

## 온도변화에 따른 ETFE 막재의 재료특성 연구

### Material Properties of ETFE Membrane under Various Temperature

김 영 호\*  
Kim, Young-Ho

김 재 열\*\*  
Kim, Jae-Yeol

#### 요 약

ETFE막재는 PTFE막재에 비해 상대적으로 두께가 매우 얇고 유연하기 때문에 다양한 온도환경에 따른 막재의 재료특성을 알아볼 필요가 있다. 본 논문에서는 ETFE 막재에 대해 다양한 온도하에서의 재료특성 실험을 수행하였다. 첫째로,  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $+20^{\circ}\text{C}$ ,  $+40^{\circ}\text{C}$  하에서 각각 5 시험편을 이용하여 인장실험을 수행하였으며, 각 온도하에서의 항복응력, 인장강도, 영계수를 도출하였다. 두 번째는,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $40^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$ 하에서 각각 3MP, 6MP, 9MP의 하중을 가하여 각 온도에 따른 크리프 변형도를 알아보았다. 마지막으로,  $-15^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ 하에서의 인열강도 시험을 수행하였다. 시험결과분석에 따르면, ETFE막재의 전체적인 거동은 크게 변하지 않았으나, 재료특성은 온도의 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

#### Abstract

It is needed to investigate the material properties of ETFE foil under various temperatures because ETFE membrane foils have very thin depth and relatively high flexibility. In this paper, the material properties of ETFE membrane foil obtained from 3 testes under various temperatures are presented. First, the uniaxial test under four temperatures as  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $+20^{\circ}\text{C}$  and  $+40^{\circ}\text{C}$  was performed. Each 5 specimen was tested and the yield stress, tensile strength and the Young's modulus of the foils are obtained. Second, the creep testes under three temperatures as  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $40^{\circ}\text{C}$  and  $60^{\circ}\text{C}$ . 3MP, 6MP and 9MP tension load was subjected to the specimen and the creep characteristics was investigated. Finally, the tear test under  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$  and  $20^{\circ}\text{C}$  was performed. It is concluded that the shape of stress-strain curve or general behaviors are similar with that of normal temperatures but the mechanical characteristics of ETFE membrane foils were affected by the temperatures, obviously.

**키워드 :** ETFE 막재, 인장강도, 크리프, 인열강도, 온도변화

**Keywords :** ETFE membrane foil, tensile strength, creep, tear strength, various temperatures

### 1. 서 론

대부분의 막재료는  $100\ \mu\text{m}$  두께로 전광선투과율 90%이상의 투명성을 가지고 있으나, ETFE 필름은 PVDF 또는 PVF 에 비해 용점이 높고, FEP 에 비해 인장파단강도 및 인장탄성률 등이 우수하다. 또한,

투명한 건재 재료 특성을 갖는 농업시설설계 등에 범용되고 있는 염화비닐수지와 비교하면, ETFE는 내후성, 투광율, 내오염성, 신장, 사용한계온도 등에 우수하다. 유리에 비해 내파손성, 경량성 등에 우수하고, 폴리카보네이트에 비해 내후성, 내열성, 내오염성 등에 우수하다. 이처럼 ETFE 막재는 투명 건축재로서의 이용가치가 높다고 말할 수 있다.<sup>1)</sup>

이렇듯 ETFE 막재는 투명성, 내후성 등 최근 전 세계적으로 대두되고 있는 우수한 환경적합성을 인

\* 세진특허법률사무소, 부소장, 공학박사

\*\* 교신저자, 협성대학교 건축공학과 부교수, 공학박사

Tel : 031-299-0758 Fax : 031-298-2737

E-mail : jykim@uhs.ac.kr

정받아 폭넓게 건축물에 응용되고 있다. 최근에는 2001년 영국의 에덴 프로젝트<그림 1>, 2006년 독일 월드컵대회 경기장, 2008년 북경올림픽 수영장의 지붕외벽에도 적용된 바 있다. 그러나 국내에서는 건축물로서의 실적은 부산 GS Xi 갤러리<그림 2>, 서울 금호 크링(Kring) 등에만 이용되었을 뿐 전반적인 보급에는 이르지 않는 것이 현실이다. 따라서 종래의 막 재료와 다른 재료특성을 가지고 있으며, 건축 재료로서의 취급에 대해서도 명확하지 않는 이 ETFE막재의 사용에 대한 정확한 이해와 기술 습득이 국내에서도 필요한 실정이다.<sup>2)</sup>



<그림 1> 에덴 프로젝트 <그림 2> GS Xi 갤러리

현재 제품화되어 있는 ETFE 막재는 일반적으로 두께는 250  $\mu\text{m}$  이하, 제품 폭 2.35m 이하의 롤 상태이며, 로드의 제한은 있지만 제품 폭 및 두께는 그 범위 안에 있으면 자유롭게 제조가 가능하다. 그러나 현재 ETFE 막재에 관한 KS 등의 재료규격뿐 아니라 설계 및 시공을 위한 국내 지침서가 존재하지 않는 실정이다.<sup>3)</sup>

일반적인 PVC 막재와 PTFE 막재는 내부에 섬유 실로 짜여진 섬유층이 있고 그 위에 코팅이 되어 있는 재료이지만, ETFE 막재는 내부에 섬유층이 없는 구조이다. 따라서, 막재의 인장 실험을 통하여 이들 재료들의 재료 성능을 알아볼 필요가 있다. 특히, ETFE막재의 영계수는 인장 실험을 통한 데이터를 이용하여 응력-변형 곡선상에 나타나는 강도 변곡점을 면밀히 분석하여 얻어져야 한다. 그동안 저자들은 일반적인 ETFE막재의 인장강도를 포함하는 재료적특성을 조사하였으며, 실험을 통하여 일축인장 강도 특성, 속도에 따른 인장강도특성을 분석하여 발표하였다.<sup>4),5),6)</sup> 발표된 연구들은 상온하에서 실험

된 결과들이 대부분이다. 따라서, PTFE막재에 비해 상대적으로 두께가 매우 얇고 유연한 ETFE막재에 대해서는 다양한 온도환경에 따른 막재의 재료특성을 알아볼 필요가 있다.

본 논문에서는 ETFE 막재에 대해 다양한 온도하에서의 재료특성 실험을 수행하였다. 첫째로,  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $+20^{\circ}\text{C}$ ,  $+40^{\circ}\text{C}$  하에서 각각 5 시험편을 이용하여 인장실험을 수행하였으며, 각 온도하에서의 항복응력, 인장강도, 영계수를 도출하였다. 두 번째는,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $40^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$  하에서 각각 3MP, 6MP, 9MP의 하중을 가하여 각 온도에 따른 크리프 변형도를 알아보았다. 마지막으로,  $-15^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$  하에서의 인열강도 시험을 수행하였다. 시험결과분석에 따르면, ETFE막재의 전체적인 거동은 비슷하였으나 재료특성은 분명히 온도의 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

## 2. ETFE 막재의 재료특성

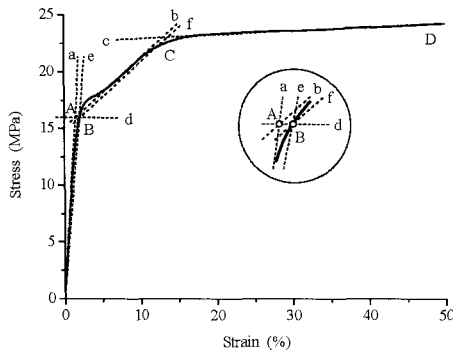
### 2.1 주요 역학적 특성

ETFE 막재의 주요 역학적 특성은 인장강도, 파단시 변형율, 항복강도와 탄성 계수 등을 포함하며 일반적으로 플라스틱 막재의 인장시험 방법을 참조한 재료의 성질 실험을 통하여 얻은 결과이다. ETFE 막재의 인장 곡선은 비교적 명확한 특징을 지니고 있는데, 변형도가 비교적 작을 때의 2개의 직선 단계 및 변형도가 클 때의 소성유동 단계와 강도 강화 단계로 구성된다. 그 파단시 변형율은 350% 이상에 달할 수 있다. 응력-변형도 곡선을 근사치 단계분할하여 얻어진 항복강도와 탄성계수 등은 실제 설계에 있어 중요한 재료 특성 변수가 될 것이다.

### 2.2 항복응력과 영계수 결정 방법

막재의 응력-변형 곡선들은 두 개의 강도 변곡점을 갖고 이것의 두 변곡점 사이 곡선의 경사는 첫 번째 변곡점 곡선의 것보다 훨씬 완만하다. 첫 번째 변

곡점은 항복점으로 간주되고, 두 번째 변곡점은 두 번째 항복점으로 간주된다. 응력이 두 번째 변곡점 값에 도달했을 때, 변형은 빠르게 증가한다. 변형이 150%보다 작을 때, 응력-변형 곡선은 <그림 3>과 같이 세 개의 수직선으로 나타낼 수 있다. 항복응력과 영계수는 <그림 3>을 참조하여 다음 단계들에 따라 결정된다.



<그림 3> 항복점과 영계수와의 관계

단계 1 : 초기 접선(선a)과 두 변곡점을 잇는 직선(선b) 그리고 두 번째 변곡점을 지나는 접선(선c)을 작성한다. 선a와 선b의 교차점을 A로 한다.

단계 2 : 첫 번째 변곡점을 B라고 한다. A점을 지나는 수평선(선d)을 작성한다. 선d와 변곡점 B를 만나는 점을 항복점으로 잡는다. 원점과 점B를 지나가는 선(선e)과 점B를 지나고 선b와 평행한 선(선f)를 긋는다. 선f와 선c의 교차점(C)을 두 번째 항복점으로 한다.

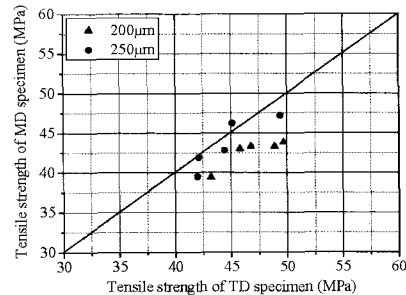
단계 3 : 항복응력과 두 번째 항복응력은 점B와 점C의 값들로부터 얻는다.

단계 4 : 접선 영계수, 활선 영계수, 두 번째 영계수와 세 번째 영계수는 선a, 선e, 선b, 그리고 선c로부터 각각 계산된다.

### 2.3 인장강도 특성

인장실험으로부터 얻어진 응력-변형도 곡선을 분석함으로써 영계수, 파단점의 변형도, 접선 영계수, 활선 영계수와 같은 막재의 인장 특성을 다음과 같

이 얻을 수 있었다. 파단 시 변형이 350~400% 반면에 장력 강성은 약 40.0~50.0MPa이다. 항복응력은 14.0MPa부터 16.0MPa까지 변하고, 두 번째 항복응력은 22MPa정도이다. 활선 영계수가 600~700MPa반면, 접선 영계수는 800~900MPa이다. 두 번째 영계수는 50~60MPa이고, 활선 영계수의 1/10보다 적다. 세 번째 영계수는 단지 약 3MPa이다. 기계방향의 장력 특성들과 횡력 방향의 것들 사이에 명확한 차이점이 없다는 것이 확인되었고, 이것은 막재 등방성 재료의 타입으로써 취할 수 있다는 것을 의미한다. 두께 200μm 와 250μm의 박막에 대해 장력 특성들의 아래 그림에서 알 수 있듯이 약간의 차이점은 있으나 거의 같은 특성을 나타내고 있다.



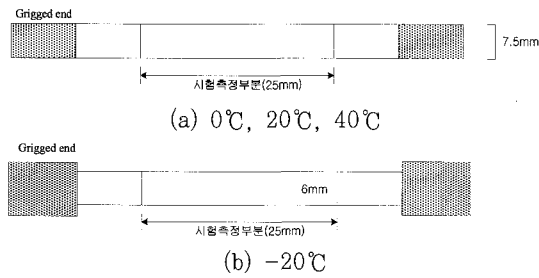
<그림 4> ETFE 박막의 인장강도

각기 다른 인장속도 하에서 응력-변형도 곡선의 변화 양상은 일치한다. 분석한 데이터에 따르면, 각 항목의 역학 매개변수와 변형률속도의 대수는 비교적 좋은 선형 관계를 나타낸다. 인장속도가 증가함에 따라 ETFE 막재의 인장강도는 약간 증가하였으며 파단시 변형율은 약간 감소하였다. 인장속도가 증가함에 따라 ETFE 막재의 항복강도는 증가하지만, 제2항복강도는 크게 증가하지 않았다. 동시에 인장속도가 증가하면 ETFE 막재의 항복 변형률은 약간 증가하지만, 제2항복 변형률은 약간 감소하였다. 인장속도가 증가함에 따라 ETFE 막재의 접선탄성계수와 제2탄성계수는 하강 추세를 보이지만, 활선탄성계수와 제3탄성계수는 특별한 변화를 보이지 않았다.

### 3. 온도변화에 따른 재료 특성

#### 3.1 일축인장실험

ETFE막재 대한 인장실험 방법에 따르면, ETFE 막재에 대한 단축 인장 실험에서는 몇몇 변수를 수정하여 실행하여야 한다. 인장 실험 모델은 <그림 5(a), (b)> 같은 스트립을 사용하였으며 인장속도는 25mm/min로 하였다.



<그림 5> 시험편



<그림 6> 인장시험기

##### 3.1.1 시험편

250 $\mu$  m 두께의 투명한 ETFE 막재를 절취하였다. ETFE 막재는 양쪽방향(MD 및 TD)의 성능의 차이가 매우 작은 점을 고려하여, 본 실험에서는 너비방향(TD)의 시험편만을 사용하는 것으로 하였다. 고·저온을 유지해 줄 수 있는 상자의 용기의 체적이 제한되어 있기 때문에, 본문에서는 비교적 작은 치수의 시험편을 사용하여 실험을 진행하였으며, 온도 변화 상황에 따라 재료의 데이터를 비교하였다. 0°C, 20°C, 40°C에서의 인장시험편은 너비가 7.5mm의 길

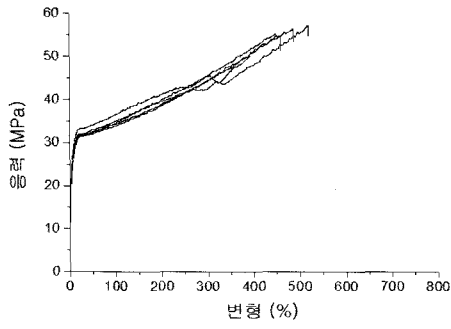
쭉한 모양을 사용하였고, -20°C에서는 ETFE 박막의 인장강도가 높아지는 점을 고려하여 확실히 고정되도록 보장하기 위하여 시험편의 가운데 부분은 너비를 6mm로 하고, 고정되는 끝부분은 더 넓고 강하게 해주었다. 수행된 모든 시험편의 시험측정 부분의 간격은 모두 25mm로 하였다.

##### 3.1.2 실험 방법

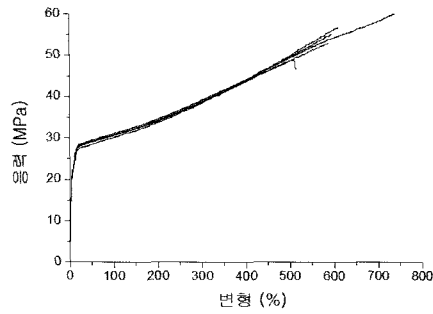
0°C, 20°C, 40°C, -20°C 각 온도 하에서, 다섯 개의 시험편을 한 세트로 인장 실험을 진행하였다. 인장속도는 25mm/min로, 고정 장치 사이의 위치 변화를 가지고 스트레인을 계산하였다. 실험기는 하중과 변형 데이터를 자동으로 기록한 후, 계산을 통하여 ETFE 박막의 응력-변형도 곡선을 얻어내었다. 응력 계산 중 사용한 시험편의 변형 전의 절단면 면적은, 변형 후에도 절단면이 줄어들지 않았은 것으로 간주하고 계산을 하였다. 실험시 주위 환경의 온도는 고·저온 상자를 통제하여서 오차범위는  $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 조절하였다. 실험 중에 얻은 응력-변형도 곡선을 근거로 하여 각 온도 하에서의 ETFE 박막의 인장강도, 항복강도, 접선탄성계수와 활선탄성계수를 계산하여 도출하였다.

##### 3.1.3 인장시험 결과

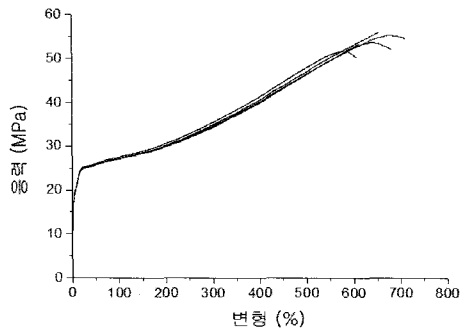
이상의 실험 방법에 의거하여 진행한 인장실험에서, 각각 다른 온도 하에서 ETFE 박막의 인장 곡선을 얻어냈다. <그림 7>은 각 온도 조건 하의 응력-변형도 곡선이다. 온도 변화에 따른 ETFE 박막 재료성능의 특성은 <그림 8>에 나타난 것과 같다.



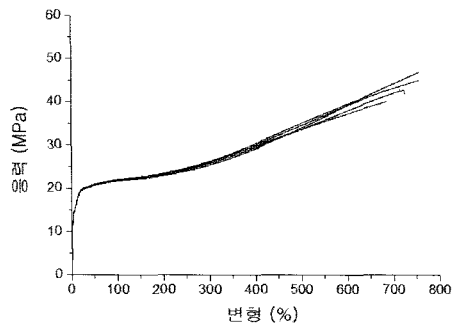
(a) -20°C



(b) 0°C

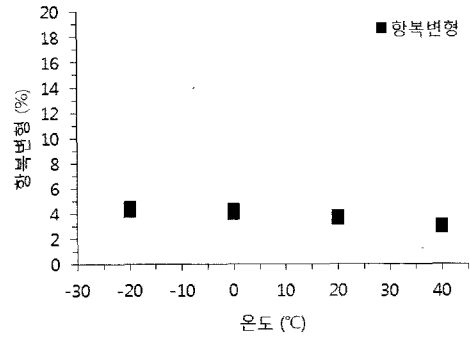


(c) 20°C

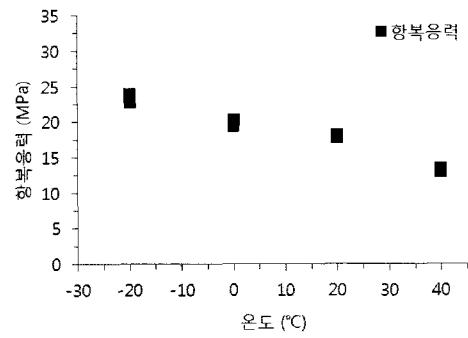


(d) 40°C

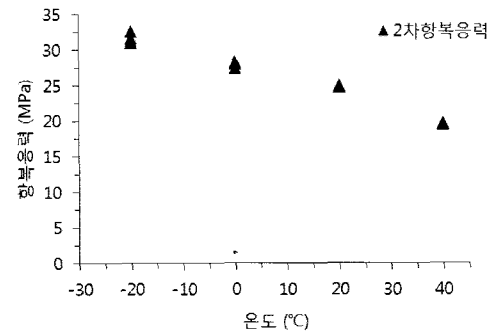
〈그림 7〉 온도변화에 따른 ETFE 막재의 응력-변형도 곡선



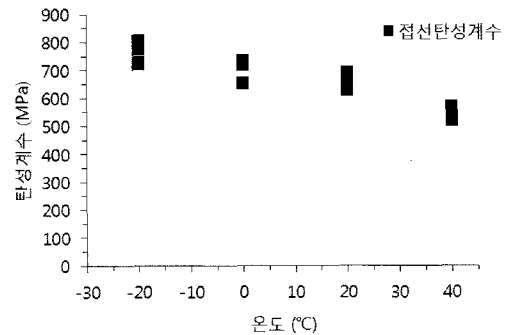
(a) 항복변형



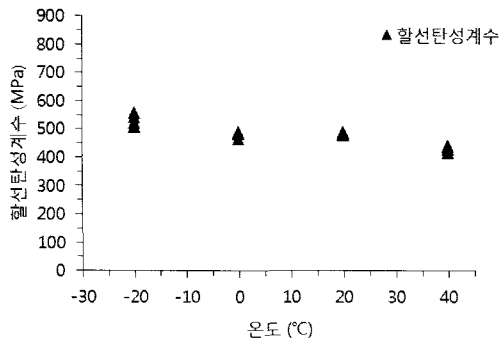
(b) 항복응력



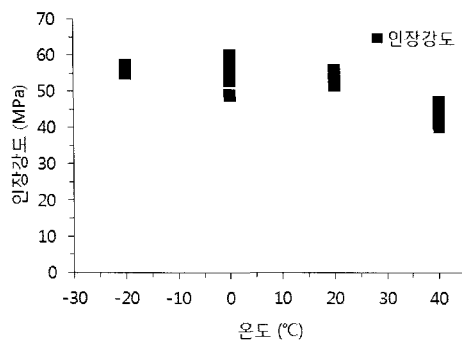
(c) 2차항복응력



(d) 접선탄성계수



(e) 할선탄성계수



(f) 인장강도

〈그림 8〉 온도변화가 ETFE 박막 재료의 성능에 미치는 영향

이상의 실험 결과를 근거로 온도에 따른 단축인장 실험결과는 다음과 같다.

- 1) -20°C에서 40°C에 이르는 온도 범위 내에서, ETFE 박막의 각각의 성능은 모두 온도의 영향을 분명히 받는다. 하지만 스트레스-스트레인 곡선의 모양은 일정히 유지되고, 재료는 여전히 점탄성의 특성을 지닌다.
- 2) 온도의 증가에 따라, 항복강도와 제2항복강도는 줄어든다. 상온인 20°C와 비교하면, -20°C일 때 항복강도와 제2항복강도는 25~30% 증가하고, 0°C일 때는 10% 이상 증가하고, 40°C일 때는 20~25% 감소한다. 〈그림 8(b), (c)〉에서 알 수 있듯이, 항복강도와 제2항복강도는 상온과 -20°C 사이에서 선형을 보이며 하강하

고, 40°C까지 온도가 올라갈 때는 하강 속도가 더욱 빨라진다.

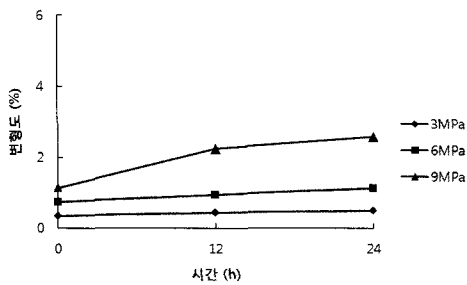
- 3) 온도가 상승함에 따라 항복변형률은 하강 추세를 보인다. 상온인 -20°C와 비교하면, -20°C일 때 항복변형률은 20% 가까이 증가하고, 0°C일 때는 약 10% 가량 증가하고, 40°C일 때는 20% 가까이 감소한다. -20°C에서 20°C에 이르기까지 항복변형률은 선형에 가깝게 하강하고, 0°C까지 온도가 올라갈 때는 하강 속도가 더욱 빨라진다. 온도에 따른 제2항복변형률의 변화는 분명하지 않다. 0°C에서 40°C까지의 온도 구간 내에서는 제2항복변형률은 명확한 변화가 없지만, 0°C에서 -20°C로 내려갈 때 제2항복변형률은 약 10% 감소한다.
- 4) -20°C~20°C에서 접선탄성계수는 선형으로 하강하는 추세를 보인다. -20°C일 때의 접선탄성계수는 20°C일 때보다 대략 16% 커진다. 온도가 20°C에서 40°C에 이르면서 올라갈 때, 접선탄성계수의 하강속도는 더 빨라서, 하강 폭은 15%이상에 이른다. 온도가 0°C에서 -20°C에 이르도록 하강할 때 할선탄성계수는 약 10% 증가한다. 20°C에서 40°C로 올라갈 때 할선탄성계수는 약 10% 감소한다.
- 5) -20°C~20°C의 범위 내에서 인장강도는 온도에 따라 하강하다가 약간 증가하지만, 변화는 비교적 작다. 하지만 온도가 20°C에서 40°C에 이르면서 올라갈 때, 하강은 두드러지며 감소량은 약 20%에 달한다.

### 3.2 막재의 크리프 특성 시험

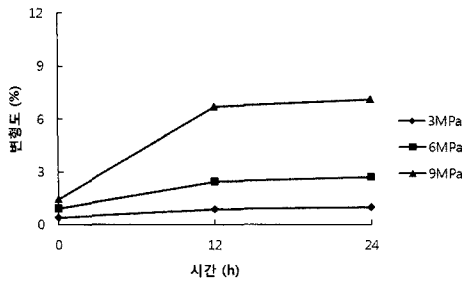
온도에 따른 막재의 크리프특성을 알아보기 위한 시험을 수행하였다. 시험은 25°C, 40°C, 60°C에서 각각 수행되었으며, 각 시험편에 하중으로 3MPa, 6MPa, 9MPa를 가하였다. 표 1 및 그림 9는 온도에 따른 크리프 변형시 변형도 변화를 나타낸 것이다.

〈표 1〉 크리프 시험시 변형도 (단위 : %)

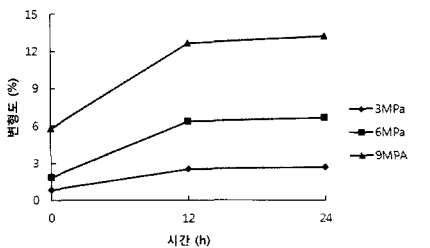
온도 /℃	응력: 3 MPa			응력: 6 MPa			응력: 9 MPa		
	0 h	12 h	24 h	0 h	12 h	24 h	0 h	12 h	24 h
25	0.35	0.44	0.49	0.73	0.94	1.12	1.13	2.24	2.58
40	0.39	0.89	0.98	0.92	2.43	2.72	1.45	6.71	7.10
60	0.83	2.55	2.66	1.85	6.36	6.65	5.76	12.68	13.21



(a) 25°C



(b) 40°C



(c) 60°C

〈그림 9〉 온도에 따른 크리프 시험시 변형도

### 3.2.1 크리프시험 결과

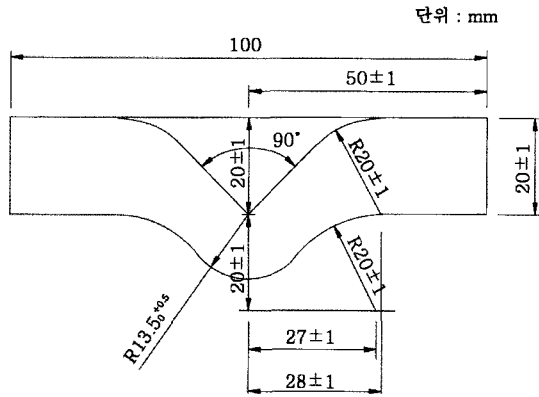
ETFE 막재는 장시간의 인장을 받으면, 비교적 명확한 크리프 현상이 나타난다. 크리프의 크기는 인장응력과 온도와 밀접한 관련이 있다. 상온 하에서 응력이 6MPa보다 작으면, 재료의 크리프는 크지 않고 시간이 지나면서 크리프 변화는 완만해진다. 응력이 9MPa가 되면 상온하의 24시간 내에 발생한 크리프는 원래 변형도보다 크다. 또한 크리프는 여전히 지속적으로 발생한다. ETFE 막재의 크리프에 온도가 미치는 영향은 매우 크다. 상온 하에서 응력이 작을 때 재료는 그리 크지 않은 크리프를 만들지만, 온도가 40°C에 이르면 크리프는 급속히 증가하고 발전추세를 지속한다. 온도가 60°C에 이르면 재료는 유연해지고 탄성계수는 감소하며 명확한 크리프 현상을 만든다.

### 3.3 막재의 인열강도측정

온도에 따른 막재료의 인열 강도를 알아보기 위한 시험을 수행하였다. 시험기는 CMT4204 마이크로컴퓨터 제어 고·저온 전자 만능 실험기와 HD-10 두께 측정기가 이용되었다. 시험편의 두께는 200μm의 ETFE 박막 재료 (Covertex membranes Shanghai Co. Ltd. 제공)를 사용하였다. 시험편의 모양과 치수는 그림10과 같다. 시험편은 절단편창을 사용하였고, 시험편이 잘릴 때 갈라진 틈이 벌어진 방향으로 시험편 방향을 정하였다. 시험편의 직각 입구의 두께는 시험편을 시험기에 물리는 부분은 20mm이고, 실험온도는 항상 일정하게 조정하여 규정치에 이르도록 한다(-15°C, 0°C, 20°C). 200mm/min의 인장 속도 하에서 실험을 진행하여 그 결과를 기록하였다. 시험편이 잘리는 과정 중의 최대 부하치가 인열하중이다. 인열강도는 아래의 식에 따라 계산하였다.

$$\sigma_{tr} = \frac{P}{d} \quad (1.1)$$

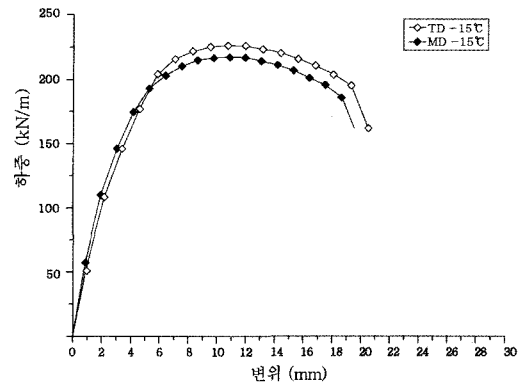
여기에서,  $\sigma_{tr}$  : 직각인열강도(kN/m)  
 $P$  : 하중(N)  
 $d$  : 시험편 두께(mm).



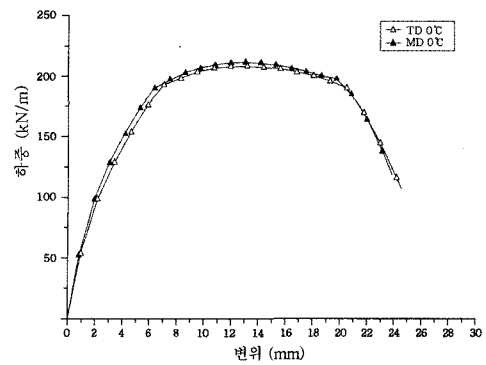
〈그림 10〉 인열시험 시험편의 모양과 치수

〈표 2〉 온도에 따른 인열강도

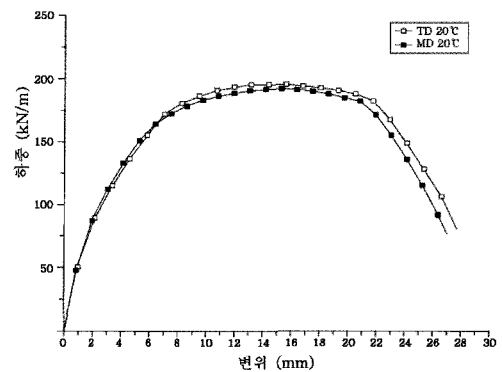
시험방향	두께 ( $\mu$ m)	온도 ( $^{\circ}$ C)	인열강도 (kN/m)
MD	203	-15	217.5
	204	0	211.7
	205	20	192.4
TD	202	-15	226.7
	206	0	208.7
	206	20	195.6



(a) 15 $^{\circ}$ C

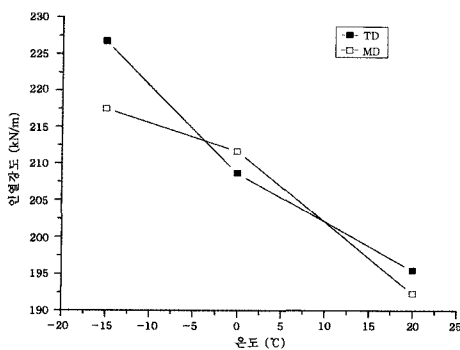


(b) 0 $^{\circ}$ C



(c) 20 $^{\circ}$ C

〈그림 12〉 하중-변위 곡선



〈그림 11〉 온도에 따른 인열강도 변화

### 3.3.1 인열강도 측정 결과

막재의 인열강도는 온도의 변화에 따라서 약간의 차이는 있으나 10%이내의 미소한 차이를 나타내고 있다. 온도가 올라감에 따라 최대하중은 감소하고 따라서 인열강도도 감소하고 있음을 알 수 있었다.



## 4. 결론

이상의 실험과 결과분석에 따라 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 온도의 변화에 따라 ETFE 막재의 각각의 특성(인장강도, 크리프, 인열강도)은 모두 온도환경에 적지 않은 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.
- 2) 인장강도 실험시 온도의 영향에도 불구하고 변형도-변위 곡선의 모양은 온도의 변화에 무관하게 일정히 유지되고, 재료는 여전히 점탄성의 특성을 지니고 있다.
- 3) 크리프 시험시 상온 하에서 응력이 작을 때 재료는 그리 크지 않은 크리프를 만들지만, 온도가 올라감에 따라 크리프는 급속히 증가하며, 유연해지고 탄성계수는 감소하며 명확한 크리프 현상을 만든다.
- 4) 막재의 인열강도는 온도의 변화에도 미소한 차이를 나타내고 있다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원(과제번호 # '06 R&D B03)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## - 참고문헌 -

1. फिल्म膜パネル委員会, ETFEフィルムパネル設計・施工指針(案) [A], 膜構造研究論文集 2005[C], 東京:日本膜構造協会, 2005, II1~II51.
2. 김재열, 배부환, “ETFE 필름 막 패널 설계에 대한 고려사항”, 한국공간구조학회지 기술기사, 제 8권 6호, pp.15-18
3. 배부환, 이창훈, “초경량 건축외장재 ETFE”, 한국공간구조학회지 기술기사, 제9권 1호, pp.17-22
4. 河端昌也, 森山史朗, ETFEフィルムのひずみ速度依存性と構造的舉動について, 膜構造研究論文集 2004, 東京:日本膜構造協会, 2004, pp.41-46
5. 강주원, 김재열, “ETFE 막재의 재료성능과 구조시스템에 관한 연구”, 대한건축학회 논문집(구조계), 제25권 6호, pp.57~64, 2009. 6
6. 김재열, 강주원, “인장속도가 ETFE막재의 역학적 특성에 미치는 영향”, 대한건축학회논문집, 제 26권 5호, pp.43~50, 2010. 5

(접 수 일 자 : 2011년4월29일)

(심사완료일자 : 2011년8월22일)

(게재확정일자 : 2011년8월31일)