

## 論文

## 탄소섬유/에폭시의 반구형 미소접합 시험편에 대한 계면강도 평가

박주언\*, 구자욱\*, 강수근\*, 최낙삼\*\*

## Interfacial shear strength test by a hemi-spherical microbond specimen of carbon fiber and epoxy resin

Joo-Eon Park\*, Ja-Uk Gu\*, Soo-Keun Kang\*, Nak-Sam Choi\*\*

## ABSTRACT

Interfacial shear strength between epoxy and carbon fiber was analyzed utilizing a hemi-spherical microbond specimens adhered onto single carbon fiber. The hemi-spherical microbond specimen showed high regression coefficient and small standard deviation in the measurement of interfacial strength as compared with a droplet and an inverse hemi-spherical one. This seemed to be caused by the reduced meniscus effects and the reduced stress concentration in the region contacting with a pin-hole loading device. Finite element analysis showed that the stress distributions along the fiber/matrix interface in the hemi-spherical specimen had a stable shear stress distribution along the interface without any stress mode change. The experimental data was also different according to the kinds of loading device such as the microvise-tip and the pin-holed plate.

## 초 록

단일 탄소섬유에 부착된 반구형 미소본드 시험편을 제작하여 에폭시수지와 탄소섬유사이의 계면전단강도를 평가하였다. 반구형 미소시험편의 경우, 드랍레트 미소접합시험편 및 역반구형 미소접합시험편과 비교하여 계면강도측정값들이 높은 회귀계수 및 작은 편차를 보여주었다. 이는반구형 시험편의 매니스커스 부분이 다른 미소시험편보다 작으며 핀홀 부하장치의 선단과 접촉하고 있는 수지부분에서 응력집중이 감소했기 때문인 것으로 사료된다. 이들 시험에 대한 유한요소해석결과, 반구형 시험편에서는 수지/섬유의 계면부를 따라 전단응력분포가 응력모드의 전환이 없이 안정하였다. 또한 이들 계면강도 측정데이터는 미소 바이스의 선단과 핀홀 판의 선단과 같은 부하장치의 종류에 따라 달라졌음을 알았다.

**Key Words** : Interfacial shear strength(계면 전단강도), Hemispherical microbond specimen(반구형 미소접합 시험편), Droplet microbond specimen(드랍레트 미소접합 시험편), Inverse hemi-spherical specimen(역 반구형 미소접합 시험편), Single carbon fiber/epoxy(탄소섬유/에폭시)

## 1. 서 론

탄소섬유 강화 에폭시 복합재료는 높은 비강도와 비강성 등의 기계적 특성뿐만 아니라 내식성, 내구성, 내열성 및 내 마모성 등의 우수한 성질을 가지고 있기 때문에 많은 기계구조물에 고 성능의 물성을 부여하고 경량화를 위한 소재로 활용 되고 있다.

섬유와 수지 사이의 계면강도는 탄소섬유 강화 복합재료에 높은 물성을 부여하기위한 중요한 요소이며 섬유와 수지의 종류, 섬유의 표면 상태, 섬유와 수지간의 결합조건 등에 영향을 받는다[1,2]. 계면 전단강도의 시험방법으로는 인발 시험 (pull-out test)[3], 마이크로 드랍레트 시험 (droplet microbond test)[4-6], 프래그멘테이션 시험 (fragmentation test)[6], 마이크로 디본딩

\* 한양대학교 기계공학과 대학원

\*\* 한양대학교 기계공학과, 교신저자(E-mail:nschoi@hanyang.ac.kr)

시험 (microbonding test)[7] 등이 있다. 이들 시험법은 시험편의 형상에 따라 각기 상이한 결과가 구해질 뿐만 아니라 실험 데이터의 분산 정도가 20~65%정도로 심하게 나타난다는 단점이 있다[8]. 저자들은 선행 연구로서 마이크로 드랍레트 시험편의 응력집중 효과와 메니스커스 효과를 저감할 수 있는 새로운 반구형 인발 미소접합 시험편 (hemi-spherical pull-out microbond specimen)[9]을 개발하여 드랍레트 시험편과 비교 분석하였으며 본 시험법이 안정하고 신뢰성 있는 데이터를 제공하였음을 확인하였다.

본 연구에서는 저자들이 제안하는 반구형 인발 미소접합 시험편의 유효성을 검증하기 위해 역 반구형 인발 시험편 (inverse hemi-spherical pull-out specimen)[10]을 추가로 제작하고 계면 강도 시험을 하여 선행연구 결과와 비교 검토하였다. 또한 실험적으로 구한 강도 데이터의 타당성을 분석하기 위하여 유한 요소 해석을 실시하였다.

## 2. 미소 접합 계면강도 시험

### 2.1 시험편 제작 및 관찰

본 연구에 사용된 재료로는 비스페놀 A 형 (DGEBA) 에폭시 주체 (YD-128, Kukdo Chemical Co.)와 피페리딘 (KBH-1089, Kukdo Chemical Co.) 경화제 그리고 지름이  $7.5\mu\text{m} \pm 0.06$ 이고, 인장강도 3.86GPa인 탄소섬유 (AS4-W-12K, Hercules)를 사용하였다. 에폭시 주체와 경화제를 10:9의 비율로 혼합한 액상 원료를 이용하여 계면강도 시험을 위한 반구형, 드랍레트, 역반구형 인발 시험편을 제작하였다.

Fig. 1은 본 실험에서 제작된 반구형 인발 미소접합 시험편의 제작 과정을 나타낸 개략도이다. 약  $30\mu\text{m}$  구멍이 미리 뚫려진 테프론 필름 (Teflon film)에 단일 섬유를 통과 시킨 후, 섬유 고정용 금속 틀에 섬유를 고정하였다. 얇은 금속 철사를 이용하여 초기 드랍레트를 형성시켰으며, 테프론 필름을 아래 방향으로 약간 내려 드랍레트를 반구형으로 형성시켰다. 탄소 섬유의 산화방지를 위해 질소 가스가 주입된 오븐에서  $120^\circ\text{C}$  / 5시간의 조건으로 시험편들을 경화하였다. 경화된 시험편의 섬유를 일정 길이만큼 절단한 후  $25\mu\text{m}$ 의 구멍이 있는 스테인레스 (두께 0.5mm) 편흔에 시험편의 상단 섬유부를 통과시키고 모놀레이프 틀에 시험편 섬유의 양단을 접착제를 사용하여 고정시켜 섬유를 일직선으로 유지함으로써 Fig. 2와 같이 반구형 미소접합 시험편을 완성하였다.

Fig. 3은 비교 실험을 위해 제작된 드랍레트 인발 미소접합 시험편 (Fig. 3(a))과 역 반구형 인발 시험편 (Fig. 3(b))의 개략도를 나타낸 것이다. 섬유의 묻힘길이는 반구형과 드랍레트 시험편의 경우, 인발 시험 전에 비디오 광학 현미경을 사용하여 측정하였으며, 역 반구형 시험편은 Fig. 4(c)와 같이 인발 실험 후 Fig. 4(a) 및 (b)의 경우와 같이 묻힘길이를 측정하였다.

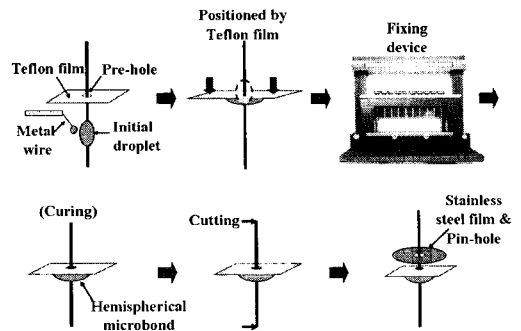


Fig. 1 Schematic of manufacturing steps for a hemi-spherical type single fiber/epoxy specimen.

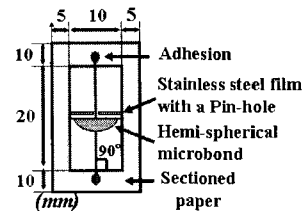


Fig. 2 Schematic of a hemi-spherical specimen.

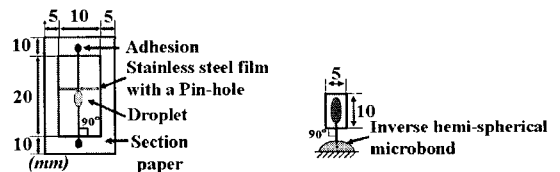


Fig. 3 Schematic of a conventional droplet microbond specimen (a) and an inverse hemi-spherical specimen (b).

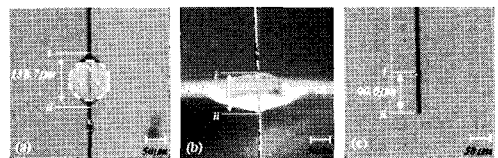


Fig. 4 Embedded length measurement of each type of specimens: (a) microdroplet, (b) hemi-spherical and (c) inverse hemi-spherical microbond specimens.

세 시험편 모두 섬유의 묻힘길이를 사진에서 보는 바와 같이 메니스커스 (meniscus) 부가 포함된 i에서 ii까지의 길이로 측정하였다. 반구형과 역 반구형 시험편의 경우 메니스커스의 크기가 전체 묻힘길이의 10% 미만으로 미미한 수준으로 나타났으나, 드랍레트 시험편에서는 메니스커스 부의 범위가 전체 묻힘 길이에서 30% 정도로 크게 관찰되어 실험 결과 데이터의 분산을 크게 초래 할 것으로 생각된다[4,9]. 또한 역반구형 시험편의 경우 시험시에 스테인레스 밀판의 무게로 인한 탄소섬유의 파손발생을 방지하기 위해 스테인레스 밀판의 크기를  $0.3\text{mm} \times 0.2\text{mm}$  정도로 작게 하여 판의 무게를 최소화하였다.

비디오 광학 현미경을 사용하여 측정하였으며, 역 반구형 시험편은 Fig. 4(c)와 같이 인발 실험 후 Fig. 4(a) 및 (b)의 경우와 같이 문힘길이를 측정하였다. 세 시험편 모두 섬유의 문힘길이를 사진에서 보는 바와 같이 메니스커스 (meniscus) 부가 포함된 i에서 ii까지의 길이로 측정하였다. 반구형과 역 반구형 시험편의 경우 메니스커스의 크기가 전체 문힘길이의 10% 미만으로 미미한 수준으로 나타났으나, 드랍레트 시험편에서는 메니스커스 부의 범위가 전체 문힘길이에서 30% 정도로 크게 관찰되어 실험 결과 데이터의 분산을 크게 초래 할 것으로 생각된다[4,9]. 또한 역반구형 시험편의 경우 시험시에 스테인레스 밀판의 무게로 인한 탄소섬유의 파손발생을 방지하기 위해 스테인레스 밀판의 크기를 0.3mm×0.2mm 정도로 작게 하여 판의 무게를 최소화하였다.

2.2 미소인발 시험

Fig. 5는 미소시험편 종류별로 인발 시험 방법과 부하용 부품의 개략도를 나타낸다. 시험편의 고정구를 10N 로드셀에 부착하고 시험편의 섬유축이 마이크로 바이스 팁 사이의 틈새 간격의 중앙에 위치하도록 XYZ 마이크로 스테이지를 이용하여 맞추고 시험을 수행하였다. 시험편의 계면파괴를 위한 인장속도는 0.1mm/min로서 시험편 종류에 관계없이 동일한 조건으로 실시하였다. 반구형과 드랍레트 시험편은 문힘길이 50~150μm, 역 반구형 시험편은 문힘길이 50~100μm 인 50개의 시험편을 각각 사용하였으며 스테인레스 강의 핀홀을 사용하여 미소 수지를 섬유로부터 인발 시험하였다. 역 반구형 시험편은 수지부 바닥에 접착된 스테인레스 스틸 판을 마이크로 팁으로 잡아당겨 수지가로드셀에 고정된 섬유로부터 인발 되도록하였다. 문힘길이가 100μm이상인 역 반구형 시험편에서 수지가 섬유에서 인발 될과 동시에 섬유 고정부에서 섬유가 취성파괴를 일으켜 잔여 시험편이 소실되어 문힘길이 측정이 불가능하였으므로, 섬유의 취성파괴가 발생하지 않은 문힘길이 100μm이하의 시험편을 시험데이터 획득 대상으로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시험편 종류에 따른 계면전단강도 측정 데이터 분석

Fig. 6은 인발시험 후 세 시험편 각각의 계면 파괴 양상을 보여주고 있는데, 섬유와 에폭시 수지사이의 계면부를 따라 파괴가 진행되었으며, 수지로부터 메니스커스가 분리되었음을 나타내고 있다. 각 시험편의 문힘길이에 따른 계면파괴하중 데이터 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 각 시험편의 계면전단강도 τ<sub>d</sub>는 계면에 작용하는 전단응력이 일정하다는 가정 하에서 다음 식 (1)로 계산 된다[11].

$$\tau_d = \frac{F_d}{\pi d_f l} \tag{1}$$

여기서 F<sub>d</sub> : 최대하중, d<sub>f</sub> : 섬유지름, l : 섬유 문힘길이 이다. 문힘길이의 증가에 따른계면 파괴하중의 증가가 나타나는 것을 알 수 있으며, 원점을 지나는 세 회귀선(A, B, C)을 구하고, x축 문힘길이 100μm 위치(점선과 교차하는 위치)에 대응하는 F<sub>d</sub> 값을 구하여 식 (1)을 이용한 평균 계면전단강도를 구한 결과, 드랍레트 시험편은 36.7MPa, 반구형 시험편은 19.6MPa 그리고 역 반구형 시험편은 38.5MPa로 계산되었다. 여기서 문힘길이 100μm위치를 선택한 이유는 세 가지 시험편 전체에서 섬유의 파단이 발생하지 않고 계면파괴가 일어나는 최대 문힘길이 였기 때문이다.

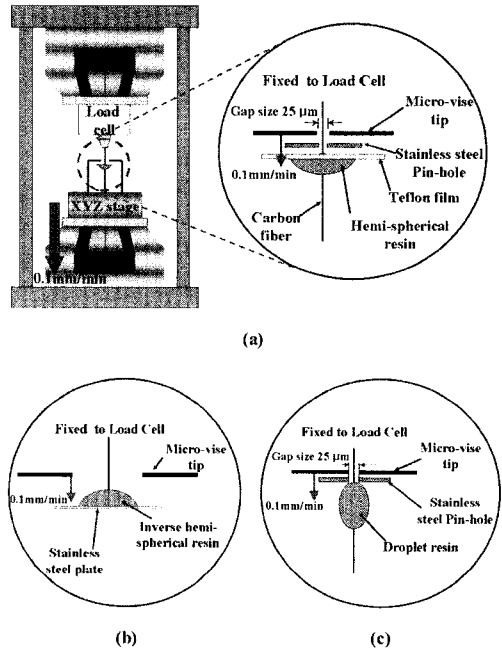


Fig. 5 Schematic pull-out test setup for each type of microbond specimens: (a) hemi-spherical and (b) inverse hemi-spherical specimens, and (c) droplet being tested with a pin-holed stainless steel film.

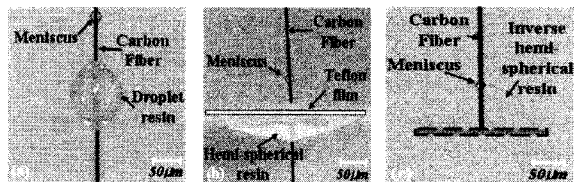


Fig. 6 Pulled-out droplet (a), hemi-spherical (b) and inverse hemi-spherical (c) specimens after tested.

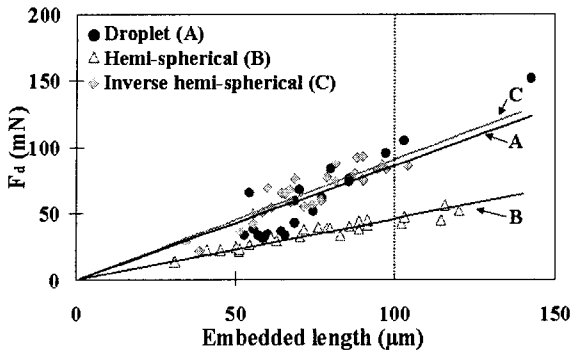


Fig. 7 Maximum loads  $F_d$  versus embedded lengths droplet, hemi-spherical and inverse hemi-spherical specimens.

역 반구형 시험편의 계면전단강도가 세 시험편 중에 가장 크게 나타나는 것은 Fig. 8에 보이는 바와 같이 탄소섬유의 상단부에 가해지는 하중  $F_d$ 는 이에 상대하는 내력으로서 섬유와 수지의 계면 부에 작용하는 전단하중  $F_s$ (shear force)와 섬유의 하단부에 작용하는 인장하중  $F_t$ (tensile force)가 함께 작용하고 있기 때문이다. 즉,  $F_s$ 와  $F_t$ 는 계면 부의 인장강도와 전단강도가 동일하다고 가정할 때 섬유 문힘길이와 섬유 단면 지름의 비( $5 \leq \frac{l}{d_f} \leq 13$ )에 따라 최대 2.8배 정도의 차이를 보

일 수 있다.  $F_t$ 가 증가하면  $F_s$ 가 감소하므로 문힘길이를 단순히 식 (1)에 적용하여 구한 계면전단강도 값에는 오차가 크게 발생 할 수 있다. 따라서 이러한 오차를 보정하기 위하여 실제 계면하중  $F_{sa}$ 를 다음과 같은 식 (2)를 이용하여 재계산 한 후 식 (1)의  $F_d$ 에 대입할 수 있다.

$$F_{sa} = \frac{F_d}{\left(1 + \frac{d_f \sigma_d}{4l\tau_d}\right)} \quad (2)$$

여기서  $F_{sa}$  : 실제 계면에작용하는 하중,  $F_d$  : 측정 하중,  $d_f$  : 섬유지름,  $l$  : 섬유 문힘길이 이다.  $\sigma_d$ 와  $\tau_d$ 을 동일하다고 가정하고 세가지 시험편들의 시험 데이터를 식 (1)을 식 (2)로 보정하여 그 평균을 구한 결과 Fig. 9에서와 같이 나타낼 수 있으며, 반구형 시험편의 경우 평균값이 약 1/2정도로 작으면서 데이터들의 분산이 가장 작게 났다.

Table 1은 세 시험편의 회귀선 작성에 의한 계면전단강도와 회귀도, 산술 평균 계면전단강도 그리고 표준 편차를 나타낸 것이다. 세 시험편의 회귀도  $R^2$ 은 반구형 시험편이 0.91로서 역 반구형과 드랍레트 시험편에 비해 월등히 신뢰 가능 회귀 선을 보여주고 있다. 또한 반구형 시험편의 표준편차가 역 반구형에 비하여 1/3 그리고 드랍레트에 비해 1/6 수준으로 저하 되어 월등히 밀집한 신뢰성있는 데이터 분포를 보이고 있다.

Table 1 Average interfacial shear strength  $\bar{\tau}_d$ , regression coefficient and standard deviation for each type

Specimen	$\tau_d$ (MPa) in Fig. 7	Regression coefficient in Fig. 7	$\bar{\tau}_d$ (MPa) In Fig. 9	Standard deviation in Fig. 9
Droplet	36.7	0.74	33.7	8.93
Hemi-spherical	19.6	0.91	20	1.65
Inverse hemi-spherical	38.5	0.81	38.1	5.53
	37.6 (corrected by eqn(2))	0.81	37.1 (corrected by eqn(2))	5.47

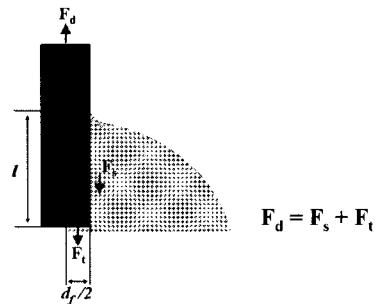


Fig. 8 Schematic of an inverse hemi-spherical specimen.

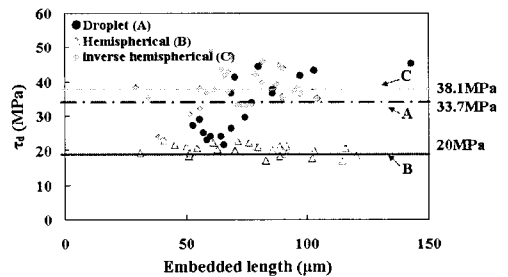


Fig. 9 Average interfacial shear strength  $\bar{\tau}_d$  versus embedded lengths droplet, hemi-spherical and inverse hemi-spherical specimens.

### 3.2 부하 방식에 따른 반구형 시험편의 계면전단강도 측정 데이터 분석

핀홀과 바이스 팁을 이용하여 부하 방식에 따른 반구형 시험편의 하중 접촉상태를 Fig. 10에 나타내었다. 반구형 시험편의 상부 면에 핀홀과 바이스 팁을 각각 적용하여 시험한 경우 시험편에 가해지는 하중 접촉면적의 차이가 발생하고 이에 따른 응력집중 효과가 크게 달라져 바이스 팁을 이용한 경우 보다 낮은 하중에 서도 계면 파괴가 발생할 것으로 판단 된다. Fig. 11은 핀홀과 바이스 팁을 이용한 반구형 시험편의 인발시험 결과를 나타낸 것이다. 동일한 반구형 시험편이라도 부하 방식에 따라 계면 파괴하중 그래프의 기울기가 차이가 남을

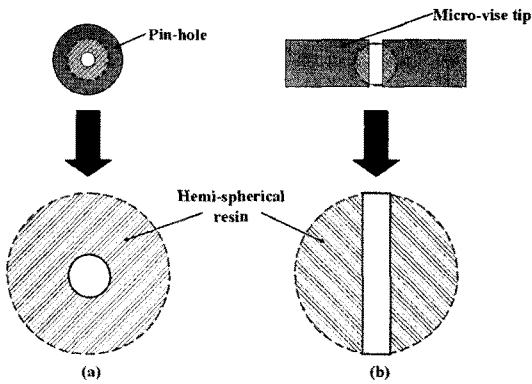


Fig. 10 Load contacting region of a hemi-spherical specimen by the loading of pin-holed film (a) and Micro-vice tip (b).

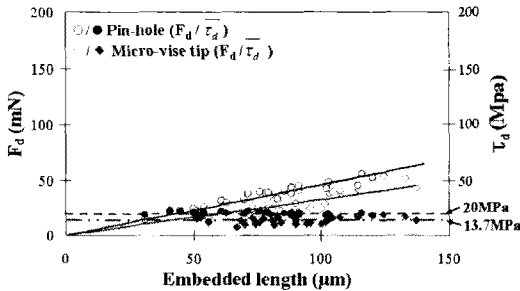


Fig. 11 Maximum loads  $F_d$  and average interfacial shear strength  $\tau_d$  of hemi-spherical specimens according to different loading tips.

Table 2 Interfacial shear strength ( $\tau_d$ ), regression coefficient and standard deviation according to different loading device

Load device type	$\tau_d$ (MPa) in Fig. 11	Regression coefficient in Fig. 11	$\tau_d$ (MPa) in Fig. 11	Standard deviation in Fig. 11
Pin-hole	19.6	0.91	20	1.65
Micro-vice tip	14.1	0.60	13.7	3.03

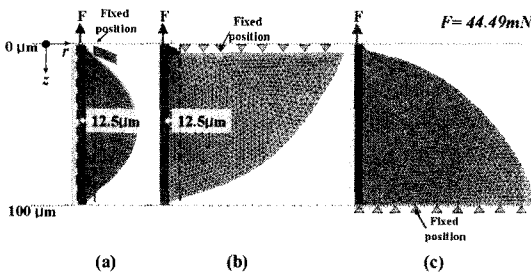


Fig. 12 FEA modeling of droplet (a), hemi-sphere (b) and inverse hemi-spherical (c) specimens. (unit:μm)

확실히 보이고 있다. Table 2는 부하 방식에 따른 평균 계면전단강도, 회 귀도 그리고 표준 편차를 나타내고 있다. 바이스 팁을 이용하여 시험한 경우 보다 낮게 나타났다. 피고트와 다이[8]는 시험편의 형상에 따라 각기 상이한 결과가 도출 될 수 있다고 언급했으며, 이 실험결과를 통하여 동일한 시험편 형상 일 지라도 가해지는 부하 방식에 따라서 섬유 수지 복합체의 계면전단강도의 평가에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

## 4. 유한요소 해석

### 4.1 모델링

Fig. 12는 본 실험에 사용된 세 가지 시험편에 대한 유한요소 수치해석 모델을 나타내고 있다. 세 가지 모델 모두 문헌 길이를 100μm으로 하고 드랍레트 모델의 경우, 25μm 핀홀을 사용 하였으므로 에폭시 드랍레트와 핀홀의 접촉위치를 섬유 축 중심에서 12.5μm가 되도록 모델링 하였다. 반구형 모델은 핀홀이 시험편의 상부 수평면에 접촉하므로 모델링에서 수평면을 z축 방향으로 고정하였다. 역 반구형 시험편은 바이스 팁이 시험편 하부에 고정되어 있는 스테인레스 박판과 접촉하게 되므로 모델링에서 수지의 밑 부분을 고정하였다. 또한 세 모델 모두 섬유축 r방향 비고정과 축 대칭(axisymmetric)조건으로 하였고, 섬유 및 계면은 4절점(4-node) 사각형 요소(element), 수지부는 6절점(6-node) 삼각형 요소로 모델링 하였다. 섬유축 상부에 작용하는 하중은 120℃/5시간의 경화 조건에서 제작된, 문헌길이 100μm의 반구형 시험편의 계면과피하중의 평균측정값인 44.49mN으로 하였으며 이값을 섬유의 단면적에 작용하는 압력으로 환산하여 입력하였으며 섬유와 수지의 물성치는 선행 연구[9]에 사용된 값을 적용하였다.

### 4.2 해석결과 및 고찰

위와 같은 유한요소해석에 의하여 세 종류의 미소시험편에 대한 계면에서의 팔면체 전단응력  $\tau_{oct}$ 의 분포를 살펴보았다. 팔면체 전단응력을 비교응력으로 선택한 이유는 선행연구 (4, 9)에서 입증된 바와 같이 미소 수지가 기본적으로 탄소성적 거동을 띠며 인장 주응력과 압축 주응력이 함께 반영된 해석을 할 수 있기 때문이다.

Fig. 13은 본 연구에 사용된 세 가지 시험편의 유한요소수치해석 모델들의 팔면체 계면전단응력  $\tau_{oct}$  분포를 나타낸 것이다. 드랍레트 모델은 z축 0μm 위치에서 반구형과 역반구형 모델에 비하여 높은  $\tau_{oct}$  응력의 집중이 나타나고 있으며 0~20 μm에서 응력 크기의 변동이 발생하였다. 하지만, 반구형 및 역 반구형 시험편은 드랍레트 시험편에 비해 완만한 응력 집중으로 서로 상당히 유사한 응력 분포 형태를 보였다. Fig. 14, 15, 16에서 볼 수 있듯이 인장응력에서 압축응력으로 전환되는 x축 10μm 부위에서 섬유의 중심축 방향으로 3축(r, θ, z)의 압력이 작용하게 되어 드랍레트 시험편의 계면 파괴를

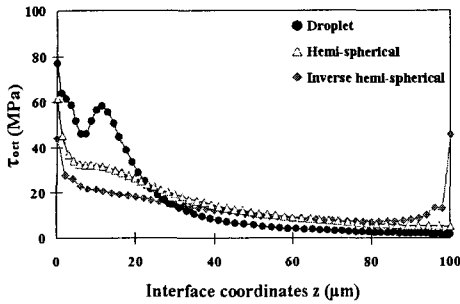


Fig. 13 Distribution of shear stresses ( $\tau_{act}$ ) along the interface.

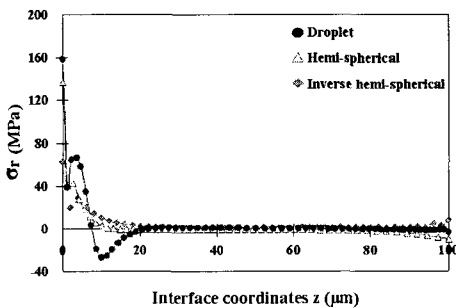


Fig. 14 Distribution of normal stresses ( $\sigma_r$ ) along the interface.

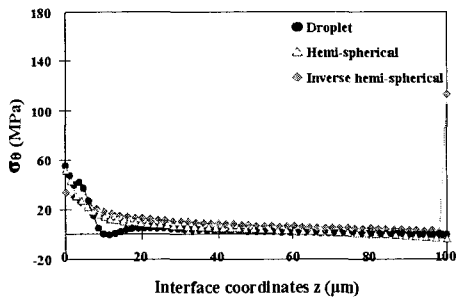


Fig. 15 Distribution of normal stresses ( $\sigma_\theta$ ) along the interface.

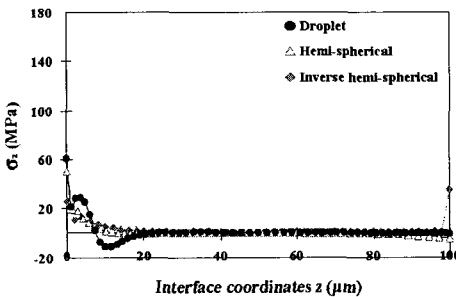


Fig. 16 Distribution of normal stresses ( $\sigma_z$ ) along the interface.

억제하는 효과를 나타내는 것으로서 Fig. 7에서 드랍레트 시험편의 계면 파괴 하중이 다른 시험편에 비하여 높게 나타나는 것을 설명해주고 있다. 또한 역 반구형 모델은 다른 두 시험편과는 달리  $z=100\mu\text{m}$  부근에서 인장응력이 크게 증가함을 보였으며 이는 역 반구형 시험편의 섬유단에서 인장응력의 집중현상으로, 먼저 인장계면파괴가 섬유단에서 발생하고 그 후 섬유측면으로 전단형 계면파괴가 진행되는 것을 가리키며, 이 점이 반구형 시험편의 계면 강도와 달라지게 되는 이유가 될 것이다. 이러한 응력분포 현상을 바탕으로, 탄소 섬유와 에폭시 수지 사이의 계면에서 응력모드 전환 또는 급격한 응력 증가는 시험편 종류에 따라 크게 달라짐을 알 수 있으며 탄소섬유 복합재료의 계면전단강도 평가에 있어서 데이터간의 편차를 매우 크게 한다고 볼 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 선행연구에서 저자들이 제안한 반구형 인발 미소접합 시험편을 제작하여 계면 강도시험을 수행하였다. 기존에 사용되어 왔던 드랍레트 인발 미소 접합 시험편과 역 반구형 인발 시험편을 제작하여 비교 실험을 하였다. 또한 유한요소수치해석을 통해 반구형, 드랍레트형, 역 반구형 모델에 대한 계면 전단응력 분포를 구하여 비교 검토하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 반구형 인발 미소 접합 시험편은 드랍레트 시험편과 역 반구형 시험편 보다 계면전단강도 평가에 있어 평균값은 약 50%로 작게 측정되고 데이터들의 분산 정도가 훨씬 적어 안정하고 신뢰성 있는 데이터의 획득이 가능하였다.
- (2) 동일한 반구형 인발 미소접합 시험편이라도 바이스 텀과 스테인레스 스틸 핀홀을 통한 인장 실험 결과에 차이가 상당히 컸다. 이는 에폭시 수지에 작용하는 하중이 일정 하더라도 하중이 가해지는 접촉면적의 크기에 따라 응력 집중 효과가 다르게 나타나서 실험 결과에 영향을 미칠 수 있다는 것을 설명해주고 있다. 따라서 본 논문에서 제시된 반구형 시험편에 핀홀 부하를 가하여 계면 전단강도를 평가하는 것이 조기 계면 파괴 발생을 억제 할 수 있어 신뢰 가능한 실험 결과데이터를 얻을 수 있었다.
- (3) 유한요소 해석 모델링을 분석한 결과, 반구형 모델은 스테인레스 스틸 핀홀이 에폭시 수지와 접촉하는 부위에서 인장응력이 집중하고 문힘길이 전체에 걸쳐 일정하게 분포하고 있는 반면, 드랍레트 모델의 경우  $x$ 축  $0\sim 20\mu\text{m}$  부위에서 인장에서 압축 모드로의 응력전환이 발생하여 계면 파괴 억제 효과가 나타남을 알 수 있었다. 또한 역 반구형 모델의  $\sigma_\theta$ 는 문힘길이  $100\mu\text{m}$ 위치에서 최대 인장응력이 발생하였으며 이는 실제 인발 시험에서 섬유단의 인장형 계면파괴가 먼저 발생하는 것을 설명하고 있다.

## 참고문헌

- 1) 문창권, 엄윤성, 조현호, 이장우, 박천옥, “섬유의 표면처리가 탄소섬유강화 복합재료의 기계적 특성에 미치는 영향,” *Polymer (Korea)*, Vol. 14, No. 6, 1990, pp. 630-637.
- 2) 문창권, 엄윤성, “섬유직경과 섬유표면처리가 계면전단강도에 미치는 영향,” *Polymer(Korea)*, Vol. 15, No. 3, 1991, pp. 289-296.
- 3) Lynn S. Penn, Shaw M. Lee, “Interpretation of the force trace for Kevlar/epoxy single filament pull-out tests,” *Fibre Science and Technology*, Vol. 17, No. 2, September 1982, pp. 91-97.
- 4) 강수근, 최낙삼, 이덕보 “미소접합 시험과 유한 요소법을 통한 섬유/에폭시 복합재의 계면전단강도 해석,” 한국복합재료학회지, Vol. 19, No. 4, 2006, pp. 7-14.
- 5) R. J. Day, J. V. Cauich Rodrigez, “Investigation of the Micromechanics of the Microbond test,” *Composites Science and Technology*, Vol. 58, 1998, pp. 907-914.
- 6) H. D. Wagner, H. E. Gallis, E. Wiesel, “Study of the interface in Kevlar 49-epoxy composites by means of microbond and fragmentation tests: effects of materials and testing variables,” *Journal of Materials Science*, Vol. 28, 1993, pp. 2238-2244.
- 7) J. F. Mandell, J. H. Chen, F. J. McGarry, “A microbonding test for in situ assessment of fibre/matrix bond strength in composite materials,” *Int. J. Adhesion and Adhesives*, Vol. 1, Issue, 1, 1980, pp. 40-44.
- 8) M. R. Piggott, S. R. Dai, “Fiber Pull Out Experiments With Thermoplastics,” *Polymer Engineering and Science*, Vol. 31, No. 17, Mid-September 1991, pp. 1246-1249.
- 9) 박주연, 최낙삼, “복합재료의 계면전단강도를 평가하기 위한 새로운 반구형 미소접합 시험편,” 한국복합재료학회지, Vol. 21, No. 2, 2008, pp. 25-30.
- 10) John A. Naim, “Analytical Fracture Mechanics Analysis Of The Pull-Out Test Including The Effects Of Friction And Thermal Stresses,” *Advanced Composite Letters*, Vol. 9, No. 6, 2000, pp. 373-383.
- 11) Umesh Gaur, Bernard Miller, “Microbond Method for Determination of the Shear Strength of a Fiber/Resin Interface: Evaluation of Experimental Parameters,” *Composites Science and Technology*, Vol. 34, 1989, pp. 35-51.