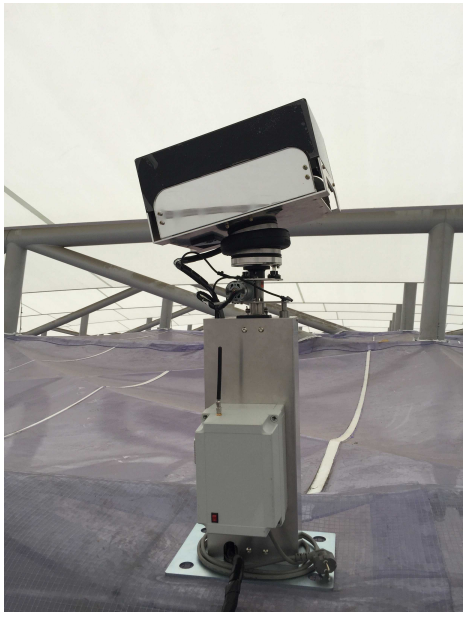


그림 2-2-2-44. 막장력측정 자동화 시스템

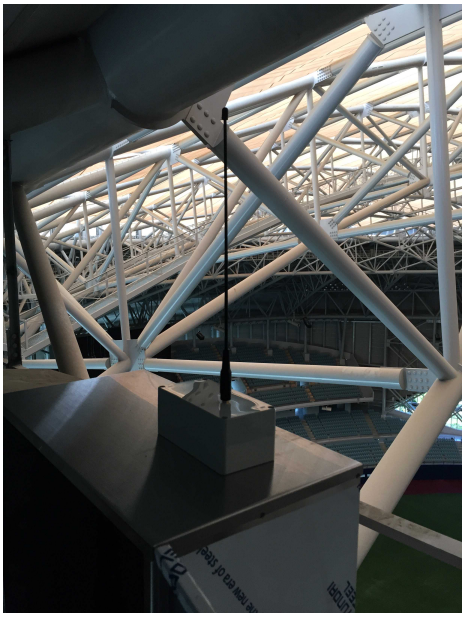


그림 2-2-2-45. 컨트롤 시스템




그림 2-2-2-46. 자동화 시스템 설치 모습

카. 막장력 헬스모니터링 시스템 시범운용

고척스카이돔에 설치된 막장력 헬스모니터링 시스템을 시범운영했다. 그림 2-2-2-47은 막장력 헬스모니터링 시스템의 인터페이스에 표시된 막재 X축(Fill 방향)의 진동데이터 FFT 결과 및 파워스펙트럼의 크기를 나타낸다. 또, 그림 2-2-2-48은 막재 Y축(Warp 방향)의 결과를 나타내고 있다. 게다가 그림 2-2-2-49는 막장력 헬스모니터링 시스템 상에서 측정된 막장력을 나타내고 있다.

막장력 헬스모니터링의 시범운용 결과 개발한 모든 시스템이 정상적으로 작동되고 현장 적용이 가능한 시제품이 완성되었다고 판단된다.

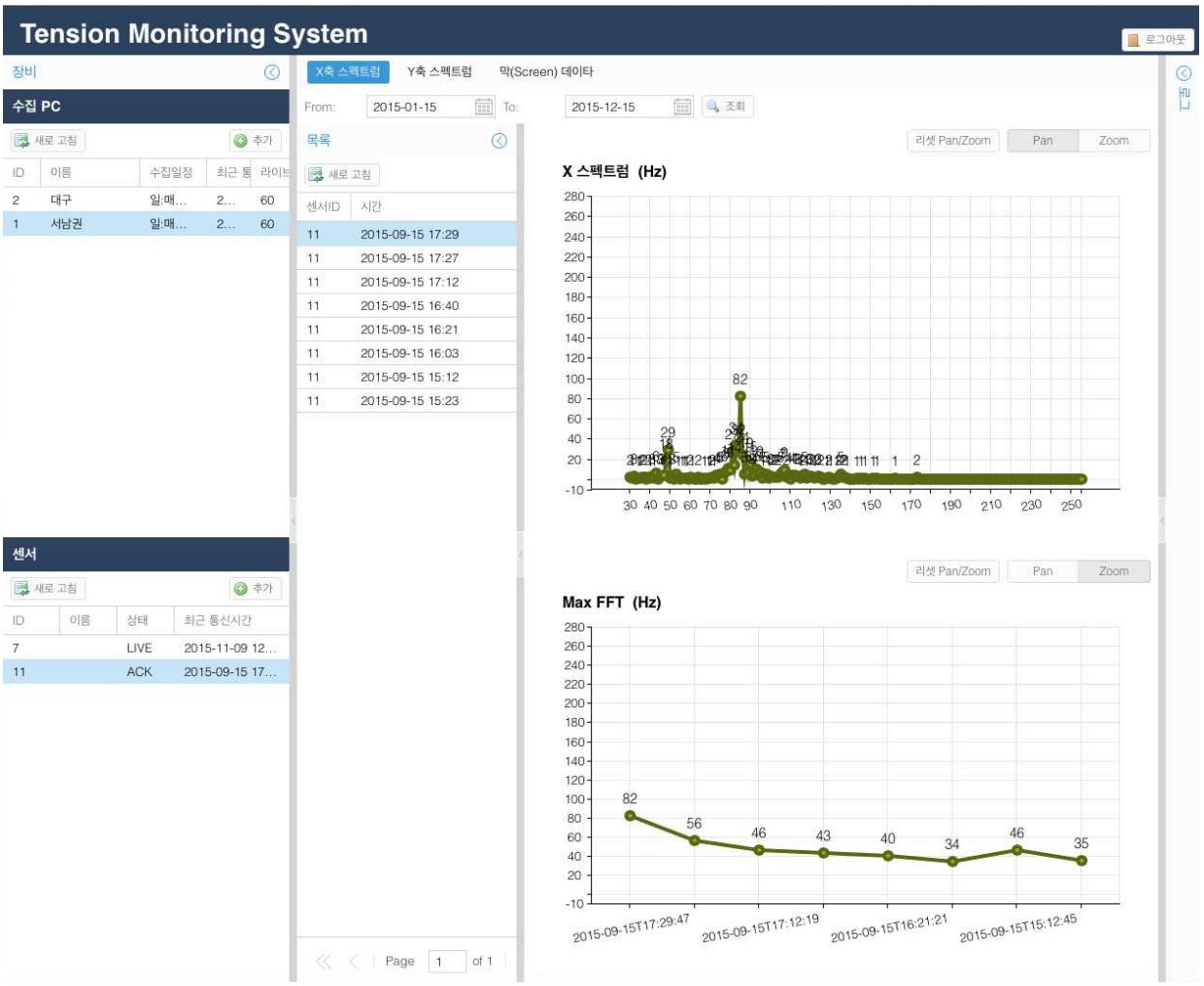


그림 2-2-2-47. 막장력 헬스모니터링의 X축 진동데이터

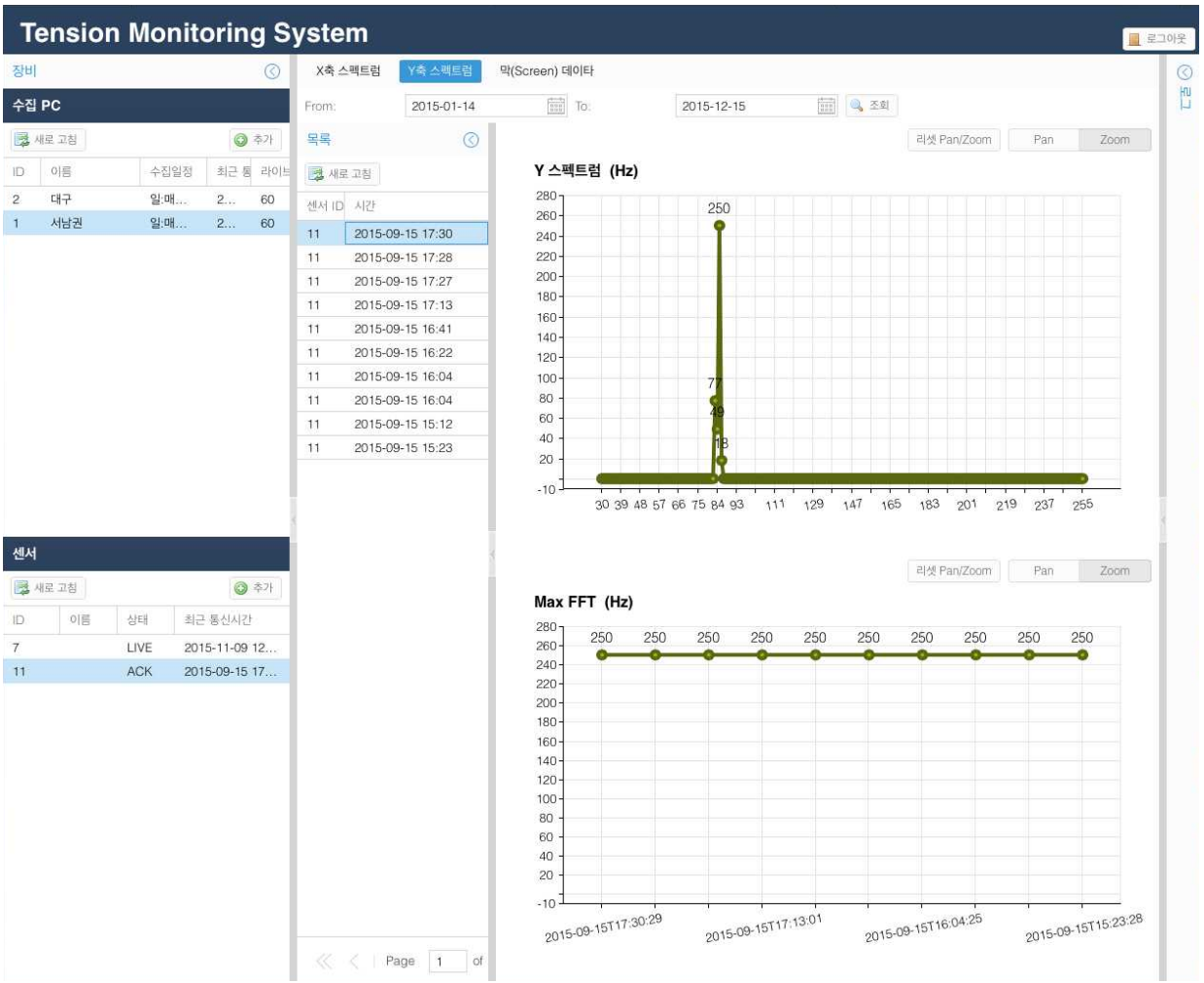


그림 2-2-2-48. 막장력 헬스모니터링의 Y축 진동데이터

타. 막장력 헬스모니터링 시스템의 현장 적용성

이 연구에서 개발된 막장력 헬스모니터링 시스템은 막장력 자동화 시스템과 이 시스템을 구동할 수 있는 관리시스템의 결합으로 완성되었다. 그러나 개발된 시스템을 각 현장에 적용시키기 위해서는 표준화된 막장력 자동화 시스템과 관리시스템 외에도, 막장력 자동화 시스템을 현장에 고정시킬 수 있는 설치 구조물을 요한다.

고척스카이돔과 같이 골조막구조로 이루어진 막구조물은 지붕막을 형성하는 철골조가 지붕막 하부에 형성되므로 이를 이용해 간단한 철골 설치물로 시스템을 구성할 수 있으나, 인천문학경기장과 같이 인장막 형식을 취하는 막구조물의 경우에는 막장력 자동화 시스템을 장착할 수 있는 별도의 설치 시스템이 필요하다. 따라서 각 적용 현장 사항을 충분히 검토한 후 장착 시스템 설계도 수반되어야 할 것으로 판단된다.

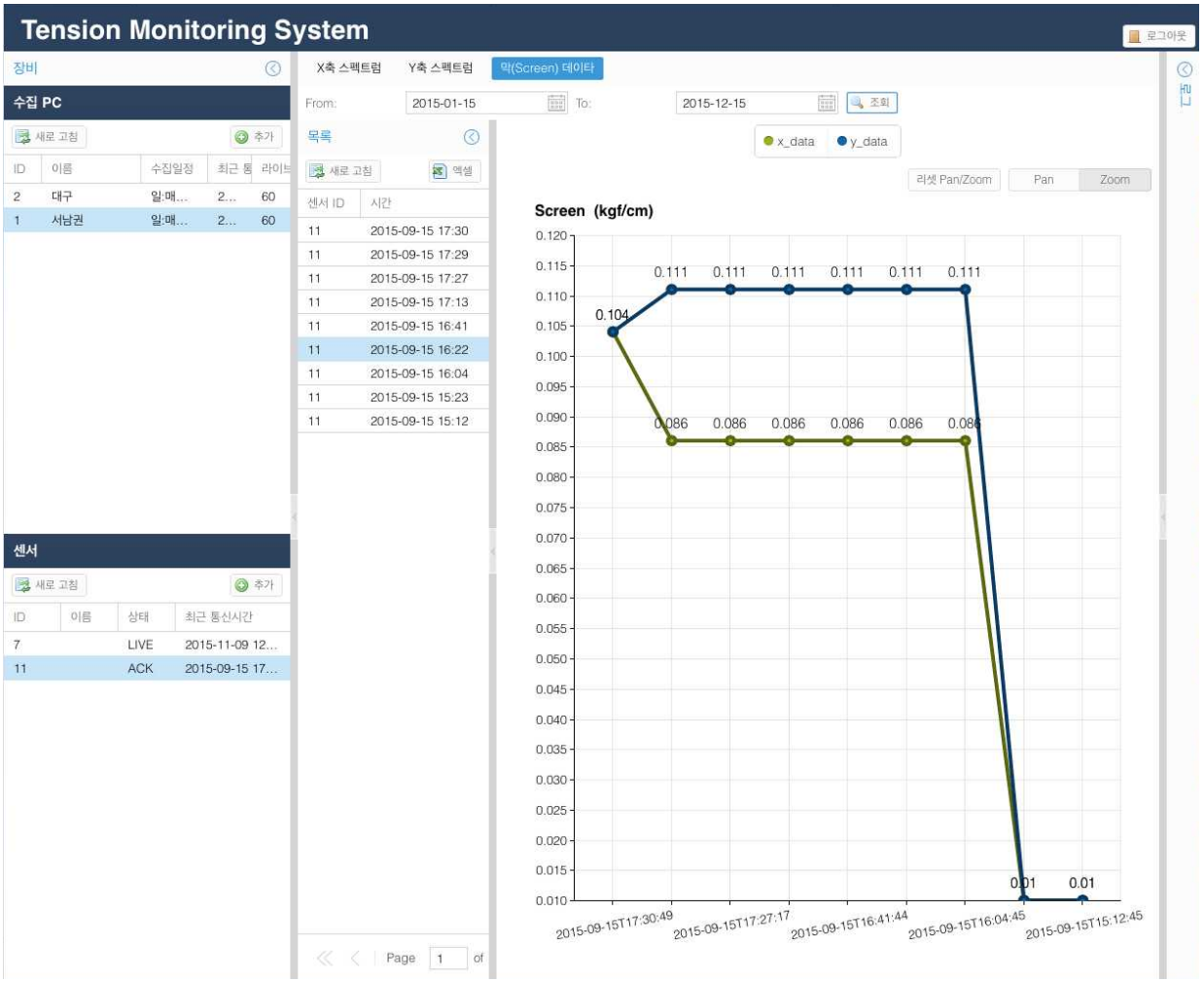


그림 2-2-2-49. 막장력 헬스모니터링의 X축, Y축 장력

파. 막장력 헬스모니터링 시스템의 향후 고도화 방안

이 연구과제에서 막장력 헬스모니터링 시스템은 시스템의 시제품 제작으로 그 적용성을 현장 시범 적용으로 검증한 단계로 향후 실용화를 위해서는 아래와 같은 기술 보완이 있어야 할 것으로 판단된다.

- 막장력 헬스모니터링 시스템을 다양한 구조형식의 막구조물에 적용해 오랜 시간 검증함으로써 문제점을 찾아내고, 시스템에 피드백해 완성도를 향상 시켜야 할 것으로 판단됨
- 헬스모니터링 시스템의 소프트웨어 성능 향상 및 오류 발견 시 알림 시스템 탑재 요망
- 태풍, 고온 등의 외부환경 변화에 의존하지 않는 유연한 모니터링 시스템으로 개선 필요
- 관제센터에서 모니터링 시스템을 보다 효율적으로 관리할 수 있도록 인터페이스 개선

3. 막장력 유지관리 기준/지침(안) 작성

막장력 유지관리 기준/지침(안)은 포터블 막장력 측정장치가 완성되고 막장력 헬스모니터링 시스템이 구축되어 기존 막구조물의 장력 추이가 데이터로 축적되어 이 값을 토대로 도입 장력의 적합 여부가 판단될 때 가능해 진다. 이 연구에서 개발한 막장력 측정장치를 이용하여 현장 구조물의 장력을 측정함으로써, 측정장치의 현장 사용성을 검증할 뿐 아니라, 막구조물의 막장력 유지관리 기준/지침(안) 작성을 위한 데이터베이스를 구축한다.

가. 기존 막구조물의 장력 측정

(1) 고척스카이돔

고척스카이돔은 그림 2-2-3-1에 그 개요를 나타내는 바와 같이, 우리나라 최초로 돔으로 구현되는 공간구조물로, 철골 프레임의 지붕틀에 막재를 덮은 골조막 형식을 취하고 있다. 이 구조물은 구조형식 상 누름케이블로 막을 고정함으로써 막의 하부로부터 받는 응력도 부담하고 있다. 특히 이 구조물의 누름케이블에는 케이블 장력을 실시간으로 모니터링할 수 있는 시스템이 장착되어 있을 뿐 아니라, 경우에 따라서는 재인장도 가능한 재인장 소켓이 설치되어 있다.



구분	내용	
구조물 명칭	고척스카이돔	
위치	서울특별시 구로구 고척동 63-6	
규모	121m×99m	
막구조	형식	골조막구조
	배이 수	16(메인 기준)
	외막	PTFE(0.8t)
	내막	PTFE(0.35t)

그림 2-2-3-1. 고척스카이돔 전경 및 개요

(가) 고척스카이돔 막장력 측정 개요

막장력 측정 당시 고척스카이돔은 막재가 시공된 지 약 3개월이 경과한 상태로 아직도 크립 중에 있었다. 따라서 모든 위치에서 장력을 측정하는 것은 큰 의미가 없으므로 그림 2-2-3-2에 보이는 6곳에서 장력측정을 진행해 개발한 막장력 측정장치의 현장 적용성을 검증하는데 그 목적을 둔다. 측정은 한 곳에서 동일하게 3번 수행해 측정미스를 방지하고자 했다. 측정 방향은 막재 섬유방향을 고려해 수평방향(Warp방향)을 X방향, 수직방향(Fill방향)을 Y방향으로 정했다. 또, 측정자의 영향 여부를 알아보기 위해 측점 P4에서는 측정자를 바꾸어 측정했다. 측정장치는 막 진동 경계박스가 20×30cm인 것과 14×21cm의 두 개로 측정에 임했다. 그

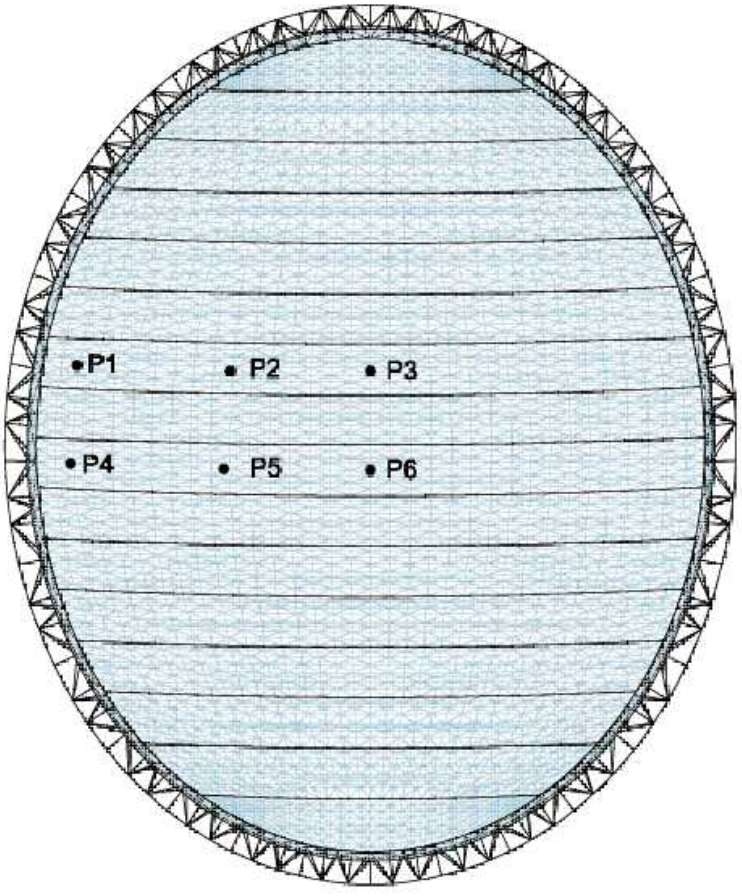


그림 2-2-3-2. 고척스카이돔 측점 위치도

림 2-2-3-3에서 2-2-3-8에 측정모습을 나타내고 있다. 특히, 그림 2-2-3-5는 측정진동수를 표시하고 있는 액정을 나타내는데, 스펙트럼의 크기가 크고 그 크기가 제일 큰 110Hz의 공진진동수 외에 양쪽에 그 크기가 작은 2번째, 3번째 진동수가 있음을 알 수 있다.

(나) 고척스카이돔 막장력 측정 결과

표 2-10에 막 진동 경계박스가 20×30cm를 적용한 측정장치의 현장검증 결과를 나타내고 있다. 측정 결과로부터 P1와 P4, P2와 P5, P3와 P6가 거의 같은 값의 장력이 도입되어 있음을 알 수 있다. 장력 값도 아치형의 지붕 중앙부로 갈수록 값이 커짐을 알 수 있는데, 이는 이 구조물의 특성에 기인한다. 즉 골조와 골조 사이에 위치하는 누름케이블이 아치형을 따라 타원형의 골조부분에서 잡아당기는 형상이므로 정 중앙에서 가장 큰 힘을 막재에 전달하고, 골조 링 부위에서는 막에 닿지 않아 장력 전달이 되지 않고 있음을 의미한다. 따라서 측정값은 구조형식의 이치에 맞게 도입되어 있음을 측정을 통해 검증되고, 개발한 측정장치의 정확성도 반증한다.

P4 지점의 장력 값은 측정자 A와 측정자 B의 결과 값을 나타내는데, X축 방향에서 측정자 A가 1.02kgf/cm인데 비해 B는 1.00kgf/cm를, Y축 방향에서 측정자 A의 값이 0.90kgf/cm인데 비해 B는 0.94kgf/cm의 값을 얻었다. 두 측정자의 값은 소수 점 이하 2번 째 유효숫자에서의 차이만 나타낼 정도로 미세함을 알 수 있고, 이 연구에서 개발한 포터블 막장력 측정장치가 측

정자의 영향을 거의 받지 않는 다는 것을 보여주고 있다. 또, 같은 지점 3회의 측정값 사이에 편차가 적고 안정된 값이 얻어짐도 알 수 있다.

다만, 측정장치로 경계박스의 크기가 다른 시제품 2대를 적용했으나, 경계박스 크기가 20×30cm의 측정장치는 안정된 값이 일관되게 측정되는 반면, 14cm×21cm의 경계박스를 가진 측정장치는 장치 자체가 막재 위에서 안정되지 않아 측정자가 신경 써 잡고 있어야 하고, 좌우 롤링으로 측정값을 얻는데 어려움이 있었다.

현장에서는 바람이나 작업자의 이동 등의 영향으로 막재는 항상 진동하고 있어, 14cm×21cm의 경계박스로는 진동경계를 구획하기 어렵다는 결론을 얻었다. 따라서 14cm×21cm의 경계박스보다 큰 20cm×30cm의 경계박스를 기준으로 하고, 이 크기보다 10% 감소시킨 18cm×27cm의 경계박스를 이용해 현장 검증을 시행하기로 했다.

이상의 결과를 종합하면, 이 연구로 개발된 포터블 막장력 측정장치는 현장 적용에 문제가 없고, 같은 측정 점에서의 결과 값에 편차가 적은 안정된 값이 얻어지며, 측정자의 영향을 받지 않는 다는 것을 알 수 있다.

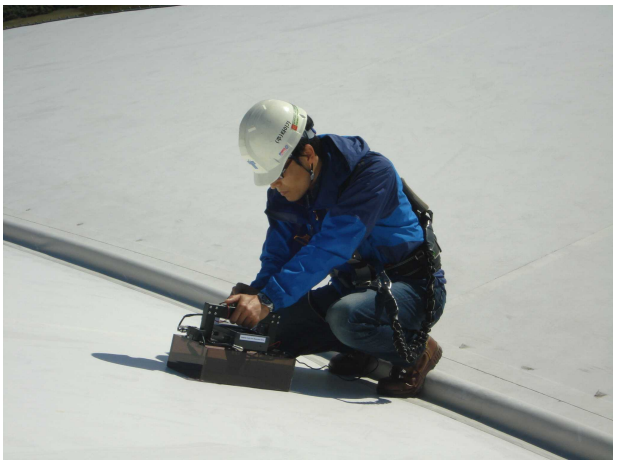


그림 2-2-3-3. 막장력 측정사진1

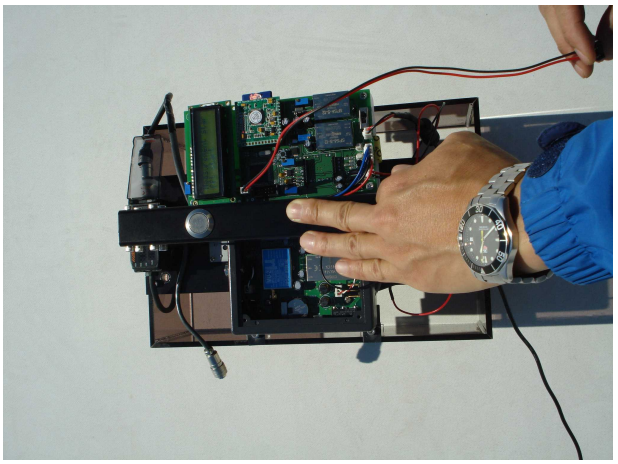


그림 2-2-3-4. 막장력 측정장치



그림 2-2-3-5. 측정 진동수



그림 2-2-3-6. 소형 막장력 측정장치 측정



그림 2-2-3-7. 소형 막장력 측정장치 측정

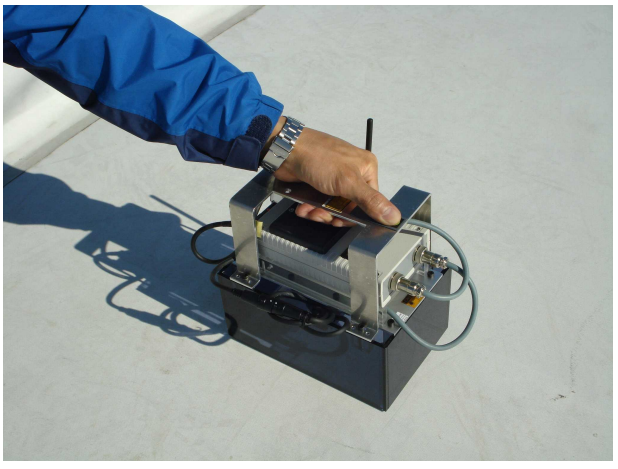


그림 2-2-3-8. 소형 막장력 측정장치

표 2-10. 고척스카이돔 검증실험 결과

측점 위치	번호	방향	측정진동수	막장력 측정값		막장력 보정값		비고
			(Hz)	$T_{ex}\ cm$	T_{ey}/cm	T_{ex}'/cm	T_{ey}'/cm	
P1	1	X	76	0.92	0.80	1.00	0.88	
		Y	74					
	2	X	77	0.94	0.82	1.02	0.90	
		Y	75					
	3	X	76	0.90	0.84	0.98	0.92	
		Y	75					
P2	1	X	96	1.45	1.30	1.55	1.39	
		Y	94					
	2	X	95	1.38	1.38	1.47	1.47	
		Y	95					
	3	X	96	1.43	1.35	1.53	1.45	
		Y	95					
P3	1	X	110	1.87	1.78	1.99	1.90	
		Y	109					
	2	X	110	1.90	1.73	2.02	1.84	
		Y	108					
	3	X	109	1.84	1.75	1.96	1.87	
		Y	108					
P4	1	X	77	0.94	0.82	1.02	0.90	측정자A
		Y	75					
	2	X	77	0.92	0.86	1.00	0.94	측정자B
		Y	76					
	3	X	75	0.86	0.86	0.94	0.94	
		Y	75					
P5	1	X	97	1.53	1.23	1.63	1.32	
		Y	93					
	2	X	97	1.48	1.33	1.58	1.42	
		Y	95					
	3	X	98	1.54	1.31	1.64	1.40	
		Y	95					
P6	1	X	109	1.84	1.75	1.96	1.87	
		Y	108					
	2	X	109	1.89	1.63	2.01	1.74	
		Y	106					
	3	X	108	1.83	1.66	1.95	1.77	
		Y	106					

(2) 제주월드컵경기장

제주월드컵경기장의 지붕구조는 그림 2-2-3-9에 나타내는 바와 같이 RADIAL 트러스, FRONT 트러스, REAR 트러스의 주 구조재와 각 RADIAL 트러스 사이를 연결하는 191개의 아치 파이프 위에 인장되어 클램핑된 PTFE막과, 상향풍압으로부터 막재를 보호하고 지탱해주는 밸리케이블로 이루어져 있다. 즉, 철골 트러스와 인장막재, 그리고 밸리케이블로 이루어진 골조 인장막 구조이다.

막지붕의 크기는 수평 투영면적 11,500㎡, 표면적 13,150㎡으로 총 19개 BAY로 구획되는데, 각 BAY는 다시 1~4개의 패널 조합으로 구성되어 있다. 이러한 각 BAY와 패널은 레벨 차에 의한 유선형의 곡선형상을 유지한다. 막재와 골조의 접합 부위는 아치 파이프 위에 막재 고정을 위한 철재 플레이트를 설치하고 그 위에 고무 개스킷으로 겹쳐진 PTFE막재를 알루미늄 클램핑 바와 스테인리스 볼트 및 너트로 고정하는 형태로 이루어진다.

제주월드컵경기장의 장력을 포터블 막장력 측정장치 최종 시제품(18cm×27cm)을 이용해 2회 측정함으로써, 측정장치의 현장 사용성을 검증하고, 막장력 유지관리 기준/지침(안) 작성을 위한 데이터베이스 구축한다.



구분	내용	
구조물 명칭	제주월드컵경기장	
위치	제주도 서귀포시 법환동	
표면적	13,150㎡	
막구조	형식	골조막구조
	배이 수	19
	외막	PTFE(1.0t)

그림 2-2-3-9. 제주월드컵경기장 전경 및 개요

(가) 1차 제주월드컵경기장 막장력 측정 개요

제주월드컵경기장은 2002년 태풍 매미로 파손된 이후 2004년 6월에 피해 복구되었다. 복구 후 9년 이상이 경과된 구조물로, 배이 케이블의 장력을 실시간 파악함으로써 유지관리를 하고 있는 구조물로, 장력 재도입을 위한 시스템 도입 등, 피해로 인한 경험을 최대한 도입한 구조물이라 할 수 있다.

막재 설치 후 9년의 시간이 경과한 구조물이므로 1차, 2차 크립은 종료되었다고 판단되므로, 그림 2-2-3-10에 보이는 바와 같이 중요 부위의 장력을 측정함으로써 구조물의 장력 데이터를 확보함과 동시에, 18cm×27cm의 경계 박스를 가지는 막장력 측정장치의 현장 적용성을 검증하는데 그 목적을 둔다. 측정 방향은 막재 섬유방향을 고려해 수평방향(Warp방향)을 X방향, 수직방향(Fill방향)을 Y방향으로 정했다. 또, 측정자의 영향 여부를 알아보기 위해 P2 패널의 3번 측점에서는 측정자를 바꾸어 측정했다. 측정장치는 막 진동 경계박스가 18×27cm으로

측정에 임했다. 그림 2-2-3-11에서 16은 측정모습을 나타내고 있다.

(나) 1차 제주월드컵경기장 막장력 측정 결과

표 2-11에 막 진동 경계박스가 18×27cm를 적용한 측정장치의 현장검증 결과를 나타내고 있다. 제주월드컵경기장의 경우는 막장력 값을 공개하기가 어려워 양축 방향의 공진진동수 만을 기입했다. 측정 결과로부터 모든 패널에서 누름 케이블이 누르는 아치의 정점부(2번 위치)에서 가장 높은 장력이 검출되었다. 이는 이 구조물의 특성에 기인한다. 즉 골조와 골조 사이에 위치하는 누름케이블이 아치형을 따라 타원형의 골조부분에서 잡아당기는 형상이므로 정중앙에서 가장 큰 힘을 막재에 전달하고, 골조 링 부위에서는 막에 닿지 않아 장력 전달이 되지 않고 있음을 의미한다. 따라서 측정값은 구조형식의 이치에 맞게 도입되어 있음을 측정을 통해 검증되고, 개발한 측정장치의 정확성도 반증한다. 누름 케이블이 막재에 닿지 않는 1번과 3번은 2번 위치에 비해 조금 낮은 장력을 얻었다. 각 패널의 1번과 3번 위치의 측정값은 비교적 같은 범위에 있는 것을 확인할 수 있다.

BAY3의 P2 3번 지점의 장력 값은 측정자 A와 측정자 B의 결과 값을 나타내는데, X축 방향에서 측정자 A가 120Hz, B가 116Hz로 약간의 차이가 있고, Y축 방향에서 측정자 A, B의 값이 120Hz로 동일하다. 막장력으로 산출하면 두 측정자의 값은 소수 점 이하 2번 째 유효숫자에서의 차이만 나타낼 정도로 미세함을 알 수 있고, 이 연구에서 개발한 포터블 막장력 측정장치가 측정자의 영향을 거의 받지 않는 다는 것을 보여주고 있다.

이상의 결과를 종합하면, 이 연구로 개발된 포터블 막장력 측정장치는 현장 적용에 문제가 없고, 측정자의 영향을 받지 않는 다는 것을 알 수 있다. 다만, 두 개의 스피커를 채용해 막에 방사하는 음량이 증가해 막의 고유진동수를 검출하는데 유리해진 반면, 소비 전력이 증가해 건전지를 자주 갈아야 하는 번거로움으로 인해 측정에 지장을 초래했다. 충전식 배터리를 도입하고 마이크로컴퓨터의 회로를 개선하는 등, 현장에서의 사용성을 증대시킬 필요가 있다.

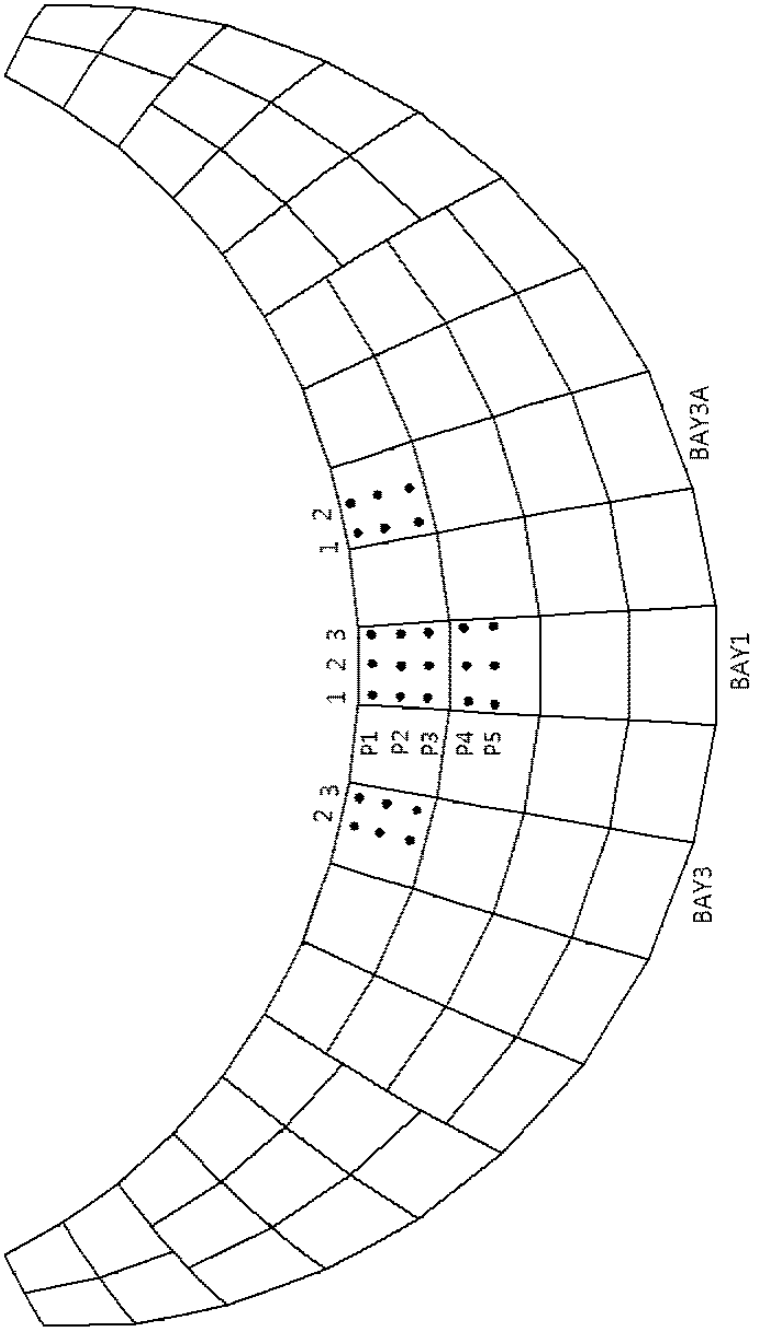


그림 2-2-3-10. 제주월드컵경기장 측점 위치



그림 2-2-3-11. 경기장 관리상황 브리핑

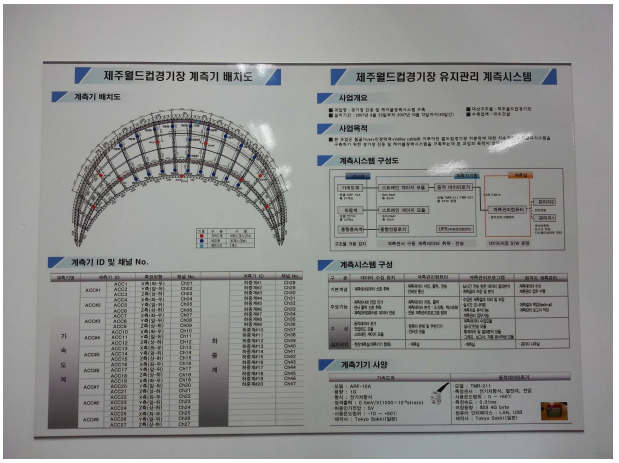


그림 2-2-3-12. 제주월드컵경기장 유리관리



그림 2-2-3-13. 18×27cm의 막장력 측정장치

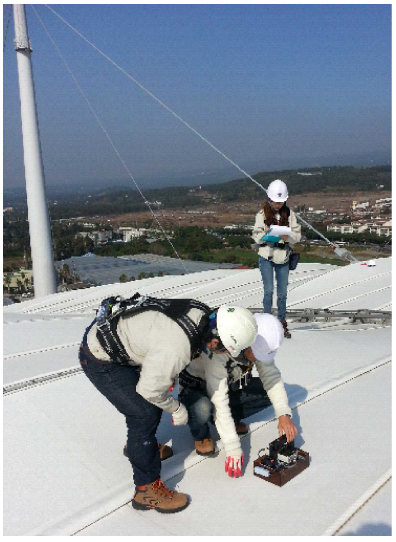


그림 2-2-3-14. 장력 측정 및 기록



그림 2-2-3-15. 장력 측정



그림 2-2-3-16. 측정자 변경

표 2-11. 1차 제주월드컵경기장 막장력 측정 결과

측점위치	패널 번호		측정진동수 (Hz)		비고
				E_y	
BAY 1	P1	1	90	85	
		2	109	136	
		3	88	85	
	P2	1	88	78	
		2	105	126	
		3	88	84	
	P3	1	78	77	
		2	102	126	
		3	94	84	
	P4	1	109	109	
		2	102	126	
		3	96	94	
	P5	1	94	87	
		2	120	143	
		3	87	78	
BAY3A	P1	1	109	105	
		2	116	156	
	P2	1	90	85	
		2	109	126	
	P3	1	96	82	
		2	109	116	
BAY3	P1	2	120	147	
		3	116	116	
	P2	2	109	120	
		3	120	120	측정자 A
			116	120	측정자 B
	P3	2	109	126	
		3	97	94	

(다) 2차 제주월드컵경기장 막장력 측정

제주월드컵경기장의 2차 현장검증실험은 2014년 04월 21일부터 04월 23일까지 3일간 수행하였으며, 측정에는 밑변의 길이가 20cm×30cm, 높이 15cm를 갖는 막장력 측정장치를 사용하였다. 측정위치는 그림 2-2-3-10과 같이 총 27곳의 막장력을 측정하였다. 제주월드컵경기장의 현장 측정결과를 표 2-12에 나타낸다. 그림 2-2-3-17에서 2-2-3-19에 2차 제주월드컵경기장 막장력 측정 모습을 나타내고 있다.

표 2-12. 제주월드컵경기장 현장측정 결과

패널번호	측정위치	1차 측정진동수 (Hz)		2차 측정진동수 (Hz)		비고
		Warp	Fill	Warp	Fill	
1	P11	75.6	81.5	73.2	80.0	
	P12	116.6	96.6	113.2	96.6	
	P13	71.2	74.2	71.7	75.6	
	P21	72.2	76.6	74.7	79.5	
	P22	119.6	96.1	119.6	96.1	
	P23	71.2	75.6	69.4	75.6	
	P31	63.4	71.7	63.9	69.3	
		67.3	71.2	64.4	73.2	측정자A
	P32	123.0	100.0	123.0	96.6	
	P33	71.7	78.6	70.8	80.0	
	P41	93.7	93.7	93.7	96.6	
	P42	111.8	101.0	111.8	100.0	
	P43	83.4	86.4	83.4	86.4	
	P51	78.6	86.4	76.6	86.4	
	P52	143.5	119.6	142.5	119.6	
	P53	67.3	74.7	68.3	73.7	
3A	P11	86.4	96.6	86.4	93.7	
	P12	135.2	111.8	135.2	111.8	
	P21	78.1	83.4	78.1	80.0	
	P22	111.8	95.2	111.8	93.7	
	P31	74.7	83.4	73.2	83.4	
	P32	116.6	100.0	116.6	100.0	
3	P12	116.6	101.0	113.2	101.0	
	P13	103.5	93.2	104	93.7	
	P22	113.2	104.9	113.2	104.0	
	P23	107.4	104.9	107.4	104.0	
	P32	113.2	100.0	111.8	100.0	
	P33	83.4	83.4	83.4	83.4	





그림 2-2-3-17. Panel 1 막장력측정



그림 2-2-3-17. 계속

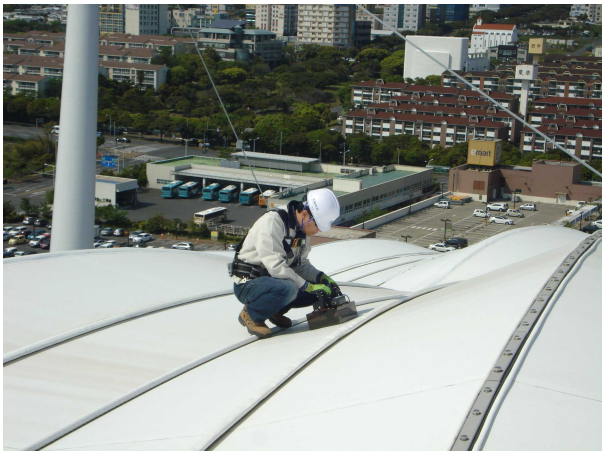


그림 2-2-3-18. Panel 3A 막장력측정



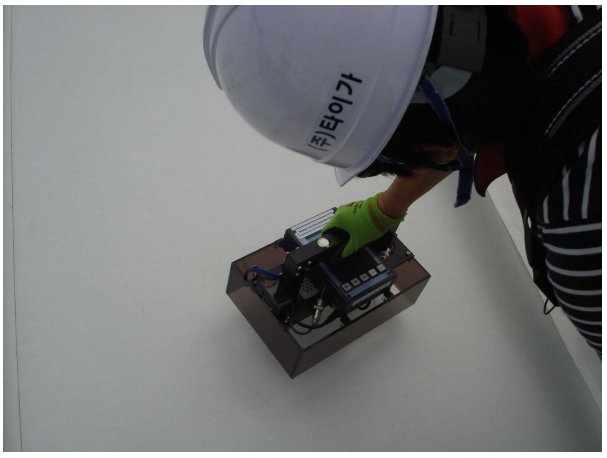


그림 2-2-3-19. Panel 3 막장력측정

(3) 인천월드컵경기장

- 위치 : 인천광역시 남구 문학동 482
- 지붕 면적 : 약 38,000㎡
- 지붕 구조 : 텐션막구조
- 지붕재 : PTFE(Teflon Coated Fiber Glass)



(가) 인천월드컵경기장 막장력 측정 개요

인천월드컵경기장 지붕구조물은 24개의 독립된 인장 막구조로써 6개의 복합 링케이블과 24개의 방사상 케이블로 구성되어 있다. 이러한 구조시스템은 태풍이나 돌풍과 같은 불규칙적인 외부 응력에 유연하게 대처할 수 있는 무빙 시스템으로 상호 유기적으로 보완 지탱하고 있다.

(나) 인천월드컵경기장 막장력 측정 개요

인천월드컵경기장의 현장검증실험은 2014년 03월 27일부터 04월 01일까지 이틀간 수행하였으며, 측정에는 밑변의 길이가 20cm×30cm, 높이 15cm를 갖는 막장력 측정장치를 사용하였다. 측정위치는 그림 2-2-3-20에 나타내는 바와 같이 전체 24개 지붕 패널을 대상으로 하고, 그림 88의 패널 Type 별로 2개 패널을 대표 패널로 선정해 모든 측점에서 측정했다.

막장력 측정은 Warp과 Fill방향으로 각각의 고유진동수를 측정하고, 그 데이터가 측정장치에 탑재된 마이크로컴퓨터의 연산과정을 거친다. 그리고 연산된 값은 동일 장치의 액정에 표시된다. 인천월드컵경기장의 현장 측정 결과는 아래의 표 2-13과 같다. 그림 2-2-3-22에서 2-2-3-27에 인천월드컵경기장 막장력 측정모습을 나타낸다.

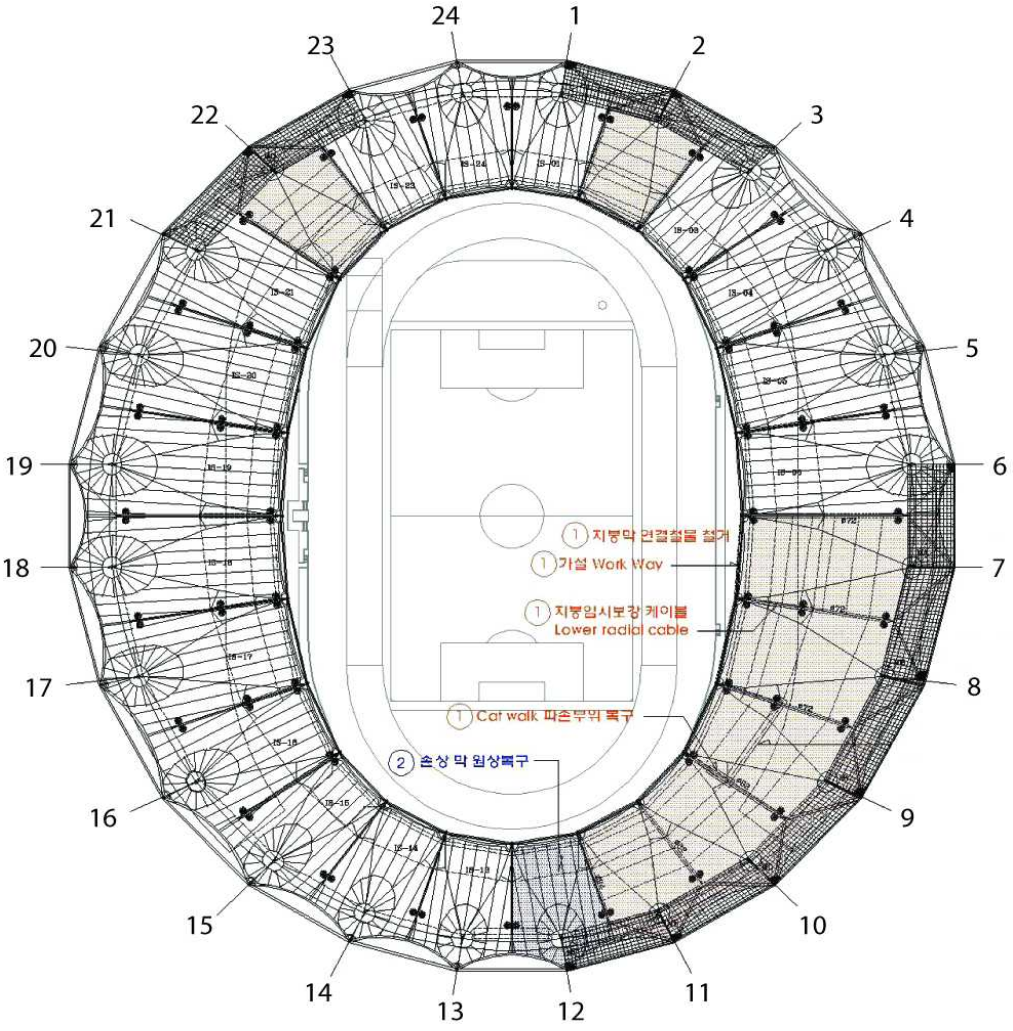
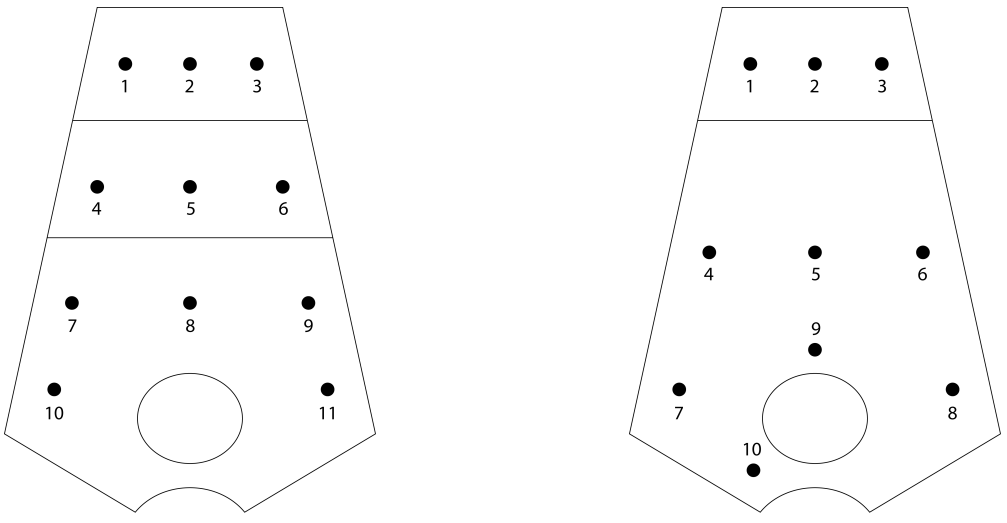


그림 2-2-3-20. 인천월드컵경기장 측정 위치도



(a) A TYPE(2 PURLIN) (b) B TYPE (1 PURLIN)

그림 2-2-3-21. 패널 타입 별 측점

표 2-13. 인천월드컵경기장 현장측정 결과

패널번호	패널타입	측정위치	1차 측정진동수 (Hz)		2차 측정진동수 (Hz)		비고
			Warp	Fill	Warp	Fill	
1	B	P1	132.3	124.5	127.4	124.5	
		P6	103.5	113.2	102.5	113.2	
2	B	P3	142.5	142.5	146.9	142.5	
		P4	111.8	116.6	111.8	119.6	
3	B	P1	116.6	104.9	116.6	105.4	
		P6	86.4	96.1	86.4	95.2	
4	B	P3	119.6	111.8	119.6	111.8	
		P4	91.3	101	88.3	101	
5	A	P4	111.8	111.8	111.8	111.8	
		P9	83.4	100.0	79.5	93.2	
6	A	P6	113.2	123.0	113.2	123.0	
			116.6	126.9	111.8	126.9	측정자A
			112.7	121.0	113.2	121.5	측정자B
		P7	93.2	104.9	93.2	107.4	
7	A	P4	142.5	146.9	142.5	146.4	
		P5	140.1	135.2	138.1	132.3	
		P9	135.2	123.0	135.2	126.9	
			138.1	127.4	138.1	129.8	측정자A
8	A	P6	157.2	157.2	154.2	157.2	
			154.7	157.2	157.2	157.2	측정자A
		P7	151.8	157.2	153.3	154.7	
9	B	P1	132.3	135.2	132.3	135.2	
		P6	121.0	123	121.0	121.0	
10	B	P3	141.9	151.3	146.4	151.3	
		P4	142.5	129.8	139.6	127.4	
11	B	P1	135.2	139.6	135.2	139.6	
		P4	116.6	111.8	116.6	107.9	
		P6	127.4	132.3	127.4	132.3	
		P7	111.8	111.8	120.1	111.8	
		P9	127.4	122	127.4	123	
12	B	P1	139.6	135.2	139.6	135.7	
		P2	142.5	135.2	142.5	135.2	
		P3	138.1	135.2	138.1	132.3	

		P4	123.0	119.6	123.0	121.0	
		P5	127.4	111.6	127.4	111.8	
		P6	154.2	122.8	154.7	129.8	
		P10	154.7	86.4	154.7	86.4	
13	B	P1	132.3	126.9	129.8	126.9	
		P6	113.2	107.9	113.2	109.3	
14	B	P1	116.6	107.9	116.6	109.3	
		P2	113.2	104.9	111.8	104.9	
		P3	113.2	106.9	111.8	106.9	
		P4	116.6	105.9	116.6	104.9	
		P5	96.1	83.4	95.2	83.4	
		P6	76.6	83.4	75.6	83.4	
15	B	P1	135.2	116.6	132.3	111.8	
		P6	88.3	93.7	83.4	88.3	
16	B	P3	126.9	111.8	127.4	111.8	
		P4	88.3	104.9	88.8	104.9	
17	A	P4	102.5	111.8	102.5	111.8	
		P5	101	79.5	100	83.4	
		P9	102.5	104.9	102.5	104.9	
18	A	P6	123	121	123	122	
		P7	121	116.6	121	116.6	
19	A	P4	116.6	116.6	111.8	115.2	
		P9	111.8	116.6	109.3	113.2	
20	A	P5	111.8	96.6	105.4	96.6	
		P6	123	111.2	123	111.8	
		P7	103.5	111.8	104.9	123	
21	B	P1	119.6	111.8	120.1	111.8	
		P6	100.0	101.0	96.6	101.0	
22	B	P3	138.1	132.3	138.1	132.3	
		P4	132.3	127.4	129.8	127.4	
23	B	P1	119.6	116.6	116.6	111.8	
		P6	96.6	107.4	96.6	106.9	
24	B	P3	126.9	116.9	127.4	122	
		P4	95.2	111.8	95.2	111.8	



그림 2-2-3-22. Panel 1 막장력측정

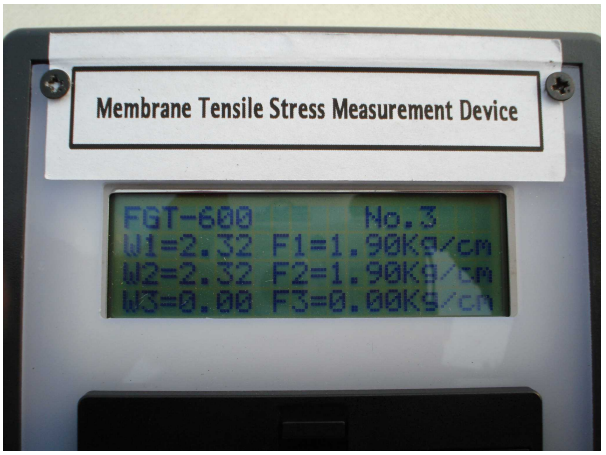


그림 2-2-3-23. 막장력측정값



그림 2-2-3-24. Panel 3 막장력측정



그림 2-2-3-25. Panel 16 막장력측정

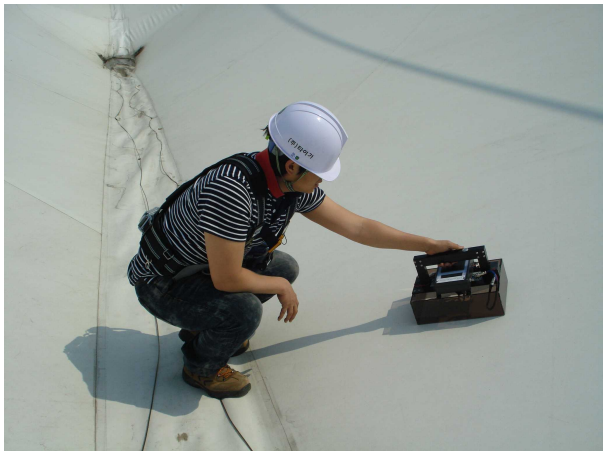


그림 2-2-3-26. Panel 8 막장력측정



그림 2-2-3-27. Panel 20 막장력측정

(4) 진주종합경기장



- 위치 : 경상남도 진주시 충무공동 2-2085
- 면적 : 36,000㎡
- 지붕 구조 : 골조막구조
- 지붕재 : PTFE A종 막재

(가) 진주종합운동장 개요

진주종합경기장 지붕구조물은 철골 PIPE 위에 막재가 인장으로 당겨져 접합됨으로써 바람이나 눈, 비 등의 외부 하중에 견디는 골조막 구조이다. 막재와 골조의 접합 부위는 아치 퍼린의 골조 위에 접합 충진재인 고무 재질을 넣고, 그 위에 알루미늄 바를 볼트로 체결해 고정하고 있다.

(나) 진주종합운동장 막장력 측정 개요

진주종합경기장의 현장검증실험은 2013년 12월 10일부터 12월 11일까지 이틀간 수행하였으며, 측정에는 밑변의 길이가 20cm×30cm, 높이 15cm를 갖는 막장력 측정장치를 사용하였다. 측정위치는 그림 2-2-3-28과 같이 총 31곳의 막장력을 측정하였다. 진주종합경기장의 현장측정 결과는 아래의 표 9와 같다. 그림 2-2-3-29에서 2-2-3-34는 진주종합운동장 막장력 측정모습을 나타내고 있다.

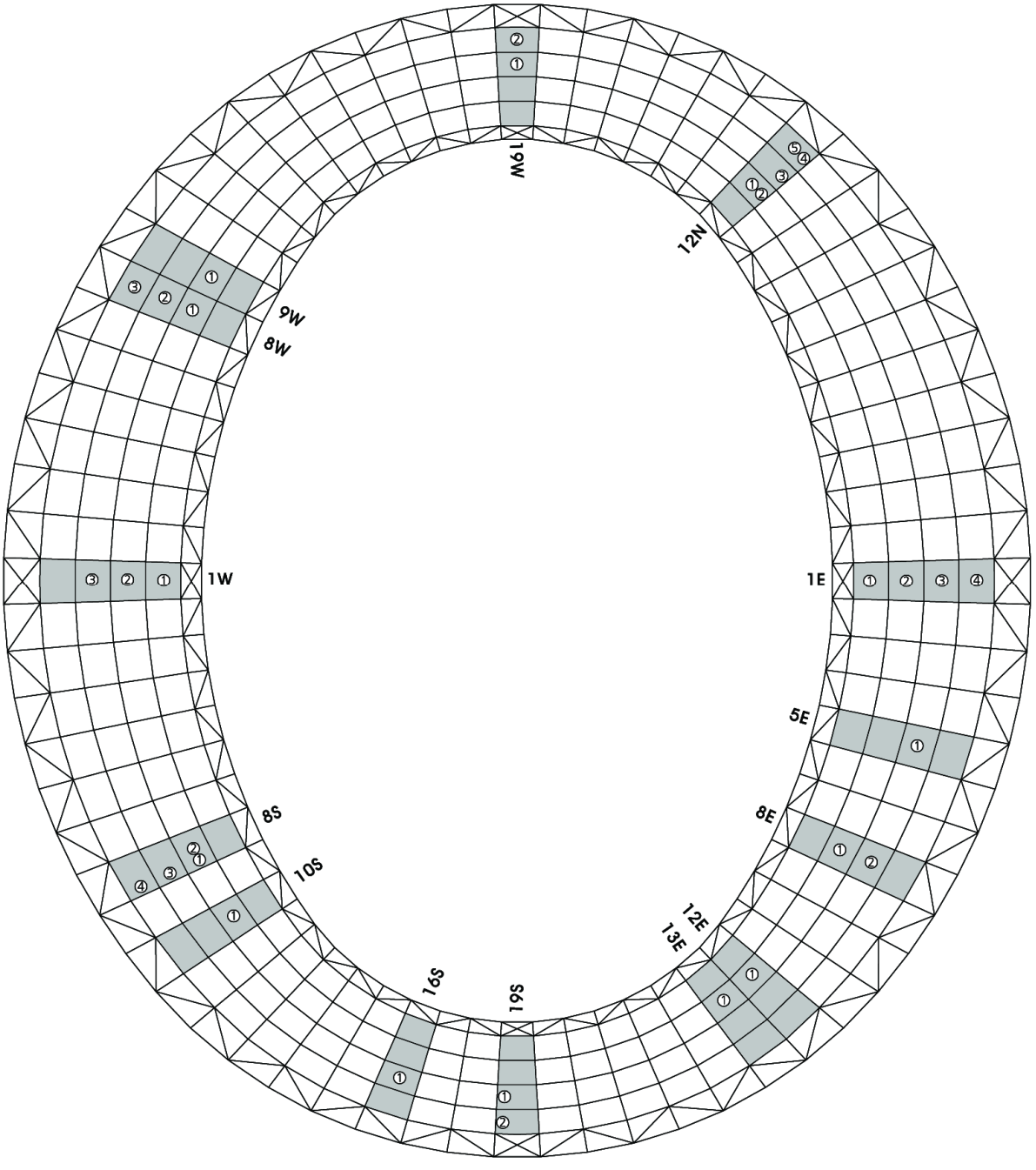


그림 2-2-3-28. 진주종합운동장 측점 위치도

표 2-14. 진주종합경기장 막장력 측정 결과

패널번호	측정위치	측정횟수	측정진동수 (Hz)		비고
			Warp	Fill	
8S	P1	1	88.3	92.7	
	P2	1	100	93.2	
	P3	1	100	100	
	P4	1	107	111.8	
	P5	1	127.4	101	
1W	P1	1	96.1	90.8	
	P2	1	100	93	
	P3	1	90.8	90.8	
	P4	1	90.3	89.8	
8W	P1	1	83.4	78.1	
	P2	1	90.8	86.4	
	P3	1	100	93.7	
9W	P1	1	86	136	
19W	P1	1	100	93.2	
	P2	1	105.4	85.3	
12N	P1	1	111.8	88.8	
	P2	1	111.8	116.6	
	P3	1	127.4	111.8	
	P4	1	138.1	121	
	P5	1	123	113.2	
1E	P1	1	107.9	109.3	
	P2	1	116.6	96.6	
	P3	1	119.6	107.4	
	P4	1	116.6	111.8	
5E	P1	1	96.6	93.7	
8E	P1	1	101	96.6	
	P2	1	111.8	100	
	P3	1	101	100	
12E	P1	1	96.6	89.8	
13E	P1	1	93.2	88.3	
19E	P1	1	107.9	112.8	
	P2	1	121	123	
16S	P1	1	83.4	86.4	
10S	P1	1	95.2	93.2	



그림 2-2-3-29. Panel 8S 막장력측정



그림 2-2-3-30. Panel 1W 막장력측정

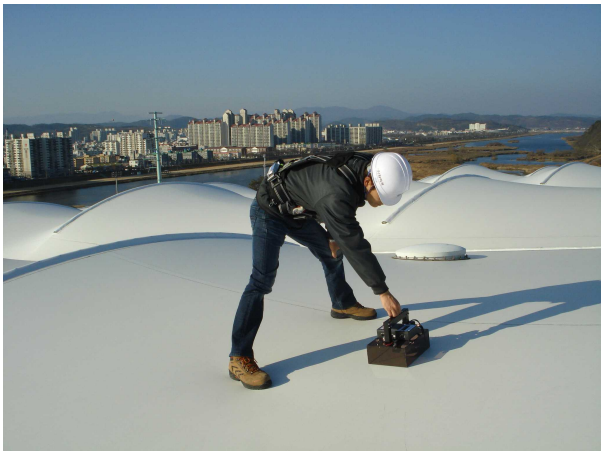


그림 2-2-3-31. Panel 9W 막장력측정



그림 2-2-3-32. Panel 19W 막장력측정



그림 2-2-3-33. Panel 1E 막장력측정



그림 2-2-3-34. Panel 16S 막장력측정

(5) 서울풍물시장



- 위치 : 서울특별시 동대문구 신설동 109-5번지
- 면적 : 5,056㎡
- 지붕 구조 : 골조막
- 지붕재 : 폴리카보네이트, XPRO(PVDF)

(가) 서울풍물시장 개요

서울풍물시장 지붕구조물은 철골 PIPE 위에 X-PRO막재가 인장으로 당겨져 접합됨으로써 바람이나 눈, 비 등의 외부 하중에 견디는 골조막 구조이다. 막재와 골조의 접합 부위는 아치 퍼린의 골조 위에 접합 충진재인 고무 재질을 넣고, 그 위에 알루미늄 바를 볼트로 체결해 고정하고 있다.

(나) 서울풍물시장 막장력 측정 개요

측정에는 밑변의 길이가 20cm×30cm, 높이 15cm를 갖는 막장력 측정장치를 사용하였다. 측정위치는 그림 2-2-3-35와 같이 32곳의 막장력을 측정하였다. 서울풍물시장의 현장측정 결과는 아래의 표 2-15와 같다. 그림 2-2-3-36에서 2-2-3-40은 서울풍물시장의 막장력 측정모습을 나타내고 있다.

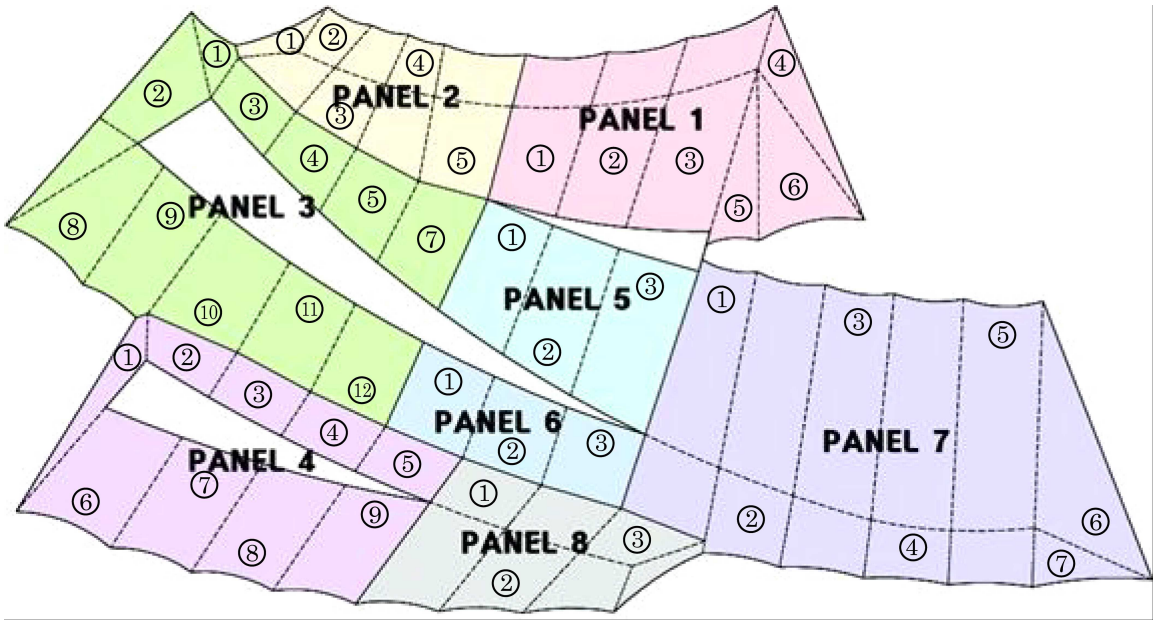


그림 2-2-3-35. 서울풍물시장 측점 위치도

표 2-15. 서울풍물시장 현장측정 결과

패널번호	측정위치	측정횟수	측정진동수 (Hz)		비고
			Warp	Fill	
1	P1	1	99	90	
	P2	1	116	99	
	P3	1	103	102	
2	P2	1	84	103	
	P3	1	99	90	
	P4	1	94	85	
	P5	1	97	84	
3	P3	1	84	78	
	P4	1	109	109	
	P5	1	109	109	
	P7	1	109	120	
	P9	1	105	88	
	P10	1	109	105	
	P11	1	109	105	
	P12	1	103	90	
4	P2	1	68	88	
	P3	1	99	103	
	P4	1	103	103	
	P5	1	103	102	
5	P1	1	99	116	
	P2	1	90	109	
	P3	1	90	120	
6	P1	1	105	97	
	P2	1	102	97	
	P3	1	88	88	
7	P1	1	90	109	
	P2	1	103	116	
	P3	1	109	109	
	P4	1	109	109	
	P5	1	109	109	
	P6	1	103	99	
8	P1	1	87	94	
	P3	1	84	99	



그림 2-2-3-36. Panel 1-① 막장력측정



그림 2-2-3-37. Panel 1-② 막장력측정



그림 2-2-3-38. Panel 1-③ 막장력측정



그림 2-2-3-39. Panel 2-② 막장력측정



그림 2-2-3-40. Panel 2-③ 막장력측정



그림 2-2-3-41. Panel 2-④ 막장력측정

(6) 상주야외음악당



- 위치 : 경상북도 상주시 만산동
- 면적 : 726㎡
- 지붕 구조 : 골조막구조
- 지붕재 : PVDF C종 막재

(가) 상주야외음악당 개요

상주 북천시민공원 야외음악당 지붕구조물은 철골 파이프 위에 PVDF막재가 인장으로 당겨져 접합됨으로써 바람이나 눈, 비 등의 외부 하중에 견디는 골조막 구조이다. 막재와 골조의 접합 부위는 아치 퍼린의 골조 위에 접합 충진재인 고무 재질을 넣고, 그 위에 알루미늄 바를 볼트로 체결해 고정하고 있다.

(나) 상주야외음악당 막장력 측정 개요

상주 북천시민공원 야외음악당의 현장검증실험은 2014년 5월 2일 당일 수행하였으며, 측정에는 밑변의 길이가 20cm×30cm, 높이 15cm를 갖는 막장력 측정장치를 사용하였다. 상주야외음악당은 곡률이 심해 접근이 힘들어, 그림 2-2-3-42에 나타내는 바와 같이 측정이 가능한 3곳의 막장력을 측정하였다. 상주야외음악당의 현장검증 실험결과는 아래의 표 2-16과 같다. 그림 2-2-3-43에서 2-2-3-48은 상주야외음악당의 막장력 측정모습을 나타내고 있다.

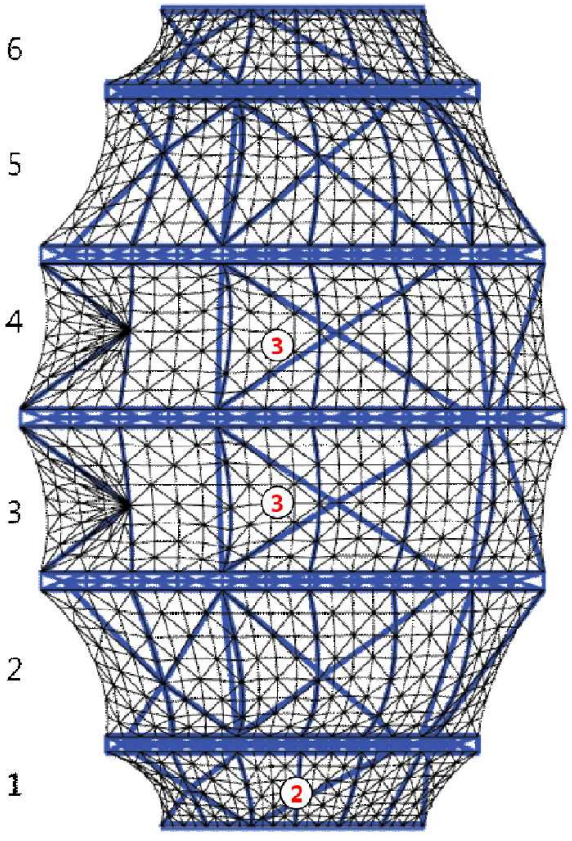


그림 2-2-3-42. 상주야외음악당 측점 위치도

표 2-16. 상주야외음악당 현장측정 결과

패널번호	측정위치	측정횟수	측정진동수 (Hz)		비고
			Warp	Fill	
1	P2	1	78.6	83.4	
		2	78.6	79.5	
3	P3	1	67.3	73.2	
4	P3	1	75.6	83.4	



그림 2-2-3-43. Panel 4 막장력측정



그림 2-2-3-44. Panel 1 막장력측정 1



그림 2-2-3-45. Panel 1 막장력측정 2



그림 2-2-3-46. Panel 1 막장력측정 3

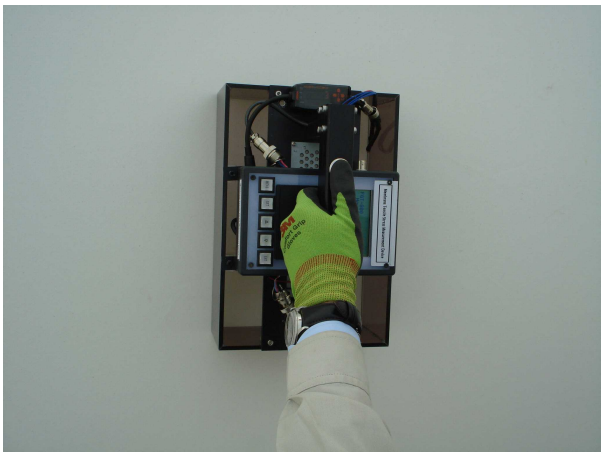


그림 2-2-3-47. Panel 3 막장력측정 1



그림 2-2-3-48. Panel 3 막장력측정 2

(7) 이천LG야구장



- 위치 : 경기도 이천시 대월면 부필리
- 면적 : 3,640㎡
- 지붕 구조 : 골조막구조
- 지붕재 : PTFE A종 막재

(가) 이천LG야구장 개요

이천LG야구장 지붕구조물은 철골 파이프 위에 PTFE막재가 인장으로 당겨져 접합됨으로써 바람이나 눈, 비 등의 외부 하중에 견디는 골조막 구조이다. 막재와 골조의 접합부위는 아치 퍼린의 골조 위에 접합 충진재인 고무 재질을 넣고, 그 위에 알루미늄 바를 볼트로 체결해 고정하고 있다.

(가) 이천LG야구장 막장력 측정 개요

이천LG야구장의 현장검증실험은 2014년 05월 22일 당일 수행하였으며, 측정에는 밑변의 길이가 20cm×30cm, 높이 15cm를 갖는 막장력 측정장치를 사용하였다. 측정위치는 그림 2-2-3-49와 같이 총 21곳의 막장력을 측정하였다. 이천 LG야구장의 현장검증 실험결과는 아래의 표 2-17과 같다. 그림 2-2-3-50에서 2-2-3-55는 이천 LG야구장의 막장력 측정모습을 나타내고 있다.

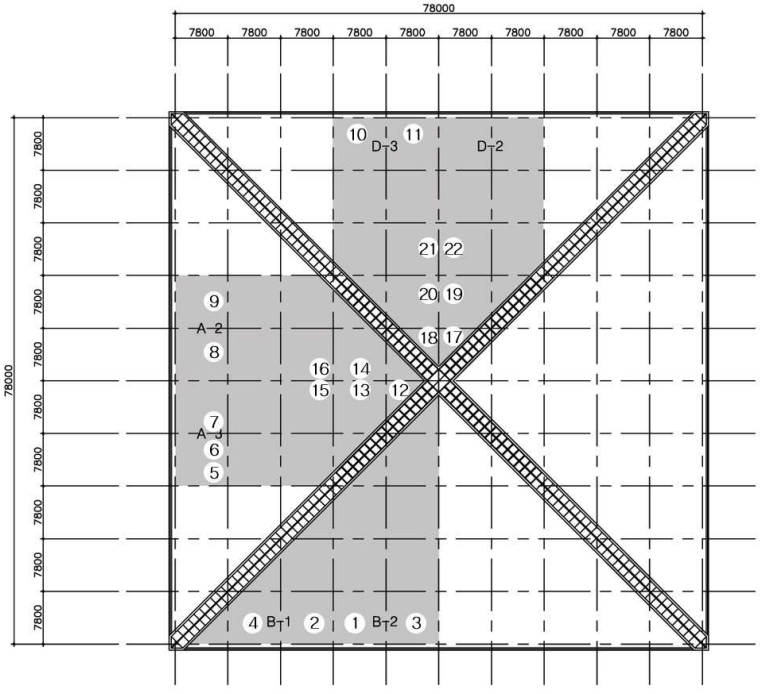


그림 2-2-3-49. 이천LG야구장 측점 위치도

표 2-17. 이천LG야구장 현장측정 결과

패널번호	측정위치	1차 측정진동수 (Hz)		2차 측정진동수 (Hz)		3차 측정진동수 (Hz)		비고
		Warp	Fill	Warp	Fill	Warp	Fill	
A-2	P8	90.8	90.8	89.8	89.8	89.8	89.8	
	P9	88.3	93.2	88.3	93.2	88.3	93.2	
		86.4	93.2	86.4	93.2	88.3	93.2	측정자A
	P14	83.4	93.2	83.4	93.2	83.4	93.2	
	P16	83.4	96.6	83.4	96.1	82.0	96.1	
A-3	P5	75.6	81.5	74.7	79.5	73.2	78.6	
	P6	83.4	83.4	83.4	83.4	83.4	83.4	
	P7	73.2	78.1	73.2	79.1	73.2	76.6	
	P12	109.3	106.9	107.9	106.9	107.9	105.9	
	P13	93.7	93.2	93.2	90.8	93.2	90.8	
	P15	90.8	93.7	90.4	96.5	90.8	95.2	
B-1	P2	83.4	83.4	83.4	83.4	83.4	83.4	
	P4	112.7	107.4	111.8	104.9	113.2	104.9	
B-2	P1	74.7	74.7	71.7	74.7	71.7	75.6	
		71.2	73.2	73.2	75.6	73.2	75.6	
	P3	74.7	80.0	75.6	83.4	76.6	79.5	
D-2	P17	100.0	103.5	100.0	102.5	100.0	101.0	
	P19	92.2	100.0	90.8	100.0	93.2	100.0	
	P22	88.3	100.0	86.4	100.0	86.4	100.0	
D-3	P10	79.5	86.4	76.6	86.4	78.6	86.4	
		78.6	88.3	79.1	88.3	78.1	88.3	측정자A
	P11	88.3	96.6	88.3	96.6	86.4	96.1	
		86.4	95.2	86.4	96.1	83.4	96.1	측정자A
	P18	113.2	109.3	116.6	107.9	113.2	107.9	
	P20	107.9	109.3	107.9	107.9	107.9	109.3	
	P21	101.0	101.0	100.0	100.0	100.0	100.0	



그림 2-2-3-50. A-2 패널 장력 측정사진

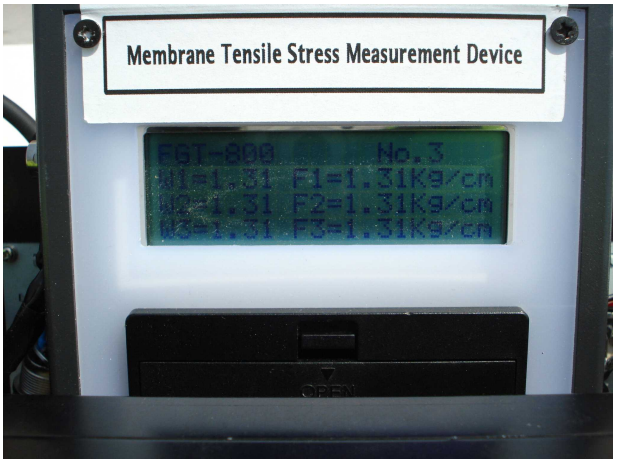


그림 2-2-3-51. 막장력 측정값



그림 2-2-3-52. A-3패널 장력 측정사진



그림 2-2-3-53. B-1패널 장력 측정사진



그림 2-2-3-54. D-2패널 장력 측정사진



그림 2-2-3-55. D-3패널 장력 측정사진

(8) 울산복합화력 지붕막 구조물

- 위치 : 울산광역시 남구 용잠로
- 면적 : 2,222㎡
- 지붕 구조 : 골조막구조
- 지붕재 : PTFE A종 막재



(가) 울산복합화력 지붕막 구조물 개요

울산 복합 화력발전소 지붕구조물 철골 파이프 위에 PTFE막재가 인장으로 당겨져 접합됨으로써 바람이나 눈, 비 등의 외부 하중에 견디는 골조막 구조이다. 막재와 골조의 접합부위는 아치 퍼린의 골조 위에 접합 충진재인 고무 재질을 넣고, 그 위에 알루미늄 바를 볼트로 체결해 고정하고 있다.

(나) 울산복합화력 지붕막 구조물 막장력 측정 개요

울산 복합 화력발전소의 현장검증실험은 2014년 5월 9일 당일 수행하였으며, 측정에는 밑변의 길이가 20cm×30cm, 높이 15cm를 갖는 막장력 측정장치를 사용하였다. 측정위치는 그림 2-2-3-56, 57과 같이 총 7곳의 막장력을 측정하였다. 울산 복합 화력발전소의 현장측정 결과는 아래의 표 2-18과 같다. 그림 2-2-3-58에서 2-2-3-63은 울산복합화력 지붕막 구조물의 막장력 측정모습을 나타내고 있다.

표 2-18. 울산복합화력 지붕막 구조물 막장력 측정 결과

패널번호	측정위치	1차 측정진동수 (Hz)		2차 측정진동수 (Hz)		3차 측정진동수 (Hz)		비고
		Warp	Fill	Warp	Fill	Warp	Fill	
7 (2호기)	P1	146.9	142.5	-	-	-	-	
	P3	100.0	109.3	-	-	-	-	
	P4	113.2	116.6	113.2	116.6	116.6	116.6	
7 (1호기)	P5	95.2	96.6	93.2	96.1	93.2	96.1	
	P6	93.7	104.9	95.2	104.9	94.2	104.9	
	P4	120.1	121.5	120.1	123.0	120.1	123.0	

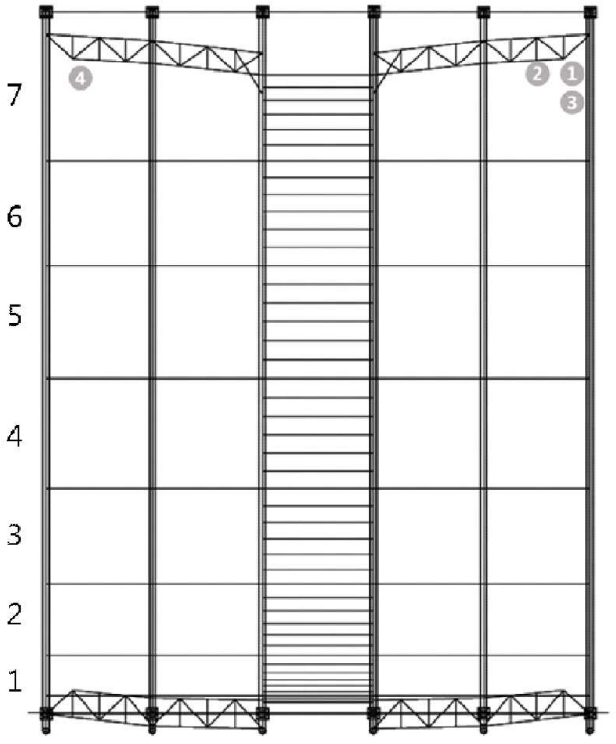


그림 2-2-3-56. 측정 위치도 (울산 복합 화력발전소 2호기)

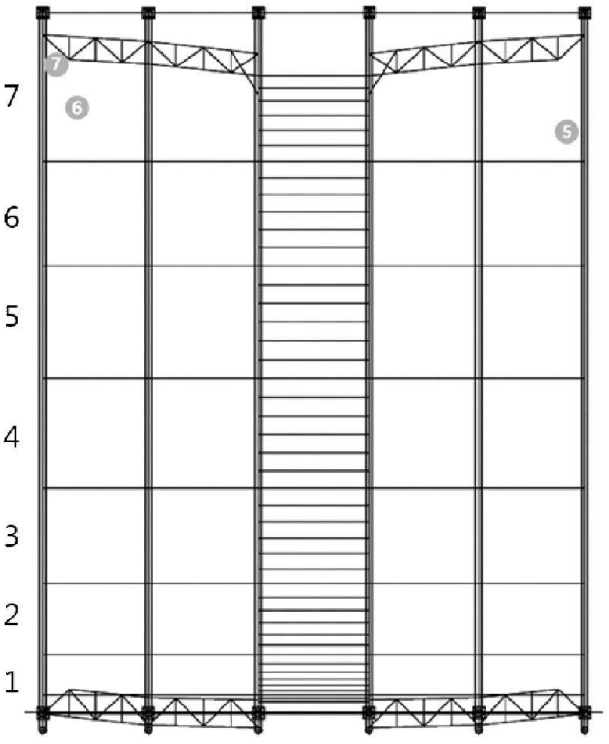


그림 2-2-3-57. 측정 위치도 (울산 복합 화력발전소 1호기)



그림 2-2-3-58. 1호기 막장력측정사진 1



그림 2-2-3-59. 1호기 막장력측정사진 2



그림 2-2-3-60. 2호기 막장력측정사진 1

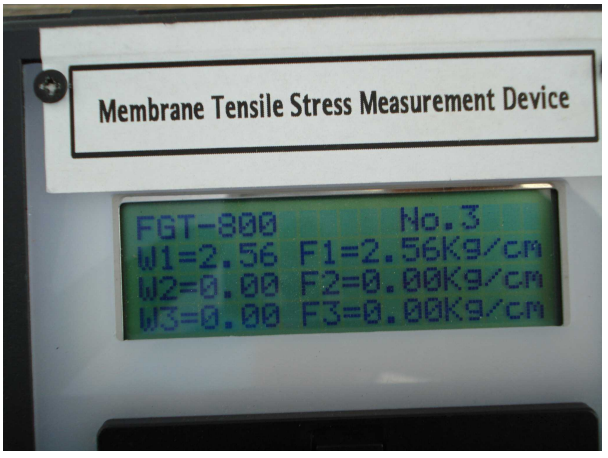


그림 2-2-3-61. 막장력 측정값



그림 2-2-3-62. 2호기 막장력측정사진 2



그림 2-2-3-63. 2호기 막장력측정사진 3

(9) 부산금정스포원 실내테니스장 지붕막 구조물

- 위치 : 부산관역시 금정구 두구동 669
- 면적 : 7,400㎡
- 지붕 구조 : 알루미늄골조 창고형 막구조
- 지붕재 : PVDF C종 막재



(가) 부산금정스포원 실내테니스장 지붕막 구조물 개요

부산금정스포원은 캐나다의 SPRUNG사 모델로 대표되는 벽체 또한 막재로 이루어진 밀폐형 막구조물이다. 이는 기존의 막구조물이 주로 대형 경기장이나 체육관의 지붕 또는 아케이드로 사용되어 벽체가 없거나 혹은 오픈되어 있고, 벽체를 가지는 경우에도 콘크리트나 철골조로 이루어지는 등, 기성 재료로 구성되어 있는 것과는 그 형식면에서도 다르다고 볼 수 있다.

장력은 장변(세로) 방향의 알루미늄 주 골조에 막을 미리 끼우고, 길이 조절이 가능한 단변(가로) 방향의 수평재 길이를 조절하면서 도입한다. 이러한 형식의 막구조물은 바람이나 눈, 비 등의 외부 하중에 저항하는 저항 시스템으로 막은 단변 방향의 장력에만 의존하고, 상대적으로 하중 전달 경로가 긴 장변 방향의 장력은 막재가 형상을 유지할 수 있을 정도로만 도입하여 하중 전달을 구조부재에 일임함으로써 구조물 전체의 안전성을 확보한다는 개념이다.

(나) 부산금정스포원 실내테니스장 지붕막 구조물 막장력 측정 개요

장력 측정은 그림 2-2-3-64, 65에 나타내는 바와 같이, 당시 막이 설치되어 있던 패널을 중심으로, 막면 외부(막 상면)에서 3곳을, 막면 내부(막 하면)에서 2곳을 측점으로 지정하여 측정을 3회 실시했다. 측정결과를 표 2-19에 나타낸다. 그림 2-2-3-66에서 2-2-3-71은 부산금정스포원 실내테니스장 지붕막 구조물 막장력 측정모습을 나타내고 있다.

표 2-19. 부산금정스포원 현장측정 결과

패널번호	측정위치	1차 측정진동수 (Hz)		2차 측정진동수 (Hz)		3차 측정진동수 (Hz)		비고
		Warp	Fill	Warp	Fill	Warp	Fill	
1	P1	135.2	96.1	135.2	96.6	135.2	96.6	외부
	P2	132.3	96.6	131.3	96.1	135.2	96.1	내부
3	P3	146.4	104.9	146.9	104.9	146.4	104.9	외부
5	P4	159.6	113.2	161.1	113.2	160.1	113.2	외부
	P5	121.0	90.8	121.0	90.8	121.0	90.8	내부

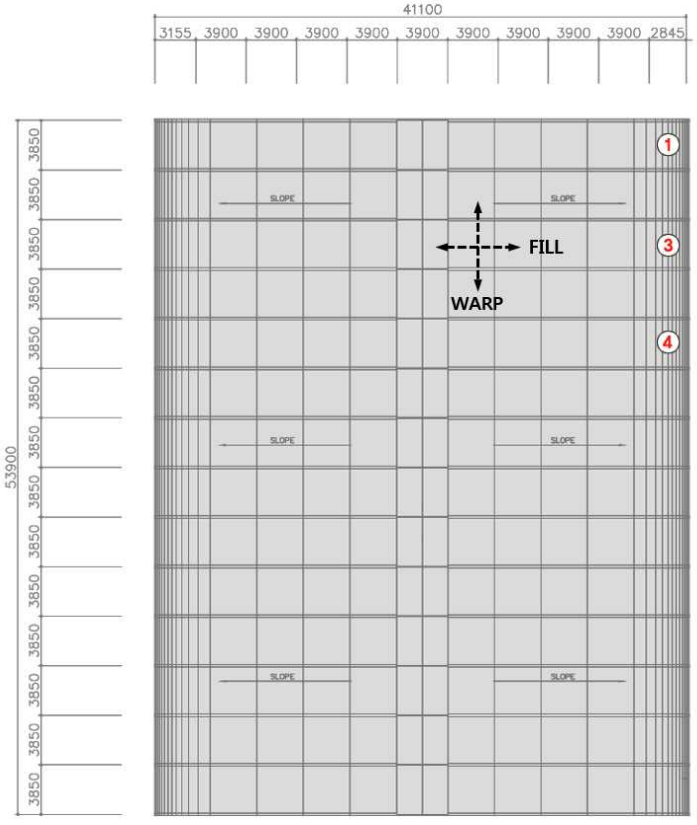
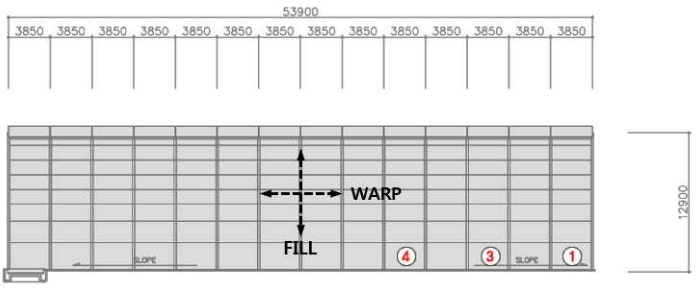
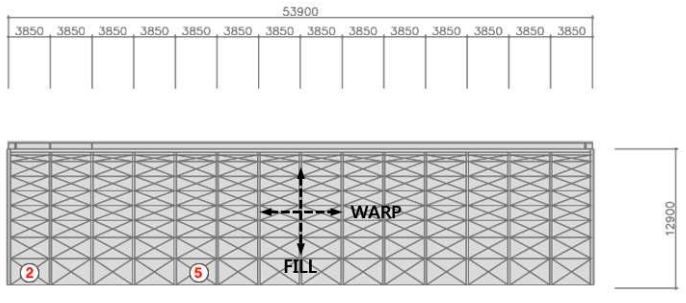


그림 2-2-3-64. 부산금정스포원 실내테니스장 측점 위치 평면도



(1) 외부 측정 위치



(2) 내부 측정 위치

그림 2-2-3-65. 부산금정스포원 실내테니스장 측점 위치 입면도



그림 2-2-3-66. 막 외부 장력 측정사진 1



그림 2-2-3-67. 막 외부 장력 측정사진 2



그림 2-2-3-68. 막 외부 장력 측정사진 3



그림 2-2-3-69. 막 내부 장력 측정사진 1



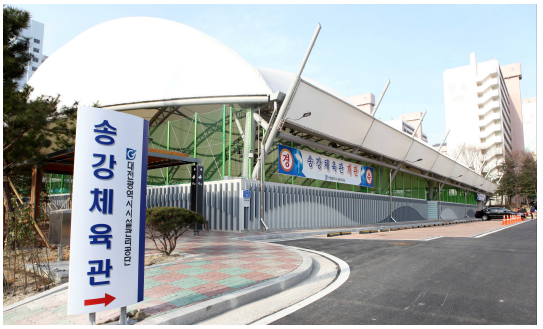
그림 2-2-3-70. 막 내부 장력 측정사진 2



그림 2-2-3-71. 막 내부 막장력 측정사진 3

(10) 대전송강테니스장

- 위치 : 대전광역시 유성구 송강동
- 면적 : 3,105㎡
- 지붕 구조 : 골조막구조
- 지붕재 : PTFE A종 막재



(가) 대전송강테니스장 개요

대전송강실내테니스장 지붕구조물은 철골 PIPE 위에 PTFE막재가 인장으로 당겨져 접합됨으로써 바람이나 눈, 비 등의 외부 하중에 견디는 골조막 구조이다. 막재와 골조의 접합 부위는 아치 퍼린의 골조 위에 접합 충진재인 고무 재질을 넣고, 그 위에 알루미늄 바를 볼트로 체결해 고정하고 있다.

(나) 대전송강테니스장 막장력 측정 개요

대전송강실내테니스장의 현장검증실험은 2013년 11월 22일 당일 수행하였으며, 측정에는 밑변의 길이가 18cm×27cm, 높이 15cm를 갖는 막장력 측정장치를 사용하였다. 측정위치는 그림 2-2-3-72와 같이 총 6곳의 막장력을 측정하였다. 대전송강실내테니스장의 현장측정 결과는 아래의 표 2-20과 같다. 그림 2-2-3-73은 대전송강테니스장 막장력 측정모습을 나타내고 있다.

표 2-20. 대전송강테니스장 막장력 측정 결과

패널번호	측정위치	1차 측정진동수 (Hz)		2차 측정진동수 (Hz)		비고
		Warp	Fill	Warp	Fill	
1	P1	109	134	102	126	
	P2	116	132	116	132	
2	P3	126	136	126	136	
	P4	126	136	126	136	
	P5	126	132	126	132	
	P6	126	143	132	143	

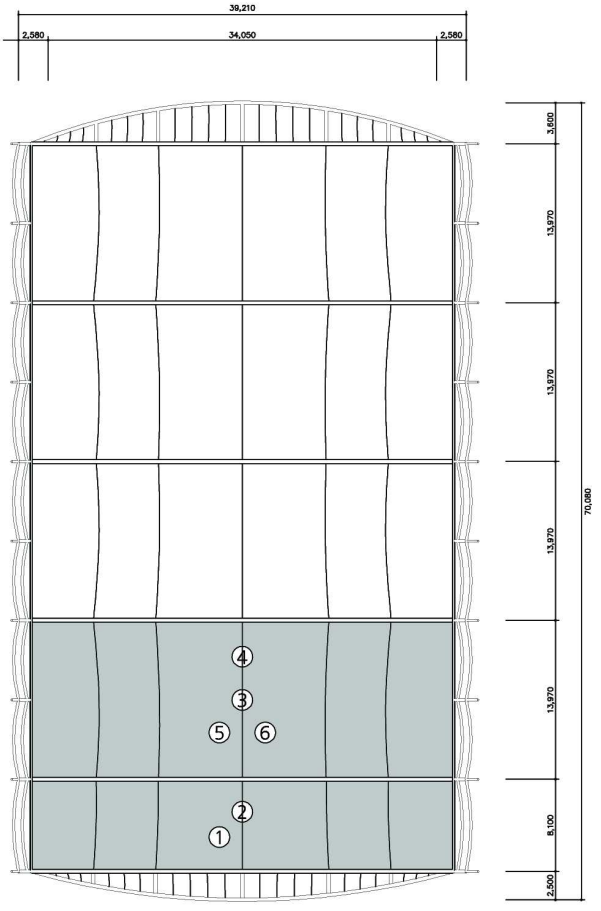


그림 2-2-3-72. 대전송강실내테니스장 측점 위치도



그림 2-2-3-73. 막장력 측정사진

(11) 일산고양종합운동장



구조물 명칭	일산 고양종합운동장	
위치	경기 고양시 일산서구 대화동 2320	
연면적	73,810.87㎡	
준공일	2003년 9월 26일	
막구조	형식	골조막
	Bay 수	총 22개 (2Part)
	막재 종류	FGT 800
		막재중량: 800g/m^2

그림 2-2-3-74. 일산 고양 종합운동장 전경 및 개요

(가) 일산고양종합운동장 개요

점검 대상 구조물인 일산 고양종합운동장은 2003년에 준공되어 현재 10년이 경과한 구조물이다. 이 구조물은 24개의 ∅1500의 Main Pipe Column 상부에 Drum을 매개로 하여 8개의 Pipe을 3각 형태의 2차원 Truss로 구성하고, Drum 뒤쪽 부재인 Rear Main Column 하부에 연결하여 Truss의 하중을 Main Pipe Column으로 전달하는 Max. Span 41.4m의 Cantilever Truss 구조이다. 또한 강성을 가진 2차원 트러스 골조 위에 Membrane Plate를 설치하고, 그 위에 PTFE 막재를 산토플렌 고무재와 알루미늄 Bar, Stud Bolt로 고정하여 마감을 형성하는 강성 골조막구조라 볼 수 있다.

해당 구조물에 사용된 막재는 일본 최대 막재 생산업체인 (주)츄코에서 생산한 FGT-800으로, 음파를 이용한 장력 측정에서 중요시 되는 물리량인 막재 질량은 1300g/m2이다. 이 막재는 2010년 한국공간구조학회에서 발간한 막구조 설계기준 및 해설서 상 A종 막재로 분류된다.

(나) 일산고양종합운동장 막장력 측정 개요

막장력 측정은 그림 2-2-3-75에 나타내는 바와 같이, 중앙 판넬을 중심으로 양쪽 2개 Bay를 포함해 총 5개 Bay를 지정하여 측정하였으며, 왼쪽 PART는 한 판넬 당 2곳을, 오른쪽 PART는 한 판넬 당 7곳을 지정하여 측정했다. 그림 2-2-3-75의 평면상에서 수평축이 Warp, 수직축이 Fill 방향을 가리키고, 번호는 측점을 나타낸다. 측정은 일반적으로 막면 위에서 수행하나, 음파를 이용한 막장력 측정기는 막면 하부에서도 동일한 성능의 측정이 가능하므로, 접근이 보다 용이한 루트로 막면의 위, 아래 어디서든 측정가능하다. 그림에서 적색으로 표시한 측점은 막면 위에서, 청색 측점은 막면 아래에서 측정을 행했다. 또, 측정 실책을 방지하기 위해 한 측점에서 동일한 측정을 3회 실시했다. 측정 모습 및 측정진동수 및 장력을 그림 2-2-3-76에서 2-2-3-79에 나타낸다.

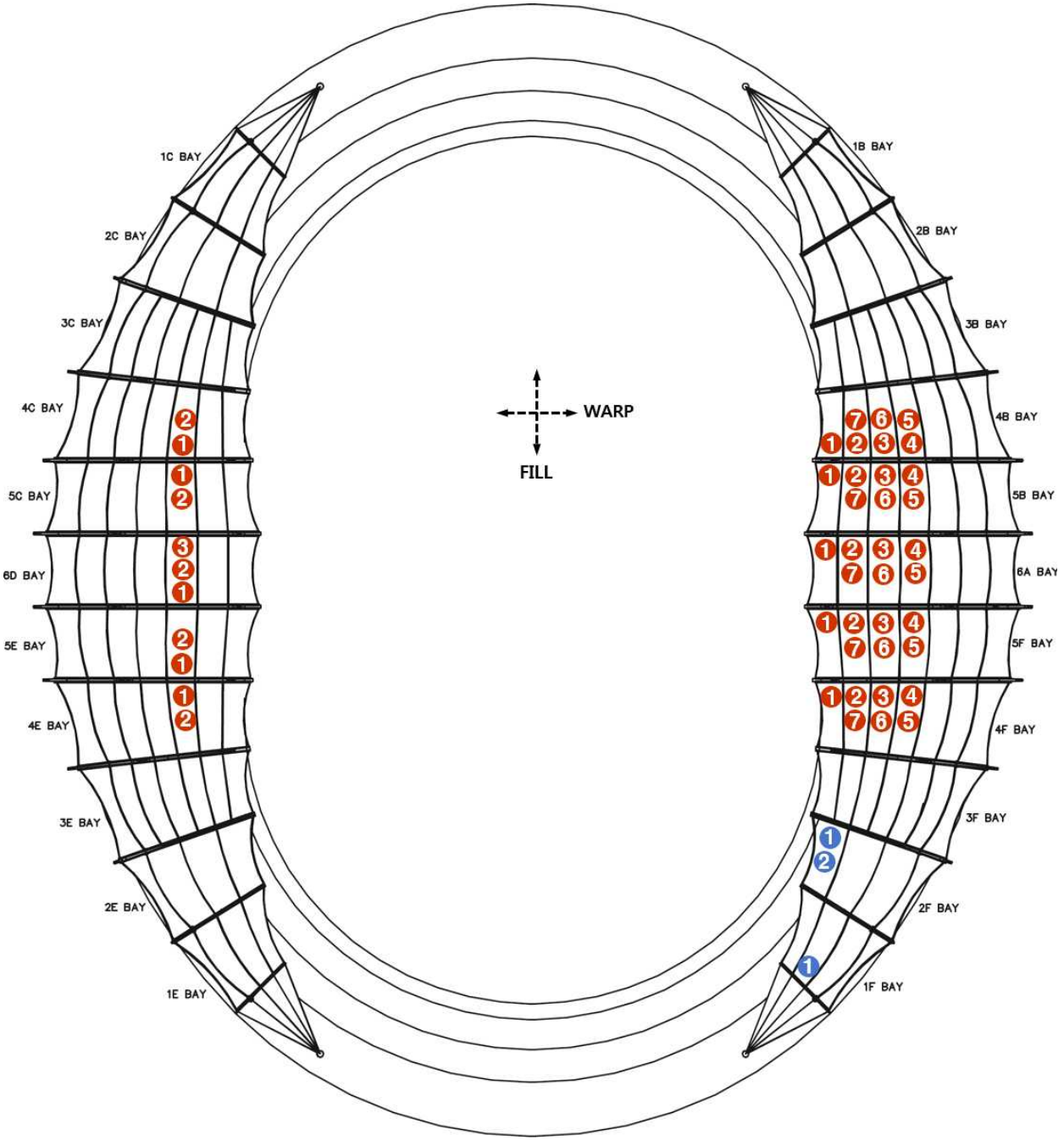


그림 2-2-3-75. 일산고양종합운동장 측점위치도(적색은 막면 위에서, 청색은 막면 아래에서 측정)

(다) 일산고양종합운동 막장력 측정결과

해당 막구조물의 장력 측정결과를 표 2-21에 나타낸다.

표 2-21. 일산 고양 종합 운동장 막장력 측정결과

패널	측정 위치	측정 횟수	측정 진동수(Hz)		비고
			WARP	FILL	
4B	1	1	100	97	
		2	100	97	
		3	100	97	
	2	1	101	100	
		2	100	100	
		3	100	100	
	3	1	90	100	
		2	89	100	
		3	90	101	
	4	1	83	94	
		2	83	94	
		3	81	94	
	5	1	125	107	
		2	125	107	
		3	125	107	
	6	1	125	111	
		2	125	111	
		3	125	111	
	7	1	124	106	
		2	125	107	
		3	125	106	

패널	측정 위치	측정 횟수	측정 진동수(Hz)		비고
			WARP	FILL	
5B	1	1	88	86	
		2	89	87	
		3	89	88	
	2	1	79	89	
		2	77	89	
		3	77	89	
	3	1	79	94	
		2	79	93	
		3	79	94	
	4	1	81	94	
		2	78	74	
		3	79	93	
	5	1	123	107	
		2	123	107	
		3	121	107	
	6	1	125	107	
		2	125	107	
		3	125	107	
	7	1	125	107	
		2	125	107	
		3	125	107	

패널	측정 위치	측정 횟수	측정 진동수(Hz)		비고
			WARP	FILL	
6A	1	1	113	103	
		2	113	100	
		3	111	103	
	2	1	89	103	
		2	89	103	
		3	87	103	
	3	1	86	107	
		2	86	107	
		3	87	107	
	4	1	89	97	
		2	89	97	
		3	89	100	
	5	1	117	103	
		2	117	103	
		3	120	103	
	6	1	119	103	
		2	117	103	
		3	119	103	
	7	1	123	107	
		2	121	107	
		3	121	106	

패널	측정 위치	측정 횟수	측정 진동수(Hz)		비고
			WARP	FILL	
5F	1	1	107	101	
		2	106	103	
		3	106	100	
	2	1	101	107	
		2	101	107	
		3	100	107	
	3	1	94	100	
		2	93	100	
		3	94	100	
	4	1	97	103	
		2	94	103	
		3	97	103	
	5	1	125	113	
		2	125	113	
		3	125	113	
	6	1	130	117	
		2	130	115	
		3	130	114	
	7	1	125	113	
		2	125	113	
		3	125	113	

패널	측정 위치	측정 횟수	측정 진동수(Hz)		비고
			WARP	FILL	
4F	1	1	119	127	
		2	120	127	
		3	119	130	
	2	1	100	120	
		2	100	120	
		3	100	119	
	3	1	107	117	
		2	107	117	
		3	107	113	
	4	1	125	125	
		2	125	125	
		3	123	125	
	5	1	130	125	
		2	130	125	
		3	133	125	
	6	1	137	125	
		2	135	130	
		3	134	125	
	7	1	133	130	
		2	133	133	
		3	134	133	

패널	측정 위치	측정 횟수	측정 진동수(Hz)		비고
			WARP	FILL	
2F	1	1	101	103	막면 하부에서 측정
		2	101	103	
		3	97	100	
	2	1	123	117	막면 하부에서 측정
		2	120	117	
		3	117	17	
1F	1	1	89	100	막면 하부에서 측정
		2	86	100	
		3	86	101	
4E	1	1	113	113	
		2	113	113	
		3	112	112	
	2	1	134	121	
		2	130	120	
		3	130	120	
5E	1	1	93	106	
		2	89	100	
		3	90	104	
	2	1	130	111	
		2	130	112	
		3	130	111	

패널	측정 위치	측정 횟수	측정 진동수(Hz)		비고
			WARP	FILL	
6D	1	1	111	114	
		2	111	115	
		3	111	114	
	2	1	125	115	
		2	130	114	
		3	125	115	
	3	1	111	113	
		2	110	111	
		3	107	111	
5C	1	1	89	100	
		2	89	100	
		3	89	100	
	2	1	130	115	
		2	130	117	
		3	130	117	
4C	1	1	97	106	
		2	97	107	
		3	97	106	
	2	1	125	113	
		2	121	113	
		3	121	113	

(다) 측정 막장력 검토

측정 대상 막구조물의 장력은 막면의 상부에 아치 구조재 방향과 평행하게 누름케이블을 설치하고, 누름케이블에 장력을 도입함으로써 2차 장력을 도입하는 시스템이다. 해당 구조물의 누름 케이블과 직교하는 막재 섬유의 Warp 방향 장력은 모든 측점에서 막구조 설계기준 및 해설서의 권고 장력인 2kN/m(≒2kgf/cm)을 초과하는 장력이 도입되어 있는 것으로 확인되었다.

반면 누름 케이블과 평행한 방향인 Fill 방향은 누름케이블의 장력이 막면의 길이를 줄이는 방향으로 작용하므로 오히려 장력을 소실시키는 역할을 한다. 누름 케이블로 막면에 장력을 도입하는 시스템에서는 비교적 빈번히 발생하는 현상으로, 설계 시 주의를 요한다. 측정결과 판넬 중앙부의 측점 대부분에서 Warp 방향에 비해 Fill 방향의 장력이 현격하게 작음을 확인했다. 또, 판넬 4B의 3, 4번, 5B의 2, 3, 4번, 6A의 2, 3, 4번, 4F의 2번, 1F의 1번, 5E의 1번, 5C의 1번 측점과 같이 누름케이블이 막면에 닿지 않는 단부에서는 Warp 방향보다 Fill 방향의 장력이 크게 검출되는 것도 이를 뒷받침한다.

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 방향의 장력을 재도입할 수 있는 효율적인 시스템이 설계되어 있지 않아 현 시점에서 쉽게 권고 장력을 유지시키기는 어렵다.

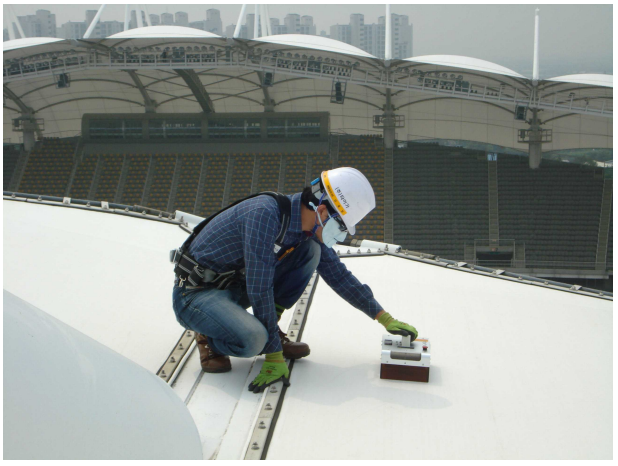




그림 2-2-3-76. 막면 상부에서의 장력 측정사진





그림 2-2-3-77. 막면 상부에서의 장력 측정사진 3



그림 2-2-3-78. 측정 진동수



그림 2-2-3-79. 측정장력

(12) 올림픽체조경기장



구조물 명칭	올림픽체조경기장	
위치	서울 송파구 방이동 88-2	
연면적	30,548㎡	
준공일	1986년 5월 31일	
막구조	형식	케이블돔
	Bay 수	총 32개
	막재 종류	SHEERFILL-II
		막재중량: 1.3kg/m^2

그림 2-2-3-80. 올림픽체조경기장 전경 및 개요

(가) 올림픽체조경기장 개요

점검 대상 구조물인 올림픽체조경기장의 지붕막은 2002년에 준공되어 현재 12년이 경과한 구조물이다. 해당 구조물에 사용된 막재는 프랑스 Saint-Gobain사에서 생산한 SHEERFILL-Ⅱ로, 음파를 이용한 장력 측정에서 중요시 되는 물리량인 막재 질량은 1.3kg/m2이다. 이 막재는 2010년 한국공간구조학회에서 발간한 막구조 설계기준 및 해설서 상 A종 막재로 분류된다.

(나) 올림픽체조경기장 막장력 측정 개요

막장력 측정은 그림 2-2-3-81에 나타내는 바와 같이, 주 케이블과 누름 케이블로 나뉘는 32개 BAY의 모든 판넬을 대상으로, 용접으로 나누어진 구획이 가장 크고 구조 특성상 장력이 완이 크다고 판단되는 가장자리 판넬의 중앙부 1곳을 지정하여 측정했다.

그림 2-2-3-81의 평면상에서 원주 방향이 Warp, 접선의 직각 방향이 Fill 방향을 가리키고, 번호는 측점을 나타낸다. 음파를 이용한 막장력 측정기는 막면의 상, 하부에서 동일한 성능의 측정이 가능하나, 접근이 보다 용이한 막면의 위에서 측정을 수행했다. 또, 측정 실책을 방지하기 위해 한 측점에서 동일한 측정을 3회 실시해 평균값을 그 측점에서의 장력으로 산출했다. 측정 모습을 그림 2-2-3-82에서 2-2-3-84에 나타낸다.

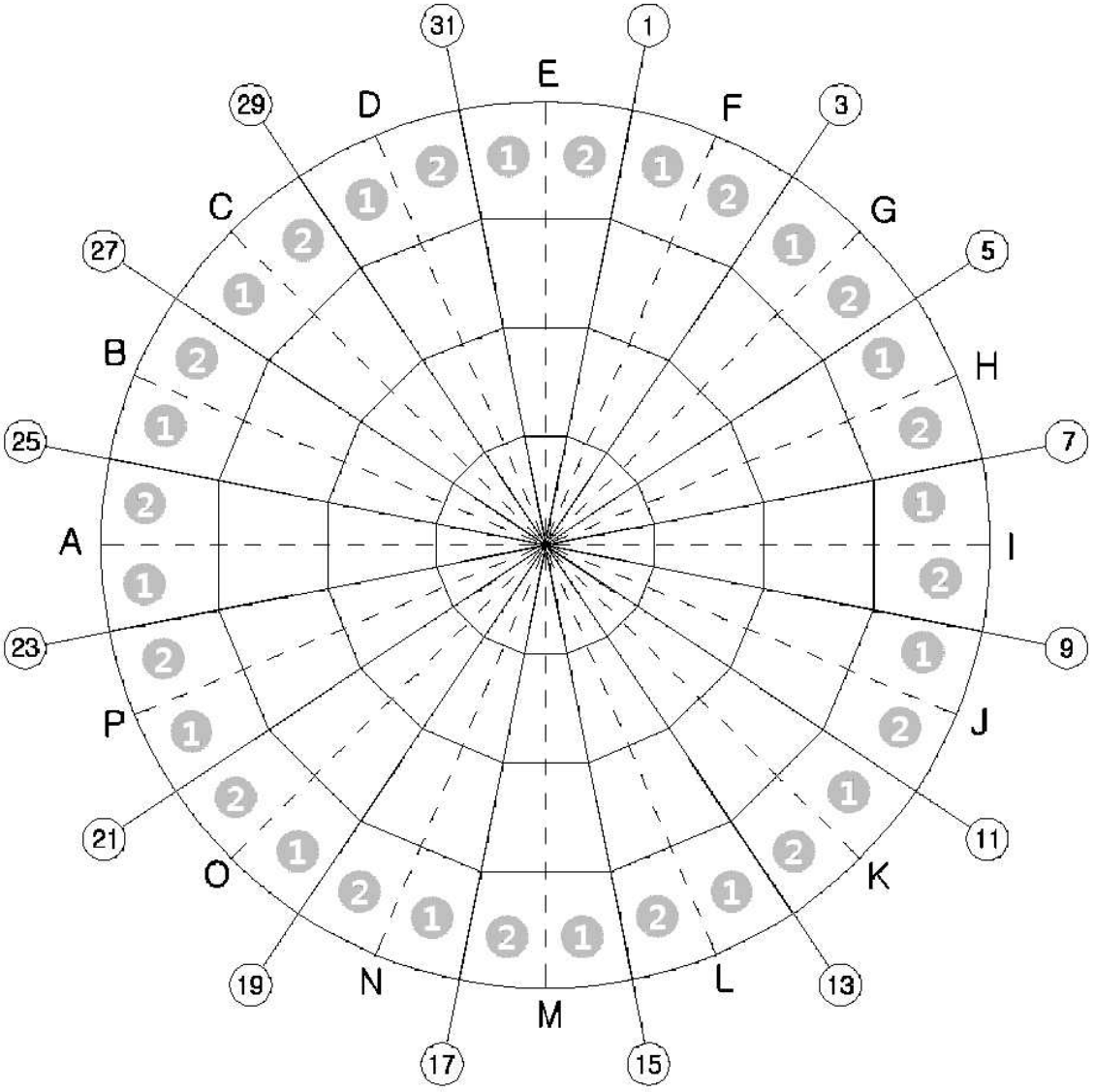


그림 2-2-3-81. 올림픽체조경기장 측정 위치 평면도




그림 2-2-3-82. 막장력 측정사진 1




그림 2-2-3-83. 막장력 측정사진 2

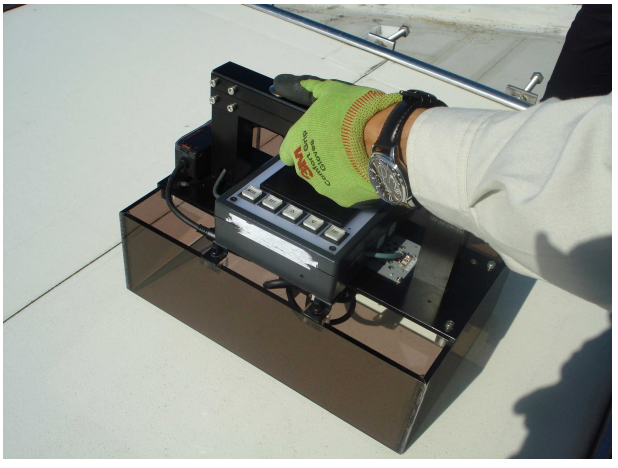



그림 2-2-3-84. 막장력측정장치

(다) 올림픽체조경기장 막장력 측정 결과

해당 막구조물의 장력 측정결과를 표 2-22에 나타낸다.

표 2-22. 올림픽체조경기장 막장력 측정결과

패널	측정 위치	측정 횟수	측정 진동수(Hz)		비고
			WARP	FILL	
A	1	1	88.3	90.8	
		2	86.4	91.3	
		3	96.4	93.2	
	2	1	91.3	96.1	
		2	89.8	95.2	
		3	90.8	96.1	
B	1	1	100	107.4	
		2	96.6	103.5	
		3	96.1	103.5	
	2	1	104.9	104.9	
		2	101.0	102.5	
		3	101.0	103.5	
C	1	1	100.0	100.0	
		2	100.0	96.1	
		3	96.1	100.0	
	2	1	96.1	96.1	
		2	96.1	96.1	
		3	96.1	96.1	
D	1	1	101.0	96.6	
		2	100.0	96.1	
		3	100.0	96.1	
	2	1	90.8	100.0	
		2	93.7	101.0	
		3	93.7	101.0	

패널	측정 위치	측정 횟수	측정 진동수(Hz)		비고
			WARP	FILL	
E	1	1	93.7	96.1	
		2	93.2	96.1	
		3	90.8	96.1	
	2	1	96.1	96.6	
		2	95.2	96.6	
		3	93.7	96.1	
F	1	1	109.3	104.9	
		2	111.8	107.4	
		3	109.3	107.4	
	2	1	107.4	103.5	
		2	107.4	103.5	
		3	107.4	103.5	
G	1	1	96.6	96.1	
		2	96.6	96.6	
		3	100.0	100.0	
	2	1	96.1	104.9	
		2	95.2	104.9	
		3	95.2	104.9	
H	1	1	107.4	104.9	
		2	104.9	101.0	
		3	101.0	107.4	
	2	1	107.4	107.4	
		2	104.9	107.4	
		3	104.9	105.9	

패널	측정 위치	측정 횟수	측정 진동수(Hz)		비고
			WARP	FILL	
I	1	1	111.8	109.3	
		2	111.8	111.8	
		3	111.8	109.3	
	2	1	119.6	113.2	
		2	111.8	111.8	
		3	111.8	111.8	
J	1	1	109.8	113.2	
		2	107.4	107.4	
		3	106.9	106.9	
	2	1	111.8	111.8	
		2	109.3	111.8	
		3	107.9	109.3	
K	1	1	107.4	107.4	
		2	107.4	107.4	
		3	107.4	107.4	
	2	1	109.3	102.5	
		2	107.4	101.0	
		3	107.4	101.5	
L	1	1	101.0	102.5	
		2	101.0	101.0	
		3	101.0	101.0	
	2	1	100.0	101.0	
		2	100.0	100.0	
		3	96.6	101.0	

패널	측정 위치	측정 횟수	측정 진동수(Hz)		비고
			WARP	FILL	
M	1	1	102.5	107.4	
		2	102.5	105.4	
		3	101.0	107.4	
	2	1	100.0	101.0	
		2	96.6	101.0	
		3	100.0	102.5	
N	1	1	104.9	106.9	
		2	101.0	104.9	
		3	101.0	103.5	
	2	1	101.0	101.0	
		2	100.0	101.0	
		3	96.6	101.0	
O	1	1	100.0	104.9	
		2	95.2	102.5	
		3	93.7	103.5	
	2	1	93.7	87.8	
		2	96.6	88.3	
		3	93.7	89.8	
P	1	1	102.5	113.2	
		2	103.5	113.2	
		3	103.5	116.6	
	2	1	96.6	100.0	
		2	96.1	96.6	
		3	95.2	100.0	

(라) 올림픽체조경기장 막장력 측정결과 검토

올림픽체조경기장 지붕막 구조물은 케이블 돔 구조로서 지름 150m의 원을 16개의 리지케이블로 분할하고, 각각의 리지케이블은 3개의 포스트의 압축으로 지지되어 돔을 이루는 형식이다. 또 포스트의 하부는 리지케이블로 연결되는 다이아고날케이블과 링 케이블이 3차원으로 지지하게 되며, 포스트와 리지 및 다이아고날 케이블은 삼각형을 형성하면서 압축과 인장으로 평형을 이룬다. 지붕막구조는 리지케이블을 경계구조로 지지되고 리지케이블 사이에 누름케이블을 설치하여 장력을 도입함으로써 지붕막구조를 안정화 시키는 시스템이다.

올림픽체조경기장의 측점 중 I, J판넬의 측정위치 1, 2, K판넬의 측정위치 1에서는 Warp와 Fill 양 방향에서 막구조 설계기준 및 해설서의 권고 장력인 2kN/m(≒2kgf/cm)를 초과하는 장력이 도입되어 있는 것으로 확인되었다. 또, F판넬의 측정위치 1, 2, K판넬의 측정위치 2에서는 Warp 방향의 장력만이, O판넬과 P판넬에서는 측정위치 1에서 Fill 방향의 장력만이 상기 기준 및 해설서의 권고 장력을 만족하고 있는 것으로 확인되었다. 그 외 대부분의 판넬에서는 양 방향의 도입 장력이 상기 권고 기준을 만족시키지 못할 뿐 아니라, 섬유 2축 방향의 장력 밸런스도 유지하지 못하고 있음이 확인되었다.

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 방향의 장력을 재도입할 수 있는 효율적인 시스템이 설계되어 있지 않아 현 시점에서 권고 장력을 유지시키기는 어렵다.

(13) 올림픽핸드볼경기장



구조물 명칭	올림픽핸드볼경기장	
위치	서울 송파구 방이동 88-2	
연면적	19,271㎡	
준공일	2011년 10월 23일 (보수)	
막구조	형식	케이블 돔
	Bay 수	총 32개
	막재 종류	SHEERFILL-II
		막재중량: 1.3kg/m^2

그림 2-2-3-85. 올림픽핸드볼경기장 전경 및 개요

(가) 올림픽핸드볼경기장 개요

올림픽핸드볼경기장은 1986년에 펜싱경기장으로 준공되어 2011년 핸드볼경기장으로 보수보강되었다. 이 구조물은 케이블 돔 구조로써 지름 93m의 원을 16개의 리지케이블로 분할하고 각각의 리지케이블은 2개의 포스트의 압축으로 지지되는 돔 지붕을 가지고 있는 형식이다. 또한 포스트의 하부는 리지케이블로 연결되는 다이아고날 케이블과 링 케이블이 3차원으로 지지하게 되며, 포스트와 리지 및 다이아고날 케이블은 삼각형을 형성하면서 압축과 인장으로 평형화되어 있다. 상부의 막구조는 리지케이블을 경계 구조로 지지되고 리지케이블 사이에 누름케이블을 설치하여 장력을 도입함으로써 막구조를 형성하게 된다.

올림픽핸드볼경기장의 지붕막은 2002년에 준공되어 현재 12년이 경과한 구조물이다. 해당 구조물에 사용된 막재는 프랑스 Saint-Gobain사에서 생산한 SHEERFILL-Ⅱ로, 음파를 이용한 장력 측정에서 중요시 되는 물리량인 막재 질량은 1.3kg/m2이다. 이 막재는 2010년 한국공간구조학회에서 발간한 막구조 설계기준 및 해설서 상 A종 막재로 분류된다.

(나) 올림픽핸드볼경기장 막장력 측정 개요

막장력 측정은 그림 2-2-3-86에 나타내는 바와 같이, 주 케이블과 누름 케이블로 나뉘는 32개 BAY의 모든 판넬을 대상으로, 용접으로 나누어진 구획이 가장 크고 구조 특성상 장력이 완이 크다고 판단되는 가장자리 판넬의 중앙부 1곳을 지정하여 측정했다. 그림 2-2-3-86의 평면상에서 원주 방향이 Warp, 접선의 직각 방향이 Fill 방향을 가리키고, 번호는 측점을 나타낸다. 음파를 이용한 막장력 측정기는 막면의 상, 하부에서 동일한 성능의 측정이 가능하나, 접근이 보다 용이한 막면의 위에서 수행했다. 또, 측정 실책을 방지하기 위해 한 측점에서 동일한 측정을 3회 실시해 평균값을 그 측점에서의 장력으로 산출했다. 측정 모습을 그림 2-2-3-87에서 2-2-3-89에 나타낸다.

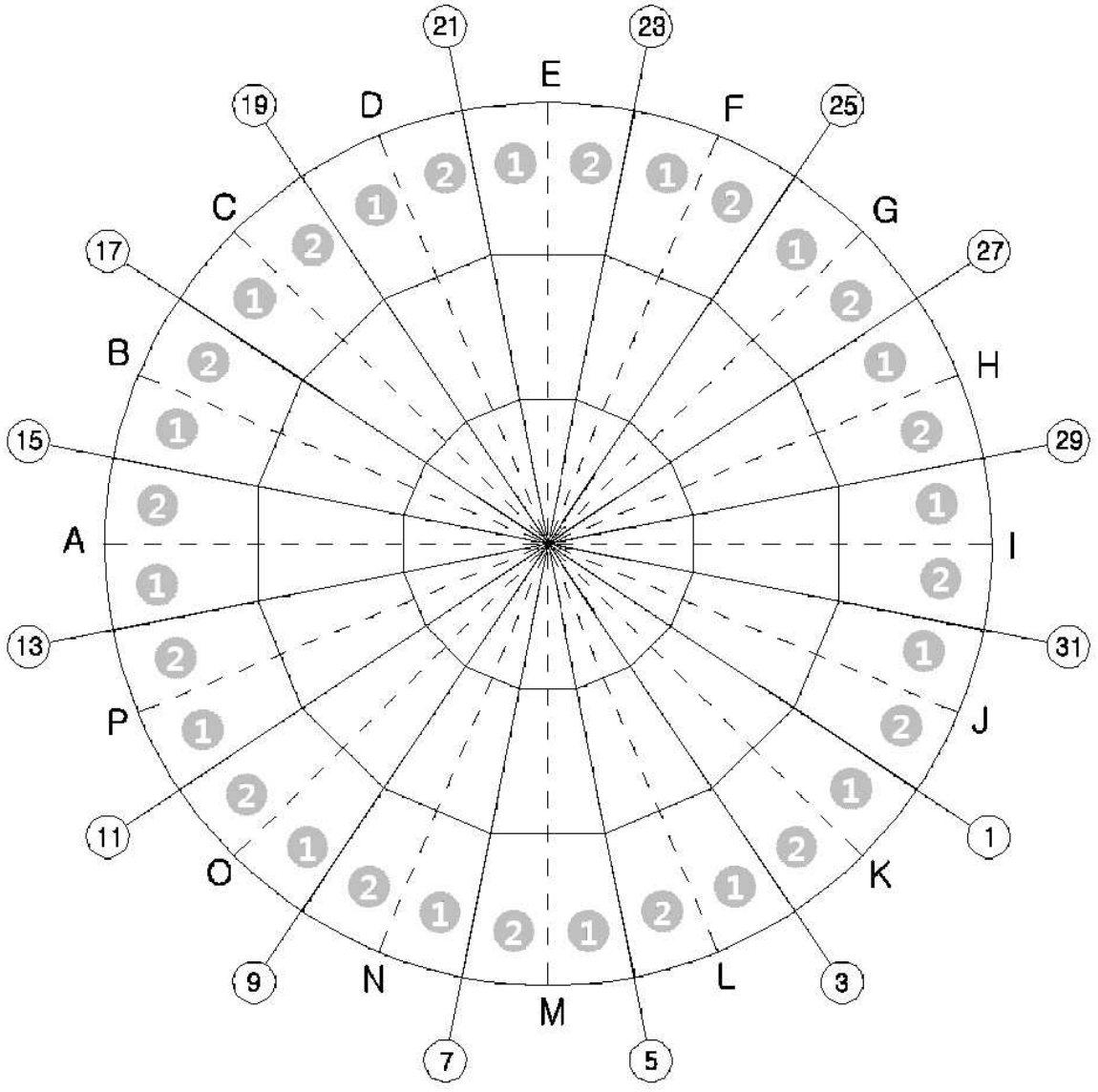


그림 2-2-3-86. 올림픽핸드볼경기장 측정 위치 평면도




그림 2-2-3-87. 막장력 측정사진

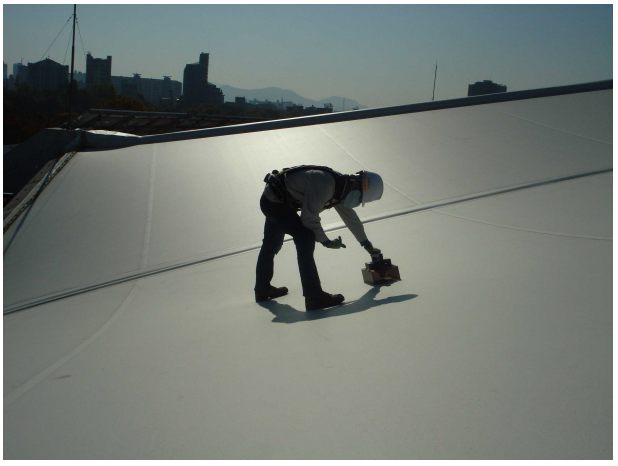



그림 2-2-3-88. 막장력 측정사진




그림 2-2-3-89. 막장력 측정사진

(다) 올림픽핸드볼경기장 막장력 측정 결과

해당 막구조물의 장력 측정결과를 표 2-23에 나타낸다.

표 2-23. 올림픽핸드볼경기장 막장력 측정결과

패널	측정 위치	측정 횟수	측정 진동수(Hz)		비고
			WARP	FILL	
A	1	1	107.9	111.8	
		2	107.4	111.8	
		3	107.4	111.8	
	2	1	111.8	111.6	
		2	107.9	116.6	
		3	111.8	111.6	
B	1	1	101.0	113.2	
		2	101.0	116.6	
		3	101.0	116.6	
	2	1	101.0	111.8	
		2	101.0	111.8	
		3	101.0	111.8	
C	1	1	101.0	111.8	
		2	100.0	111.8	
		3	100.0	111.8	
	2	1	96.6	107.4	
		2	95.2	107.4	
		3	96.1	107.9	
D	1	1	101.0	113.2	
		2	100.0	111.8	
		3	100.0	113.2	
	2	1	96.1	111.8	
		2	96.6	111.8	
		3	96.6	107.4	

패널	측정 위치	측정 횟수	측정 진동수(Hz)		비고
			WARP	FILL	
E	1	1	96.6	111.8	
		2	96.6	111.8	
		3	96.6	111.8	
	2	1	101.0	111.8	
		2	91.6	111.8	
		3	100.0	111.8	
F	1	1	101.0	111.8	
		2	101.0	111.8	
		3	101.0	111.8	
	2	1	101.0	111.8	
		2	101.0	111.8	
		3	101.0	111.8	
G	1	1	101.0	104.9	
		2	96.6	104.9	
		3	96.6	104.9	
	2	1	101.0	106.9	
		2	101.0	111.8	
		3	102.5	111.8	
H	1	1	104.9	116.6	
		2	103.5	113.2	
		3	102.5	113.2	
	2	1	93.7	106.0	
		2	93.2	100.0	
		3	93.7	106.0	

패널	측정 위치	측정 횟수	측정 진동수(Hz)		비고
			WARP	FILL	
I	1	1	107.9	113.2	
		2	100.0	107.9	
		3	100.0	107.4	
	2	1	107.9	111.8	
		2	107.4	111.8	
		3	107.4	111.8	
J	1	1	111..8	121.0	
		2	107.4	119.6	
		3	104.9	113.2	
	2	1	107.4	113.2	
		2	101.0	113.2	
		3	102.5	111.8	
K	1	1	107.4	111.8	
		2	103.5	111.8	
		3	101.0	111.8	
	2	1	101.0	107.4	
		2	100.0	107.4	
		3	100.0	107.4	
L	1	1	102.5	109.3	
		2	100.0	111.8	
		3	101.0	111.8	
	2	1	101.0	111.8	
		2	101.0	111.8	
		3	101.0	111.8	

패널	측정 위치	측정 횟수	측정 진동수(Hz)		비고
			WARP	FILL	
M	1	1	101.0	111.8	
		2	101.0	111.8	
		3	101.0	111.8	
	2	1	102.5	113.2	
		2	102.5	111.8	
		3	104.6	111.8	
N	1	1	107.4	111.8	
		2	105.4	111.8	
		3	104.9	111.8	
	2	1	105.4	113.2	
		2	107.4	113.2	
		3	105.4	116.6	
O	1	1	104.9	116.6	
		2	107.4	116.6	
		3	107.4	119.6	
	2	1	107.4	121.0	
		2	107.4	121.0	
		3	107.4	121.0	
P	1	1	111.8	111.8	
		2	111.8	119.6	
		3	111.8	119.6	
	2	1	111.6	116.2	
		2	106.9	116.6	
		3	111.8	116.6	

(라) 올림픽핸드볼경기장 막장력 측정결과 검토

올림픽핸드볼경기장은 케이블 돔 구조로써 지름 93m의 원을 16개의 리지케이블로 분할하고, 각각의 리지케이블은 3개의 포스트의 압축으로 지지되어 돔을 이루는 형식이다. 또 포스트의 하부는 리지케이블로 연결되는 다이아고날 케이블과 링 케이블이 3차원으로 지지하게 되며, 포스트와 리지 및 다이아고날 케이블은 삼각형을 형성하면서 압축과 인장으로 평형을 이룬다. 지붕막구조는 리지케이블을 경계구조로 지지되고 리지케이블 사이에 누름케이블을 설치하여 장력을 도입함으로써 지붕막구조를 안정화시키는 시스템이다.

올림픽핸드볼경기장측점 중 판넬 A의 측정위치 2, P판넬의 측정위치 1에서는 Warp와 Fill 양 방향에서 막구조 설계기준 및 해설서의 권고 장력인 2kN/m(≒2kgf/cm)를 초과하는 장력이 도입되어 있는 것으로 확인되었다. 또, B판넬의 측정위치 2, C판넬의 측정위치 1을 제외한 모든 판넬에서 Fill 방향의 장력이 상기 기준 및 해설서의 권고 장력을 만족하고 있는 것으로 확인되었다. 그 외의 판넬에서는 양 방향의 도입 장력 및 Warp 방향의 장력이 상기 권고 기준을 만족시키지 못할 뿐 아니라, 섬유 2축 방향의 장력 밸런스도 유지하지 못하고 있음이 확인되었다.

막구조물은 섬유 축 2방향의 장력이 동일하게 도입될 때 가장 효율적으로 외부 하중에 저항할 수 있다. 해당 구조물의 Warp 방향 장력은 누름 케이블의 장력으로 비교적 쉽게 조절할 수 있으므로, 누름케이블의 장력 재도입으로 인한 라이즈 감소로 인한 폰딩 위험이 없다면 장력 재도입을 검토할 수 있다.

(14) 난지물재생센터



구조물 명칭	난지물재생센터 최초침전지	
위치	경기 고양시 덕양구 대덕로 426	
연면적	제1처리장	14,246.4㎡
	제2처리장	14,810.9㎡
준공일	2002년 6월	
막구조	판넬 수	총 144개 (1 & 2처리장)
	막재 종류	한화 포리마 PVDF
		막재중량: 1300g/m^2

그림 2-2-3-90. 난지물재생센터 전경 및 개요

(가) 난지물재생센터 개요

난지물재생센터 최초침전지 막구조물은 2002년에 준공되어 현재 13년이 경과한 구조물이다. 이 구조물은 최초침전지인 기존 구조물 위에 Steel Pipe를 세워 하부를 앙카볼트로 고정하고, 달대 볼트를 이용하여 철골에 막을 매어 단 현수막구조이다. 막 한 판넬은 두 개의 콘으로 봉우리를 형성하고 있고, 하나의 콘을 4개의 철골 파이프가 지지하고 있다.

판넬은 3가지 유형으로 밑변의 길이가 23.3m×11.55m, 15.9m×11.55m, 4.2m×22.2m로 구성되어 있고, 철골 구조재의 높이는 모두 3.6m로 설계되었다. 또, 철골 구조재는 상부에서 플랜지로 볼트 접합하였고, 하부는 베이스 플레이트에 핀을 이용하여 힌지 접합되도록 했다.

설계 시 고려한 풍하중은 최대풍속 30m/sec로 상정해 해석하였으며, 눈하중은 최대 적설량 50cm로 설정했다. 이들 외력에 저항할 수 있는 막재료로 건축구조용 PVDF를 채용했는데, 허용인장강도가 Warp(경사)방향으로 730kgf/5cm, Fill(위사)방향으로 700kgf/5cm을 갖는 당시 국내에서는 인장강도가 가장 큰 막재로 시공되었다. 이 막재는 한화에서 생산한 한화 포리마 PVDF로, 음파를 이용한 장력 측정에서 중요시 되는 물리량인 막재 질량은 1300g/m2이다. 또, 이 막재는 2010년 한국공간구조학회에서 발간한 막구조 설계기준 및 해설서 상 C종 막재로 분류된다.

(나) 난지물재생센터 막장력 측정 개요

막장력 측정은 그림 2-2-3-91, 92에 나타내는 바와 같이, 제1처리장과 제2처리장 동일하게 알파벳 대문자로 표시된 각 존의 중앙 양 쪽 판넬을 따라서, Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ열 각각 한 곳을 측정지점(이하 측점)으로 정해 측정을 시행했다. 측정은 제2처리장부터 시행했는데, 전체 구조물의 측점을 정하기 위해 F존에서는 모든 판넬에서 측정을 행했다. 그림 13, 14의 평면상에서 철골 구조재가 교차하는 콘을 중심으로 밑변 방향이 막재의 Warp 방향, 변에서 수선 방향이 Fill 방향을 가리킨다. 그림 상의 기호 '●'는 측점을 나타낸다.

음파를 이용한 막장력 측정기는 막면의 상, 하부에서 동일한 성능으로 자유롭게 측정이 가

능하므로, 지붕막 구조물의 경우는 접근이 보다 용이한 루트로 막면의 위, 아래를 선택해 측정하게 된다. 그러나 해당 막구조물은 구조물 특성 상 하부에서의 접근이 불가능해 막면의 상부에서만 측정을 행했다. 또, 측정 실책을 방지하기 위해 한 측점에서 동일한 측정을 3회 실시하고, 그 평균값을 취했다. 해당 구조물의 막장력 측정모습과, 측정진동수 및 장력을 그림 2-2-3-93에서 2-2-3-97에 나타낸다.

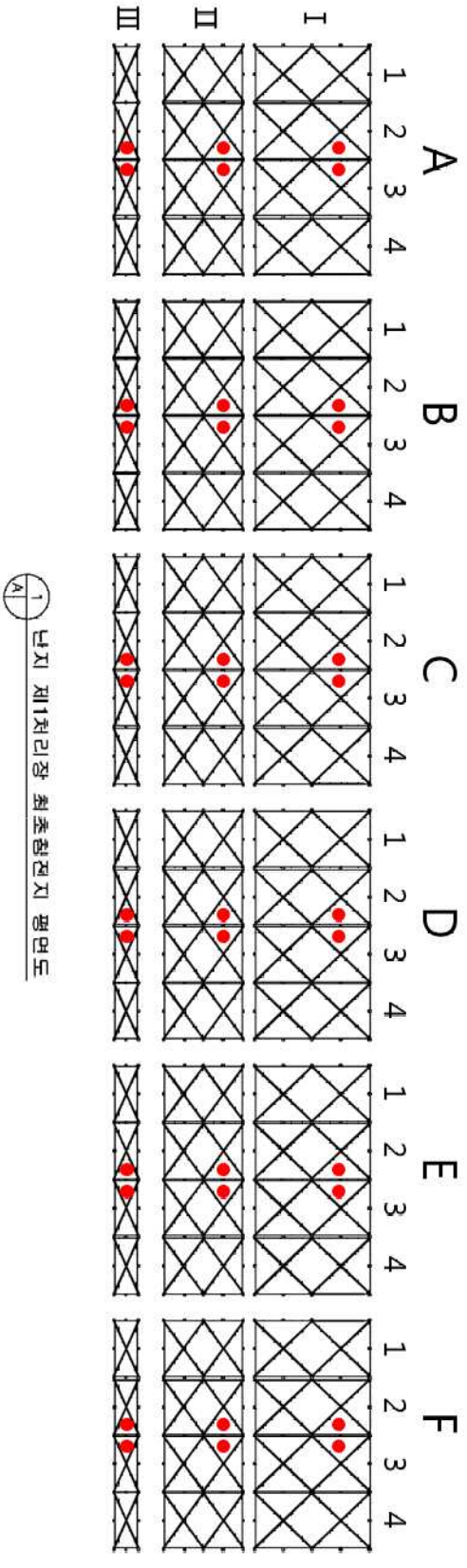


그림 2-2-3-91. 난지물재생센터 제1처리장 최초침전지 측점위치 평면도

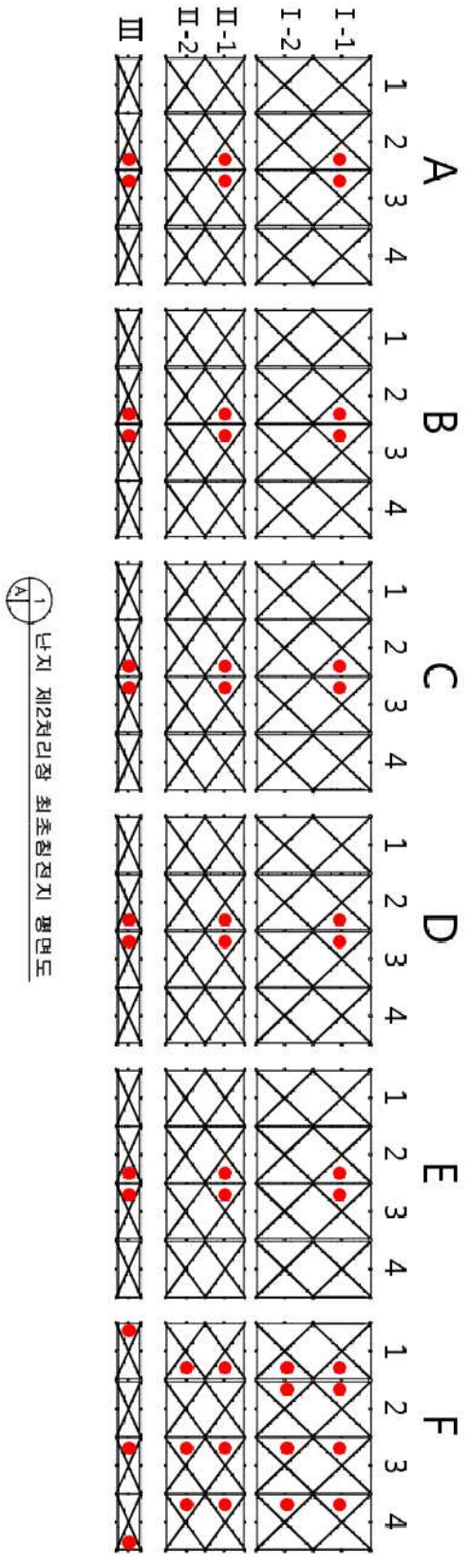


그림 2-2-3-92. 난지물재생센터 제2처리장 최초침전지 측정위치 평면도

(다) 난지물재생센터 막장력 측정 결과

해당 막구조물의 장력 측정결과를 표 2-24(제1처리장), 2-25(제2처리장)에 나타낸다.

표 2-24. 난지물재생센터 제1처리장 최초침전지 막장력 측정결과

Zone	측정 위치		측정 횟수	막장력 측정값(kgf/cm)		비고
				WARP	FILL	
A	I	2	1	0.76	0.59	
			2	0.74	0.62	
			3	0.76	0.59	
		3	1	0.81	0.46	
			2	0.80	0.49	
			3	0.69	0.54	
	II	2	1	0.69	0.54	
			2	0.69	0.54	
			3	0.69	0.54	
		3	1	0.92	0.43	
			2	0.80	0.49	
			3	0.86	0.57	
	III	2	1	0.50	0.50	
			2	0.50	0.50	
			3	0.50	0.50	
		3	1	0.90	0.49	
			2	0.80	0.49	
			3	0.78	0.54	
B	I	2	1	0.80	0.49	
			2	0.80	0.49	
			3	0.80	0.49	
		3	1	0.75	0.45	
			2	0.84	0.41	
			3	0.74	0.43	

Zone	측정 위치		측정 횟수	막장력 측정값(kgf/cm)		비고
				WARP	FILL	
B	II	2	1	1.07	0.65	
			2	1.03	0.67	
			3	1.07	0.65	
		3	1	0.86	0.42	
			2	0.84	0.41	
			3	0.84	0.41	
	III	2	1	0.52	0.55	
			2	0.54	0.54	
			3	0.50	0.5	
		3	1	0.93	0.63	
			2	0.85	0.64	
			3	0.85	0.41	
C	I	2	1	0.85	0.64	
			2	0.85	0.64	
			3	0.85	0.64	
		3	1	1.02	0.43	
			2	1.02	0.43	
			3	1.02	0.43	
	II	2	1	0.78	0.54	
			2	0.78	0.54	
			3	0.78	0.54	
		3	1	0.81	0.53	
			2	0.87	0.54	
			3	0.83	0.47	
	III	2	1	0.46	0.46	
			2	0.39	0.49	
			3	0.39	0.49	
		3	1	1.00	0.49	
			2	0.87	0.54	
			3	0.90	0.53	

Zone	측정 위치		측정 횟수	막장력 측정값(kgf/cm)		비고
				WARP	FILL	
D	I	2	1	0.36	0.56	
			2	0.36	0.56	
			3	0.36	0.56	
		3	1	0.65	0.43	
			2	0.65	0.43	
			3	0.65	0.43	
	II	2	1	0.83	0.74	
			2	0.80	0.76	
			3	0.95	0.60	
		3	1	0.80	0.49	
			2	0.80	0.49	
			3	0.80	0.49	
	III	2	1	0.36	0.45	
			2	0.36	0.45	
			3	0.36	0.45	
		3	1	0.76	0.38	
			2	0.74	0.43	
			3	0.76	0.38	
E	I	2	1	0.76	0.59	
			2	0.76	0.59	
			3	0.76	0.59	
		3	1	0.92	0.72	
			2	0.93	0.83	
			3	0.92	0.72	
	II	2	1	0.72	0.72	
			2	0.53	0.57	
			3	0.95	0.65	
		3	1	0.85	0.64	
			2	0.87	0.54	
			3	0.87	0.54	

Zone	측정 위치		측정 횟수	막장력 측정값(kgf/cm)		비고
				WARP	FILL	
E	III	2	1	0.38	0.51	
			2	0.39	0.49	
			3	0.39	0.49	
		3	1	1.28	0.45	
			2	1.28	0.45	
			3	1.28	0.45	
F	I	2	1	0.88	0.63	
			2	0.95	0.60	
			3	0.88	0.63	
		3	1	0.73	0.64	
			2	0.5	0.46	
			3	0.63	0.63	
	II	2	1	0.74	0.62	
			2	0.78	0.58	
			3	0.76	0.59	
		3	1	0.80	0.49	
			2	0.80	0.49	
			3	0.78	0.54	
	III	2	1	0.77	0.68	
			2	0.61	0.53	
			3	0.76	0.60	
		3	1	0.64	0.64	
			2	0.67	0.59	
			3	0.67	0.59	

표 2-25. 난지물재생센터 제2처리장 최초침전지 막장력 측정결과

Zone	측정 위치		측정 횟수	막장력 측정값(kgf/cm)		비고
				WARP	FILL	
A	I	2	1	1.07	0.66	
			2	1.07	0.66	
			3	1.07	0.66	
		3	1	1.34	0.69	
			2	1.34	0.69	
			3	1.34	0.69	
	II	2	1	1.09	0.44	
			2	1.08	0.47	
			3	1.09	0.46	
		3	1	1.35	0.54	
			2	1.22	0.57	
			3	1.29	0.56	
	III	2	1	0.71	0.71	
			2	0.71	0.71	
			3	0.71	0.71	
		3	1	1.28	0.45	
			2	1.44	0.48	
			3	1.22	0.57	
B	I	2	1	1.34	0.69	
			2	1.34	0.69	
			3	1.27	0.73	
		3	1	1.09	0.51	
			2	1.25	0.44	
			3	1.17	0.48	

Zone	측정 위치		측정 횟수	막장력 측정값(kgf/cm)		비고
				WARP	FILL	
B	II	2	1	1.69	0.58	
			2	1.49	0.63	
			3	1.37	0.63	
		3	1	1.28	0.45	
			2	1.14	0.51	
			3	1.03	0.59	
	III	2	1	0.84	0.67	
			2	0.84	0.67	
			3	0.84	0.67	
		3	1	0.46	0.46	
			2	0.46	0.46	
			3	0.46	0.46	
C	I	2	1	1.38	0.86	
			2	1.4	0.83	
			3	1.5	0.81	
		3	1	1.14	0.63	
			2	1.14	0.63	
			3	1.21	0.65	
	II	2	1	1.17	0.69	
			2	1.09	0.63	
			3	1.13	0.66	
		3	1	1.21	0.6	
			2	1.21	0.6	
			3	1.21	0.60	
	III	2	1	0.53	0.61	
			2	0.53	0.61	
			3	0.53	061	
		3	1	0.32	0.45	
			2	0.29	0.48	
			3	0.31	0.47	

Zone	측정 위치		측정 횟수	막장력 측정값(kgf/cm)		비고
				WARP	FILL	
D	I	2	1	0.97	0.78	
			2	0.96	0.73	
			3	1.03	0.75	
		3	1	1.17	0.69	
			2	1.13	0.71	
			3	1.13	0.71	
	II	2	1	1.09	0.44	
			2	1.09	0.44	
			3	1.09	0.44	
		3	1	1.13	0.54	
			2	1.14	0.51	
			3	1.04	0.56	
	III	2	1	0.57	0.53	
			2	0.57	0.53	
			3	0.57	0.53	
		3	1	0.42	0.42	
			2	0.40	0.43	
			3	0.37	0.59	
E	I	2	1	0.85	0.64	
			2	0.85	0.64	
			3	0.85	0.64	
		3	1	1.09	0.63	
			2	1.09	0.63	
			3	1.09	0.63	
	II	2	1	1.34	0.69	
			2	1.34	0.69	
			3	1.34	0.69	
		3	1	1.04	0.56	
			2	1.04	0.56	
			3	1.04	0.56	

Zone	측정 위치		측정 횟수	막장력 측정값(kgf/cm)		비고
				WARP	FILL	
E	III	2	1	0.5	0.5	
			2	0.5	0.5	
			3	0.48	0.51	
		3	1	0.64	0.64	
			2	0.64	0.64	
			3	0.64	0.64	
F	I -1	1	1	1.13	0.54	
			2	1.13	0.54	
			3	1.09	0.63	
		2	1	0.54	0.28	
			2	0.55	0.26	
			3	0.47	0.31	
		3	1	1.06	0.57	
			2	1.03	0.59	
			3	0.99	0.67	
		4	1	1.09	0.63	
			2	1.19	0.59	
			3	1.13	0.54	
	I -2	1	1	1.22	0.57	
			2	1.22	0.57	
			3	1.22	0.57	
		2	1	0.66	0.32	
			2	0.62	0.32	
			3	0.65	0.31	
		3	1	1.02	0.66	
			2	0.99	0.67	
			3	1.04	0.56	
		4	1	1.07	0.66	
			2	1.09	0.63	
			3	1.21	0.6	

Zone	측정 위치		측정 횟수	막장력 측정값(kgf/cm)		비고
				WARP	FILL	
F	II-1	1	1	1.03	0.59	
			2	0.99	0.67	
			3	0.99	0.67	
		3	1	1.04	0.56	
			2	1.03	0.59	
			3	1.04	0.56	
		4	1	0.8	0.49	
			2	0.67	0.59	
			3	0.78	0.54	
	II-2	1	1	0.92	0.43	
			2	0.92	0.43	
			3	0.94	0.38	
		3	1	1.04	0.56	
			2	1.09	0.44	
			3	1.04	0.56	
		4	1	0.83	0.43	
			2	0.71	0.48	
			3	0.71	0.48	
	III	1	1	1.28	0.45	
			2	1.24	0.47	
			3	1.24	0.47	
		3	1	0.61	0.53	
			2	0.61	0.53	
			3	0.62	0.51	
		4	1	0.36	0.42	
			2	0.31	0.44	
			3	0.24	0.45	

(라) 난지물재생센터 막장력 측정결과 검토

측정 대상 막구조물의 장력은 아치 정점부에 설치된 달대 볼트를 조여 콘을 위로 당김으로써 장력을 도입하는 시스템이다. 따라서 달대 볼트의 조임 길이가 확보되면 2차적으로 장력 재도입이 가능한 재인장 시스템을 갖추고 있다고 볼 수 있다.

제2처리장의 밑변 방향과 평행한 막재 섬유의 Warp 방향 장력은 대부분의 측점에서 막구조 설계기준 및 해설서의 권고 장력인 1kN/m(≒1kgf/cm)을 초과하거나, 약간 미달하는 장력이 도입되어 있는 것으로 확인되었다. 그러나 제1처리장의 Warp 방향 장력은 단 3곳을 제외하고는 모든 측점에서 권고 장력을 밑도는 것으로 측정되었다.

한편 밑변의 수선방향인 막재 섬유의 Fill 방향은 제1, 2처리장의 모든 측점에서 권고 장력의 50% 수준인 것으로 측정결과 확인되었다. 막재 섬유의 특성으로 인해 Warp 방향에 비해 Fill 방향의 신율이 큰데, 특히 콘형의 막구조물에서는 Fill 방향에서 응력완화 현상이 빈번히 발생하므로, 재인장 장치를 갖추는 것이 일반적이다. 해당 막구조물 또한 달대 볼트로 구성된 재인장 시스템을 갖추고 있으나, 13년이 경과되어 열화된 PVDF 막재를 재인장하는 것은 무리가 있다. 막재 섬유 자체의 열화뿐 아니라, 막재를 이어붙인 용접부의 열화로 박리강도를 견디지 못하고 박리될 가능성이 높기 때문이다.

막구조물은 섬유 축 2방향의 장력이 동일하게 도입되어 있을 때 가장 효율적으로 외부 하중에 저항할 수 있다. 해당 구조물의 Warp 방향 장력은 콘크리트 구조물에 알루미늄 홀더로 고정하고 있어 조정이 불가능하나, Fill 방향의 장력을 재인장 시스템을 갖추고 있어 장력 재도입이 가능하다고 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 막재 및 용접부의 열화로 인해 현재의 막 판넬을 유지하면서 권고 장력 이상으로 막장력을 관리하는 것은 어려울 것으로 판단된다.

현재 막구조물의 막재 리모델링 검토 작업이 서울시와 협의 중에 있다.

(15) 기존 막구조물의 장력 측정 결과에 대한 관리 기준 및 유지관리 방안

이 연구에서는 14개 동에 달하는 막구조물의 장력 측정을 수행해 결과를 수집함으로써, 현재 국내에 준공된 막구조물의 막장력 도입상태를 점검하였다. 각각의 막구조물은 다양한 막재로 지붕막을 구성하고 있어 하나의 일관된 의견으로 수렴하기는 어렵지만, 측정을 수행한 모든 막구조물에서 막재 섬유 2 방향 중 적어도 한 방향에서 '막구조 설계기준 및 해설'에서 제시한 초기장력을 하회하고 있는 것으로 확인되었다. 그 수치로는 적게는 10%에서 많게는 80%에 달하는 비율로 장력이 소실되어 있다.

현재의 막구조물에 대한 학문적 연구로는 막장력만으로 해당 구조물의 안부를 판단하기는 불가능하다. 다시 말해 막장력이 설계장력에 비해 80% 이상 소실되어 있다 하더라도 막재 판넬의 크기가 작다던가, 폰딩이 발생하기 어려운 큰 경사를 형성하고 있는 경우, 또 플러터링이 일어나더라도 그 변위 내에 상해를 입힐만한 부재가 존재하지 않을 경우에는 안전하게 존치되어 온 것이 사실이다.

그럼에도 불구하고 장력이 소실된 막구조물을 방치할 경우에는 막장력이 관리되어 온 구조물에 비해 파손 위험이 큰 것이 사실이다. 따라서 단순히 막장력만으로 안부를 판단하기 보다는 막구조물의 설계장력의 30% 이상 소실되었을 때에는 재인장 등으로 막장력을 설계장력으로 복귀시키는 것이 막구조물을 안전하게 관리할 수 있는 하나의 지표가 될 수 있다.

막장력을 복원시키기 위해서는 해당 막구조물에 재인장 시스템이 설계단계부터 도입되어

있어야 한다. 장력막의 경우에는 케이블 길이를 조절함으로써 도입장력을 조절할 수 있다. 또, 누름케이블로 막재의 한 방향에 2차 막장력을 도입하는 골조막 구조의 경우에는 누름케이블의 길이를 조절함으로써 비교적 간단히 막재의 한 방향 장력을 재도입할 수 있다. 그러나 막구조물은 막재 섬유 2 방향에 동일한 장력이 도입될 때 외부하중에 효과적으로 대응할 수 있다. 따라서 대형 막구조물에 자주 사용되는 골조막 구조형식의 경우에는 누름케이블과 평행한 방향의 장력도 필요에 따라 도입할 수 있는 재인장 시스템이 설계단계부터 고려되어야 할 것으로 판단된다.

(16) 기존 막구조물의 장력 측정 환경 및 과정

일반적으로 인력에 의한 막장력 측정은 맑은 날을 골라서 작업을 수행했다. 포터블 막장력 측정장치로 수행한 기존 막구조물의 장력 측정은 14개 동에 달해 이루어졌다. 이 모든 장력 측정은 막구조물의 막면 위 또는 아래에서 측정자가 측정장치를 손에 들고 지정된 측점에서 작업을 수행하게 된다. 대형 스타디움의 경우 막면 아래에서 측정하기 위해서는 100m의 팔을 가진 '스카이'를 타고 작업을 수행하게 되는데, 트랙으로 장비 진입이 어려울 뿐 아니라, 트랙 보호를 위해서도 꺼려해 가급적 막면 위에서의 작업을 선호한다.

대형 스타디움의 지붕막 구조물은 보통 지면에서 70m를 넘는 곳에 위치하므로 막면 위에서의 작업에는 환경의 영향을 많이 받는다. 즉, 막면이 젖어 있으면 막면으로의 진입 자체가 불가하고, 또 폭염 시에는 작업자의 안전을 위해서라도 작업을 중지하는 것이 관례이다.

따라서, 이 연구에서 수행한 14개 동의 막장력 측정은 모두 맑고, 작업하기 좋은 날을 골라서 작업했다. 통상 막의 장력은 햇볕의 영향을 받는 것으로 인식되고 있으나, 그 결과가 막의 장력을 조정해야 할 정도로 크지 않다고 판단하고 있다. 다만, 섬유를 사용하지 않고 화학물질로만 이루어진 ETFE막재의 경우에는 열의 영향을 크게 받아 여름철과 겨울철의 장력이 크게 차이나나, ETFE는 쿠션 구조를 주로 사용하므로, 이 연구에서 개발된 포터블 막장력 측정장치 및 헬스모니터링 시스템의 적용이 어려운 구조로 하고 있다.



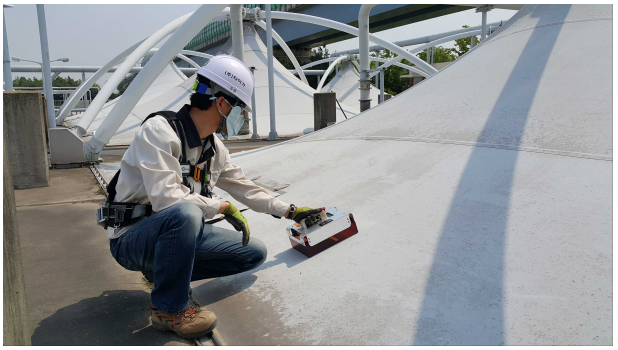


그림 2-2-3-93. 막면 상부에서의 장력 측정사진



그림 2-2-3-94. 막재 Warp 방향의 장력 측정

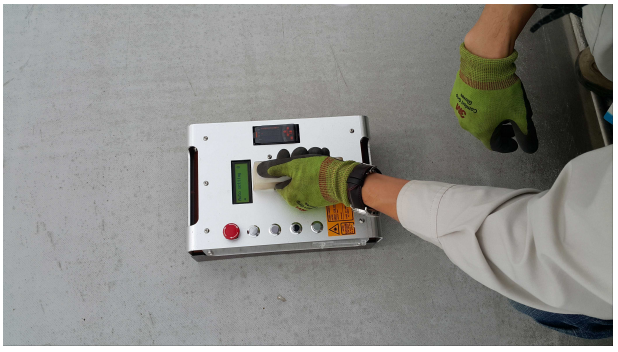


그림 2-2-3-95. 막재 Fill 방향의 장력 측정

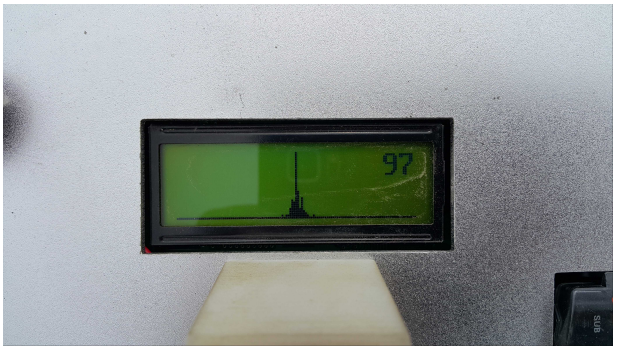


그림 2-2-3-96. 측정진동수



그림 2-2-3-97. 액정에 표시된 장력

나. 막구조물의 막장력 유지관리 기준/지침(안)

기존 막구조물의 장력측정과 육안검사 등을 바탕으로 막구조물의 막장력 유지관리 기준/지침(안)을 아래와 같이 작성했다.

(1) 막구조물의 유지관리

(가) 개요

이 유지관리 지침서는 적절한 장력을 도입함으로써 처음으로 눈이나 비와 같은 외부 하중에 저항할 수 있는 막재로 덮어 씌워 진 지붕 구조의 안전을 확보하고 구조물을 오래도록 건강하게 유지하기 위함을 그 목적으로 한다.

일상점검, 정기점검, 임시점검 등의 형태로 전문 시험장비 및 막 전문 인력을 보유하고 있는 업체에 주기적으로 점검을 의뢰해, 지붕막의 형성 요소인 막과 Cable의 장력뿐 아니라, 지붕막구조의 안전성과 내구성을 확보함으로써 자산으로서의 막구조물을 안전하고 건강하게 유지하기 위한 지침서로 활용한다.

(나) 유지관리 전문업체의 자격(권장사항)

지붕막 유지관리 전문업체는 막구조 및 그와 관련된 케이블을 비롯해 각종 접속 금구류의 정밀한 유지 및 관리가 가능한 기술력과 장비를 보유하고 있을 뿐 아니라, 지붕판금건축물 조립공사업 면허를 보유하고 있는 업체 또는 이와 같은 능력을 보유하고 있다고 해당 구조물의 관리사무소장이 인정한 업체로 선정한다. 또, 막의 제작과 설치 특성상 요구되는 정밀도 유지 등을 고려해, 사전 자격심사를 아래에 제시하는 사항을 포함시켜 공정하게 수행한 후, 이에 합격한 업체로 선정하여야 한다.

(2) 지붕막 구조물의 유지관리 지침(안)

(가) 점검의 목적

막구조물의 점검은 막재료 및 구조 상태를 가까이서 점검함으로써 보수나 막의 재시공 여부 및 그 시기를 관리자에게 보고해 적기에 대처할 수 있게 함으로써, 막구조물을 안전하게 이용할 수 있도록 하는데 그 목적이 있다. 막장력과 케이블 장력을 실측하여 준공 시 도입된 설계장력과 비교 검토한 후, 허용하는 오차 범위를 벗어날 경우, 즉시 장력을 재도입하는 등 필요한 조치를 취할 수 있도록 하여야 하며, 이를 가능케 하는 계측장비를 보유하고 능숙하게 조작 가능한 자가 해야 한다. 점검은 다음에 기술하는 방법으로 한다.

(나) 점검의 기본

유지관리 및 보수를 위한 막구조의 점검은 다음 항목을 토대로 연관된 세부사항을 점검한다. 세부 사항에 대해서는 정기점검에서 상세하게 다루도록 한다.

- 지붕막 본체 손상 확인
- 막재료 열화 확인
- 막장력 확인
- 막 정착부 확인

- 물빠짐부 확인
- 시설관리자로부터의 공청

(다) 점검의 종류

구분	점검내용	실시자
일상점검	일상적으로 구조물의 변형유무, 막체의 파손 등을 육안으로 점검한다.	시설관리자
정기점검	준공 후 3년째와 그 후 매 1년마다 막장력 측정을 포함하여 막구조 부분 등의 열화정도로 점검한다.	정기점검 전문가
임시점검	태풍이나 폭설, 지진 등의 천재지변 후, 또는 특별히 점검이 필요하다고 판단될 때, 막장력 측정을 포함하여 임시로 피해의 유무, 손상 정도를 점검한다.	정기점검 전문가

① 일상점검

건축물 소유주 또는 관리자가 건물의 유지 관리를 위해서 일상적으로 적당한 시기에 실시하는 것으로, 정해진 점검표에 따라 행한다. 점검결과 노화현상의 정도나 그 규모 또는 면적으로 보아 문제가 있다고 판단될 경우에는 임시점검을 실시한다. 일상 점검은 다음 사항에 유의하면서 그림 2-2-3-98의 점검표에 따라 실시한다.

■ 주의사항

1) 유지관리 책임자는 일상점검으로 막체 등에 이상이 없다는 사실을 확인하여야 한다.
2) 주요 점검항목으로는 막면의 상태, 막판넬 연결부의 누수나 변형여부, 막체손상 등이 있으며, 육안으로 관측한다.
3) 특히, 강풍이나 폭설 등에 폭로된 경우에는 반드시 이상 유무를 확인해야 한다.
4) 뚜렷한 변화나 이상이 관측된 경우에는 임시점검을 실시해야 한다.
5) 점검주기는 월 1회 이상으로 하며, 특이사항에 대해서는 정기점검 시 정밀점검을 실시한다.

② 정기점검

막의 노화로 인한 장력저하, 케이블의 장력저하 등의 구조적 강도에 대한 사항과 지붕 방수 및 마감 부분의 누수 등 비 구조적 사항을 모두 포함해 미리 정해진 주기에 따라 실시하는 정기적인 점검을 말한다.

정기점검의 점검 주기는 해당 건축물의 준공이 있은 3년 후에 실시하여야 하며, 그 이후에는 매 1년마다 실시하는 것을 기본으로 한다. 또, 막과 케이블의 장력 측정을 비롯해, 막재의 시편 시험과 같은 구조점검은 따로 실시해, 장력 측정 결과서와 보고서를 작성해 유지관리 책임자에게 제출해야 한다.

정기점검으로 이상이 있다고 판단된 경우는 정밀진단을 실시해야 하며, 진단결과에 따라 보수, 보강 등의 적절한 대책을 세워야 한다. 정기점검 시 요하는 검사항목과 방법 및 결과 보고서 작성은 '(바) 정기점검'을 따른다.

별지 서식 1 호

점 검 표

점검종	일상·정기·임시	대상구조물		점검일시	년 월 일
용어	GRADE Ⅰ : 특별한 지장 없음 GRADE Ⅱ : 다음 점검까지 주의 요함 GRADE Ⅲ : 진단 요함 ※ : 대책 요함			평점 1 : 영향 없음 평점 2 : 미세 평점 3 : 상당 평점 4 : 유해 평점 5 : 매우 큼	

점검항목		평점	GRADE	위치	최종판단 및 조치	
막구조부 전체	변형					
	주름					
	찢김 및 파단					
	초기장력 저하					
막재료	균열 및 마모					
	용접부의 박리					
	누수					
	곰팡이 및 오염					
정착부	클램프부의 녹, 변형, 손상 및 마모					
	개스킷 고무 열화					
	연결 금속구 열화					
케이블	녹,변형, 손상, 마모					
	연결금속물의 녹,변형 및 손상					
	케이블 프로텍터 마모					
	초기장력 저하					
막체배수구	우수 드레인 상부					
	우수 드레인 설치부					
	스커트 부					
	워터 디버터					
	배수구 청소					
열선	열선					
	스노우 스톱퍼					
아우터링 난간부						

그림 2-2-3-98. 지붕막 구조물 점검표

③ 임시점검

지역 특성이나 기후적 영향으로 막구조에 장해가 발생한 때, 혹은 태풍, 돌풍, 폭우, 폭설 등의 이상 기후나, 지진 등 천재지변과 화재, 강풍으로 인한 부유물의 비산에 의한 사고 등이 발생한 경우에는 임시점검을 실시한다. 임시점검 시 요하는 검사 항목과 방법, 진단 및 보고서 작성은 정기 점검을 따른다.

(라) 점검 실시체계와 점검행위자 설정

일상점검은 해당 건물주나 시설관리자가 자체적으로 시행할 수 있으나, 정기점검이나 임시점검의 경우에는 유지보수에 필요한 시험장비 및 기기를 보유하고 있어야 하므로, 막 유지관리 및 보수 전문업체를 선정하여 점검하는 것이 일반적이다. 자체적으로 점검하여 특이사항이 발견된 경우는 전문가에게 의뢰하여 다시 점검하거나 임시점검을 실시한다.

정기점검은 막구조물 전문가에게 의뢰하고, 임시점검은 정기점검 자격에 준하는 자로 구성해 정기점검 항목 및 사항에 맞게 시행해야 한다.

(마) 점검자의 안전사항

막구조물의 점검은 고소의 막면 위에 점검자가 올라가서 수행해야 하므로, 점검 전문가나 작업자의 안전에 각별히 주의해야 한다. 일반 건설현장에서 안전 상 요구되는 안전모와 안전화를 반드시 착용하여야 한다. 통상 막면은 PTFE 또는 PVC 코팅되어 미끄러우므로, 점검 책임자의 판단에 따라 안전화를 대신해 미끄럼 방지용 작업화를 착용할 수 있다. 또, 막구조물의 점검은 대체로 고소 작업을 동반하므로 안전그네의 착용을 의무화하고, 작업 시 낙상에 대비해 충분한 안전장치를 확보해야 한다. 더욱이, 대형 막구조물에 사용되는 PTFE 막재는 대부분 흰색이고, PVC 막재의 경우에는 다양한 색깔을 가지나, 빛을 반사시키므로 장시간의 작업이 예상될 때에는 햇볕을 차단해 줄 수 있는 보안경(선글라스)을 반드시 착용해야 한다. 점검 중에 비가 내릴 때에는 막면 위에서의 작업을 즉시 중단해야 하고, 비가 그친 후에도 빗물이 마르지 않아 막면에 남아 있을 때는 작업을 보류해야 한다.

(바) 정기점검

막구조물에 대해 실시하는 정기점검 대상이 되는 부위는 1) 막구조부 전체, 2) 막재료, 3) 정착부, 4) 케이블, 5) 막체 부분의 배수구, 6) 막장력 측정, 7) 케이블장력 8) 기타의 8분야로 분류할 수 있다. 이하 이들 각 항목의 점검 방법과 주의사항 등에 대해 상세히 기술한다.

(1) 막구조부 전체

막구조부 전체는 막면에 발생한 폰딩, 주름, 찢김, 파단 등, 주로 육안으로 이상 유무를 확인한다.

① 폰딩

폰딩은 막구조물의 장력이 소실되어 빗물이 한 곳에 고이는 현상으로, 막구조물을 파단으로 이르게 할 수 있는 위험한 현상이다. 폰딩은 보통 막면의 경사가 적고 편평한 부분이나 정착부 및 막장력이 소실된 부분에 발생하는 경우가 많다.

② 막면에 생긴 주름

주름의 발생은 막장력의 저하를 나타내는 현상 중 하나로, 발생한 부위나 주름의 방향 등을 상세히 관찰할 필요가 있다. 주름은 보통 막체의 정착부나 정점, 여러 막재가 겹치는 부분에 발생하는 경우가 많으므로 해당 부분을 주의해 관찰한다. 주름은 폰딩으로 발전할 가능성이 크므로, 특히 경사가 완만한 부분이나, 정착부 쪽의 주름의 굴곡이 심할 경우는 장력 재도입 등의 방법으로 주름을 제거해야 한다.

③ 찢김 및 파단

막면의 찢김은 비록 작은 것이라 할지라도 방치하면 태풍이나 적설 등으로 인해 확장되어 막면 전체를 파단으로 이르게 하는 등 중대한 문제를 일으킬 가능성이 있으므로 간과하지 않도록 주의해 관찰한다. 막면의 찢김이 발견된 경우에는 신속히 보수 등의 대책을 세워야한다.

(2) 막재료

막재료의 점검항목은 균열(전면 및 국소적) 및 마모, 코팅 및 용접부의 박리, 누수, 곰팡이 및 오염 등의 항목으로 정리된다. 검사 항목 중 균열, 마모, 용접부의 박리 등을 특히 주의해 점검한다.

① 균열 및 마모

막면의 균열이나 마모는 재료의 열화나 강도 저하 상황을 파악하기 위한 중요한 단서가 되므로, 손으로 만져 코팅재의 열화가 없는지 상세하게 확인한다. 또, 일반적으로 마모의 발생이 예측되는 부위는 막재가 케이블이나 보와 접촉해 있는 부분 등에 한정되므로, 이러한 부위를 주의 깊게 점검한다.

② 코팅층 및 용접부의 박리

코팅층이나 용접부의 박리는 누수를 포함해 다양한 트러블로 발전할 가능성이 있는 중요한 항목이므로 특히 주의해 관찰하고, 필요한 경우에는 플라스틱제 주걱 등을 이용해 용접부를 확인한다.

③ 곰팡이 및 오염

곰팡이나 오염물질은 막재의 코팅층을 변색시켜 미관을 해칠 뿐 아니라, 코팅재와 섬유를 마모시키는 역할도 한다. 따라서 곰팡이가 생긴 영역을 청소하고, 필요한 경우에는 막재 패치 용접이나 막 판넬의 부분 재시공 등의 방법으로 제거하도록 한다.

④ 막면 누수

누수는 상주자나 시설관리자를 취재해 누수 위치를 확보하고, 비가 오는 날을 택해 따로 점검하면 보다 정확한 점검이 가능하다. 누수가 광범위하게 확인된 경우에는 막 판넬을 재시공하는 등의 대책이 필요하다.

(3) 정착부

정착부는 막을 구조체에 정착시키기 위한 부분으로, 점검 항목으로 막면을 물어 당기는 클램프 부분의 금속물과 그 결합 요소인 볼트와 너트, 클램프 사이의 개스킷 고무 등의 고무류와 연결금속물 등이 있다. 정착부는 막구조물의 안정성에 깊이 관여하므로, 점검에 있어 특히 주의를 기울여야 한다.

① 막 클램프부의 녹, 변형, 손상 및 마모

막체를 물어 구조체에 정착시키기 위해 사용되는 금속 클램프는 보통 알루미늄으로 제작되어 녹이 생길 염려는 적지만, 클램프를 조이는 볼트와 너트는 철제를 사용하는 경우가 많으므로 녹 여부를 확인하고, 그 정도가 심할 경우에는 교체한다. 또, 클램프의 변형, 손상 또는 마모가 일어난 경우에도 그 부분을 교체한다.

② 개스킷 고무 열화

막과 클램프의 중간재인 개스킷은 고무재가 주로 사용된다. 이 부분에 열화가 일어나면 클램프가 느슨해져 막재를 안정적으로 고정하기 어렵게 된다. 고무는 대기에 노출되면 열화 정도가 다른 재료에 비해 빠르게 진행되는 재료이므로, 점검 시, 경화, 균열, 파손, 쵸킹[2] 등을 육안 또는 촉지로 확인한다.

③ 연결금속구의 열화

정착부에 사용되는 금속 부품의 종류는 다양하고 해당 건축물 고유의 사양으로 구성되어 있는 경우가 적지 않다. 따라서 정기점검 시에는 사전에 그 건축물에 사용된 막재료 등이 어떤 사양으로 정착 되었는지 충분히 확인해 둘 필요가 있다. 점검항목은 녹, 손상, 마모, 볼트의 조임 능력 저하 등이다.

(4) 케이블

케이블은 비교적 대형 막구조 건축물에 사용되는 경우가 많고, 도입장력도 큰 중요한 구조요소이다. 또, 막재료 자체에 비해 장력의 재도입이 비교적 용이한 점도 장점으로 꼽힌다. 점검 대상은 케이블 본체, 단말 금속구, 피복재로 크게 분류할 수 있다. 구체적 점검 항목으로는 케이블 본체의 녹, 손상, 마모, 단말 금속물의 녹, 손상, 마모, 초기 장력 저하(완화), 피복재의 균열, 손상 등이다.

① 녹, 변형, 손상 및 마모

무 피복재 케이블의 경우 비교적 쉽게 녹이나 변형을 육안으로 확인 할 수 있다. 녹은 제거하고, 오일이나 페인트 등으로 피복한다. 변형은 초기장력의 저하를 나타내는 중요한 단서가 되므로 간과하지 않도록 주의를 기울여 관찰한다. 손상이나 마모가 발생한 경우는 정밀 진단을 통해 교체 등의 계획을 수립해야 한다.

2) 고무의 열화로 인해 표면에 분말 상의 물질이 생기는 현상

② 연결 금속물의 녹, 변형 및 손상

케이블 이음재나 소켓, 단말 금속물은 케이블 장력을 본 구조체에 전달하는 중요한 역할을 하므로, 녹이나 변형, 손상 등이 발생하지 않도록 주의해 관리해야 한다.

③ 케이블 프로텍터 마모

케이블 프로텍터는 막체를 케이블에 고정시키기 위한 금속물이 케이블을 손상시키는 것을 막기 위해 케이블과 금속구 사이에 넣는 보완재로, 주로 고무재가 사용된다. 케이블 프로텍터는 케이블과 금속구 사이에 마찰을 유발시켜 금속구가 움직이지 못하게 하는 역할도 병행하므로, 손상, 마모 등에 특히 주의를 기울여 관찰한다.

④ 초기장력 저하

케이블의 장력 변화는 로드셀 등의 장비로 비교적 쉽게 관찰할 수 있다. 케이블의 초기장력 저하는 막구조 건축물 전체의 안전성에 매우 큰 영향을 미친다. 정기 점검 결과 '진단 필요'로 판정 받은 경우는 로드셀 장착 등의 방법으로 장력 측정을 실시하고, 장력 재도입 등의 필요성을 검토해야 한다. 케이블 장력 측정에 관한 상세는 (7) 케이블 장력에서 상세히 다룬다.

(5) 막체 배수구

막체 배수구는 빗물 등의 원활한 물 빠짐을 확보해 폰딩 유발을 방지하고, 불필요한 하중을 막체에 작용시키지 않게 하는 중요한 요소로, 유지관리를 위한 점검 항목으로서 매우 중요하다. 일반적으로 막의 상, 하부에 설치된 우수 드레인, 막체 패널의 고랑 부분(Gutter), 스커트 부분, 워터 디버터, 배수구 청소 상태 등을 점검한다.

① 우수 드레인 상부(막 상면: 스커트 부분)

빗물이나 눈이 녹은 물 등은 막체 배수구를 통해 빠르게 지면으로 배출되어야 하므로, 배수구 주변이 오염 또는 이물질로 덮여 있는지 여부를 점검해야 한다. 또, 배수구와 막체는 다른 성질의 재료가 접착되어 있어 빗물이 샐 여지가 많으므로 접착 부를 세밀하게 점검한다.

② 우수 드레인 설치부(막 하면)

막 상부 면에서 내려오는 빗물이 지면으로 원활히 빠져 나갈 수 있도록 막 하부(실내 측)의 우수 드레인 상태를 점검한다. 연결부가 이탈하거나, 빠져 있는 경우는 신속히 조치한다.

③ 스커트 부분(Gutter)

막 판넬이 연결되는 밸리(Valley) 부위는 이물질이나 오염 물질이 모이기 쉬운 장소로, 보통은 케이블이나 정착 금속물을 보호할 목적으로 같은 종의 막으로 덮어 씌워 놓는 경우가 많다. 이 막은 장력을 필요치 않으므로 주름이 있는 경우가 많고, 주 막면의 주름과는 다른 성격의 것이므로 크게 주의를 기울일 필요는 없다. 다만, 주름 부위에 오염물질이 고이게 되면 막을 부식시킬 수 있고, 결국은 케이블이나 정착 금속물의 부식으로 이어질 수 있으므로 청소상태를 점검 하고, 필요 시 청소하도록 한다.

④ 워터 디버터

워터 디버트는 빗물이 막체를 타고 다양한 각도에서 지면으로 떨어지지 않고 배수구로 모이도록 유도하는 장치로, 부식 여부와 이물질, 오염물질 등의 부착 여부를 점검한다. 특히, 워터 디버터와 막체와의 접착부 상태를 주의 깊게 관찰하고, 필요한 경우는 적절한 재료나 도구를 사용해 보수하도록 한다.

⑤ 배수구 청소

막체 배수구는 빗물 등의 원활한 물 빠짐을 확보해 폰딩 유발을 방지하고, 불필요한 하중을 막체에 작용시키지 않게 하는 중요한 요소이다. 배수구는 막체에 붙은 먼지나 오염 물질이 빗물과 함께 모여 드는 곳으로 보통 오염되어 있는 경우가 많으므로, 일상 점검 시를 비롯해 수시로 점검하고 이물질을 주기적으로 제거할 필요가 있다. 이물질이나 오염 물질을 제거하지 않으면, 국소 부위에 과다한 하중을 부가해 막구조체의 변형이나 폰딩을 유발 시킬 수 있다. 또, 배수구가 막혀 우수 드레인 이외의 곳으로 배수되는 경우가 발생하면, 대량의 물이 높은 지붕에서 한 번에 떨어지게 되므로 지면의 사람이나 사물에 타격을 가할 수 있다. 따라서, 배수구 청소는 점검 시 매우 중요한 점검 항목이 된다.

- 청소 작업 중 안전 사항

지붕 막 위에서 청소 작업을 진행할 때는, 막 청소를 위해 사용하는 비누성분으로 인해 매우 미끄러워 전도나 추락 등의 위험이 커지므로, 반드시 로프와 안전벨트, 신발 등 작업자의 안전을 보장할 수 있는 장비 설치 및 장착 확인 후 작업해야 한다.

- 청소방법: 국소 부위

지정된 세제를 바스켓에 물과 희석하여 부드러운 나일론 솔이나 걸레 등으로 청소해야 할 부위에 바른 후 건조되기 전에 다시 깨끗한 물이나 걸레로 헹구어 낸다.

- 청소방법: 대규모 부위

세제 용액을 대규모 청소 부위에 바를 수 있도록 브러시나 걸레 등을 끝에 달 수 있는 세차용 막대를 사용한다. 세제를 따뜻한 물로 희석해 청소 부위에 분사하고, 깨끗한 물로 헹구어 낼 수 있는 Washer를 사용하는 것이 적합하다. 다만, Washer를 이용해 세척할 경우는 분사압력이 너무 세거나 부주의로 막의 코팅이 벗겨지거나 찢어지지 않도록 주의해야 한다.

- 청소용 세제

막재 청소를 위해 사용하는 청소용 세제는 MEK Toluene이나 Home Cleaner 등을 병행해 사용 한다.

(6) 막장력 측정

① 개요

막은 장력이 도입되어 처음으로 구조재로서의 역할을 할 수 있는 재료이므로, 초기(설계)장력의 유지 여부가 막구조의 안전을 좌우한다고 해도 과언이 아니다. 따라서 막장력 측정은 유지관리의 가장 중요한 항목이 된다.

막장력을 측정할 수 있는 공인된 장치는 없으나, 일본 나고야 대학교의 최근 연구로 막장력

을 두 축 방향 각각으로 정량적이고 정확하게 측정할 수 있는 장치는 개발되어 있다[3]. 현재의 기준에는 어떤 장치로 측정해야 한다는 강제 사항을 두고 있지는 않으나, 성능이 검증된 장치로 측정하도록 한다.

② 측정 위치 및 방법

막 판넬에서 케이블이나 구조부재로 구획되어 막이 자유로이 진동할 수 있는 부분을 측정을 위한 기본 파트로 하고, 그 파트의 크기에 따라 1곳 이상을 측점으로 설정해 측정한다. 또, 한 측점에서 3회 측정하고, 모든 측점에서의 3회 측정값과 평균값, 표준편차를 측정시트에 기록해 정기점검 및 유지관리 보고서에 첨부해야 한다.

③ 초기장력 관리 기준(안)

막구조물의 초기형상 해석 시 필요한 초기장력은 막구조물의 구조형식, 하중, 변형, 시공 및 기타 요인들을 고려하여 결정한다. 막재에 도입하는 초기장력은 아래의 값을 포준으로 한다.

막재 A, B종(유리 섬유직포)	2 kN/m 이상
막재 C종(폴리에스테르계 섬유직포)	1 kN/m 이상

④ 준공 후 막장력 관리 기준(안)

준공 후 시간이 경과한 막구조물의 막장력은 해당 구조물의 설계장력을 기준으로 판단한다. 일반적으로 막구조물의 시공 시에는 막재의 완화가 충분히 진행된 후 설계장력을 유지하도록 시공 시 설계장력의 3할 정도를 할증해 장력을 도입하는 것이 보통이다. 준공 후 막장력은 설계장력을 상회하는 지 검토하고, 설계장력의 7할을 하회할 경우에는 재인장 등으로 설계장력을 복원시켜야 한다.

(7) 케이블 장력 측정

① 개요

케이블은 사용하는 장력이 크고 막구조뿐 아니라, 구조물 전체의 안정을 유지하는 중요한 구조 요소이다. 또, 막체에 비해 장력을 비교적 쉽고 정확하게 측정할 수 있고, 장력 재도입이 용이하므로, 케이블 장력의 정확한 유지관리를 통해 안전한 구조물로 유지될 수 있도록 해야 한다.

② 측정 위치 및 방법

케이블 장력은 대체로 케이블 단말 부에 로드셀을 장착해 그 변위량을 구함으로써 장력을 구해낸다. 장력이 완전히 이완된 상태에서는 값을 구해 낼 수 없으므로, 모니터링 시스템을 구축해 실시간으로 장력을 파악하는 것이 좋으나, 준공 시 설치가 되어 있지 않은 경우에는 장력 파악이 곤란하므로, 진동법 등의 다른 방법으로 측정하도록 한다. 가능한 한 모든 케이블을 측정 대상으로 한다. 측정점이 많을 경우에는 점검 책임자가 정하는 케이블로 선정해 측정할 수

3) 진상욱, 음파를 이용한 막구조물의 막장력 측정장치 개발, 나고야대학교 박사학위 논문, 2008. 3

있다. 측정값은 측정시트에 기록해 정기 점검 및 유지관리 보고서에 첨부해야 한다.

3절. 연구수행결과 및 검증

1. 연구수행 내용 및 결과

가. 연구개발결과 요약

구분	연구내용	연구결과
1차년	▪ 막장력 측정장치 개발 - 측정장치의 소형, 경량화 - 측정장치의 전자회로 및 전원 설계 - 데이터 무선 송수신 시스템 개발 - 실용화 검증	▪ 막장력을 높은 정확도와 안정성으로 현장에서 손쉽게 사용할 수 있는 소형, 경량화된 막장력 측정장치 개발 ▪ 측정장치 이외의 부속 장치를 통합하고, 태양열 또는 배터리 구동이 가능한 막장력 장치를 위한 전자회로 및 전원설계 ▪ 막장력 측정 데이터를 지상의 관제시스템에 실시간으로 보낼 수 있는 무선 송수신 기술 개발 및 장치에 탑재 ▪ 소형, 경량화 장치 개발과정에서 개량된 장치의 정확도 및 안정성 검증
	▪ 막장력 헬스모니터링 시스템 구축 - 막구조 및 일반구조물의 헬스모니터링 수법 조사 - 데이터 해석 및 축적 시스템 설계	▪ 막구조 및 일반구조물의 헬스모니터링 수법 조사 ▪ 측정한 막장력의 고유진동수 데이터를 해석해 막장력을 추출하고 해당 데이터를 축적하는 시스템 설계
	▪ 막장력 측정 및 헬스모니터링 최적 시스템 소프트웨어 개발 - 장력 산정 시스템 설계 - 헬스모니터링 소프트웨어 개발	▪ 막장력 측정장치 상의 액정화면에 측정 고유진동수를 변환하여 장력을 표시할 수 있는 시스템 설계 ▪ 상시 설치된 막장력 측정장치가 보내오는 측정신호를 분석하고, 이상 데이터를 캐치해 낼 수 있는 헬스모니터링 소프트웨어 개발
	▪ 막장력 유지관리 기준 작성 - 기존 및 시공 중인 막구조물의 장력 측정, 파악	▪ 기존 및 시공 중인 막구조물의 장력을 파악해 분석함으로써 유지관리 기준/지침(안) 작성을 위한 토대 마련

2차년	▪ 막장력 측정장치 개발 - 원격 리모트 컨트롤 시스템 설계 - 실용화 검증 및 개량	▪ 소형, 경량화 장치 개발과정에서 개량된 장치의 정확도 및 안정성 검증 및 개량 ▪ 원거리에서 막장력 측정장치를 미세 조정하는 등 컨트롤 할 수 있는 시스템 설계
	▪ 막장력 헬스모니터링 시스템 구축 - 막장력 측정 자동화 시스템 개발 - 막장력 측정 자동화 시스템 Mock-Up 테스트 - 막장력과 누름케이블 장력과의 상관관계 도출실험	▪ 막장력 측정 자동화 시스템 개발 ▪ 개발된 막장력 측정 자동화 시스템을 실험실 Mock-up을 통해 측정 성능 및 구동성능 검증 ▪ Mock-up 실험체를 이용해 막장력과 누름케이블 장력과의 상관관계 도출을 위한 실험 수행
	▪ 막장력 유지관리 기준 작성 - 기존 및 시공 중인 막구조물의 장력 측정, 파악	▪ 기존 및 시공 중인 막구조물의 장력을 파악해 분석함으로써 유지관리 기준/지침(안) 작성을 위한 토대 마련

3차년	▪ 포터블 막장력 측정장치 개발 - 실용화 검증 및 개량	▪ 소형, 경량화 장치 개발과정에서 개량된 장치의 정확도 및 안정성 검증 및 장치 개량
	▪ 막장력 헬스모니터링 시스템 구축 - 막장력 측정 자동화 시스템 현장 설치 시스템 개발 - 현장 시범 적용	▪ 막장력 측정 자동화 시스템을 기존 막구조물에 상시 설치할 수 있는 설치 시스템 개발 ▪ 자동화 시스템과 관제센터 서버와의 무선송수신 상태 점검 ▪ 막장력 헬스모니터링 시스템을 현장에 시범 설치
	▪ 막장력 유지관리 기준 작성 - 기존 및 시공 중인 막구조물의 장력 측정, 파악 - 막장력 유지관리 지침 및 기준 작성 - 막재 리모델링 등 시장 개척	▪ 기존 및 시공 중인 막구조물의 장력을 파악해 분석함으로써 유지관리 기준 작성의 토대 마련 ▪ 기존 및 시공 중인 막구조물의 장력 분석을 통해 막장력의 유지관리 지침 및 기준 작성 ▪ 유지관리 기준을 근거로 기존 막구조물의 성능평가를 행하고, 부적합 구조물은 리모델링 등의 조치

2. 목표성과 및 성과검증방법

(단계)	연차별 성과목표	성과지표	측정방법	목표치	가중치
1 (1단계)	측정장치의 소형, 경량화	90% 이상의 정확도	기존대비 정확도	95%이내	20%
		장치크기 20×30×20cm 이내	실측	99%이내	5%
		장치 중량 2.5kg 이내	실측	99%이내	5%
	측정장치의 전자회로 및 전원설계	마이크로컴퓨터 전자회로 설계	막장력 측정장치 정상작동 여부	95%이내	5%
		태양열 및 교류 1.5V 배터리 구동	막장력 측정장치 정상작동 여부	100%	5%
	실용화 검증	막 인장장치와 실제 막구조물의 장력측정을 통한 실험적, 반복적 검증과 기존 막장력 측정장치와 성능 및 실용성 비교	측정정확도 및 현장 사용성	95%이내	10%
	막구조 및 일반 구조물의 헬스모니터링 수법조사	전 세계 막구조 헬스모니터링 수법조사	문헌 조사량 및 분석 보고서	90%이내	5%
	데이터 해석 및 축적 시스템 설계	해석 및 축적 시스템 설계	실측 데이터 해석 및 축적 가능 여부	95%이내	10%
	장력 산정 시스템 설계	측정장치와 헬스모니터링 시스템 상의 장력 산정 설계	막장력 측정장치 정상작동 여부	95%이내	5%
	헬스모니터링 소프트웨어 개발	헬스모니터링 관제 시스템 구축	헬스모니터링 관제 시스템 정상작동 여부	95%이내	20%
	기존 및 시공 중인 막구조물의 장력파악	시공된 각종 막구조물의 장력 측정	막장력 측정 데이터 건수	85%이내	10%
	소 계				100%
	사업연계지표	시제품 제작`	시제품 제작 건수	3건	50%
		국외(SCI)논문	국외논문 투고건수	1건	30%
		국내논문	국내논문 투고건수	1건	20%
	소 계				100%

(단계)	연차별 성과목표	성과지표	측정방법	목표치	가중치
2 (2단계)	원격리모트 및 무선 송수신 기술개발	측정장치와 관제센터와의 데이터 송수신 기술 개발	시스템 정상작동 여부	95%이내	10
	실용화 검증	막 인장장치와 실제 막구조물의 장력측정을 통한 실험적 반복적 검증과 기존 막장력 측정장치와 성능 및 실용성 비교	측정정확도 및 현장 사용성	95%이내	10
	막장력측정장치의 막구조물 상시 설치 시스템 개발	상시 설치 시스템 개발	상시설치 시스템 완성 및 설치 가능 여부	90%이내	30
	원격리모트 시스템설계	막장력 측정장치 컨트롤 시스템 개발	관제 시스템 상의 막장력 측정장치 정상 컨트롤 여부	90%이내	20
	데이터 무선 송수신 소프트웨어 개발	측정장치와 관제센터와의 데이터 송수신 시스템 설계	관제센터와 측정장치의 데이터 송수신 가능 여부	90%이내	20
	기존 및 시공 중 막구조물의 장력 파악	기존 및 시공된 각종 막구조물의 장력 측정, 파악	막장력 측정 데이터 건수	85%이내	10
	소 계				100%
	사업연계지표	특허출원/등록	특허출원/등록 건수	1건	30
		시제품 제작	시제품 제작 건수	2건	50
		국내 논문	국내 논문 투고 건수	1건	20
	소 계				100%

(단계)	연차별 성과목표	성과지표	측정방법	목표치	가중치
3 (3단계)	실용화검증	막 인장장치와 실제 막구조물의 장력측정을 통한 실험적, 반복적 검증과 기존 막장력 측정장치와 성능 및 실용성 비교	측정정확도 및 현장 사용성	95%이내	20
	막장력 피드백 시스템 설계	피드백 시스템 설계	시스템 정상 작동 여부	90%이내	30
	기존 및 시공 중 막구조물의 장력 파악	시공된 각종 막구조물의 장력 측정	막장력 측정 데이터 건수	85%이내	10
	막장력 유지관리 기준/지침(안) 작성	막장력 유지관리 기준/지침(안) 작성	기준/지침(안)서 작성	90%이내	30
	막재 리모델링 등 시장 개척	구조물 장력진단 및 리모델링 구조물 수주	막재 리모델링 계약서	80%이내	10
	소 계				100%
	사업연계지표	시제품 제작	시제품 제작 건수	1건	20
		기준/지침(안)	기준/지침(안) 작성 건수	1건	20
		매뉴얼	매뉴얼 작성 건수	1건	20
		국외(SCI)논문	국외 논문 투고 건수	1건	20
		국내 논문	국내 논문 투고 건수	1건	20
	소 계				100%

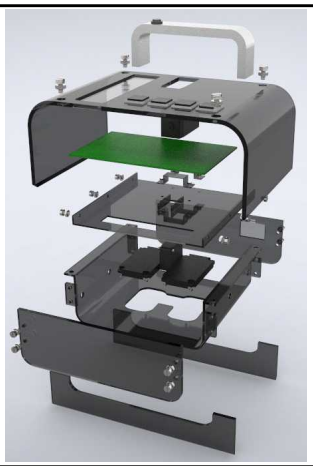
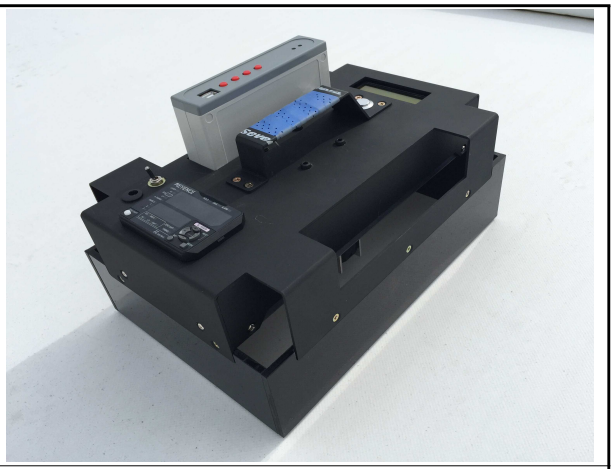
제3장 최종 연구성과 및 적용실적

1절. 개별 연구성과

연번	개별 연구성과	연구성과 설명	성과유형	성과달성 책임	연구기간
1	막장력 측정장치	막장력을 높은 정확도로 측정가능한 올인원 휴대형 막장력 측정장치	장비·장치	타이가	'12.11 ~ '15.07 (2년8개월)
2	막장력 헬스 모니터링 시스템 구축	막장력을 실시간으로 파악 가능한 모니터링 시스템 구축	시스템	타이가/ 한국건설 품질연구원	'12.11 ~ '15.09 (2년10개월)
3	막장력 유지관리 기준/지침(안) 작성	막장력의 효율적 유지관리를 위한 기준/지침(안)	정책·제도	타이가/ 한국건설 품질연구원	'12.11 ~ '15.11 (3년0개월)

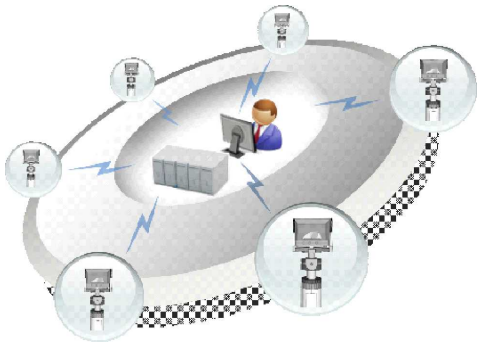
2절. 개별 연구성과 설명

1. 포터블 막장력 측정장치(장비・장치)

관련 그림 / 사진	 
정의	막 섬유 2축방향의 장력을 각각 높은 정확도를 갖고 안정적으로 측정할 수 있을 뿐 아니라 휴대가 가능한 세련된 막장력 측정장치
설정사유	기존 또는 시공 중인 막구조물의 막장력을 유지 관리할 수 있는 장치 확보
목적	• 음파를 이용해 90% 이상의 정확도로 막재섬유 2축 방향으로 측정가능한 장치 • 장치크기 20×30×20cm 이내이고 장치 중량 2.5kg 이내의 포터블 장치 • 마이크로컴퓨터 전자회로를 탑재해 막장력 산정이 가능한 올인원 장치 • 충전식 배터리로 구동되는 휴대형 장치 • 무선으로 데이터 송수신이 가능한 장치 • 원격으로 리모트 컨트롤 가능한 장치 • 인장장치와 기존 막구조물의 장력측정을 통한 실험적, 반복적 검증 및 개량 • 초보자도 손쉽게 사용가능 한 올인원 형태의 세련된 디자인 구현 • 기존 막구조물 및 시공 중인 막구조물의 막장력을 유지 관리할 수 있는 장치 확보

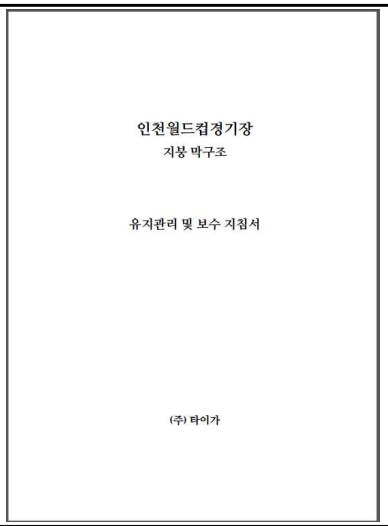
<table>
<tr><td colspan="2">성능목표</td><td colspan="7">(기존기술 수준)
• 막의 반력이나 혹은 진동을 이용하여 막장력을 유추하는 방법 존재
• 각각의 막재료마다 실험을 통해 샘플 데이터를 미리 확보해 놓아야 함
• 경험적 측정 영역을 벗어나지 못함
• 정확도나 안정성 및 실용성이 결여되어 측정장치로서의 기본 요구 조건을 충족시키지 못함
(개발기술 수준)
• 음파를 이용한 막장력 측정장치는 막재의 물리적 질량만으로 모든 막재에 확장가능
• 이론과 실험을 통한 오랜 연구로 구현된 과학적 도구
• 현장에서 사용되고 있는 모든 막재에서 90% 이상의 정확도 확보
• 측정자나 측정환경의 영향을 받지 않는 안정성 구비
(개발기술 수준 설정근거)
• 현재 막구조물 설계, 시공, 유지관리 현장에서 막장력을 정확하게 정량적으로 측정할 수 있는 효과적인 측정장치 없음</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과달성
책임자
(소속기관)</td><td colspan="7">진상욱(타이가)</td></tr>
<tr><td colspan="2">소요기간</td><td colspan="7">’12.11 ~ ’15.07(2년8개월)</td></tr>
<tr><td rowspan="7">핵
심
성
과</td><td rowspan="3">양적성과</td><td>연차</td><td>특허 출원</td><td>특허 등록</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td>1차년</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>국제학술발표 대회논문 1
국내학술발표 대회논문 1
시제품 3
우수발표논문상 1</td></tr>
<tr><td>2차년</td><td></td><td></td><td></td><td>1</td><td></td><td>국내학술발표 대회논문 1
사용 매뉴얼 1
시제품 2</td></tr>
<tr><td>3차년</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>SCI논문투고 1
국내학술발표 대회논문 1
시제품 2</td></tr>
<tr><td rowspan="3">질적성과</td><td>1차년</td><td colspan="6">• 측정장치의 소형, 경량화
• 측정장치의 전자회로 및 전원설계
• 장력 산정 시스템 설계
• 실험실 및 현장에서 측정정확도 및 현장 적용성 검증</td></tr>
<tr><td>2차년</td><td colspan="6">• 막장력 측정장치 개량, 개선
• 원격 리모트 및 무선 송수신 기술 개발
• 실험실 및 현장에서 측정정확도 및 현장 적용성 검증</td></tr>
<tr><td>3차년</td><td colspan="6">• 막장력 측정장치 개량, 개선
• 실험실 및 현장에서 측정정확도 및 현장 적용성 검증</td></tr>
<tr><td rowspan="3">달성
확인방법</td><td>1차년</td><td colspan="6">• 실험실 검증 데이터
• 기존 및 시공 중인 막구조물의 장력 측정</td></tr>
<tr><td>2차년</td><td colspan="6">• 실험실 검증 데이터
• 사용 매뉴얼 작성
• 기존 및 시공 중인 막구조물의 장력 측정</td></tr>
<tr><td>3차년</td><td colspan="6">• 실험실 검증 데이터
• 기존 및 시공 중인 막구조물의 장력 측정</td></tr>
</table>

2. 막장력 헬스모니터링 시스템(시스템)

<table>
<tr><td colspan="2">관련 그림 / 사진</td><td colspan="7">   </td></tr>
<tr><td colspan="2">정의</td><td colspan="7">음파를 이용한 막장력 측정장치를 막구조물에 상시 설치함으로써 막장력을 중앙 관제 센터에서 실시간으로 감시할 수 있는 시스템</td></tr>
<tr><td colspan="2">설정사유</td><td colspan="7">막장력 측정장치의 상시 설치로 막장력을 실시간으로 감시할 수 있는 시스템 구축 가능</td></tr>
<tr><td colspan="2">목적</td><td colspan="7">• 막구조물의 막장력을 실시간으로 파악하고 감시 가능한 모니터링 시스템
• 막구조 및 일반구조물의 헬스모니터링 수법조사로 본 연구의 위치 파악
• 막면 진동데이터 해석 및 축적 시스템 설계
• 막장력 측정 자동화 시스템 완성 및 Mock-up 테스트
• 막장력 측정 자동화 시스템 상시 설치 시스템 구축
• 막장력 피드백 시스템 설계
• 현장 시범 적용</td></tr>
<tr><td colspan="2">성능목표</td><td colspan="7">(기존기술 수준)
• 막장력을 실시간으로 모니터링할 수 있는 시스템은 전 세계적으로 전무
(개발기술 수준)
• 세계 최초의 막장력 헬스모니터링 시스템
(개발기술 수준 설정근거)
• 막장력을 실시간으로 모니터링할 수 있는 시스템은 전 세계적으로 전무</td></tr>
<tr><td colspan="2">성과달성 책임자 (소속기관)</td><td colspan="7">진상욱(타이가), 이성민(한국건설품질연구원),</td></tr>
<tr><td colspan="2">소요기간</td><td colspan="7">’12.11 ~ ’15.09(2년10개월)</td></tr>
<tr><td rowspan="5">핵심성과</td><td rowspan="3">양적성과</td><td>연차</td><td>특허 출원</td><td>특허 등록</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td>1차년</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>2차년</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>시제품 1</td></tr>
<tr><td>3차년</td><td>2</td><td></td><td>논문투고 1</td><td>논문투고 1</td><td></td><td>국제학술발표 대회논문 1
시제품 2
매뉴얼 1</td></tr>
<tr><td rowspan="2">질적성과</td><td>1차년</td><td colspan="6">• 막구조 및 일반구조물의 헬스모니터링 수법조사
• 막면 진동데이터 해석 및 축적 시스템 설계
• 헬스모니터링 소프트웨어 개발</td></tr>
<tr><td>2차년</td><td colspan="6">• 중계기 데이터 무선 송수신 시스템 개발
• 막장력 측정 자동화 시스템 개발
• 막장력 측정 자동화 시스템 Mock-up 테스트
• 막장력과 누름케이블 장력과의 상관관계 도출 실험</td></tr>
</table>

		3차년	• 막장력 자동화 시스템 오류 개선으로 완성도 향상 • 막장력 측정 자동화 시스템의 막구조물 상시설치 시스템 설계 • 자동화 시스템과 관제센터 서버와의 무선 송수신 상태 점검 • 현장 시범 적용
	달성 확인방법	1차년	• 보고서 • 시스템 구축, 정상작동 여부 • 현장적용
		2차년	• 보고서 • 시스템 구축, 정상작동 여부 • 현장적용
		3차년	• 보고서 • 시스템 구축, 정상작동 여부 • 사용 매뉴얼 작성 • 현장적용

3. 막장력 유지관리 기준/지침(안)(정책・제도)

<table>
<tr><td>관련 그림 / 사진</td><td colspan="7"> 
</td></tr>
<tr><td>정의</td><td colspan="7">기존 및 시공 중 또는 준공된 막구조물의 장력을 파악 및 분석함으로써, 막구조물 유지관리에 가장 중요한 도입장력을 체계적으로 유지, 관리할 수 있는 기준/지침(안) 제시</td></tr>
<tr><td>목적</td><td colspan="7">• 기존 및 시공 중인 막구조물의 막장력 측정을 통한 데이터베이스 구축
• 막구조물의 장력 도입 실태 파악
• 막장력 및 막구조물의 유지관리 기준/지침(안) 작성
• 유지관리 기준을 근거로 기존 막구조물의 성능평가 가능
• 막장력 측정장치 및 헬스모니터링 시스템으로 측정된 실재 장력이 설계장력에 적합한지 판별 후 부적합 판단 시에는 장력을 재도입하거나, 재도입 시스템이 설계되어 있지 않을 시 막재를 리모델링해야 하는 근거로 제시</td></tr>
<tr><td>성능목표</td><td colspan="7">(기존기술 수준)
• 한국공간구조학회에서 편찬한 ‘막구조 설계기준 및 해설’ 존재
• 기준에는 ‘시공 후 막의 인장 값이 설계치를 만족하는지 검사해야 한다.’고 명시
• 해설에서는 ‘지금까지 막의 인장을 정확하게 측정하는 기계는 국내외적으로 없고, 이 기준에서는 강제하지 않지만 경험에 의한 판단이 필요하다’고 해설
(개발기술 수준)
• 현재 막구조물의 장력을 바탕으로 한 유지관리 시스템에 관한 전문가는 국내외를 통 털어 주관총괄책임자가 유일
• 포터블 막장력 측정장치와 헬스모니터링 시스템은 전 세계에 전무
• 우리나라가 원천 기술을 확보
• 전 세계 막구조물의 막장력 유지관리 분야 선점
(개발기술 수준 설정근거)
• 현재 막구조물의 장력을 바탕으로 한 유지관리 시스템에 관한 전문가는 국내외를 통 털어 주관총괄책임자가 유일
• 포터블 막장력 측정장치와 헬스모니터링 시스템은 전 세계에 전무</td></tr>
<tr><td>성과달성 책임자 (소속기관)</td><td colspan="7">진상욱(타이가), 이성민(한국건설품질연구원)</td></tr>
<tr><td>소요기간</td><td colspan="7">’12.11 ~ ’15.11(3년0개월)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">핵심성</td><td>양적성과</td><td>연차</td><td>특허 출원</td><td>특허 등록</td><td>SCI 논문</td><td>비SCI논문</td><td>S/W</td><td>기타</td></tr>
<tr><td></td><td>1차년</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>국내학술발표 대회 논문 1
기술상수상 1</td></tr>
</table>

과		2차년						
		3차년						국내논문투고 1 기준/지침(안) 1
	질적성과	1차년	• 기존 및 시공 중인 막구조물의 장력 측정을 통한 데이터베이스 구축					
		2차년	• 기존 및 시공 중인 막구조물의 장력 측정을 통한 데이터베이스 구축					
		3차년	• 기존 및 시공 중인 막구조물의 장력 측정을 통한 데이터베이스 구축 • 막장력 유지관리 지침/기준(안) • 막재 리모델링 등 막구조물의 유지관리 시장 개척					
	달성 확인방법	1차년	• 기존 및 시공 중인 막구조물의 장력 측정					
		2차년	• 기존 및 시공 중인 막구조물의 장력 측정					
		3차년	• 기존 및 시공 중인 막구조물의 장력 측정 • 막구조물의 막장력 유지관리 기준/지침(안) 작성 • 막재 리모델링 수주(진행 중)					

3절. 주요 연구성과

1. 국내외 연구논문

가. 국외 학술저널논문(SCI)

구분	논문제목	학술지명	투고년월
1	Development of Membrane Stress Measurement Equipment for Membrane Structures: Evaluation of Added Mass of Membrane(Contributed)	IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement	2014.08

나. 국내 학술저널논문

구분	논문제목	학술지명	게재년월
1	화이트노이즈를 이용한 막장력 측정 장치의 소형·경량화 검증	한국공간구조학회지	2014.09

다. 국외 학술발표논문

구분	논문제목	학술회의 명칭	발표일
1	Practical Use of Membrane Stress Measurement Equipment through Its Downsizing	In Proc. IASS2013	2013.09
2	Maintenance of membrane structures through membrane tension measurement	In Proc. IASS2015	2014.09

라. 국내 학술발표논문

구분	논문제목	학술회의 명칭	발표일
1	음파를 이용한 막구조물의 장력 측정장치	한국공간구조학회	2013.05
2	음파를 이용한 막장력 측정장치의 실용화 검증	한국공간구조학회	2014.05
3	음파를 이용한 포터블 막장력 측정장치	한국공간구조학회	2015.05
4	막장력 측정을 통한 막구조물의 유지관리	한국구조물진단유지관리공학회	2015.10

2. 특허출원 및 등록

구분	특허명	출원/등록 구분	출원/등록 번호	출원/등록 국가	출원/등록 날짜
1	지붕막 재인장 장치	출원	10-2015-0006458	대한민국	2015.01.13
2	지붕막 재인장 장치	출원	10-2015-0006459	대한민국	2015.01.13

3. 시제품 제작

구분	시제품 명칭	제작일
1	포터블 막장력 측정장치	2013.05 2014.05 2015.03
2	막장력 측정 자동화 시스템	2014.05
3	막장력 헬스모니터링 시스템	2015.05

4. 사용 매뉴얼 작성

구분	사용 매뉴얼	작성일
1	막장력 측정장치 사용설명서	2013.05
2	막장력 측정 자동화 시스템 운용설명서	2015.09

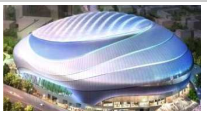
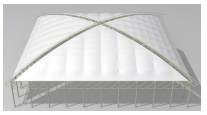
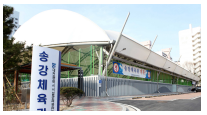
5. 기준/지침(안) 작성

구분	기준/지침(안)명	작성일
1	인천문학경기장 지붕 막구조 유지관리 및 보수 지침서	2014.12

6. 수상력

구분	수상명	수상일
1	한국공간구조학회 우수발표논문상	2013.05
2	한국구조물진단유지관리공학회 기술상	2015.10

4절. 기술실시 및 현장적용사례

구분	포터블 막장력 측정장치 적용 현장 명칭	현장사진	실시일
1	고척스카이돔		2013.05 2015.07
2	제주월드컵경기장		2013.11 2014.04 2014.11 2015.07
3	인천월드컵경기장		2014.03
4	진주종합경기장		2013.12
5	서울풍물시장		2013.12
6	상주야외음악당		2014.05
7	이천LG야구장		2014.05
8	울산복합화력 지붕막 구조물		2014.05
9	부산금정스포원 실내테니스장 지붕막 구조물		2014.05
10	대전송강테니스장		2013.11
11	일산고양종합운동장		2014.08
12	올림픽체조경기장		2014.10
13	올림픽핸드볼경기장		2014.10
14	난지물재생센터		2015.05

구분	막장력 헬스모니터링 시스템 적용 현장 명칭	현장사진	실시일
1	고척스카이돔		2015.09

5절. 기술개발 성과의 국내외 시장 전망

이 연구과제가 진행되기 전까지 막장력을 높은 정확도를 유지하고, 측정장치로서 필수 요소인 안정성을 가지며 현장에서 손쉽게 이용 가능한 공개된 국내 기술은 없었다. 그러나 막구조 설계 및 시공 회사는 시공 중 또는 일정 시간이 경과한 후에 반드시 막장력을 확인해야 하므로, 자체 개발한 검증되지 않은 장비를 사용해 대략적인 파악에 그치는 경우가 대부분이고, 숙련된 현장 기술자가 손으로 막면을 만지거나 두드려서 막의 팽팽함 정도를 경험이나 감에 의해 판단해 왔던 것이 현실이다.

한국공간구조학회에서 편찬한 막구조 설계기준 및 해설에는 막의 인장 검사나 막장력의 유지관리에 관하여, “시공 후에 막의 인장 값이 설계치를 만족하는지 검사해야 한다” 고 명시하고 있는데, 그 해설 부분에서는 “지금까지 막의 인장을 정확하게 측정하는 기계는 국·내외적으로 없고, 이 기준에서는 강제하지 않지만 경험에 의한 판단이 필요하다” 고 적시하고 있다.

이 해설 및 기준에서 나타내고 있듯이, 현재 막장력에 관한 전문가는 국내외를 통 털어 주관 총괄책임자가 유일할 뿐 아니라, 높은 정확도와 안정성을 확보하고 현장에서 손쉽게 사용할 수 있는 포터블 막장력 측정장치와 막장력 헬스모니터링 시스템은 국내는 물론이거니와 전 세계적으로 그 유래를 찾을 수 없는 획기적인 아이템이다. 따라서 이 연구과제 수행으로 인해 우리나라가 원천 기술을 확보함으로써 막구조물의 유지관리 분야를 선점할 수 있을 뿐 아니라, 국내 막구조 회사가 해외로 진출 할 수 있는 교두보를 마련할 수 있다.

한편, 해외의 막구조 시장은 크게 A종 항구막재인 PTFE와 최근 새로 등장한 신재료인 ETFE를 전문으로 설계 시공하는 업체로 나눠진다. 이 양대 산맥은 도쿄돔을 설계 시공한 일본계 기업인 마크막스(太陽工業)와 에덴프로젝트로 유명한 독일계 기업인 벡터포일텍(Vector foiltec)이 형성하고 있다. 최근은 마크막스 또한 ETFE의 설계와 시공을 수행한 사례가 보이지만, 실적 면에서나 시공된 구조물의 규모에서 벡터포일텍에 주도권을 내주고 있다.

국내외 막구조 시장은 막재가 가지는 채광성과 경량성의 특성뿐 아니라, 설계 및 시공기술의 개발로 매년 큰 폭으로 상승하고 있다. 특히, 지진이 많은 일본은 지진 하중을 줄이기 위해 지붕 중량을 줄이는데 집중하고 있는데, 피난시설로 이용되는 체육관의 지붕을 막재로 교체하는 작업이 추진되고 있으며, 지진 시 낙하 물에 의한 위험을 방지하기 위해 천장재로 이용되는 텍스를 막재로 교체하는 등의 시험이 진행되고 있는 등, 막구조의 가능성은 날로 증가하고 있다.

그럼에도 불구하고 앞서 설명했듯이, 막장력에 관한 전문 기술이 없어 설계장력이 시공 시에 정확히 도입되었는지의 파악이 어려운 상태고, 유지관리 또한 육안으로 확인하거나, 손으로 눌러보는 수지법이 이용되는 실정으로 국내와 크게 다르지 않다. 향후 막구조 시장의 성장과 더불어 정량적인 과학적 데이터에 근거한 구조물의 정성적인 성능평가에 대한 요구는 강화될 것이므로 포터블 막장력 측정장치와 막장력 헬스모니터링 시스템의 해외 시장 진출을 어렵지 않게 예상할 수 있다.

제4장 연구목표 달성 및 효과

1절. 연구개발 최종목표 달성도

1. 1차년 성과지표 달성도

			성과목표		성과지표		성과검증 기준				가중치	(평점1-5)
							목표치	달성치	측정방법	검증방법		
목표	1	포터블 막장력 측정장치 개발	1-1	측정장치의 소형, 경량화	①	90% 이상의 정확도	95% 이내	100 %	기존대비 정확도	보고서	20	
					②	장치크기 20×30×20cm 이내	99% 이내	100 %	실측	실측	5	
					③	장치 중량 2.5kg 이내	99% 이내	100 %	실측	실측	5	
			1-2	측정장치의 전자회로 및 전원 설계	①	마이크로컴퓨터 전자회로 설계	95% 이내	95%	막장력 측정장치 정상작동 여부	동영상	5	
					②	교류 1.5V 배터리 구동	100 %	100 %	막장력 측정장치 정상작동 여부	동영상	5	
			1-4	실용화 검증	①	막 인장장치와 실제 막구조물의 장력측정을 통한 실험적, 반복적 검증	95% 이내	95%	측정정확도 및 현장 사용성	실험실, 현장측정 보고서 및 현장시연 (서남권 야구장)	10	
	2	막장력 헬스 모니터링 시스템 구축	2-1	막구조 및 일반구조물의 헬스모니터링 수법 조사	①	전 세계 막구조 헬스모니터링 수법 조사	90% 이내	90%	문헌 조사량 및 분석 보고서	보고서	5	
			2-2	데이터 해석 및 축적 시스템 설계	①	해석 및 축적 시스템 설계	95% 이내	95%	실측 데이터 해석 및 축적 가능 여부	보고서	10	
	3	막장력측정 및 헬스 모니터링 최적시스템 소프트웨어 개발	3-1	장력 산정 시스템 설계	①	측정장치와 헬스모니터링 시스템 상의 장력 산정 설계	95% 이내	95%	막장력 측정장치 정상작동 여부	보고서	5	
			3-2	헬스모니터링 소프트웨어 개발	①	헬스모니터링 관제 시스템 구축	95% 이내	95%	헬스모니터링 관제 시스템 정상작동 여부	보고서	20	
	4	막장력 유지관리 기준/지침(안) 작성	4-1	기존 및 시공 중 막구조물의 장력파악	①	시공된 각종 막구조물의 장력 측정	80% 이내	80%	막장력 측정 데이터 건수	보고서	10	
		종합점수 = ∑ (성과별달성율×가중치)									100	

		성과지표	목표치	달성치	가중치	달성평점
목표	사업연계지표	시제품 제작	3건	3건	50	
		국외(SCI)논문 투고	1건	1건	30	
		국내논문 투고	1건	0건	20	
	종합점수 = ∑ (성과별달성율×가중치)				100	

2. 2차년 성과지표 달성도

			성과목표		성과지표		성과검증 기준				가중치	(평점1-5)
							목표치	달성치	측정방법	검증방법		
목표	1	포터벌 막장력 측정장치 개발	1-3	원격리모트 컨트롤 시스템 개발	①	측정장치와 관제센터와의 데이터 송수신 기술 개발	95% 이내	95%	시스템 정상작동 여부	보고서	10	
			1-4	실용화 검증	②	막 인장장치와 실제 막구조물의 장력측정을 통한 실험적, 반복적 검증	95% 이내	95%	측정정확도 및 현장 사용성	실험실, 현장측정 보고서 및 현장시연 (서남권 야구장)	20	
	2	막장력 헬스 모니터링 시스템 구축	2-3	막장력 측정장치의 막구조물 상시 설치 시스템 개발	①	상시설치 시스템 개발	90% 이내	90%	상시 설치 시스템 완성 및 설치 가능 여부	현장시연 (서남권 야구장) 및 보고서	30	
			2-5	막장력 측정장치의 막구조물 상시 설치 시스템 Mock-up	①	막장력 측정장치의 막구조물 상시 설치 시스템 Mock-up	80% 이내	80%	상시 설치 시스템 설치 가능 및 정상 작동 여부	보고서	20	
	3	막장력 유지관리 기준 작성	4-1	기존 및 시공 중 막구조물의 장력 파악	①	시공된 각종 막구조물의 장력 측정	80% 이내	80%	막장력 측정 데이터 건수	보고서	20	
	종합점수 = ∑ (성과별달성율×가중치)										100	

		성과지표	목표치	달성치	가중치	달성평점 (평점1-5)
양적 목표	사업연계지표	특허출원/등록	1건	2건	30	
		시제품 제작	2건	2건	50	
		국내 논문	1건	1건	20	
	종합점수 = ∑ (성과별달성율×가중치)				100	

3. 3차년 성과지표 달성도

			성과목표		성과지표		성과검증 기준				가중치	달성평점 (평점1-5)
							목표치	달성치	측정방법	검증방법		
목표	1	포터벌 막장력 측정장치 개발	1-4	실용화 검증	①	막재 인장장치와 실제 막구조물의 장력측정을 통한 실험적, 반복적 검증과 기존 막장력 측정장치와 성능 및 실용성 비교	95% 이내	95%	측정정확도 및 현장 사용성	실험실, 현장측정 보고서 및 현장시연 (서남권 야구장)	30	
	2	막장력 헬스 모니터링 시스템 구축	2-4	막장력 피드백 시스템 설계	①	피드백 시스템 설계	90% 이내	90%	시스템 정상 작동 여부	보고서	20	
	4	막장력 유지관리 기준 작성	4-1	기존 및 시공 중 막구조물의 장력 파악	①	시공된 각종 막구조물의 장력 측정	85% 이내	85%	막장력 측정 데이터 건수	보고서	25	
			4-2	막장력 유지관리 지침 및 기준 작성	①	막장력 유지관리 지침/기준 (안) 작성	90% 이내	90%	지침 및 기준서 작성	지침 및 기준서	20	
			4-3	막재 리모델링 등 시장 개척	①	구조물 장력 진단 및 리모델링 구조물 수주	70% 이내	35%	막재 리모델링 계약서	계약서	5	
	종합점수 = ∑ (성과별달성율×가중치)										100	

		성과지표	목표치	달성치	가중치	달성평점 (평점1-5)
양적 목표	사업연계지표	시제품	1건	1건	20	
		기준/지침(안)	1건	1건	20	
		매뉴얼	1건	1건	20	
		국외(SCI)논문 투고	1건	1건	20	
		국내 논문 투고	1건	1건	20	
	종합점수 = ∑ (성과별달성율×가중치)				100	

2절. 연구개발성과의 기술적 효과분석

1. 핵심성과물의 기술적 효과

이 연구개발로 완성된 포터블 막장력 측정장치는 막재료의 단위 면적당 질량 정보만으로 막재 섬유의 직교하는 두 방향 장력을 측정기의 디지털 표시 패널에 수치로 표시한다. 적용 주체는 항구 막구조물에 주로 이용되는 A종막이지만, B, C종을 비롯해 ETFE막 등, 다른 모든 막재의 장력 측정장치로 이용할 수 있다. 이는 B, C종 막재료로 구성된 실재 막구조물의 장력을 측정함으로써 검증을 마쳤다.

상기 ETFE 막재료는 기존의 PTFE 막재료가 구조물에 사용되어진 후, 투명성과 디자인성이 우수한 신재료로 시장에 등장했지만, 국내에서는 아직 시공 사례가 비교적 적은 새로운 막구조이다. 최근 일본에서는 사단법인 일본막구조협회가 주축이 되어 ETFE 막재료의 기준 고시를 진행시키고 있으며 보급을 위해서 활발히 활동하고 있다. 개발 장치가 두 겹의 필름을 겹쳐 그 속에 공기를 불어 넣어 만드는 쿠션 형태의 구조형식에 적용 가능한지 여부는 향후 검토해야 할 과제로 남아 있다.

그럼에도 불구하고, 이 연구로 개발된 막장력 측정장치의 등장은 ETFE와 같이 새로운 막구조물의 성능확보를 통해 그 보급에도 공헌할 수 있을 뿐 아니라, 향후의 사회적 요구에도 충분히 대응할 수 있는 확장성, 응용성을 가지고 있는 기술이라 말할 수 있다. 게다가, 막장력 헬스모니터링 시스템이 구축되면 해당 구조물의 라이프 사이클에 따라 장력의 모니터링이 가능해지므로 막구조의 유지관리 시스템 구축에도 크게 공헌할 수 있다. 이 시스템은 세계적으로도 처음 시도되는 만큼 우리나라가 세계 속에서 막구조의 유지관리 분야를 리드해 나갈 수 있는 원천 기술을 확보할 수 있게 될 것이다.

2. 기대성과 및 파급효과

연구개발로 완성된 포터블 막장력 측정장치의 등장은 항구 막구조물을 비롯하여 새로 등장한 ETFE 막구조물의 성능확보를 통해 보급에도 공헌할 수 있을 뿐 아니라, 향후의 사회적 요구에도 충분히 대응할 수 있는 확장성, 응용성을 가지고 있는 기술이라 말할 수 있다. 게다가, 이 측정장치에 탑재된 무선 데이터 통신기술과 원격 리모트 컨트롤 장치로 준공된 막구조물에 상시 설치할 수 있는 막장력 헬스모니터링 시스템은 해당 구조물의 라이프 사이클에 따라 장력의 건전성 모니터링이 가능해지므로 막구조의 유지관리 시스템 구축에도 크게 공헌할 수 있다. 이 시스템은 세계적으로도 처음 시도되는 만큼 우리나라가 세계 속에서 막구조의 유지관리 분야를 리드해 나갈 수 있는 원천 기술을 확보할 수 있을 것이다.

2002년과 2010년 태풍으로 인해 제주와 인천월드컵경기장의 지붕막이 파손되었다. 또, 2010년 말에는 미국 미네소타 주 미네아 폴리스시에 있는 공기막구조 다목적 스타디움인 '메트로돔'의 지붕막 일부가 과도한 적설로 인해 붕괴되는 사고도 있었다. 이들 막구조물은 건설시, 같은 규모로 시공된 스페이스 프레임구조의 약 6할의 공사비로 실현할 수 있었던 공간구조이지만, 이러한 사고가 일어나면 저비용 구조형식으로서 가지는 장점은 사라져 버린다. 막은 가볍고 실내가 밝아 에너지 부하를 줄일 수 있는 장점이 있어 대공간 스타디움 이외에도 학교 체육관이나

창고 등의 공간구조물을 실현하는데 매우 귀중한 구조형식이다. 이미 기술한 대로, 기존 기술의 추적을 용납하지 않는 신기술로 막구조물 헬스모니터링 시스템을 구축되어, 국내외를 불문하고 사회적 자산인 막구조물의 설계, 시공, 유지관리의 전 분야에 걸쳐 크게 공헌할 수 있고, 향후 막구조와 주변 기술에 활력을 불어 넣을 수 있을 것으로 기대된다. 그 결과로 지역사회 및 국민의 안심, 안전한 생활을 지원하고, 경제활동의 유지 및 추진에 공헌 할 수 있다고 확신한다.

3절. 연구개발성과의 경제적 효과분석

우리나라에서는 인천월드컵경기장으로 일반에 널리 알려진 막구조물은 본래 압축 또는 휨에 대해서는 저항할 수 없는 막재료를 적절한 인장상태로 유지함으로써 안정화되고 막구조물 전체가 눈이나 바람에 의한 하중에 견딜 수 있게 되는 구조물로써, 기본적으로 장력막, 골조막, 공기막의 세 가지 구조형식을 취한다. 항구 구조물로 우리나라에서 인정받고 있는 막구조물에는 주로 유리섬유로 짜인 직포에 테프론 수지로 코팅된 A종으로 분류되는 PTFE 막재료와, 코팅 수지 재료로 염화비닐을 이용한 B종 막재료가 이용된다. ETFE막은 투광성과 디자인성이 우수한 신재료로 최근 그 수요가 증가하고 있는 새로운 막구조이다. 국내에서도 서울 신청사에 사용되는 등 시장 전망이 밝은 재료이다.

국내외의 막구조물의 최근 동향은 대형 스타디움의 경우에는 여전히 A종 막재가 주로 사용되고, 국내 최초의 돔구장으로 시공되고 있는 고척스카이돔에도 적용되었다. 또, 투광성과 디자인성이 우수한 신재료로 최근 세계적으로 그 수요가 증가하고 있는 ETFE막은, 국내에서도 서울시 신청사와 대구 물문화관에 사용되는 등 시장이 성장해 나가는 과정에 있다. 건축외의 산업분야에서는 특히 해외에서 제철소의 저탄장이나, 쓰레기 매립장등의 대형 산업시설의 덮개로 사용되는 사례가 늘고 있다. 새로운 재료인 ETFE막을 비롯해 국내외 막구조 시장은 막재가 가지는 채광성과 경량성의 특성뿐 아니라, 설계 및 시공기술의 개발로 여전히 매년 큰 폭으로 상승하고 있다.

국내의 연간 막장력 측정 등의 막구조물의 유지관리 시장은 사회적 인식이 아직 확립되지 않아 아직 제대로 성장하지 못하고 있어 약 10억 원 안팎의 작은 규모를 형성하고 있다. 또, 막장력 헬스모니터링 시스템은 현재 전 세계적으로 전무한 상태로 시장 규모를 예측할 수 없으나, 일정 규모 이상의 면적을 가진 막구조물에는 의무 적용해야 한다면 그 시장 규모는 설치시장 규모만으로 수백억 원을 넘고, 유지 관리 시장까지 포함한다면 수천억의 시장을 형성할 수 있을 것으로 예상된다. 이를 해외로 확장하면 수조 원대 규모로 형성될 것으로 예상한다.

4절. 연구개발성과의 정책적 효과분석

막구조 설계 및 유지관리와 관련하여 국내의 현재 관계 법령은 한국공간구조학회에서 발행한 막구조 설계 기준 및 해설에서 막구조의 설계 기준을 제시하고 있으며 막장력 측정 및 유지관

리에 대한 내용은 특별히 마련되어 있지 않다. 2002년 월드컵을 기점으로 막구조를 적용한 여러 개의 경기장이 건설되었으나 태풍 등의 영향으로 막이 파손되는 경험을 하였고, 최근 강력한 태풍이 국내에 빈도 높게 상륙함에 따라 막구조물의 안전에 관한 사회적인 관심이 증대되었다. 따라서 이 연구과제 수행 결과물로 완성한 막구조물의 유지관리 기준/지침(안)이 막장력을 포함한 막구조물 유지관리 분야의 관계 법령 제정에 초석이 될 수 있을 것으로 판단된다.

제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

1절. 연구성과 향후 활용방안

현재 국내 막구조물의 시공 및 유지관리 시장에서 막장력을 높은 정확도로 측정할 수 있는 기술은 이 연구로 개발한 음파를 이용하는 방법이 유일하다. 막장력을 높은 정확도와 안정성으로 측정가능한 장치가 있고, 이를 막구조물에 상시 설치함으로써 막장력을 실시간으로 모니터링 할 수 있는 헬스모니터링 시스템이 완성되면 아래에 열거한 항목으로 활용가능하다.

막구조물 시공 시 도입되어야 할 장력을 정확히 계측할 수 있으므로 설계에 반영할 수 있다. 시공 완료된 막구조물의 막장력을 정확히 측정할 수 있으므로, 준공 후 시간 이력에 따른 막장력의 이완을 평가하고, 장력 재도입 및 막재 리모델링의 판단 기준 등 과학적 데이터에 의한 판단이 가능하다. 시공된 막구조물의 막장력을 실시간으로 헬스모니터링 할 수 있으므로, 호우나 태풍시의 막장력 추이, 변동 폭 등을 파악해 설계에 반영함으로써 각종 자연재해에 대처할 수 있는 재난예방 시스템으로 활용할 수 있다. 개발된 막장력 측정장치는 전 세계에 시공된 모든 막구조물의 과학적 막장력 유지관리 도구로 활용 가능하다. 구축된 막장력 헬스모니터링은 전 세계에 시공된 막구조물의 막장력을 실시간으로 정확하게 파악해 장력 도입상태를 알려 주는 헬스모니터링 시스템으로 활용 가능하다.

포터블 막장력 측정장치에 대한 요소기술은 이 연구과제의 연구책임자인 진상욱이 일본 나고야대학에서 10년에 걸쳐 이룩한 오리지널 기술로, 음파를 이용한 막장력 측정에 관한 기본 이론과 이론 검증을 위해 시험 제작한 초기 모델 등은 이미 13편의 논문으로 발표되어 학계에서 인정을 받았다. 따라서, 이 기술을 이용해 실현한 포터블 막장력 측정장치는 특허보다는 장치 인증기관의 인증을 통해 장비 사용성을 확대하고, 이 장치를 탑재한 막장력 헬스모니터링 시스템과 막장력의 재인장 장치에 관한 특허로 이 연구의 성과에 대한 지적재산권을 확보하고 자 한다.

2절. 연구성과 실용화 방안

이 연구로 개발된 첫 번째 결과물인 포터블 막장력 측정장치는 국내 5대 막구조 스타디움(서울돔구장, 서울월드컵경기장, 제주월드컵경기장, 진주종합운동장, 고양종합운동장)에 우선 적용해 막장력 유지관리 도구로 충분히 활용한다. 당해연차부터 현장 적용해 막장력 데이터를 수집하고 있으며, 현장 검증 과정에서 장비의 문제점 및 개선사항을 발견하고, 피드백 과정을 거쳐 세련된 디자인의 2세대 포터블 막장력 측정장치를 완성했다. 금후 실용화 및 제품화로 국내 반응을 검토하고, 요구사항 등의 피드백 과정을 거친 다음 해외 시판도 검토할 예정이다.

막장력 헬스모니터링 시스템은 국내 최초 돔형 막구조 스타디움인 서울돔구장 또는 현재 케이블 장력의 모니터링을 실시하고 있는 제주월드컵경기장에 시험 설치하고, 이 연구과제 종료 후 2~3년간의 데이터 취합 및 피드백 과정을 거쳐 문제점을 보완해 실용화할 계획이다. 막구조물의 장력 유지관리 기준이 마련되어 장력 파악에 대한 법적 근거가 마련되면 헬스모니터링 시스템 또한 제품화하고, 일정 면적 이상의 막구조물에 의무 설치함으로써 수익창출이 가능해

진다. 개선점 등을 찾아내고, 요구사항에 대한 피드백 과정이 완료되면 해외 시장에도 내 놓을 계획이다.

3절. 추가연구 필요성

1. 포터블 막장력 측정장치의 추가연구 필요성

이 연구개발로 높은 정확도와 안정성을 확보하면서 막재섬유 두 축 방향의 장력을 제 각각 정량적으로 측정할 수 있는 포터블 막장력 측정장치가 완성되었다. 막구조물은 섬유 두 축으로 짠 섬유를 코팅해 구성한 막재를 주재료로 사용하므로 막구조물은 막재에 적절한 인장력이 도입되어서야 비로소 안전한 구조재로 역할 수행한다. 따라서 막구조물은 시공 시 도입된 설계장력을 파악하고 꾸준히 관리하는 것이 가장 중요하다.

이 연구과제의 성공적 수행으로 휴대가 가능한 막장력 측정장치가 개발되어 있으나, 막구조물의 장력측정은 점검자가 측정장치를 휴대하고 지상 70m 상부에서 직접 수행해야 하므로 장력측정 및 점검이 인력에 의존하다 보니 매우 위험한 구간은 육안 또는 누락하는 경우가 다반사이다.

따라서 향후 막구조물의 막장력 측정이나 육안 점검 및 정기 점검에 있어서 인적 위험요소가 배재 가능하고 유지관리 효율성 증가시킬 수 있는 막장력 측정 및 점검 자동화 로봇 개발 등 후속 연구가 필요하다.

2. 막장력 헬스모니터링 시스템의 추가연구 필요성

인천월드컵경기장으로 일반에 널리 알려진 막구조물은 본래 압축 또는 휨에 대해서는 저항할 수 없는 막재료를 적절한 인장상태로 유지함으로써 안정화되고 막구조물 전체가 눈이나 바람에 의한 하중에 견딜 수 있게 되는 구조물이다. 따라서 막구조물의 시공 후, 점탄성 거동이 수렴된 후에 소요의 설계장력이 도입되었는지는 건전한 유지관리의 관점에서도 파악해 두어야 할 중요 사항이 된다. 그러나 20에서 30년의 내구연한을 경과한 막구조물은 응력완화로 인한 막장력의 소실이 일어나므로, 정기적인 장력 모니터링은 구조물의 건강상태를 파악하고 구조물을 안전하게 유지관리 할 수 있는 필수요건이 된다.

이 연구개발 과제의 연구범위는 막구조물에 막장력 자동화 시스템을 설치하고, 필요에 따라 막의 장력을 모니터링하는 시스템의 구축까지이다. 그러나 모니터링된 막의 장력이 설계장력이나 권고 장력의 몇 % 수준까지가 안전한 지, 또 안전 범위를 벗어났을 때는 어떠한 조치를 취해야 하는 지, 조치를 취하기 위해서는 설계 단계에서부터 어떠한 시스템을 동반해야 하는 지에 대한 고찰이 필요하다.

따라서 막장력 헬스모니터링 시스템을 대형 막구조 경기장으로 확대 적용하고, 이 결과물로 얻어지는 장력 모니터링 값을 해석, 분석함으로써 막구조물의 안전성에 관한 연구가 후속되어야 한다. 또, 막장력 헬스모니터링 시스템과 연계해 막의 장력을 조정하거나 재인장해야 할 필

요가 있는 경우에는 자동으로 쉽게 수행할 수 있는 재인장 시스템의 개발도 수행되어야 한다.

3. 막장력 유지관리 기준/지침(안)의 추가연구 필요성

우리나라에서 항구건축물로 인정받고 있는 막구조물에는 주로 유리섬유로 짠 직포에 테프론 수지로 코팅된 A종으로 분류되는 PTFE 막재료와, 코팅 수지 재료로 염화비닐을 이용한 B종 막재료가 이용된다. 국내외의 막구조물의 최근 동향은 대형 스타디움의 경우에는 A종 막재가 주로 사용되고 국내 최초의 돔구장으로 완공된 고척스카이돔(구 명칭: 서남권 돔구장)에도 적용되었다. 건축외의 산업분야에서는 특히 해외에서 제철소의 저탄장이나, 쓰레기 매립장등의 대형 산업시설의 덮개로 사용되는 사례가 늘고 있고 막구조물은 꾸준히 증가하고 있으나 아직껏 막구조물의 유지관리를 위한 지침이나 기준이 마련되어 있지 않은 상태이다. 또, 막구조물의 유지관리가 인적 위험요소를 내포하고 있어 장력측정이나 유지관리를 위한 점검이 체계적으로 이루어지지 않고 있는 실정이다.

지진이 많은 일본은 지붕 중량을 줄이는데 집중하고 있으며 피난시설로 이용되는 체육관의 지붕을 막재로 교체하는 작업이 추진되고 있는 중에 있다. 그러나 해외 또한 막장력에 관한 전문 기술이 없어 설계장력이 시공 시에 정확히 도입되었는지의 파악이 어려운 상태로, 유지관리에 있어 육안으로 확인하거나, 손으로 눌러보는 수지법이 이용되는 실정으로 국내와 크게 다르지 않다. 향후 막구조 시장의 성장과 더불어 정량적인 과학적 데이터에 근거한 구조물의 정성적인 성능평가에 대한 요구는 강화될 것으로 판단된다.

따라서 막구조물의 유지관리에 법적 강제력이 동원된 기준이 마련되어야 할 뿐 아니라, 이 연구과제에서 수행한 막장력 유지관리 기준/지침(안)을 바탕으로 막구조물 전체의 점검에 관한 세밀한 항목 분류와 점검 후 판단 기준 등을 마련할 수 있는 후속 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 막구조 설계기준 및 해설, (사)한국공간구조학회, 기문당, 2010
2. S. W. Jin and H. Ohmori, Development of measurement equipment of membrane stress for membrane structures, Research Report on Membrane Structures 2005 (in Japanese), No. 19, pp. 35-40, Feb., 2006
3. S. W. Jin and H. 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, Dec., 2006
4. S. W. Jin and H. 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, Feb., 2007
5. S. W. Jin and H. Ohmori, Development of measurement equipment of membrane stress for membrane structures using white noise sound wave, Research Report on Membrane Structures 2006 (in Japanese), No.20, pp. 65-70, Feb., 2007
6. S. W. Jin and H. 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, Dec., 2007
7. S. W. Jin and H. Ohmori, Development of measurement equipment of membrane stress for membrane structures using white noise sound wave: correspondence to difference of membrane materials and practical measurement of actual membrane structures, Research Report on Membrane Structures 2007 (in Japanese), No. 21, pp. 35-42, Feb., 2008
8. S. W. Jin, H. Ohmori and J. Y. Kim, Development of measurement equipment of membrane stress using white noise sound wave, Journal of the Korean Association for Spatial Structures (in English), Vol. 8, No. 2, pp. 63-72, Apr., 2008
9. S. W. Jin and H. Ohmori, Development of measurement equipment of membrane stress for practical use: downsizing, weight saving and improvement of adaptability for various stress level, Research Report on Membrane Structures 2008 (in Japanese), No. 22, pp. 39-46, Mar., 2009
10. S. W. Jin, H. Ohmori, J. Fujiwara, F. Takeda and T. 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, Jun., 2011
11. S. W. Jin and H. Ohmori, Development of membrane stress measurement equipment for membrane structures: proposal of measuring method and its experimental verification, Measurement Science and Technology (SCI), 22, 115704 (10pp), Sep., 2011
12. 膜構造研究レビュー2000, (社)日本膜構造協會調査·研究小委員會, (社)日本膜構造協會, 2000

부 록

성과물 증빙자료 목록

증빙 01 : 국내 학술지 게재 논문

- 화이트노이즈를 이용한 막장력 측정장치의 소형·경량화 검증

증빙 02 : 국제학술회의 발표논문

- Practical Use of Membrane Stress Measurement Equipment through Its Downsizing
- Maintenance of membrane structures through membrane tension measurement

증빙 03 : 국내학술회의 발표논문

- 음파를 이용한 막구조물의 장력 측정장치
- 음파를 이용한 막장력 측정장치의 실용화 검증
- 음파를 이용한 포터블 막장력 측정장치
- 막장력 측정을 통한 막구조물의 유지관리

증빙 04 : SCI급 학술지 투고논문

- Development of Membrane Stress Measurement Equipment for Membrane Structures: Evaluation of Added Mass of Membrane

증빙 05 : 국내 학술지 투고논문

- 막장력 측정을 통한 막구조물의 유지관리 시스템 검토

증빙 06 : 특허출원 (국내)

- 지붕막 재인장 장치
- 지붕막 재인장 장치

증빙 07 : 막구조물 유지관리 기준/지침(안)

- 인천문학경기장 지붕 막구조 유지관리 및 보수 지침서

증빙 08 : 막장력 측정장치 및 건전성 모니터링시스템 매뉴얼

- 막장력 측정장치 사용 매뉴얼
- 막장력 건전성 모니터링시스템 사용 매뉴얼

증빙 09 : 시제품 제작

- 최종보고서 참조

증빙 10 : 현장적용사례

- 최종보고서 참조

증빙 11 : 수상력

- 한국공간구조학회 우수발표논문상
- 한국구조물유지관리진단공학회 기술상

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.