

폴리에스터 막재의 역학적 특성에 관한 기초시험

Basic Test on the Mechanical Characteristics of Polyester Membrane

박강근*
Park Kang-Geun

윤승현**
Yoon, Seoung-Hyun

이장복***
Lee, Jang-Bok

요약

막 구조는 자유로운 형태, 경량성, 내구성, 햇빛 투광성 및 균질성 때문에 전 세계적으로 현대 건축물에 다양하게 사용되어 왔다. 새로운 막 재료의 개발로 새로운 건축 구조설계에 대한 가능성을 열어가고 있다. 최근 주로 사용되는 막 구조의 지붕 재료에는 PVC, PVF, PVDF, PTFE 코팅 막재 및 ETFE 막재가 주로 사용되고 있다. 건축용 막은 내화성, 강도 부족, 인열강도, 내구성 및 탄성 등에 대한 몇 가지 문제점들을 가지고 있다. 이러한 문제점들을 평가하기 위해서 본 연구에서는 PVDF 코팅 폴리에스터 막재에 대한 인장강도, 인열강도 및 반복하중거동 시험을 실시하여 건축용 막재의 기초적인 역학적 특성을 분석하고자 한다. 막재의 탄성계수는 $337.30\sim 1257.63\text{N/mm}^2$, 신율은 $17.90\sim 26.91\%$ 로 주어졌다.

Abstract

Membrane structures are now used in various ways throughout the world with the merits of free shape, lightness, durability, sunlight transmittance and homogeneous material. The development of new membrane material opened up new possibility for the design of new building structures. Recently it was mainly used PVC, PVF, PVDF, PTFE, ETFE membrane for using the roofing material of membrane structures. Some problems of architectural membrane have fire proofing, lack of strength, tear resistance, durability and elasticity. For the estimation of this problems, it will be tested the basic mechanical properties of membrane material about tensile strength, tearing resistance and repeated loading behavior. Elastic modulus is $337.30\sim 1257.63\text{N/mm}^2$, and strain is $17.90\sim 26.91\%$.

키워드 : 막 구조, 역학적 성질, 인장강도, 인열강도, 반복하중거동

Keywords : Membrane structures, Mechanical properties, Tensile strength, Tearing strength, Repeated loading behavior

1. 서론

건축용 막재는 현재 전 세계적으로 다양하게 사용되어 건축재료와 형태 디자인적인 면에서 자유로운 형태를 추구하는 새로운 건축세계를 열어가고 있다. 최근에는 건축용 막재료가 합성섬유나 유리섬유로 만들어 지기 때문에 역학적 성능이 우수한 소재들이 개발되어 왔고,

PVDF 코팅 폴리에스터 섬유 막재, PTFE 코팅 유리섬유 막재가 전 세계적으로 대공간 구조물의 지붕재료로 많이 사용되어 왔다.¹⁾ 최근에는 중국 북경 올림픽 주경기장 및 수영장의 지붕 재료로 투명하며 햇빛 투광성이 우수한 ETFE 막재를 사용하여 조명을 이용한 야경의 화려한 새로운 건축적 이미지를 창조하기도 하였다. 이러한 건축용 막재가 경기장이나 특수시설물의 대공간 지붕에 많이 사용되어 왔지만 막재가 가지는 역학적 특성 때문에 태풍이나 적설하중에 의해서 막재가 파손되는 일들이 발생하고 있다.³⁻⁵⁾ 본 연구에서는 국내에서 생산되는 PVDF 폴리에스터 코팅 막재에 대한 인장강도, 인열

* 정희원 · 부산대학교 산업건축과 교수, 공학박사

** 정희원 · 부산대학교 산업건축과 교수

Tel: 055-350-5344 Fax:055-350-5349

E-mail : samysh@pusan.or.kr

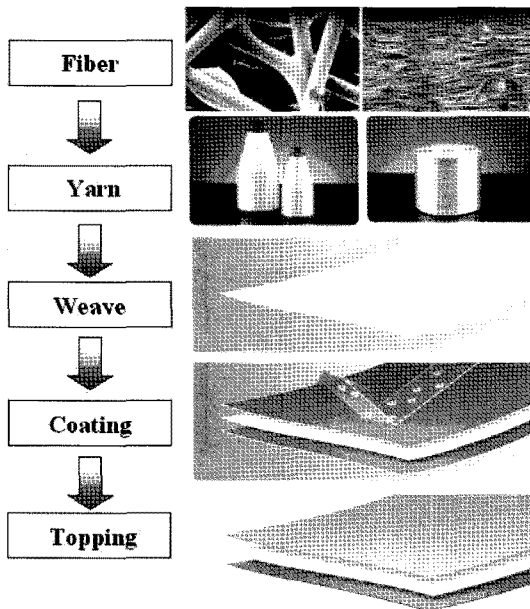
*** 정희원 · (주)동아스트 대표이사, 공학박사

강도 및 반복하중 시험을 수행하여, 폴리에스터 막재에 대한 역학적 성능에 대한 기초적 특성을 분석하고자 한다.

2. 건축 구조용 막재

2.1 막재의 구성

막 구조물의 지붕 구조를 덮기 위해서 많이 사용되는 주재료는 건축 구조용 막재(architectural fabric)이다. 막재 내구성능의 차이는 직포의 종류와 더불어 코팅(coating) 및 토핑(topping)재료에 따라 다르다. 이러한 차이는 막 구조물의 공사금액에 많은 영향을 미치게 되므로 구조물의 사용목적, 규모, 장소 등에 따라 적절한 막재가 선택이 되어져야 경제적인 설계가 될 수 있다.³⁾

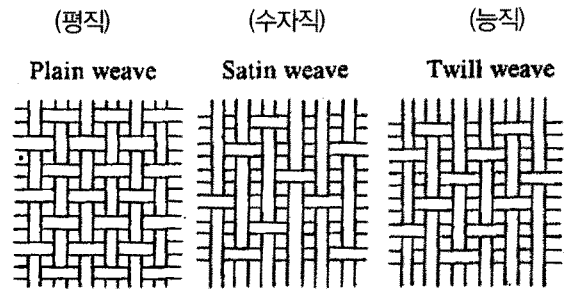


〈그림 1〉 막재의 구성

막재의 구성은 〈그림 1〉과 같이 기본적으로 직포와 코팅재로 구분된다. 구성요소들 중에서 막재의 인장강도는 직포에 의해 대부분 결정되며 코팅재와 토핑재는 자외선과 오염 등의 외부 환경요인으로부터 직포를 보호하는 역할을 한다. 토핑은 PVC 계열의 막재에서 필요하며 테프론 막재에서는 사용하지 않는다. 이와 같이 막재의 물리적인 성능을 유지시키기 위한 코팅재의 선택과 직포의

종류에 따라 다양한 막재가 만들어 진다. 막재의 생산과정을 살펴보면, 아래와 같이 섬유생산에서 토핑까지의 많은 단계를 거치게 된다.³⁾

주로 건축용 막재에 사용되는 섬유는 폴리에스터(polyester)와 유리섬유(glass fiber)이다. 이러한 섬유를 꼬아서 만든 것이 실이 되며 실을 이용하여 옷감을 만드는 방법과 동일하게 종사와 횡사로 배치하면 직포가 되는 것이다. 실을 배치하는 방법에 따라서도 〈그림 2〉과 같이 평직, 수자직, 능직 등의 방법이 있으나 구조용 막재는 양방향의 인장강도를 비슷하게 하기 위해 평직을 주로 사용한다.³⁾



〈그림 2〉 직포의 구성방법

막재의 조합은 직포와 코팅재 및 토핑재의 결합으로 구성되며 주로 사용되는 종류는 〈표 1〉과 같다. 막재의 인장강도는 섬유의 굵기가 작은 것을 여러 가닥으로 꼬아 만드는 것이 좋기 때문에 유리섬유를 사용할 경우 β-yarn을 이용하는 막재가 구조적으로 유리하며 폴리에스터 섬유의 경우도 최소 1000 데니아(denier) 이상의 가는 섬유를 이용하는 것이 좋다.³⁾

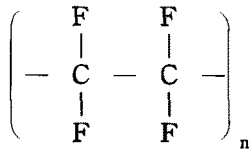
〈표 1〉 막재의 구성재료

직포	코팅재	토핑재
- 유리	- 4불화에틸렌 수지 (PTFE, A종) - 실리콘 (A종) - 폴리염화비닐(PVC, B종)	
- 폴리에스터 - 폴리아라미드	- 폴리염화비닐(PVC, C종) - 크로로 플렌고무 (C종)	- 아크릴 - PVDF - PVF

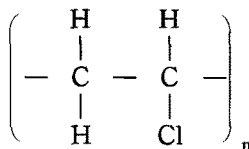
2.2 코팅재 및 토핑재의 화학적 특성

코팅재 및 토핑재의 화학적 특성은 막재의 인장강도에 직접적인 영향을 주지 않지만, 직포를 보호하여 강도를 장기간 보존하기 위한 재료이므로 막재의 수명에 많은 영향을 미치게 된다. 사용 막재의 화학적 특성을 분석하면 다음과 같다.³⁾

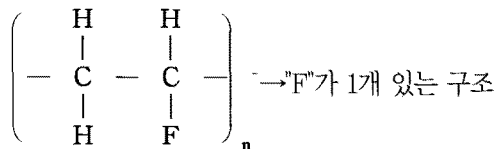
(1)PTFE(Poly Tetra Fluoro Ehtylene, 4염화불소)



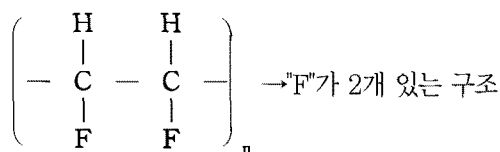
(2)PVC (Poly Vinyl Chloride, 염화비닐)



(3)PVF (Poly Vinyl Fluoride)



(4)PVDF (Poly Vinyl Deneffluoride)



유리섬유 막재의 코팅에 주로 사용하는 PTFE는 불활성 재료로서 가장 화학적 결합력이 강하여 염기나 자외선에 오랫동안 견딜 수 있기 때문에 막재의 수명이 가장 길다. PVC 코팅은 화학적 결합력이 약하기 때문에 불소가 포함된 PVDF나 PVF로 토핑을 하여 막재의 수명을 연장하여야 한다. 막재의 토핑방법에 있어 PVF는 필름의 형태로 접합(laminate)하지만 PVDF는 수지형태의 액상 방법으로 처리한다. 따라서, 자정능력은 물론 막재의 수명은 PVF로 토핑 처리한 막재가 PVDF 막재에 비해 우수하다.³⁾

3. 폴리에스터 막의 역학적 특성 시험

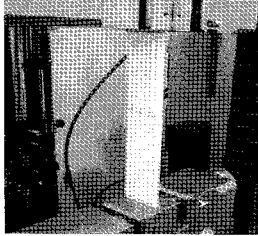
3.1 인장강도 시험

막재의 물리적 특성을 분석하기 위해서는 역학적 작용 및 특성, 화학적 작용, 생물학적 작용, 열저항 및 성질, 내후성, 물 흡수 및 수압, 음향특성, 광학 시험 등에 관한 시험 등이 필요하다고 생각된다. 본 연구에서는 막재의 역학적 성능 중에서 가장 중요한 인장강도시험<그림 3-10>, 인열강도시험<그림 11-20>, 반복하중시험<그림 21-23>에 대한 역학적 특성에 대한 연구를 수행하고자 한다.

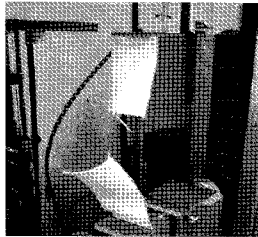
1축 인장강도 시험법은 막재의 인장강도, 신율 등을 구하기 위해서 스트립 법(Strip method)과 그랩법(Grab method)으로 분류할 수 있다. 스트립 법에 의한 1축 인장강도 시험은 KSK K 0521(시험체 폭 50mm, 클램프 간격 200mm, 시험속도 50mm/min), JIS L 1096(시험체 폭 30mm, 크램프 간격 200mm, 200mm/min), ASTM D 4851(시험폭 25.4mm, 클램프 간격 75mm, 시험속도 50mm/min), DIN 53354(시험체 폭 50mm, 길이 300mm, 시험속도 100mm/min)에 정의되어 있다. 그랩 법에 의한 직물의 인장강도는 KSK K 0521(시험체 폭 100mm, 클램프 간격 100mm, 시험속도 50mm/min), ISO 13934(시험체 폭 100mm, 클램프 간격 100mm, 시험속도 50mm/min)에 정의되어 있고 섬유의 광폭시험에 주로 사용한다. 시험편의 준비는 다음과 같다. 각 시험편은 직물의 경사(warp)방향과 위사(webt)방향에 대해서 평행하게 절단을 하여야 하고 동일한 울수가 되도록 하여야 한다. 시험편은 각 시료의 방향에 대해서 5개 이상으로 한다. 클램프의 파지 면이 미끄러지지 않도록 하기 위해서는 고무, 종이, 펠트, 가죽, 플라스틱 등을 대어준다. 크램프에서 미끄러지거나 클램프 모서리에서 5mm 내에서 파단된 시험결과는 버려야 한다.¹⁾⁻⁵⁾ 본 연구에서는 국내에서 생산된 3가지 종류의 폴리에스터 막재(폴리에스터+PVC 코팅+PVDF 토핑)에 대한 인장강도시험을 수행하여 기본적인 역학적 특성을 파악하고자 한다<그림 3-10>. 시험체의 종류는 <표-2>와 같다.

〈표 2〉 시험체의 종류

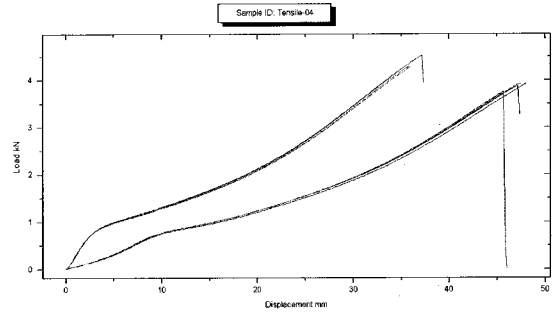
시험종류	두께(mm)	색상	폭(mm)×간격(mm)
시험체 A	1.00	흰색	50 × 200
시험체 B	0.98	노랑	50 × 200
시험체 C	0.68	흰색	50 × 200



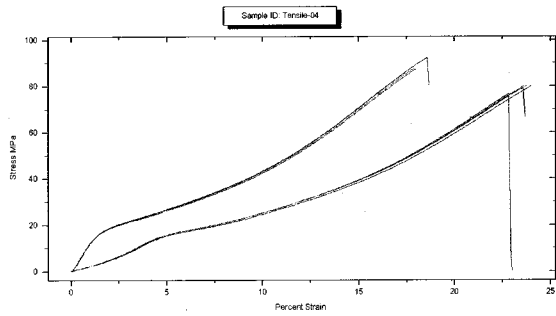
〈그림 3〉 폴리에스터 막의 인장시험 사진(스트립 법)



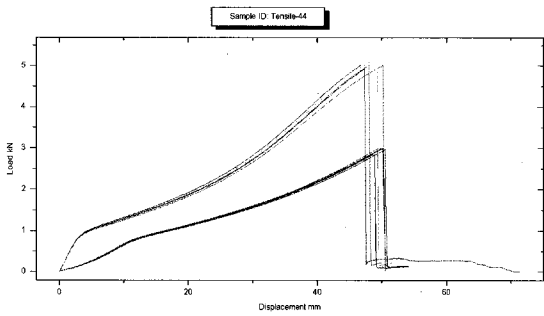
〈그림 4〉 폴리에스터 막의 인장시험결과와 사진



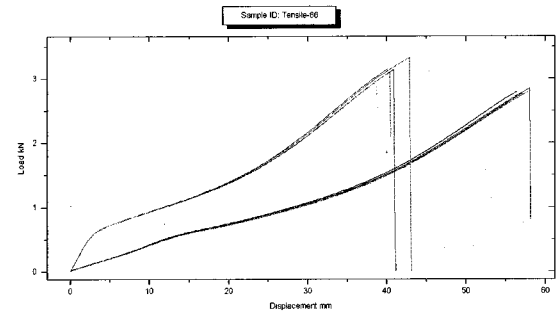
〈그림 7〉 시험체 B의 하중-변위 곡선



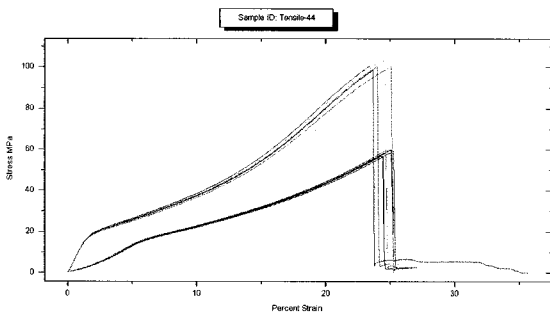
〈그림 8〉 시험체 B의 응력-변형 곡선



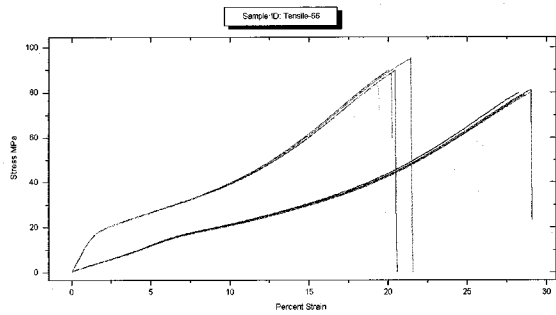
〈그림 5〉 시험체 A의 하중-변위 곡선



〈그림 9〉 시험체 C의 하중-변위 곡선



〈그림 6〉 시험체 A의 응력-변형 곡선

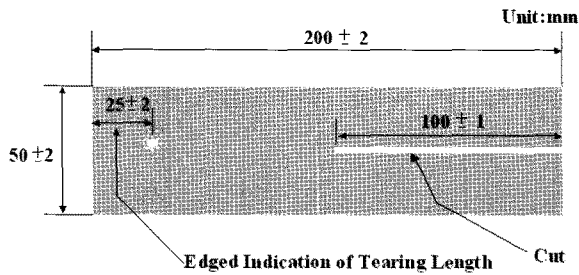


〈그림 10〉 시험체 C의 응력-변형 곡선

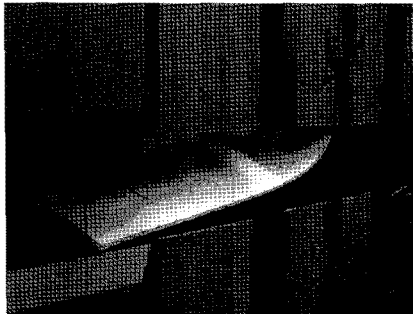
3.2 인열강도 시험

3.2.1 싱글 인열법에 의한 인열강도 시험법

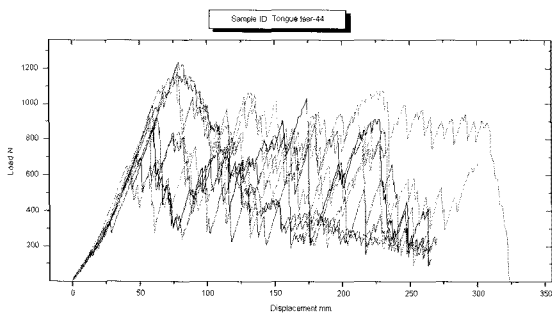
싱글인열법(Single tear method)에 의한 시험방법은 직사각형 시험편의 짧은 변의 중심을 절단하여 바지모양으로 만들고, 그 가랑이를 기록이 가능한 인장시험기의 클램프에 직선이 되도록 물려 직물을 절단한 방향으로 당겨서 시험을 한다. 각 방향으로 최소 5개 또는 동일한 그 이상의 시험편으로 한다. 시험편의 길이 200mm, 폭 50mm 크기의 직사각형으로, 폭의 중심에서 길이가 100mm 되도록 길이 방향으로 자른다. 인열시험을 끝내는 위치를 나타내기 위하여 시험편의 절단하지 않은 끝에서부터 25mm 되는 부분에 표시를 한다(그림11-15).



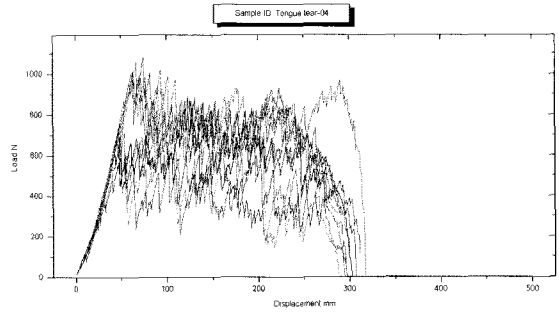
〈그림 11〉 바지모양 인열시험체 형상



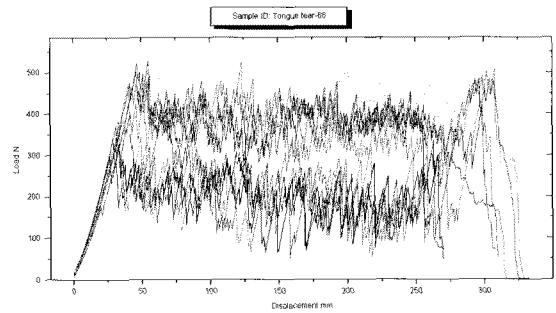
〈그림 12〉 싱글 인열법에 의한 인열시험 사진



〈그림 13〉 시험체 A의 인열시험 결과



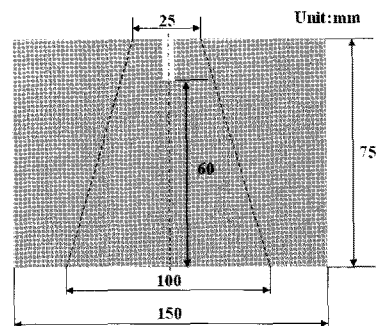
〈그림 14〉 시험체 B의 인열시험 결과



〈그림 15〉 시험체 C의 인열시험 결과

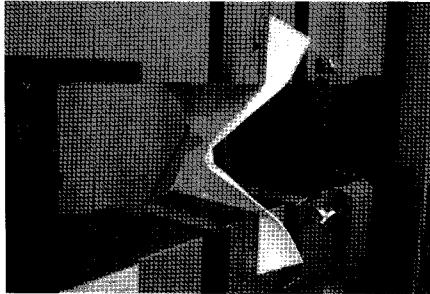
3.2.2 트래피조이드법에 의한 인열강도 시험

인열강도 시험편에서 트래피조이드(Trapezoid) 형태는 〈그림 16〉과 같다. 75mm × 150mm의 크기인 시험편을 자르고, 각 시험편에 형판 또는 적당한 방법을 사용하여 이등변 사다리꼴의 표시를 하고, 짧은 변 중앙에서 변과 직각으로 15mm를 미리 잘라 놓는다. 시험편을 시험기의 클램프 사이의 중앙에 잘려진 부분이 오도록 사다리꼴의 사선을 따라서 파지시킨다. 길이 및 폭 방향으로 각각 5개 시험편에 대해 기록계 위에 표시된 피크의 평균 하중값을 측정한다. 길이 및 폭 방향으로 각

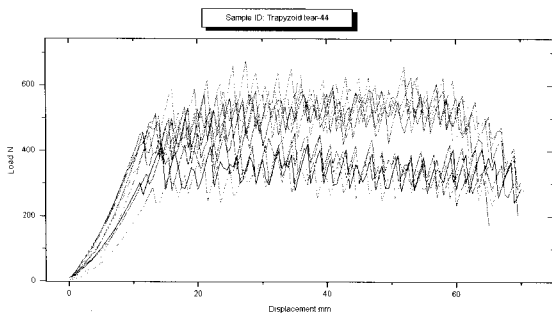


〈그림 16〉 트래피조이드법에 의한 인열시험체 형상

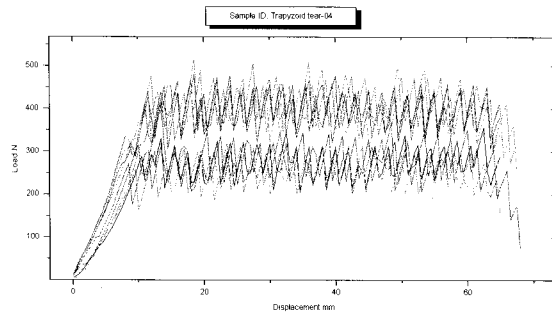
각 5개 시험편에 대해 평균값을 측정한다. 클램프의 이동거리는 클램프 사이의 간격 25mm에서 시작과 함께 측정된다. 인열저항은 시험편이 완전히 끊어질 때까지 기록되지만 결과는 오직 64mm까지 도달된 거리에 대해서만 유효하다(그림 17-20).



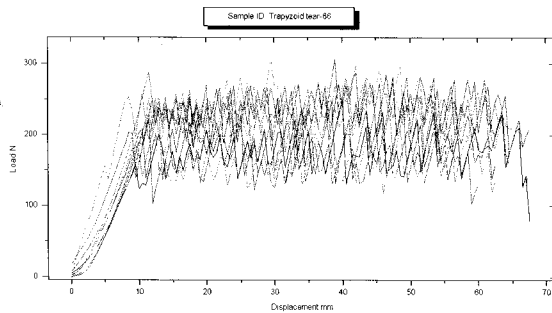
〈그림 17〉트래피조이드법에 의한 인열시험 사진



〈그림 18〉 시험체 A의 인열시험 결과



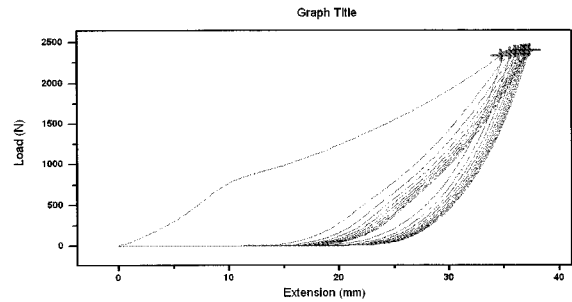
〈그림 19〉 시험체 B의 인열시험 결과



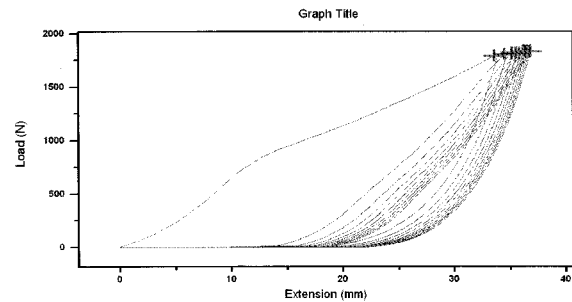
〈그림 20〉 시험체 C의 인열시험 결과

3.3 반복하중 시험

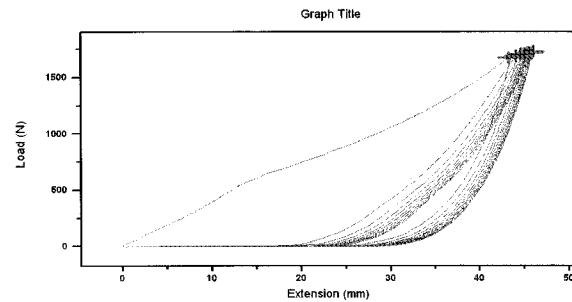
구조물에 시공되는 막재는 주로 바람 등에 의해서 반복적인 하중을 받는다. 반복적인 하중이 작용할 시에 막재의 하중 변형 곡선을 파악하기 위한 시험을 수행하였다. 인장내력의 약 50%범위 내에서 반복하중을 가하여 막재의 하중-변위 곡선을 구하였다(그림 21-23).



〈그림 21〉 시험체 A의 반복하중시험 결과



〈그림 22〉 시험체 B의 반복하중시험 결과



〈그림 23〉 시험체 C의 반복하중시험 결과

4. 막재의 시험 결과 분석 및 고찰

4.1 인장강도에 대한 분석 및 고찰

본 연구에서는 유리섬유 막재에 대한 1축 인장시험에서 최대인장강도, 탄성계수, 신율을 분석하고자 한다. 본 시험에서 인장강도와 신율이 막구조 기준에 적합한 막재인지 파악할 수 있다<표3-8>.

<표 3> 시험체 A의 경사방향 인장강도시험 결과

시험체A (경사)	두께 (mm)	탄성계수 (N/mm ²)	최대값 (kN)	신율 (%)
1	1.00	1154.84	5.16	24.58
2	1.00	1214.47	5.03	23.41
3	1.00	1151.92	5.01	24.00
4	1.00	1179.29	4.93	23.66
5	1.00	1135.18	5.01	25.08
평균	1.00	1167.14	5.03	24.15

<표 4> 시험체 A의 위사방향 인장강도시험 결과

시험체A (경사)	두께 (mm)	탄성계수 (N/mm ²)	최대값 (kN)	신율 (%)
1	1.00	338.26	2.97	25.25
2	1.00	340.45	2.99	24.91
3	1.00	338.55	3.00	25.08
4	1.00	321.36	2.84	24.41
5	1.00	347.87	2.98	24.66
평균	1.00	337.30	2.96	24.86

<표 5> 시험체 B의 경사방향 인장강도시험 결과

시험체A (경사)	두께 (mm)	탄성계수 (N/mm ²)	최대값 (kN)	신율 (%)
1	0.98	1244.09	4.45	18.33
2	0.98	1227.15	4.19	17.41
3	0.98	1212.61	4.27	18.00
4	0.98	1188.36	4.51	18.58
5	0.98	1232.07	4.29	17.19
평균	0.98	1220.86	4.34	17.90

<표 6> 시험체 B의 위사방향 인장강도시험 결과

시험체A (경사)	두께 (mm)	탄성계수 (N/mm ²)	최대값 (kN)	신율 (%)
1	0.98	540.46	3.75	22.83
2	0.98	533.59	3.92	23.75
3	0.98	515.94	3.91	24.00
4	0.98	526.34	3.86	23.58
5	0.98	527.66	3.79	23.16
평균	0.98	528.80	3.85	23.46

<표 7> 시험체 C의 경사방향 인장강도시험 결과

시험체A (경사)	두께 (mm)	탄성계수 (N/mm ²)	최대값 (kN)	신율 (%)
1	0.68	1278.03	2.94	19.33
2	0.68	1256.45	3.15	20.08
3	0.68	1254.14	3.32	21.41
4	0.68	1254.27	3.13	20.41
5	0.68	1245.25	3.09	20.16
평균	0.68	1257.63	3.13	20.28

<표 8> 시험체 C의 위사방향 인장강도시험 결과시험체

시험체A (경사)	두께 (mm)	탄성계수 (N/mm ²)	최대값 (kN)	신율 (%)
1	0.68	450.09	2.84	29.00
2	0.68	444.13	2.80	29.08
3	0.68	450.74	2.76	20.58
4	0.68	467.46	2.79	28.25
5	0.68	459.08	2.62	27.66
평균	0.68	454.30	2.76	26.91

4.2 인열강도에 대한 분석 및 고찰

본 연구에서는 유리섬유 막재의 인열강도 특성에 대해서 연구를 시험한 결과를 분석 및 고찰하고자 한다. 인열강도 시험은 싱글 인열법과 트레비조이드법에 의한 인열강도 시험을 수행하였다<표9-11>.

<표 9> 시험체 A의 인열강도시험 결과

시험법의 종류	두께 (mm)	경사방향	위사방향
싱글 인열법(kN)	1.00	0.50	0.33
트레비조이드법(kN)	1.00	0.28	0.23

<표 10> 시험체 B의 인열강도시험 결과시험법의 종류두께

시험법의 종류	두께 (mm)	경사방향	위사방향
싱글 인열법(kN)	1.00	1.11	0.87
트레비조이드법(kN)	1.00	0.59	0.47

<표 11> 시험체 C의 인열강도시험 결과시험법의 종류두께

시험법의 종류	두께 (mm)	경사방향	위사방향
싱글 인열법(kN)	1.00	1.01	0.75
트레비조이드법(kN)	1.00	0.46	0.35

5. 결 론

본 연구에서는 폴리에스터 막재에 대한 역학적 특성을 파악하기 위해서 1축 인장시험, 인열시험, 반복하중시험을 수행하였다.

(1) 폴리에스터 막재의 경사방향 탄성계수는 $1167.14 \sim 1257.63 \text{ N/mm}^2$, 위사방향의 탄성계수는 $337.30 \sim 528.80 \text{ N/mm}^2$ 경사방향의 신율은 $17.90 \sim 24.15\%$, 위사방향 신율은 $20.28\% \sim 26.91\%$ 로 주어졌다. 막재시험에서 인장강도 최소기준 300 N/cm 이상을 만족하고 최대신율 35% 이하 기준을 만족하였다. 반복하중시험에서도 신율의 회복이 비교적 우수함을 알 수 있었다.

(2) 인열시험 결과에서 싱글인열법 보다는 상하 피크치가 균일한 분포를 보이는 트레피조이드법에 의한 인열강도 시험방법이 적당하다고 사료된다.

▶ 접수일자 : 2010년 1월 25일

▶ 심사 완료일자 : 2010년 월 15일

▶ 게재 확정일자 : 2010년 6월 15일

- 감사의 글 -

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의해서 수행되었습니다.

- 참고문헌 -

1. Membrane Design and Structures, Modern Architecture Series, 1999.11
2. 한국산업규격, 한국표준협회, 2006
3. 이장복, 건축구조용 막재의 특성, 한국공간구조학회지 기술기사, 2004.3, pp. 7-12
4. 박강근, 윤성기, "유리섬유 막재의 역학적 특성에 관한 시험", 한국공간구조학회지, 2008. 4, pp. 55-62
5. 박강근, 윤승현, 배부환, "ETFE 필름 막의 역학적 특성 시험", 한국공간구조학회지, 2009. 6 pp. 77-82