

풍력 발전 블레이드 복합재 GFRP 의 인장 특성의 온도 의존성[§]

허용학^{*†} · 김종일^{*} · 김동진^{*} · 이건창^{*}

*한국표준과학연구원 산업측정표준본부

Temperature-Dependency of Tensile Properties of GFRP Composite for Wind Turbine Blades

Yong-Hak Huh^{*†}, Jong Il Kim^{*}, Dong Jin Kim^{*} and Gun Chang Lee^{*}

*Div. of Industrial Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science

(Received April 16, 2012 ; Revised July 9, 2012 ; Accepted July 12, 2012)

Key Words: Wind Turbine Blade(풍력발전 블레이드), GFRP Composite(GFRP 복합재), Tensile Properties(인장강도), Temperature Dependency(온도의존성)

초록: 본 연구에서는 풍력 발전 블레이드용 재료인 GFRP(Glass fiber-Reinforced Plastic) 복합재의 인장특성의 온도에 따른 의존성을 고찰하였다. 섬유 방향이 0°와 0/±45°로 적층된 두 종류의 복합재로 제작된 인장 시험편으로부터 인장 강도와 탄성계수 그리고 푸아송비에 대한 특성을 상온, -30°C, -50°C 그리고 60°C에서 측정하였다. 인장 시험으로부터 섬유방향이 축방향으로 적층된 복합재의 인장강도와 탄성 계수는 섬유 적층 방향의 의존성을 보였고 단축으로 적층된 복합재의 강도 및 탄성 계수가 상대적으로 우수함을 보았다. 그리고 시험온도의 의존성도 확인할 수 있었으며, 푸아송비는 온도의 영향이 크지 않음을 확인할 수 있었다.

Abstract: In this study, the temperature-dependency of the tensile properties of a glass fiber reinforced plastic (GFRP) used in wind turbine blades was examined. The tensile strength, elastic modulus, and Poisson's ratio of the tensile specimen manufactured from uniaxial (0°) and triaxial (0/±45°) laminate composite plates were measured at four different testing temperatures—room temperature, -30°C, -50°C, and 60°C. It was found that the tensile strengths and elastic moduli of the uniaxial laminates were greater than those of the triaxial laminates over the testing temperature range. The tensile strength of the two laminates was significantly dependent on the testing temperature, while the dependency of the elastic modulus on the temperature was insignificant. Furthermore, it could be considered that the Poisson's ratio changed slightly with a change in the testing temperature.

1. 서 론

신재생에너지 개발에 대한 세계 각국의 요구가 커짐에 따라 중장기적으로 에너지 개발 및 확보를 위한 노력이 증대되고 있고, 특히 풍력 에너지의 개발은 폭발적으로 증가되고 있다. 최근 이러한 풍력 발전 에너지의 개발은 세계 각국의 개발 의지와 함께 대형 및 해상 풍력으로 발전하고 있고, 풍력 에너지 획득을 증가시키기 위하여 극한 지역

에까지 에너지 획득 지역이 넓어지고 있다. 이러한 에너지 개발 영역 확대는 운영하는 풍력 발전 사용 환경에 대한 신뢰성이 중요하게 되고 이를 위하여 사용 온도에 대한 특성 파악과 이에 대한 설계가 요구된다.

일반적으로 풍력 발전 블레이드는 풍력 발전기의 30년 사용 수명동안 -20°C 미만부터 50°C 이상의 온도 조건에 노출되게 된다. 따라서 풍력 발전기의 신뢰성을 확보하기 위해서는 블레이드의 주 재료인 GFRP 복합재의 온도에 대한 특성 파악이 필요하다. 일반적으로 복합재에서는 섬유(fiber)와 매트릭스(matrix) 계면의 온도 영향이 섬유 배열과 레진 특성에 따라 크게 나타날 수 있다.⁽¹⁾ 그러나 일반적으로 저온의 환경에서는 취성이 더 커

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계학술대회 (2012. 4. 5.-6., 영남대학교) 발표논문임.

† Corresponding Author, yhhuh@kriss.re.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

지게 되고 탄성계수가 증가하고, 고온에서는 온도의 증가에 따라서 인장 강도는 감소하는 특성을 나타낸다.^(2,3) 이러한 온도의 증가에 따른 강도의 변화와 함께 복합재의 파괴 특성도 온도의 증가에 따라 계면 파괴 에너지의 감소를 가져오고 있음을 실험결과에서 보여주고 있다. 복합재의 온도에 따른 기계적 물성의 변화는 복합재 구성재료의 열팽창 계수의 차이로 인한 내부 응력의 발생으로 부분적으로 기인하고 있다고 할 수 있다. 또한 저온에서도 온도의 변화에 따라 내부 응력의 변화를 가져와 매트릭스 균열을 발생하게 된다.

본 연구에서는 이러한 온도에 따른 풍력 발전 블레이드 재료인 GFRP의 사용온도 범위내에서의 특성을 조사하였다. -50℃에서 60℃까지 변화하는 온도 범위에서 인장 특성인 인장강도, 탄성계수 그리고 푸아송비(Poisson's ratio)의 변화를 실험적으로 고찰하였으며, 온도 천이에 따른 각 물성의 의존성을 확인하였다.

2. 시험 방법

2.1 시험편

본 연구에 사용한 재료는 풍력 발전 블레이드 복합재인 GFRP(Glass Fiber-Reinforced Plastic)으로 섬유 방향이 시험편 길이 방향(0°)의 1축인 UD와 0°/±45° 세 축으로 적층된 TRI 두 종류이다. 이 두 복합재의 적층(laminate)은 E-glass/Epoxy로 하였고, 두 재료 모두 동일하게 4 Ply로 적층하였다. 두께는 두 재료 모두 3.5 mm이며 판재형으로 제작하였다. 인장 시험편은 ASTM D5083과 ISO 527-4에 규정된 표준 시험 방법^(4,5)에 따라 너비 25 mm, 길이 200 mm로 제작하였다. 인장 하중의 부하에 따른 변형률을 측정하기 위하여 시험편 앞면과 뒷면에 각각 3개와 1개의 변형률 게이지(kyowa, 120Ω, 게이지 길이 5 mm)를 Fig. 1과 같이 부착하였다. 앞면에 부착한 두 게이지는 시험편 축 방향 그리고 하나의 게이지는 횡 방향으로 각각 부착하였고 뒷면의 게이지는 축 방향으로 부착하였다.

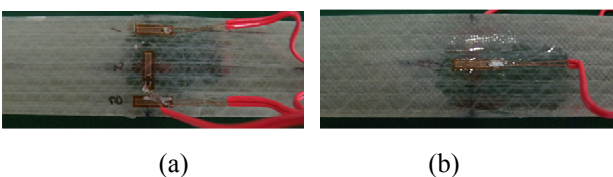


Fig. 1 Strain gauges mounted on the (a) front face and (b) back face of the tensile specimen used in this test

2.2 측정시스템 및 측정 조건

Fig. 2는 본 측정에 사용한 인장 시험 시스템(MTS 810, 하중 용량:250 kN)과 온도 환경을 조성한 환경 챔버(MTS, 651)를 나타낸다. 시험온도는 -50℃, -30℃, 상온 그리고 60℃로 하였으며, 각 시험온도는 시험편에 부착된 열전대(J 타입)를 기준으로 제어하였다. 시험 온도에 도달한지 약 30분 뒤에 인장 시험을 수행하였다. 인장 시험은 변위 제어로 수행되었고 시험 속도는 1 mm/min로 하였다. 시험편에 부착된 변형률 게이지로부터 인장 변형률은 데이터 획득 시스템(Vishay, SYSTEM 7000)을 사용하여 10 Hz로 획득하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 인장 곡선 거동 특성

Fig. 2에서 보여준 측정 시스템을 사용하여 인장 시험을 수행하였으며, 시험편 앞면과 뒷면에 부착된 변형률 게이지로부터 측정된 변형률을 사용하여 축방향 변형률과 횡 방향 변형률을 각각 계산하였다. 축 방향의 변형률은 Fig. 1에서 보여준 앞면 두 축 방향 변형률 게이지의 변형률의 평균과 뒷면의 변형률 게이지의 변형률의 평균으로 정하였으며, 횡방향 변형률은 Fig. 1(a)의 횡 방향 게이지의 변형률로 정의하였다.

$$\varepsilon_a = \frac{1}{4}(\varepsilon_{f,1} + \varepsilon_{f,2} + 2\varepsilon_{b,1}) \quad (1)$$

$$\varepsilon_T = \varepsilon_{f,3}$$



Fig. 2 Photographs for tensile testing system with environmental chamber

여기서 $\epsilon_{f,1}$ 와 $\epsilon_{f,2}$ 은 시험편 전면에 부착된 축 방향 게이지로부터 측정되는 변형률 $\epsilon_{b,1}$ 는 시험편 뒷면에 부착된 축 방향 게이지로부터 측정되는 변형률, $\epsilon_{f,3}$ 은 시험편 전면에 부착된 횡 방향의 게이지로부터 얻어지는 변형률을 나타낸다.

Fig. 3은 본 연구에서 설정한 시험온도 영역에서 얻어진 복합재 UD의 응력-변형률 곡선을 나타낸다. 응력-변형률 곡선은 인장 강도가 결정될 때까지 비교적 선형성이 잘 유지되고 있음을 볼 수 있다. 또한 시험 온도의 변화에 따라 인장 곡선은 매우 유사함을 볼 수 있다. 그러나 이 곡선으로부터 탄성계수를 결정하기 위하여 곡선을 잘 살펴보면 초기 변형률 영역과 이후 영역에서의 곡선은 다른 선형 기울기를 가지고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 3(b)는 Fig. 3(a)의 전체 응력-변형률 곡선에서 초기 변형률 영역에서의 응력-변형률 관계를 나타내고 있으며, 이 영역에서 곡선은 선형적인 응

력-변형률 관계로 나타낼 수 있다. 이와 같은 초기 영역의 선형적인 관계와는 달리 초기 영역을 벗어난 영역에서의 곡선은 초기 선형의 기울기와는 다른 기울기로 천이가 되고 있어, 초기 변형률 영역과는 구분되고 있다. 이와 같은 응력-변형률의 관계는 복합재 TRI에서도 동일하게 관찰될 수 있다. Fig. 3(b)에서 보여준 바와 같이 응력-변형률 곡선의 기울기의 변화를 보이기 시작하는 초기 변형률 영역은 약 $2000 \mu\epsilon$ 부근이다.

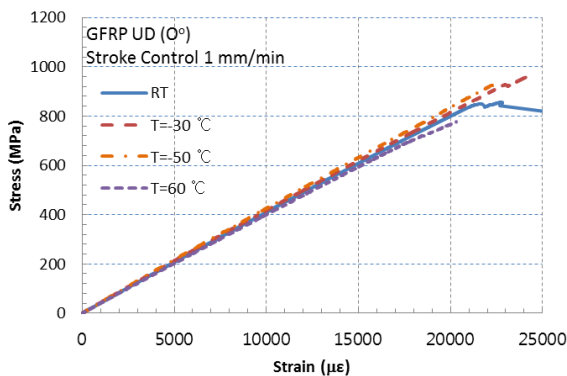
3.2 섬유 방향 과 온도에 따른 인장 특성

Fig. 3에서 보여준 인장 응력-변형률 곡선으로부터 두 복합재 UD와 TRI의 인장 강도와 탄성 계수를 결정하였으며, Fig. 4는 본 측정 온도에 따른 인장 강도와 탄성 계수의 변화를 각각 나타낸다. 여기서 인장 강도는 인장-변형률 곡선에서 최대 하중에서의 강도를 나타내며, 탄성 계수는 Fig. 3(b)에서 보여준 바와 같이 인장 응력-변형률 곡선에서 기울기 천이가 발생하기 전의 초기 선형 기울기에서 결정하였다.

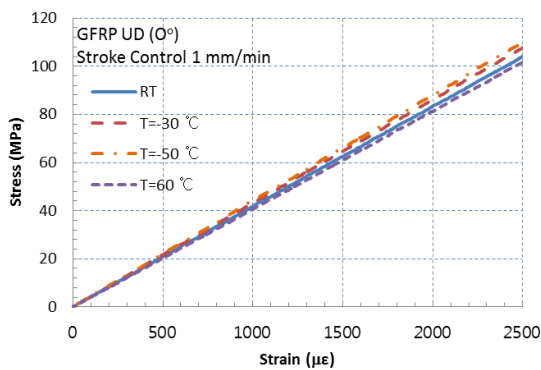
Fig. 4(a)에서 보여주고 있는 인장 강도는 복합재의 적층 섬유 방향과 온도의 영향을 같이 나타내고 있다. 섬유 방향이 다른 두 복합재의 인장 강도는 명확한 차이를 보이고 있다. 0° 의 섬유 방향을 가지는 복합재 UD의 인장 강도는 903 MPa로 복합재 TRI보다 상온에서는 약 47% 더 크고 온도가 저온으로 감에 따라 약 44%의 인장 강도의 증가가 발생하고 있다. 그러나 60°C 의 고온에서는 섬유 방향에 의한 영향은 57%로 상대적으로 크게 나타나고 있다.

탄성계수에서도 섬유 방향에 대한 영향이 명확하게 나타나고 있으며, 이는 Fig. 4(b)에서 보여주고 있다. 0° 의 섬유 방향을 가지는 복합재 UD의 탄성계수가 복합재 TRI에 비해 상대적으로 크며, 상온에서 복합재 UD는 약 43 GPa로 복합재 TRI에 비해 약 32%가 크다. 이러한 상대적인 차이는 저온과 고온에서 약 31%로 유사하게 나타나고 있다.

상온에서 903 MPa의 인장 강도를 가지는 복합재 UD에서는 온도가 60°C 로 측정온도가 증가함에 따라 인장 강도는 16% 정도 감소하고 저온으로 감에 따라 인장 강도는 15% 정도 증가하고 있음을 Fig. 4(a)는 보여주고 있다. 저온인 -30°C 와 -60°C 에서는 인장강도의 상대적인 차이가 크지 않았다. 이러한 경향은 복합재 TRI에서도 확인할 수 있으며, 상대적인 증가 및 감소폭도 비교적 유



(a) Over full strain range



(b) Over the initial strain range

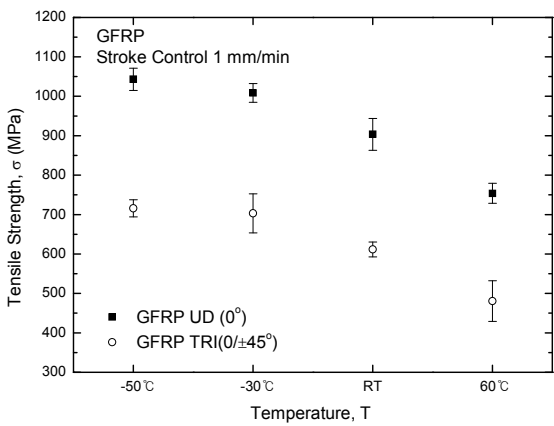
Fig. 3 Typical example of the stress-strain curve at four different testing temperatures for GFRP composite UD

사하다. 이러한 인장 강도의 온도에 따른 변화는 탄소 섬유 복합재에도 나타난 바 있다.^(2,3) 이러한 온도에 따른 강도의 증가와 감소는 일반적으로 섬유와 매트릭스간의 재료의 열 팽창계수의 차이로 인한 내부 응력의 발생으로 기인하고 있다고 보고 되고 있다.⁽⁶⁾

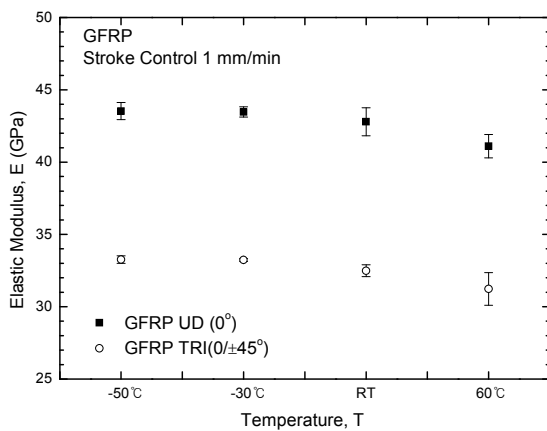
이에 비해 탄성 계수는 온도의 영향이 인장 강도에서의 영향에 비하여 상대적으로 크게 나타나지 않고 있음을 Fig. 4(b)는 보여주고 있다. 특히 저온에서는 그 차이가 그리 크지 않다. 그러나 온도가 상승함에 따라 탄성 계수는 약간 감소하는 경향을 보이고 있다.

3.3 푸아송비 특성

Fig. 1 에서 보여준 바와 같이 변형률 게이지를



(a)



(b)

Fig. 4 Variation of (a) tensile strength and (b) elastic modulus for two UD and TRI composites with testing temperatures

시험편에 부착하여 인장 하중 부하동안 축 방향의 변형률과 횡방향의 변형률 측정을 하였으며, 이로부터 두 복합재의 푸아송비를 결정하였다. Fig. 5 는 식(1)에 따라 얻어진 변형률, 축 방향의 변형률과 횡방향의 변형률의 관계를 복합재 UD 에 대하여 나타낸 결과이다. Fig. 5 에서 보여준 바와 같이 두 방향 변형률, 즉 축 방향과 횡 방향의 변형률은 초기 변형 부분과 대 변형이 이루어지는 부분에서의 기울기 차이가 일어나고 있음을 볼 수 있으며, 본 연구에서는 푸아송비의 결정을 초기 선형 기울기에서 결정하였다. 이러한 두 변형률의 기울기 차이가 특성은 복합재 TRI 에서도 동일하게 나타나고 있었으며, 본 연구에서 설정한 시험온도에서도 동일하게 나타났었다. Fig. 6 은 각 시험온도에 대하여 측정한 복합재 UD 와 TRI 에서의 푸아송비의 변화를 나타낸다. 단축 적층 복합재 UD 의 푸아송비는 시험온도와 무관하게 0.28~0.30 의 범위에 존재하고, 다축 적층 복합재 TRI 의 푸아송비는 0.41 ~ 0.51 에 존재하며 온도에 대하여

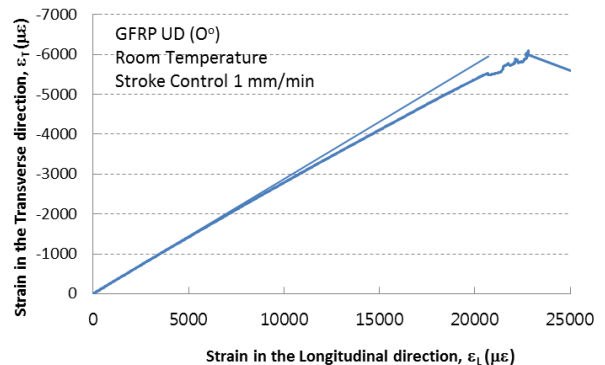


Fig. 5 Typical example of the longitudinal and transverse strain during tensile loading for composite UD

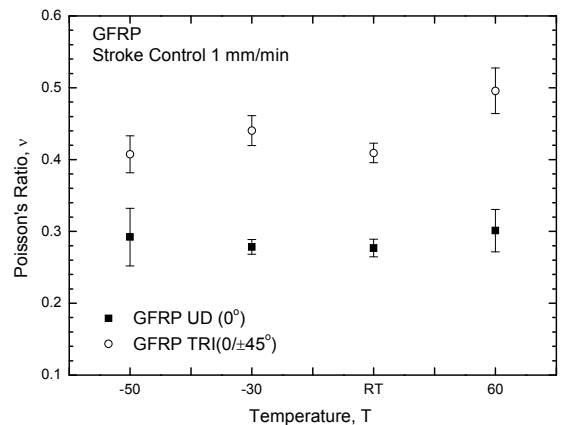


Fig. 6 Variation of Poisson's ratio with temperature

어떠한 경향성을 볼 수 가 없었다. 단축 복합재 UD 가 다층 적층 복합재 TRI 에 비하여 푸아송비가 작음을 확인할 수 있다.

3.4 파단면 분석

섬유방향이 다른 두 적층 복합재의 인장 하중에 대한 거동을 Fig. 3 과 Fig. 4 을 통하여 확인할 수 있었으며, 이들 거동은 온도에 따라 다소의 차이를 보이고 있음을 알 수 있었다. 이러한 거동의 차이는 파단면에 어떠한 영향을 미칠 수 있는 가를 보기 위하여 각 복합재의 온도별 대표적인 파단면을 Table 1 과 같이 정리하였다. 복합재 UD 에서는 상온에서 섬유와 매트릭스가 적절히 파손되어 최대 하중의 도달로 파괴에너지가 섬유 파손과 매트릭스로 적절히 분산되어 있었다. 시험온도가 상승함에 따라 60℃ 에서는 섬유가 매트릭스외부로 노출되지 않고 내부에서 파손된 형태를 보이고 있다. 이에 반하여 저온으로 감에 따라 매트릭스의 취성으로 섬유와 매트릭스가 같이 파손되고 섬유의 취성 파괴가 과다하고 노출되어 나음을 볼 수 있다. 복합재 TRI 에서는 상온에서는 매트릭스와 섬유의 적절한 파손으로 파괴에너지가 분산되고 섬유의 45 도 방향의 적층으로 전단 파괴 양상을 볼 수 있으며, 전체적으로는 복합재 UD 와 매우 유사한 파괴형태를 보이고 있다. 복합재 TRI 도 복합재 UD 와 같이 시험 온도의 상승과 감소에 대하여 유사한 파단 형태를 보이고 있으며, 저온에서는 비교적 섬유 파단의 비율이 상대적으로 많음을 볼 수 있다.

Table 1 Comparison of fracture appearance of the two composites UD and TRI with change of testing temperature

Temp.	UD	TRI
-50℃		
-30℃		
RT		
60℃		

4. 결 론

본 연구에서는 풍력 발전 블레이드용 재료인 GFRP(Glass fiber-Reinforced Plastic) 복합재의 인장 특성의 온도에 따른 의존성을 고찰하였다. 섬유 방향이 단축(0°)와 삼축(0/±45°)로 적층된 두 종류의 복합재로 제작된 인장 시험편으로부터 인장 강도와 탄성계수 그리고 푸아송비에 대한 특성을 측정하였다.

- (1) 단축 방향으로 적층된 복합재의 인장강도와 탄성 계수는 3 축으로 적층된 복합재보다 크다.
- (2) 시험 온도가 상승함에 따라 인장 강도는 감소하고 온도가 낮아짐에 따라 증가하는 경향을 보였으나, 탄성계수는 온도의 영향이 크지 않았다.
- (3) 푸아송비는 3 축으로 적층된 복합재가 단축 복합재에 비해 상대적으로 크나, 온도의 변화에 따른 영향이 크지 않았다.

후 기

본 연구는 2011 년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (2010T100100754)

참고문헌

- (1) Buxton, A., Baillie, C., 1994, "A Study of the Influence of the Environment on the Measurement of Interfacial Properties of Carbon Fiber/Epoxy Resin Composites," *Composites*, Vol. 25, No. 7, pp. 604~608.
- (2) Schwartz, M.M. 1996, "The Influence of Environmental Effects," *Composite Materials Properties, Nondestructive, Testing and Repair*, pp. 117~119.
- (3) Hale, J.M., Gibson, G.A., 1997 "Strength Reduction of GRP Composites Exposed to High Temperature Marine Environments," *Proceedings of ICCM-11, Gold Coast, Australia, 14th-18th*, pp. 411~420.
- (4) ASTM D5083 - 10 Standard Test Method for Tensile Properties of Reinforced Thermosetting Plastics Using Straight-Sided Specimens.
- (5) ISO 527-4 :1997 Plastics - Determination of Tensile Properties - Part 4: Test Conditions for Isotropic and Orthotropic Fibre-Reinforced Plastic Composites.
- (6) Marom, G., 1989, "Environmental Effects on Fracture Mechanical Properties of Polymer Composites," *Application of Fracture Mechanics to Composite Materials*, edited by Friedrich, K., pp. 397~423.