ETFE필름의 연신성형에 의한 장력막구조의 고내력화 실험 및 해석적 연구

Experimental and Analytical Study on High Stress of Tensile Membrane Structures by Stretch Fabrication Using ETFE Film

정 을 석*
Jeong, Eul-Seok

河端昌也**
Kawabata, Masaya

김 승 덕***
Kim, Seung-Deog

Abstract

Most of the structural forms in which ETFE film is used are the cushion(pneumatic membrane structures) and tension type(tensile membrane structures), which have been generally accepted to be the most efficient forms. Tensile membrane structures are pulled outward from the exterior to introduce initial stress. And such structures offer the advantage of a natural shape formed by tensile stress and eliminate the need for blast air. Recently, the number of tension type structures is increasing. However, there are problems of creep and relaxation of ETFE films under long-term stresses.

In this paper, the stretch fabrication method is proposed for stretching the film into the plastic region during initial tensioning as a way to increase its strength. And its effectiveness is confirmed by investigating experimental and analytical test using ETFE films.

Keywords : ETFE Film, Stretch Fabrication, Membrane Structures, Cushion type, Tension type, Elasto-Plastic Analysis

1. 서 론

최근, 대공간구조물의 지붕 및 외벽에 ETFE(Ethylene/TetraFluoroEthylene copolymer, 이하 ETFE) 필름을 이용한 사례가 증가하고 있다. ETFE필름은 투명성, 내후성 그리고 리사이클성등이 우수한 재료로써 투명에서 차광까지의 광선투과율에 대한 폭넓은 컨트롤, 자외선 및 열선의 선택적 차단 그리고 복층화에 의한 단열등과 같은 기능성 및 디자인의 가능성으로부터 앞으로 다양한 건축물에서의 적용이 기대되는 재료이다¹⁾²⁾.

ETFE필름을 이용한 막구조의 설계법에는, 허용응력을 제1항복점까지로 하는 탄성설계와 허용응력을 제2항복점까지로 하는 소성설계의 2가지 방법을

생각할 수 있다<Fig. 1>. 소규모의 패널을 상정한 「ETFE필름 패널설계·시공지침안³⁾」은 전자의 경우를, 스타디움과 같은 대공간구조물에 사용되는 대형 패널은 실질적으로 후자의 경우를 따른 시공사례가 보고되고는 있으나, 선행사례가 많은 해외에서도 이에 대한 명확한 설계기법은 보고되고 있지 않은 실정이다.

〈Fig. 1〉 Stress-strain curve of ETFE film⁴⁾

* 정희원, 세명대학교 건축공학과 박사후연구원, 공학박사
Architectural Engineering, Semyung University
Tel: 043-649-7082 Fax: 043-649-7082
E-mail : Jeong.eulseok.wx@gmail.com

** 요코하마국립대학 건축도시문화전공, 준교수, 공학박사
Faculty of Engineering, Yokohama National University

*** 종신회원, 세명대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Architectural Engineering, Semyung University

ETFE필름을 이용한 구조형식에는 쿠션방식(공기막방식)<Fig. 2>과 텐션방식(장력막방식)<Fig. 3>의 2종류가 가장 효율적인 방법으로서 알려져 있으나, 현재까지의 시공사례를 보면, 텐션방식보다는 쿠션방식의 사례가 대부분이다. 그 이유로서는, ETFE필름을 텐션방식에 적용하기 위해서는 필름의 크리프, 응력완화등과 같은 재료의 점성거동을 해결해야 하는 문제점을 들 수 있다.

한편, ETFE필름은 탄성범위에서의 허용응력이 낮은 단점을 가지고 있으나, 기존의 막재료에 비해 높은 연신능력을 가지고 있기 때문에, 이러한 장점을 살려 시공시 소성범위까지 연신시키는 방법을 생각할 수 있으며, ETFE필름을 이용한 텐션방식의 적용가능성을 높일 수 있을 것이라 생각된다.

(a) Structural system (b) The ARC(2012)
〈Fig. 2〉 Applied case of cushion type

(a) Structural system (b) Queens Cloud(2011)
〈Fig. 3〉 Applied case of tension type

ETFE필름을 이용한 막구조는 1980년대부터 연구가 시작되었으며, 현재 실험 및 해석적 검토를 통한 다양한 연구가 진행되고 있는 상황이다. 먼저, 필름의 텐션방식으로의 적용에 관한 연구로서, Nakajima et al.⁵⁾은 ETFE필름의 크리프, 릴렉сей션과 같은 점성거동을 고려한 응력이완에 관한 실험을 수행한 후, 실험결과로부터 안정변형률을 평가하였으며, Spring-Strut System에 대해 안정변형률을 고려한 해석적 검토를 수행하였다. 그러나, 실험 및 해석에 대한 검토범위는 허용응력이 제1항복점을 초과하지 않는 탄성범위로 하였다. 한편, 필름의 연신

성형에 관한 연구로서, Kawabata & Jeong⁴⁾은 쿠션방식 필름막구조를 대상으로 하여 가열가압연신에 의한 입체성형실험을 수행하였으며, 그 유효성에 대해서 검토하였다. 그리고, 가압을 통해 쿠션방식에서의 2축 연신에 대한 가능성을 확인하였으나, 텐션방식에 대한 연신성형의 유효성 검토에 대해서는 아직 보고되어지고 있지 않다.

따라서, 본 연구에서는 ETFE필름의 장력막구조에의 적용가능성을 확인하기 위하여 연신성형에 대한 기초적 연구를 수행한다. 먼저, ETFE필름의 허용내력을 높이는 방법으로써 시공시에 필름을 소성범위까지 연신시키는 방법(이하 연신성형)을 제안하고, 외부하중을 고려한 가압실험을 통해 그 유효성을 확인한다. 그리고 연신성형 실험을 모의한 해석적 검토를 수행하여 ETFE필름의 소성설계기법에 대한 타당성을 확인한다.

2. ETFE필름의 연신성형

2.1 연신성형의 개요

필름의 연신에 의한 고내력화(가공경화)는 다른 제조분야에서 일반적으로 이루어지고 있으며, 포장용 랩과 PET필름이 그 대표적인 예라고 볼 수 있다. ETFE필름의 연신에 따라 2가지 효과를 생각할 수 있다. 첫째, 연신에 의해 탄성거동과 같은 안정된 응력-변형률관계의 범위를 확장시킬 수 있다. 즉, 소성범위에서의 변형률경화 현상에 의해 재료의 항복점이 높아지고, 그에 따라 필름의 내력을 높일 수 있게 된다. 둘째, 연신에 의해 필름의 결정화가 진행되고, 재료성질이 변화하게 된다. 이런 결정화는 크리프 컴플라이언스, 크리프 속도 및 응력완화 속도를 저하시켜 응력완화 탄성율을 높이는 효과가 있기 때문에, 필름의 크리프 또는 응력완화를 제어할 수 있다⁶⁾.

ETFE필름의 연신방법에 관한 기존의 연구사례로 가열가압에 의한 2축연신의 가능성을 확인하였으나, 적용대상은 쿠션방식에 유효한 방법임을 알 수 있었다²⁾. 그러나, 필름의 연신은 패널 부착시에 직접 시공하는 방법도 생각할 수 있다. 특히, 단순형상

패널의 경우, 평면재단으로도 패널 부착시에 연신이 가능하고, 라이즈-스팬비가 작은 고내력 패널 또는 라이즈-스팬비가 크면서도 용착선이 적고 부드러운 곡면을 제작하는 것도 가능하게 된다. 그러나, 이와 같이 패널 부착시에 연신성형에 대한 사례는 아직 보고되고 있지 않다. 그 이유로서는, 쿠션방식은 부착시에 초기장력을 필요로 하지 않는 점, 연신에 의한 국부적 변형과 잔류변형에 대하여 고려해야만 하는 점, 변형률 2%이상 영역에서의 복잡한 점소성 거동에 대하여 평가할 해석기법의 미확립 등을 들 수 있다.

2.2 ETFE필름의 연신범위

ETFE필름의 연신범위를 알아보기 위하여 1축 인장실험을 수행한 후, 실험결과로부터 필름의 공학변형률과 내력비 및 두께비의 관계를 <Fig. 4>에 나타낸다⁴⁾. 비교 결과, 변형률 300~400%의 범위는 내력이 크게 상승하므로 ETFE필름의 연신효과는 높으나, 필름의 두께 감소로 인한 인열강도 및 내충격성 저하 문제가 발생하기 때문에 건축용도에 적용하기에는 부적합하며, 1축연신의 경우, 단위 폭당의 내력(C)이 극치가 되는 10~20%가 효율적이라 할 수 있다.

<Fig. 4> Stretching range on uniaxial test

3. ETFE필름의 연신성형 실험

3.1 실험개요

ETFE필름의 연신효과에 대한 유효성을 검토하기 위하여 연신성형 실험을 수행하였다.

시험체의 개요를 <Fig. 5>에 나타낸다. 시험체는 2m×2m의 정방형 프레임에 두께 200μm의 필름을

Double layer로 평면 재단하여 설치하고, 축소율, Edge 케이블의 유·무, 하중의 재하패턴을 고려하여 <Table 1>과 같이 8종류로 설정하였으며, 시험체수는 T-type의 경우 각각 1편, TE-type의 경우 각각 2편의 시험체를 사용하였다. 이때, 시험체의 분류는 <Fig. 6>과 같은 방식으로 분류하였다.

(a) ETFE Panel(T-type)

(b) ETFE Panel(TE-type)

(c) Installation of ETFE Panel
<Fig. 5> Outline of specimen

<Fig. 6> Classification of specimen

〈Table 1〉 Type of specimens

Specimen	Edge Cable	Reduction	Loading pattern
T-00S	X	0%	Single loading
T-00C	X	0%	Cyclic loading
T-05S	X	5%	Single loading
T-05C	X	5%	Cyclic loading
T-10S	X	10%	Single loading
T-10C	X	10%	Cyclic loading
TE-05C	○	5%	Cyclic loading
TE-10C	○	10%	Cyclic loading

ETFE필름에 대한 연신효과를 확인하기 위하여, 연신성형 후의 필름에 컴프레서를 이용하여 공기를 송풍한 후, 압력과 변형을 계측하였다. 이 때, 중앙부의 수직변위는 레이저 변위계를 설치하여 가압에 의한 라이즈변화를 측정하였다. 그리고, 가압시의 변형형상은 시험체의 필름면 하부에 무게추를 붙여 재하 도중의 변형형상을 기록하였다. 또한, 시험체에는 미리 격자선을 그려 넣어, 필름의 연신성형 전·후, 그리고 프레임으로부터 제거한 후의 변형 및 잔류변형률을 계측하였다. 실험의 진행은 ETFE필름을 연신성형에 의하여 프레임에 설치한 후, 풍하중을 가정하여 <Fig. 7>과 같이 내압을 이용한 재하실험을 수행하였다. 이 때, 실험실의 분위기온도는 25±2℃를 유지하였다. 시험체 T-00C(연신율 0%)와 TE-05C(연신율 5%)의 실험 전경을 <Fig. 8>에 나타낸다.

(a) T-00C(Reduction:0%, V. Displ.:287mm)

(b) TE-05C(Reduction:5%, V. Displ.:200mm)

〈Fig. 8〉 Loading test

3.2 실험결과

실험 결과로부터, 가압방법과 케이블 유·무에 대한 내압과 라이즈-스팬비의 결과를 <Fig. 9>에 나타낸다. 비교 결과, 가압방법에 대한 실험결과는 <Fig. 9(a)>와 같이 거의 동일한 결과가 나타남을 확인할 수 있었으며, <Fig. 9(b)>의 케이블 유·무에 대한 결과는 압력레벨에서 차이를 보였으나, 이는 재료 거동의 차이보다 케이블의 이동에 따른 결과로 생각할 수 있다. <Table 1>의 8개의 시험체 중, 가압방법과 케이블 유·무에 대해 동일한 결과를 보이는 시험체를 제외하고, 시험체 T-00C(연신율 0%)와 T-05C(연신율 5%)의 실험 결과에 대하여 검토하였다. 필름의 응력은 실험시 직접 측정할 수 없었기 때문에 필름의 응력은 <Fig. 10>과 같이 변형형상이 원호가 됨을 가정하고, 시험체의 중앙부 수직변위로부터 식(2)를 이용하여 평균응력을 계산하여 검토하였다. 또한, 필름의 평균변형률은 식(3)을 이용하여 평균응력 계산시와 동일한 관계로부터 구하였다.

$$R = \frac{L^2 + 4h^2}{8h} \quad (1)$$

$$\sigma_m = \frac{PR}{2t} \quad (2)$$

$$\epsilon_m = \frac{2R\theta - L}{L} \quad (3)$$

(a) Comparison of loading pattern(reduction 0%)

(b) Comparison of edge cable(reduction 5%)
〈Fig. 9〉 Comparison on loading pattern & edge cable

(a) Assumption of deformed shape

(b) Relation of stress and internal pressure
〈Fig. 10〉 Calculation of ave. stress & strain

대상 시험체 중 T-00C와 T-05C에 대한 압력과 라이즈비의 관계를 <Fig. 11(a)>에 나타낸다. T-00C의 경우, 초기강성이 매우 작기 때문에 가압에 따른 변형이 크게 나타났으며, 라이즈비 7.5%, 압력 1.2kPa 부근에서 필름이 항복함을 알 수 있었다. 이후 소성역까지 가압 후 하중을 제거한 결과, 잔류변형이 크게 일어남을 확인할 수 있었다. 반면, T-05C의 경우, 압력 3kPa까지 가압후, 하중을 제거해도 잔류변형이 생기지 않고, 초기 상태로 돌아오는 결과를 보였다. 다음으로 필름의 응력-변형을 관계를 <Fig. 11(b)>에 나타낸다. 비교 결과, 필름은 가공경화와 동일한 현상이 일어남을 알 수 있었으며, 재하·제하시의 인장탄성율은 탄성시와 거의 같고, 필름의 면외변형에 대한 재료 강성의 상승을 확인할 수 있었다.

(a) Internal pressure-Rise span ratio curve

(b) Stress-strain curve

〈Fig. 11〉 Experimental results of cyclic loading

한편, 연신성형실험의 진행시, 시험체 중, T-05S(연신율 5%)와 TE-10C(연신율 10%)는 시험체의 코너부분에서 필름의 찢어짐이 발생하였으며, 5%이상의 연신율을 적용하는 것은 바람직하지 않다고 사료된다.

〈Fig. 12〉 Fracture shape of ETFE Film

〈Fig. 14〉 Material property of ETFE Film

4. 연신성형실험의 해석적 검토

4.1 해석개요

연신에 의한 필름의 응력분포와 내압에 의한 구조 거동을 검토하기 위하여, 실험을 모의한 해석을 수행하였다. 필름의 응력해석에는 범용유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하였다. 해석모델은 실험시 결과를 얻을 수 없었던 TE-10C(연신을 10%)와 가압 방법 및 케이블 유·무에 대한 결과로부터, T-00C와 T-05C 두 가지 경우로 설정하였으며, 해석모델을 <Fig. 13>에 나타낸다. 재료 모델은 필름의 탄소성 거동을 표현하기 위하여 Von-Mises항복조건을 고려한 Multi-linear 탄소성모델을 채택하였으며, 필름의 재료정수를 <Fig. 14>에 나타낸다. 해석조건은 연신성형을 가정하여 외주 경계부에 강제변위를 부여한 후, 실험시의 가압조건에 맞추어 내압조건을 설정하였다. 단, 실험시는 부하와 제하의 시작점을 라이즈비를 기준으로 하고 있는 것에 대해, 해석시는 내압(1kPa → 10Pa → 2kPa → 10Pa → 3kPa → 10Pa)을 기준으로 하였다.

〈Fig. 13〉 Analysis model

(a) Internal pressure(1kPa)

(b) Internal pressure(2kPa)

(c) Internal pressure(3kPa)

〈Fig. 15〉 Stress distribution(T-00C)

4.2 해석결과

연신성형 및 내압조건에 대한 T-00C(연신을 0%)의 상당응력 분포를 <Fig. 15>에, T-05C(연신을 5%)

의 상당응력분포를 <Fig. 16>에 나타낸다. T-00C의 경우, 가압시의 상당응력분포는 정방형 시험체의 중앙부에서 원호방향을 따라 최대응력이 분포하고, 내압 1kPa의 가압시에는 제1항복점(13MPa)을 초과하지 않고 탄성범위내에서의 응력분포를 나타내고 있다. 내압 2kPa과 3kPa의 가압시에는 제1항복점을 초과해 소성범위에 들어가 있으나, 제2항복점(23MPa)에는 도달하지 않는 결과를 보였다. 한편, T-05C의 경우, 필름의 응력분포는 T-00C에 비해 소성범위가 넓게 분포하였으며, 내압 1kPa 가압시에 필름의 최대응력은 제1항복점을 초과하는 결과를 보였다. 또한, 내압 2kPa과 3kPa 가압시의 최대응력은 제2항복점에 도달하는 결과를 나타내었다.

(a) Internal pressure(1kPa)

(b) Internal pressure(2kPa)

(c) Internal pressure(3kPa)

<Fig. 16> Stress distribution(T-05C)

다음으로, 반복점증가압시의 실험 및 해석결과를 비교한다. T-00C에 대한 압력과 라이즈비의 관계를 <Fig. 17(a)>에, 응력과 변형률 관계를 <Fig. 17(b)>에 나타낸다. 또한, T-05C에 대한 압력과 라이즈비의 관계를 <Fig. 18(a)>에, 응력과 변형률 관계를 <Fig. 18(b)>에 나타낸다. 해석결과에 대해서는 <Fig. 15>와 <Fig. 16>에 나타내고 있는 상당응력값과 원호의 가정으로부터 구한 실험값은 서로 다르기 때문에, 해석결과도 같은 방법으로 중앙부 수직 변위의 관계로부터 구한 평균응력과 평균변형률로 하였다. 비교 결과, 압력과 라이즈비의 관계, 응력과 변형률의 관계에 대한 해석결과는 실험결과와 거의 일치하였으며, 가압에 의한 필름의 거동을 탄소성해석을 통해 재현할 수 있었다. 또한, 재하 및 제하시의 곡선 팽창은 ETFE필름 특유의 점성에 의한 영향으로 사료된다.

(a) Internal pressure-Rise span ratio curve

(b) Stress-strain curve

<Fig. 17> Comparison between experimental & analysis result(T-00C)

(a) Internal pressure-Rise span ratio curve

(b) Stress-strain curve

〈Fig. 18〉 Comparison between experimental & analysis result(T-05C)

5. 결 론

본 연구에서는 ETFE필름의 장력막구조에의 적용 가능성을 확인하기 위하여, ETFE필름에 대한 연신 성형방법을 제안하였으며, 실험 및 해석적 검토를 수행한 결과, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 필름의 연신성형에 의해, 재료의 항복응력이 높아지고, 내력의 상승효과를 확인할 수 있었으며, 외력에 의한 변형 후에도 처짐 발생이 저하됨을 알 수 있었다.
- 2) 필름의 연신범위에 대해서는, 1축연신의 경우, 10~20%의 연신이 효율적임을 알 수 있었으나, 연신성형실험 결과, T-05S(연신율 5%)와 TE-10C(연신율 10%) 시험체의 코너부분에서 필름이 찢어지는 현상을 확인하였으며, 시공시 연신성형을 적용할 경우, 5%이상의 연신율을 적용하는 것은 어려울 것으로 사료된다.
- 3) ETFE필름의 탄소성모델을 적용하여 해석한 결과, 실험결과와 거의 일치함을 확인하였으며, 가

압에 의한 필름의 거동을 탄소성해석을 통해 재현할 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 건설교통기술 촉진사업(11첨단도시C14)과 한국연구재단 2014년도 이공분야 학문후속세대양성사업(NRF-2014R1A6A3 A01007549)의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. S. J. Lee, S. R. Lee, "Tensile Strength Characteristics fo ETFE Roof Material in Large Membrane Structures", Journal of KASS, Vol. 10, No. 1, 2010, pp. 51-58
2. J. Y. Kim, J. W. Kang, "Tensile Test and Creep Tests of ETFE Membrane", Journal of KASS, Vol. 10, No. 3, 2010, pp. 57-64
3. Film and Membrane Panel Committee, *Guideline for Design and Construction of ETFE Film Panel*, Membrane Structures Association of Japan, 2006(in Japanese)
4. M. Kawabata, E. S. Jeong, "Study on Three Dimensional Fabrication of ETFE Film Panel by Stretching - Part 1:Outline of Fabrication by Stretching", Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, 2008, pp. 931-932(in Japanese)
5. H. Nakajima et al., "Study on Stress Relaxation of Tensile Membrane Structures with Spring - Strut System Using ETFE Film", Research Report on Membrane Structures, No.23, 2009, pp. 1-7(in Japanese)
6. The Japan Society of Material Science, *Elements of Solid Mechanics*, Nikkan Kogyo Shimbun Ltd., Japan, 1981(in Japanese)

(접 수 일 자 : 2014년 08월 08일)

(심사완료일자 : 2014년 08월 29일)

(게재확정일자 : 2014년 09월 04일)