

유리섬유 막재의 역학적 특성에 관한 시험

Test on the Mechanical Characteristics of Glass Fiber Membrane

박 강 근*
Park, Kang-Geun

윤 성 기**
Yoon, Sung-Kee

요 약

막 구조는 형태의 다양성, 막의 가벼움과 내구성, 투광성 및 균질성 때문에 현대 건축물에 다양하게 사용되어 새로운 건축 세계를 열어가고 있다. 본 논문은 대공간 건축 구조물에 주로 사용되는 유리섬유 막 재료의 역학적 특성에 대한 연구이다. 현재 주로 사용되는 건축용 막 재료의 종류에는 PVC, PVF, PVDF, PTFE, ETFE 막재들이 있다. 본 연구에서는 이러한 건축용 막 재료에 대한 역학적 시험 방법을 정립하고, PTFE 코팅 유리섬유 막재에 대한 인장강도, 인열강도 및 반복하중 시험 등을 실시하여 건축용 막 재료의 역학적 특성을 분석하고자 한다.

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 membrane materials have fire proofing, lack of strength, self cleaning capacity, tear resistance, durability, heat insulation, sound insulation and elasticity. For the solution of this problems, it will be tested the mechanical properties of membrane material about tensile strength, tearing resistance, etc.

키워드 : 막 구조, 역학적 성질, 인장강도, 인열저항, 자정 능력

Keywords : Membrane structures, Mechanical properties, Tensile strength, Tearing strength, Self-cleaning capacity

1. 서 론

건축용 막재는 현재 전 세계적으로 다양하게 사용되어 건축 재료와 형태 디자인적인 면에서 새로운 건축 세계를 열어가고 있다. 최근에는 건축용 막 재료가 합성섬유나 유리섬유로 만들어져 역학적 성능이 우수한 소재들이 개발되어 전통적인 막재에 부족했던 내구성 및 안전성이 많이 개선되어 왔다. 건축용 막재의 가장 큰 장점은 가볍고 반투명하며 잘 접하기 때문에 대공간 구조의 지붕재료로 가장 각광을 받아왔다. 그러나 막재의 재료적 특성 때문에 소음, 단열, 인열강도, 자정능력 등에 대한 문제

점을 안고 있다. 1930년대에는 PVC, PVF, PVDF 막 재가 개발되었고, 1940년도에는 폴리에스터 섬유가 개발 되었다. 1970년대에는 PTFE 코팅 유리섬유 막 재가 개발되어 우리나라 월드컵 경기장의 지붕재료로 뿐만 아니라 전 세계적으로 대공간 구조물의 지붕재료로 많이 사용되어 왔다^{1,2)}. 최근에는 중국 북경 올림픽 주경기장 및 수영장의 지붕 재료로 햇빛 투광성이 우수한 ETFE 막재를 사용하여 새로운 건축적 이미지를 창조하기도 하였다. 건축용 막재가 국내에서 많이 사용되어 왔지만 체계적인 시험방법이나 역학적 특성에 대해서 정립되지 못하여 설계 및 시공 시에 재료의 역학적 특성을 잘못 이해하여 태풍이나 적설하중에 의해서 막재가 파손되어 건축물의 안정성 및 내구성에 문제점들이 발생되고 있다. 현존하는 국내 대공간 구조물의 막재료의 설계 및 시공의 오류로 인하여 막대한 비용을 투자하여

* 정회원 · 부산대학교 산업건축과 교수, 공학박사
Tel : 055-350-5345 Fax : 055-350-5349
E-mail : sampgk@pusan.or.kr

** 정회원 · 부산대학교 건축학부 교수, 공학박사

보수 및 보강을 하였고, 경제적인 이유로 지붕 시스템의 보강이 수행되지 않는 건물도 있다. 본 연구에서는 유리섬유 코팅 막재에 대한 인장강도, 인열강도, 접합강도, 반복하중 시험을 수행하고, 시험결과에 대한 데이터를 분석 정리하여 대공간 구조물의 설계 및 시공 시에 필요한 역학적 성능에 대한 기초적 자료를 제공하고자 한다.

2. 막재의 역학적 특성 시험

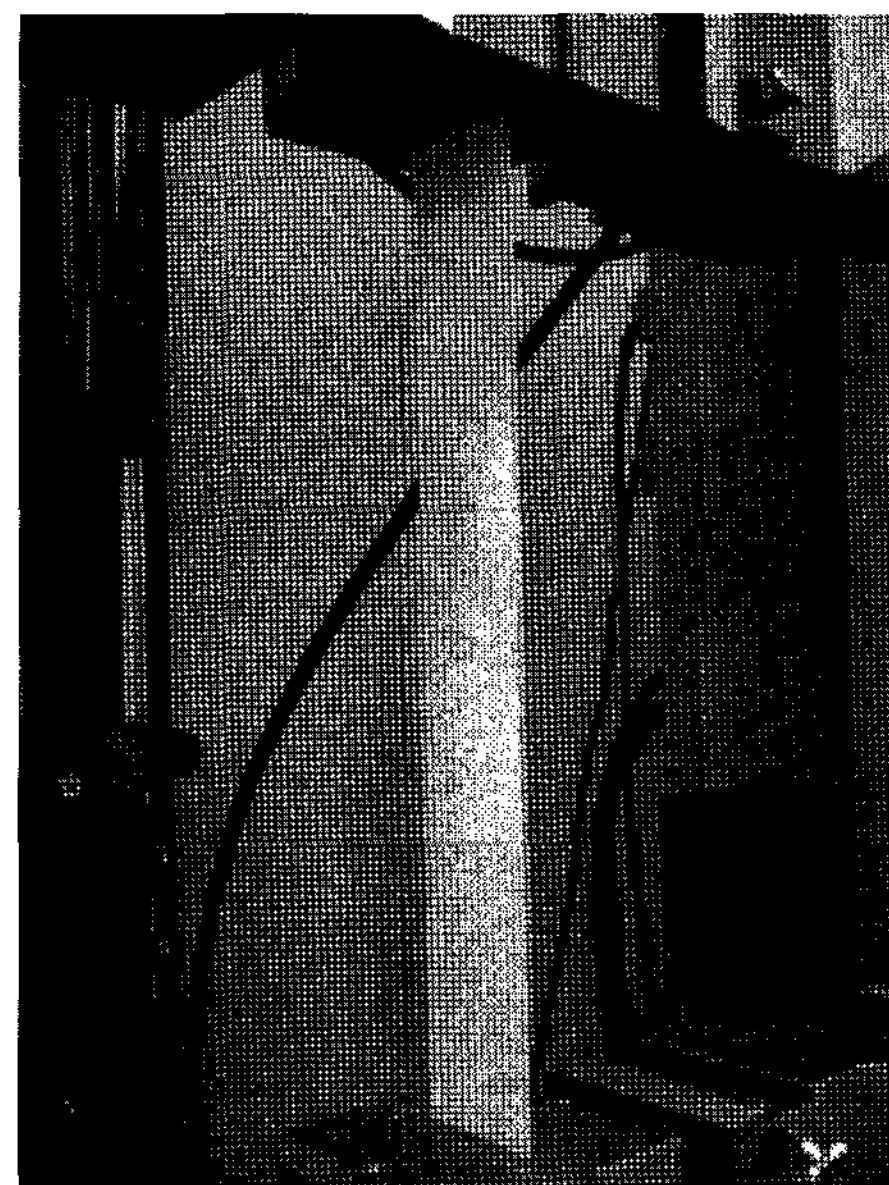
2.1 인장강도 시험

막재의 물리적 특성을 분석하기 위해서는 역학적 성능, 열 저항 및 성질, 내후성, 물 흡수 및 수압, 음향 특성, 광학 시험, 화학적 성능 등에 관한 시험 등이 이루어 져야 한다고 생각된다. 본 연구에서는 막재의 역학적 성능 중에서 가장 중요한 막재의 인장강도, 인열강도, 접합강도, 반복하중시험에 대한 역학적 특성에 대한 연구를 수행하고자 한다.

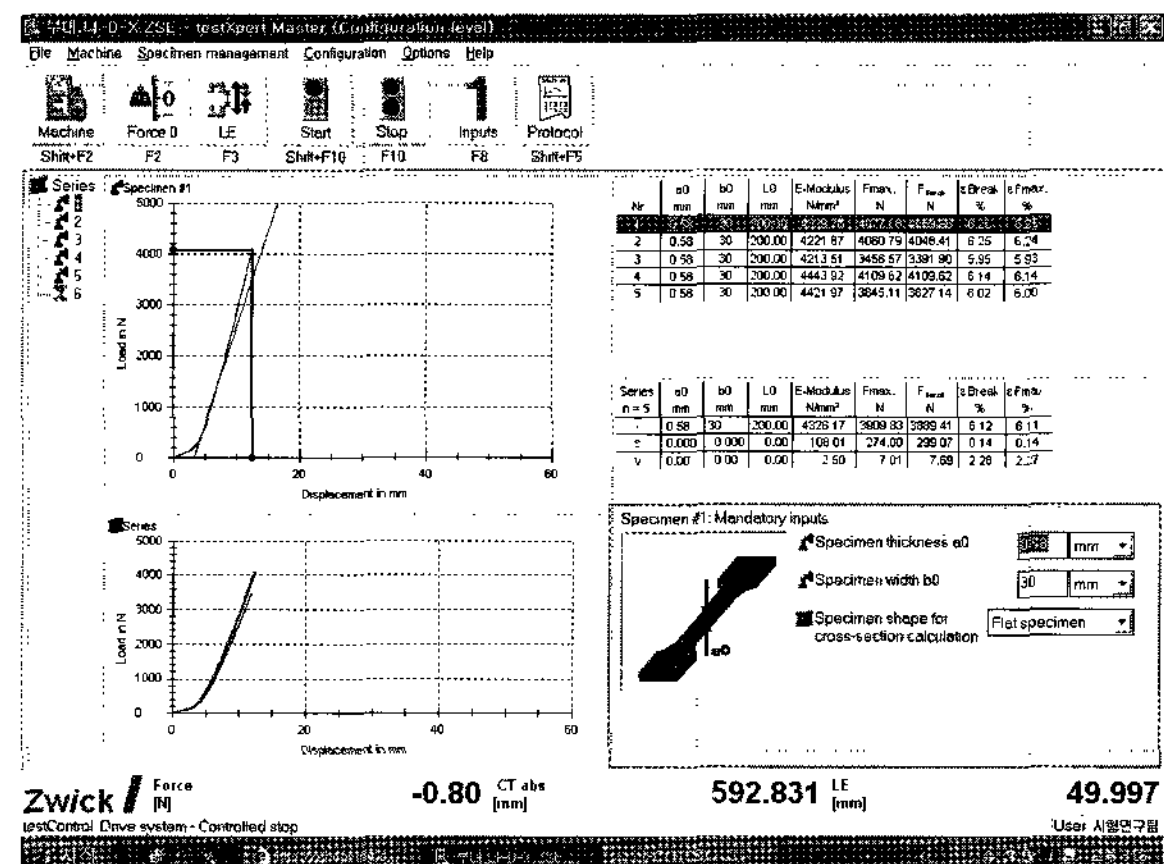
2.1.1 1축 인장강도 시험

1축 인장강도 시험법은 막재의 인장강도, 신율 등을 구하기 위해서 스트립법(Strip method)과 그라브법(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, 클램프 간격 200mm, 시험속도 200mm/min), ASTM D 4851(시험폭 25.4mm, 클램프 간격 75mm, 시험속도 50mm/min), DIN 53354(시험체 폭 50mm, 클램프 간격 300mm, 시험속도 100mm/min)에 정의 되어 있다. 필요한 경우에 시험체 크기를 임의로 조정할 수 있다. 그라브법에 의한 직물의 인장 강도는 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 섬유 광폭시험에 주로 사용한다. 시험편의 준비는 다음과 같다. 각 시험편은 직물의 경사(warp)방향과 위사(weft)방향에 대해서 평행하게 절단을 하여야 하고 동일한 울수가 되도록 하여야 한다. 시험편은 각 시료의 방향에 대해서 5개 이상으로 한다. 클램프의 파지 면이 미끄

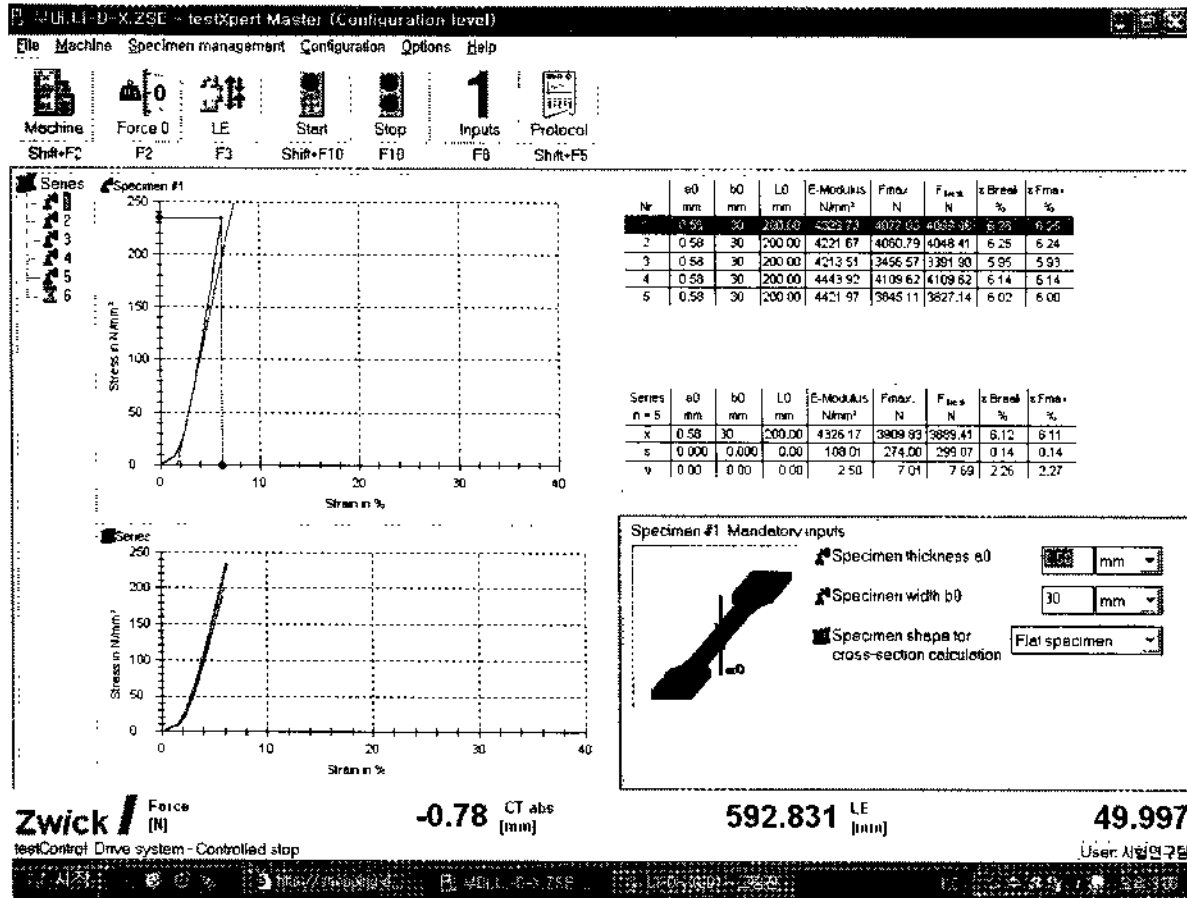
러지지 않도록 하기 위해서는 고무, 종이, 펠트, 가죽, 플라스틱 등을 대어준다. 클램프에서 미끄러지거나 클램프 모서리에서 5mm 내에서 파단된 시험결과를 버린다. 시험실용 시료는 벌크 샘플로부터 전폭으로 1m 이상의 길이의 시험용 시료를, 각 벌크의 끝 부분에서 3m 이상 떨어진 곳에서 무작위로 채취한다. 시험편을 채취할 때는 전체 나비의 1/10 이상 떨어진 곳에서 채취한다. 경사방향에 대해서 시험을 할 때는 시험편의 긴 방향이 경사와 평행하게 되어야 하며, 위사방향에 대해서 시험을 할 때는 시험편의 긴 방향이 위사와 평행하여야 한다^{2~5)}.



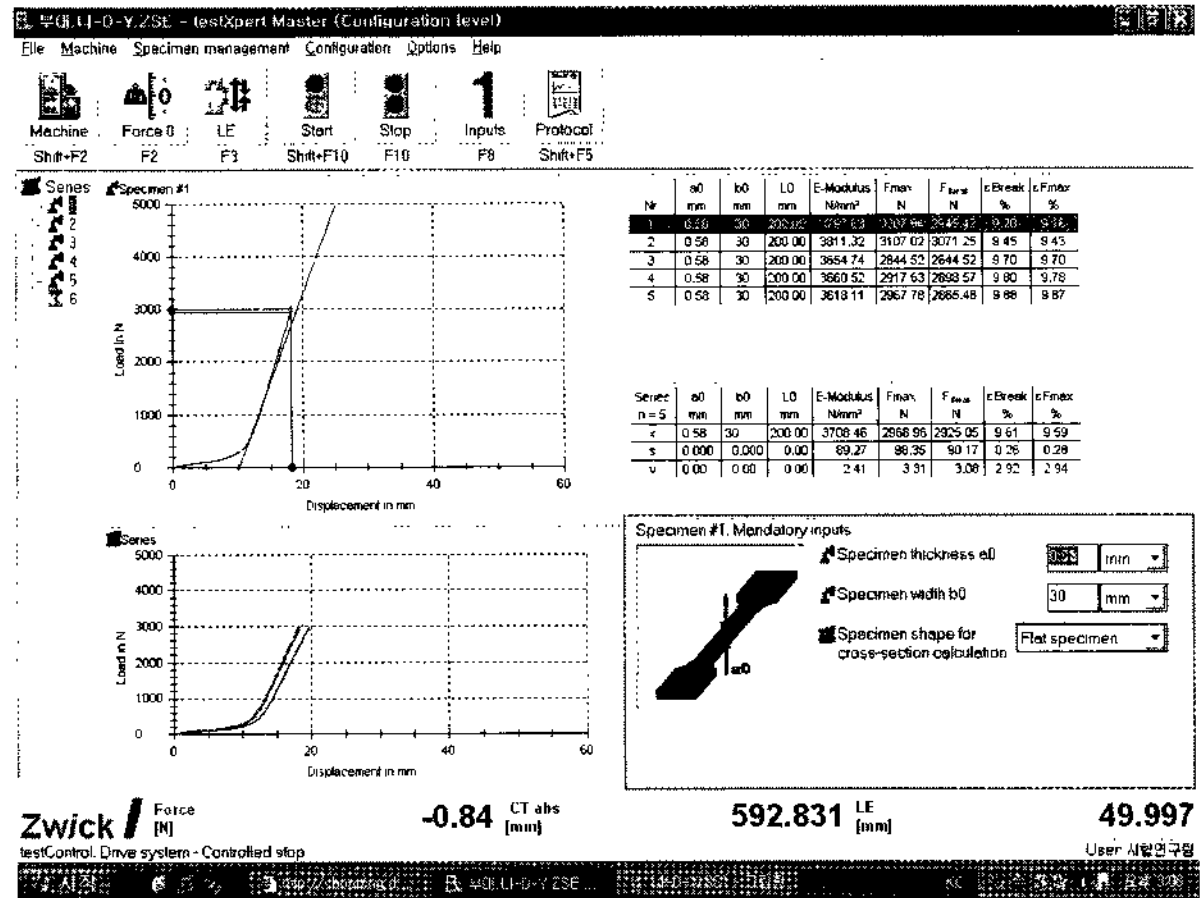
〈그림 1〉 유리섬유 막의 인장시험 사진(스트립법)



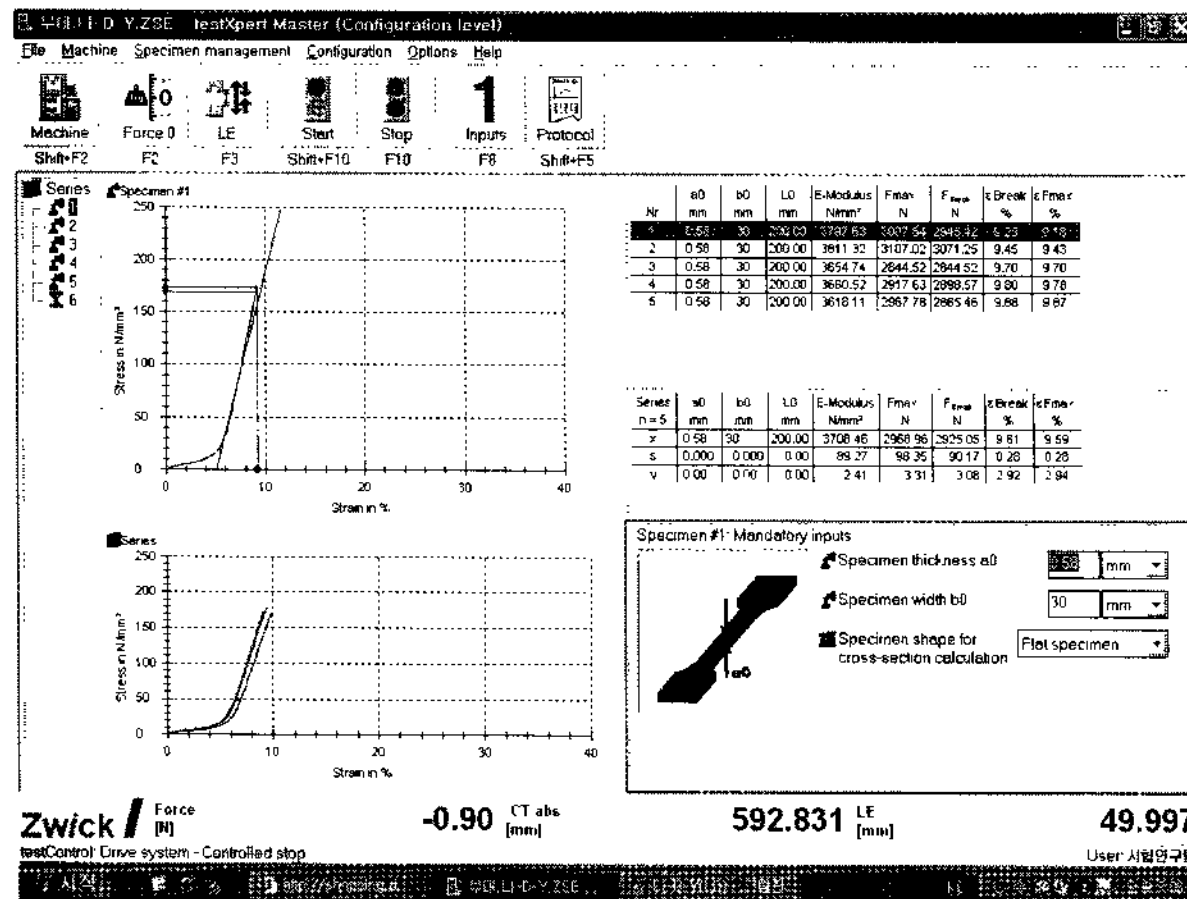
〈그림 2〉 유리섬유 막의 경사방향 하중-변위 곡선 (스트립법: 폭 30mm, 클램프 간격 200mm)



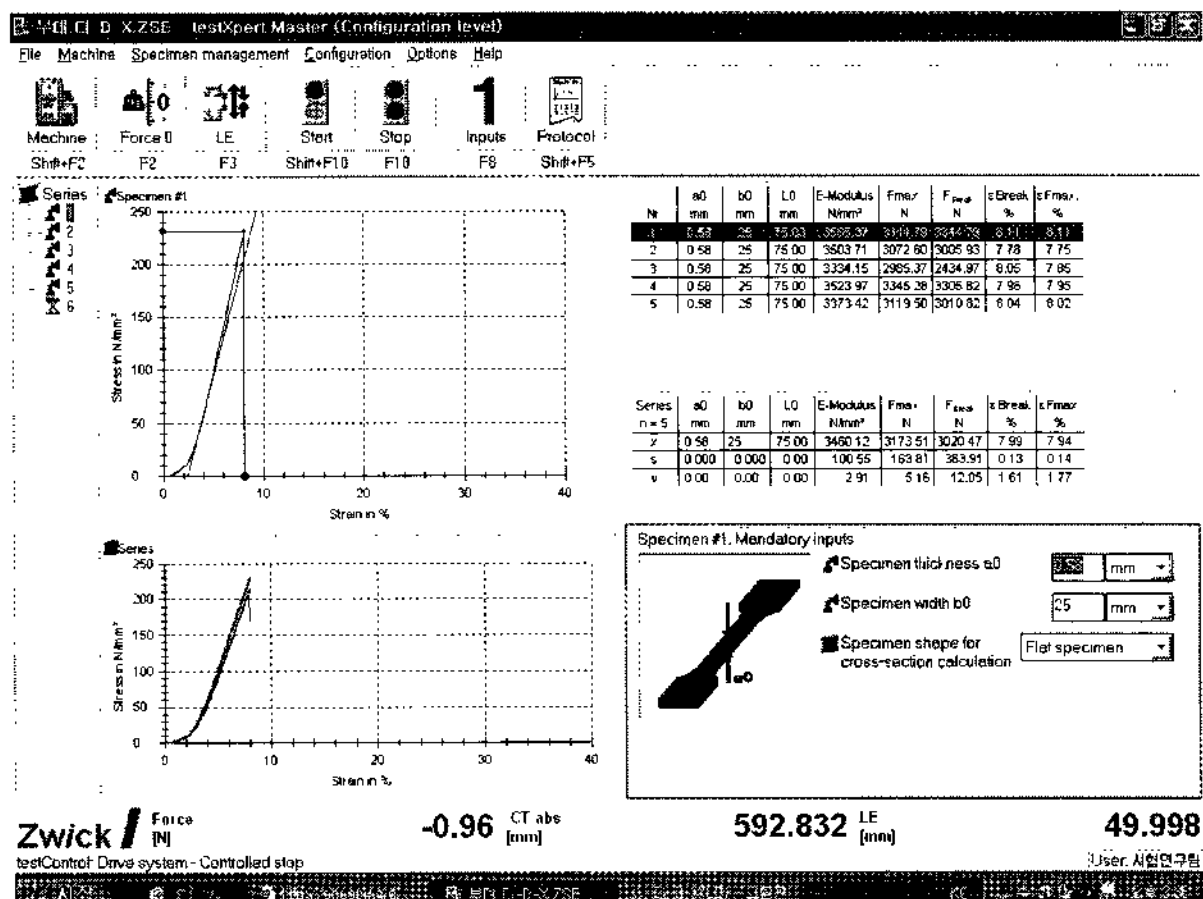
〈그림 3〉 유리섬유 막의 경사방향 응력-변형도 곡선 (스트립법: 폭 30mm, 크램프 간격 200mm)



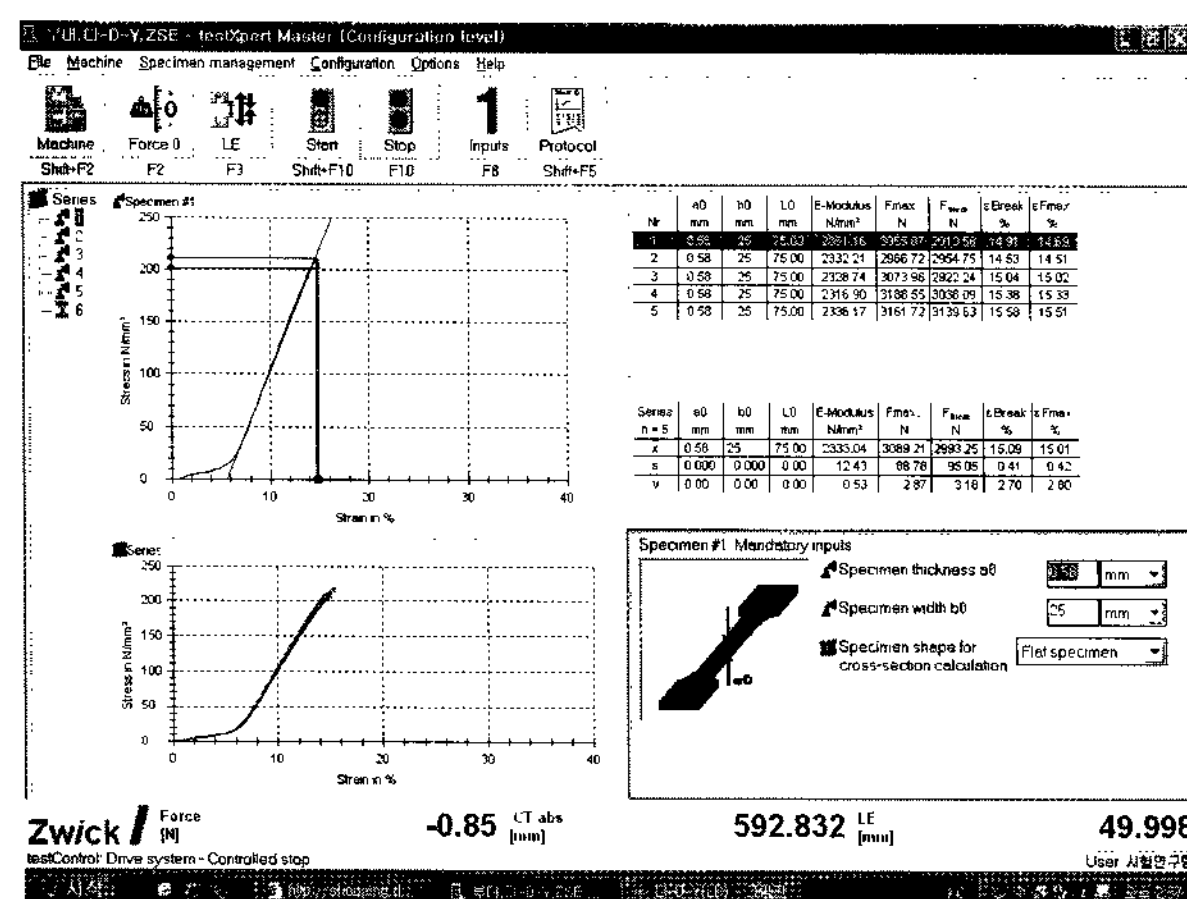
〈그림 4〉 유리섬유 막의 위사방향 하중-변위 곡선 (스트립법: 폭 30mm, 크램프 간격 200mm)



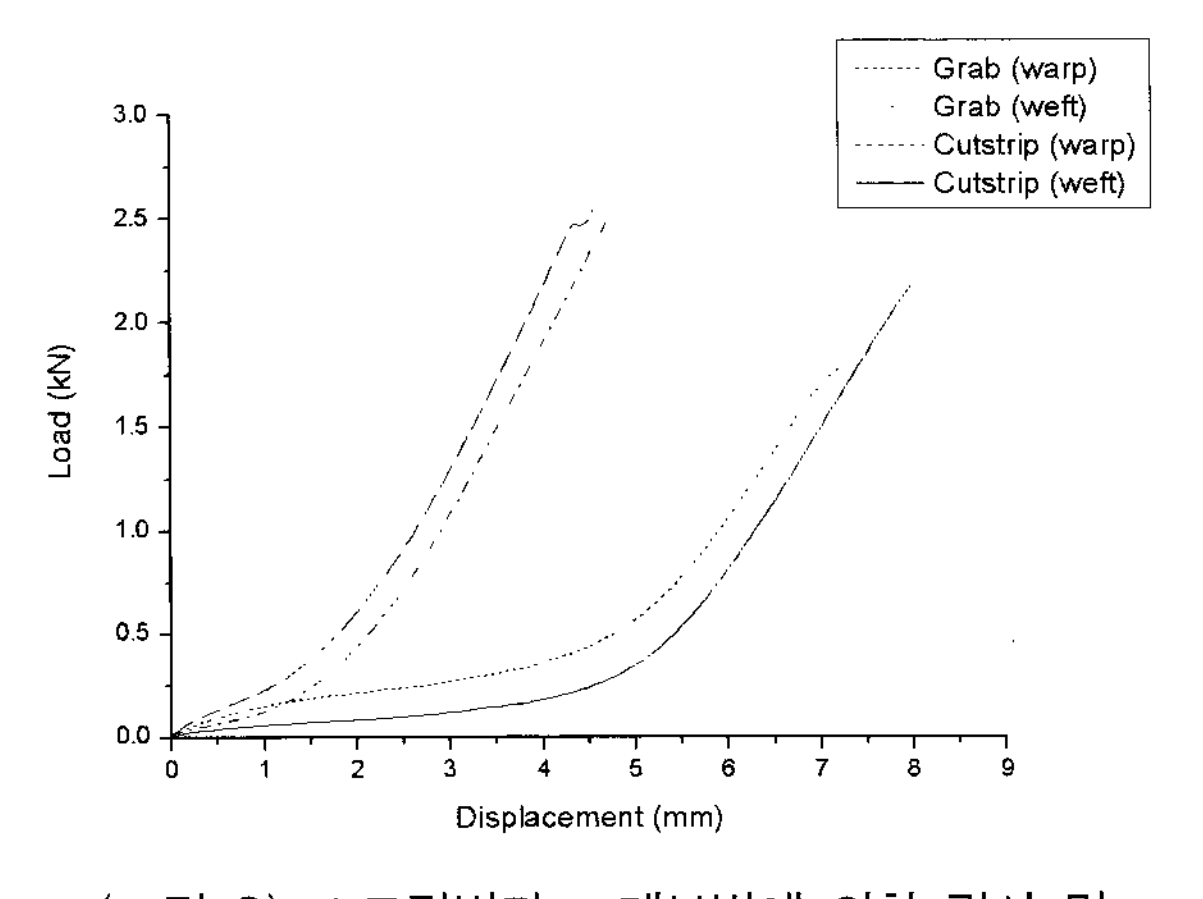
〈그림 5〉 유리섬유 막의 위사방향 응력-변형도 곡선 (스트립법: 폭 30mm, 크램프 간격 200mm)



〈그림 6〉 유리섬유 막의 경사방향 응력-변형도 곡 (스트립법: 폭 25mm, 크램프 간격 75mm)



〈그림 7〉 유리섬유 막의 위사방향 응력-변형도 곡 (스트립법: 폭 25mm, 크램프 간격 75mm)



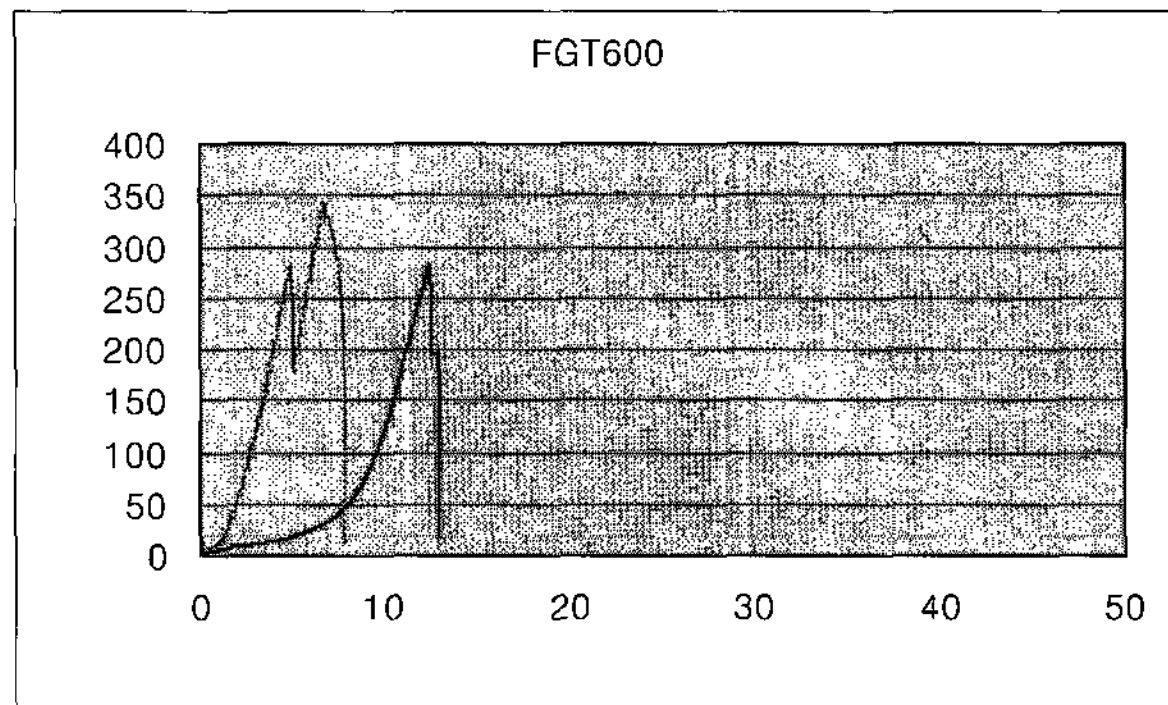
〈그림 8〉 스트립법과 그라브법에 의한 경사 및 위사방향 하중-변위 곡선 비교 (시험체: 폭 25mm, 크램프 간격 100mm)

2.1.2 2축 인장강도 시험

대공간 구조물에 사용되는 막재는 바람 등의 하중에 의해서 반복적인 2축으로 하중을 받고 있고, 경사 방향과 위사 방향의 내력이 다르기 때문에 2축으로 동시에 인장력을 가하여야만 보다 바람직한 인장 내력을 얻을 수 있다고 사료 된다. 본 연구에서는 섬유유 크리프 시험장치를 이용하여 2축 인장 시험을 하는 방법을 제안 하고자 한다. 시험편의 크기는 사용되는 장비의 크기에 맞추고 게이지 길이를 표시한 기준점과 그림 사이가 200mm 이상 되도록 하면서, 그림 사이의 최소 게이지 길이가 확보 되어야 한다. 하중은 일정한 온도와 습도에서 일정한 정하중을 시험편에 부가 한다. 1축 크리프 시험체 시편은 폭 50mm, 길이 200mm, 클리프 물림 길이는 20mm이다. 2축 인장 시험체 시편은 2축 크리프 시험체와 동일하게 경사방향과 위사방향에 대해서 시험체 폭은 50mm, 시험체 길이는 양 방향으로 200mm로 하였고, 크리프 물림 길이는 20mm로 하였다. 그리고 2축 인장 시험체의 경사방향과 위사 방향의 인장강도를 측정하였다.



<그림 9> 2축 크리프시험 및 인장시험 장치



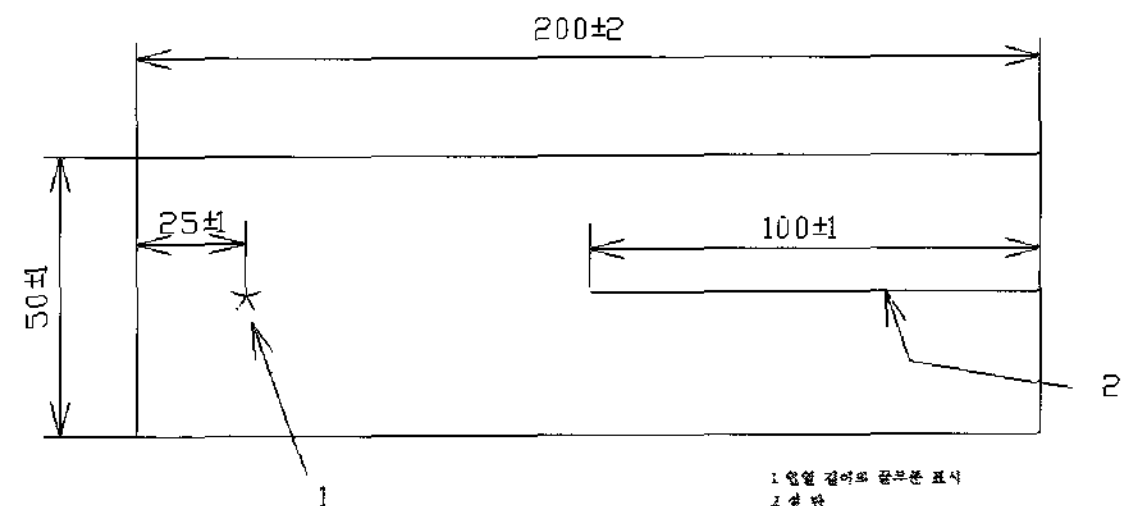
<그림 10> 2축 크리프 시험기를 이용한 2축 인장 시험결과(시험체 : 폭 50mm, 클램프 간격 200mm)

2.2 인열강도 시험

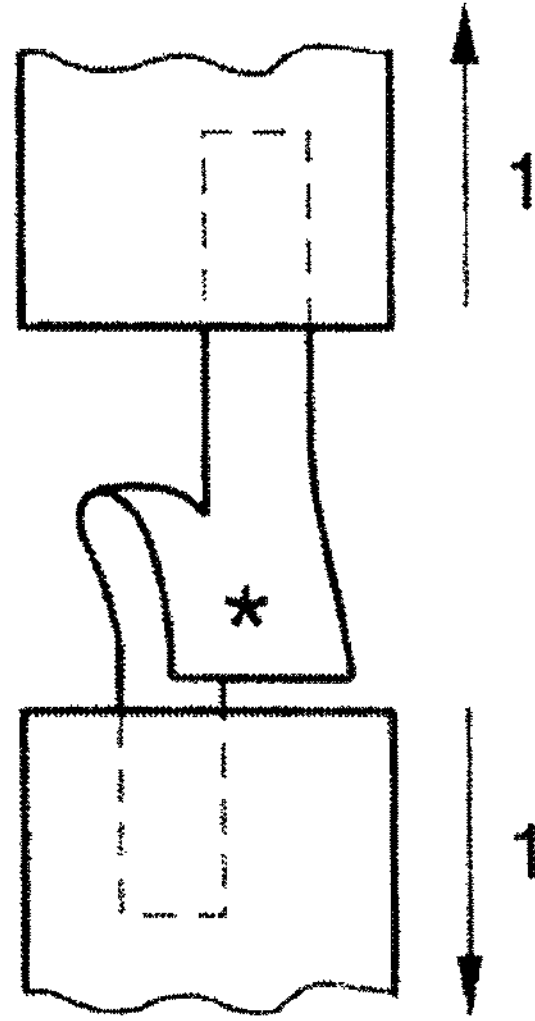
2.2.1 싱글 인열법에 의한 인열강도 시험법

싱글 인열법(Single tear method)에 의한 시험방법은 직사각형 시험편의 짧은 변의 중심을 절단하여 바지모양으로 만들고, 그 가랑이를 기록이 가능한 인장 시험기의 클램프에 직선이 되도록 물려 직물을 인열하기 위해 절단한 방향으로 당긴다. 규정된 거리까지 인열시켜 하중을 기록한다. 시료로부터 2개의 시험편을 채취한다. 1개는 경사방향, 1개는 위사방향에서 채취해야 한다. 직물 이외의 경우에는 길이 및 가로와 같은 적당한 방향 표시를 한다. 각 방향으로 최소 5개 또는 동일한 그 이상의 시험편으로 한다. 세로나 가로방향의 실을 포함한 시험편이 있으면 안 되며 시료의 가장자리에서 150mm 이내에서 채취해서는 안 된다. 시험편의 길이 (200±2)mm, 폭 (50±1)mm 크기의 직사각형으로, 폭의 중심에서 길이가 (100±1)mm 되도록 길이 방향으로 자른다. 인열시험을 끝내는 위치를 나타내기 위하여 시험편의 절단하지 않은 끝에서부터 (25±1)mm 되는 부분에 표시를 한다⁶⁾.

싱글 인열법은 시험편을 바지모양 형태로 하여 직물의 인열강도를 구하는 방법이다. 인열강도는 시험편의 자른 부분과 평행하게 힘을 가하여 시험편이 힘을 가한 방향으로 찢어질 때 먼저 발생한 인열을 전파시키기 위해 필요한 힘이다. 시험편의 절단선이 중앙선을 지나가도록 맞추고 시험편의 가랑이에 하나씩 물린다. 시험편의 절단되지 않은 끝부분은 자유롭게 둔다. 인열의 발생이 절단된 부분과 평행이 되도록 하며 가하는 힘의 방향으로 시험편의 각 가랑이가 위치하도록 주의한다. 시험이 시작 될 때 초기하중은 가하지 않는다⁶⁾.

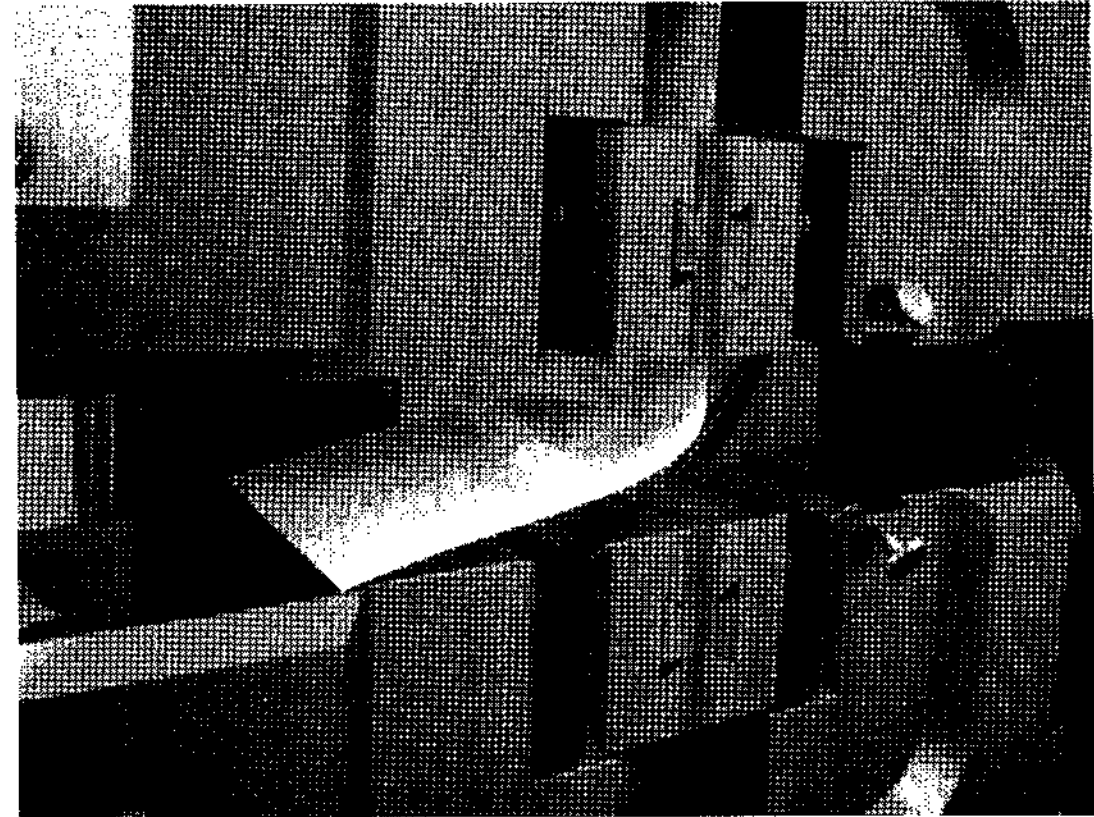


<그림 11> 바지모양 인열 시험체 형상

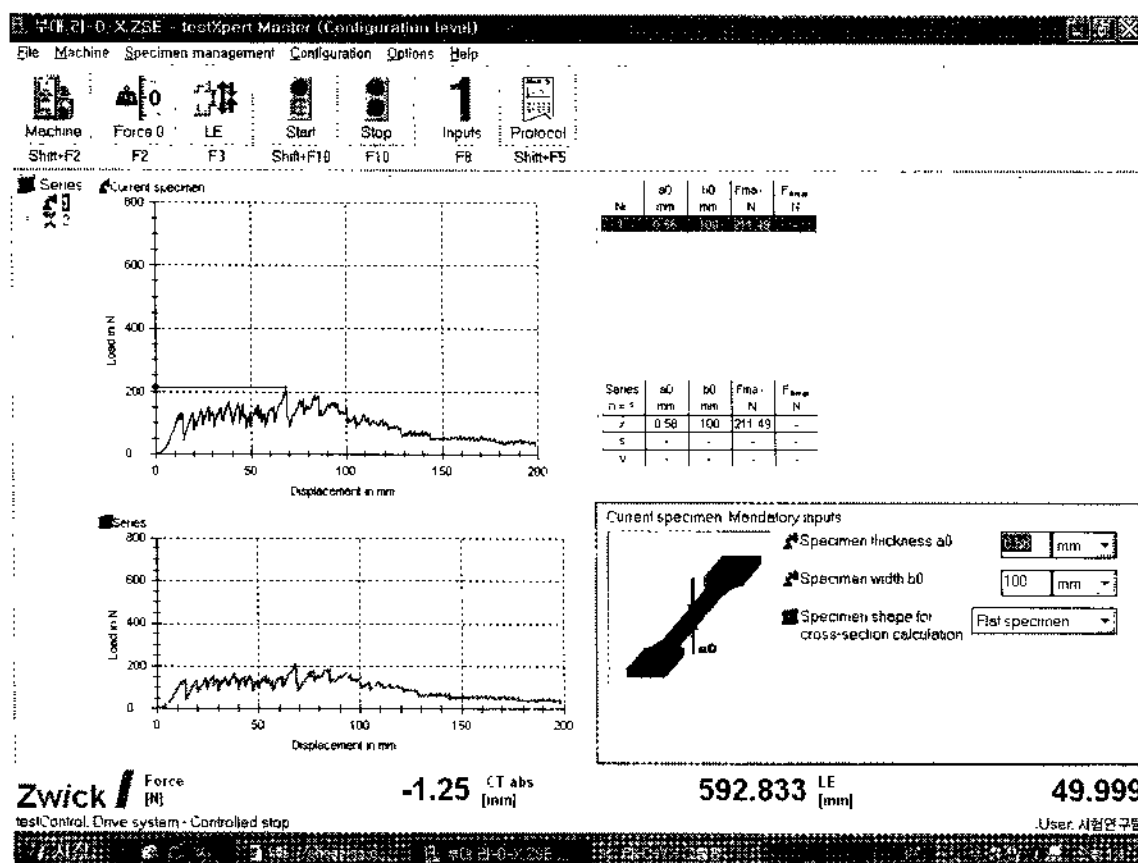


1 조

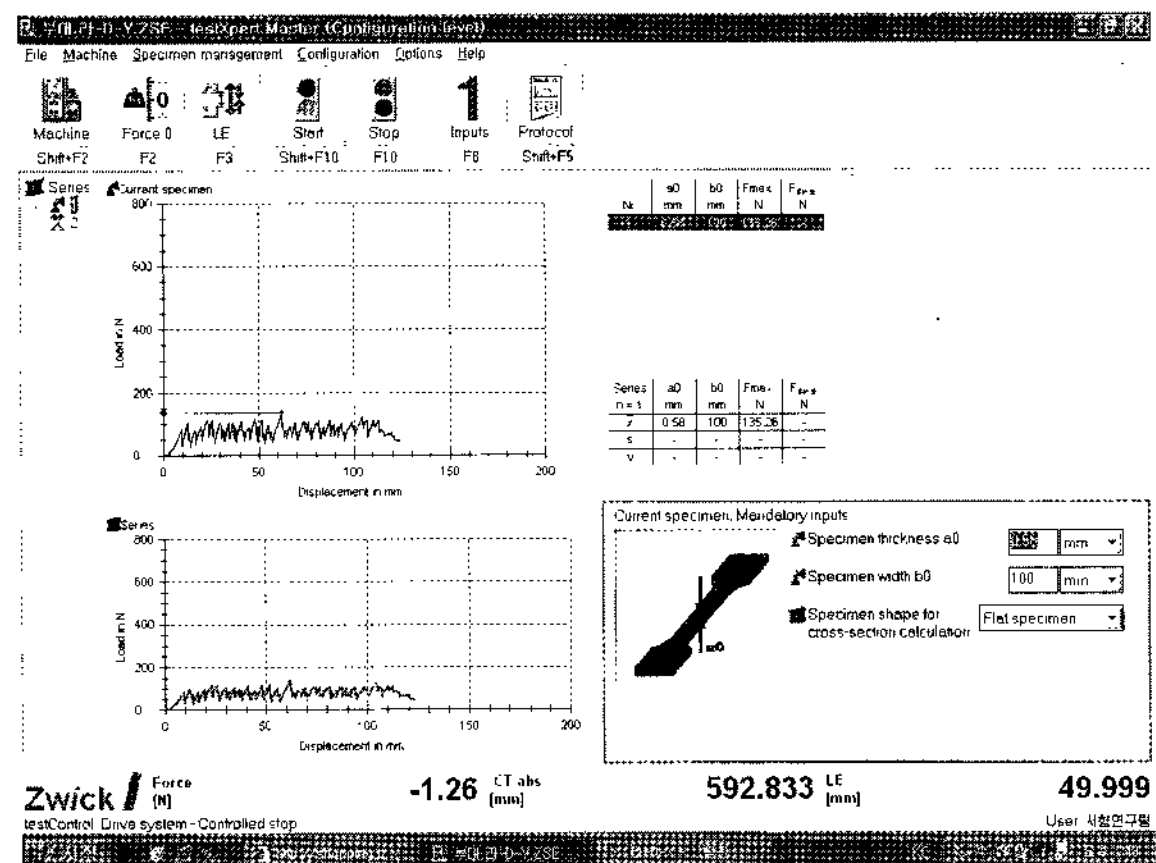
<그림 12> 싱글 인열 시험편의 파지형태



<그림 13> 싱글 인열법에 의한 인열시험 사진



<그림 14> 싱글 인열법에 의한 경사방향 시험결과



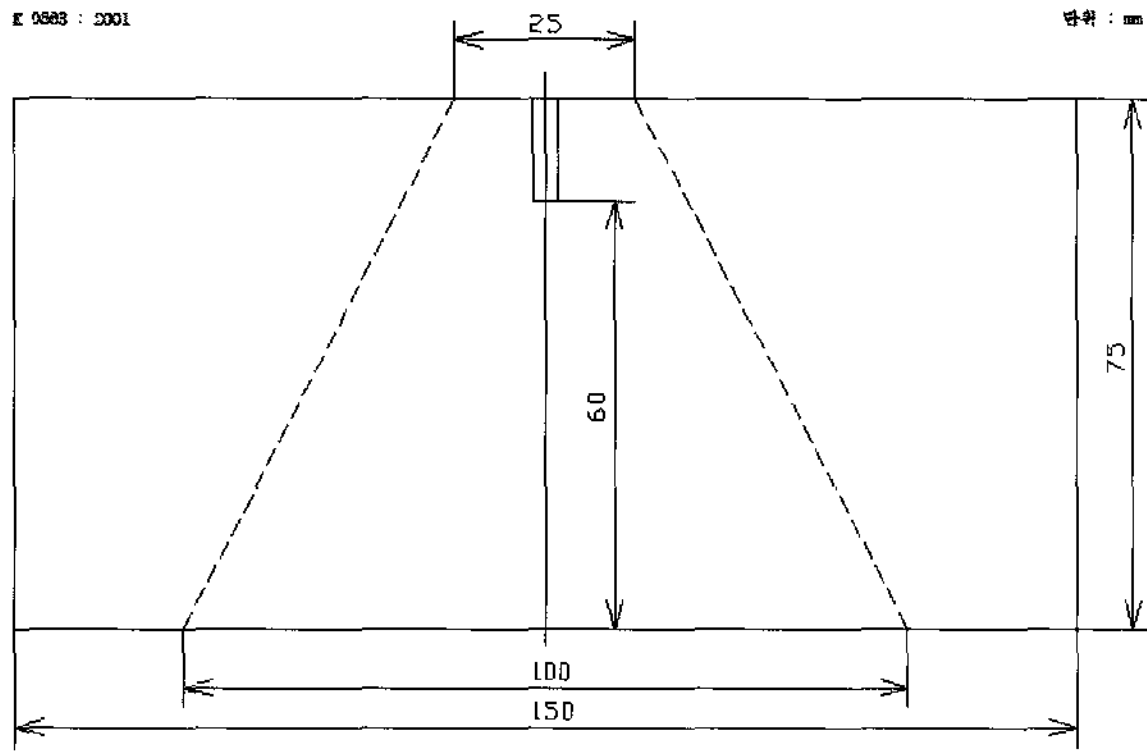
<그림 15> 싱글 인열법에 의한 위사방향 시험결과

인열강도를 기록하기 위한 장치를 작동방법 및 시험방법은 다음과 같다. 이동 클램프를 100mm/분의 속도로 움직이게 한 후에 시험편의 끝부분에 표시한 점까지 인열시킨다. 인열강도 시험 시에 힘이 가해지는 방향을 따라 인열이 되는지 그리고 실이 찢어지지 않고 시험편으로부터 밀리지는 않는지 관찰한다. 시험편에서 실의 밀림이 없고 힘이 가해진 방향으로 인열이 되었다면, 이러한 인열은 정확하다고 볼 수 있다. 이러한 조건 외의 다른 결과들은 시험 결과에서 무시하여야 한다⁶⁾.

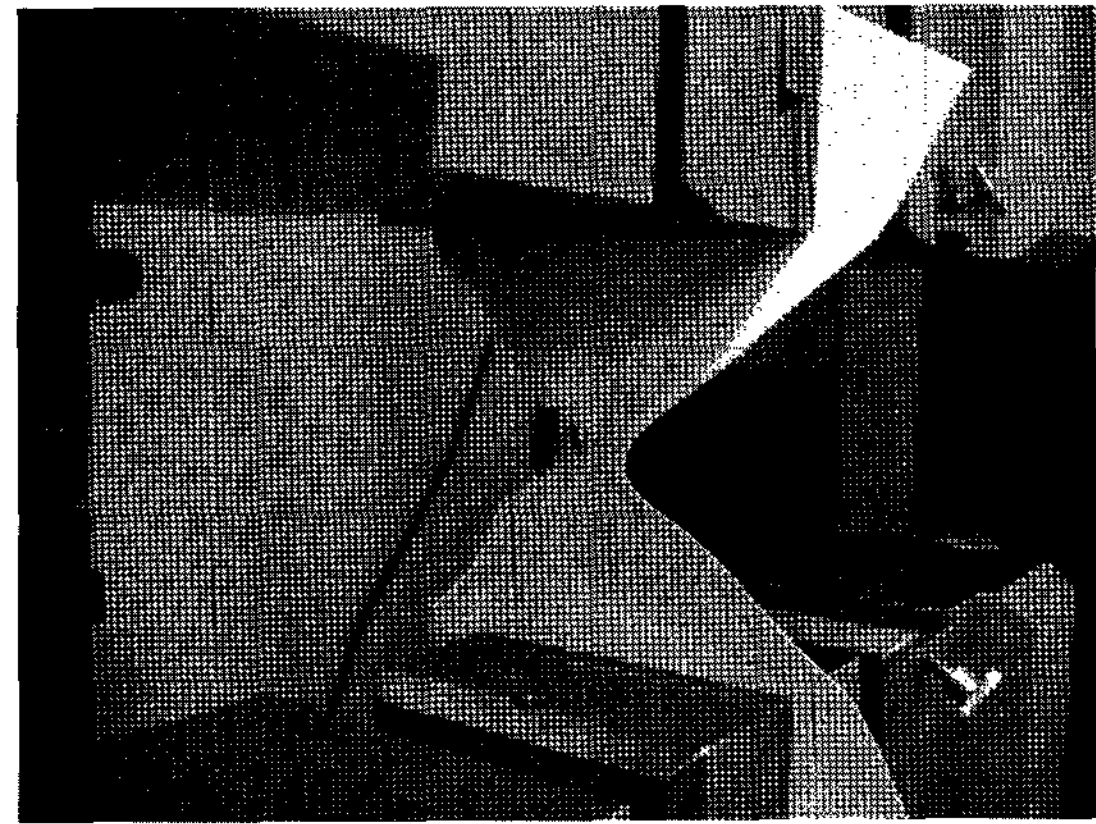
2.2.2 트래피조이드법에 의한 인열강도 시험

인열강도 시험편에서 트래피조이드(Trapezoid) 형태는 <그림 16>과 같다. 인장 시험편에 트래피조

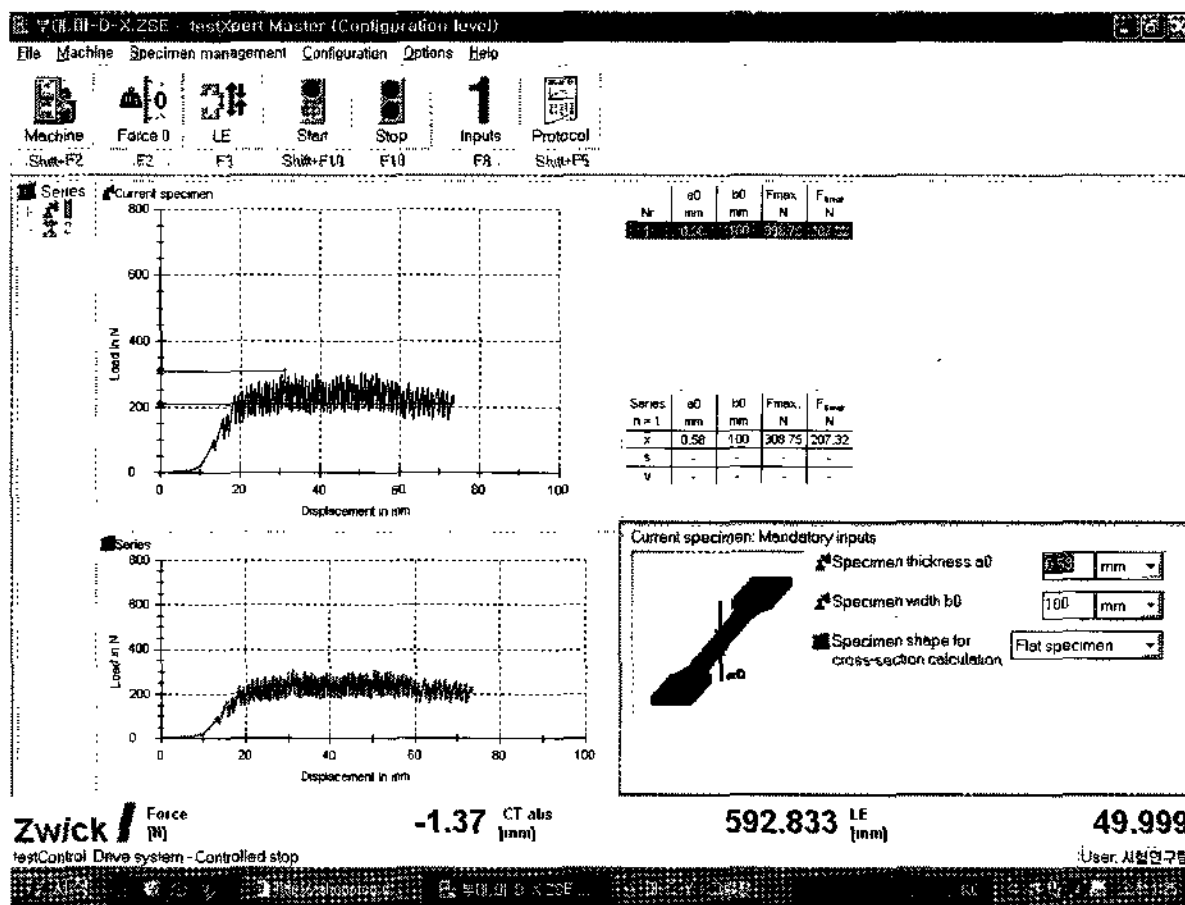
이드의 평행하지 않은 면(점선 부분)을 파지한다. 시험시에는 인열이 폭을 가로질러 전달되도록 시험편을 연속적으로 신장시킨다. 최대 인열 강도의 평균을 측정한다. 75mm×150mm의 크기로 시험편을 자르고, 각 시험편에 형판 또는 적당한 방법을 사용하여 이동변 사다리꼴의 표시를 하고, 짧은 변 중앙에서 변과 직각으로 15mm를 미리 잘라 놓는다. 시험편을 시험기의 클램프 사이의 중앙에 잘려진 부분이 오도록 사다리꼴의 사선을 따라서 파지시킨다. 사다리꼴의 짧은 변이 팽팽하게 파지되고 긴 변이 접혀지도록 물린다. 시험기를 작동하여 인열이 끝날 때까지의 인열하중을 기록장치로 기록한다. 만약 미리 자른 부위에서 인열이 발생되지 않으면 그 결과는 버린다. 길이 및 폭 방향으로 각각 5개 시험편에



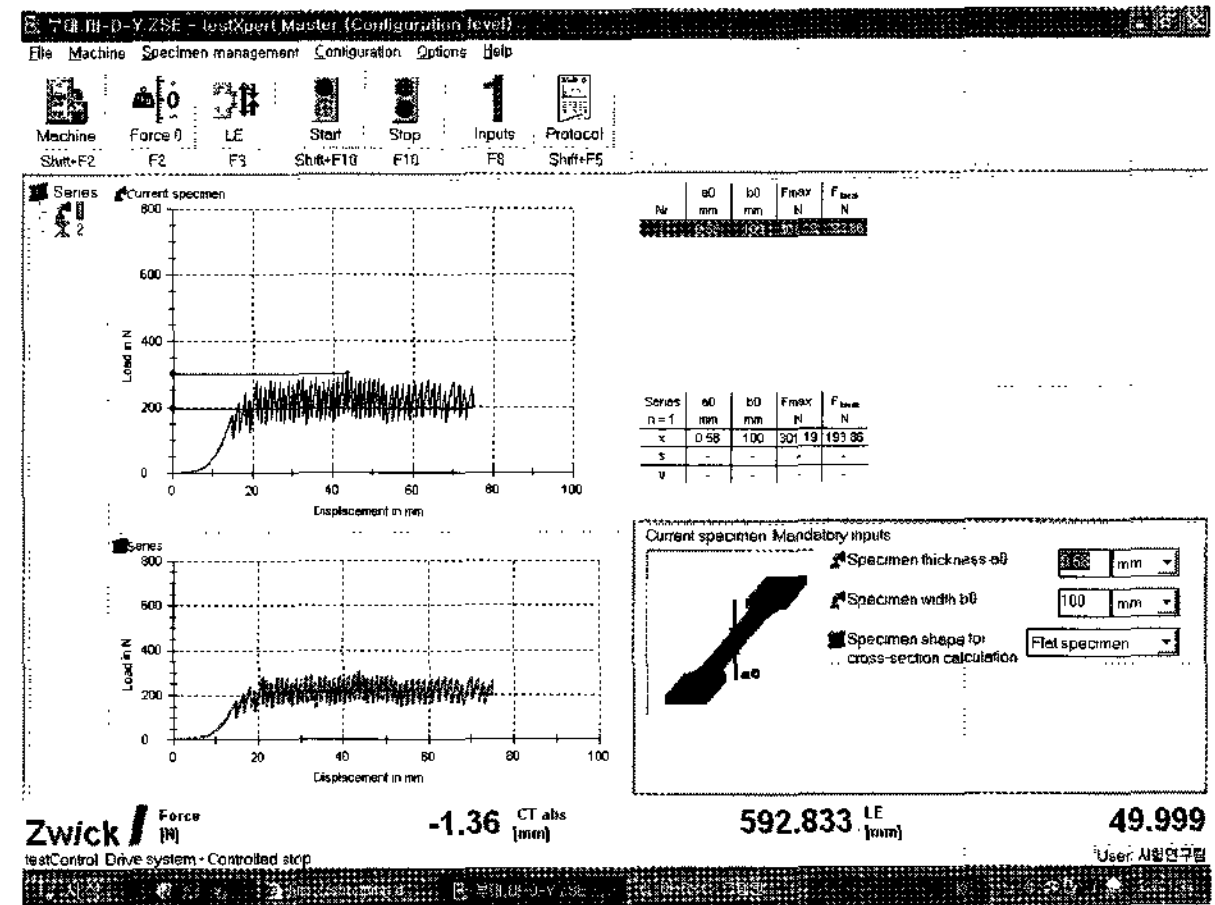
〈그림 16〉 트래피조이드법에 의한 시험체 형상



〈그림 17〉 트래피조이드법에 의한 인열시험 사진



〈그림 18〉 트래피조이드법에 의한 경사방향 시험결과

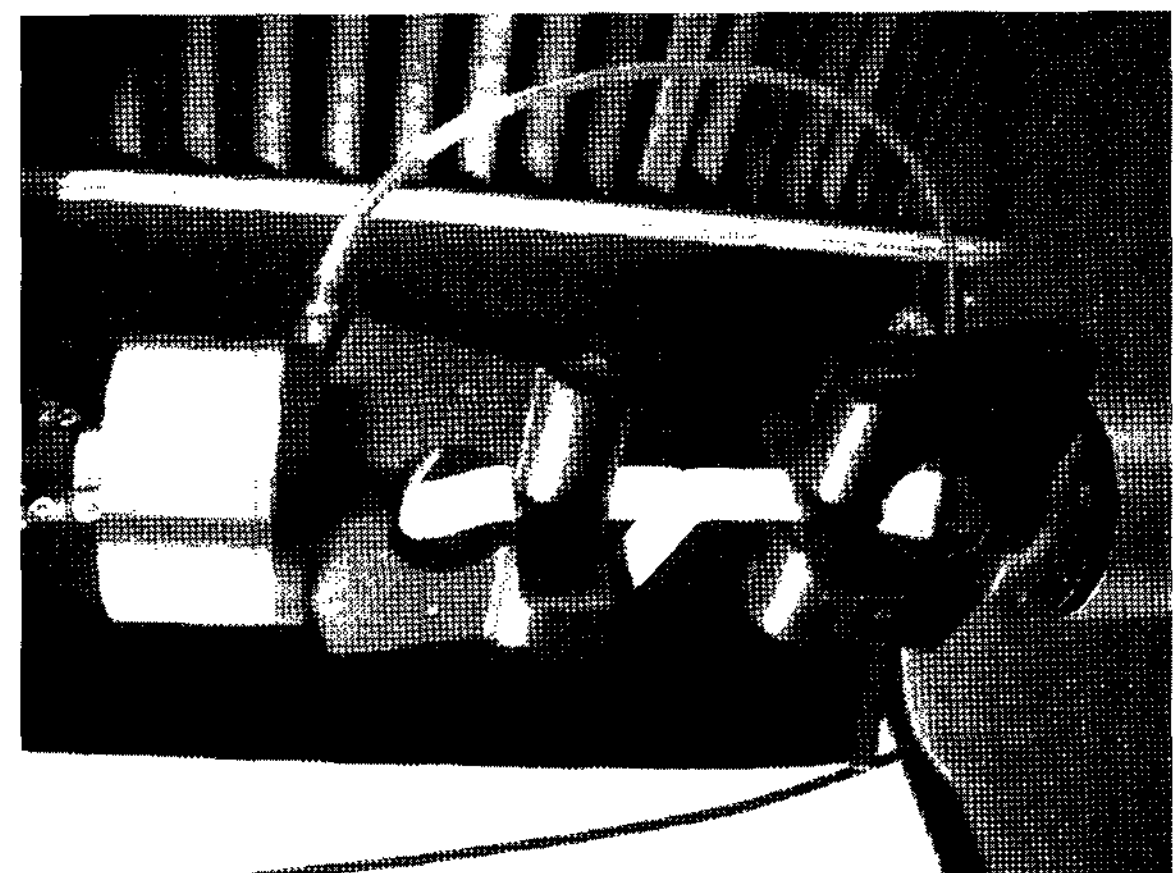


〈그림 19〉 트래피조이드법에 의한 위사방향 시험결과

대해 기록계 위에 표시된 피크의 평균 하중값을 측정한다. 결과적으로 기록계 위에서 각 시험편에 대해 하나의 하중 피크로 계산된다. 길이 및 폭 방향으로 각각 5개 시험편에 대해 평균값 및 변동계수를 측정한다. 클램프의 이동거리는 클램프 사이의 간격 25mm에서 시작과 함께 측정된다. 인열저항은 시험편이 완전히 끊어질 때까지 기록되지만 결과는 오직 64mm까지 도달된 거리에 대해서만 유효하다. 이 범위를 넘어서 측정된 인열 하중은 시험편의 가장자리에 근접되어 저하되기 때문에 클램프의 이동거리 64mm 미만에서의 하중 피크만을 계산해야 한다.

2.2.3 유리섬유 막재의 용접접착강도 시험

대공간 구조물의 막재는 실제 시공 시에 경사방향은 하중지지 방향이므로 주로 위사방향에 대해서 열을 가하여 용융접착한다. 이러한 막재의 접착부분

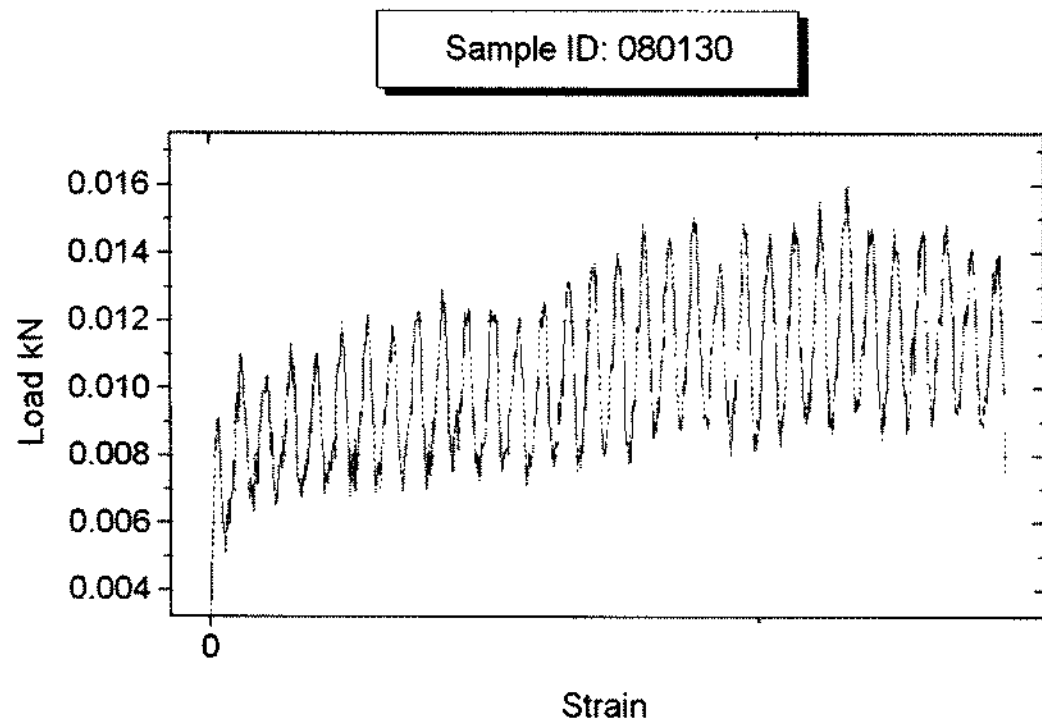


〈그림 20〉 유리섬유 막재의 용접접합 강도시험 사진

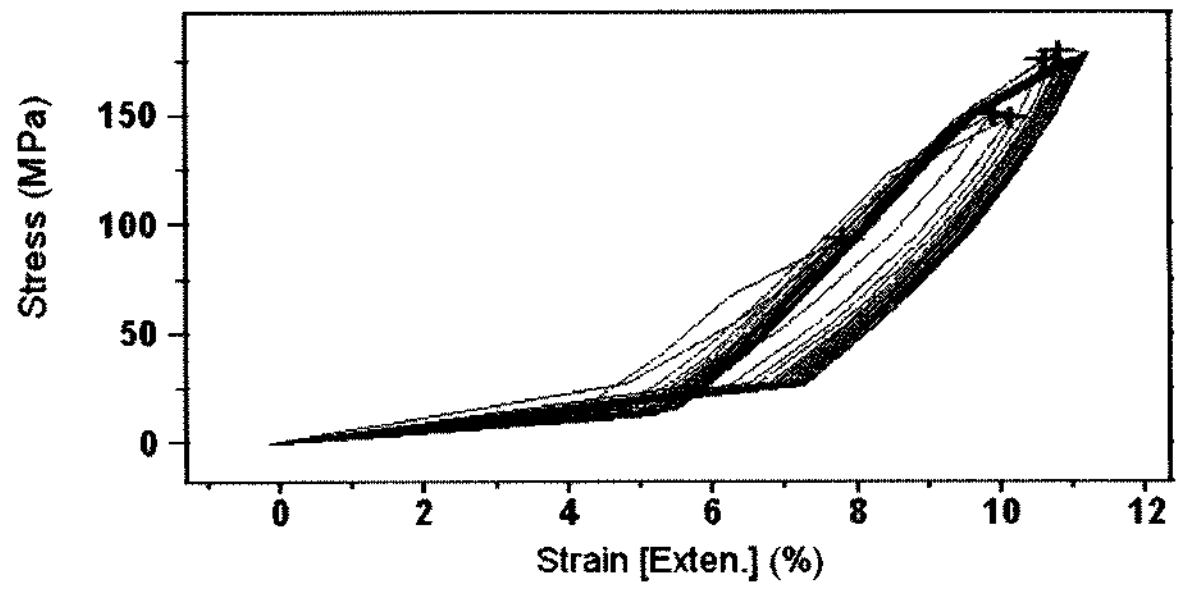
에 대한 용접부 접착강도 시험을 수행하였다.

2.2.4 유리섬유 막재의 반복 인장강도 시험

구조물에 시공되는 막재는 주로 바람에 의해서 반복적인 하중을 받는다. 반복적인 하중이 작용할



〈그림 21〉 유리섬유 막재의 용접접합강도시험결과
(시험체 폭 20mm, 길이 150mm,
용접 50mm)



〈그림 22〉 반복하중에 의한 경사방향 인장 시험결과
(시험체 : 폭 25mm, 크램프 간격 200mm)

시에 막재의 응력 변형도 곡선을 파악하기 위한 시험을 수행하였다. 인장내력의 80%범위 내에서 반복하중을 수행하여 반복하중에 대한 막재의 내력과 변형을 조사하였다.

3. 막재의 시험 결과 분석 및 고찰

3.1 인장강도에 대한 분석 및 고찰

본 연구에서는 유리섬유 막재에 대한 1축 인장시험, 크리프 시험기에 의한 2축 인장시험을 분석 및 고찰 하고자 한다. 막재의 1축 인장시험 결과에서 유리섬유 막재의 경사방향 탄성계수는 4326.17 N/mm²으로 측정 되었고, 위사 방향의 탄성계수는 3808.46 N/mm²으로 측정 되었다. 경사방향의 신율은 6.11%이고 위사방향이 신율은 9.59%로 측정 되었다. 유리섬유 막재는 섬유 제조방법에 따라서 경사방향과 위사방향의 인장강도가 현저히 차이가 있기 때문에 막재의 설계시에 장변과 단변에 대한 방향성을 고려해서 설계를 해야 한다. 일본 막구조 협회의 2축 인장시험 방법은 국내에서는 장비가 없고 복잡하기 때문에 현실적으로 시험이 어려운 실정이다. 크리프 시험기에 의한 2축 인장시험은 1축 인장시험 방법에 대한 보완시험으로 시행하여 양축이 동시에 작용할 때 경사와 위사방향의 내력을 동시에 파악할 수 있는 시험방법으로 판단된다. 시험체의 위사방향이 먼저 끊어지면서 경사방향의 곡선에서 흔들림이 발생하고 다시 하중이 가해지고, 최종적으로 경사방향에 대해서 파단이 발생한다. 본 시험의 결과에서

〈표 1〉 경사방향 인장강도 시험 결과

위사 번호	두께 (mm)	탄성계수 (N/mm ²)	최대값 (N)	신율 (%)
1	0.58	4329.78	4069.96	6.25
2	0.58	4221.67	4048.41	5.95
3	0.58	4213.51	3391.90	6.14
4	0.58	4443.92	4109.82	6.02
5	0.58	4421.97	3827.14	6.14
평균	0.58	4326.17	3889.41	6.11

〈표 2〉 위사방향 인장강도 시험 결과

경사 번호	두께 (mm)	탄성계수 (N/mm ²)	최대값 (N)	신율 (%)
1	0.58	3707.63	2945.42	9.20
2	0.58	3811.32	3071.25	9.45
3	0.58	3654.74	2844.52	9.70
4	0.58	3660.52	2898.57	9.80
5	0.58	3618.11	2865.48	9.88
평균	0.58	3708.46	2925.05	9.59

는 경사방향과 위사방향의 인장내력이 동시에 비교할 수 있는 장점이 있다. 경사방향의 내력이 위사방향 보다 높으며, 변형도는 위사방향이 경사방향보다 크다는 것을 알 수 있다. 1축 인장강도 시험법의 결과 보다는 인장강도가 적게 측정되었다.

3.2 인열강도에 대한 분석 및 고찰

본 연구에서는 유리섬유 막재의 인열강도 특성에 대해서 연구를 시험한 결과를 분석 및 고찰하고자 한다. 인열강도 시험은 싱글 인열법과 트레피조이드법에 의한 인열강도 시험을 수행하였다. 인열강도 시험결과에서 싱글 인열법과 트레피조이드법에 의

〈표 3〉 인열강도 시험 결과

시험법의 종류	두께(mm)	경사방향	위사방향
싱글 인열법(N)	0.58	211.49	135.26
트레피조이드법(N)	0.58	308.75	301.19
평균	0.58	260.12	218.22

한 인열강도 시험의 내력 차이가 크다는 것을 알 수 있다. 싱글 인열법은 막재가 전단에 의한 인열의 특성이 강하고, 트레피조이드법은 한올 한올의 인장에 의한 인열특성이 강하기 때문에 판단된다. 인열 시험 시에는 두 가지 시험을 동시에 수행하여 병행할 필요가 있다고 사료 된다.

3.3 접합강도 및 반복하중의 분석 및 고찰

막재와 막재의 접합은 유리섬유 막재는 열을 가하여 용융용접접합으로 하고 폴리에스터 막재는 열을 가하면 막재가 열에 손사이 되므로 고주파 용접 접합을 한다. 유리섬유 막재의 용접부 접합강도 시험 결과인 <그림 20>의 그래프에서 비교적 균일한 접합강도를 보여주고 있다. 반복하중에 의한 인장시험에서는 <그림 22>에서와 같이 반복하중에 의해서 유리섬유 막재는 반복하중에 의해서 변형도가 약간 증가 하지만 내력의 저하는 거의 없다는 것을 보여주고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 유리섬유 막재에 대한 역학적 특성을 파악하기 위해서 1축 인장시험, 2축 인장시험, 인열시험, 접합강도 시험, 반복하중 시험을 수행 하였다.

(1) 유리섬유 막재의 인장시험 결과에서는 막재의 인장강도, 탄성계수, 신율 등에 대한 값을 구할 수 있었고, 참고문헌 5)의 결과와 비교해 볼 때 유리섬유 막재는 인장강도가 폴리에스터 막재에 비해서 인장강도가 크다는 것을 알 수 있고, 신율은 작다는 것을 알 수 있었다. 스트립법과 그레브법과의 비교에서 스트립법

에 의한 결과가 변형 및 내력이 크게 나타남을 알 수 있다. 결과의 차이는 시험방법에 의한 차이로 그레브법은 광폭 시험체를 규정된 폭으로 물려 인장시험하기 때문에 물림부분에서 찢어지기 때문이다.

(2) 유리섬유 막재의 인열 시험결과에서는 참고문헌 6)의 폴리에스터 막재에 비해서 인열강도의 최대 최소값이 비교적 균일하게 나타나고 있으며, 싱글인열법과 트레피조이드법에 의한 인열강도의 차이가 나기 때문에 두 가지의 시험을 동시에 수행하여 인열강도를 비교할 필요가 있다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 첨단도시개발사업의 연구비지원(과제번호 #06 R&D B03)에 의해서 수행되었습니다.

참고문헌

1. Membrane Design and Structures, Modern Architecture Series, 1999.11
2. Technical Information on Permanent Architectural Membrane Material, Chukoh Chemical Industries, 2005
3. 한국산업규격, 한국표준협회, 2006
4. 막재료의 품질성능 시험방법, 일본 막구조 협회, 2003
5. 박강근, 이장복, 김광일, "폴리에스터 막재의 인장강도에 관한 시험", 한국공간구조공학회 국제심포지움 및 춘계학술발표회 논문집, 2007. 5, pp. 79-84
6. 박강근, 윤성기, 한규원, "폴리에스터 막재의 인열강도에 관한 시험", 한국공간구조공학회 국제심포지움 및 춘계학술발표회 논문집, 2007. 5, pp. 85-90