

고온 환경하에서의 CFRP의 인장강도특성에 관한 연구

박재범* · 황태경* · 김형근* · 도영대*

Study on the Tensile Strength Characteristics of CFRP under the High Temperature Condition

Jaebeom Park* · Taekyung Hwang* · Hyunggeun Kim* · Youngdae Doh*

ABSTRACT

In this research, the decrease of the tensile strength in CFRP was investigated by experimental and analytical methods. We focused on the role of the interface between the reinforcing fiber and the epoxy resin matrix. The tensile and the interface strengths in CFRP were evaluated using the strand and the short beam specimens. Curtin's model which correlate the mechanical strength of the interface to the tensile strength was introduced for analytical study. The experimental and the analytical results showed good coincidence and we found that the interface strength is the key factor which governs the CFRP's tensile strength.

초 록

고온 특성이 매우 우수한 탄소섬유와 상대적으로 내열성능이 취약한 Epoxy수지로 구성된 CFRP재의 고온 환경 하에서의 인장강도 특성에 관한 실험적 및 해석적 연구가 수행되었다. 특히, CFRP재의 인장강도특성에 결정적으로 작용하는 섬유와 Epoxy 수지와와의 계면의 특성에 초점을 맞추었으며, 고온 환경 하에서 점차적으로 저하되는 계면 강도의 변화가 CFRP재의 인장강도에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 이를 위해, Strand 인장 및 Short Beam 시험을 고온 환경 하에서 실시하였으며, Curtin-Takeda Model를 도입하여 이론해석을 실시하였다.

Key Words: Tensile Strength(인장강도), Fiber-Matrix Interface(섬유-모재 계면), Filament Winding(필라멘트 와인딩), Pressure Vessel(압력용기), High Temperature(고온)

1. 서 론

추진기관의 압력용기로서 현재 사용이 증대되고 있는 필라멘트 와인딩용 복합재료로는 강화

섬유로서 탄소섬유, 모재로서 Epoxy수지가 사용되는 탄소섬유강화복합재료(이하,CFRP)가 널리 사용되어지고 있다. 이러한 CFRP재의 강도 및 강성 특성은 강화섬유와 모재의 강도 및 강성이 복합적으로 작용하여 발현되어 지며, 흔히 혼합률(Rule of Mixture)로서 구해진다[1]. 그러나 최근, 각종 연구결과들이 종합되어 지면서, CFRP

* 국방과학연구소 기4-4
연락처자, E-mail: jbparkut@yahoo.com

각 구성요소의 개별적인 역학적 특성보다는 강화섬유/모재의 계면특성이 CFRP재의 강도특성에 더 큰 영향을 미치는 것으로 확인되고 있다 [2,3]. 한편, 추진기관용 압력용기의 경우, 우주환경 및 초고속의 조건하에서 운용되어지는 경우가 많으며, 이때 구조재인 CFRP재의 역학적 특성의 변화를 예측하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 이러한 상황을 고려하여, 고온 환경하에서의 CFRP재의 강도특성에 관한 실험적 및 이론적 해석을 실시하였다. 특히, 강화섬유/모재 계면특성의 고온 환경에 의한 변화가 CFRP재의 강도에 미치는 영향을 정량적으로 평가하여, 향후 고온 환경 하에서의 추진기관 압력용기의 구조안전성평가의 기초자료를 확보하였다.

2. 실험 결과

2.1 시험편 및 시험장비

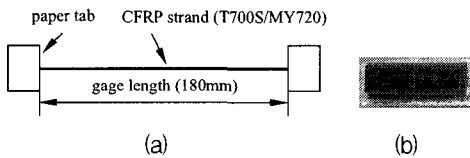


Fig. 1 Specimens used for the experiments: (a) strand, (b) short beam.

Figure 1은 본 연구에서 사용된 시험편을 나타낸 것이다. 인장강도측정을 위해서는 Strand 시험편을 사용하였으며, 계면전단강도의 측정을 위해서는 Short Beam 시험편을 사용하였다. 고온 환경 하에서의 시험을 수행하기 위하여 Fig.2에 나타낸 것과 같은 Chamber를 인장 시험기에 부착하여 고온 환경시험을 실시하였다. 시험편의

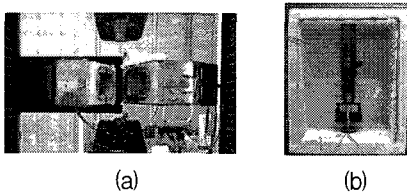


Fig. 2 High Temperature Chambers: (a) for tensile test, (b) for bending test.

온도측정을 위해 온도센서(Thermocouple)을 시험편위에 설치하여, 목표온도에 도달한 것을 확인한 후, 시험을 실시하였다.

2.2 시험 결과 및 분석

Figure 3은 인장시험결과를, Fig.4는 계면 전단 강도 측정결과를 나타낸 것이다. 온도가 증가함에 따라 인장강도가 감소하고 있는 것이 확인되고 있으며, 특히 일정온도(약 350°C) 이상에서는 일정한 값을 유지하고 있다. 탄소섬유는 일반적으로 매우 우수한 내열 특성을 보유하고 있으므로, 이러한 비교적 낮은 온도 영역(300°C이하)에서의 강도저하는 Epoxy수지 모재의 열화에 의한 것으로 판단된다. Figure 4는 Epoxy수지의 강도 특성을 나타내는 계면전단강도의 온도의존성을 나타낸 것으로 Epoxy수지의 강도가 온도에 크게 좌우되는 것이 확인된다. 그러나 일반적으로 상

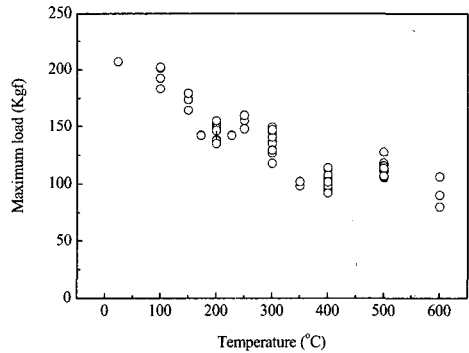


Fig. 3 Variation of the tensile strength under High Temperature Conditions.

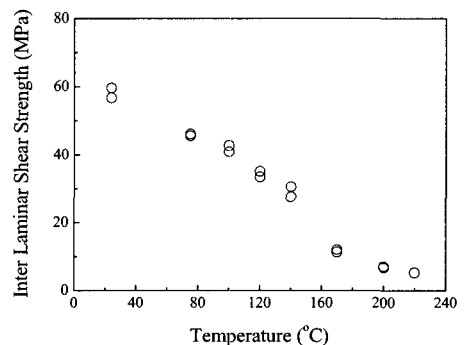


Fig. 4 Variation of the Inter Laminar Shear Strength under High Temperature Conditions.

온에서의 Epoxy 수지의 강도는 70-80MPa에 불과하므로, CFRP재의 강도가 2500-3000MPa인 것을 고려하면 혼합물의 관점에서 보면 Epoxy수지가 CFRP재의 인장강도에 미치는 영향은 미미하다. 따라서, 본 실험에서 얻어진 결과는 혼합물의 관점에서는 설명되어 질 수 없으며, 강화섬유/모재사이에 형성된 계면 특성의 변화를 통해 설명되어야 한다.

3. 이론 해석 및 고찰

3.1 계면의 역학적 특성과 Curtin 모델

본 절에서는 2절의 실험적 사실을 계면의 역학적 특성을 고려한 인장강도 예측모델을 이용하여, 고찰해 보고자 한다. 섬유 파단부에서 모재는 소성 거동을 하며, 복합재 내부의 강화섬유는 섬유는 외부하중을 지지하는 영역과 모재의 소성 거동에 의해 축 방향응력이 선형적으로 증가하는 영역으로 나뉘며, 특히 외부하중을 지지하지 못하는 영역을 기계적 무효거리라 한다 (Fig. 5). 섬유파단부 인근의 특이한 거동은 강화섬유와 모재사이에 형성된 계면에 의해 발생되는 것으로, Curtin 등은 이러한 거동과 섬유 강도의 통계적 분포특성(3-parameter Weibull)을 고려하여 복합재의 인장강도에 관한 예측 Model을 제안하였다[4].

$$\sigma_{ult} = f\sigma_c \left(\frac{2}{m+2} \right)^{1/(m+1)} \left(\frac{m+1}{m+2} \right) + (1-f)\sigma_y \quad (1)$$

위 식에서 s_c , d_c 는 각각 임계강도, 임계 소성영역 길이라 하며 식(2)로 나타내 진다.

$$\sigma_c = \left(\frac{\sigma_o^m r L_o}{r} \right)^{1/(m+1)}, \quad \delta_c = \left(\frac{\sigma_o r L_o^m}{\tau} \right)^{m/(m+1)} \quad (2)$$

즉, 복합재의 인장강도는 섬유의 강도 분포 및 계면의 전단강도 t , 그리고 섬유 반경 r 에 의해 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 식(1)에서 f 는 섬유체적 함유율, s_o , m 은 3-parameter

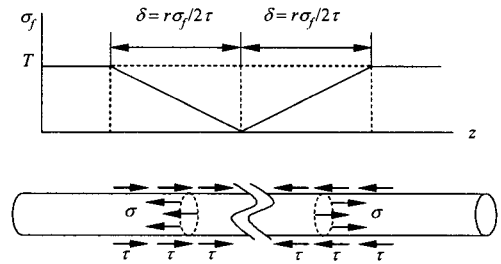


Fig. 5 Schematic representation of the broken fiber ends. The interfacial stress t and the applied stress s_f generate the mechanical ineffective length d .

Weibull 분포의 scale 및 shape parameter이며, L_o 는 단섬유 강도측정시의 섬유의 길이이다. 한편, 모재의 항복응력 s_y 이 인장강도에 미치는 영향은 미미함으로 식(1)의 두번째 항은 생략이 가능하다.

3.2 섬유강도 분포 특성에 의한 영향

식(1)에서 알 수 있듯이 복합재의 인장강도는 계면의 역학적 특성은 물론, 섬유강도의 통계분포특성과 밀접하게 관련되어 있다. 특히, 임계소성영역길이를 갖는 강화 섬유의 강도가 특히 중요하다. 그러나, 임계소성영역길이는 통상 수백 mm에 불과하다. 이러한 길이의 섬유에 대해 인장시험을 실시하는 것은 불가능하므로, 통상은 시험이 가능한 최소 길이의 섬유를 이용하여 강도분포를 구한 후, 이를 3-parameter Weibull 분포식으로 나타낸 후, 강도의 길이 의존성을 이용하여 임계소성영역길이의 섬유강도를 추정하는 것이 일반적이다. 식(3)에 3-parameter Weibull 분포식을 나타내었다.

$$1 - P_f = \exp \left[- \left(\frac{l}{L_o} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{ult}}{\sigma_o} \right)^m \right] \quad (3)$$

여기서, P_f 는 파손확률, l 은 섬유길이, s_{ult} 는 섬유강도이다. 식(3)을 통해 임의의 섬유길이 l 의 섬유의 특성강도 ($P_f=1-e^{-1}=0.632$ 에 해당하는 s_{ult})를 추정할 수 있으며, 이 특성 강도 값은 식(4)로 나타내어진다.

$$\sigma_{o,l} = \sigma_{o,L} \left(\frac{L_o}{l} \right)^{1/m} \quad (4)$$

그러나 섬유유인장강도 분포특성을 정확하게 구하는 것은 매우 어려우며, 실제로 이에 대한 연구들이 현재도 진행 중에 있다[5]. 본 연구에서는 이러한 상황을 고려하여, Length Scaling에 따른 섬유강도 추정의 오차를 가급적 줄이기 위해, 가능한 최소의 Gage Length를 갖는 단섬유인장시험결과[6]를 사용하여 해석을 실시하였다. Table 1은 본 연구에서 사용된 탄소섬유유인장시험 결과를 나타내었다. Figure 5는 Table 1의 결과를 이용한 식(1)의 계산 결과와 실험결과를 비교하여 나타낸 것이다. 시험결과는 섬유체적함유율 $f=0.55$ 인 곡선과 잘 일치하고 있다. 실제로 시험에 사용된 Strand 시편의 섬유체적함유율을 측정 한 결과, 약 56%인 것을 확인하였다. Figure 6은 본 연구의 실험을 통해 확인된 고온 환경에서의 인장강도의 저하 현상은 계면강도의 저하에 의한 기계적 무효거리의 증가에 의해 매우 정확히 설명될 수 있다는 것을 보여주고 있으며, 또한 Curtin Model의 유용성을 뒷받침하고 있다.

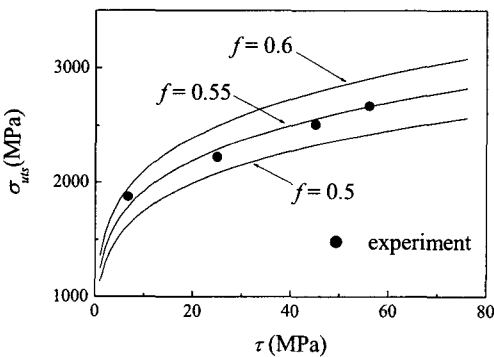


Fig. 6 Comparison between the Experimental and the Analytical Results.

Table 1 Material Properties used for Calculation

r	L_o	m	s_o
3.5 mm	2 mm	4.3	5049 MPa

4. 결 론

본 연구에서는 CFRP재의 고온 환경하에서의 인장강도 특성에 대한 실험적, 해석적 연구를 실시하였으며, 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) CFRP재의 인장강도는 사용온도가 증가함에 따라 점차 감소하며, 일정온도 (본 연구에서는 약300°C) 이상에서는 일정한 값에 수렴한다.
- 2) 인장강도가 감소하는 온도영역에서는 계면전단강도의 점진적인 감소가 확인되었다.
- 3) 인장강도의 감소경향은 강화섬유/모재의 계면전단강도를 고려하여 효과적으로 예측될 수 있다.

참 고 문 헌

1. Jones, R. M., Mechanics of Composite Materials, Scripta Book Company, 1975.
2. Rosen, B. W., "Tensile Failure of Fibrous Composites," AIAA J. Vol.2, 1964, pp.1985-1991
3. Zweben, C., "Tensile Failure Analysis of Fibrous Composites," AIAA J. Vol.6, 1968, pp.2325-2331
4. Curtin, W. A., "Stochastic Damage Evolution and Failure in Fiber-Reinforced Composites," Advanced in Appl. Mech., Vol.36, 2000, pp.163-253
5. Curtin, W. A., "Tensile Strength of Fiber-Reinforced Composites III.," J. Comp. Mater., Vol.34, No.15, 2000, pp.1301-1332
6. 박 종만, "미세역학시험법과 비파괴적 평가를 이용한 CFRP재의 계면 특성연구", 국방과학연구소 시험평가용역보고서, 2004