

## 복합재료의 계면특성 평가를 위한 접촉각 방법의 정확도 비교

권동준<sup>1</sup> · 김종현<sup>2</sup> · 박종만<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>경상국립대학교 나노신소재융합공학부, 그린에너지융합연구소

<sup>2</sup>한국화학연구원 정밀·바이오화학연구본부 정밀화학소재연구단, 정밀화학융합기술연구센터

(2022년 06월 10일 접수, 2022년 06월 29일 수정, 2022년 08월 04일 채택)

### Comparison on Accuracy of Static and Dynamic Contact Angle Methods for Evaluating Interfacial Properties of Composites

Dong-Jun Kwon<sup>1</sup>, Jong-Hyun Kim<sup>2</sup>, Joung-Man Park<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Science and Convergence Technology, Research Institute for Green Energy  
Convergence Technology, Gyeongsang National University, Jinju, Republic of Korea

<sup>2</sup>Center for Advanced Specialty Chemicals, Korea Research Institute of Chemical Technology, Ulsan 44412,  
Republic of Korea

(Received June 10, 2022; Revised June 29, 2022; Accepted August 04, 2022)

**요약:** 섬유와 기지 간 계면 특성을 분석하기 위해 일반적으로 접촉각을 활용하여 계산된 접착일을 활용한다. 접촉각 측정 방식으로 동적접촉각과 정적접촉각이 있으며, 본 논문에서는 보다 정확도가 높은 접촉각 측정 방법이 무엇인지 모색하였다. 각각 4가지 종류의 에폭시 수지와 유리섬유를 사용하였고, 유리섬유와 에폭시의 표면 에너지를 기반으로 접촉각,  $W_a$ 를 계산하여 계면강도를 예측하였다. 접촉각과 계면 전단강도는 이론상 비례관계이며, 이를 확인하기 위해 조성이 다른 에폭시와 유리섬유 간의 계면강도를 마이크로드롭렛 시험법을 이용하여 측정하였다. 정적접촉각 결과의 경우 접촉각과 계면 전단강도 사이에는 일치하지 않는 경향을 보였다. 이는, 동적 접촉각 평가 방법은 정적 접촉각에 비해, 드롭 크기에 따른 최소 표면적을 이루는 에어와 미니스커서에서 접선 측정에 따른 에너지를 최소화할 수 있다는 점이다.

**Abstract:** To analyze the interfacial property between the fiber and the matrix, work of adhesion was used generally that was calculated by surface energies. In this paper, it was determined what types of contact angle measurement methods were more accurate between static and dynamic contact angle measurements. 4 types of glass fiber and epoxy resin were used each other to measure the contact angle. The contact angle was measured using two types, static and dynamic contact angle methods, and work of adhesion,  $W_a$  was calculated to compare interfacial properties. The interfacial property was evaluated using microdroplet pull-out test. Generally, the interfacial property was proportional to work of adhesion. In the case of static contact angle, however, work of adhesion was not consistent with interfacial property. It is because that dynamic contact angle measurement comparing to static contact angle could delete the error due to microdroplet size to minimize the surface area as well as the meniscus measuring error.

**Keywords:** Dynamic- & static contact angle, Interface, Micro-mechanics, Composites

† Corresponding author: Joung-Man Park (jmpark@gnu.ac.kr)

## 1. Introduction

복합재료에서 계면은 섬유 및 기지재료의 표면특성을 분석하여 접착강도를 분석하고, 예측할 수 있다 [1-3]. 일반적으로, 재료의 표면을 분석하는 방법은 FE-SEM이나 AFM과 같은 장비를 활용하는 것이 일반적이다 [4,5]. 물리적 형태의 계면을 분석하는데 단순한 형상이 아니라, 재료 표면 및 계면에서의 화학적 반응성을 분석하기 위해서는 라만, XPS 및 FT-IR과 같은 분광기를 필요로 하고, 계면의 결정상태 및 구조분석을 위해 XRD를 사용하였다 [6,7]. 명확한 분석 결과를 얻을 수 있지만, 장비가 고가인 점, 데이터 분석을 위한 전문성을 요구하는 단점이 존재한다. 따라서 가장 간단하면서 경제적인 표면분석법은 접촉각 평가법이다 [8-10].

표면을 분석하기 위한 시료의 표면은 오염되지 않은 깨끗하고, 평평한 표면을 이루고 있어야 한다. 시료의 표면에 세가지 이상의 극성 및 비극성 용매를 접촉시켜 용매의 접촉각을 계산하면 접촉각 평가는 끝이다. 접촉각을 통해 확보한 결과를 바탕으로 재료의 표면에너지 계산하며, 표면에너지 결과값을 바탕으로 두 재료간 계면접착력을 분석한다 [11,12]. 이러한 접촉각 평가방법은 용매를 시료에 떨어뜨려 액적의 각도를 계산하는 정적접촉각과 용매는 고정되어 있는데, 시료를 용매에 담그고 빼는 과정을 통해 무게감지를 바탕으로 시료의 접촉각을 계산하는 동적접촉각으로 나눌 수 있다 [13,14]. 일반적으로 표면 에너지 결과를 결정하기 위해 물, 에탄올, 에틸렌글리콜, 디아이오도메탄, 폼아미드 등과 같은 세 중 이상의 용매를 사용하여 접촉각을 측정하고, 결과값을 이용하여 표면에너지를 계산할 수 있다 [15,16].

시편 표면의 접촉각을 확보할 경우 재료의 표면에너지를 계산이 가능하다. 또한 이러한 열역학적 개념을 바탕으로 두 재료 사이의 접착력을 계산할 수 있다는 장점을 가진 표면 평가법이다 [17]. 접촉된 구간 또는 접착을 진행할 계면에 대한 상태를 분석하기 위해 계면전단강도, 층간전단강도를 평가하지만, 이러한 결과와 표면에너지를 기반으로 계산한 접착일의 결과는 비례관계를 가진다. 따라서 접촉각 평가법은 접촉각 평

가 결과를 계산하여 표면분석 및 이중 재료간 계면상태를 상대적으로 비교할 수 있는 장점이 있다 [18].

용매와 시료를 접촉시켜 형성되는 접촉구간에서의 액적의 접촉각을 측정하는 것이 본 실험의 핵심이기 때문에 접촉각을 측정하기 위한 노하우 및 측정기준이 중요하다. 하지만 동적접촉각 및 정적접촉각은 평가기준 확립이 부족한 상황이다. 평가에 대한 최적조건은 실험실 및 실험진행자에 의해 설정되기에 결과에 대한 상대적 평가가 대부분이다 [19]. 동적 접촉각 평가의 경우 시료가 용매로 삼입되는 속도 및 삼입되는 길이 등에 따라 접촉각 평가에 변수를 일으키고 이에 대한 변수 최적화 및 규격화가 필요한 상황이다. 정적접촉각의 경우 시료의 표면을 평가하는데 액적의 크기를 규격화하는 것을 필요로 한다 [20]. 이처럼 접촉각 평가분야에 대한 정확성과 평가법에 대한 활용 결과는 연구자에 따라 달라지기 때문에 두 평가에 대한 비교가 필요하다 판단하였다.

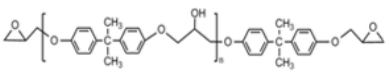
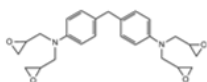
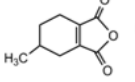
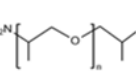
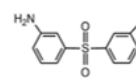
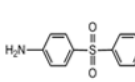
본 연구에서는 정적 접촉각과 동적 접촉각을 활용하여 복합재료를 이루는 4종류의 에폭시 기지재료 및 유리섬유에 대한 접촉각 및 표면에너지 결과 비교를 하였다. 이를 통해 어떠한 접촉각 평가방법이 최적의 접촉각 평가기법인지를 확인하였다. 접촉각 평가방법의 종류에 따라 접촉각, 표면에너지 및 접착일의 결과와 시료들 간의 계면전단강도 간의 상관관계를 분석하였다.

## 2. Experimental

### 2.1. Materials

Table 1은 실험에 사용된 에폭시의 화학구조를 나타내었다. 비스페놀 A형 에폭시와 4개의 관능기를 가지는 TGDDM (tetraglycidyl diaminodiphenylmethane) 에폭시를 주제로 사용하였다. 경화제는 acid anhydride, amino, 33DDS (Diaminodiphenyl sulphone), 44DDS를 이용하였다. 당량비를 계산하여 최적의 경화조건으로 실험을 진행하였다. 유리섬유는 오웬스 코닝사의 SE-1500을 사용했다.

Table 1. The chemical structure of different epoxy

Epoxy		Hardener			
					
Bisphenol A type epoxy	TGDDM	Anhydride type	Amino type	33DDS	44DDS

**2.2. Static and dynamic contact angle measurements and calculations of work of adhesion**

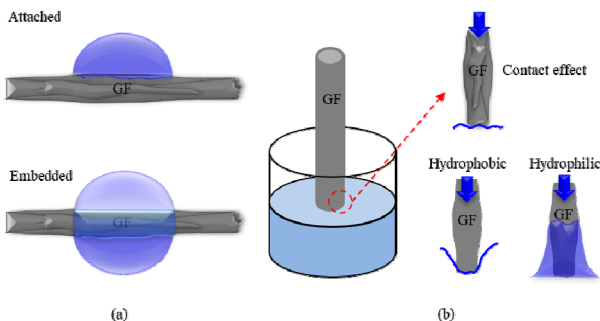
Fig. 1은 접촉각 측정 방법에 따른 모식도이다. 정적 접촉각 방법은 반사현미경과 투과현미경을 이용하여 고체 시료와 용매 간 접촉에 의해 형성된 용매의 접촉각을 계산한다. Fig. 1a와 같은 정적 접촉각 방법은 일반적으로 섬유 표면에 용매를 접촉시키는데 함침형(용매와 섬유가 접촉한 길이 150 μm~200 μm) 및 표면접촉형(용매와 섬유가 접촉한 길이~50 μm)에 따라 접촉각 계산이 달라짐을 표현한다. 섬유는 원형이기 때문에 측정 조건이 다르다. 함침형은 섬유에 용매가 함침된 상태이지만, 표면접촉형은 매우 작은 액적을 이용하여 표면에 드랍을 형성시켜야 하기 때문에 약 100 μm의 액적 직경으로 측정할 수 있다. Fig. 1b는 동적 접촉각 평가인 Wilhelmy 방법에 대한 모식도이다. Wilhelmy 방법은 재료가 용매로 들어가고 나옴에 따라 재료가 받는 힘을 활용하여 접촉각을 측정하는 방식으로 수식은 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{F}{C \cos \theta} \tag{1}$$

이 식에서  $F$ 는 재료가 용매로 들어가고 나옴에 따라 받는 힘으로 동적접촉각측정장비(DCAT-11)을 활용하여 측정하였다.  $C$ 는 재료의 둘레,  $\gamma$ 는 액체의 표면장력으로 이를 활용하여 접촉각을 계산할 수 있다. 이러한 접촉각 결과와 Young 방정식을 바탕으로 측정 시료의 표면에너지를 확인하였다.

$$\gamma_S - \gamma_{SL} = \gamma_L \cos \theta \tag{2}$$

이 식에서  $\gamma_S$ ,  $\gamma_{SL}$ ,  $\gamma_L$ 은 각각 고체, 고체와 액체 간, 액체의 표면에너지이다. 재료의 표면에너지를 기반으로 두 재료 간의 접착일을 계산할 수 있다. 전체 표면장



**Figure 1.** Comparison of contact angle measurement with different testing schematics: (a) static contact angle; (b) dynamic contact angle.

력,  $\gamma_L$ 는 Lifshits-van der Waals 조성,  $\gamma_{LW}$ 와 산-염기 조성,  $\gamma_{AB}$ 의 합이다. 산-염기 조성(혹은 수소결합)은 전자받기,  $\gamma^+$ 와 전자주기,  $\gamma^-$ 조성을 포함한다. Young-Dupre 방정식에 따라 위 성분의 계산 접착일( $W_a$ )은 다음과 같이 표현될 수 있다 (3).

$$W_a = \gamma_L(1 + \cos \theta) = 2(\gamma_L^{LW} \gamma_S^{LW})^{\frac{1}{2}} + 2 \left[ (\gamma_S^- \gamma_L^+)^{\frac{1}{2}} + (\gamma_S^+ \gamma_L^-)^{\frac{1}{2}} \right] \tag{3}$$

접착일의 경우 고체 및 용매의 루이스산, 염기 인자를 고려하거나 분산, 극성 표면에너지를 활용하여 다양한 접근이 가능하다. 본 실험에서는 식 (3)을 기반으로 접착일을 계산하였다.

**2.3. Analysis of interfacial shear strength via microdroplet test**

유리섬유와 에폭시계면전단강도(IFSS)는 에폭시 조성에 따른 마이크로드롭렛 인발 테스트를 진행하여 평가되었다. 유리섬유를 일정한 간격으로 알루미늄 프레임에 고정시킨 뒤 팁 핀을 이용하여 섬유에 서로 크기가 다른 에폭시 드롭렛을 형성시켰다. 에폭시 조성 따라 시편을 30개 제조하였고, 메니스커스 간의 거리(함침길이)를 현미경을 통해 확인하였다. 전체 결과들을 이용하여 마이크로 드롭렛이 인발 되는 것, 섬유가 끊어지는 것 등으로 구간을 나누어 두 경향이 접점을 이루는 구간을 임계 함침길이(critical embedded length)라고 명명하고, 에폭시 조성에 따른 유리섬유와의 계면전단강도를 계산하여 결과를 비교평가하였다. 아래의 수식을 통해 실험변수에 따른 계면전단강도를 계산할 수 있었다.

$$\tau = \frac{F_{max}}{\pi D_f L} \tag{4}$$

이 식에서  $F$ 는 인발력,  $D_f$ 는 섬유의 직경,  $L$ 은 에폭시 수지의 묻힘 길이를 나타낸다.

**3. Results and discussion**

**3.1. Comparison of surface energy with differences in contact angle methods**

Fig. 2는 정적 접촉각 방법으로 측정한 유리섬유의 용매에 따른 접촉각을 나타낸다. 다른 용액으로 접촉각 수치에 대한 차이가 용매의 크기에 따라, 용매의 종류에 따라 관찰되었다. 정적 접촉각을 측정할 때 사용되는 용매에 따라 접촉각이 다르게 확인되는 것은 당연한 결과이지만, 용액의 크기에 따라 접촉각이 달라진다는 것은 Fig. 3과 같이 중요한 변수이다. 드롭렛의

함침깊이가 증가됨에 따라 접촉각도 증가되었다.

이러한 이유는 드롭렛의 크기가 증가됨에 따라 접촉각을 측정하는 고체 시료의 표면영향을 더 크게 받으며, 드롭렛의 크기가 증가됨에 따라 드롭렛이 보유하는 깃스 자유에너지가 증가되어 접촉각의 변화에 영향을 준다고 예측할 수 있다. 또한 섬유에 함침된 드롭렛은 크기가 증가됨에 따라 중력의 영향을 더 받기 때문에 각도의 변화가 발생되었다.

Fig. 4는 동적 접촉각법을 이용한 고체 시편의 표면 접촉각 결과이다. Fig. 4a는 유리섬유, Fig. 4b는 산무수물계 에폭시 기지재료의 접촉각 결과를 보여준다. 동적접촉각은 시료를 용매에 담겼다 빼는 Wilhelmy 방법을 기반으로 접촉각을 계산하며, 시편이 용매에 들어갈 때 발생하는 전진각과 시편이 용매를 빠져나오려 할 때 발생하는 후진각을 이용하여 시편 표면의 히스테리시스를 계산할 수 있는 접촉각 평가법이다. Fig. 4a와 같이 섬유의 경우 접촉각을 측정하는데 매우 낮은 mg 단위의 힘을 측정하기 때문에 많은 노이즈가 발생된다. 동적접촉각을 측정할 때 고체 시편이 물과 접촉

하는 순간 급격한  $F$  값 변화를 그래프를 통해 확인할 수 있다. 이렇게 파란색으로 나타나는 구간 데이터를 이용하여 전진각을 도출한다. 초기 depth 구간에서 확인된 급격히 증가된  $F$  값의 결과와 용매에 2 mm 삽입하고 시편이 빠져나오기 직전까지의 구간동안 데이터 추세를 이용하여 후진각을 계산하는데 사용할 수 있다. Fig. 4a에서 파란색 선이 전진각을 계산하는 추세선이라면, 이 추세선과 평행한 기울기를 가지는 빨간색 선이 후진각을 계산할 때 사용되는  $F$  값을 도출한다고 설명할 수 있다. Fig. 4a와 같이 고체 시료의 무게가 매우 가볍거나, 고체 시료의 부피가 매우 작아 측정되는  $F$  값이 낮을 경우 측정에 대한 오류 발생률은 높을 수

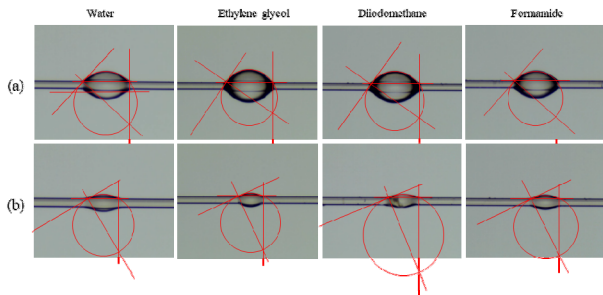


Figure 2. Photograph of GF of static contact angle; (a) 100 μm size droplet, (b) 50 μm size droplet..

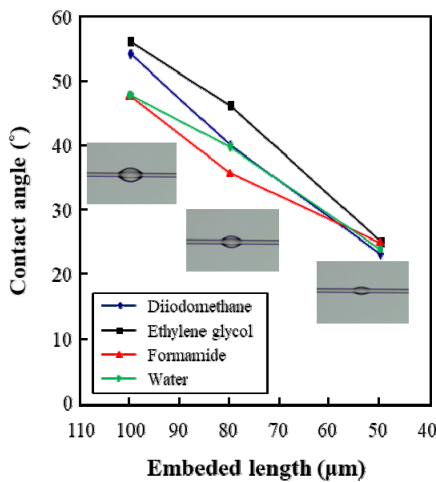


Figure 3. Static contact angle of GF using different solvents with drop size effect..

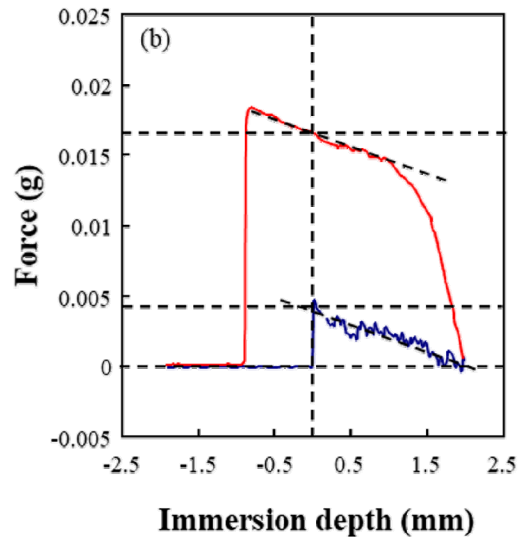
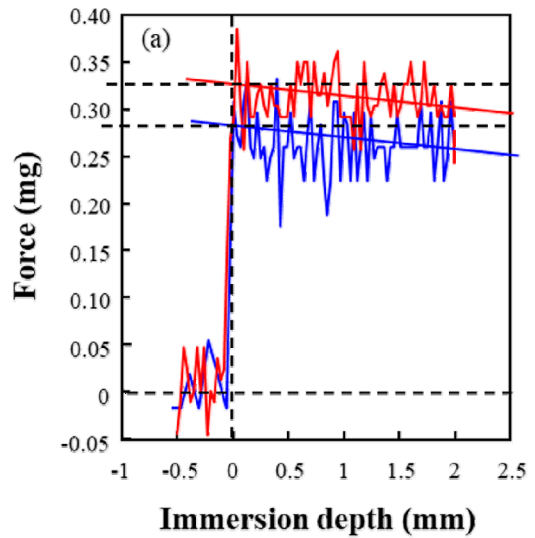


Figure 4. Dynamic contact angle of (a) GF and (b) anhydride hardener epoxy using water.

**Table 2.** The arrangement of contact angle for epoxy and fiber with different test method

	Measurement Type	Distilled water	Ethylene glycol	Diiodo methane	Formamide	
Anhydride hardener/epoxy	Static	63	49	40	30	
	Dynamic	84	71	75	77	
Amino hardener/epoxy	Static	51	38	36	42	
	Dynamic	85	60	74	78	
TGDDM/33 DDS	Static	47	45	52	41	
	Dynamic	88	75	65	80	
TGDDM/44 DDS	Static	42	45	59	55	
	Dynamic	83	64	74	74	
SE-1500 glass fiber	Static	Embedded	47	56	54	48
		Attached	29	25	23	25
	Dynamic		40	33	66	20

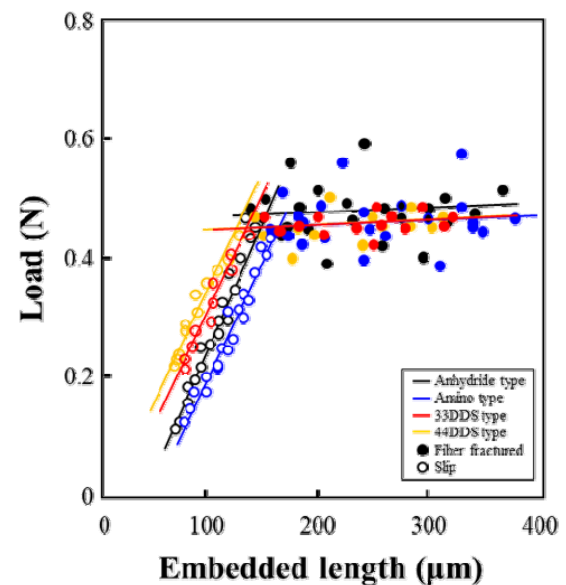
있다. 하지만 Fig. 4b와 같이  $g$  단위의  $F$  값을 측정할 수 있는 고체 시편일 경우 동적 접촉각 측정에 매우 유용하다. 하지만 고체 시편의 표면에 매끄럽지 못하거나, 이물질이 존재하거나, 시편의 휨이 존재할 경우 동적접촉각은 오류를 일으킬 수 있었다.

따라서 그래프 자체의 전진각, 후진각 계산을 위한 평행선 도출이 본 접촉각 평가방법의 중요テクニック이며, 접촉각 계산을 위한  $F$  값 설정에 있어 실험자에 따른 데이터 편차가 발생하는 것이다. 비교적 Fig. 4b와 같이 에폭시 시료는 실험데이터에 대한 노이즈가 낮은 편이며, 전진각을 계산하는 경우에  $F$  값에 대한 히스테리시스 크기가 크게 형성되고, 후진각에서는 안정적인 데이터가 관찰되었다. 이러한 평가방법을 기반으로 Table 2를 정리하였다. 접촉각 측정을 위해 사용되는 용매는 고체 시료와 접촉하는 면적, 접촉하는 방법에 따라 접촉각변화를 크게 일으켰다. 또한 에폭시 기지재료와 섬유와의 경우 정적 접촉각, 동적 접촉각 측정법에 따라 결과에 대한 경향이 달랐다. 에폭시 기지재료는 정적 접촉각 평가법으로 확인한 결과보다 동적 접촉각으로 측정한 용매에 따른 접촉각 크기가 더 높았으며, 전체 에폭시 기지재료는 동일한 경향을 나타내었다. 그에 비해 섬유 강화재는 동적 접촉각으로 측정한 접촉각이 더 높은 결과를 나타내었다. 이러한 이유에 대해서는 접촉된 용매와 고체 재료 간의 접촉면적이 중요 요인이라 판단하였다. 고체 표면에 용매가 접촉하는 면적이 좁을수록 용매의 드롭렛 자체의 용매 특성 및 용매가 가지는 부피 요인에 의한 형상학적 변수가 접촉각 측정에 미치는 영향은 낮다. 그에 비해 접촉하는 면적이 좁을 경우 재료 자체의 표면에너지 특성이 접촉각에 미치는 영향이 더 높아지기 때문에 접촉각의 크기 차이가 발생되었다고 판단할 수 있다. 즉 접촉각을 측정할 때 용매의 드롭렛

사이즈를 통일하여야 정확한 고체 시료의 표면에너지 분석이 가능하다. 또한 동적접촉각과 정적 접촉각의 경우 두 평가법의 확실한 방법의 차이가 존재하지만, 본질적으로 용매와 고체 시료가 접촉하는 면적을 동일하게 유지하여야 비교적 유사한 표면에너지 결과를 도출할 수 있었다.

### 3.2. Comparison with the correlation of work of adhesion and interfacial shear strength between epoxy and glass fiber

Fig. 5는 섬유와 에폭시 사이의 마이크로드롭렛시험을 통해 확인한 계면전단강도 결과이다. 각 조건 별로



**Figure 5.** Interfacial shear strength between GF and matrix with different epoxy resins.

Table 3. The arranged interfacial shear strength results with different conditions

	33DDS	44DDS	Anhydride hardener/epoxy	Amino hardener/epoxy
Critical embedded length ( $\mu\text{m}$ )	120	140	145	163
Interfacial shear Strength (MPa)	75	69	66	56.9

20개의 시편을 이용하였으며, 마이크로드롭렛 인발 실험을 통해 드롭렛이 섬유에서 빠지는 경향과 드롭렛과 섬유 간의 접착력이 높아 인발 실험에 따른 섬유 파단 경향으로 나누어 데이터를 표현하였다. 두 경향에 따른 임계 함침길이를 확인하였고, 이 값을 이용하여 조성에 따른 임계 계면전단강도를 식 4을 활용하여 계산하였다. 도출한 결과를 Table 3과 같이 정리하여 나타내었다. 임계 함침길이는 짧을수록 계면전단강도가 높다는 것을 의미하며, 가장 최고의 계면접착력을 나타내는 조건은 TGDDM/33 DDS에서 관찰되었다. 에폭시 조성차이에 따라 계면전단강도의 차이가 존재하였다.

궁극적으로 접착각 측정 방법에 따른 식 2, 3을 활용하여 계산된 에폭시 수지와 섬유의 표면에너지 및 접착일을 Table 4, 5로 정리하였다. 일반적으로 접착각 결과를 바탕으로 접착일을 계산할 경우 접착일과 계면전단강도 간에 비례관계로 나타난다 [21-23]. 하지만 정적접착각 평가법으로 계산한 접착일의 경우, 계면전단강도 경향은 Table 3과 일치하지 않는 것을 확인하였다. TGDDM/33DDS가 가장 높은 계면전단강도를 측정

되었으나, 접착일을 계산해 볼 때 계면강도가 가장 높지 않음을 확인하였다. 아미노계 에폭시와 유리섬유 간의 계면이 우수한 접착력을 나타낸다고 계산되었으나, 실제 계면접착강도는 가장 낮은 결과를 나타내었다. 즉 접착각을 측정할 때 문제가 되는 요인으로 접착각을 측정하는데 있어 섬유의 형상이 둥글었기 때문이라고 판단된다. 또한 정적 접착각을 측정하는데 함침식이나 표면접착식을 사용하였을 때, 접착일 또는 표면에너지 값의 차이가 있으나 전체 경향은 같음을 확인하였다. 마지막으로 Table 5와 같이, 동적접착각을 이용하여 섬유와 에폭시 기지재료간 계면접착일을 계산하였다.

동적 접착각을 이용하여 확인한 접착일의 경향은 계면전단강도의 경향과 유사하였다. 즉 가장 최적의 접착각 측정 면적에서 표면을 분석하였기 때문에 실험과정에서 발생하는 오차를 최소화할 수 있었다. 동적접착각 평가법이 정적접착각 평가법에 비해 표면분석의 정확성이 더 높음을 증명했다.

Table 4. Work of adhesion and various surface energy for GF and matrix with epoxy using static contact angle measurement

Materials	Test method	$\gamma_s$	$\gamma_s^{LW}$	$\gamma_s^{AB}$	$\gamma_s^+$	$\gamma_s^-$	$\gamma^d$	$\gamma^p$	Wa (Embedded)	Wa (Attached)
33DDS	Static	40.4	30.3	10.1	2.5	10.1	17.1	26.9	89.9	103.2
44DDS	Static	37.7	29.2	8.5	1.0	19.0	10.4	40.7	103.7	118.4
Anhydride hardener condition epoxy	Static	45.5	39.6	5.9	1.4	6.1	26.8	16.6	85.1	97.5
Amino hardener condition epoxy	Static	47.0	51.6	5.5	0.7	10.9	23.0	24.5	102.3	116.8
Fiber	Embedded	34.1	14.6	19.5	46.6	2.0	14.0	31.4		
	Attached	45.8	18.7	26.9	51.7	3.6	23.8	34.9		

Table 5. Work of adhesion and various surface energy for GF and matrix with epoxy using dynamic contact angle measurement

	$\gamma_s$	$\gamma_s^{LW}$	$\gamma_s^{AB}$	$\gamma_s^+$	$\gamma_s^-$	$\gamma^d$	$\gamma^p$	Wa (Dynamic)
33DDS	22.4	21.2	1.2	0.1	8.2	9.0	16.1	69.2
44DDS	24.9	20.7	4.3	1.2	4.1	14.3	10.8	62.9
Anhydride hardener/epoxy	20.9	18.0	2.9	0.4	5.6	9.4	12.6	62.7
Amino hardener/epoxy	21.6	18.0	3.6	0.7	4.5	11.3	10.9	60.8
Fiber	49.0	10.8	38.2	43.5	8.4	12.3	44.2	

#### 4. Conclusion

본 연구에서는 정적 접촉각과 동적 접촉각 평가법의 정확성을 비교분석하고, 복합재료용 에폭시 기지재료 4종과 유리섬유 간의 계면접착력 분석시 효과적인 표면분석 기법이 무엇인지를 규명하였다. 정적 접촉각 및 동적 접촉각 평가방법에 따라 용매에 따른 영향, 평가법에 의한 평가기준의 차이는 있지만, 실험결과에 대한 영향은 용매와 고체 시료가 접촉하는 표면적이 낮을수록, 그리고 고체 시료의 표면상태가 균질할수록 효과적인 평가가 가능하였다. 실제 에폭시와 섬유 간의 계면전단강도 평가결과와 동적접촉각 평가법의 유사성이 높았다. 즉 동적 접촉각 측정법은 정적 접촉각 측정법에 비해 미네스커스 각도 측정 및 접촉표면의 최소화에 따른 오류발생을 낮출 수 있었다.

#### Acknowledgmen

This research was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) was funded by the Ministry of Education (No. 2020R1A6A1A03038697 and NRF-2021M3H4A3A01043762).

#### References

1. J. Fleisher, R. Teti, G. Lanza, P. Mativenga, H.C. Mohring, A. Caggiano. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* **67**, 603 (2018).
2. C.N.C. Lam, R. Wu, D. Li, M.L. Hair, A.W. Neumann. *Adv. Colloid Interface Sci.* **96**, 169 (2002).
3. S. Pimanpang, P.I. Wang, J.J. Senkevich, G.C. Wang, T.M. Lu. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* **278**, 53 (2006).
4. D. Polster, H. Graaf. *Appl. Surf. Sci.* **265**, 88 (2013).
5. J. Chinnam, D. Das, R. Vajjha, J. Satti. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* **62**, 1 (2015).
6. K. Grundke, K. Pöschel, A. Synytska, R. Frenzel, A. Drechsler, M. Nitschke, A.L. Cordeiro, P. Uhlmann, P.B. Welzel. *Adv. Colloid Interface Sci.* **222**, 350 (2015).
7. M.A. Mahjoub, G. Monier, C.R. Goument, L. Bideux, B. Gruzza. *Appl. Surf. Sci.* **357**, 1268 (2015).
8. K. Li, T. Kobayashi. *Ultrason Sonochem.* **28**, 39 (2016).
9. Q. Ronghui, L. Lin, J. Yu. *Int. J. Heat Mass Transf.* **88**, 210 (2015).
10. Y. Yamamoto, K. Tokieda, T. Wakimoto, T. Ito, K. Katoh. *Int. J. Multiph. Flow.* **59**, 106 (2014).
11. C.A. Fuentes, K. Beckers, H. Pfeiffer, L.Q.N. Tran, C.D. Gillain, I. Verpoest, A.W.V. Vuure. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* **455**, 164 (2014).
12. C. Zhang, W. Zhou, Q. Wang, H. Wang, Y. Tang, K.S. Hui. *Appl. Surf. Sci.* **276**, 377 (2013).
13. S.D. Hong, M.Y. Ha, S. Balachandar. *J. Colloid Interface Sci.* **339**, 187 (2009).
14. A.A. Shareef, P. Neogi, B. Bai. *Chem. Eng. Sci.* **99**, 113 (2013).
15. F. Huang, Q. Wei, X. Wang, W. Xu. *Polym. Test.* **25**, 22 (2006).
16. J.M. Park, D.S. Kim, S.R. Kim. *Compos. Sci. Technol.* **63**, 40 (2003).
17. J.M. Park, Z.J. Wang, D.J. Kwon, G.Y. Gu, W.I. Lee, J.K. Park, K.L. DeVries. *Compos. B: Eng.* **43**, 1171 (2012).
18. X. Sun, Y. Hasegawam, H. Kohno, Z. Jiao, K. Hayakawa, K. Okita, N. Shikazono. *Mater. Charact.* **96**, 100 (2014).
19. A. Maestro, E. Guzman, F. Ortega, R.G. Rubio. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* **19**, 355 (2014).
20. D.J. Kwon, Z.J. Wang, J.Y. Chou, P.S. Shin, K.L. DeVries, J.M. Park. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* **72**, 160 (2015).
21. P.S. Shin, J.H. Kim, H.S. Park, Y.M. Baek, D.J. Kwon, K.L. DeVries, J.M. Park. *J. Adhes.* **97**, 438 (2021).
22. Q. Wu, Q. Wan, X. Yang, F. Wang, J. Zhu. *Appl. Surf. Sci.* **547**, 149162 (2021).
23. J.H. Kim, D.J. Kwon, K.L. DeVries, J.M. Park. *Compos. Sci. Technol.* **225**, 109495 (2022).