

ETFE 막재에 대한 인장실험과 크리프 실험

Tensile Test and Creep Tests of ETFE Membrane

김재열*
Kim, Jae-Yeol

강주원**
Kang, Joo-Won

요약

본 논문에서는 세 종류의 ETFE 막재에 대한 단축인장실험을 수행하였다. 이 실험에서 얻은 변형도-변위 곡선을 분석함으로써 항복응력, 두 번째 항복응력, 탄성계수, 두 번째 탄성계수, 그리고 세 번째 탄성계수를 얻게 되었다. 아울러, 탄성 단계와 항복 단계, 소성유동 단계에서 각각 ETFE 막재의 사이클 하중시험을 진행하여, 잔여변형률, 응력 이완, 하중 변화(재하/제하) 중 ETFE 막재의 탄성 변화 등을 알아본다. 재료의 크리프시험에서는 25, 40, 60℃의 시험온도와 3, 6, 9MPa의 인장 응력 하에서 크리프시험의 시간은 24시간으로 설정하였다.

Abstract

Uniaxial tensile tests of ETFE membrane are performed in this paper. Three kinds of ETFE membrane with different thickness are used in the tests. The tensile strength, the tensile strain at break and the stress-strain curve are obtained from the tests. Furthermore, the cycle loading test of ETFE membrane is carried out through using different values of cycle stress. The residual strain, the relaxation of stress and the change of the elastic modulus of foil are investigated. In the creep test, three kinds of temperature (25, 40 and 60 °C) and three kinds of stress (3, 6 and 9 MPa) are set respectively and the creep time lasts 24 hours.

키워드 : ETFE 막재, 인장실험, 사이클 하중, 크리프

Keywords : ETFE membrane, Tensile test, Cycle loading, Creep

1. 서론

최근 베이징 올림픽의 주요경기장인 국립 수영 센터를 비롯하여 다양한 건축물들의 건설이 새로운 건축 막재인 ETFE 막재가 사용되어 이에 대해 많은 관심을 갖게 되었다. ETFE 막재는 투광률이 90%보다 큰 건축 재료로서 질량이 가볍고 화학적 성질이 안정되어 있으며, 자정 능력이 좋고, 충격에 강하여 파괴될 위험성이 적은 장점을 지니고 있어 건축구조물 지붕 및 마감재료로서 적용할 수 있는

전망이 매우 밝다.

ETFE 막재의 주요 역학적 성질은 인장강도, 파단시 변형률, 항복강도와 탄성계수 등을 포함하며 일반적으로 플라스틱 막재의 인장 시험 방법을 참조한 재료의 성질 실험을 통해 얻은 결과이다.¹⁾ ETFE 막재의 인장곡선은 비교적 명확한 특징을 지니고 있는데, 변형률이 비교적 작을 때의 2개의 직선 단계 및 변형률이 클 때의 소성유동 단계와 응력 강화 단계로 구성된다. ETFE 막재의 파단시 변형률은 350% 이상에 달할 수 있으며, 이러한 재료 특성을 포함하여 항복강도와 탄성계수 등은 실제 설계에 있어 중요한 재료 특성이다.

막 구조는 사용과정 중 평면이 매끄럽고 주름이

* 협성대학교 건축공학과 부교수, 공학박사

** 교신저자, 영남대학교 건축학부 부교수, 공학박사

Tel: 053-810-2429 Fax: 053-810-4625

E-mail : kangj@ynu.ac.kr

없도록 하기 위하여 막재에 프리텐션을 가해야 한다. ETFE 막재가 구조체로서 역할을 하기 위해서는 아래와 같은 두 가지 방법으로 막 표면에 인장력을 가해야 한다. 한 가지 방법은 미리 축소시켜 놓은 막재를 고정된 틀에 당겨 고정하는 펼침식 막 구조이다. 다른 방법은 공기압력을 통해 막 표면에 긴장 상태를 만드는 풍선식 막 구조이다. 펼침식 ETFE 막 구조는 사용 후에 막 표면에 이완 현상이 일어나지 않도록 장력 조절을 할 수 있는 장치를 필요로 하며, 이완시 이를 이용해서 재차 인장한다. 그리고 풍선식 ETFE 막 구조는 공기 주입 조절 시스템으로 막 표면을 항상 탱탱하게 하도록 해야 한다.

현재 우리나라의 ETFE 막재에 대한 연구는 매우 부족한 상태이기 때문에 실무에 적용하고자 하는 기술수요를 충분히 제공하지 못하고 있는 실정이다. 김재열, 강주원²⁾은 두 종류의 ETFE 막재에 대한 실험을 수행하여 막재의 인장특성을 제시하였다. 이 논문에서는 ETFE 막재의 일반적인 인장특성을 설명하는데 한정되었으며, ETFE 막재를 이용한 구조시스템에 대해 소개를 하였다. 또한, 박장근¹⁰⁾등도 ETFE막재에 대한 실험을 수행하였고, 인장특성에 대한 연구결과를 발표하였다.

고분자화합물인 막재의 인장시험방법³⁾⁴⁾에서는 인장속도의 범위를 정해주고 있고, ETFE 막재에 대한 변형률속도는 $100\% \text{min}^{-1}$ 을 권장하고 있다.¹⁾⁵⁾ 그러나, 고분자 재료의 인장강도, 파단시 변형률, 항복강도와 탄성계수 등의 시험변수는 시험시 조절되어야 할 변형률속도와 매우 큰 관련을 가지고 있다.⁶⁾ 즉, 각기 다른 인장 속도 하에서 도출되는 ETFE 막재의 인장곡선은 각각 다른 양상을 나타낼 수 있다. 변형률속도를 고려한 ETFE 막재의 인장 시험은 河端⁷⁾등에 의해 수행되었으며, 변형률속도를 $1\% \sim 200\% \text{min}^{-1}$ 의 범위로 지정하여 인장시험을 수행하였다. 여기서, 河端등은 속도에 따른 항복강도와 탄성계수의 변화를 고찰하였지만, 변형률속도에 따른 인장강도, 파단시 변형률 등의 관련 변수의 변화상황은 도출하지 않았다. 국내에서는, 김재열, 강주원⁹⁾이 변형률속도의 변화를 각각 10%, 25%, 50%, 100%, 200%와 $500\% \text{min}^{-1}$ 로 구별하

여 수행된 실험결과를 발표하였다. 이 논문에서는 각 속도에 대응하는 인장강도, 파단시 변형률, 항복응력, 탄성계수등의 역학적 특성을 이 제시되었다.

막 표면의 이완은 사용과정 중 재료에 발생한 소성 변형과 크리프에 의한 것이다. 일축방향 인장시험에서 알 수 있듯이, ETFE 막재 표면은 초기 변형이 매우 적은 탄성 단계와 비교적 큰 변형이 일어나는 항복 단계, 그리고 마지막으로 매우 큰 변형이 발생하는 소성유동이라는 단계를 거친다. 명백히, 각기 다른 응력 조건하에서 재료에 발생하는 소성 변형과 크리프가 다르고, 동시에 사용하는 온도가 또 다른 중요한 영향 요인이다. 표면에는 항상 프리텐션이 작용하고 있고, 또한 공기 압력을 받으면 표면 응력이 변하게 된다. ETFE 막재의 사이클 응력 하의 잔여 소성 변형과 다양한 응력 및 온도 조건하의 크리프의 발전 속도 등은 ETFE 막재의 강도 설계치와 펼침식 막 구조에서 막재의 축소율, 장력 조절 장치, 풍선식 막구조를 장기 사용시 공기 누출에 의한 형상의 변동 범위 및 ETFE 막재 구조의 여타 구조적으로 요구되는 것을 결정하는 중요요인이다. ETFE 막재의 인장강도는 일반적으로 40MPa 이상이고, 소성유동이 발생할 때의 제1 항복응력은 21MPa 정도이고, 항복응력은 대략 15MPa(변형률 속도 $100\%/\text{min}$)이다.⁹⁾ 설계시 이 세 가지 응력 지표를 어떻게 고려할지는 현재 국제적으로 통일된 기준이 없다. 일본은 ETFE 막재의 사이클 로딩과 크리프 성능에 대하여 일정한 시험 연구를 진행하였는데⁸⁾, ETFE 막재 구조 설계지침 초안에서 항복응력을 강도 설계치(단기하중 허용응력)로 임시로 제시하고 있다.⁵⁾ 우리나라의 ETFE 막재 건축은 나날이 증가하는 추세에 있다고 하지만, ETFE 재료의 특성과 관련된, 특히 재료의 점탄성에 대한 연구가 아직 공백상태이다.

본 논문에서는 ETFE 막재에 대하여 일축방향 인장시험을 진행하여 인장강도, 파단시 변형률과 탄성계수 등 기본 데이터를 도출하였다. 세 종류(두께: $200\mu\text{m}$, $250\mu\text{m}$, $300\mu\text{m}$)의 막재에 대한 단축 인장 테스트가 수행되었고, 이 테스트로부터 얻은 변형도-변위 곡선을 분석함으로써 항복응력, 두 번째 항복응력, 탄성계수, 두 번째 탄성계수, 그리고 세

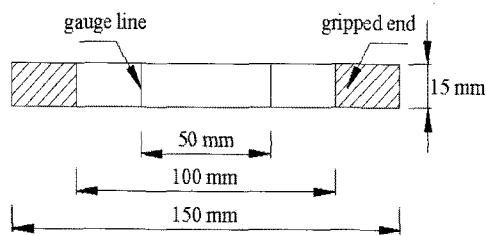
번째 탄성계수를 얻게 되었다.

또한, 본 논문에서는 ETFE 막재의 사이클 인장 시험과 크리프 시험을 진행하였다. 사이클 인장 시험은 탄성단계, 항복 단계와 소성유동 단계로 구분하여 사이클 하중시험을 진행하여, 다른 응력 상태에서 재료의 잔여 소성 변형 변화를 고찰하였다. 크리프시험은 3가지의 온도를 설정하여 3종류의 응력 상태 하에서 24시간 크리프 시험을 진행하여 변형률의 양상을 측정하였다.

2. 일축 인장 실험

2.1 인장실험 방법

인장 실험 모델은 <그림 1> 같은 스트립을 사용하였으며 장력변형속도는 100%/min로 하였다.



<그림 1> 스트립(strip) 견본

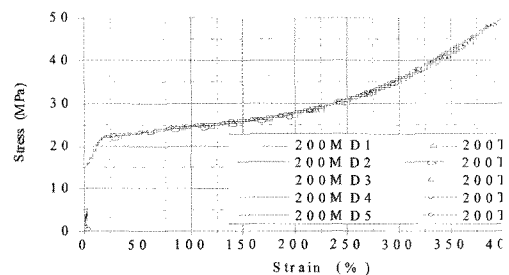
일반적으로 감겨져 있는 막재의 펼쳐진 방향은 기계방향(MD)라고 불려지고, 직교방향은 너비방향(TD)라고 불린다. 실험에 사용된 스트립 견본들은 MD와 TD 둘 다 취하기로 한다. 단부 몰림부분(gripped ends)은 특별한 그립핑 홀더(gripping holder)에 고정되고, 측정기준 선들 사이의 신장이 측정된다. 단부 몰림부분 사이의 속도가 100mm/min이므로 측정기준 선들 사이에 있는 장력 응력 속도가 대략 100%/min 이다. 시험편의 응력을 계산하는데 있어서 단면적은 시험 시작 전에 막재의 두께와 폭으로부터 얻어지고, 시험 중에 단면적의 변화는 무시된다. 막재의 변형률은 두 개의 측정기준 선들 사이의 늘어난 양으로 계산된다. 단축인장 실험은 막재의 두께 200 μ m, 250 μ m, 300 μ m 막재의 변MD와 TD 방향으로 각

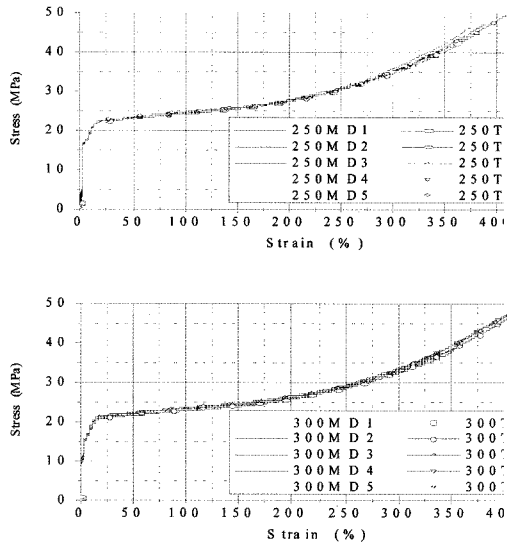
각 5개의 시험편을 가지고 실험하였다. 인장 실험은 실내온도는 24°C 에서 수행되었고, 실험 결과는 <그림 2>와 같다.

2.2 단축 인장 실험결과

<그림 2>에 나타난 단축 인장 실험 결과를 살펴보면 기계방향(MD)의 장력 특성과 너비 방향(TD)의 장력특성사이에 명확한 차이점이 없다는 것이 확인되었고, 이것은 막재는 등방성 재료로서 취급 할 수 있다는 것을 의미한다. 그러나 <표 1~9>에서 알 수 있듯이 두께 200 μ m, 250 μ m, 300 μ m의 막재에 따라 각각의 장력 특성들은 약간의 차이점이 있음을 알게 되었다.

ETFE 막재의 일축 인장 시험 결과에서 얻은 응력-변형 곡선들은 두 개의 강도 변곡점을 갖고 이것의 두 변곡점 사이 곡선의 경사는 첫 번째 변곡점 곡선의 것보다 훨씬 완만하다. 첫 번째 변곡점은 항복점으로 간주되고, 두 번째 변곡점은 두 번째 항복점으로 간주된다. 응력이 두 번째 변곡점 값에 도달했을 때 변형은 빠르게 증가한다. <그림 2> 및 <표 1~9>에서 알 수 있듯이 과단시 변형이 350%~400% 반면에 장력 강성은 약 40~50MPa이다. 항복응력은 14~16MPa까지 변하고, 두 번째 항복응력은 22MPa정도이다. 활선 탄성계수가 600~700MPa 반면에, 접선 탄성계수는 800~900MPa 이다. 두 번째 탄성계수는 50~60MPa이고, 활선 탄성계수의 1/10 보다 적다. 세 번째 탄성계수는 단지 약 3MPa이다. 프와송비는 0.39~0.45정도이다.





〈그림 2〉 ETFE 막재의 응력 변형 곡선

〈표 1〉 인장강도 (단위 :MPa)

두께/방향		시험체 번호					평균
		1	2	3	4	5	
200μm	MD	43.8	43.3	43.0	43.3	39.4	42.6
	TD	46.8	45.8	43.2	48.9	49.7	46.9
250μm	MD	41.9	46.2	42.8	47.2	39.5	43.5
	TD	42.0	49.4	45.1	42.1	44.4	44.6
300μm	MD	38	36.8	38.6	38.7	38.1	38.0
	TD	45.7	46.9	43.3	47.6	47.1	46.1

〈표 2〉 파단시 변형도 (단위 :%)

두께/방향		시험체 번호					평균
		1	2	3	4	5	
200μm	MD	358	359	354	359	329	352
	TD	382	373	363	389	400	381
250μm	MD	355	373	359	388	336	362
	TD	356	4009	382	357	370	375
300μm	MD	353	337	345	355	350	348
	TD	394	410	379	407	406	399

〈표 3〉 항복응력과 변형도 (단위 : 응력:MPa, 변형도:%)

두께/방향		시험체 번호					평균	
		1	2	3	4	5		
200 μm	MD	응력	14.8	14.8	14.7	14.7	14.6	14.7
		변형도	2.3	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
	TD	응력	14.6	14.5	14.6	14.8	14.8	14.7
		변형도	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1
250 μm	MD	응력	15.7	15.8	15.8	15.9	15.8	15.8
		변형도	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3
	TD	응력	15.4	15.6	15.6	15.6	15.9	15.6
		변형도	2.1	2.1	2.1	2.3	2.4	2.2
300 μm	MD	응력	13.8	14.1	14.3	14.3	13.9	14.1
		변형도	2.3	2.3	2.2	2.4	2.3	2.3
	TD	응력	13.9	13.7	14.1	13.9	14.0	13.9
		변형도	2.2	2.1	2.0	2.1	2.1	2.1

〈표 4〉 2차 항복응력과 변형도 (단위 : 응력:MPa, 변형도:%)

두께/방향		시험체 번호					평균	
		1	2	3	4	5		
200 μm	MD	응력	21.9	21.9	21.7	22.0	21.8	21.9
		변형도	14.7	15.1	14.2	14.7	14.4	14.6
	TD	응력	21.8	21.7	21.8	22.0	22.1	21.9
		변형도	14.5	14.4	14.5	14.2	14.4	14.4
250 μm	MD	응력	21.9	22.3	22.1	22.1	22.0	22.1
		변형도	15.0	15.3	14.4	14.5	14.5	14.7
	TD	응력	22.2	22.1	22.1	22.1	22.5	22.2
		변형도	15.4	15.3	15.4	15.0	15.7	15.4
300 μm	MD	응력	20.7	21.1	21.5	21.2	20.7	21.0
		변형도	15.7	14.9	15.4	15.2	14.7	15.2
	TD	응력	21.1	20.9	21.4	21.4	21.3	21.2
		변형도	15.1	15.2	15.3	15.6	15.6	15.4

〈표 5〉 접선 탄성계수 (단위 :MPa)

두께/방향		시험체 번호					평균
		1	2	3	4	5	
200μm	MD	894	994	877	854	857	895
	TD	886	834	882	868	851	864
250μm	MD	858	910	941	812	877	880
	TD	944	906	858	864	881	891
300μm	MD	785	797	926	792	740	808
	TD	818	816	882	860	857	847

〈표 6〉 활선 탄성계수 (단위 :MPa)

두께/방향		시험체 번호					평균
		1	2	3	4	5	
200μm	MD	649	710	689	670	675	679
	TD	640	652	670	658	666	657
250μm	MD	646	649	687	640	658	656
	TD	676	674	662	666	659	667
300μm	MD	595	624	665	616	606	621
	TD	627	609	628	625	627	623

〈표 7〉 2차 탄성계수 (단위 :MPa)

두께/방향		시험체 번호					평균
		1	2	3	4	5	
200μm	MD	56.8	55.5	58.9	57.4	58.8	57.5
	TD	58.4	59.0	58.2	59.3	59.0	58.8
250μm	MD	48.9	49.8	51.4	50.9	51.5	50.5
	TD	51.0	50.1	50.1	51.5	49.8	50.5
300μm	MD	51.5	55.0	55.1	53.9	54.8	54.1
	TD	56.2	55.1	55.4	56.0	55.1	55.6

〈표 8〉 3차 탄성계수 (단위 :MPa)

두께/방향		시험체 번호					평균
		1	2	3	4	5	
200μm	MD	2.9	4.4	3.4	3.3	3.0	3.4
	TD	3.2	3.1	3.4	3.1	2.9	3.1
250μm	MD	2.6	2.6	2.7	2.8	2.7	2.7
	TD	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
300μm	MD	2.9	2.3	2.4	2.5	2.5	2.5
	TD	2.7	2.5	2.4	2.5	3.0	2.6

<표 9> 프외승비

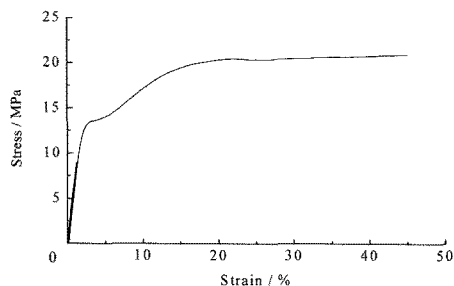
방향	시험체 번호			평균
	1	2	3	
MD	0.45	0.42	0.39	0.42
TD	0.43	0.44	0.42	0.43

3. 사이클 인장 시험

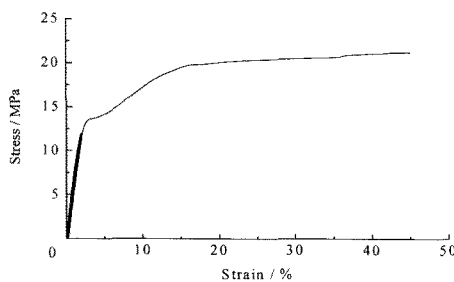
3.1 탄성단계의 사이클 인장

규정 응력(본 실험에서는 6MPa, 12MPa 두 종류의 응력을 선택)까지 인장한 후 응력 0까지 제하 한 이후에 다시 규정 응력까지 재하하는 사이클을 5회 반복하였다. 이 사이클이 완료된 후 변형률 40~50%까지 계속 인장한 후에 시험을 정지하였다. 이렇게 얻어진 사이클 인장 곡선은 <그림 3>과 같다.

<그림 3>에서 알 수 있듯이, 사이클 로딩 중 재하 곡선과 제하 곡선은 거의 포개어지고, 잔여 변형도는 명확히 나타나지 않으며, 사이클 인장 후의 인장곡선은 명확한 변화가 없다. 본 단계에서 ETEF 막재는 비교적 좋은 탄성 성능을 보이고, ETEF 막재 구조 설계 시, 재료 탄성 가정에 따라 설계를 진행할 수 있다.



(a) 사이클 하중(응력: 6 MPa)

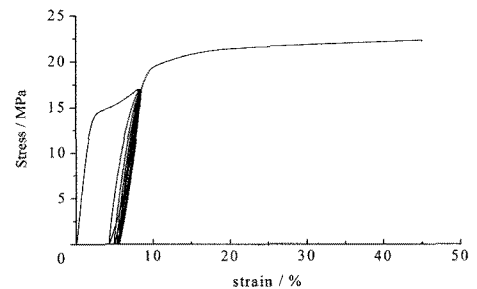


(b) 사이클 하중(응력: 12 MPa)

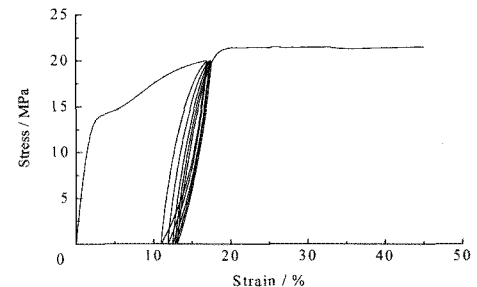
<그림 3> 탄성단계의 사이클 하중 재하

3.2. 항복 단계의 사이클 로딩

응력이 17MPa, 20MPa 일 때를 선택하여 항복 단계의 사이클 로딩 시험을 진행하여 <그림 4>와 같은 시험 결과를 얻었다. 사이클 과정 중의 응력 이완 현상을 고찰하기 위하여 변형율 10%, 15%의 사이클 인장 시험을 진행한 결과는 <그림 5>과 같다.



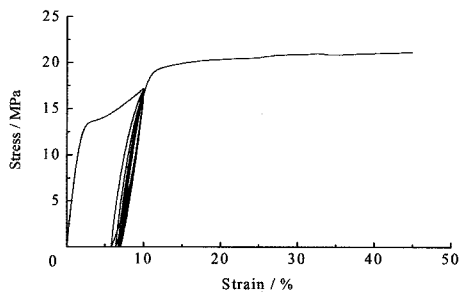
(a) 사이클 하중(응력: 17 MPa)



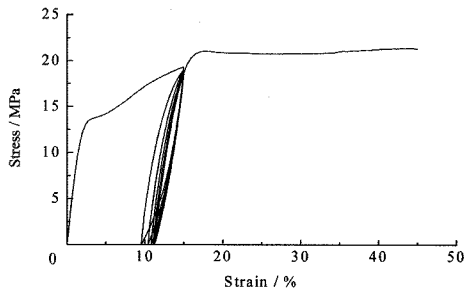
(b) 사이클 하중(응력: 20 MPa)

<그림 4> 항복 단계 사이클 하중 재하

<그림 4>, <그림 5>를 분석하면 알 수 있듯이, 첫 번째 사이클의 재하는 탄성단계의 인장곡선과 거의 평행을 이룬다. 응력 0까지 제하하면 비교적 큰 잔여 변형도가 발생한다. 재하를 지속한 후 곡선은 일정한 고리(loop) 형태를 띠는데, 사이클 횟수에 따라 증가하며 루프(loop) 곡선이 만드는 면적은 점차 감소한다. 매번 사이클 이후에는 소량의 잔여 변형도가 발생하지만, 잔여 변형도의 증가량은 작다. 5차 사이클 이후, 응력을 17MPa, 20MPa로 조절된 실험은 각각 잔여 변형도가 7%, 13% 정도 생겨난다. 변형도를 조절한 사이클 인장 결과<그림 5>에 따르면, 사이클 인장은 소량의 응력 이완을 발생시키고, 5차 사이클 이후 응력의 감소량은 5~10%에 이른다.



(a) 사이클 하중(변형도: 10%)



(b) 사이클 하중(변형도: 15%)

<그림 5> 항복단계 사이클 하중 재하

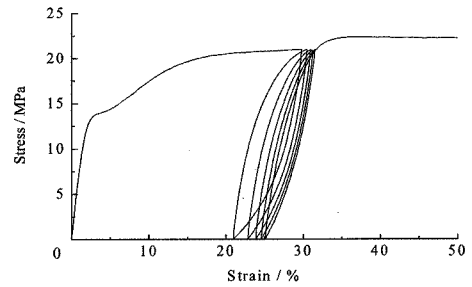
시험결과에서 알 수 있듯이, 사이클 인장을 거친 후에는, ETFE 막재의 탄성은 극도로 높아져 응력 경화 현상이 나타난다.

본 실험의 결과를 분석해 보면 항복 단계에서 ETFE 막재는 재하 이후 매우 큰 잔여 변형도를 발생시킨다. ETFE 막재의 재단(裁斷) 축소율은 보통 1% 이하로, 그 잔여 변형도보다 훨씬 작은 값이다. 그렇기 때문에 펼침식 ETFE 막재 구조 설계시, 공기 압력 하의 최대 표면 응력을 조절해야 할 것으로 생각한다.

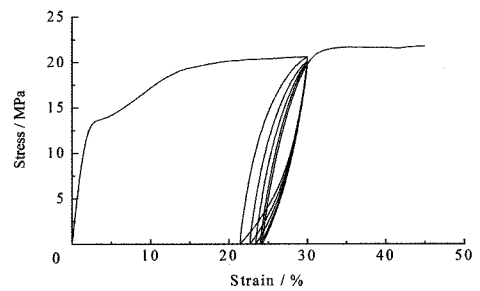
3.3. 소성흐름 단계의 사이클 로딩

ETFE 막재의 소성흐름 단계에서, 응력 21MPa, 변형도 30%로 정해 놓고 사이클 하중 재하 시험을 진행하여 그 결과는 <그림 6>과 같다. 이는 항복단계의 사이클 로딩 시험 결과와 비슷한데, 재하 이후 재료는 매우 큰 잔여 변형을 만들었고, 동시에 루프(loop) 곡선은 한층 이 넓어졌다. 사이클 횟수가 증가함에 따라, 루프(loop) 곡선이 둘러싸는 면적은 줄어들고 잔여 변형도는 증가하였다. 5차 사이클이 끝난 후 잔여 변형도는 대략 25%에 이르렀다. 마찬가지로, 사이클 인장 후, ETFE 막

재 재료의 탄성은 극도로 높아져 재료는 응력 경화를 나타낸다.



(a) 사이클 하중(응력: 21 MPa)



(b) 사이클 하중(변형도: 30%)

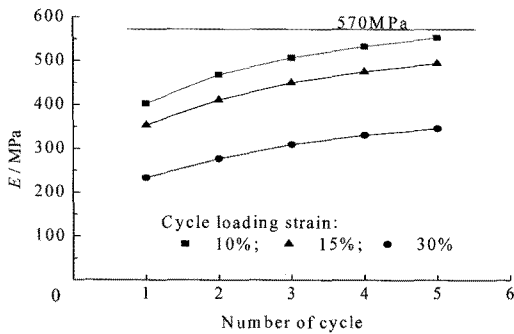
<그림 6> 소성흐름 단계의 사이클 로딩

3.4 응력-변형도 루프(loop) 곡선의 할선 경사도

사이클 하중 재하 과정 중 ETFE 막재의 탄성 특성을 평가하기 위하여, 재하와 재하 단계에서 응력-변형도 곡선의 할선(로딩 곡선의 최저점과 최고점을 이은 선) 경사도를 계산하여 보았다. 이 할선경사도는 사이클 하중 재하 과정의 탄성 계수와 가까워졌다. 같은 온도와 같은 인장속도의 조건으로 일축방향 인장 시험으로부터 얻은 ETFE 막재의 탄성단계 할선 탄성계수는 평균 670MPa 정도였다. 변형도 조절 사이클 하중 재하(사이클 변형도는 10%, 15%, 30%이다.)의 응력-변형도 루프(loop) 곡선에서 계산하여 얻은 할선 경사도는 3개의 시험 결과의 평균치로, 그 결과는 <그림 7>과 같다.

<그림 7>에서 보듯이, 항복 단계와 소성유동 단계의 사이클 로딩 한 ETFE 막재의 할선탄성계수는 그 탄성단계의 할선탄성계수보다 작다. 사이클 횟수가 증가할수록, 할선탄성계수는 점점 커지고,

변형도가 매우 큰 항복단계 사이클 로딩에 대하여 그 탄성 계수는 재료탄성단계의 활선계수에 근접하는 경향이 있다.



〈그림 7〉 응력-변형도 루프의 활선 경사도

4. 크리프 시험

본 논문에서는 온도 25, 40, 60℃에서 3MPa, 6MPa, 9MPa 응력의 ETFE 막재의 크리프 시험을 진행하였다. 크리프 시험이 경과한 시간은 24시간 이고, 실험 설비는 선전 신산쓰 재료 검측 주식회사(深圳新三思材料檢測有限公司)가 만든 CMT4204 형 시험기와 고저온 상자를 이용하였다.

이 크리프 실험에 사용한 ETFE 막재와 그 시험편의 형태는 4장의 사이클 인장실험과 같다. 시험편을 규정온도의 고저온 시험상자에 넣고 3mm/min의 인장속도에 맞추되, 규정 응력까지 로딩크기를 24시간 동안 변화시키지 않고 유지시켰다. 그 시간동안 일정한 시간 간격에 따라 고정 장치 간의 변위량을 측정하여 그것으로 ETFE 막재의 크리프 곡선을 얻었다.

〈표 10〉은 크리프 시험 시작할 때(0h), 12시간(12h), 24시간(24h) 경과 후의 각각의 변형도 결과를 나타낸다. 표에서 볼 수 있듯이, 3종류의 응력 상태(3,6,9MPa)와 3종류의 온도 상태 하에서 ETFE 막재는 모두 크리프 현상을 나타내었다.

응력이 3MPa일 때, 재료의 크리프량은 비교적 작운데, 상온 하에서 24시간의 크리프 변형도는 0.14%이며 수렴 추세를 보인다. 응력이 9MPa일 때 상온 하에서라도 매우 큰 크리프가 발생하였다. 예를 들면 25℃, 24시간의 크리프 변형도는 원래의 변형도를 넘어서고 또한 크리프 역시 크게

발생한다. 응력이 6MPa인 경우, 상온 하에서 발생한 크리프량은 그리 높지 않고(0.39%) 크리프 발전 역시 비교적 완만하다.

상온(25℃)에서 응력이 적은 조건(≤6MPa) 하에서 ETFE 막재의 크리프량은 그리 높지 않지만 온도가 40℃까지 올라가자 크리프량은 급속히 증가하고 응력이 커질수록 증가량도 많아진다. 40℃ 일 때, 응력이 3MPa, 6MPa인 상황에서 재료의 크리프는 발전 추세를 보인다. 응력이 9MPa인 경우, 24시간의 크리프량은 5%를 넘어선다. 온도가 60℃에 다다르자, 재료는 유연해지고 탄성계수는 감소한다. 크리프시험을 시작하자마자 변형도가 증가하고, 시작한 후 크리프가 명확히 발생한다.

〈표 10〉 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

5. 결론 및 고찰

ETFE 막재에 대하여 단축인장실험, 속도에 따른 인장 실험, 사이클 하중 및 크리프 시험을 수행하였다. 실험 결과를 분석해보면 다음과 같다.

1) 단축 인장실험 결과, 기계방향의 장력 특성과 횡력 방향의 것들 사이에 명확한 차이점이 없다는 것이 확인되었고, 이것은 막재는 등방성 재료의 타입으로써 취할 수 있다는 것을 의미한다. 파단 시 변형이 350~400% 반면에 장력 강성은 약 40~50MPa이다. 항복응력은 14~16MPa까지 변하고, 두 번째 항복응력은 22MPa정도이다. 활선탄성계수가 600~700MPa반면에, 접선탄성계수는 800~900MPa이다. 두 번째 탄성계수는 50~60MPa이고, 활선탄성계수의 1/10 보다 적다. 세 번째 탄성계수는 단지 약 3MPa이다.

2) 응력이 큰 항복응력 이후, 사이클 응력은 잔여 변형도를 발생시키고, 응력-변형도 곡선은 루프(loop) 현상을 만든다. 응력-변형도 루프(loop)

곡선이 에워싸는 면적은 사이클 응력이 증가함에 따라 증가하고, 사이클 횟수가 증가하면 감소한다. 항복 단계에서 사이클 로딩을 진행하면, 사이클 횟수가 증가할수록 루프(loop) 곡선의 할선경사도는 점차 ETFE 막재의 할선 탄성계수에 가까워진다. 사이클 인장을 거친 후, ETFE 막재의 탄성이 최대한 높아지면 응력 경화현상이 나타난다. 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℃에 이르면 크리프는 급속히 증가하고 발전추세를 지속한다. 온도가 60℃에 이르면 재료는 유연해지고 탄성계수는 감소하며 명확한 크리프 현상을 만든다.

참고문헌

1. फिल्म膜パネル委員會. ETFE फिल्म 패널設計·施工指針(案) [A]. 膜構造研究論文集 2005[C]. 東京:日本膜構造協會, 2005. II1~II 51.
2. 김재열, 강주원, "ETFE 막재의 재료성능과 구조시스템에 관한 연구", 대한건축학회 논문집(구조계), 25권 6호, pp.57-64, 2009
3. BS EN ISO 527, Plastics Determination of tensile properties, 1996
4. GB 13022-91, 塑料 薄膜拉伸性能試驗方法 (in Chinese)
5. DG/TJ08-2019-2007, 膜結構檢測技術規程 (in Chinese)
6. 尼爾森. 高分子和復合材料的力學性能.北京: 輕工業出版社, 1981.
7. 河端昌也, 森山史朗. ETFE फिल्म의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, 日本膜構造協會, pp.41-46, 2004
8. Kawabata M, Moriyama F. Study on viscoelastic characteristics and structural response of film membrane structures. IASS-APCS 2006 Symposium, Beijing, 2006
9. 김재열, 강주원, "인장속도가 ETFE막재의 역학적 특성에 미치는 영향", 대한건축학회논문집, 제26권 5호, pp.43~50, 2010. 5
10. 박강근, 윤승현, 배부환, "건축용 ETFE 필름 막의 역학적 특성 시험", 한국공간구조학회지, 제9권 2호, pp.77-82, 2009
11. 김재열, 배부환, "ETFE 필름 막 패널 설계에 대한 고려사항", 한국공간구조학회지 기술기사, 제8권 6호, pp.15-18, 2008
12. 배부환, 이창훈, "초경량 건축외장재 ETFE", 한국공간구조학회지 기술기사, 제9권 1호, pp.17-22, 2009