

CFRP와 금속 재료의 접합을 위한 epoxy/MWCNT의 특성 분석

유성훈*[†] · 권일준* · 신동우* · 박성민* · 염정현**

The Analysis on Properties of Epoxy/MWCNT for Bonding CFRP to Steel Plates

Sung-Hun Yoo*[†], Il-Jun Kwon*, Dong-Woo Shin*, Sung-Min Park*, Jeong-Hyun Yeum**

ABSTRACT: The effect of a multi walled carbon nanotubes (MWCNT) on the adhesive properties and thermal properties of epoxy were studied by double lap-shear tests. Epoxy/MWCNT resins were prepared from a different amount of the MWCNT incorporated into the epoxy resins (araldite 2011). Steel plates and carbon fiber reinforced plastics (CFRP) were chosen as materials. Mechanical tests were performed by a universal testing machine (UTM). The analysis of thermal properties were conducted by a thermogravimetric analyzer (TGA) and a differential scanning calorimetry (DSC). The fracture surface morphology was examined using a scanning electron microscopy (SEM) and optical microscope. Compared to neat epoxy, it was found that the mechanical properties of epoxy/MWCNT resins are increased.

초 록: 에폭시 수지의 열적 특성과 접합 특성에 대해 다중벽 탄소 나노 튜브 (MWCNT)의 효과가 이중 중첩 전단시험에 의해 연구되었다. Epoxy/MWCNT 복합 수지는 에폭시 수지(araldite 2011)에 다양한 질량 비율로 MWCNT를 분산하여 제조되었다. MWCNT의 효과를 확인하기 위해 접합강도 시험이 열특성 변형 만능재료시험기에 의해 진행되었고 충격강도 시험이 ASTM D256에 따라 진행되었다. 금속 판재와 탄소섬유강화복합재료가 실험 재료로써 사용되었으며, 열적 안정성 분석은 열 중량 분석기와 시차 주사 열량기에 의해 진행되었다. 또한 접합강도 시험 후 시편의 형태학적 특성은 주사전자현미경에 의해 관찰되었고 파괴거동을 알아보기 위하여 광학현미경을 사용하였다. 에폭시 수지와 비교하였을 때 epoxy/MWCNT 복합 수지가 물리적 특성이 향상되는 것을 나타내었다.

Key Words: 다중벽 탄소 나노 튜브(Multi walled carbon nanotubes), 탄소섬유강화복합재료(Carbon fiber reinforced plastics), 에폭시 수지(Epoxy resin), 금속 재료(Steel material), 접합강도(Adhesive strength)

1. 서 론

자동차에서 경량화는 오랜 시간 동안 지속되어 온 화두이다. 하지만 향후 완성 차 업체들은 경량화에 대한 과제를 선택이 아닌 필수로 해결해야 할 상황에 처해 있다. 최근 소비자들의 편의와 안전에 대한 요구가 높아지면서 차량부

품 수가 지속적으로 늘어나고 있어서 차량 중량은 증가할 수밖에 없는 상황이다. 이를 계기로 소재 혁신을 통한 차량 경량화의 중요성이 더욱 부각될 전망이며, 철강소재는 대표적인 경량소재인 비철금속계열 알루미늄합금, 마그네슘합금과 합성수지계열 엔지니어링플라스틱, 탄소섬유강화플라스틱(carbon fiber reinforced plastics, CFRP)으로 대체되

Received 7 March 2017, received in revised form 26 June 2017, accepted 30 June 2017

*DYETEC Institute, Daegu, Korea

*[†]DYETEC Institute, Daegu, Korea, Corresponding author (E-mail: enviro1234@naver.com)

**Kyungpook National University, Daegu, Korea

며 비철금속과 합성수지는 경합의 관계를 형성하면서 발전할 것으로 전망된다[1-3].

하지만, 자동차 차체부품에 CFRP를 적용하기 위해서는 금속판재와 접합이 가능해야 한다. 그러나 기존 자동차 구조용 접합에 일반적으로 널리 이용되어 왔던 저항 점 용접(resistance spot welding)은 CFRP와 금속 사이의 서로 다른 열적 특성으로 적용이 어렵다. CFRP와 금속 사이의 접합을 위한 대표적인 방법으로 기계적 접합기술(mechanical joining technology)과 접착제를 이용한 접합방식(Adhesive bonding) 그리고 이 두 가지 방법을 동시에 적용한 하이브리드 접합기술(Hybrid joining technology)이 있다. 기계적 접합방법은 리벳이나 볼트체결과 같이 추가적인 접합요소를 이용한 체결방식으로 접합강도가 우수하며 충격 에너지 흡수능이 뛰어난 장점이 있다[4-7].

접착제를 이용한 접합방식에 있어서는 파괴 후 접착제가 피착재 표면에 남아있는 접착제 응집파괴가 이상적이다[8,9]. 최근에 개발된 자동차 차체 구조용 접착제의 경우에는 피착재 응집파괴가 일어날 정도로 강한 접착력과 강도를 발휘하는 것도 있다. 임시고정용 접착제의 경우에는 피착재의 표면에 잔류물이 남지 않는 접착파괴가 이상적이다. 접착제와 피착재 사이의 접착력이 작으며 박리 응력이 접착제에 분산되도록 부드럽고 두껍게 되어 있다. 접합부의 파괴모드를 정확히 파악하는 것은 문제를 해결하는데 있어서 매우 중요하다. 접합부의 파괴모드는 4가지로 나눌 수 있고, 파괴거동을 Fig. 1에 나타내었다.

본 연구에서는 탄소 나노 튜브로 보강된 재료를 이용하여 CFRP와 금속 재료 사이의 접합강도에 대한 연구를 진행하였다. 에폭시 수지에 multi walled carbon nanotubes (MWCNT)를 기계적 분산법을 이용하여 epoxy/MWCNT 복합 수지를 제조하였고 이 복합 수지를 이용하여 CFRP와 금속 재료 사이의 접합을 할 경우 물리적 특성이 증가하고 접착면적이 일정하게 유지된다는 장점이 있다[10-12]. 그리고 neat 에폭시 수지와 epoxy/MWCNT 복합 수지의 열적 특성과 물리적 특성 비교를 진행하였다.

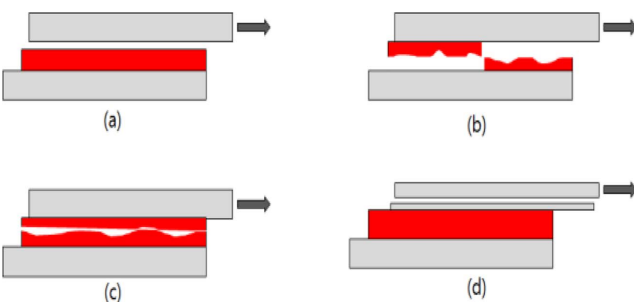


Fig. 1. Failure mode of adhesive part for composite and steel (a : interface failure, b : interface/cohesion failure, c : cohesion failure, d : substrate failure)

2. 재료 및 실험

2.1 실험재료

열경화성 수지가 함침된 탄소 프리프레그를 적층하여 제조된 두께 1.5 mm의 탄소섬유강화플라스틱(CFRP)과, plate 형태의 금속 재료를 이종 소재 접합 재료로서 이용하였다. Epoxy/MWCNT 복합 수지를 제조하기 위하여 에폭시 수지로 Araldite 2011(AW 106 Cl, HUNTSMAN, China)를 사용하였고, 다중벽 탄소 나노 튜브(multiwall carbon nanotubes, MWCNT)로 평균 직경 10-15 nm의 CM-95(Hanwha Chemical, Korea)를 사용하였다. 경화제로는 hardener 2011(HV 953 U Cl, HUNTSMAN, China)가 사용되었다.

500 mm × 500 mm 크기의 CFRP 판재는 UD방향으로 제작되었으며 인장탄성률과 인장강도는 평균 120 MPa, 2200 MPa의 물성을 나타내었다. plate 형태의 금속 재료는 접합강도 시험을 할 때에 재료가 파손되거나 휘어지는 것을 방지하기 위하여 CFRP 판재와 동일한 두께의 재료를 선정하였고, 금속 표면에 묻어있던 기타 이물질들을 제거한 후 실험을 진행하였다.

2.2 에폭시 수지/탄소 나노 튜브 복합 수지 제조

기계적 분산법을 통해 epoxy/MWCNT 복합 수지를 제조하였고, 분산 기기로는 균질기(SHG-15DX, SciLabTisTM)와 초음파처리기(HD2200, SONOPULS)가 사용되었다. MWCNT의 질량 분율에 따른 물성변화와 화학적 특성을 알아보기 위하여 각각 1 wt.%, 2 wt.%, 3 wt.%, 4 wt.%로 설정하여 복합 수지를 제조하였다. 그리고 균질기의 RPM은 300 RPM으로 설정하였고 시간은 10 min으로 설정하여 진행하였고, 균질이 끝난 후 초음파를 동일하게 10 min동안 처리하여 MWCNT 분산을 진행하였다. 분산이 끝난 epoxy/MWCNT 복합 수지는 에폭시GUN(HUNTSMAN, UK)을 이용하여 경화제와 1:0.85 비율로 섞어서 도포하였고, 두께 0.5 mm로 동일하게 이종소재를 접합하였다. 이종소재를 접합한 후, 진공건조기에서 온도를 조건에 맞게 설정하여 일정시간 진행한 뒤에 경화를 진행하였다.

2.3 열적 안정성

열 중량분석기(thermo gravimetric analyzer, TAC 7/DX, Perkin Elemer)를 통하여 경화가 완료된 neat 에폭시 수지와 epoxy/MWCNT 복합수지의 열적 안정성 분석을 진행하였다. 질소 분위기 하에 10°C/min의 속도로 가열되었고 500°C까지 승온하였으며 온도에 따른 중량의 감소를 측정하였다. TGA를 측정하기 전에, 대기 중 수분으로 인한 시험오차를 줄이기 위하여 시험샘플은 진공건조기에 보관되었다. 그리고 neat 에폭시 수지와 epoxy/MWCNT 복합수지의 유리전이온도를 시차 주사 열량계(DSC, Perkin-Elmer DSC7)를 사용하여 측정하였다. 30°C에서 300°C까지 10°C/min의

속도로 승온하고 그 후 5분간 온도를 유지하여 열적 이력을 없앴으며 $-10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 속도로 300°C 에서 30°C 까지 냉각하였다.

2.4 기계적 물성

2.4.1 충격강도

경화된 neat 에폭시 수지와 epoxy/MWCNT 복합 수지에 대해 izod 충격시험을 진행하였으며, 이 때 측정에 사용된 실험장비는 충격강도시험기(IT504, TINIUS-OLSEN)이다. 충격시험의 시편은 ASTM D256에 따라 폭 12.7 mm, 길이 80 mm, 두께 10 mm로 제작되었고 시편에 V-notch를 주어 시험을 진행하였으며 결과값은 5개의 시험 시편에 대한 평균값으로 나타내었다.

2.4.2 접합강도

Lap strength 측정을 위한 시편은 ASTM D3528에 근거하여 길이 45 mm, 폭 10 mm로 제작하였으며, 표점거리와 시험속도는 각각 56 mm, $1.27\text{ mm}/\text{min}$ 으로 설정하여 시험을 진행하였다. 3개의 시편의 결과값을 평균내었고 거리에 따른 접합강도와 하중 값으로 그래프를 나타내었다. 측정 기기는 열특성 변형 만능재료시험기(AG-250kNX, SHIMADZU, Japan)가 사용되었다.

2.4.3 열처리에 따른 접합강도 및 파괴거동

Neat 에폭시 수지와 epoxy/MWCNT 수지의 열처리 후 접합강도를 평가하고자, 진공건조기에서 100°C 와 150°C , 그리고 210°C 로 열처리 된 시편을 이용하였다. 접합강도를 측정할 때 ASTM D3528에 근거하여 시험을 진행하였고, 시편의 열처리 시간은 동일하게 30 min으로 설정하였으며 열처리 후 구성성분과 열처리 온도에 따른 접합강도를 비교하였다. 또한 접착력과 피착재 표면처리, 그리고 구성성분에 따른 접합부의 파괴거동을 알아보기 위하여 광학현미경(SMZ18, NIKON)을 이용하였다.

2.4.4 경화조건에 따른 기계적 물성

Neat 에폭시 수지와 epoxy/MWCNT 복합 수지를 경화할 때 온도를 각각 23°C 와 80°C , 100°C , 150°C 로 다르게 설정하여 경화 시간에 따른 기계적 물성의 변화를 알아보기 위하여 인장시험과 굴곡시험을 진행하였고 각각 3개의 시편의 결과값을 평균내어 그래프에 나타내었다. 인장시험은 ASTM D638에서 type II의 규격에 따라 진행되었고 3점 굽힘 시험은 ASTM D7264에 따라 폭 13 mm, 길이 120 mm, 두께 3 mm의 시편을 제작하여 진행되었다. Support span의 길이와 시편의 두께의 비는 32:1의 비율로 설정하였고 하중 봉은 끝부분의 직경이 3 mm인 것을 사용하여 3점 굽힘 시험을 진행하였다. 시험규격에 따라 cross head의 속도는 $2.6\text{ mm}/\text{min}$ 로 하였고 굴곡강도(σ)와 굴곡탄성률(E)는 각각 식 (1)

Table 1. Cure time on cure temperature for neat epoxy and epoxy/MWCNT resin

Cure temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Average cure time (min)	Minimum cure time (min)
23	720	420
80	50	30
100	10	6
150	5	4

과 식 (2)에 따라 계산하였다.

$$\sigma = 3PL/2bh^2 \quad (1)$$

$$E = L^3m/4bd^2 \quad (2)$$

식 (1)에서의 σ 는 외부 표면에서의 응력값, P는 적용 하중값, L은 support span의 길이, b는 시편의 폭, 그리고 h는 시편의 두께를 나타낸다. 식 (2)에서의 E는 굴곡탄성계수, L은 support span의 길이, b는 시험이 완료된 시편의 두께, m은 하중그래프에서의 tangent 기울기를 나타낸다.

그리고 경화 온도에 따른 경화시간은 Table 1에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열적 안정성 분석

Epoxy/MWCNT 복합 수지의 MWCNT의 질량 분율에 따른 TGA 결과를 Fig. 2에 나타내었다. TGA 결과를 비교했을 때, epoxy/MWCNT 복합 수지의 MWCNT 질량 분율이 3 wt.%일 때, 가장 우수한 열분해 특성을 나타내고 있는 것을 확인하였다. 내열성의 척도가 되는 5%의 무게 감량이 일어나는 온도를 분석하여 Table 2에 나타내었다. 각각의 온도값을 비교한 결과 MWCNT의 질량 분율이 3 wt.%인 epoxy/

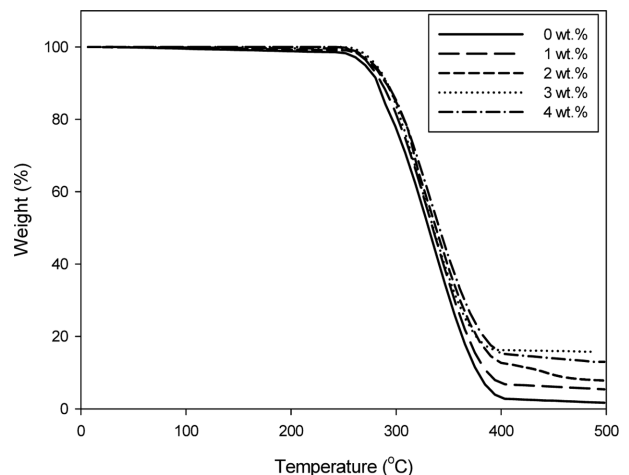


Fig. 2. TGA thermograms of the neat epoxy and epoxy/MWCNT

Table 2. Thermal properties of epoxy/MWCNT

	Temperature at 5% weight loss (°C)
Epoxy/MWCNT(0 wt. %)	270.75
Epoxy/MWCNT(1 wt. %)	276.24
Epoxy/MWCNT(2 wt. %)	277.02
Epoxy/MWCNT(3 wt. %)	281.40
Epoxy/MWCNT(4 wt. %)	277.69

Table 3. Glass transition temperature of the neat epoxy and epoxy/MWCNT

Composition	Curing temperature (°C)	T _g (°C)
Neat epoxy	80	46.2
Epoxy/MWCNT (3 wt.%)	80	60.5

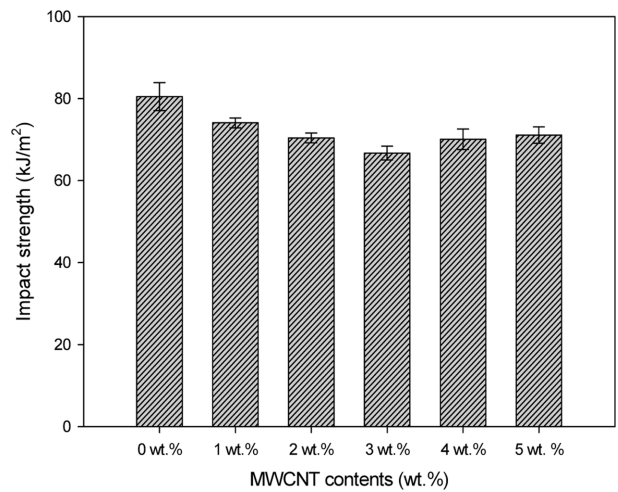
MWCNT 복합 수지가 가장 높은 온도를 보여주었고, MWCNT의 질량 분율이 4 wt.%일 때 오히려 온도가 소폭 감소하는 경향을 나타내었다. 일반적으로 MWCNT를 분산시켜 제조한 나노복합재는 열안정성이 증가한다고 알려져 있다[13-16]. 하지만 MWCNT의 질량 분율이 4 wt.%일 때 MWCNT 사이의 응집 현상으로 인하여 MWCNT가 제대로 분산되지 못하여 내열성이 감소하는 것으로 판단된다.

그리고 시차 주사 열량분석기를 이용한 neat 에폭시 수지와 epoxy/MWCNT 복합 수지의 유리전이온도를 분석한 결과를 Table 3에 나타내었다. MWCNT의 질량 분율이 3 wt.%인 epoxy/MWCNT 복합 수지와 neat 에폭시 수지의 유리전이온도를 비교한 결과 MWCNT가 복합된 수지의 유리전이온도가 약 30.95% 증가하였다. 이는 MWCNT가 첨가됨으로 인해 내열성이 증가하여 유리전이온도가 증가한 것으로 보인다.

3.2 기계적 물성 분석

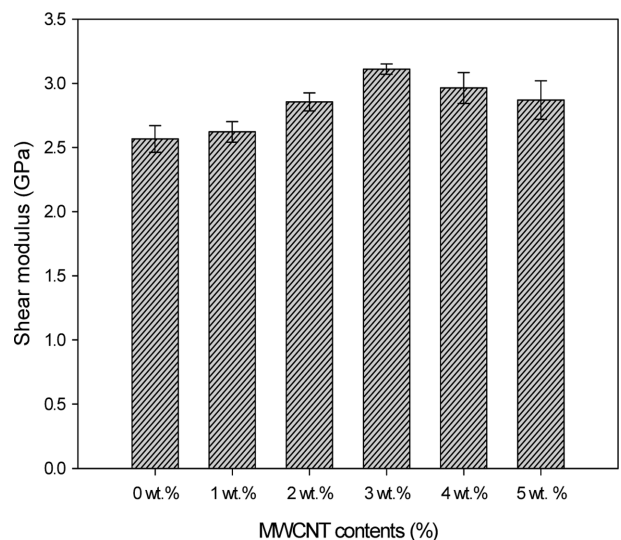
3.2.1 충격강도 분석

Fig. 3에 경화된 neat 에폭시 수지와 epoxy/MWCNT 복합 수지의 충격강도를 측정된 결과를 나타내었다. 측정값을 비교해본 결과 MWCNT가 분산된 시편이 경화된 neat 에폭시 수지보다 대체적으로 감소하는 경향을 나타내었고 MWCNT의 질량 분율이 3 wt.%일 때 가장 낮은 값을 나타내었다. MWCNT의 질량분율이 증가할수록 충격강도값이 감소하는 것은 MWCNT의 근본적인 강성도로 인하여 외부로부터 가해지는 충격을 잘 흡수하지 못하여 발생한 것으로 판단된다. 하지만 4 wt.%일 때는 MWCNT 사이의 응집현상으로 인하여 강성도가 감소함에 따라 충격강도값이 일시적으로 증가한 것으로 판단된다. 일반적으로 Izod 충격시험에서 시편의 유리전이온도나 강성도가 높을수록 충격강도 결과값은 감소하는 경향이 있다[17-20].

**Fig. 3.** Izod impact strength of neat epoxy (0 wt. %) and epoxy/MWCNT on a different MWCNT contents

3.2.2 접합강도 분석

Fig. 4, 5는 epoxy/MWCNT 수지와 neat 에폭시 복합수지의 접합시험 결과 및 stress-strain 곡선을 나타내고 있다. 전단탄성률의 경우 neat 에폭시 수지를 이용한 시편에서 2.56 GPa, 1 wt.%의 MWCNT를 함유한 시편에서 2.62 GPa, 2 wt.%에서 2.85 GPa, 3 wt.%에서 3.11 GPa, 그리고 4 wt.%에서 2.96 GPa의 값을 각각 나타내었다. 에폭시 수지에 MWCNT의 함량이 3 wt.%까지 증가함에 따라 전단탄성률이 증가하는 경향을 나타내었으나 4 wt.%의 MWCNT가 포함된 시편에서는 오히려 전단탄성률이 감소하는 결과를 나타내었다. 외부응력이 시편에 가해질 때, MWCNT로 인하여 기계적 물성이 향상되어 전단탄성률이 neat 에폭시 수지에 비해 약 21% 정도 증가하지만 4 wt.%에서는 MWCNT 사이의 응집 현상으로 인하여 전단탄성률값이 오히려 감소하는 결과를

**Fig. 4.** Shear modulus of epoxy/MWCNT adhesive a variety of MWCNT contents (0 wt.% : neat epoxy)

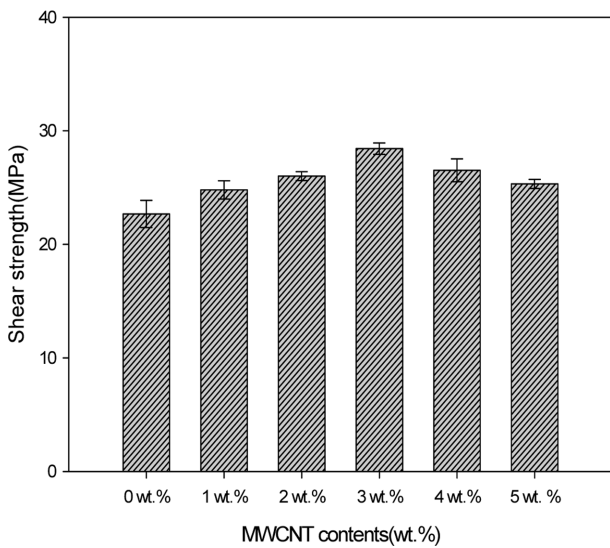


Fig. 5. Shear strength of epoxy/MWCNT adhesive on a variety of MWCNT contents (0 wt.% : neat epoxy)

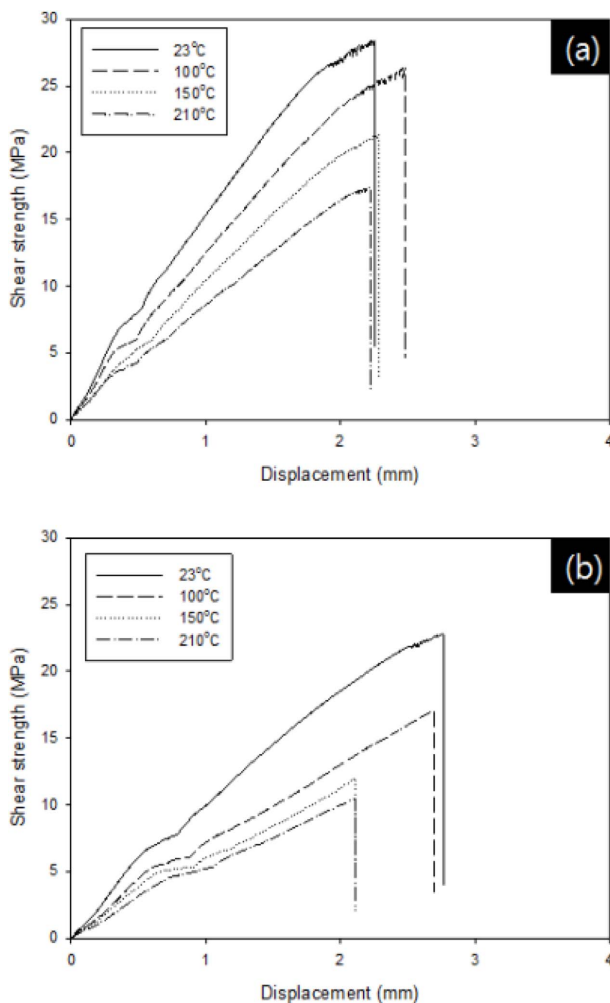


Fig. 6. Result in measurement of shear strength for (a) epoxy/MWCNT(3 wt.%) and (b) neat epoxy adhesive at a different test temperatures

나타내었다. 전단강도의 경우에는 neat 에폭시 수지를 이용한 시편에서는 22.68 MPa를 나타내었고, 3 wt.%의 MWCNT를 포함한 epoxy/MWCNT 복합 수지에서 27.57 MPa로 neat 에폭시 수지를 이용한 시편에 비해 약 20%가 향상된 결과를 나타내었다. 4 wt.%의 MWCNT를 포함한 시편에서는 역시 응집현상으로 인한 감소효과로 전단강도 값이 소폭 감소하는 결과를 나타내었다.

3.2.3 열처리에 따른 접합강도와 파괴거동 분석

열처리에 따른 neat 에폭시 수지와 epoxy/MWCNT 복합 수지의 접합강도를 측정된 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 상온에서 측정된 접합강도의 경우 neat 에폭시 수지와 epoxy/MWCNT 복합 수지가 22.82 MPa와 28.32 MPa를 나타내었고, 열처리 온도가 100°C에서 17.52 MPa와 26.12 MPa, 150°C에서 11.95 MPa와 21.10 MPa, 그리고 210°C에서 11.38 MPa와 17.23 MPa의 값을 각각 나타내었다. 즉 열처리 온도가 증가함에 따라 neat 에폭시 수지와 epoxy/MWCNT 복합 수지 모두 접합강도 값이 감소함을 보여주었다. 열처리 온도가 23°C인 경우와 210°C인 경우의 접합강도 값을 비교해 볼 때, epoxy/MWCNT 복합 수지의 접합강도 값은 39.15% 감소하였고 neat 에폭시 수지의 접합강도 값은 50.26% 감소하는 것을 확인하였다. 이는 MWCNT가 포함될 경우 neat 에폭시 보다 열적 안정성이 향상되어 접합강도의 감소폭

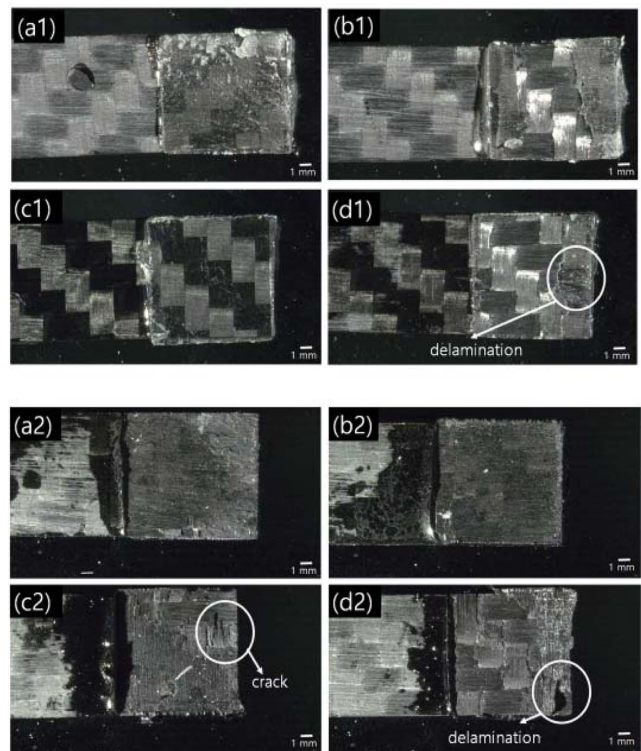


Fig. 7. Failure modes of (a1-d1) neat epoxy and (a2-d2) epoxy/MWCNT(3 wt.%) adhesive at a 23 °C (a1, a2), 100°C (b1-b2), 150°C (c1-c2), and 210°C (d1-d2)

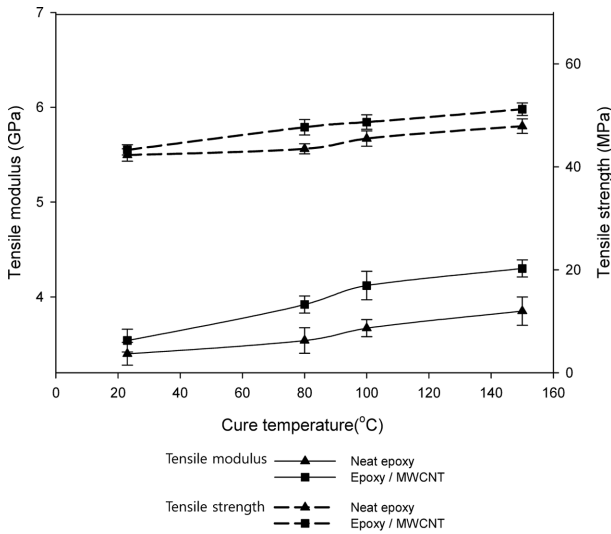


Fig. 8. Effect of curing temperature on a tensile properties for neat epoxy and epoxy/MWCNT(3 wt.%).

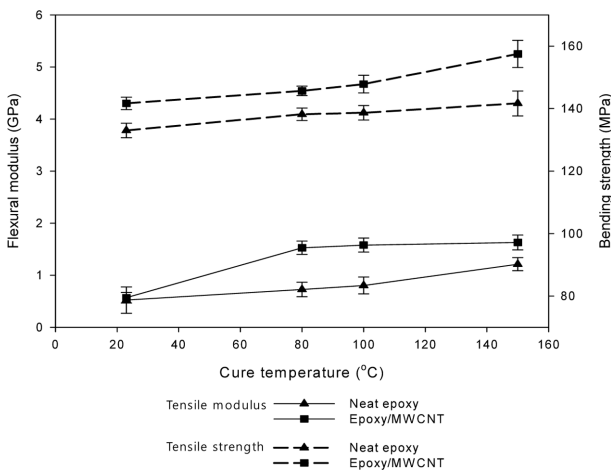


Fig. 9. Effect of curing temperature on a flexural properties for neat epoxy and epoxy/MWCNT(3 wt.%)

이 작게 나타난 것으로 판단된다.

그리고 열처리 온도에 따른 파괴거동을 Fig. 7에 나타내었고, 열처리 온도가 23°C(a1, a2)인 경우 응집파괴가 일어난 것을 확인하였다. 그리고 열처리 온도가 210°C(d1, d2)인 경우에 neat 에폭시 수지와 epoxy/MWCNT 복합수지는 응집파괴와 계면파괴가 혼합된 형태의 파괴거동을 나타내었으며 공통적으로 CFRP의 적층면이 파괴되는 delamination 현상이 발생하였다. 이는 높은 열처리 온도로 인하여 CFRP 내부의 계면결합력이 감소하여 일어난 현상으로 판단된다. 열처리 온도가 100°C(b1, b2)와 150°C(c1, c2)인 경우에 응집파괴와 계면파괴가 혼합되어 일어난 것을 확인하였다.

3.2.4 경화조건에 따른 기계적 물성 분석

Neat 에폭시 수지와 epoxy/MWCNT 복합 수지의 경화온도에 따른 인장시험과 굴곡시험의 결과를 Fig. 8와 Fig. 9에 나타내었다. 경화된 epoxy/MWCNT 복합 수지가 neat 에폭시 수지보다 같은 경화온도에서 인장탄성률과 인장강도, 그리고 굴곡탄성률과 굴곡강도가 더 높게 나타났다. 또한 neat 에폭시 수지와 epoxy/MWCNT 복합 수지가 경화온도가 증가함에 따라 기계적 물성이 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 수지가 경화되는 과정에서 경화온도가 증가할수록 에폭시 수지의 가교 구조의 밀도가 증가하기 때문에 발생한 현상으로 판단된다[21,22].

3.3 파괴단면 분석

Epoxy/MWCNT(3wt.%) 복합 수지의 접합강도 시험 후 에폭시 층(a1-a3)과 CFRP 계면을 주사전자현미경으로 관찰한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Epoxy/MWCNT 복합 수지에 전단력이 가해질 때 에폭시 층에서 균열이 발생한 지점을 확인하였고, 이로 인해 에폭시 수지에 분산되어 있던 MWCNT가 관찰된 것으로 판단된다. 그리고 전단력과 epoxy/MWCNT 복합 수지의 접합력으로 인한 CFRP 계면에서의

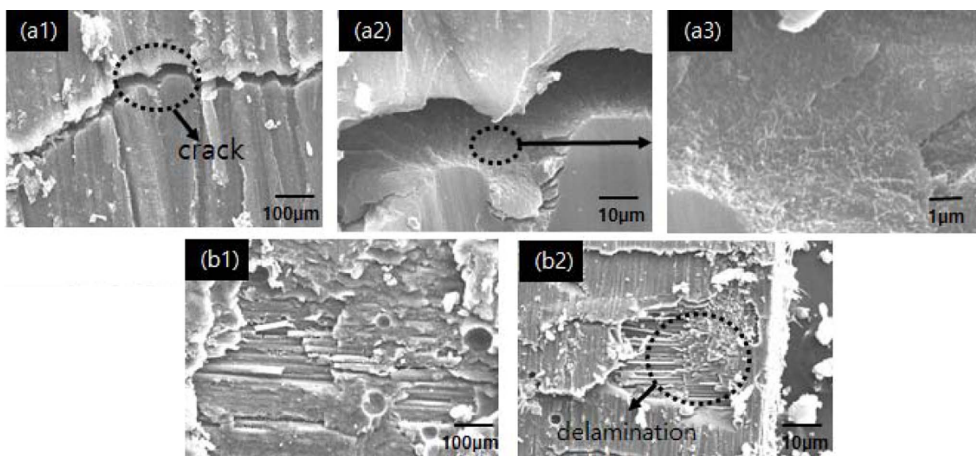


Fig. 10. SEM photographs of (a1-a3) epoxy layer and (b1-b2)CFRP interface for epoxy/MWCNT(3 wt.%)

delamination 현상을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 이종 소재 사이의 접합을 위해 에폭시 수지에 MWCNT를 분산하여 epoxy/MWCNT 복합 수지를 제조하였고 neat 에폭시와 epoxy/MWCNT 복합 수지 사이의 열적 안정성과 기계적 물성의 비교를 진행하였다.

그 결과 MWCNT를 사용한 복합 수지가 neat 에폭시에 비해 우수한 열적 안정성을 나타내었다. MWCNT의 질량 분율이 3 wt.%일 때 가장 뛰어난 열적 안정성과 기계적 물성을 나타내었지만, MWCNT의 질량 분율이 4 wt.%일 때 MWCNT의 응집 현상으로 인하여 에폭시 수지에 분산이 어렵기 때문에 내열성과 접합강도 값이 소폭 감소하는 경향을 나타낸 것으로 판단되었다. 그리고 neat 에폭시 수지와 epoxy/MWCNT 복합 수지의 경화 조건에 따른 기계적 물성을 비교한 결과 경화온도가 증가할수록 수지의 가교 구조의 밀도가 증가하여 우수한 기계적 물성을 나타내는 것을 확인하였다. 또한 접합강도 시험 후 시편의 단면과 파괴 거동을 관찰하였다. 그 결과 접합강도 값이 높은 시편일수록 계면파괴보다 응집파괴가 일어나는 경향을 나타내었고 에폭시 층에서의 균열이 일어나는 현상과 CFRP 계면에서의 전단력에 의한 delamination 현상을 관찰하였다.

이러한 epoxy/MWCNT 복합 수지는 에폭시 수지에 MWCNT가 분산됨으로 인해 열적 안정성과 물리적 특성을 증가하는 경향을 나타내었고 이종 소재 접합에 있어서 효과적으로 이용될 것이라고 전망된다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 산업소재핵심기술개발사업 (과제번호 : 10063368)의 연구비 지원 하에 연구되었으며, 당 기관의 연구비 지원에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Lee, J., Kong, C., and Soutis, C., "Experiment Investigation on the Behaviour of CFRP Laminated Composites under Impact and Compression After Impact(CAI)", *Composites Research*, Vol. 16, No. 4, 2003, pp. 66-73.
2. Lee, M.S., Kim, H.H., and Kang, C.G., "Effect of Surface Roughness of AL5052/CRP Composites on the Adhesion and Mechanical Properties", *Composites research*, Vol. 26, No. 5, 2013, pp. 295-302.
3. Sato, C., and Takano, A., "NEDO Project "Automotive Light Weight Structural Elements of CFRP Composites": Joining Technology for Dissimilar Materials", *Journal of the Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol. 61, No. 10, 2007, pp. 40-42.
4. Dandy, A., "Joining & Fastening: An Overview of Mechanical Joining and Fastening Methods", *Sheet Metal Industries*, Vol. 75, No. 6, 1998, pp. 12-14.
5. Budde, L., "Mechanical Joining of Sheet Metal", *Eurojoin -conference*, Vol. 2, 1994, pp. 903-912.
6. Neugebauer, R., Mauermann, R., Dietrich, S., and Kraus, C., "Mechanical Joining of Magnesium Alloys with a Heated Anvil as Counter Tool", *Magnesium International Conference*, Vol. 8, 2010, pp. 1295-1301.
7. Neugebauer, R., Jesche, F., Kraus, C., and Hensel, S., "Mechanical Joining with Self Piercing Solid-rivets at Elevated Tool Velocities", *AIP Conference Proceedings Series*, Vol. 1353, No. 2, 2011, pp. 1278-1283.
8. Ghosh, S.N., and Maiti, S., "An Epoxy-Terminated Structural Adhesive. II. Curing, Adhesive Strength, and Flammability Characteristics", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 63, No. 6, 1997, pp. 683-691.
9. Bhuniya, S.P., and Maiti, S., "Heterocyclic Based Epoxy Terminated Structural Adhesive II. Curing, Adhesive Strength and Thermal Stability", *Journal of Polymer Materials*, Vol. 19, No. 14, 2002, pp. 395-402.
10. Kim, M., Okoli, O.I., Jack, D., Park, Y.B., and Liang, Z.Y., "Characterisation and Modelling of CNT-epoxy and CNT-Fibre-epoxy Composites", *Plastics, Rubber and Composites*, Vol. 40, No. 10, 2011, pp. 481-490.
11. Sangermano, M., Pinneri, S., Calza, P., and Paganini, C., "Photocatalytic Activity of Epoxy/CNT Nanocomposite Films", *Macromolecular Materials & Engineering*, Vol. 297, No. 4, 2012, pp. 353-358.
12. Grabowski, K., Zbyrad, P., and Uhl, T., "Development of the Strain Sensors Based on CNT/Epoxy Using Screen Printing", *Key Engineering Materials*, Vol. 588, 2014, pp. 84-90.
13. Kwon, Y., "Anisotropic Thermal Conductive MWCNT/Polymer Composites Prepared with an Immiscible PS", *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 14, No. 8, 2014, pp. 6146-6149.
14. Wienecke, M., Bunescu, M.C., Deistung, K., Fedtke, P., and Borchardt, E., "MWCNT Coatings Obtained by Thermal CVD Using Ethanol Decomposition", *Carbon*, Vol. 44, No. 4, 2006, pp. 718-723.
15. Seyhan, A.T., de la Vega, A., Tanoglu, M., and Schulte, K., "Thermal Curing Behavior of MWCNT Modified Vinyl Ester-polyester Resin Suspensions Prepared with 3-roll Milling Technique", *Journal of Polymer Science. Part B, Polymer Physics*, Vol. 47, No. 15, 2009, pp. 1511-1522.
16. Chen, X., He, G., Du, J., Pei, S., and Guo, J., "Investigation on the Thermal Conductivity of HDPE/MWCNT Composites by Laser Pulse Method", *Science China Technological Sciences*, Vol. 52, No. 9, 2009, pp. 2767-2772.
17. Schaeffer, S.L., Johnson, R.L., and Lewis, W.B., "Impact Force Comparison of Polymers: Molded-Notch Versus Cut-Notch Using the ASTM D 256 Izod Impact Test Method", *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 26, No. 2, 1998, pp. 151-156.
18. Das, V., Pandey, A.K., and Krishna, B., "Low Temperature Izod Impact Studies of Blends Based on Impact Grade Polypropylene and Ethylene- alpha -Octene Copolymer", *Journal of Rein-*

- forced Plastics and Composites*, Vol. 28, No. 23, 2009, pp. 2879-2888.
19. Park, Y., Lyu, M.Y., and Paul, D.R., "Computer Simulation of Izod Impact Test for Impact Modifier Reinforced Nylon6", *Elastomers and Composites*, Vol. 48, No. 2, 2013, pp. 172-179.
 20. Margem, J., Margem, F., Margem, M., Gomes, V., and Monteiro, S., "Izod Impact Tests in Polyester Matrix Composites Reinforced with Malva Fibers", *TMS Annual Meeting and Exhibition Supplemental Proceedings*, Vol. 143, 2014, pp. 417-424.
 21. Mustata, F.R., Tudorachi, N., and Bicu, I., "Epoxy Resins Cross-Linked with Bisphenol A/Methylenedianiline Novolac Resin Type: Curing and Thermal Behavior Study", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 51, No. 25, 2012, pp. 8415-8424.
 22. Mustata, F.R., and Tudorachi, N., "Epoxy Resins Cross-Linked with Rosin Adduct Derivatives. Cross-Linking and Thermal Behaviors", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 49, No. 24, 2010, pp. 12414-12422.