리드스위치 센서와 무선주파수를 이용한 막재료의 손상 모니터링에 관한 연구

An Experimental Study on Monitoring Damages of Membrane Materials Using Lead Switch Sensors and Radio Frequency

김 동 현*
Kim, Dong-Hyun

김 태 곤**
Kim, Tae-Gon

석 창 목***
Suk, Chang-Mok

Abstract

PTEF membranes are used for roofing materials of membrane structures. PTEF is the abbreviation of Poly-tetra Fluotide-ethylene. These materials are consisted of fiberglass weave and polytetrafluoroethylene coating. Also, PTEF membranes have some problems of structural capacity by wind or snow load, etc. In this study, sensor housings using lead switches are bonding in PTFE membranes, Monitoring to changes tension and tear damages are studied using radio frequency. If tension is received on edged membranes, bonded lead switches of sensor housings will be destroyed by changes tension, and these become to send signals of damages at the connected radio frequency system with increased tension.

Study of these functional membrane materials will be contributed to prevent water leakage and long-term maintenance of membrane structures.

Keywords : Membrane Material, Lead Switch, Sensor Housing, Radio Frequency, Tensile Test

1. 서 론

막재료(Membrane Material)는 박람회 등과 같은 가설 구조물에 사용되어 왔지만 비약적인 대공간구조의 시스템 개발 및 발전 등으로 스포츠 시설이나 쇼핑센터 등의 지붕재료로 이용되고 있다. 막구조는 골조막 구조와 장력막 구조, 공기막 구조 등으로 구분되며 막재료적인 측면으로는 유리섬유 양면에 에틸렌 수지를 도포하고 불소수지를 코팅한 막재인

PTFE(Poly-tetra Fluotide-ethylene), 유리섬유에 염화비닐을 코팅한 재질로 방화성이 좋은 것이 특징인 Silicone-coated Fiberglass, 합성섬유에 염화비닐을 코팅한 재질로 방염 2품이며 내굴곡성 및 경계성이 우수한 Vinyl-coated Polyesters, 고장력 불소수지 폴리에스터 원사 표면을 절삭한 후 고주파 웰딩이나 필름을 이용한 응용접합을 한 PVF(Polyvinyl Fluoride), 인장력 및 파열강도가 높고 가공성이 좋고 가격이 저렴하여 중·소형 막구조에 많이 사용되는 PVDF(Polyvinyliden Fluoride) 등이 있다. 이들 재료 중 PTFE 막재는 인천 월드컵 경기장 등의 지붕재료로 사용되고 있다. 이러한 막재료에서 발생하는 손상은 대부분 풍하중(Wind Load) 및 적설하중(Snow Load)의 증가에 의한 막(Membrane) 및 케이블(Steel Cable)의 장력변화 등으로 발생하는 찢김현상 등이 대부분이다. 막재료에서 발생하는 이러한 손상을 검토하고 보수하기 위해 많은 노력과

* 정희원, 동양대학교 건축실내학과 강사, 공학박사
Dongyang University, Dept. of Architectural & Interior Design, Ph.D

** 교신저자, 경북전문대학교 건축인테리어과, 교수
Kyungbuk College, Architecture Interior, Professor
Tel: 054-630-5210 Fax: 054-630-5449
E-mail : kimteagon@hanmir.com

*** 정희원, 경북대학교 건축토목공학부 강사, 공학박사
Kyungpook National University, School of Architecture & Civil Eng., Ph.D

시간을 소비하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 막재료의 시공상 발생하는 막재료의 주름 및 적재하중(Live Load) 등의 증가로 발생하는 손상, 풍하중 등의 영향으로 발생하는 막재료의 장력변화를 검토하기 위한 무선 손상모니터링 시스템 개발을 구상하였다. 막재료에 외력이 작용하여 장력변화가 발생하면 이에 동작하는 센서하우징(Sensor Housing)을 제작 및 비교 검토를 하였고, 이를 주파수 변환방식(FDMA)의 발신기와 결합하여 막재료에 장력변화 및 할렬손상(Tear Damage)이 발생하면 이를 무선으로 손상신호를 전송하는 손상자현 무선시스템(Self-diagnostic Wireless System)에 대한 기초적 연구이다.

2. 연구 동향

센서를 이용한 막재료의 손상 모니터링에 관한 국내외 연구로 Frank J. Foley(2002)는 염화비닐 막재료의 자외선에 의한 노후와 우박의 영향에 대하여 연구하였으며, 막재료 패널에 가상 우박실험을 위해 얼음구를 제작하고 이를 일정 높이에서 자유낙하시킨 충격에너지를 이용하여 막재료에 발생한 손상에 대한 연구를 하였다.¹⁾ C. Galliot(2009)는 텐서닝 에어빔 시스템 구조(Tensioning Air Beam Structures)에서의 염화비닐로 코팅된 섬유 비선형 특성에 대해 연구하였다. 2축 인장실험과 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용한 수치해석으로 염화비닐로 코팅된 폴리에스터 막재의 직조와 전단거동에 대해 평가한 연구였다.²⁾

이승재(2010)는 초대형 막구조물의 지붕용 ETFE 필름에 대한 기초적 역학적 특성을 조사하기 위해 1축 인장시험법을 이용하여 막재 인장특성에 대해 연구하였다. 연구내용은 1축 인장시험을 이용하여 ETFE 필름 막재의 인장강도, 연신율, 영계수 등의 기초적 자료를 제공하는 것이었다.³⁾ 강주원(2011)은 인장 막구조물의 단축인장응력에 대해 연구하였다. 연구내용은 주름이 막재료를 시공하는 과정에서 발생하는 경우와 장기 편심하중 등의 영향으로 발생하는 경우 등에 대해 막재요소가 1축 응력상태가 되어 주름을 발생하는 과정과 이를 검토할 수 있는

방법에 대해 제안한 연구였다.⁴⁾ 오상근(2011)은 대공간 막구조물 지붕의 수밀성능 확보를 위한 유지관리 지표에 대해 연구하였다. 막구조물의 지붕 누수 방지 및 장기적인 내구성 확보를 위한 유지관리 기술의 정립을 위해 대공간 건축물 지붕에서 발생된 기존의 누수사례 및 요인을 분석하여, 막구조물의 유지관리 지표를 제안하는 연구였다.⁵⁾

따라서, 국내외 대부분의 연구는 1축 인장시험을 이용한 막재료의 인장응력에 대한 평가와 2축 인장시험을 이용한 전단응력에 대한 평가, 수치해석법을 이용한 막재료의 내력평가에 대한 내용이 주를 이루었으며, 직접적으로 센서를 막재료에 부착하여 장력변화에 따른 막재료의 손상 모니터링에 대한 연구는 미미한 것으로 나타났다.

3. 실험 모델

리드스위치 센서와 무선주파수를 이용하여 일정한 장력이 작용하고 있는 막재료에 외력 등의 발생으로 주름 및 손상이 발생하면 손상신호를 무선으로 전달해주는 기능성 막재료에 대해 구상하였다.

〈Fig. 1〉 Plans of tensile membrane specimens

막재료의 인장실험을 위해 크기가 30×200×0.6 mm인 건축용 막재를 재단하였으며 건축용 막재 양단에 인장력이 작용될 때, 막재의 변위(Displacement)

nt)차에 의해 리드스위치 센서가 동작하도록 하기 위해 캔틸레버(Cantilever), 45° 경사(Diagonal), 수직(Vertical) 형태의 센서하우징들을 제작하였다. 센서 하우징의 재료는 아크릴계(Acryloyl) 합성수지를 이용하였다. <Fig. 1>은 1축 인장 막재료 양단에 인장력이 작용하여 막재료의 변위가 일정이상 증가면 동작하는 기능성 막재료를 개발하기 위해 부착된 리드스위치(Lead Switch)와 3가지 형태의 센서하우징(Sensor Housing)들을 나타내고 있다.

〈Table 1〉 Sensor housings and materials

	Type of Sensor Housing	Housing Material
Sensor 1	Cantilever	Acryloyl
Sensor 2	Diagonal	Acryloyl
Sensor 3	Vertical	Acryloyl

〈Table 2〉 Size of sensor and material

	Length(mm)	Diameter(mm)	Housing Material
Lead Switch Sensor	9.64	1.72	Pyrex

〈Table 3〉 Size of FDMA transceiver

Type of RF Moudle	Size (mm)	Power (Volt)	Housing Material
Transceiver	250 X 160 X 40	DC 12	Acryloyl
Transmitter	50 X 45 X 10	DC 12	Acryloyl

〈Table 4〉 PTFE membrane

	Test Method	Unit	
Weight (+5%)	DIN EN 22286	g/m ²	1100
Thickness	DIN EN 22286	mm	0.6
Tensile Strength	BS 324 Part 4 Method 6 or DIN 53354	N/5cm	4800 X 3600
Tear Strength	BS 7304 Part 4	N	275 X 275
Transmissivity	ASTM E-424-71	%	19
Reflection	ASTM E-424-71	%	69
Color			White

<Table 1>은 1축 인장 막재료 시험체에 사용된 센서하우징의 종류 및 재료를 나타내며, <Table 2>는 센서하우징에 적용된 리드스위치 센서의 제원을

나타낸다. <Table 3>은 1축 인장 막시험에 이용된 FDMA 송수신기의 제원을 나타내고 있고, <Table 4>는 기능성 건축용 막재료의 실험을 위해 이용된 PTFE 막재료의 제원을 나타내고 있다.

〈Fig. 2〉 Lead switch sensors and PTFE membranes

<Fig. 2>는 PTFE 막재에 부착된 리드스위치 센서와 아크릴 센서하우징들을 나타내고 있다. 1축 인장 막시험체의 하단 1/4 지점에 부착된 Sensor 1 과 Sensor 2, Sensor 3을 부착하여 외력에 의해 막 시험체의 인장력이 증가하여 막재료의 변위(Displacement)가 증가하면 하우징 센서가 동작하여 건축용 막재료의 손상정보를 무선으로 전송하기 위해 FDMA(Frequency Division Multiple Access) 방식의 저가형 상용 송수신기를 사용하였다.

〈Fig. 3〉 FDMA transceiver for experiment

<Fig. 3>은 주파수 분할 방식의 송수신기를 나타

내고 있으며, 외력의 증가로 인하여 막재료의 변위가 증가하면 동작하는 형태를 나타내고 있다.

4. 해석 모델

1축 인장 막재료 시험체의 하단 1/4 지점에 부착된 Sensor 1과 Sensor 2, Sensor 3이 외력에 의해 인장력이 증가하여 막재료의 변위(Displacement)가 증가하면 3가지 형태인 센서하우징의 리드스위치 센서가 부착된 영역의 변위를 각각 검토하기 위해 범용 유한요소해석 프로그램인 Midas를 이용하였다.

〈Fig. 4〉 Analysis models of the finite element method

막재료 해석모델의 경계조건은 일단 고정과 타단 자유로 수직변위만 작용하도록 하였으며 인장하중 재하는 1kN씩 증가시켜 센서하우징이 부착되지 않은 경우와 각각의 센서하우징이 막재료에 부착된 경우들에 대한 변위를 비교하였다. 〈Fig. 4〉는 PTFE 막재에 Sensor 1, 2, 3을 부착하여 인장력을 작용시킨 수치해석 모델을 나타내고 있다. 수치해석 결과 Sensor 3이 부착된 PTFE 막재의 변위증가가 센서가 부착되지 않은 PTFE 막재와 유사한 것으로 나타났으며, Sensor 1, 2 순서로 변위가 증가하는 것으로 나타났다. 〈Fig. 5〉는 PTFE 막재에 부착된 센서의 종류에 따른 변위증가 비교를 나타내고 있다.

〈Fig. 5〉 Comparisons by shapes of sensor housings

5. 실험 결과 및 분석

5.1 종사와 횡사가 직교인 1축 인장 막재료

크기가 30×200×0.6mm인 1축 인장 막재료가 종사(Warp)와 횡사(Fill)의 방향이 직교인 인장시편에 Sensor 1, 2, 3을 부착하여 막재료 양단에 외력으로 인하여 인장력이 증가하면 센서하우징이 변형되고, 이에 부착되어 있는 리드스위치가 파괴되어 막재료의 변위증가 정보를 무선으로 전달하는 기능성 건축용 막재료를 구상하였다. 또한, 각각의 센서하우징 형태에 따른 동작 민감도(Sensitivity)에 대해서 비교 및 검토하였다.

〈Fig. 6〉 Tensile experiment of membrane

<Fig. 6>은 Sensor 1, 2, 3이 부착되지 않은 PTFE 건축용 막재의 인장시험을 나타내고 있다. <Fig. 7, 8, 9>는 1축 PTFE 인장 막재료에 Sensor 1, Sensor 2, Sensor 3을 부착하여 막재료의 양단에 인장력을 작용시켰을 때 막재료의 변형이 증가하여 센서하우징의 리드스위치가 파괴되어 막재료의 변위증가 정보를 무선으로 전송하는 기능성 막재료의 1축 인장 시험을 나타내고 있다.

<Fig. 7> Tensile experiment of sensor 1

<Fig. 8> Tensile experiment of sensor 2

1축 PTFE 인장 막재료에 Sensor 1을 부착하여 막재료의 양단에 인장력을 작용시킨 경우에는 막재료의 내력 50%에서 막재료의 변위증가에 의해 손상신호를 보내는 것으로 나타났다. <Fig. 10>은 Sensor 1을 이용한 막재료의 무선 손상신호 전송시험을 나타내고 있다.

<Fig. 9> Tensile experiment of sensor 3

<Fig. 10> Damage signal of sensor 1

Sensor 2를 부착하여 막재료의 양단에 인장력을 작용시킨 경우에는 막재료의 내력 70%에서 막재료의 변위증가에 의해 손상신호를 보내는 것으로 나타났다. <Fig. 11>은 Sensor 2를 이용한 막재료의 무선 손상신호 전송시험을 나타내고 있다. Sensor 3을 부착하여 막재료의 양단에 인장력을 작용시켰을 경우에는 막재료의 내력 30%에서 막재료의 변위증가에 의해 손상신호를 보내는 것으로 나타났다. <Fig. 12>는 Sensor 3을 이용한 막재료의 무선 손상신호 전송시험을 나타내고 있다.

실험결과 Sensor 3의 경우가 막재료에 센서를 부착하고 막재료의 양단에 인장력을 작용하여 무선 손상신호 전달시험을 한 결과에서 외력으로 인하여 막재료의 변위가 증가할 때 Sensor 1과 Sensor 2에

비해 먼저 손상신호를 무선으로 전달하는 것으로 나타나 아크릴을 이용한 센서하우징은 Sensor 3의 형태가 실험한 센서하우징들의 형태 중에서 민감한 것으로 나타났다.

〈Fig. 11〉 Damage signal of sensor 2

〈Fig. 12〉 Damage signal of sensor 3

5.2 종사와 횡사가 경사인 1축 인장 막재료

크기가 30×200×0.6mm인 1축 인장 막재료가 종사(Warp)와 횡사(Fill)의 방향이 경사인 인장시편에 Sensor 1, 2, 3을 각각 막재료에 부착하여 막재료 양단에 외력으로 인하여 인장력이 증가하면 센서하우징이 변형되면서 이에 부착되어 있는 리드 스위치가 파괴되어 변위증가 정보를 무선으로 전달하는 기능성 건축용 막재료를 구상하였다. 또한, 각각의 센서하우징 형태에 따른 동작 민감도(Sensiti-

vity)에 대해서 비교 및 검토하였다. 〈Fig. 13〉은 Sensor 1, 2, 3이 부착되지 않은 종사와 횡사가 경사인 PTFE 건축용 막재의 인장시험을 나타내고 있다.

〈Fig. 13〉 Membrane with diagonal directions of warp and fill

〈Fig. 14, 15, 16〉은 종사와 횡사가 경사인 1축 PTFE 인장 막재료에 Sensor 1, 2, 3을 각각 부착하여 막재료의 양단에 인장력을 작용시켰을 때 막재료의 변형이 증가하여 센서하우징 부근의 변위가 증가하면 리드스위치가 파괴되어 변위증가 정보를 무선으로 전송하는 기능성 막재료의 1축 인장시험을 나타내고 있다. 종사와 횡사가 경사인 1축 PTFE 인장 막재료에 Sensor 1을 부착하여 막재료의 양단에 인장력을 작용시켰을 경우에는 막재료의 내력 50%에서 막재료의 변위증가에 의해 손상신호를 보내는 것으로 나타났다. 〈Fig. 17〉은 Sensor 1을 이용한 종사와 횡사가 경사인 막재료의 무선 손상신호 전송시험을 나타내고 있다. Sensor 2를 부착하여 막재료의 양단에 인장력을 작용시킨 경우에는 막재료의 내력 60%에서 막재료의 변위증가에 의해 손상신호를 보내는 것으로 나타났다. 〈Fig. 18〉은 Sensor 2를 이용한 종사와 횡사가 경사인 막재료의 무선 손상신호 전송시험을 나타내고 있다. Sensor 3을 부착하여 막재료의 양단에 인장력을 작용시켰을 경우에는 막재료의 내력 30%에서 막재료의 변위증가에 의해 손상신호를 보내는 것으로 나타났다. 〈Fig. 19〉는 Sensor 3을 이용한 종사와 횡사가 경사인 막재료의 무선 손상신호 전송시험을 나타내고 있다.

〈Fig. 14〉 Tensile test using sensor 1 of membrane with diagonal directions of warp and fill

〈Fig. 17〉 Damage signal of sensor 1 in membrane with diagonal directions of warp and fill

〈Fig. 15〉 Tensile test using sensor 2 of membrane with diagonal directions of warp and fill

〈Fig. 18〉 Damage signal of sensor 2 in membrane with diagonal directions of warp and fill

〈Fig. 16〉 Tensile test using sensor 3 of membrane with diagonal directions of warp and fill

〈Fig. 19〉 Damage signal of sensor 3 in membrane with diagonal directions of warp and fill

실험결과 Sensor 3의 경우가 종사와 횡사가 경사인 막재료에 센서를 부착하고 막재료의 양단에 인장력을 작용하여 무선 손상신호 전달시험을 한 결과에서 외력으로 인하여 막재료의 변위가 증가할 때 Sensor 1과 Sensor 2에 비해 먼저 손상신호를 무선으로 전달하는 것으로 나타나 아크릴을 이용한 센서하우징은 Sensor 3의 형태가 실험한 센서하우징들의 형태 중에서 민감한 것으로 나타났다.

6. 결 론

리드스위치 센서와 무선주파수를 이용한 막재료의 손상 모니터링에 관한 연구에 대한 결론은 다음과 같다.

1) 리드스위치 센서와 무선주파수 시스템을 양단부에 인장력이 작용하는 막재료에 부착한 경우, 외력에 의해 막재료의 변위가 증가하면 막재료의 초기 변형 및 손상 등을 검토할 수 있는 것으로 사료된다.

2) 리드스위치 센서와 무선주파수 시스템을 이용한 PTFE 막재의 손상신호 전달에 대한 실험결과에서 Sensor 3이 막재료의 종사와 횡사가 직교인 경우와 경사인 경우에서 Sensor 1과 Sensor 2보다 먼저 손상신호를 전달하는 것으로 나타났으며, 이는 Sensor 3의 하우징 형태가 막재료의 수직변위증가에 민감하게 동작하는 형태인 것으로 나타났다.

3) 리드스위치 센서와 무선주파수를 이용한 막재료의 손상 모니터링의 추후 연구사항으로 2축 인장력이 작용하고 있는 막재에 대한 연구가 진행되어야 하며, 기타 막재료에 대한 적용성 실험으로 손상에 따른 신호발신대역에 대한 후속연구가 필요하다고 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2010년 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. [NRF-2010-359-D00024]

References

1. F. J. Foley, J. D. Koontz, J. K. Valaltis, "Aging and Hail Research of PVC Membranes", 12th International Roofing and Waterproofing Conference "Exploring Tomorrow's Technology Today"(Orlando, FL, Sept. 25-27, 2002), pp.1-25.
2. Galliot C, Luchsinger RH. Non-linear properties of PVC-coated fabrics used in Tensairity structures. ICCM 17, 17th International Conference on Composite Materials. Edinburgh, UK, 2009.
3. Lee Seung-Jae, Lee So-Ra, "Tensile Strength Characteristics of ETFE Roof Material in Large Membrane Structures", Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol.10, No.1, 2010, pp.51-58.
4. Kang Joo-Won, Kim Jae-Yeol, "A Study on Uniaxial Tensile Stress of Tensioned Membrane", Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol.11, No.3, 2011, pp.85-93.
5. Oh Sang-Keun, Kim Dong-Bum, Lee Sun-Gyu, "Technical Index for the Maintenance of Watertightness of the Roof of a Large-Span Membrane Structure", Journal of the Korea Institute of Building Construction, Vol.11, No.1, 2011, pp.51-59.
6. MATLAB(Version 6) Users Manual. The Mathworks, 2006.
7. Emmanuel C. Ifeakor, Barrie W. Jarvis, "Digital Signal Processing", Prentice Hall, 2002, pp.317-341.
8. EH.L.KWOK, "Electronic Materials", THOMSON, 1997, pp.158-173.
9. Vinay K. Ingle, John G. Proakis, "Digital Signal Processing using MATLAB", Brooks/Cole Thomson Learning, 2000, pp.183-208.

(접 수 일 자 : 2013년 10월 25일)

(심사완료일자 : 2013년 11월 22일)

(게재확정일자 : 2013년 11월 27일)