

초대형 막구조물 지붕용 ETFE 필름 막재의 인장특성

Tensile Strength Characteristics of ETFE Roof Material in Large Membrane Structuresb

이 승 재*
Lee, Seung-Jae

이 소 라**
Lee, So-Ra

요 약

ETFE 필름 막재는 Ethylen Tetra Fluoro Etylene의 약자로, 무색의 투명한 막재료이다. ETFE 필름 막재는 내화학성이 있고 매우 가벼운 장점이 있는 것으로 알려져 있다. ETFE 필름 막재는 50 μ m에서 300 μ m의 두께가 주로 사용되며, 인장강도는 40MPa에서 60MPa 정도이고, 인장연신율은 300%에서 400%정도이다. 본 연구에서는 최근 해외에서 초대형 막구조물의 막재료로 사용되는 ETFE 필름 막재에 대한 기초적 역학적 특성을 조사하기 위하여 인장시험을 수행하였다. 인장시험으로부터 인장강도, 인장연신율, 영계수(Young's Modulus) 등 건축 설계 시 필요한 기초적 자료를 제공하고자 한다.

Abstract

ETFE is the abbreviation of Ethylen Tetra Fluoro Etylene, a sort of colorless and transparent granules. The advantage ETFE film has daylight transmission and chemical resistance, the aging resistance and lightweight. The thickness of ETFE film is used to from 50 μ m to 300 μ m and tensile strength of ETFE film changes from 40MPa to 60MPa and the tensile strain at break can get to about 300-400%. In this paper, ETFE film carried out the tensile proprieties, such as the tensile strain at break, the tensile strength are examined.

키워드 : 인장시험, 건축용 ETFE막재, 응력변형도 곡선, 인장강도, 영계수, 연신율

Keywords : Tensile test, Architectural ETFE membrane, Stress strain curve, tensile strength, Young Modulus

1. 서 론

대공간 구조물을 만들기 위한 재료는 가볍고 강성이 큰 성질이 중요시되면서 역학적 성능이 우수한 많은 재료들이 개발되어 부족했던 내구성 및 안전성이 많이 개선되고 있다. 최근 주로 사용되고 있는 ETFE 필름 막재(Ethylene Tetra Fluoro Etylene)는 무색의 투명한 입자

로 두께는 50마이크로미터에서 300마이크로미터이며 인장강도는 40MPa에서 60MPa정도로 내구성, 경량성이 우수한 최선의 건축지붕 재료이며, 투광성은 가시광선 영역에서 약 90%, 자외선 영역에서 약 83%의 투과율을 보인다고 한다. 또한 안전성, 자정능력이 뛰어난 특징이 있다.¹⁾²⁾

ETFE 필름 막재는 영국의 Eden Project을 시작으로 뮌헨의 Allianz Arena 축구 경기장, 2008 베이징 올림픽 수영장에 사용되었다. 국내에서도 시공된 사례가 있으나, ETFE 필름 막재를 구조재료로 이용하는 경우, 구조 해석 시 필수적으로 필요한 영계수(Young's Modulus), 항복강도, 인장강도 등의 재료 물성치와 시험방법 등이

* 정회원 · 한국기술교육대학교 건축공학과 교수, 공학박사

Tel: 041-560-1334 Fax:041-560-1224

E-mail : leeseung@kut.ac.kr

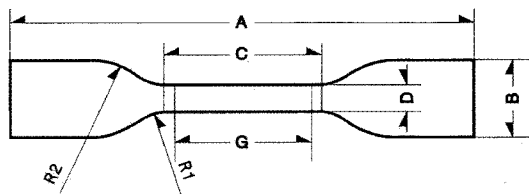
** 학생회원 · 한국기술교육대학교대학원 건축공학과 석사과정

정해져있지 않아 제작사가 제공하는 정보에 의존하고 있는 것이 사실이다.³⁾

본 연구에서는 국내에서 아직 규격화 되어있지 않은 ETFE 필름 막재에 대한 기초적인 역학적 특성을 조사하기 위하여 온도변화에 따른 재료 인장실험을 수행하였다. 이 실험결과를 인장강도, 연신율, 각 온도별 특성, 영계수 등 ETFE 필름 막재의 설계 시에 필요한 최소한의 재료성능에 대한 기초적인 자료를 제시하고자 한다.

2. ETFE 필름 막재의 인장시험

2.1 실험재료



〈그림 1〉 Dumbbell shaped specimen

〈 표 1 〉 온도에 따른 시편 수

규격	방향	시험온도	시편개수
ASTM 412	MD방향	23℃	5
	TD방향	23℃	5
KS M 6518	MD방향	23℃	5
	TD방향	23℃	5
JIS K 6251	MD방향	23℃	5
	TD방향	23℃	5
	MD방향	40℃	5
	TD방향	40℃	5
	MD방향	60℃	5
	TD방향	60℃	5
	MD방향	80℃	5
	TD방향	80℃	5
	MD방향	100℃	5
	TD방향	100℃	5

〈 표 2 〉 시편 규격

규격	Type	A	B	C	D	G	R1	R2
ASTM D 412	B	140	25	59±2	6+0.05	50±0.5	14±1	25±2
JIS K 6251	3호	100	25	20+2	5±0.1	20	11	25
KS M 6518	3호	100	25	20	5	20	11	25

이번 시험에서는 ETFE 필름 막재에 대한 인장실험을 MD방향 및 TD방향으로 실시하여 인장강도, 연신율, 영계수를 측정하였다. 일반적으로 MD방향은 막재료가 인플레이션법으로 사출되어 나오는 방향을 말하며, TD방향은 MD방향의 연직방향을 일컫는다. 실험 시 시편은 ASTM D 412(이하 ASTM), KS M 6518(이하 KS), JIS K 6251(이하 JIS)을 기준별로 각각 5개의 시편을 제작하였으며 세 종류의 시편을 MD, TD 방향으로 23℃에서 실험하였다. 온도에 따른 ETFE 필름 막재의 변화와 그 특징을 알아보고자 JIS K 6251 규격으로 실험 시 온도별로 5개씩 시편을 제작하여 23℃, 40℃, 60℃, 80℃, 100℃에서 실험을 하였다. 본 연구에서 사용한 시험편은 총 70개이다.

2.2 인장시험기

인장시험기는 온도를 조절하는 항온기 챔버가 부착된 만능시험기를 사용하였다. 만능시험기 후면부로부터 레일을 이용하여 항온챔버를 이동할 수 있는 구조로 되어 있다. 항온챔버는 상온~300℃의 온도설정능력과 1℃/s²의 온도상승능력을 지니고 있다. 이 시험에서 설정한 하중량은 3000N(300kgf)이다. 파단연신율 측정은 파단 후 시험편의 늘어난 양을 직접 측정하였다. ASTM, KS, JIS 세 종류의 시편을 내부온도가 상온 23℃가 될 때까지 기다린 후 인장강도 및 연신율 실험을 시행하고 시험이 파단상태에 이르면 실험을 마친다. JIS의 경우 23℃, 40℃, 60℃, 80℃, 100℃ 상태에서 인장강도와 연신율을 실험하였다. 이때 상온 초과 온도 상에서 인장실험을 실험 시 챔버 내의 온도를 100℃까지 올린 뒤 시험 삽입 후 온도가 약 10~15℃정도 떨어지기 때문에 이것을 다시 100℃까지 올린 후 측정한다. 고온시험 시 항온기 챔버 문을 그대로 열어서 시험을 삽입하게 되므로 실험온도가 높을수록 챔버 개폐에 의한 열 손실량도 증가하여 정규시험 온도까지 필요온도 상승시간이 더 오래 걸린다.

3. ETFE 필름 막재의 시험결과

3.1 인장강도 및 연신율 측정 결과

본 실험에서 사용된 인장강도와 연신율의 계산식은 다음과 같다.

$$T_B = \frac{F_B}{A}, E_B = \frac{L_l - L_o}{L_o} \times 100$$

여기서 T_b : 인장강도(MPa)

F_b : 최대하중(N)

A : 시험편의 단면적(mm²)

E_b : 연신율(%)

L_l : 눈금거리(mm)

L_o : 절단될 때의 눈금사이의 길이(mm)

이번 실험의 경우 시험편의 두께 0.25mm, 평행부분 너비 5mm, 시험편 단면적 A는 1.25mm²이며 연신율 실험 시 L_o 는 20mm이다. 인장강도 및 연신율의 실험결과는 표3과 같다.

23°C에서 MD방향 인장강도는 ASTM은 49.9MPa이며, KS는 52.2MPa, JIS는 50.8MPa로 근사한 값을 나타내었다. TD방향 인장강도는 ASTM은 48.8MPa이고,

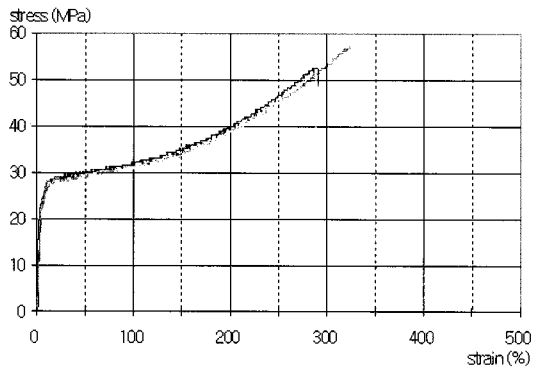
KS는 48.9MPa, JIS는 49.1MPa로 근사한 값을 나타내었다. 연신율의 경우 MD방향 ASTM은 296%로 가장 높은 값을 나타내었으며 KS와 JIS는 각각 260%와 255%로 근사한 값을 나타내었다. TD방향의 경우 역시 ASTM이 298%로 가장 높은 값을 나타내었으며 KS와 JIS는 260%와 263%로 근사한 값을 나타내었다. JIS의 경우 온도가 20°C씩 올라감에 따라 인장강도는 작아지고 연신율은 커지는 경향을 나타내었다. <표4 - 10>은 각 시편에 따른 시험결과 및 변동계수를 나타낸 표이다.

3.2 항복강도와 영계수의 산정

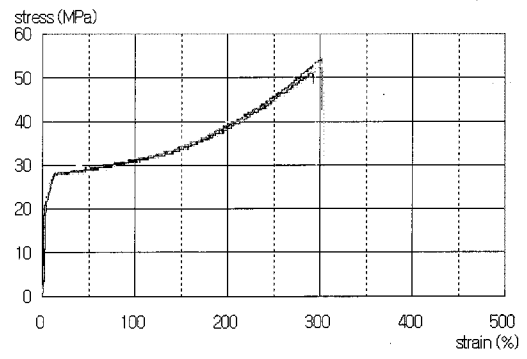
<그림 8>은 KS 기준 시편의 응력변형곡선을 나타낸 것이다. 응력변형곡선은 a와 b점에서 기울기가 급격히 변화한다. a점보다 응력이 작을 경우 시험편은 탄성 상태에 있으며 a점 부근에서 기울기가 급격히 감소하면서 b점을 향한다. 이 때 a점과 b점 사이 구간은 초기 항복이 시작되는 구간이며, 본 연구에서 항복강도를 구하는 방법으로 직선A(a점과 b점을 지나는 직선)와 직선B(최초의 곧은 직선, 탄성구간의 직선)의 교차점의 응력 값을 사용하였다. 그림 8은 전형적인 응력변형곡선을, 그림 9는 항복강도 및 영계수 산정 방법을 나타낸 그래프이다.

< 표 3 > 시편에 따른 실험결과

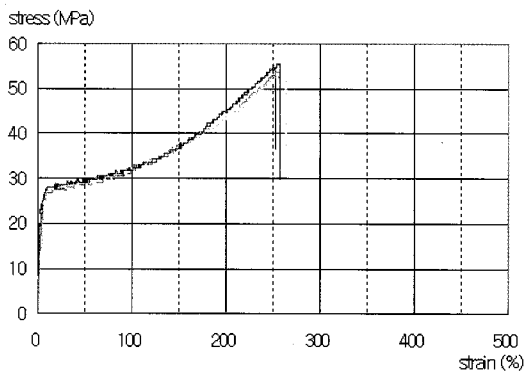
규격	방향	온도(°C)	인장강도(MPa)	연신율(%)	탄젠트영계수	시컨트영계수
ASTM	MD	23	49.9	296	1006.8	816.5
KS		23	52.2	260	851.1	597.8
JIS		23	50.8	255	763.4	608.3
		40	43.0	319	481.3	324.4
		60	36.2	376	399.1	233.9
		80	29.1	436	147.6	120.4
		100	23.2	468	116.5	83.3
ASTM	TD	23	48.8	298	722.4	580.4
KS		23	48.9	260	789.1	598.3
JIS		23	49.1	263	719.4	585.7
		40	41.7	334	447.4	294.1
		60	36.1	383	335.4	200.8
		80	28.7	441	142.1	116.2
		100	21.0	479	106.8	80.9



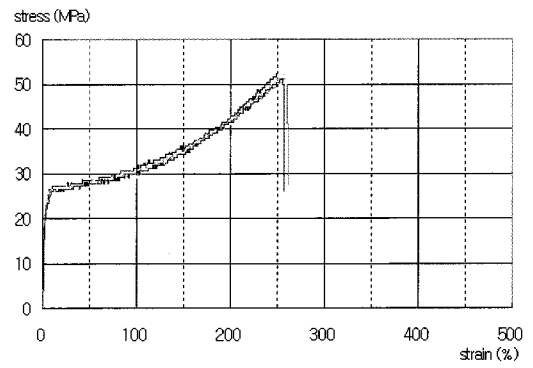
〈그림 2〉 ASTM - MD방향 (온도 23°C)



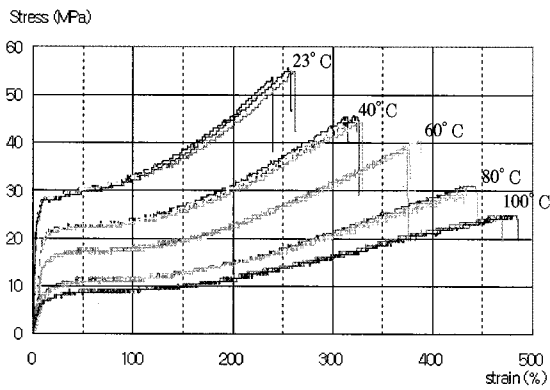
〈그림 3〉 ASTM - TD방향 (온도 23°C)



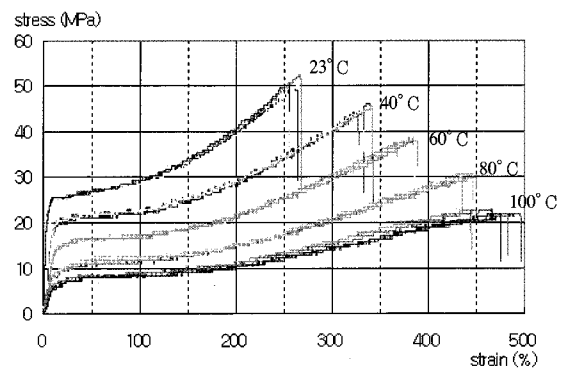
〈그림 4〉 KS - MD방향 (온도 23°C)



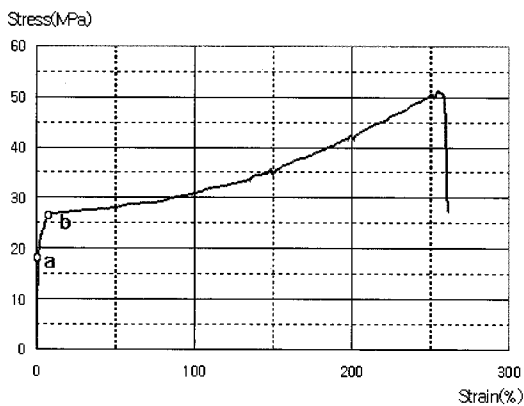
〈그림 5〉 KS - TD방향 (온도 23°C)



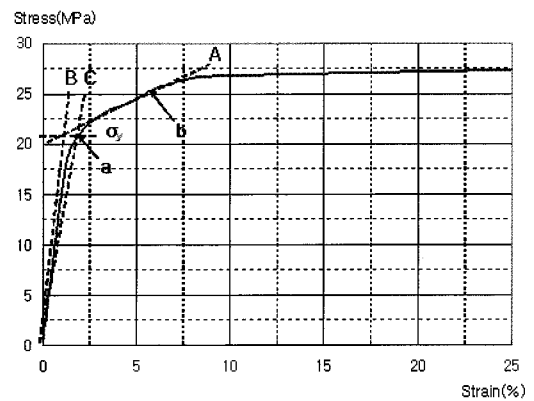
〈그림 6〉 JIS - MD방향



〈그림 7〉 JIS - TD방향



〈그림 8〉 ETFE 필름 막재의 응력변형곡선¹⁾



〈그림 9〉 항복강도와 영계수의 결정¹⁾

〈 표 4 〉 ASTM의 시험결과 및 변동계수

시험명	방향	항복강도(MPa)	탄젠트영계수	시컨트영계수	인장강도(MPa)	연신율(%)
ASTM-01-23	MD	23.2	1102.9	890.8	48.5	256.6
ASTM-02-23		24.0	1020.4	879.5	54.9	325.0
ASTM-03-23		21.9	928.3	800.1	47.6	288.8
ASTM-04-23		23.3	1069.8	835.5	50.0	289.0
ASTM-05-23		22.3	929.2	699.3	48.5	291.8
평균		22.9	1006.8	816.5	49.9	296.2
변동계수(%)		3.74	7.93	9.44	2.74	1.68
ASTM-01-23	TD	22.0	793.4	667.9	50.4	256.6
ASTM-02-23		20.9	717.6	587.5	47.6	325.0
ASTM-03-23		21.3	731.7	568.9	49.5	288.8
ASTM-04-23		21.2	729.3	550.6	49.1	289.0
ASTM-05-23		20.8	650.6	539.9	47.2	291.8
평균		21.3	722.4	580.4	48.7	296.2
변동계수(%)		2.28	7.03	8.75	5.86	5.46

〈 표 5 〉 KS의 시험결과 및 변동계수

시험명	방향	항복강도(MPa)	탄젠트영계수	시컨트영계수	인장강도(MPa)	연신율(%)
KS-01-23	MD	22.77	910.8	618.8	52.7	254.7
KS-02-23		22.46	753.7	570.1	51.5	257.6
KS-03-23		22.93	932.1	686.5	54.6	264.1
KS-04-23		21.68	881.3	579.7	50.8	265.4
KS-05-23		21.83	802.6	548.5	51.4	259.0
평균		22.334	851.1	597.8	52.2	260.2
변동계수(%)		2.50	8.86	9.09	2.62	1.31
KS-01-23	TD	20.8	790.9	596.0	48.5	255.1
KS-02-23		21.8	807.4	648.8	49.2	261.5
KS-03-23		21.8	807.4	615.8	49.2	264.2
KS-04-23		21.8	807.4	576.7	48.5	260.1
KS-05-23		21.2	736.1	560.8	49.2	257.7
평균		21.5	789.1	598.3	48.9	259.7
변동계수(%)		2.14	3.91	5.74	0.77	1.62

〈 표 6 〉 JIS의 시험결과 및 변동계수(온도 23°C)

시험명	방향	항복강도(MPa)	탄젠트영계수	시컨트영계수	인장강도(MPa)	연신율(%)
JIS-01-23	MD	20.4	759.3	632.0	49.7	241.5
JIS-02-23		20.4	774.3	625.0	50.8	263.3
JIS-03-23		20.6	852.5	640.0	50.8	258.7
JIS-04-23		20.8	684.6	566.7	51.4	257.3
JIS-05-23		20.8	763.1	854.3	51.4	257.6
평균		20.6	763.4	608.3	50.8	255.7
변동계수(%)		1.02	7.81	5.29	1.46	3.24
JIS-01-23	TD	19.4	801.7	642.4	48.5	264.1
JIS-02-23		20.5	783.6	645.6	51.5	268.3
JIS-03-23		20.4	699.3	597.1	49.2	267.3
JIS-04-23		19.5	637.6	518.8	47.4	260.3
JIS-05-23		20.4	699.3	546.0	49.2	256.3
평균		20.1	719.4	585.8	49.1	263.3
변동계수(%)		2.75	9.39	9.69	3.11	1.90

〈 표 7 〉 JIS의 시험결과 및 변동계수(온도 40℃)

시편명	방향	항복강도(MPa)	탄젠트영계수	시컨트영계수	인장강도(MPa)	연신율(%)
JIS-01-40	MD	15.5	513.9	351.1	43.8	316.6
JIS-02-40		15.1	458.5	320.6	43.1	319.8
JIS-03-40		15.4	506.3	323.3	43.8	323.6
JIS-04-40		15.1	499.3	326.4	42.6	326.2
JIS-05-40		14.9	436.3	303.3	41.9	309.5
평균		15.2	481.3	324.4	43.0	319.1
변동계수(%)		1.60	7.01	5.30	1.87	2.04
JIS-01-40	TD	14.1	456.5	311.1	41.0	331.3
JIS-02-40		14.6	474.0	308.0	41.0	328.8
JIS-03-40		14.8	480.2	297.0	42.6	339.5
JIS-04-40		14.8	453.7	283.9	42.2	338.7
JIS-05-40		14.4	385.6	274.1	41.5	330.4
평균		14.5	447.4	294.1	41.7	333.7
변동계수(%)		2.10	8.43	5.35	1.69	1.55

〈 표 8 〉 JIS의 시험결과 및 변동계수(온도 60℃)

시편명	방향	항복강도(MPa)	탄젠트영계수	시컨트영계수	인장강도(MPa)	연신율(%)
JIS-01-60	MD	12.7	432.7	250.4	35.8	378.5
JIS-02-60		12.8	400.9	245.2	35.8	372.1
JIS-03-60		12.9	404.4	247.3	37.4	385.4
JIS-04-60		12.7	395.6	229.3	35.8	374.8
JIS-05-60		12.6	367.0	203.7	36.3	371.8
평균		12.7	399.1	233.9	36.2	376.5
변동계수(%)		0.90	5.87	8.28	2.13	1.50
JIS-01-60	TD	11.4	375.3	197.4	36.0	385.7
JIS-02-60		11.4	331.7	197.4	36.0	385.4
JIS-03-60		11.5	329.9	210.3	35.8	380.2
JIS-04-60		11.5	320.7	192.0	36.0	372.8
JIS-05-60		11.8	325.4	208.1	36.5	388.3
평균		11.5	335.4	200.8	36.1	382.5
변동계수(%)		1.34	6.58	3.89	0.69	1.61

〈 표 9 〉 JIS의 시험결과 및 변동계수(온도 80℃)

시편명	방향	항복강도(MPa)	탄젠트영계수	시컨트영계수	인장강도(MPa)	연신율(%)
JIS-01-80	MD	7.03	159.8	129.2	30.6	440.1
JIS-02-80		6.90	156.8	126.8	28.8	439.1
JIS-03-80		6.93	157.5	124.2	29.4	432.4
JIS-04-80		6.33	136.4	112.6	28.0	429.5
JIS-05-80		6.41	130.3	110.1	28.7	439.7
평균		6.72	147.6	120.4	29.1	436.2
변동계수(%)		4.83	9.30	7.18	3.34	1.12
JIS-01-80	TD	6.57	156.4	107.4	29.4	447.1
JIS-02-80		6.34	144.1	115.3	28.0	434.9
JIS-03-80		6.42	135.4	119.8	28.7	450.2
JIS-04-80		6.53	137.8	114.2	28.7	438.7
JIS-05-80		6.57	138.6	126.3	29.4	434.7
평균		6.49	142.1	116.2	28.9	441.1
변동계수(%)		1.57	5.93	6.06	2.74	1.62

〈 표 10 〉 JIS의 시험결과 및 변동계수(온도 100℃)

시편명	방향	항복강도(MPa)	탄젠트영계수	시컨트영계수	인장강도(MPa)	연신율(%)
JIS-01-100	MD	5.24	124.8	81.3	22.4	452.8
JIS-02-100		5.29	123.6	79.9	22.4	459.3
JIS-03-100		5.31	111.1	77.9	23.1	486.1
JIS-04-100		5.40	122.7	94.4	24.0	486.9
JIS-05-100		5.33	103.7	79.3	24.0	476.6
평균		5.31	116.5	83.3	23.2	468.7
변동계수(%)		1.10	8.01	8.39	3.39	2.84
JIS-01-100	TD	5.18	116.1	86.3	21.3	462.7
JIS-02-100		5.24	111.5	82.1	20.6	483.4
JIS-03-100		5.25	103.8	78.6	20.6	497.1
JIS-04-100		5.33	102.9	80.5	21.8	467.2
JIS-05-100		5.25	101.4	77.7	20.6	483.5
평균		5.25	106.8	80.9	21.0	478.8
변동계수(%)		1.02	5.98	4.23	2.48	2.90

4. 각 규격별 변동계수

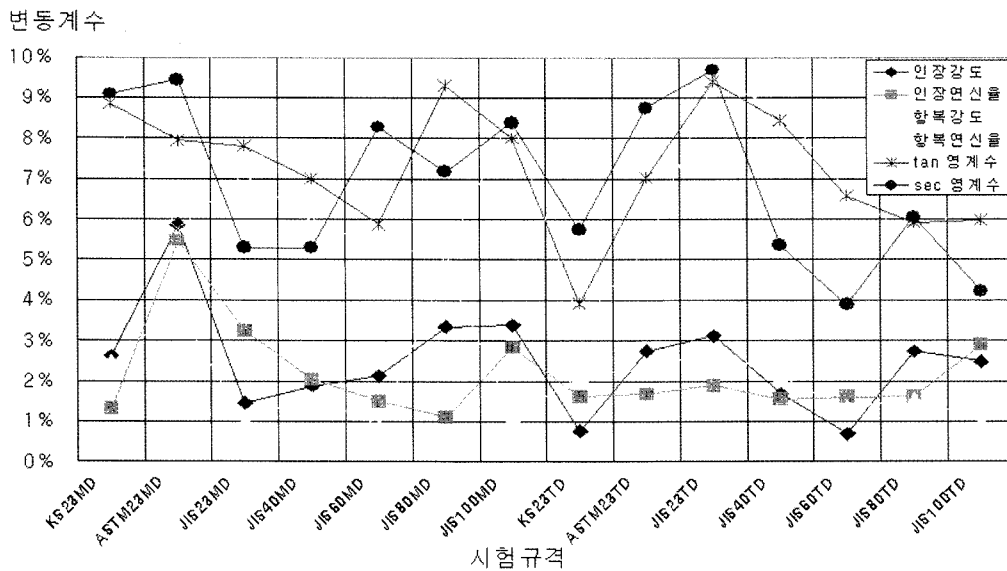
〈그림 10〉은 인장강도 및 연신율, 항복강도, 영계수 결과를 변동계수로 나타낸 그래프이다. 인장강도의 경우 ASTM이 6%, KS와 JIS는 4% 이내로 작았으며 연신율 역시 ASTM의 값이 다른 규격에 비해 변동계수가 높지만 모두 6% 이내로 작은 값을 알 수 있다. 항복강도의 경우 JIS 80℃에서 변동계수가 6%정도로 높은 것을 알 수 있다. 인장강도와 연신율, 항복강도가 6% 이내로 나타난 것은 각각의 데이터 값의 편차가 작음을 의미하며

이는 규격별로 결과 값이 비슷하다는 것을 알 수 있다.

탄젠트영계수와 시컨트영계수, 항복연신율의 변동계수는 인장강도와 연신율, 항복강도에 비해 6%~10%로 높은 것을 알 수 있다. 이는 각 결과 값의 편차가 상대적으로 큰 것을 나타낸다.

5. 결론

인장특성 실험결과 23℃에서 인장강도는 세 종류의 시편모두 50MPa정도의 값으로 유사한 결과를 나타내었



〈그림 10〉 각 기준별 시험결과와 변동계수

으며 연신율의 경우 23℃에서 250%~300%로 근사한 값이 나온 것을 알 수 있다. 이는 변동계수가 6% 미만으로 각 시편들의 결과 값이 상대적으로 근사한 값이 나왔으며 이는 그 특성이 비슷하다고 할 수 있다.

각 기준별 시험 결과에 의하면 인장강도, 인장연신율, 항복강도의 변동계수는 평균적으로 3%를 나타내고 있으며, 변동폭은 상대적으로 작음을 알 수 있다.

영계수의 경우 KS의 탄젠트 영계수는 851.1이고 시컨트 영계수는 597.8로 약 250정도의 차이가 나며, ASTM와 JIS1의 경우도 탄젠트영계수와 시컨트영계수가 250정도의 차이가 나는 것을 알 수 있었다. 세 값 모두 탄젠트영계수가 시컨트영계수에 비해 250정도 큰 값을 나타내며 탄젠트영계수는 750~1010, 시컨트영계수는 600~820정도의 값을 얻었다.

MD방향과 TD방향을 비교해보면 인장강도는 20MPa~23MPa, 연신율은 ASTM은 평균 290%정도, KS와 JIS의 경우 평균 260%정도로 MD방향과 TD방향의 값이 근사한 것을 알 수 있다. 이는 ETFE 필름 막재가 방향에 따른 특성 차이가 크게 없다는 것을 나타내고 할 수 있다.

-감사의 글-

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

-참고문헌-

1. 김재열, 우민걸, "Uniaxial Tensile Test of ETFE Film," 한국공간구조학회 학술발표대회 논문집, 제 8권 5호, 2008
2. 장일순, 이성범, "세계의 건축을 바꾸어 가는 ETFE," 한국공간구조학회 춘계학술발표회 논문집, 한국공간구조학회 춘계학술발표회 논문집, 2008
3. 박강근, 윤승현, 배부환, "건축용 ETFE 필름 막의 역학적 특성 시험," 한국공간구조학회, 제9권 2호, 2009
4. 박강근, 윤성기, "유리섬유 막대의 역학적 특성에 관한 시험," 한국공간구조학회, 제8권 2호, 2008
5. 김승덕, "건축용 막 재료의 현황과 전망," 대한건축학회, 2005

▶ 접수일자 : 2009년 11월 23일

▶ 심사 완료일자 : 2009년 12월 4일

▶ 게재 확정일자 : 2009년 12월 11일