

진공성형 공법을 이용한 풍력발전기 블레이드의 수리

이광주*, 장한슬², 선석운²

¹한국기술교육대학교 기계공학부, ²한국기술교육대학교 대학원 기계공학과

Application of the Infusion Method to the Repair of Damage in Wind Turbine Blades

Kwangju Lee*, Han Seul Jang², Seokwoon Seon²

¹School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education

²Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Korea University of Technology and Education

요약 운전 중에 손상된 풍력발전기 블레이드는 전통적으로 에폭시 수지를 사용하는 수적층 공법으로 수리가 되어 왔다. 수적층 공법의 접착 강도는 높지 않으며 에폭시 수지는 낮은 온도에서 경화특성이 좋지 않은 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 손상된 블레이드 수리를 위하여 폴리에스터 수지를 사용하는 진공성형 공법을 제안한다. 진공성형 공법은 수지를 균일하게 분포시키는 장점이 있으며, 폴리에스터 수지는 저온에서 에폭시보다 경화가 더 잘되는 특성을 가지고 있다. 상온에서 수리가 이루어질 때, 제안한 방법을 사용할 경우 전통적인 방법에 비하여 평균 접착강도가 최대 77.7% 향상되었다. 섭씨 15도와 5도에서 제안한 방법을 사용하여 수리가 이루어질 때, 동일한 온도에서 전통적인 방법으로 수리한 경우보다 평균 접착강도가 향상되었다. 전통적인 방법을 사용하여 수리가 불가능한 저온에서도, 본 논문에서 제안한 방법을 사용할 경우 수리가 가능하게 되었고 상온에서 전통적인 방법으로 수리가 된 경우보다 더 좋은 접착강도를 얻을 수 있게 되었다.

Abstract Damaged wind turbine blades are repaired conventionally using a hand lay-up method with epoxy, where the bonding strength is not high. Epoxy has poor curing characteristics at low temperatures. The infusion method with polyester was proposed. Infusion method is believed to distribute resin uniformly. Polyester is used because it hardens better than epoxy at low temperatures. At room temperature, the proposed method increased the bonding strength by 77.7% compared to the conventional method. Using the proposed method at 15 and 5°C, the bonding strength increased compared to the conventional method. This paper proposes a new method for repairing wind turbine blades, even at temperatures where the conventional method cannot be used because epoxy resin does not harden. The bonding strength of the proposed method at low temperatures is higher than that of the conventional method at room temperature.

Key Words : Wind Turbine Blade, Infusion Method, Polyester, Bonding Strength

1. 서론

1.1 연구배경

풍력발전기 블레이드 (Wind Turbine Blade)는 운전 과정에서 강한 바람, 블레이드의 진동, 낙뢰, 새나 얼음

등과의 충돌 및 제작상의 결함으로 인해 파손될 가능성이 높다. 초기 크랙이 발견되면, 블레이드가 풍력발전기에 장착된 상태로 지상 50~100m 높이의 고공에서 수행되므로 공간적인 제약과 외기의 온도 및 바람에 의해 크게 영향을 받게 된다.

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2013년도 산학연협력 기술개발사업 (과제번호 C0124121)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

*Corresponding Author : Kwangju Lee(Korea Univ. of Technology and Education)

Tel: +82-10-5619-1125 email: klee@kut.ac.kr

Received July 10, 2014

Revised August 6, 2014

Accepted August 7, 2014

블레이드의 수리를 위해서 에폭시 수지를 사용하는 수적층 공법 (Hand Lay-up Method)이 전통적으로 사용되어 왔다. 수적층 공법에서는, 유리 섬유를 에폭시 수지를 사용하여 손으로 눌러서 접착하므로, 진공이나 가압 등을 통하여 이루어지는 수리 공법에 비하여 접착 강도가 낮아질 수밖에 없는 한계를 가지게 된다.

전통적인 수리 공법의 또 다른 문제는 온도에 의한 제약이다. 일반적으로 전통적인 방법에서는 에폭시 수지를 주로 이용하고 있다. 그 이유는 에폭시 수지의 접착강도가 양호하고 작업성이 뛰어나기 때문이다. 그러나 섭씨 15도 이하의 온도에서는 에폭시 수지의 자연 경화가 거의 불가능하다. 국내에서 풍력발전기가 설치된 지역은 주로 풍속이 높은 산악 지대이다. 따라서 봄과 가을의 온도는 섭씨 15도 이하이며, 한 여름에도 온도는 섭씨 25도 정도에 불과하다. 강한 풍속으로 인한 열손실 효과 등을 감안하면 국내 육상 풍력 발전 사이트의 온도는 약 6~9월의 4개월 동안만 섭씨 15도 이상을 유지하므로, 에폭시 수지를 사용할 경우에 정상적인 수리 작업은 1년 중에 약 4개월 동안만 가능한 실정이다.

1.2 연구동향

Marin 등 [1]은 풍력 발전기용 블레이드의 손상은 피로 메커니즘에 의한 것으로 판단하여, 응력집중 부위에 대한 보안을 통하여 손상 영역의 응력을 크게 경감하는 방안에 대한 연구를 하였다. 일반적으로 에폭시 수지는 상온에서 경화시간이 짧고 저온에서는 경화가 잘 되지 않는 특성을 가지고 있다. 이런 단점을 해결하기 위하여 영국 Gurit 사는 자외선에 의해 경화가 시작되는 에폭시 수지를 적용하여, 작업온도 및 경화시간의 제약을 받지 않는 제품을 개발하였다[2]. 프랑스 Resoltech 사는 에폭시 수지를 사용하지만 이를 키트화 함으로써 풍력 발전 사이트 현장에서 작업성을 대폭 향상시킨 제품을 개발하였다[3].

Song과 Yum은 여러 가지 수지와 적층법에 따른 접착 강도를 비교하였다. 폴리에스터 수지를 사용하였을 경우 진공적층 공법이 수적층 공법에 비해 접착강도가 우수함을 확인하였다[4]. Ahn 등은 여러 가지 종류 접착제들의 기계적 물성을 비교하였으며, 수적층 공법보다 진공적층 공법을 사용할 때의 접착강도가 더 높음을 확인하였다[5]. Nhut과 Yum은 연마와 아세톤 사용을 통하여 접착 강도가 향상됨을 확인하였다[6].

Yoon 등은 수리된 부위의 접착강도를 실험적으로 연구하였다[7]. 이들은 탄소/에폭시 모재와 동일한 재료를 사용하여 수리할 경우, 수리된 적층판의 강도는 파손되지 않은 적층판 강도의 약 80%이며 유리섬유로 수리한 적층판의 강도는 파손되지 않은 적층판 강도의 60%까지 감소하는 것을 확인하였다.

1.3 연구목적 및 방법

전통적으로 풍력발전기 블레이드의 수리에는 에폭시 수지를 사용하는 수적층 공법이 사용되어 왔다. 그러나 수적층 공법은 진공이나 가압을 사용하는 방법과 비교할 때 접착강도가 낮은 단점을 가지고 있다. 또한 에폭시 수지는 저온에서 경화가 불가능하거나 경화가 되더라도 접착 강도가 매우 저하되는 문제를 가지고 있다.

본 논문에서는 블레이드 수리에 진공성형 공법을 적용하고 저온에서도 경화특성이 뛰어나며 가격이 저렴한 폴리에스터 수지를 사용하려고 한다. 또한 접착강도의 향상을 위하여 프라이머 (Primer)를 함께 사용하였다. 프라이머의 사용 유무 및 초기 경화도, 주변 온도 등에 의해 접착 강도가 달라지게 된다. 본 논문에서는 이러한 변수들을 고려하여 폴리에스터 수지를 사용하여 진공성형 공법으로 수리했을 때의 접착강도와 에폭시 수지를 사용하여 수적층 공법으로 수리했을 때의 접착강도를 비교하고 가장 우수한 접착강도를 구현할 수 있는 수리 방법을 찾으려고 한다

2. 블레이드의 수리 공법

섬유강화 복합재료를 성형하는 공법은 매우 다양하다. 그러나 이미 성형된 구조물의 수리를 위해서는 주로 수적층 공법이 사용되어 왔다. 본 연구에서는 진공성형 공법을 수리에 적용하려고 한다. 이들 공법의 특징은 다음과 같다.

2.1 수적층 공법 (Hand Lay-up Method)

수리하고자 하는 부위에 원하는 두께만큼의 섬유를 적층하고, 수지를 도포하고, 롤러를 이용하여 압력을 가하는 방법으로 기포를 제거한 다음에 상온에서 성형하는 수리 공법이다. 주로 에폭시를 수지로 사용하고 있다. 많은 도구가 필요하지 않고 비용이 저렴하다. 그러나 수리

하는 사람이 롤러를 사용하여 가압을 하므로 수지 분포의 균일성이 나빠 접착강도가 낮으며, 롤러로 압착할 때 섬유 방향이 흐트러질 수도 있다.

2.2 진공성형 공법 (Infusion Method)

VIP (Vacuum Infusion Process)라고도 부르며 준비된 소재에 진공 백과 펌프를 이용하여 진공을 걸고 대기압을 이용하여 수지를 충전시키는 성형법이다. RTM (Resin Transfer Molding) 공법과 달리 한 쪽 금형만 있어도 성형이 가능하고, 복잡한 형상의 제품을 한 번에 성형할 수 있다는 장점이 있다.

접착강도를 향상시키기 위해서 프라이머 (Primer)를 함께 사용하기도 하며 사용되는 수지의 침투성이 불완전할 때를 대비하여 접착되려는 부위에 미리 수지를 도포하기도 한다.

진공성형 공법에서 수지유동현상은 Darcy's Law에 따른다. 수지 충전시간 (Fill Time)은 가사시간 (Gel Time)보다 짧아야 하며 이는 압력, 투과성, 점도, 수지 이동거리라는 4가지 변수에 의해 결정된다:

$$U = \frac{K}{\mu} \nabla P \quad (1)$$

여기서 U , K , μ , ∇P 는 각각 수지 유동속도, 투과성계수, 수지 점도, 압력 구배이다. 투과성계수 K 는 식(2)에 의해서 정의된다[8].

$$K = \frac{R_f^2}{4K_{ii}} \cdot \frac{(1 - V_f)^3}{V_f^2} \quad (2)$$

위 식에서 R_f , K_{ii} , V_f 는 각각 섬유 반경, Kozeny 상수, 섬유함유율이다.

2.3 접착 이론

2.3.1 화학적 결합 (Chemical Bonding)

접착제와 피착제의 표면 사이에서 화학적 결합이 형성되어 접착력이 증가한다는 결합 이론이다. 열경화성 수지와 같이 치밀한 구조를 가진 경우 계면에서 접착제의 확산이 어려워 약한 접착성을 나타내게 되므로 화학적 결합이 형성되어야 접착력이 향상된다. 에폭시/셀룰로오스의 경우 공유결합, 폴리우레탄/에폭시의 경우 공유결합과 이온결합의 성질로 높은 접착력이 나타나는 등 몇몇의 경우 계면에서의 화학적 결합이 접착력 향상의 주요 원인이 밝혀졌다[9].

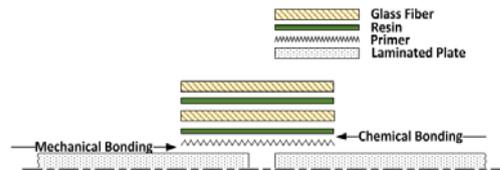
2.3.2 기계적 결합 (Mechanical Bonding)

접착제가 피착제의 표면에 존재하는 요철에 침투하여 고유 접착력이 형성된다는 이론이다.

에폭시 수지와 금속의 접착에너지는 금속 표면의 형태에 크게 영향을 받는데 평평한 표면보다는 피라미드 구조와 Dendrite, Club-Headed Nodular 구조의 표면 형태를 가지는 금속과의 접착에너지가 높음을 알 수 있다. 이러한 구조의 내부로 에폭시 수지가 침투하여 기계적 맞물림이 형성되어 나타는 결과이며 피착제의 표면 형태가 접착의 주요한 요인임을 나타낸다.

2.3.3 프라이머 (Primer)의 사용

수리 과정에서 우수한 접착 성능을 갖는 프라이머를 사용함으로써 화학적 결합력을 향상시킬 수 있다[Fig. 1]. 프라이머의 경화상태는 프라이머와 수리제 사이의 화학적 결합력에 영향을 미치게 된다. 따라서 프라이머의 경화 정도가 접착 강도에 미치는 영향을 고찰할 필요가 있다. 또한 이와 별도로 프라이머와 접촉하는 복합재 모재 (Glass/Epoxy Laminate)에 사포 등으로 표면 처리를 하여 기계적 결합력을 향상시킬 수 있다.



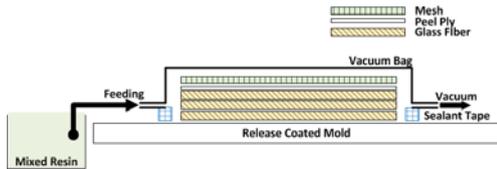
[Fig. 1] Adhesive Mechanism of Primer

3. 수리 시편 제작

3.1 복합재 모재의 제작

수리 시편 제작의 첫 단계로 풍력발전기 블레이드에 해당하는 복합재 모재를 제작하였다. 복합재 모재는 상온에서 진공성형 공법 (Infusion Method)으로 제작하였다[Fig. 2]. 공장에서 풍력발전기 블레이드를 상온에서 생산하므로, 블레이드에 해당하는 복합재 모재도 상온에서 제작하였다. 진공성형 공법으로 복합재 모재를 제작하는 과정은 다음과 같다. 먼저 이형 처리된 유리판 (Release Coated Mold) 위에 3축 방향의 유리 섬유 3장을 적층하였다. 성형이 끝난 다음에 복합재 모재와 다른 부자재와의 탈형을 돕기 위해서, 유리 섬유 위에는 필 플라

이 (Peel Ply)를 올려둔다. 다음으로 수지의 공급을 돕기 위해서 메쉬 (Mesh)를 필 플라이 위에 올려둔다. 그 이후 Sealant Tape와 Vacuum Bag Film을 이용하여 성형하고자 하는 대상물을 진공상태로 만든다. 수지를 공급하기 위한 유로를 설치하고, 진공 펌프를 이용하여 수지를 공급한다.



[[Fig. 2] Production of Glass/Epoxy Laminate Using Infusion Method

복합재 모재 및 수리 시편 제작에 사용한 재료는 Table 1에 정리하였다. 모재 제작에는 Kumho P&B Chemicals에서 생산하는 진공성형 전용 에폭시 수지 (모델 KER 9100)를 사용하였다. 충분한 성형 강도를 확보하기 위하여, 진공성형 이전에 배합된 에폭시에 포함된 기포를 제거하는 탈포 과정을 진행하였다. 진공을 유지하기 위해서, 뉴질랜드 Vacmobiles 사의 진공펌프를 사용하여 0.5~0.6 bar의 진공도를 유지하였다. 수지 공급이 완료가 된 이후 계속 진공 상태를 유지하면서 상온에서 4 시간 동안 경화를 진행하였다. 성형이 완료된 모재의 두께는 3mm이다.

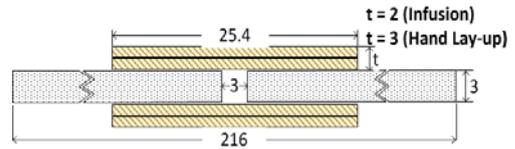
[[Table 1] Materials Used in the Fabrication of Specimens

Material	Model No.	Manufacturer
Glass Fiber	3 Axial Glass Fiber	Seartex, Germany
UP Resin (Infusion)	LSP-8020B (120cps)	CCP Composite Korea
Epoxy Resin (Infusion)	KER 9100 (300cps)	Kumho P&B Chemicals
Epoxy Resin (Hand Lay-up)	KER 9500 (1300cps)	Kumho P&B Chemicals

3.2 수리 시편 제작

풍력발전기 블레이드의 수리를 모사하기 위해서, 앞서 제작한 복합재 모재 2개를 서로 접착하였다. 전통적으로 사용되어 오던 방법 (에폭시를 사용하는 수적층 공법)과 본 논문에서 제안하는 방법 (폴리에스터를 사용하는 진공성형 공법)을 사용하여 ASTM D3528의 규격에 의해 시편을 제작하였다[Fig. 3]. 수적층 공법으로 시편을 제작할 때에는 너무 센 힘으로 가압할 경우 섬유 방향이 흐트러질 수 있었다. 따라서 2장의 유리섬유로 수리한 부

분의 두께는 수적층 공법으로 수리할 때에는 3 mm이고 진공성형 공법으로 수리할 때에는 2 mm이었다[Fig. 3].



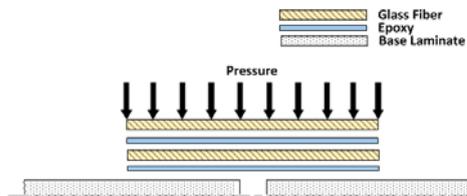
[[Fig. 3] Dimensions of Specimen to Test Repair Strength

상온에서 시편을 제작할 때에는 에폭시 수지나 폴리에스터 수지 (각각 수적층 및 진공성형 공법에서 사용)의 경화가 잘 일어나 별도의 열원이 필요하지 않았다. 그러나 섭씨 15도 이하의 저온에서는 수지의 자연 경화가 쉽지 않아서, 250W 용량의 (주)대경의 적외선 조사기 (모델명 Infrared-300)를 사용하여 경화가 발생하는 부위의 온도를 섭씨 25도로 유지하였다. 표면에서의 온도 측정을 위해서 $\pm 1^\circ\text{C}$ 의 오차 범위를 가지는 보쉬의 레이저 온도 측정기 (모델명 PTD 1)를 이용하였다.

저온에서 수리 시편을 제작하기 위해서 온도 조절이 가능한 환경 챔버를 제작하였다. 챔버의 크기는 가로×세로×높이가 2100×2200×2400mm이며, 오차 범위는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 이내로 제작하였다.

3.2.1 수적층 공법을 사용한 수리 시편 제작

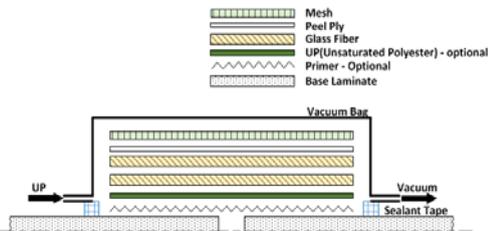
풍력발전기 블레이드를 수리할 때에는, 유리 섬유를 사용하여 블레이드의 한 쪽 표면만 보강하는 방법을 사용한다. 그러나 접착강도를 평가하기 위한 실험에서는 좌우 대칭성을 위해서 복합재 모재의 양면을 모두 수리함으로써 대칭성을 확보하였다. 복합재 모재의 양면에서 각각 3축 방향 유리 섬유를 2장씩 수적층하여 에폭시 수지를 사용하여 경화시켰다[Fig. 4]. 수적층 공법을 사용한 수리 시편 제작에는 Kumho P&B Chemicals에서 생산하는 수적층용 에폭시 수지 (모델 KER 9500)를 사용하였다.



[[Fig. 4] Hand Lay-up Method to Make Repair Specimens

3.2.2 진공성형 공법을 사용한 수리 시편 제작

진공성형 공법을 이용한 수리 시편 제작의 경우에도, 좌우 대칭성을 위해서 복합재 모재의 양면에서 각각 3층 유리 섬유 2장을 사용하여 수리를 하였다[Fig. 5]. 진공성형에서는 CCP Composite Korea의 폴리에스터 수지 (모델 LSP-8020B)를 사용하였다. 모재 제작에 사용한 것과 동일한 진공펌프와 절찰를 사용하여 수리 시편을 제작하였다.



[Fig. 5] Infusion Method to Make Repair Specimens

폴리에스터를 사용한 진공성형 공법에서 접착강도의 향상을 위하여 프라이머 (Primer)를 사용하였다. 화학적 결합력의 차이를 비교하기 위해서, (1) 프라이머를 사용하지 않은 경우 (2) 진공성형을 하기 전에 프라이머를 완전 경화시킨 경우 (Tacky 0%) (3) 진공성형 하기 전에 프라이머를 절반만 경화시킨 경우 (Tacky 50%) 등 모두 3가지 방법으로 수리 시편을 제작하였다.

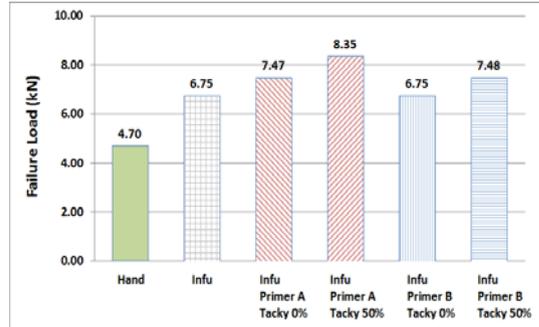
4. 접착강도 평가

4.1 상온에서 수리된 시편의 접착강도 평가

모두 6가지의 수리 시편에 대한 인장시험을 수행하였다. 인장시험기로 100kN 용량을 가진 MTS 810을 이용하였으며 LVDT (Linear Variable Differential Transducer)와 로드셀 (Load Cell)을 사용하여 각각 변위와 하중을 측정하였다. 실험에서 구한 접착강도 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 각 경우에 5개씩의 시편을 시험하여 그 평균 접착강도를 표시하였다.

Fig. 6에서 수적층 공법과 진공성형 공법으로 제작된 시편을 각각 "Hand"와 "Infu"라고 표시하였다. 프라이머를 사용하지 않은 경우에는 별도의 표시를 하지 않았으며 프라이머를 사용한 경우에는 프라이머 종류에 따라서 "Primer A" 또는 "Primer B"라고 표시하였다. 프라이머

로는 CCP Composites Korea의 비스페놀 에폭시 변성 비닐에스터 2액형 수지와 (주)세원화성의 비스페놀 A-type Epoxyacrylate 3액형 수지를 사용하였다. 프라이머를 사용하였을 경우, 진공성형 시작하기 전에 프라이머를 완전히 경화를 시킨 경우에 "Tacky 0%"라고 표시하였고, 프라이머를 사전에 절반만 경화시킨 경우에 "Tacky 50%"라고 표시하였다.



[Fig. 6] Results of Tensile Shear Test where Repair Specimens Were Made at Room Temperature

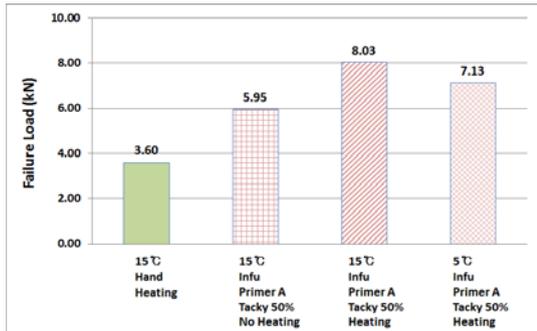
위 그림에 의하면, 폴리에스터를 사용하여 진공성형 공법으로 수리할 경우의 평균 접착강도는 6.75~8.35 kN으로 에폭시를 사용하여 수적층 공법으로 수리할 때의 평균 접착강도 4.70 kN보다 43.6~77.7% 더 향상되었음을 확인할 수 있다. 프라이머를 사용하였을 때가 사용하지 않았을 때보다 접착강도가 더 향상됨을 알 수 있으며, Primer B보다 Primer A를 사용하였을 때 접착강도가 더욱 향상되었음을 알 수 있다. 프라이머는 진공성형 이전에 완전 경화시켜서 사용하는 것보다 50% 정도만 사전에 경화시켜서 사용하는 것이 접착강도를 더욱 향상시킬 수 있다.

4.2 저온에서 수리된 시편의 접착강도 평가

섭씨 15도와 5도에서 수리된 시편의 접착강도를 실험으로 측정하였다. 모든 경우에 5개씩의 시편을 시험하여 그 평균 접착강도를 표시하였다[Fig. 7].

Fig. 7에서 "15℃"와 "5℃"는 각각 시편이 수리된 온도를, "Hand"와 "Infu"는 각각 수적층 공법과 진공성형 공법으로 제작된 시편을 나타낸다. 프라이머를 사용하지 않은 경우에는 별도의 표시를 하지 않았으며 프라이머를 사용한 경우에는 "Primer A"라고 표시하였다. 프라이머를 사용하였을 경우에는 진공성형 시작하기 전에 프라이

머를 50%만 사전에 경화를 시켰으며, 그림에서는 "Tacky 50%"라고 표기하였다. 온도가 낮기 때문에 외부 열원을 가지고 표면에서의 온도를 약 섭씨 25도로 유지하면서 시편을 제작한 경우를 "Heating"이라고 표시하였으며, 외부 열원을 이용하지 않은 경우를 "No Heating"이라고 표시하였다.



[Fig. 7] Results of Tensile Shear Test where Repair Specimens Were Made below Room Temperature

위 그림에 의하면, 섭씨 15도의 온도에서 에폭시를 사용하여 수직층으로 수리된 시편의 경우에 평균 접착강도는 3.60 kN에 불과하여 상온에서 동일한 방법으로 수리된 시편의 평균 접착강도인 4.70 kN보다 더 작음을 알 수 있다. 이는 외부 열원을 이용하여 에폭시 수지를 가열할 때 수지의 국부적인 끓는 현상으로 접착강도가 저하되었기 때문이라고 생각된다. 진공성형 공법으로 수리할 경우의 평균 접착강도는 외부열원 사용 유무에 따라서 각각 5.95 및 8.03 kN으로 에폭시를 사용한 수직층 공법의 평균 접착강도를 상회함을 알 수 있다. 폴리에스터를 사용하여 진공성형 공법으로 수리할 경우에, 외부 열원을 사용하지 않았을 경우의 평균 접착강도는 8.03 kN으로 열원을 사용하지 않았을 때의 5.95 kN보다 더 높은 것을 알 수가 있다. 두 경우 모두, 상온에서 에폭시를 사용하여 수직층으로 제작된 시편의 평균 접착강도인 4.70 kN보다 높게 나타났으며, 폴리에스터 수지를 사용한 진공성형 공법이 접착강도 향상에 도움이 되는 것을 확인할 수 있다.

섭씨 5도에서는 외부 열원을 사용하더라도 에폭시 수지에 경화가 전혀 일어나지 않아서 수직층 공법에 의한 수리가 불가능하였다. Primer A를 사전에 50% 경화시킨 다음에 폴리에스터 수지를 사용하여 진공성형 공법으로 수리한 경우에 평균 접착강도는 7.13 kN이었으며, 이는

상온에서 에폭시를 사용하여 수직층 공법으로 제작한 시편의 평균 접착강도인 4.70 kN보다 더 높은 결과이다.

5. 결론

풍력발전기 블레이드 수리에는 전통적으로 에폭시 수지를 사용하는 수직층 공법이 사용되어 왔다. 본 논문에서는 폴리에스터 수지를 사용하는 진공성형 공법을 제안하였다. 이와 함께 화학적 결합을 촉진하여 접착강도를 향상하기 위하여 프라이머를 함께 사용하였다. 진공성형 이전에 프라이머를 완전히 또는 50%만 경화한 경우를 모두 고려하였다. 수리 시편은 상온에서 제작한 경우와 섭씨 15도 및 5도의 저온에서 제작한 경우를 고려하였다. 저온에서 시편을 제작하기 위하여 오차 범위가 $\pm 1^\circ\text{C}$ 이내인 별도의 환경 챔버를 제작하였다. 모든 경우에, 수리 시편을 5개씩 제작하여 이들의 평균 접착강도를 서로 비교하였다.

상온에서 수리된 시편의 경우, 에폭시 수지와 수직층 공법을 이용하는 전통적 방법에 비하여 폴리에스터 수지와 진공성형 공법을 이용하는 제안된 방법을 사용할 경우 평균 접착강도를 최대 77.7% 향상시킬 수 있었다.

프라이머를 사용하지 않은 경우보다 프라이머를 사용한 경우에 평균 접착강도가 더욱 향상이 되었다. 프라이머를 사용한 경우에도, 프라이머를 완전 경화시킨 경우보다 50%만 경화시킨 상태에서 진공성형 공법을 시작하는 것이 더욱 접착강도를 향상시켰다. 이는 프라이머를 통하여 화학적 결합력이 증가되었기 때문으로 생각된다.

섭씨 15도의 저온에서 수리를 하였을 경우에도 에폭시 수지로 수직층 공법을 사용한 전통적인 방법보다, 폴리에스터로 진공성형 공법을 사용하였을 경우에 접착강도가 높았다. 섭씨 15도에서 제안한 방법으로 수리하였을 경우에 (접착강도 최대 8.03 kN), 상온에서 전통적인 방법으로 수리하였을 경우 (접착강도 4.70 kN)보다 접착강도를 최대 70.9% 향상시킬 수 있었다.

섭씨 5도에서는 에폭시를 사용하는 방법으로는 수리 자체가 불가능하였다. 이 경우에는 외부에서 열원을 가하더라도 에폭시 수지의 경화 자체가 불가능하였기 때문이다. 제안한 방법으로 수리하였을 경우 평균 접착강도가 7.13 kN으로 상온에서 전통적인 방법으로 수리하였을 때의 접착강도 4.70 kN보다 접착강도가 51.7% 향상되었

다.

본 연구에서는 풍력발전기 블레이드 수리에 있어서 전통적인 수리 방법보다 더 높은 접착강도를 얻을 수 있는 방법을 제안하였다. 제안한 방법을 활용하면 외부의 온도에 의한 제약을 크게 극복할 수 있으며 접착강도도 크게 향상시킬 수 있다.

References

- [1] J.C. Marin, A. Barroso, F. Paris and J. Canas, "Study of Damage and Repair of Blades of a 300kW Wind Turbine," *Energy, Elsevier*, Vol.33, pp.1068-1083, 2008
- [2] G. Marsh, "The Challenge of Wind Turbine Blade Repair," *Renewable Energy Focus, Elsevier*, Vol.12, pp.62-66, 2011
- [3] Resoltech, <http://www.resoltech.com/> (accessed June 10, 2014)
- [4] H-C Song and J-S Yum, "A Study of the Mechanical Properties of Fiberglass Reinforcements with Constitution of Lay-up, Manufacturing Method, and Resins," *Journal of Korean Society of Oceanography*, Vol.24, No.5, pp.75-80, 2010
- [5] S-H Ahn, H-K Choi and K-W Nam, "Strength Evaluation for Adhesive Bonds of Adhesive with FRP Ship Body Structure," *Journal of Korean Society of Oceanography*, Vol.24, No.1, pp.146-152, 2010
- [6] P.T. Nhut and Y.J. Yum, "Effect of Surface Properties on Adhesive Strength of Joint of Glass Fiber/Polyester Composite Panels," *Journal of Korean Society of Mechanical Engineers, A*, Vol.36, No.12, pp.1591-1597, 2012
DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2012.36.12.1591>
- [7] S-W Yoon, M-G Jeong, Y-B Park, J-H Kweon, J-H Choi, S-J Shin, M-H Song and K-I Song, "Tensile Strength of Composite Laminates with Various Repairing Methods," *Proceedings of KSAS 2011 Autumn Annual Meeting*, Korean Society of for Aeronautical & Space Sciences, pp.96-99, 2011
- [8] S.T Peters, *Handbook of Composites*, Chapman & Hall, 1998
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4615-6389-1>
- [9] J.T. Han, D.H. Lee and K. Cho, "Adhesion Science and Technology," *Journal of Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol.7, No.4, pp.43-59, 2004

이 광 주(Kwangju Lee)

[정회원]



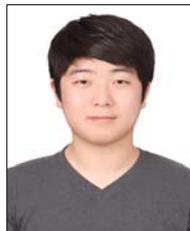
- 1985년 2월 : 서울대학교 대학원 항공공학과 (공학석사)
- 1991년 11월 : Department of Aerospace and Ocean Eng., Virginia Polytechnic Institute and State University (공학박사)
- 1993년 1월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

구조역학, 복합재료, 신뢰성

장 한 슬(Han Seul Jang)

[준회원]



- 2012년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학부 (공학사)
- 2012년 2월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 대학원 공학석사 과정

<관심분야>

구조역학, FEM, 복합재료

선 석 운(Seokwoon Seon)

[준회원]



- 2013년 8월 : 한국기술교육대학교 기계공학부 (공학사)
- 2013년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 대학원 공학석사 과정

<관심분야>

실험적 구조역학, 복합재료