

에폭시 접착제의 탄소나노튜브 함량과 경화시 습도 변화에 따른 GFRP 및 CFRP의 접착강도 변화 평가

박희웅¹ · 김종현² · 박종만^{2†}

¹경상국립대학교 나노신소재공학부 고분자공학전공

²경상국립대학교 나노신소재융합공학과

(2022년 01월 10일 접수, 2022년 02월 10일 수정, 2022년 02월 18일 채택)

Evaluation of the Change in Adhesion Strength of GFRP and CFRP with Carbon Nanotube Contents in Epoxy Adhesive with Moisture Change during Curing

Hee-Woong Park¹, Jong-Hyun Kim², Jong-Man Park^{2†}

¹Department of Materials Science and Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

²Department of Materials Engineering and Convergence Technology, Research Institute for Green Energy
Convergence Technology, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

(Received January 10, 2022, Revised February 10, 2022; Accepted February 18, 2022)

요약: 풍력블레이드가 대형화되면서 유리섬유 복합재료(GFRP)와 탄소섬유 복합재료(CFRP)를 혼용하여 제작하고 있고, 이 때 두 가지 이종재료 간의 접착특성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 에폭시 접착제 내 탄소나노튜브 함량 및 경화 시 습도의 차이에 따른 접착강도의 변화를 평가하였다. 탄소나노튜브의 함량이 다른 에폭시 접착제를 활용하여 GFRP와 CFRP를 접착하였고, 경화 시 습도에 따른 특성의 변화를 알아보기 위해 접착강도를 평가하였다. 탄소나노튜브 함량에 따른 변화를 알아보기 위해 접착제에 들어가는 탄소나노튜브의 함량을 0, 0.1, 0.3, 0.5, 1 wt%로 나누어 단일 랩 전단 시험을 진행하였고, 습도 조건에 따른 변화를 확인하기 위해 항온항습기로 습도를 20, 50, 80% 조건으로 나누어 접착제를 경화시킨 후 단일 랩 전단 시험을 진행하였다. 실험결과 에폭시 접착제에 탄소나노튜브를 넣음으로써 접착특성이 향상됨을 확인하였지만 함량이 과도하게 많을 때에는 접착력이 줄어드는 것을 확인하였다. 또한 습도가 증가할수록 접착특성이 변하지 않음을 확인할 수 있었다.

Abstract: As the wind blades become larger, they tend to be made by mixing glass fiber and carbon fiber, and it is important to increase the properties of the adhesive which adheres the two materials. The physical properties of the adhesive vary depending on the content of the additive and curing conditions. In this study, the change in adhesion strength with the difference between the CNT (Carbon Nanotube) content of the epoxy adhesive and the humidity during curing was evaluated. GFRP and CFRP specimens were prepared and adhered using an epoxy adhesive, and to examine changes in characteristics with carbon nanotube contents and with the humidity during curing of the epoxy adhesive, adhesion strength was evaluated by dividing the difference between carbon nanotube content and humidity. To find out the change with the CNT contents, the interlaminar shear strength (ILSS) test was performed by dividing the contents of the CNT into 0, 0.1, 0.3, 0.5, and 1 wt%, and to confirm the change with the humidity conditions, the adhesive was cured by dividing the humidity by 20, 50, and 80%. From the result of the experiment, the adhesive force decreased when the content was excessively large, although the adhesive property was enhanced by adding CNT to the epoxy adhesive. In addition, it was confirmed that the adhesion characteristics were not changed as the humidity increased.

Keywords: Epoxy Adhesives, Composite Materials, Carbon Nanotube, Moisture, Adhesion Property

† Corresponding author: Jong-Man Park (jimpark@gnu.ac.kr)

1. 서론

풍력발전 시스템은 작은 발전기 여러 개보다 큰 발전기 하나를 설치하는 것이 비용, 효율 측면에서 더 좋기 때문에 시간이 지날수록 규모가 대형화되고 있다[1]. 대표적인 피로하중 구조물인 풍력발전기의 블레이드가 대형화가 됨에 따라 피로에 취약한 유리섬유만 사용하기보다 강도와 강성이 뛰어난 탄소섬유를 혼용하고 있다[2-5]. 하지만 대형화에 따른 블레이드의 무게와 하중의 증가는 블레이드에 피로균열을 발생시킨다[6,7]. 따라서 블레이드의 크기가 증가됨에 따라 사고의 위험에 많이 노출되어 있다. 스코틀랜드의 Caithness주에서 개최되는 Caithness Windfarms 정보 포럼에서 발표한 2000년부터 2014년까지 15년간 풍력발전기에서 발생한 사고 데이터는 총 1,443건이다[8]. 그 중 가장 많은 빈도수를 차지한 것은 블레이드의 손상으로, 복합재료 플라이가 분리되는 층간분리, 섬유 파손 및 전단 웹(shear web)과 스파(spar) 접합부에 발생하는 디본딩(debonding)이 주로 발생한다[9]. 디본딩 시에 결함은 끝단에서 높은 응력 집중을 유발해 전단웹의 파손을 일으키고 구조적 안정성을 크게 저하시키는 결과를 초래한다[10,11]. 이처럼 복합재료들을 강도와 비용 등의 이유로 혼합해서 사용하고 이를 접합함에 있어 사고와 문제점들이 발견되기 때문에 복합재료 간의 접착에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다[12,13].

현재 풍력 블레이드는 에폭시 접착제를 사용하여 스킨(GFRP)과 스파 캡 및 CFRP 전단웹을 부착하는 방식으로 제작을 한다[14]. 볼트나 리벳, 용접 등의 기계적 방식의 체결은 강도는 더 강하지만 체결장치에 의한 무게 증가의 문제가 있고, 대부분의 체결장치는 금속재료로 부식이 쉽기 때문에 잦은 부품 교체가 필요하다. 이와 비교하여 접착제를 활용하는 경우, 기계적 체결 방식과 다르게 힘이 한 점에 집중되지 않고 접착면적에 힘이 분산되어 응력이 균일하게 분포한다는 장점이 있다[15,16]. 또한 접착제가 도포되는 것에 의해 피막이 형성되어 구조를 강화시키고 피로강도가 증가된다[17,18]. 에폭시 접착제는 높은 응집력을 가지며 경화시 수축률이 낮아 변형이 적고, 높은 내열성 및 내화학성을 가지고 있어 블레이드의 체결에 가장 적합한 접착제이다. 그러나 에폭시 접착제의 물성은 경화조건과 습도의 영향을 크게 받으며 수분에 취약하다[19]. 그렇기 때문에 수분에 강한 에폭시 접착제의 연구가 최근 활발하게 진행되고 있다[20].

접착제에 탄소나노튜브를 첨가하는 연구가 많이 진행되고 있는데 탄소나노튜브는 높은 전기 전도성과 유연성, 낮은 중량 밀도를 가지며, 직경이 나노 크기인 반면 길이는 수 μm 에서 길게는 수 mm까지 될 수 있기

때문에 중형비가 매우 커서 나노복합재료 제조 분야에서 혁신적인 물질로 여겨지고 있다[21,22]. 또한 탄소나노튜브가 소수성이기 때문에 물 분자를 밀어냄으로 인해 접착제에 이상적인 보강제 역할을 할 수 있다. 하지만 분산 조건, 나노입자 종류와 형상, 함량 등에 따라 접착제의 기계적 물성 향상 정도가 달라진다[23,24].

본 연구에서는 에폭시 접착제 내에 탄소나노튜브 함량, 경화 시 습도 조건에 따른 접착 시편을 제작하였고 강화효과가 최대로 나타나는 탄소나노튜브의 최적 함량과 습도조건이 존재할 것이라고 가정하여 접착강도가 가장 향상되는 최적의 탄소나노튜브 함량을 찾고자 하였다. 이를 위해 GFRP와 CFRP를 제작하고, 탄소나노튜브 함량에 따른 에폭시 접착제를 만들어 각 조건에 따라 접착강도를 측정하였다.

2. 실험

2.1. 시편제작

본 논문에서는 GFRP 및 CFRP를 기지재로 사용하였다. $\pm 45^\circ$ 로 직조된 유리섬유매트(SE-1500, 오웬스코닝, 미국)와 비스페놀-A계 에폭시(KFR-121, 국도화학, 한국), 아민계 경화제(KFH-141, 국도화학, 한국)를 100:30 무게비로 혼합한 에폭시 수지를 활용하여 VARTM (Vacuum assisted resin transfer molding) 공법을 통해 40 vol%의 섬유분율을 가진 GFRP를 제작하였다. CFRP의 경우, Pultrusion 공법으로 제작된 90 vol%의 섬유분율을 가진 CFRP(티비카본, 한국)를 활용하였다. 단일 랩 전단 시편은 ISO 10365 규격의 1/2 사이즈로 축소하여 제작하였다. 표면 거칠기 형성을 위해 기지재의 접착구간에 220방 사포를 이용하여 20회 가랑 샌딩 작업을 진행하였다. 접착제로 비스페놀-A계 에폭시(KFR-730FL, (주)국도화학, 한국)와 아민계 경화제(KFR-730FL, (주)국도화학, 한국)를 1:1 부피 비율로 혼합하여 사용하였다. 혼합 후 접착제에 탄소나노튜브(Multi-Walled Carbon Nanotube Powder, graphene-supermarket, 미국)의 함량을 나누어 접착제를 만들었다. 그 후 만들어진 GFRP와 CFRP시편에 접착 두께는 1 mm, 폭은 5 mm로 설정하여 일정하게 접착제를 발라 그림 1의 오른쪽과 같이 시편을 만들어 고정시켜주었다.

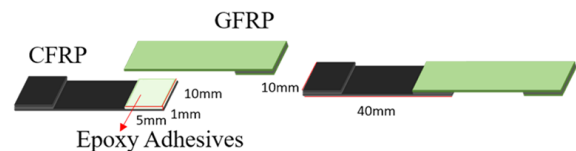


Figure 1. Schematic arrangement of single lap shear specimens: Size of specimen.

2.2. 실험 방법

2.2.1. 탄소나노튜브-에폭시 접착제의 탄소나노튜브 함량에 따른 접착강도 평가

탄소나노튜브의 함량에 따른 접착강도를 확인하기 위해 탄소나노튜브의 함량을 0, 0.1, 0.3, 0.5, 1 wt% 로 설정하여 에폭시 접착제에 분산을 진행하였다. 시편은 건조오븐(FO-22GW, 제이오텍, 한국)을 활용하여 80°C 에서 12시간 동안 경화를 진행하였다. 접착제가 경화된 후 접착 특성을 파악하기 위해 랩 전단 시험을 만능시험기(H1KS, 로이드, 영국)를 이용하여 각 조건 별 3회씩 진행하였다. 속도는 1 mm/min으로 진행하였다. 실험이 끝난 후에 파단 형태를 확인하기 위해 파단면을 반사현미경(AM4815, 디노라이트, 대만)을 이용하여 촬영하였다.

2.2.2. 탄소나노튜브-에폭시 접착제의 경화시 습도에 따른 접착강도 평가

습도 조절을 위해 만들어진 시편을 항온항습기(TH-ME-025, 제이오텍, 한국)를 이용하여 습도를 나누어 80°C에서 12시간 동안 경화를 진행하였다. 그 후 동일하게 랩 전단 시험을 만능시험기를 이용하여 각 조건별 3회씩 같은 속도로 진행 후 단면을 촬영하였다.

젖음성을 평가하기 위해 탄소나노튜브의 함량이 다른 에폭시 접착제와 CFRP 및 GFRP의 표면의 젖음성을 측정하였다. 고체와 액체 간의 젖음성은 열역학적 평형 상태에 있는 마이크로 드롭렛과 수직인 표면의 접촉각으로 측정할 수 있다. 젖음성은 증류수, 포름아미드, 에틸렌글리콜 및 다이오드메탄 등 네 가지 용매에 대한 정적 접촉각을 측정하여 구할 수 있다. 젖음성 평가를 하기 위해 각 시편의 표면에 1 ml의 용매를 떨어뜨렸다. 그 후 서로 다른 성질의 물방울의 정적 접촉각을 현미경을 이용해 직접 측정하였다. 고체 표면에 형성된 액체 방울에 작용하는 표면 에너지들과 발생하는 접촉각(θ)은 발표된 Thomas Young의 관계식으로 다음과 같이 구해진다.

$$\gamma_s - \gamma_{SL} = \gamma_L \cos \theta \tag{1}$$

여기서 γ_L 은 액체의 표면 에너지, γ_{SL} 은 고체와 액체 사이의 표면 에너지, γ_s 는 고체의 표면 에너지이다. 이를 통해 접착일 W_a 을 구할 수 있다. Young의 법칙을 대입하면 Young-Dupré의 방정식을 따르는 W_a 값이 다음과 같이 표현된다.

$$W_a = \gamma_s - \gamma_{SL} + \gamma_L = \gamma_L(1 + \cos \theta) \tag{2}$$

γ^p 와 γ^d 는 극성 표면 에너지 및 비극성 표면 에너지

이다. 극성 및 비극성 표면 에너지는 다음과 같이 표현되는 Owens-Wendt 방정식을 사용하여 표현된다.

$$W_a = \gamma_L(1 + \cos \theta) = 2(\gamma_s^d \gamma_L^d)^{\frac{1}{2}} + 2(\gamma_s^p \gamma_L^p)^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

이 식은 다른 물질이 존재하지 않고 두 물질이 서로 접촉하는 상황에 사용할 수 있다. 세 번째 물질이 존재하는 상황은 극성 및 비극성 특성을 가지고 있다. 이 식은 위의 식에서 파생된다.

$$W_a^d = \gamma_L - (\gamma_A^d \gamma_L^d)^{\frac{1}{2}} - (\gamma_A^p \gamma_L^p)^{\frac{1}{2}} - (\gamma_G^d \gamma_L^d)^{\frac{1}{2}} - (\gamma_G^p \gamma_L^p)^{\frac{1}{2}} + (\gamma_A^d \gamma_G^d)^{\frac{1}{2}} + (\gamma_A^p \gamma_G^p)^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

여기서 γ^d 와 γ^p 는 간섭 액체의 액체 표면 에너지의 구성요소이다. γ^d 값을 아는 경우 물과 같은 세 번째 물질 I 이 존재하는 표면에서 이 식들을 통해 강도 예측이 가능하다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 탄소나노튜브 함량에 따른 랩 전단 강도 변화

Fig. 2는 탄소나노튜브 함량에 따른 전단강도 변화를 알아보기 위한 랩 전단 시험의 결과이다. 탄소나노튜브를 넣지 않은 에폭시 접착제의 경우 전단강도가 가장 낮은 것을 볼 수 있었으나, 접착제 내의 탄소나노튜브의 함량이 증가함에 따라 랩 전단 강도가 증가하는 것

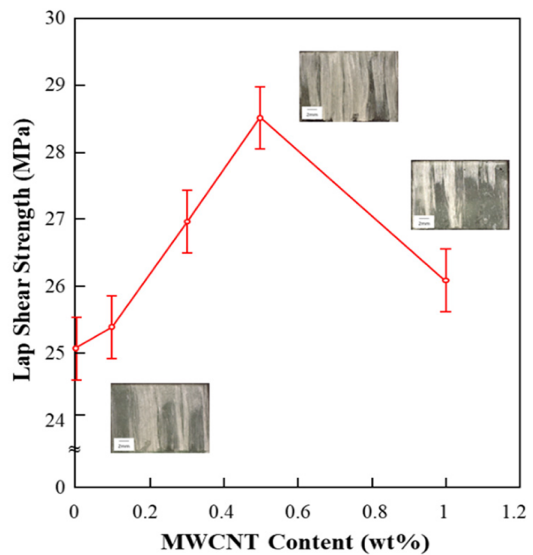


Figure 2. Lab shear strength for epoxy adhesives with different CNT contents.

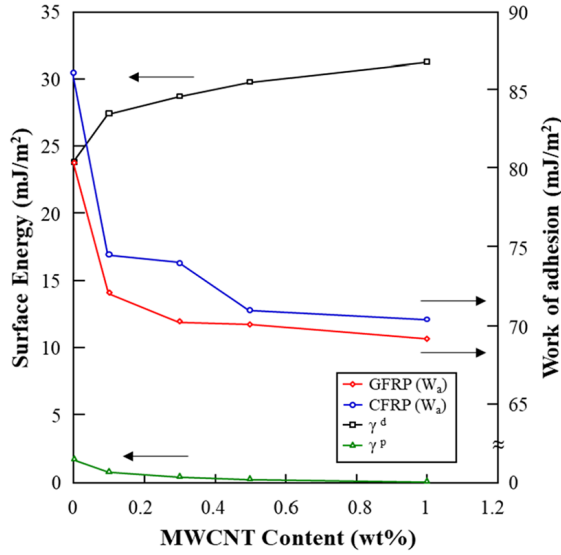


Figure 3. γ^p , γ^d and W_a of GFRP and CFRP with different CNT contents.

을 볼 수 있었다. 하지만 1 wt%의 탄소나노튜브가 들어간 경우 랩 전단 강도가 감소하는 것을 확인하였다.

랩 전단 시험 후에 파단면을 반사현미경을 통해 관찰하였을 때, 탄소나노튜브를 넣지 않은 접착제를 사용한 시편은 GFRP가 파단되었다. 탄소나노튜브의 함량이 증가함에 따라 파단면이 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 하지만 1 wt%의 탄소나노튜브를 넣은 접착제의 경우 0.5 wt%의 탄소나노튜브를 넣은 것보다 파단면이 작아지는 것을 볼 수 있었다.

Fig. 3은 탄소나노튜브 함량에 따른 γ^d 와 γ^p 값과 GFRP와 CFRP의 값을 나타낸다. 이 γ^d 와 γ^p 값을 기반으로 값을 구할 수 있고 이를 통해 강도를 예측할 수 있다. Fig. 3을 보면 W_a 값은 감소하는 경향을 띄는 것을 확인할 수 있었고 접착 강도 또한 감소해야 한다고 예측할 수 있다. 하지만 실제 실험 결과를 보았을 때(Fig. 2) 에폭시 접착제 내 탄소나노튜브의 함량이 증가됨에 따라 랩 전단 강도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 접착제의 탄소나노튜브가 GFRP와 CFRP의 빈 틈에 들어가 갈고리 역할을 해주어 시편을 잡아주는 효과와 탄소나노튜브로 인해 접착제 자체의 물성이 증가하는 등의 여러 이유들로 감소하는 W_a 의 측정값과는 다르게 접착 강도는 실제로 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 1 wt% 이상으로 탄소나노튜브를 첨가할 경우 랩 전단 강도가 감소하는 것을 확인하였다.

Fig. 4는 에폭시 접착제의 탄소나노튜브함량에 따른 파괴거동의 모식도이다. Fig. 4를 보면 (a)와 (b)에서는 탄소나노튜브의 함량이 증가하면 크랙이 줄어들지만 (c)처럼 일정 wt%이상의 탄소나노튜브가 들어가면 응

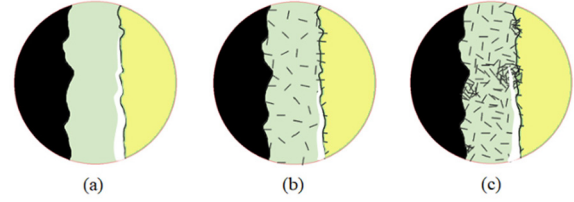


Figure 4. Schematic arrangement of fracture behavior of epoxy adhesive with: (a) 0 wt%; (b) 0.5 wt%; (c) 1 wt%.

집 현상이 일어나 탄소나노튜브의 분산이 잘 일어나지 않아 오히려 강도가 약해질 수 있다. 힘을 받는 부분인 에폭시 접착제의 면적이 분산이 잘 되지 않은 탄소나노튜브들로 인해 줄어들어 강도가 약해지기 때문이다. 또한 응집 현상이 일어나면 크랙이 탄소나노튜브가 뭉친 부분을 따라 퍼지기 때문에 균열이 더 잘 일어날 수 있는 환경이 만들어진다. 이 때 에폭시 접착제 자체에 파괴가 일어나 분리된다. 파단면을 확인해보았을 때, 0.5 wt%까지 탄소나노튜브의 함량이 증가됨에 따라 GFRP의 파손정도가 증가함을 확인하였다. 그러나 0.5 wt% 이상의 탄소나노튜브를 도입하는 경우, GFRP의 파손정도가 감소하거나 아예 파손되지 않음을 확인하였다.

3.2. 경화시 습도에 따른 랩 전단 강도 변화

Fig. 5은 경화시 습도에 따른 전단강도 변화를 알아보기 위한 랩 전단 시험의 결과이다. 실험 결과 그래프를 통하여 습도가 높아질수록 랩 전단 강도 값이 전체적으로 감소하는 것을 확인하였다. 사진에서 습도가 높아질수록 파단면이 줄어드는 모습을 확인할 수 있다.

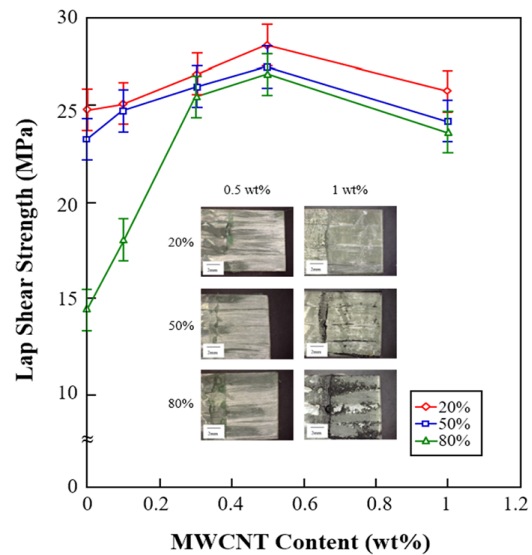


Figure 5. Lab shear strength with different CNT contents and moisture during curing for epoxy adhesive.

1 wt% 조건에서 특히 80% 습도조건을 보면 표면에 파괴된 탄소나노튜브-에폭시 접착제가 습도가 높아 접착제 자체의 물성도 낮을 뿐더러 Fig. 4(c)와 같이 접착제 자체에서 파괴가 일어나 다른 사진들에 비해 접착제가 많이 붙어있는 것을 확인할 수 있다.

또한 습도조건이 같을 때 탄소나노튜브를 넣지 않은 접착제의 경우 전단강도가 낮은 것을 볼 수 있었으나, 접착제 내의 탄소나노튜브의 함량이 증가함에 따라 전단강도가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 하지만 탄소나노튜브가 1 wt% 비율로 들어간 경우에는 0.5 wt%보다 전단강도가 감소하였다. 랩 전단 시험 후의 표면을 보면 GFRP의 파단 정도가 다르다. 접착력이 강한 0.5 wt%가 가장 많이 파단되는 것을 확인할 수 있다. 0.5 wt%에서 1 wt%가 되면 GFRP의 파단 정도가 확연히 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 탄소나노튜브 함량에 따른 접착강도를 알 수 있다.

Fig. 6은 탄소나노튜브 함량에 따른 GFRP와 CFRP의 W_a^l 값을 나타낸다. W_a^l 값은 물과 같은 세 번째 물질이 존재할 때 사용할 수 있기 때문에 습도에 대한 영향과 효과를 판단할 수 있다. Fig. 7은 탄소나노튜브 함량에 따른 물의 접촉각을 나타낸다. Fig. 7을 보면 탄소나노튜브의 함량이 증가할수록 접촉각 또한 증가한다. 소수성인 탄소나노튜브가 많이 들어갈수록 물을 밀어내어 젖지 않기 때문이다. Fig. 3의 그래프의 W_a^l 값은 일반 에폭시 접착제의 접착력이 탄소나노튜브가 함유된 에폭시 접착제보다 뛰어나다고 표현되지만 탄소나노튜브 함량이 많아질수록 물에 대한 접촉각이 커지고 W_a^l 값이 증가하는 것으로 볼 때 수분이 존재하는 상태에서는 탄소나노튜브 함량이 증가할수록 접착강도가 강해진다고

볼 수 있다. 실험 결과 탄소나노튜브가 들어감에 따라 접착이 더 잘 되었다. 하지만, Fig. 6의 그래프에서 W_a^l 값이 1 wt%일 때가 0.5 wt%보다 크기 때문에 접착강도가 더 증가해야 하지만 Fig. 5의 그래프를 보면 1 wt%에서 접착강도가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 20%, 50%, 80% 습도조건에서 모두 동일하게 전단강도가 줄어드는 것을 확인하였는데 마찬가지로 과하게 들어간 탄소나노튜브가 강도를 낮추는 것임을 알 수 있다.

Fig. 8은 에폭시 접착제와 GFRP의 접착 모델을 탄소나노튜브의 유무로 나누어서 나타내었다. Fig. 8을 보면 에폭시는 경화되면서 에폭사이드가 개환해 하이드록실기(-OH)로 변하게 된다. 그 후 하이드록실기가 수소결합을 형성하여 GFRP와 에폭시 사이의 접착을 가능하게 한다. 수소결합은 촉매역할을 하여 개환반응을 촉진시켜 경화를 가속시킨다. 그러나 공기 내의 습도가 증가함에 따라 수소결합 구조가 깨져 경화 반응의 가속 효과를 상쇄하고 물에 녹아들어온 수용성 불순물과 물 분자는 접착제와 재료 사이로 침투해 수소결합을 대신하게 된다. 이로 인해 접착제와 복합재료 사이의 수소결합을 방해하는 결과를 만들어 접착강도가 저하된다. 그렇기 때문에 습도가 높을수록 에폭시 접착제의 물성이 취약해진다고 볼 수 있다. 이를 해결하기 위해 Fig. 8(b)와 같이 접착제의 보강제로 탄소나노튜브를 이용하였고 소수성의 성질을 가진 탄소나노튜브가 물을 밀어내어 에폭시와 물이 반응하는 것을 막고, 벽과 같이 작용해 물이 에폭시로 침투하는 시간을 증가시켜 물과의 반응을 최대한 늦춰 결과적으로 접착제의 물성 저하를 막게 된다.

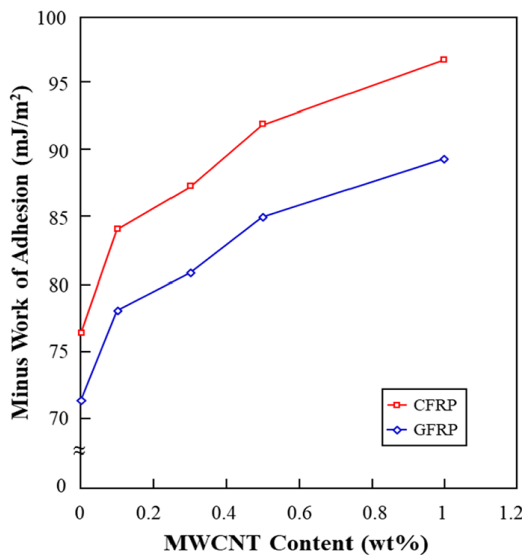


Figure 6. W_a^l of GFRP and CFRP with different CNT contents.

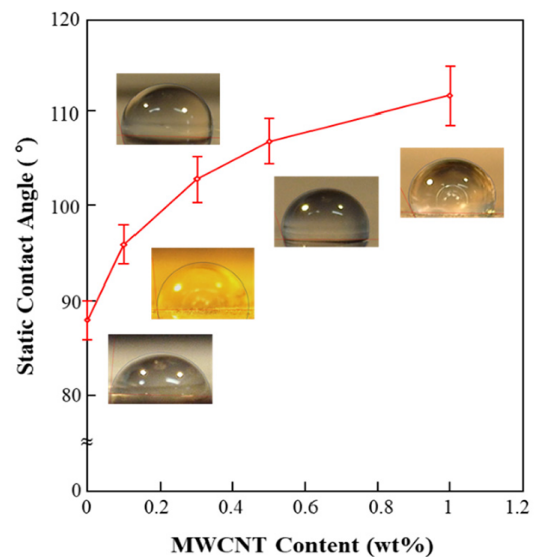


Figure 7. Static contact angle with different CNT contents using distilled water.

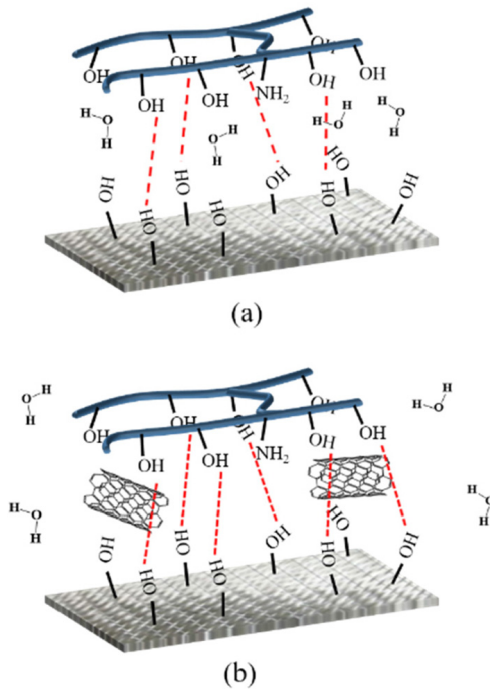


Figure 8. Schematic arrangement of adhesive and GFRP: (a) epoxy adhesive; (b) CNT/epoxy adhesive.

4. 결론

본 연구는 GFRP와 CFRP를 에폭시 접착제를 이용하여 접착하고, 접착제에 탄소나노튜브 함량의 차이를 두었을 때와 경화 시 습도의 차이에 따라 접착 강도 변화를 확인하는 것을 목적으로 하였다. W_a 값을 구해 강도를 예측하였고, 예측한 접착강도는 탄소나노튜브 함량이 증가할수록 감소해야 하지만 탄소나노튜브의 갈고리 역할, 탄소나노튜브로 인한 접착제 자체의 물성 증가 등의 여러 이유들로 예측과는 다르게 접착제에 탄소나노튜브를 섞어 접착할 경우 오히려 랩 전단 강도가 증가하였다. 그러나 0.5 wt% 보다 많은 wt%의 탄소나노튜브가 들어가면 응집 현상이 일어나 탄소나노튜브의 분산이 잘 일어나지 않아 강도가 약해지고 균열이 더 잘 일어나기 때문에 1 wt% 에서는 감소하는 모습을 보여준다. 경화 시 습도 차이의 경우의 접착특성은 정적접촉각을 통한 표면에너지와 W_a^I 을 통하여 예측하였고 랩 전단 시험을 통해 접착특성 평가를 진행하였다. 랩 전단 시험 결과 20, 50, 80 % 조건에서 습도가 증가할수록 강도가 약해진다. 또한 탄소나노튜브의 함량의 증가에 따라 접촉각과 W_a^I 모두 증가하는 것을 확인하였다. 하지만 0.5 wt% 이상으로 탄소나노튜브가 들어가게 되면 마찬가지로 랩 전단 강도가 감소하는 것을 확인하였다. 이것 또한 모든 조건에서 동일하기 때문에

과도한 탄소나노튜브가 강도를 낮추는 것임을 알 수 있다. 이번 연구를 통하여 에폭시 접착제가 탄소나노튜브 함량과 습도 조건으로 접착 강도에 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서 수행한 실험은 탄소나노튜브-에폭시 접착제가 일반 에폭시 접착제보다 수분 침투력이 낮고 물성이 좋다는 것을 보여준다. 본 연구에서 수행한 모든 실험결과를 통해, 탄소나노튜브를 첨가함에 따라 습한 환경에서의 GFRP와 CFRP간 에폭시 접착제의 접착 강도가 개선됨을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 이공학개인기초연구지원사업(No. 2016 R1D1A1B0101262016)을 통해 진행된 연구 결과입니다.

References

1. S. T. Ke, T.G. Wang, Y.J. Ge, Y. Tamura, *Advances in Structural Engineering*, **18(12)**, 2075 (2016).
2. C.H. Lee, J.M. Park, T.W. Kim, J.S. Park, *The Korea Society of Mechanical Engineers Symposium*, 650 (2002).
3. S.Y. Kim, I.S. Han, S.K. Woo, K.S. Hong, *The Korean Society for New and Renewable Energy*, 378 (2007).
4. P.W. Sonparote, S.C. Lakkad, *Fibre Science and Technology*, **16**, 309 (1982).
5. A.A. Khalid, *Materials and Design*, **27(6)**, 499 (2006).
6. D.W. Kim, G. Jeong, J.H. Lim, J.W. Lim, B.M. Yu, K.S. Lee, *Journal of Aerospace System Engineering*, **12(2)**, 66 (2018).
7. H.K. Jang, Y.C. Kim, *Composite Research*, **29(6)**, 336 (2016).
8. G.S. Kim, J.H. Jeong, *Journal of the Korea Society for Power System Engineering*, **19(4)**, 76 (2015).
9. H.S. Jee, N.H. Ju, C.H. So, J.K. Lee, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, **35(3)**, 179 (2015).
10. S.I. Lee, P.S. Shin, J.W. Park, W.D. Joo, *Journal of Wind Energy*, **12(2)**, 37 (2021).
11. H.G. Kim, Y.J. Jang, B.S. Kim, K.W. Kang, *New and Renewable Energy*, **15(1)**, 18 (2019).
12. Y.J. Jang, J.W. Jin, K.W. Kang, *The Korean Society of Mechanical Engineers*, 19 (2017).
13. H.G. Kim, Y.J. Jang, J.H. Kim, K.W. Kang, *New and Renewable Energy*, **15(4)**, 1 (2019).
14. H.G. Kim, Y.J. Jang, S.I. Lee, K.W. Kang, *The Korean Society of Mechanical Engineers*, 34 (2019).

15. Y.H. Lee, D.W. Lim, J.H. Choi, J.H. Kweon, M.K. Yoon, *Composite Structures*, **92(12)**, 2916 (2010).
16. C.H. Kim, J.H. Choi, J.H. Kweon, *Composite Structures*, **120**, 183 (2015).
17. A.G. Magalhães, M.F.S.F. de Mourab, *NDT & E International*, **38(1)**, 45 (2005).
18. Y. Boutar, S. Naïmi, S. Mezlini, M.B.S. Ali, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **67**, 38 (2016).
19. J.H. Kim, K.Y. Choi, H.J. Joo, F.L. Jin, S.J. Park, *Elastomers and composites*, **40(3)**, 166 (2005).
20. B.U. Kang, *Korea Academy Industrial Cooperation Society*, **12(3)**, 1479 (2011).
21. S. Yu, M.N. Tong, G. Critchlow, *Materials and Design*, **31(1)**, 126 (2010).
22. S.H. Yang, S.Y. Yu, J.H. Ryu, M.H. Cho, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, **26(6)**, 423 (2013).
23. P.S. Shin, D.J. Kwon, J.H. Kim, S.I. Lee, K. L. DeVries, J.M. Park, *Composites Science and Technology*, **142**, 98 (2017).
24. M.Y. Ku, J.H. Kim, H.Y. Kang, G.W. Lee, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, **37(5)**, 657 (2013).