

ETFE 필름 막 패널 설계

Design of ETFE Film Panel



김 재 열*
Kim, Jae-Yeol



김 희 균**
Kim, Hee-Kyun



강 주 원***
Kang, Joo-Won



배 부 환****
Bae, Boo-Hwan

1. 서론

최근 국내에서는 인장 내력을 가지면서 투명성과 다양한 구조적·건축적 장점을 지닌 ETFE 필름막 설계에 대한 관심이 높아지고 있다. ETFE는 10여 년 전 본 학회지를 통하여 소개된 바 있으나 일부 건축가나 건설 업체에서 식물원 등 제한된 건축에만 적용하고 있다.

우리나라는 아직 ETFE 필름막에 대해서는 학회 등 공인된 기관의 인증 기준이 없으며, 일반 막재료 기준에 준하여 설계하고 있는 실정이다. 그러나 ETFE 필름막은 일반 PVC 계열이나 PTFE 계열 막재에 비해 강도나 응력 등에서 많은 차이점을 보이고 있어 ETFE만의 명확한 기준이 절실히 요구되고 있다. 일본

에서는 새로 발간된 건축학회 기준에 ETFE에 대한 기준이 추가되었으며, 중국은 ETFE에 대한 기준이 이미 마련되어 있다. 국내에서도 설계자 및 건설관계자들이 정비된 기준을 요구하고 있어 전문가들의 중지를 모아 하루 빨리 기준을 제정할 필요가 있다.

불소수지 필름의 일종인 ETFE(Ethylene Tetra-Fluoro Ethylene) 필름은 투명성, 내후성, 환경접합성 등으로 인해 최근 다양한 곳에 이용되고 있다. 일본에서는 태양 공업을 선두로 외형이나 목적이 다양한 ETFE 막구조가 건설되고 있다. 유럽은 2006년 독일 월드컵 대회를 비롯하여 오래전부터 유럽 전반에 ETFE 필름막을 사용하고 있다. 이외에도 2008년 북경올림픽 수영장의 지붕과 외벽에 적용되는 등 ETFE 필름은 오늘날 많은 주목을 받고 있는 재료이다. 국내에서는 부산 GS Xi 갤러리, 서울 금호 크링(Kring), 서울식물원, 대구 물문화관 등에서 일부 사용되었을 뿐 전반적인 보급에는 이르지 않는 것이 현실이다. 그러나 기준 정립이 완성되면 향후 국내 사용도 증가할 것으로 예상된다. 따라서 기존 막재료와 다른 재료 특성을 가지고 있으면서 건축 재료로서의 취급에 있어

* 협성대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Dept. of Architectural Eng., Hyupsung Univ.

** (주)에코닝 기술연구소 연구소장, 공학박사
Econing Co., Ltd.

*** 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사
School of Architecture, Yeungnam University

**** MMK주식회사 대표이사
MMK Inc.

서도 명확하지 않는 ETFE 필름의 사용에 대해 정확한 이해와 기술의 습득이 필요하다. 이에 본고에서는 ETFE 필름 설계 시 고려해야 할 사항에 관하여 최근 제정된 일본 기준을 중심으로 알아보기로 한다.

2. 일반사항

2.1 필름 재료

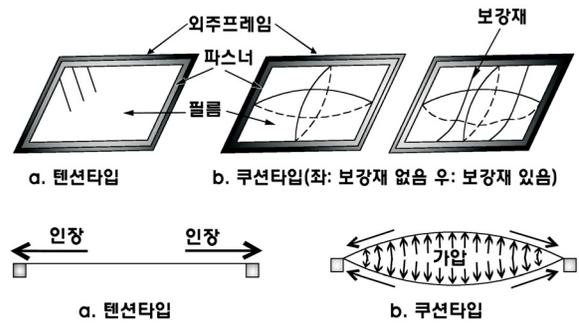
ETFE 필름은 에틸렌과 테트라플로로틴을 95% 이상 포함한 공중합수지로 구성된다. 일반적인 제조 방법으로는 불소수지 원료를 용점 이상의 온도로 용융시켜 압출 형성에 의해 제작하는 방법과 인플레이션 법에 의해 제작하는 방법 등이 있다. 필름은 본래 높은 투명성을 가지고 있지만 자외방사선 투과의 저감, 결로 방지, 의장성 부여(착색, 모양 부착 등), 차광성 부여 등의 용도에 따른 요구로 첨가제의 혼합, 표면 개선제의 코팅, 인쇄 등에 의해 개선하는 것도 가능하다.

일반적인 ETFE 필름은 250 μm 두께로 가시광선 투과율 90% 이상의 투명성을 가지고 있다. PVDF나 PVF에 비해 용점이 높고, FEP에 비해 인장과단강도 및 인장탄성률이 우수하다. 또한 투명한 건재 재료 특성을 갖는 농업시설 설계 등에 범용되고 있는 염화비닐수지에 비해 내후성, 투광율, 내오염성, 신장, 사용 한계온도가 우수하다. 유리에 비해서는 내파손성, 경량성이 우수하며, 폴리카보네이트에 비해 내후성, 내열성, 내오염성이 우수하다. 이처럼 필름은 투명 건재로서의 이용가치가 높다고 할 수 있다.

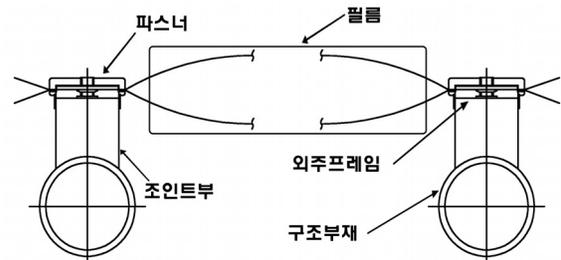
현재 제품화 되어 있는 ETFE 필름은 일반적으로 두께 250 μm 이하, 폭 2.35m 이하의 롤 상태이다. 로드의 제한은 있지만 제품의 폭 및 두께가 해당 범위 안에 있으면 자유롭게 제조가 가능하다. 그러나 ETFE 필름에 대한 KS 등의 재료 규격은 없다.

2.2 구성과 타입

필름패널은 필름과 외주를 둘러싼 프레임, 필름을 프레임에 정착하는 파스너로 구성되어 있으며, 외주



<Fig. 1> Concept of film panel



<Fig. 2> Example of cushion type

프레임으로 둘러싸인 범위를 파스너를 포함하여 1패널로 정의한다. 필름패널에는 필름을 외주로부터 잡아당겨 장력을 주는 텐션 타입과 복층을 해서 필름 사이의 공기층을 가압하여 필름에 장력을 주는 쿠션 타입이 있다. 2가지 모두 필름은 장력 상태로 평면 또는 곡면을 형성하여 형태를 안정화시키고, 눈 및 비에 의한 폰딩(Ponding)과 바람에 의한 찢어짐 등을 방지할 수 있다. 그러므로 텐션 타입에서는 시공 시 필름에 장력을 부가하면서 파스너에 정착시킬 필요가 있다. 이에 비해 쿠션 타입에서는 내압을 유지하기 위한 공기실과 가압 장치 등이 필요하다. 각 필름패널은 독립되어 있고, 지붕재 또는 외벽재 등으로서 구조 부재에 충분한 강도로 부착하여 적용한다. 특별히 구조 부재를 외주 프레임으로 하는 경우도 있다. 어느 것의 경우든 지붕과 외벽이 스패 2m 정도의 프레임으로 구획된 필름으로 형성되어 있다.

3. 필름 재료를 이용한 설계

3.1 필름의 품질 및 성능

필름의 품질 및 성능을 유지하기 위해서는 <Table 1>

과 같은 시험항목으로부터 소요의 규격 값에 대해 적절한 범위 안에 있는 것이 확인되어야 한다.

3.2 허용응력

본 절에서는 최근 발간된 일본 기준을 바탕으로 ETFE 필름을 소개하고자 한다. 막구조용 필름의 인장 허용응력도는 <Table 2>의 식을 따른다. 여기서, F_1 은 막구조용 필름의 롤 방향 및 롤 직교 방향의 제1 기준강도를 나타낸다(Fig. 3).

막면을 쿠션 형태로 한 막구조용 필름의 내부 공기압을 높임으로써 장력을 도입하는 경우 태풍에 대한 구조계산 시 단기에 발생하는 힘에 대한 인장의 허용응력도는 <Table 3>의 식으로 구할 수 있다. 여기서, F_1 은 앞에서 규정하는 막구조용 필름의 롤 방향 및 롤 직교 방향의 제1기준강도를 나타낸다(Fig. 3).

<Table 1> Test items of film material

(1) 두께	(2) 인장강도	(3) 인장항복응력
(4) 신장	(5) 인열강도	(6) 내반복절곡성
(7) 내후성	(8) 난연성	(9) 광선투과율
(10) 내마모성	(11) 내박리성	(102) 인장탄성률 및 프와송비
(113) 내약품성	(124) 내열성	(115) 내인장크리프성

<Table 2> Allowable tensile stress of film structures

		장기 인장 허용응력도	단기 인장 허용응력도
적설 시 이외	접지 않을 경우	$\frac{F_1}{2}$	$\frac{F_1}{2}$
	접을 경우	$\frac{F_1}{2}$	$\frac{4F_1}{5}$
적설 시	접지 않을 경우	$\frac{1.4F_1}{2}$	$\frac{4.5F_1}{5}$
	접을 경우	$\frac{1.4F_1}{2}$	$\frac{3.6F_1}{5}$

<Table 3> Allowable tensile stress of film structures (In case of typhoon)

단기에 발생하는 힘(태풍)에 대한 인장의 허용응력도(N/mm ²)	$\frac{6F_1}{5}$
---	------------------

<Table 4> Ultimate tensile stress of film material

		인장 재료 강도(N/mm ²)
막구조용 필름	적설 시 이외	F_2
	적설 시	$\frac{6F_1}{5}$

3.3 막재의 종국응력(재료응력)

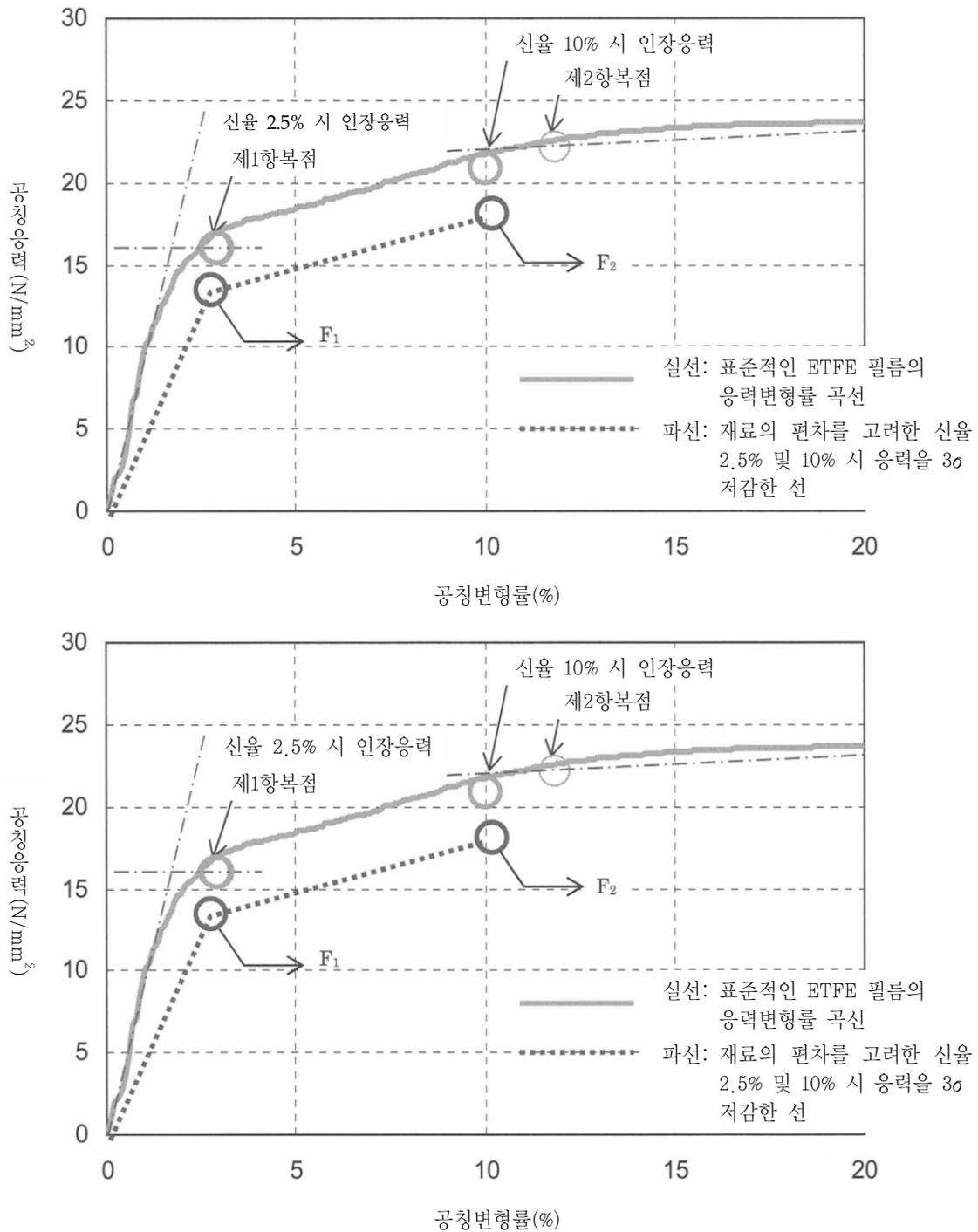
필름의 인장에 대해 과단되는 재료 강도는 <Table 4>의 식을 따른다. 여기서, F_1 은 막구조용 필름의 롤 방향 및 롤 직교 방향의 제1기준강도(단위 N/mm²)이며, F_2 는 막구조용 필름의 롤 방향 및 롤 직교 방향의 제2기준강도(단위 N/mm²)이다.

3.4 기준 강도

막구조용 필름의 인장 허용응력도는 ETFE 필름의 항복점을 가진 응력도-변형률도 관계와 크리프 및 응력 완화(릴랙세이션)등의 점성거동, 쿠션 방식의 구조 특성 등에 기초하여 정해진다. ETFE로 대표되는 불소수지 필름은 자외선에 의한 강도 저하가 거의 없기 때문에 옥외 폭로 상태에서의 강도 저하는 발생하기 어렵다. 불소수지 필름은 ETFE 외에도 다양한 종류가 있다.

3.4.1 막구조용 필름의 인장의 기준 강도

막구조용 필름의 인장 기준 강도는 허용응력도 등 수치의 기준이 되고, 막구조의 안전성 확보를 위해서 중요하다. 예를 들어 ETFE 필름에는 <Fig. 3>과 같이 2개의 항복점이 있으며, 제1항복점과 제2항복점 사이에는 가공경화를 동반하는 안정적인 2차 구배가 있다. ETFE 필름의 제1기준강도는 제1항복점, 제2기준강도는 제2항복점의 물성치에 대응함과 동시에 쿠션 방식



〈Fig. 3〉 Stress-Strain relationship of ETFE film

에서 허용 가능한 소성변형률의 크기를 고려하여 정한다.

일본 기준의 경우 “구조계산에 대해서는 원칙으로 막재료의 모든 부분에서 허용응력도 등의 수치를 만족하고 있는 것을 확인하는 것으로 구조안전성을 판정하고 있다. 또한 지정 건축 재료로 인정을 받은 막

구조용 필름의 규정된 기준 강도의 수치는 제조회사가 제품에 대한 강도 기록 및 편차 등을 고려하여 정한 최소치(보정치)여야 한다”고 규정하고 있다. 제조회사가 막구조용 필름의 제조상 강도 편차를 고려한 경우의 방법 중 하나로 어느 로트(Lot)에서의 인장 강도시험에서 시험편을 20장 이상으로 하고, 신율 2.5%

및 10% 시 응력의 평균값에서 표준편차의 3배 수치를 제외한 수치로 하는 방법이 있다.

3.4.2 강도 지정이 필요한 막구조용 필름

일본의 경우 기준의 범위 내에서 사용할 수 있는 막구조용 필름은 ETFE 필름에 한정되어 있으며, 해당 하는 막구조용 필름에 대해서는 기준 강도의 규정을 따라야 한다. 이 외의 필름 사용은 프로젝트별로 학회나 전문가 단체의 검증을 취득한 건축물이나 가설건축물의 경우에 가능하다.

3.4.3 장기 및 적설 시 허용응력도

텐션 방식의 경우 자중 및 초기 장력, 쿠션 방식의 경우 자중 및 공기방이 막구조용 필름에 상시 작용하는 하중이 된다. 적설하중도 지속적으로 작용하는 하중으로 고려해야 한다. 막구조용 필름은 제1항복점의 1/2 응력에서는 크리프가 작지만, 제1항복점을 초과하는 응력에서는 크리프가 크게 발생한다. 다설 지역에서는 수개월간의 하중, 일반 지역에서는 수일간의 하중을 상정하여 크리프 변형이 지장이 없는 정도가 되게끔 적설 시와 적설 시 이외의 허용응력도를 별도로 정하고 있다. 불소수지 필름은 필름과 눈 사이에 수분이 존재할 경우 미끄러지기 쉽기 때문에 구배가 적어도 용설이 발생한다. 지붕 형상 중 아치간의 골 부분이 있는 경우는 용설에 의한 하중의 편분포를 고려해야 한다.

3.4.4 쿠션 방식의 허용응력도

쿠션 방식은 항복점을 초과하는 응력에 의해 소성 변형률이 발생하면 쿠션 외막의 상부 라이즈, 내막의 하부 라이즈가 증가한다. 공기압을 사용하지 않는 경우 소성변형률의 발생은 초기 장력의 저하 및 막면의 이완으로 연결되기 때문에 응력도가 항복점을 초과하지 않도록 해야 한다. 한편, 쿠션 방식은 상·하부 라이즈의 증가에 따라 필름이 다른 부재에 접촉하지 않거나 의장 및 계획의 관점에서도 지장이 없는 경우 소성변형률을 허용한 설계가 가능하다. ETFE 필름은

인장력에 대하여 제1항복점과 제2항복점의 사이에서 가공경화를 동반하는 안정적인 거동을 나타내는 것에서 태풍 발생 시 쿠션 방식의 허용응력도는 제1기준 강도의 1.2배로 하고 있다.

3.4.5 막구조용 필름의 접기

〈Table 2〉에서 언급한 ‘접는 경우’는 지붕면 또는 벽면을 개폐로 하고 막구조용 필름을 접어서 움직이는 경우를 뜻한다(Fig. 4). 개폐에 의해 막면을 반복적으로 접는 것은 내부의 공기를 뺀 후 또는 빼면서 접게 되어 공기압의 제거 및 접는 기구의 제어를 동시에 해야 한다. 이에 따라 복잡한 설비 설계나 안정성의 확인이 필요하게 된다. 쿠션의 접기를 실시하는 경우 허용응력도 설정은 프로젝트별로 학회나 전문가의 검증을 얻은 후 시공하는 것을 권고한다.

3.5 필름 막재료의 상호 접합

구조내력상 주요한 부분에 사용하는 막면에 적용하는 막재료의 상호 접합은 막재료가 상호로 존재응력을 전달할 수 있도록 해야 하며, 다음과 같은 접합 방법을 취해야 한다.

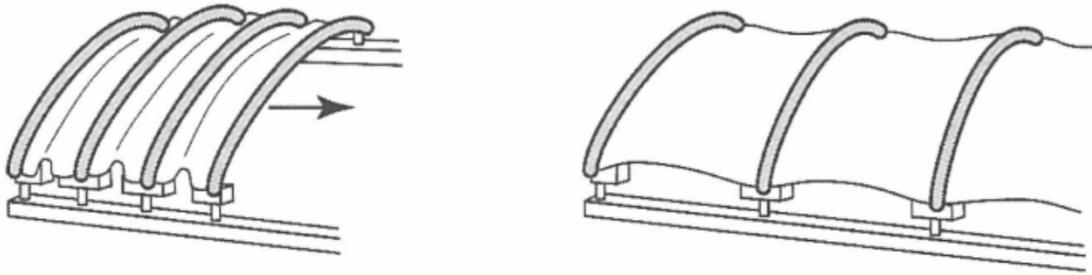
3.5.1 열판용착접합

열판용착접합이란 열판을 눌러 달게 하여 접합하는 막재료의 겹친 부분의 코팅재나 해당 부분에 삽입한 열착필름 또는 접합하는 막구조용 필름의 겹친 부분을 용융하고, 접합하는 막재료를 압착하는 접합 방법이다.

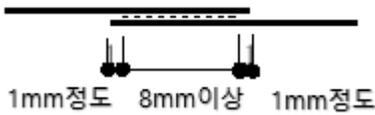
① 용착부는 벗김, 어긋남, 균열, 파손, 주름, 이외 내력상의 결점이 없는 것으로 한다.

② 막구조용 필름은 용착 폭을 기본적으로 8mm 이상으로 해야 한다(Fig. 5).

③ 접합부의 인장강도는 막재료의 종류에 따라 사용하는 막구조용 필름의 신율 10% 시의 응력에 1.2배를 곱하여 구한 수치 이상으로 한다. 단, 구조계산에 의해 구조내력상 안전한 것을 확인한 경우에는 사용하는 막구조용 필름의 신율 10% 시의 응력에 1.1배를



〈Fig. 4〉 Retractable film structures (Folding case)



〈Fig. 5〉 Welding of film

급하여 구한 수치 이상으로 할 수 있다.

④ 단부의 용착은 단층 단부인지 용착되는 부분이 여러 층 중복되어 있는 중복층인지에 따라 다를 수 있다. 그러나 용착부는 8mm 이상이 기본이다.

3.5.2 접합 특성

막구조용 필름 접합부의 접합 폭과 인장강도는 상관성이 보이지 않는다. 이는 필름 상호의 접합부에 대하여 인장력이 작용한 경우 용착부의 단부절단(필름이 2장 이상 겹쳐진 부분과 1장 부분의 경계에서 필름이 절단되는 것)에 의해 인장강도가 정해지는 것이 많기 때문이다.

3.6 필름 막면 정착부

3.6.1 막면 정착부의 허용응력도

막면 정착부의 인장 허용응력도는 〈Table 5〉와 같

〈Table 5〉 Allowable tensile stress of film anchoring

		장기 인장 허용내력(N)	단기 인장 허용내력(N)
막구조용 필름	적설 시 외	$\frac{F_j}{3}$	$\frac{2F_j}{3}$
	적설 시	$\frac{1.4F_{fj}}{3}$	$\frac{1.8F_{fj}}{3}$

다. 막구조용 필름을 사용하는 경우 구조계산을 할 때 해당 수치 및 인장의 허용응력도 수치 중 작은 수치로 해야 한다. 〈Table 5〉에서 F_j 는 막재료의 막면 정착부 실황에 따른 인장실험에 의해 구한 인장강도(단위 N)이며, F_{fj} 는 막구조용 필름의 막면 정착부 실황에 따른 인장실험에 의해 구한 인장강도(단위 N)이다.

3.6.2 태풍 시 막면 정착부의 허용응력도

막면을 쿠션 형태로 한 막구조용 필름의 내부 공기압을 높임으로써 장력을 도입하는 경우 태풍에 대한 구조계산 시 단기에 발생하는 힘에 대한 정착부의 인장 허용응력도는 〈Table 6〉의 허용응력도를 막면 정착부의 종류 및 형상에 따라서 구한 유효단면적으로 나눈 수치로 할 수 있다. 여기서, F_{fj} 는 앞의 호에 규정하는 막구조용 필름의 막면 정착부 실황에 따른 인장실험에 의해 구한 인장강도(단위 N)를 나타낸다.

3.6.3 막면 정착부의 재료 강도

막구조용 필름을 사용하는 경우 구조계산을 할 때 해당 수치 및 인장의 재료 강도 수치 중 작은 수치로 해야 한다.

3.6.4 정착부 정착 방식

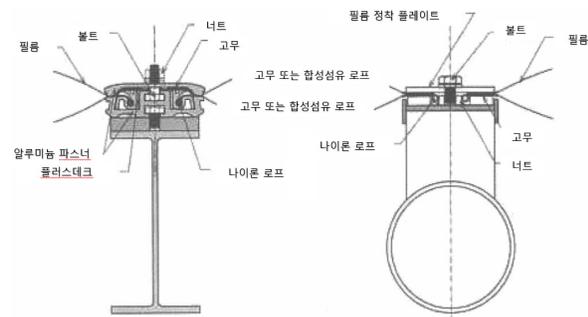
필름막의 정착은 PTFE막이나 PVC막과 근본적으로 크게 다르지 않지만 참고를 위해 국내외에서 사용하는 정착부에 대한 방식 중 가장 일반적인 몇 가지 예시를 소개한다. 각 업체마다의 노하우나 특허를 가진 특수한 공법을 사용할 수 있으므로 현재 기준에 게재

〈Table 6〉 Ultimate tensile stress of film anchoring

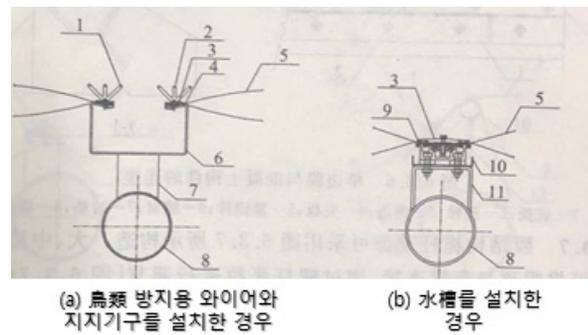
단기에 발생하는 힘(태풍)에 대한 인장 허용내력(N)
$\frac{2.4F_{fj}}{3}$

〈Table 7〉 Ultimate tensile stress of film anchoring

막구조용 필름의 인장 종국내력(N)
$\frac{2.5F_{fj}}{3}$



〈Fig. 6〉 Anchoring detail (AIJ Standard, 2020)

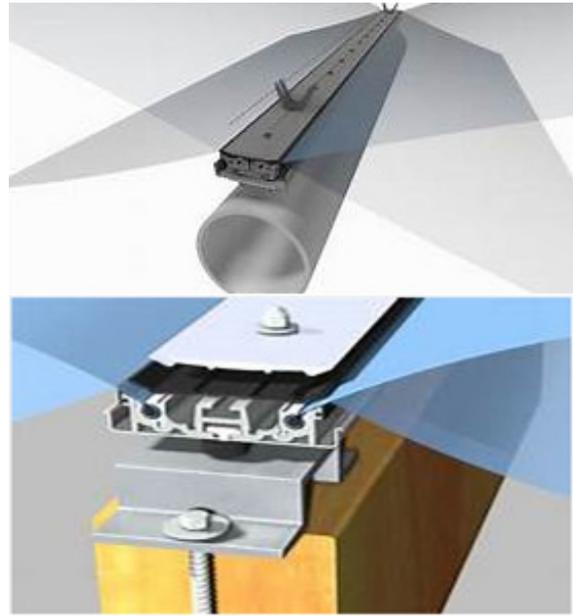


〈Fig. 7〉 Anchoring detail (CECS158, 2015)

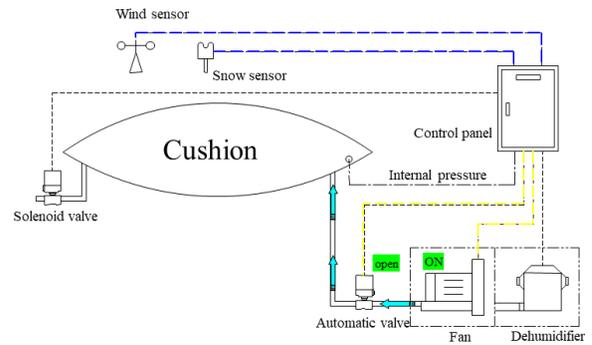
되어 있거나 인터넷 등을 통해 일반인에게 공개되어 사용되는 방식 및 형태이다.

3.7 쿠션막의 압력 유지

쿠션 타입의 압력 유지 방법에는 공기를 완전히 가둔 밀봉 방식, 송풍 등으로 압력을 유지하는 가압 방식, 기존 공기막구조처럼 비상 전원(예비동력원을 포함)이나 예비가압장치를 설치하여 가압 + 백업 방식



〈Fig. 8〉 CECS158 (Europe)⁵⁻⁷⁾



〈Fig. 9〉 Concept of air-supply system (Japan)

의 세 종류가 있다. 밀봉 방식은 가장 단순한 것으로 기온 및 기압의 변화, 폭풍 발생 시 풍압력, 적설하중에 의한 막재의 변형 등에 대하여 내압도 수동적으로 변화한다. 공기막구조의 경우 유리섬유의 접혀 구부러짐에 의한 열화방지나 에어돔 등의 공간 확보의 필요성으로 인해 적설 시 내압을 적설 하중보다 높게 하는 것이 일반적이다. ETFE 필름막은 과도하게 내압을 올리면 막재의 크리프가 염려되기 때문에 하층 막재에 와이어로프 등을 설치하여 막재면의 강하 시 적설 하중을 지지하도록 되어 있는 경우가 많다. 〈Fig. 9〉는 일본 T사에서 사용하는 개념도이다. 이또한 각 업체별로 사용하는 기술을 보유하고 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

PTFE막이나 PVC막에 대한 설계 기술과 시공 기술, 이를 뒷받침해주는 기관 인정 기준은 우리나라에 소개된 기간이 긴 만큼 설계자와 건축 관계자들이 큰 어려움을 느끼지 않을 정도로 정착되었다. 그러나 비교적 근래에 소개된 필름 막(ETFE)에 대한 기준이나 설계 및 시공 기술은 초보 상태라 할 수 있다. 필름 막에 대한 수요가 점차 늘어나고 일부 기업에서 ETFE 필름을 제작할 수 있는 공장을 설립하는 등 관심은 높아지고 있으나 미비한 기준과 설계 및 시공 기술의 불확실성으로 시장이 넓혀지지 못하고 있는 실정이다. 현장 시공에 대해서도 아직 정비되지 않은 국내의 현실을 틈 타 해외에서의 실적만 가진 에이전트성 기업의 가격 경쟁 황포에 의해 막구조 자체의 품질 저하 뿐 아니라 국내 엔지니어에 의한 기술 이전이나 기술 습득의 기회가 번번이 멀어지고 있다.

필자들은 10여 년 전 한국공간구조학회를 통하여 ETFE를 소개하고 ETFE 필름 막의 붐을 기대하였으나 작은 울림에 그치고 말았다. 다행히 최근 ETFE에 대한 관심이 높아지고, 한국공간구조학회를 중심으로 한 기준 정비 등에 관심이 높아지는 바 이번 기회에 막은 아무나 막하는 분야가 아니라 고도의 기술이 필요한 정교한 분야라는 인식을 심어주었으면 한다.

References

1. 막구조기준 및 해설, 2010.
2. 일본막구조기준 및 동해설, 일본건축센타, 2020.
3. 중국막구조 기준(CECS158), China Planning Press, 2015.
4. Kim, J. Y., "Roof design by transparent membrane", 구미서관, 2012.
5. Kim, J. Y., & Wu, M., "Uniaxial Tensile Test of ETFE Film", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.8, No.5, pp.5~8, 2008, Retrieved from file:///C:/Users/user/Downloads/Uniaxial_Tensile_Test_of_ETFE_Film.pdf
6. Kim, J. Y., & Bae, B. H., "Recommendation for Design of ETFE Fil Panel", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.8, No.6, pp.15~22, 2008, Retrieved from file:///C:/Users/user/Downloads/Recommendation_for_Design_of_ETFE_Film_Panel.pdf
7. https://de.images.search.yahoo.com/search/images;_ylt=Awr9J.la_R1gU3EAJkwzCQx.;_ylu=Y29sbwNncTEEEcG9zAzEEdnRpZAMEc2VjA3Nj?p=ETFE&fr=yfp-search-sb&guccounter=1
8. <https://bigspans.com/membranes/etfe-film/>
9. <https://www.flontex.ch/en/etfe-technology>