

풍력블레이드의 패브릭 스킨재료 물성 시험방법에 대한 고찰

조형순¹ · 배재성^{1,†} · 이수용¹

¹한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Review of Test Methods for Fabric Skin Properties of Fabric-Covered Wind Turbine Blade

Hyeongsun Cho¹, Jae-Sung Bae^{1,†} and Sooyong Lee¹

¹School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

Abstract : Wind Turbines are becoming larger in size in order to improve economic efficiency through cost reduction, such as the construction of growth and power infrastructure of energy efficiency. It have requested the large-scale blade design and production. In the present study the new manufacture technique called a fabric-blade structure using spar, rib, and fabric membrane skin is introduced. The architectural membrane test method has been studied to be applied to the skin of the blade. The density and one-axis tensile tests of the architectural membrane materials are conducted to confirm the physical properties which are necessary to the structural designs and analyses of the wind turbine blade.

Key Words : Wind Turbine Blade, Architectural Fabric, Fabric-Blade Structure, Tensile Test, Density Test

1. 서 론

풍력발전기는 에너지 효율의 증대 및 전력기반시설 구축 등의 비용 절감을 통한 경제성 향상을 위해 매우 빠른 속도로 대형화하고 있다. 이러한 대형화에 따라 새로운 블레이드의 설계 및 제작 기술을 요구되고 있다. 블레이드의 크기가 점점 커지고 있지만 전통적인 몰드 공법은 블레이드 길이에 한계가 존재하며 비용 측면에서도 많은 제약이 따르게 된다. 이에 따라 더 큰 효율을 얻기 위한 대형 블레이드를 제작하기 위한 여러 가지 방법들이 모색되고 있다. 2012년 말 GE는 미국의 DOE(Department of Energy)의 지원을 받아 패브릭 스킨을 가진 초경량 블레이드 (Fig. 1)에 대한 연구를 수행 중에 있다. Fig. 1은 금속재질의 스파와

리브, 그리고, 패브릭 스킨으로 구성된 블레이드의 개념을 보여준다. Fig. 1의 블레이드는 항공기 구조에 사용된 트러스 구조와 유사한 개념으로 스파, 리브, 스킨이 블레이드의 주요 구조를 이루게 된다. 이러한 구조는 스파가 주요하중을 모두 담당하며, 스킨은 블레이드 단면의 에어포일형상을 유지하며, 리브는 스킨에 작용하는 공기력을 스파로 전달하는 역할을 하게 된다.

본 연구에서는 Fig. 1과 유사한 복합재 패브릭 블레이드 구조를 제안하고, 이러한 구조의 블레이드 설계/제작 시 필요한 패브릭 재질의 물성시험 방법을 고찰하고, 설계/해석에 필요한 물성치를 확보하고자 한다. 제안된 풍력 블레이드에 사용될 스킨은 경화과정이 없고 가벼우며 얇은 내구성이 강한 막재료를 사용하고자 한다. 막재료의 경우 1차 구조물 재료인 유기적인 (organic) 섬유와 내화성, 방수성의 기능을 가진 폴리머(polymer) 기반의 코팅재료를 사용하여 내구성과 환경적으로 안정적이어야 한다. 막재의 성능은 Fig. 2 와

Received: Aug. 25, 2015 Revised: Sep. 23, 2015 Accepted: Sep. 23, 2015

† Corresponding Author

Tel: +82-2-300-0102, E-mail: jsbae@kau.ac.kr

Copyright © The Society for Aerospace System Engineering

같이 직포(fabric), 코팅(prime coat), 토핑(top coat)의 재료에 따라 달라진다. 막재의 인장강도는 대부분 직포에 의해 결정되며 코팅재와 토핑재는 외부 환경 요인으로부터 직포를 보호하게 된다[1-3]. 막재료의 큰 특징은 가볍고 잘 접히고 한 장으로 덮을 수 있다는 장점 때문에 구조 시스템의 지붕재료로 많이 사용되었다. 코팅재는 1930년 대에 PVC, PTFE가 개발되었고, 1940년대에 폴리에스테르 섬유가 개발 되었다. 또한, 1970년대에는 PTFE 코팅 유리섬유 막재가 개발되었고 2000년대에는 비닐과 같이 햇빛 투광성 및 균질성이 좋은 ETFE 막재가 개발되었다[1-3]. 월드컵 경기장 및 기타 경기장의 지붕 등의 대공간 구조물의 지붕의 재료로 사용되는 막재료를 블레이드에 사용하기 위해서 체계적인 시험 방법이나 역학적 특성에 대하여 정립되어 있지 않다. 본 연구에서는 섬유의 시험법을 분석하고, PTFE 코팅 유리섬유 중 타코닉(Taconic)사의 Solus1110의 제품의 인장시험을 통하여 인장강도 및 신율을 측정하는 방법에 대해 고찰하고자 한다.

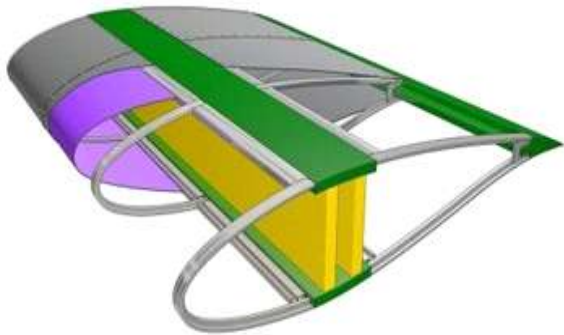


Fig. 1 Concept of Fabric-Blade

2. 건축용 유리섬유의 물성 시험

2.1 건축용 유리섬유의 밀도 시험

일반적으로 밀도를 구하는 방식은 아르키메데스 법칙으로 시편의 질량을 부피로 나눠서 계산하는 방식이다. 이외에 정확한 밀도 측정을 위해서 시편의 비중을 이용하여 밀도를 구할 수 있으며 ASTM D792에 제시되어 있는 방법을 참고로 하여 밀도를 구할 수 있다[4].

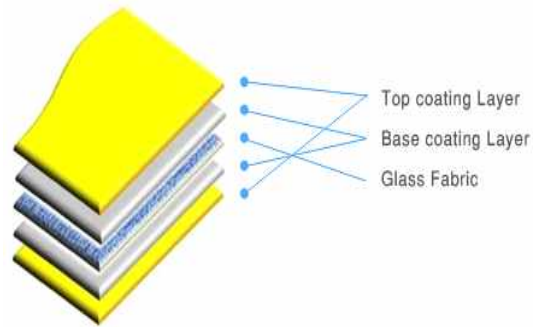


Fig. 2 Architectural Membrane Configuration

밀도의 경우 일정한 환경 조건($23\pm 2^{\circ}\text{C}$, $50\pm 10\%$)에서 증류수(distilled water)나 다른 용액을 사용하여 서로간의 비중 차를 이용하여 구할 수 있다. 이를 구하기 위해서는 정밀 저울이 필요하며 Fig. 3처럼 최소 0.1 mg 까지 측정이 가능해야 한다. 증류수의 경우 시험 조건의 온습도와 같게 하기 위하여 하루정도 두어 컨디셔닝을 시켜준다.

먼저 습기를 제거하기 위하여 82°C 에서 24시간동안 건조를 시킨 후 무게를 측정(Fig. 4)하며 이후 Fig. 5의 장치를 이용하여 증류수에 시편을 넣고 질량을 측정한다(Fig. 6). 시편의 사이즈는 요구사항이 크게 없기 때문에 $35\times 35\text{ mm}^2$ 으로 만들어 측정하였다. 비중 값을 이용하여 밀도를 측정하므로 관련규격[4]의 Eq. 1과 Eq. 2에 의하여 정확한 밀도 값을 산출 할 수 있다. Eq. 1은 비중을 구하는 식으로 대기의 온도와 증류수의 온도 모두 23°C 를 나타낸다. 대기 중에서의 시험편의 동적질량 a(Fig. 4)와 시편과 시험 장치를 포함



Fig. 3 Precision Balances (0.1 mg)



Fig. 4 Specimen Mass Measurement



Fig. 5 Density Determination Kit



Fig. 6 Specimen Mass Measurement in distilled water

하여 측정된 동적질량 b (Fig. 6), 시험장치의 동적질량 w (Fig. 5)를 이용하여 비중을 구하게 된다. Eq. 1에서 구한 비중을 이용하여 Eq. 2처럼 23°C에서의 증류수의 밀도 값을 곱하여 시편의 밀도를 최종적으로 구할 수 있다. 증류수의 온도가 다를 경우 시험규격[4]에 제시되어 있는 식을 사용하여야 한다.

$$\gamma^{23/23^{\circ}\text{C}} = a / (a + w - b) \quad (1)$$

$$\rho^{23^{\circ}\text{C}} [\text{kg}/\text{m}^3] = \gamma^{23/23^{\circ}\text{C}} \times 997.5 \quad (2)$$

여기서,

$$\gamma^{23/23^{\circ}\text{C}} = \text{비중}$$

a = 대기 중에서의 시험편의 동적 질량

b = 수침된 시험편의 동적 질량 (부분적으로 수침된 와이어(wire)의 질량을 포함한다.)

w = 수침된 싱커(sinker)와 와이어(wire)의 동적 질량

$\rho^{23^{\circ}\text{C}}$ = 23°C에서 측정된 시편의 밀도

$997.5\text{kg}/\text{m}^3$ = 23°C에서 증류수의 기준 밀도

2.2 건축용 유리섬유의 인장강도 시험

건축용 막재의 인장강도 시험법은 막재의 인장강도, 탄성계수, 신율등을 구하기 위한 1축 인장시험방법과 시험편에 경사와 위사 방향으로 동시에 하중을 가하여 인장강성과 포와송비를 구할 수 있는 2축 인장시험방법으로 크게 나눌 수 있다[5-8].

건축용 유리섬유의 1축 인장강도 시험법은 크게 스트립법(strip method)와 그라브법(grab method)로 분류할 수 있다. 스트립법에 의한 인장강도 시험은 KS ISO K0521, ASTM D4851, ASTM D5035에 정의되어 있다. 그라브법에 의한 인장강도 시험은 KS ISO K0520, ASTM D5034에 정의되어 있다. 시험환경에 따라 시험체 크기를 임의로 조정할 수 있다[9-11].

신율 측정의 경우 그림간 거리를 초기 길이로 하여 변위의 변화량을 측정하는 방법과 신장계(extensometer), 스트레인게이지(straingage)의 변화량을 측정하는 방법을 이용하여 계산할 수 있다. 탄성계수는 응력-변형률(stress-strain) 그래프에서 선형구간을 선택하여 구할 수 있다.

2축 인장 시험의 경우 시험 방법이 표준화 되어 있

지 않아 다양한 시험 방법들이 제시 되고 있으며 주로 십자가 형태의 시편을 이용하여 인장 시험을 진행한다 [6-7,12].

본 논문에서는 스트립법을 이용하여 인장시험을 진행하였다. 시험 방법은 PTFE가 코팅된 유리섬유를 사용하였기 때문에 ASTM D4851과 ASTM D5035를 사용하여 진행하였다. 일정한 환경조건($23\pm 2^{\circ}\text{C}$, $50\pm 10\%$)에서 진행하였다. 시편은 경사와 위사 방향으로 최소 5개의 시편에 대하여 동일한 조건에서 전체 나비의 1/10 이상 떨어진 곳에서 채취하고 시험조건과 동일한 환경조건에서 24시간 보관한 뒤에 시험을 진행하였다. 시험 중 클램프에서 파지면이 미끌어지지 않게 하기 위해 샌드페이퍼를 대어주었다. 시편을 잡기 위한 그립(grip)압의 경우 압이 너무 세면 파지면 안에서 조기파단이 발생할 수 있다. 따라서 적당량의 압으로 잡아주는 것이 중요하며 일정한 그립압을 주기 위하여 유압그립 장치를 이용하여 시험하였다.

하중 측정의 경우 시편의 최대 하중에 맞는 용량의 로드셀을 선택해야 한다. Fig. 7은 시험에 사용된 시험 장치를 나타낸 그림이며 Fig. 8은 시편을 장착한 전반적인 모습을 나타낸다.

시험에 사용한 시편의 폭은 25 mm, 두께는 0.6 mm 이다. 또한, 물림간격은 75 mm 로 하였으며 미끄러짐을 방지하기 위하여 샌드페이퍼를 이용하였고 그립압은 약 0.6 MPa을 가하여 장착하였다. 시험속도는 50 mm/min의 일정한 변위속도로 시험을 하였다. Fig. 9는 PTFE 유리섬유의 인장시험 결과를 나타내었으며



Fig. 7 Tensile Test Equipment with Laser Extensometer



Fig. 8 PTFE Fabric Tensile Test



Fig. 9 PTFE Fabric Tensile Test Result

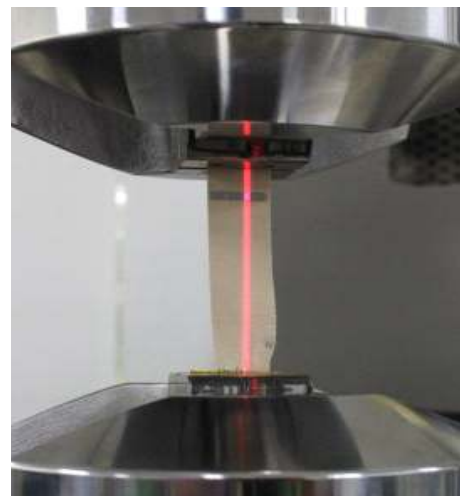


Fig. 10 PTFE Fabric Tensile Test Result with Laser Extensometer

Fig. 10는 레이저 측장기를 추가적으로 사용하였을 때 이다. 사용된 레이저 측장기는 100mm 까지 측정이 가능하며 표점거리를 50mm로 두고 실험 하였다. Fig. 11과 Fig. 12은 PTFE 유리섬유의 경사 및 위사 방향에 대한 하중-변위, 응력-변형률 관계를 그래프로 나타낸 그림이며, Fig. 13와 Fig. 14은 레이저 측장기를 이용하여 변형률을 측정하였을 때 PTFE 유리섬유의 경사 및 위사 방향에 대한 하중-변위, 응력-변형률 관계를 나타낸 그림이다.

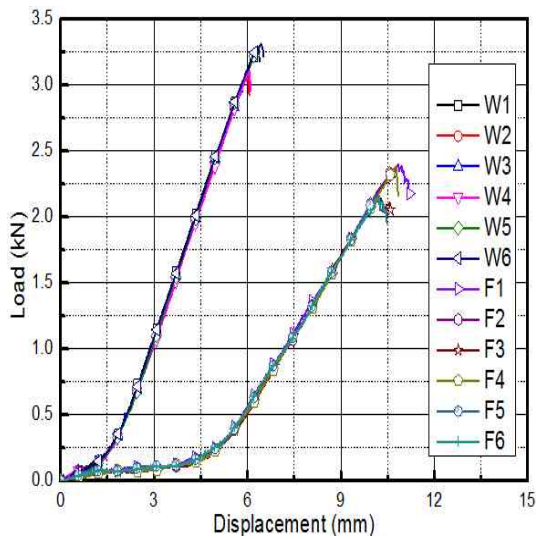


Fig. 11 Load-Displacement curve of Warp and Fill Direction

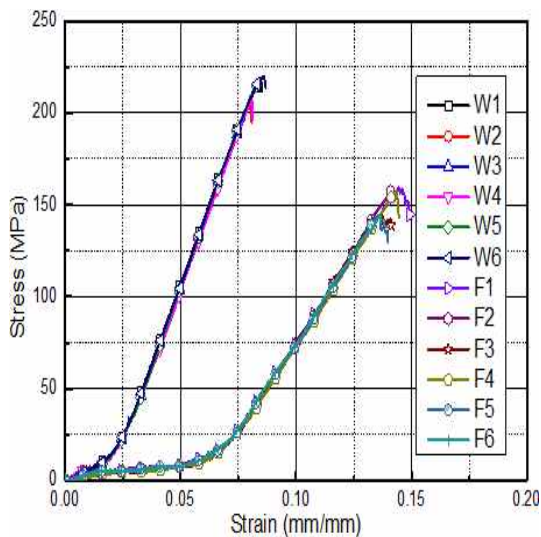


Fig. 12 Stress-Strain curve of Warp and Fill Direction

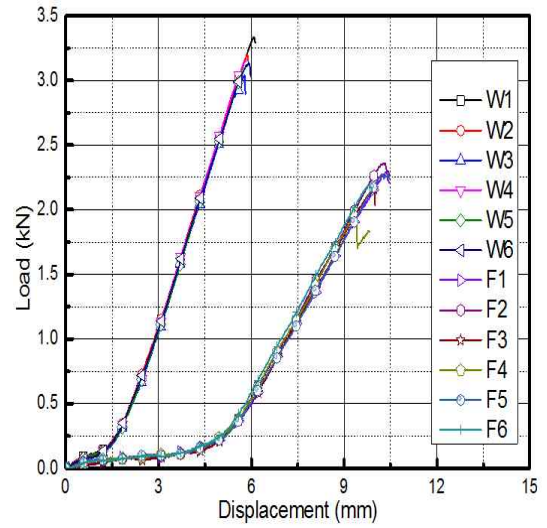


Fig. 13 Load-Displacement curve of Warp and Fill Direction (with Laser Extensometer)

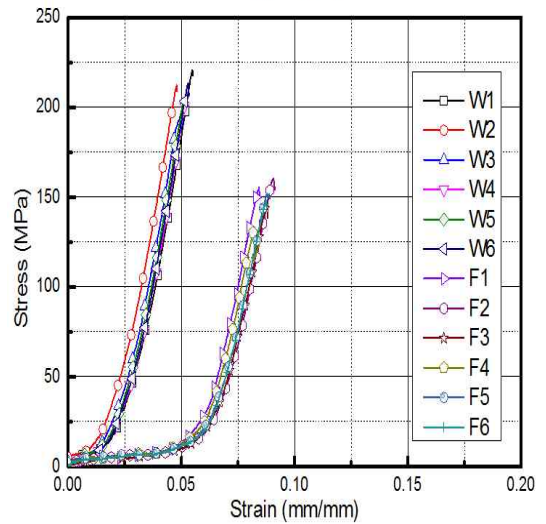


그림. 14 Stress-Strain curve of Warp and Fill Direction (with Laser Extensometer)

2.3 건축용 유리섬유 물성시험 결과 고찰

2.3.1. 건축용 유리섬유의 밀도시험에 대한 고찰

밀도 시험의 경우 시편을 측정하는 주위의 환경에 대하여 민감하며 값의 차이를 나타낼 수 있다. 또한, 섬유에 어느 코팅물질이 적용하는가에 따라서도 그 물성이 변할 수 있다. Table 1은 PTFE가 코팅된 유리섬유에 대하여 밀도 시험을 진행한 결과 값이다.

Table 1 PTFE Fabric Density Test Result

Specimen	Density	Error	Width	Thickness	Length
	g/cm ³	%	mm	mm	mm
1	1.775	3.19	34.92	0.605	34.65
2	1.767	3.60	34.84	0.612	34.42
3	1.824	0.50	34.72	0.605	34.41
4	1.771	3.39	34.98	0.610	34.41
Avg	1.784	2.67	34.87	0.608	34.47
* Reference Density : 1.8333 g/cm ³					

시험에 사용된 섬유의 밀도는 1.8333 g/cm³이다. 시험은 총 4개의 시편에 대하여 진행하였다. 결과를 살펴보면 평균 1.784 g/cm³으로 나타났으며 평균 3%, 전체적으로는 최대 3.6% 정도의 차이가 생겼다.

PTFE가 코팅 된 유리섬유의 경우 방수성을 가진 재료이기 때문에 밀도 시험 시 기포가 시편에 붙는 것을 주의해야 한다. 또한, 주로 증류수를 사용하여 비중 차이를 이용한 밀도를 측정하게 되는데 증류수의 온도가 너무 낮게 되면 그에 따른 보정 값을 이용하여 구해지지만 주위온도에 따라 증류수의 온도가 크게 변할 수 있으므로 밀도 측정 시에는 주위의 온도와 같은 온도에서 실험하는 것이 더 정확한 값을 얻을 것으로 생각된다.

2.3.1. 1축 인장강도 시험에 대한 고찰

PTFE이 코팅 된 유리섬유에 대한 인장강도 시험의 결과를 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

Table 2 Warp Direction Test Result with Laser extensometer

No.	Load	Stress	Strain	Modulus
	kN	MPa	%	GPa
1	3.33	220	5.52	6.75
2	3.20	212	4.81	7.41
3	3.04	199	5.07	7.13
4	3.15	208	5.27	6.73
5	3.06	203	5.08	7.16
6	3.14	213	5.34	7.01
Avg.	3.15	209	5.18	7.03
Ref.	2.40	160	3~10	-

Table 3 Fill Direction Test Result with Laser extensometer

No.	Load	Stress	Strain	Modulus
	kN	MPa	%	GPa
1	2.29	156	8.47	6.32
2	2.36	160	9.13	6.06
3	2.16	147	8.82	5.97
4	1.96	132	8.44	6.11
5	2.28	152	8.91	6.10
6	2.20	148	8.79	5.90
Avg.	2.21	149	8.76	6.08
Ref.	1.80	120	5~17	-

1축 인장 시험에 대하여 Table 2는 경사(Warp)방향에 대하여 실험한 결과이며, Table 3은 위사(Fill)방향에 대하여 실험한 결과를 나타낸 것이다.

유리섬유 막재의 경사 방향의 응력은 209 MPa로 측정되었으며, 변형률은 5.18%, 탄성계수는 7.03 GPa로 측정되었다. 위사 방향의 경우 응력은 149 MPa, 변형률은 8.76%, 탄성계수는 6.08 GPa로 경사 방향보다는 응력과 탄성계수가 낮게 나오는 것을 확인하였다. Fig. 13와 Fig. 14으로부터 시험시편 간의 값의 차이도 크게 나지 않는 것을 확인 할 수 있으며, 시험의 방법이 잘 맞았다고 생각된다.

Fig. 11과 Fig. 12는 레이저 측정기를 사용하지 않고 그림간의 거리를 이용하여 측정된 결과이다. 하중-변위 그래프를 살펴보면 비슷한 하중과 변위를 얻을 수 있으나 응력-변형률 그래프를 살펴보면 그림간의 거리를 이용한 변형률과 레이저 측정기를 사용한 변형률은 차이가 존재하게 된다. 이는 그림간 거리를 사용 시 초기 길이 75mm를 표점거리로 사용하고 레이저 측정기는 50mm의 표점거리를 사용하므로 변형률을 측정하고자 하는 범위의 차이 때문에 나타날 수 있는 결과라 생각된다. 하지만 두 경우 모두 변형률결과가 사용된 시편 제조사에서 제시된 변형률 범위 안에 모두 들어가기 때문에 결과로만 보면 문제가 되지 않는다. 다만 레이저 측정기는 센서반사테이프(reflective tape)를 사용하기 때문에 시편이 매우 얇거나 코팅양이 적은 시편을 사용한다면 결과에 영향을 받을 수 있으며 레이저 측정기의 측정 범위를 벗어날 수 있는 시편의 경우에 그림간의 거리를 사용하여 변형률을 측정하는 편이 좋다고 생각한다. 그 외의 경우에는 결과의

신뢰성이 높은 레이저 측정기를 이용한 편을 추천한다. 또한, 1축 시험 조건에 영향을 줄 수 있는 온도와 습도 등에 따른 물성의 변화를 확인할 필요성이 있다 [13-14].

3. 결론

본 연구에서는 새로운 풍력발전기를 제작하기 위하여 스킨의 재료로 사용하고자 하는 건축막 재료에 대하여 밀도 및 1축 인장 시험을 진행 하였다.

밀도의 경우 주위의 온도 및 증류수의 온도에 따라 결과가 달라질 수 있기 때문에 주의해야 하며 시험 도중 기포가 붙지 않게 시험해야 한다. 섬유의 직조 상태 및 코팅 상태에 따라 결과 값이 다르게 나타날 수 있기 때문에 비중을 이용하여 구한 방식이 흔히 알고 있는 아르키메데스 법칙으로 구한 결과 보다 더 정확한 값을 얻을 수 있다.

1축인장 시험의 결과의 경우 시험 하고자 하는 시편에 맞는 그립압를 주어야 미끌림 현상이나 조기파단 (premature)을 방지 할 수 있으며 시편마다 비슷한 결과를 취할 수 있다는 것을 시험을 통해 알 수 있었다. 또한, 실험 결과로부터 레이저 측정기를 사용 유무에 따른 변형률이 차이를 가지는 것을 알 수 있었다.

건축막 재료를 풍력 발전 블레이드의 스킨 재료로서 사용하기 위해 밀도 및 1축 인장 시험 뿐만 아니라 인열 시험, 접합시험 및 내구성 시험 등 여러 시험을 통해서 적절성을 파악해야 한다. 또한, 해안가에 설치 할 경우 습도, 태양의 자외선에 따른 변화 등의 환경 요건들도 고려하여 시험하여 설계에 반영해야 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원 에너지기술개발사업의 연구비 지원 (No. 20143030021130) 에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] S.D.Kim, “The Present and Future of Architectural Fabrics”, Review of Architecture and Building

Science, Vol. 49, No. 10, 49-56, 2005

[2] K.G.Park, S.K.Yoon, J.B.Lee, W.H.Jun, “Cycling Load of Architectural Glass Fiber Membrane”, Proceedings of KASS Symposium, Spring 2008, Vol. 5, No. 1, 2008

[3] K.G.Park, S.M.Park, “Testing Method of Tension Strength for Architectural Membrane Material“, KASSS Journal, Vol. 7, No. 4, 5-9, 2007-2008

[4] ASTM D792-13 : Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement

[5] K.Y.Baek, M.R.Jung, “Test on Tension Strength and Loading for Architectural Fabric”, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol 30, No. 1, 47-48, 2010

[6] J.G.Park, D.C.Ahn, J.B. Nam, Y.S.Kim, “State of Art for Biaxial Tensile Test Systems” Transactions of Materials Processing, Vol. 20, No.3, 222-228, 2011

[7] C.Galliot, R.H.Luchsinger, “The shear ramp : a new test method for the investigation of coated fabric shear behaviour - Part II : experimental validation”, Composites Part A : Applied Science and Manufacturing, Vol. 41, Issue 12, 1750-1759, 2010

[8] S.Y.Sur, “Testing Method of Elastic Ratio of Architectural Fabric”, KASSS, Vol. 8, No. 3, 2008

[9] ASTM D3035-11 : Standard Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics

[10] KS K 0521 : 텍스타일 -천의 인장 성질 -인장강도 및 신도 측정

[11] ASTM D4851-07 : Standard Test Methods for Coated and Laminated Fabrics for Architectural Use

[12] B.N.Bridgens, “Architectural Fabric Properties: Determination, Representation and Prediction”, Doctor of Philosophy, The University of Newcastle-upon-Tyne, 2005

[13] K.G.Park, H.S.Lee, Y.H.Choi, I.S.Kim, H.K.Kim, “Quality Evaluation of Architectural Membrane”, Proceedings of KASS Symposium, Vol. 7, No. 1, 2010

[14] Y.H.Huh, J.I.Kim, D.J.Kim, G.C.Lee,

“Temperature-Dependency of Tensile Properties of GFRP Composite for Wind Turbine Blades”, KSME A, Vol. 36, No. 9, 1053-1057, 2012

저 자 소 개



조 형 순

2012년 한국항공대 기계공학과 졸업.
2015년 동 대학원 석사. 2015년~현재
항공우주산업기술연구소 연구원. 관심
분야는 복합재료 구조 및 응용.



배 재 성

1996년 한국항공대학교 항공기계공학과 졸업. 1998년 한국과학기술원 항공우주공학과 석사. 2002년 한국항공대학교 항공우주공학과 박사. 2005년~현재 한국항공대학교 항공우주및기계공학부 부교수. 관심분야는 공력탄성학, 기계진동, 풍력발전기



이 수 용

1981년 한국항공대 항공기계과 졸업.
1985년 미국 Stanford University 대학원 공학석사. 1989년 미국 Stanford University 대학 공학박사. 1992년~현재 한국항공대학교 항공우주및기계공학부 교수. 관심분야는 복합재 구조 및 응용, 설계.