

탄소섬유/에폭시 복합적층판의 피로수명 분포특성

김영기, 박병준*·김재훈, 이영신**·전제춘***

Characteristics of Fatigue Life Distribution for Carbon/Epoxy Composite Laminates

Y. K. Kim, B. K. Park*, J. H. Kim, Y. S. Lee**, J. C. Jeon***

Key Words: Fatigue life distribution, Composite laminates, Weibull distribution, Median rank, Maximum likelihood method, Non-linear regression method

Abstract

The characteristics of fatigue life distribution for Carbon/epoxy composite laminates was investigated under tension-tension loading($R=0.1$). The statistical nature of the fatigue life of the composite materials was analyzed by Weibull, normal, lognormal distributions.

As a result, it was observed that the correlation between the experimental results and the theoretical predictions for the fatigue life is good. The distribution of the static ultimate strength has the characteristic of lognormal distribution and distribution of the fatigue life has characteristics of the Weibull distribution.

1. 서론

탄소섬유강화 복합재료는 기존의 금속재료에 비하여 비강도와 비강성이 높은 고강도 경량화 재료로 우수한 피로특성과 내마모성, 내마열성, 절연성 등이 좋은 특성을 가지고 있으며, 적층각 및 적층순서에 따라 적절한 강도와 강성을 갖는 재료로 설계 제작할 수 있는 장점을 지니고 있어 경량화가 요구되는 항공·우주산업분야 및 골프채, 스키, 요트 등과 같이 스포츠·레저용품에 폭 넓게 응용되고 있다. 그러나, 복합재료가 비균질 이면서 이방성을 갖는 재료로서 매우 복잡한 파괴특성을 지니고 있다. 또한 재료의 물리적 성질, 파손거동 및 피로수명 평가 등에 대해 축적된 자료가 부족하기 때문에 복합재료의 사용은 비교적

높은 신뢰성을 요구하지 않는 스포츠·레저용품 등에 보다 많이 활용되고 있다. 그리고 일반적으로 높은 신뢰성을 요구하는 항공·우주산업분야 등의 활용에는 많은 제약을 받고 있는 실정이다. 따라서 탄소섬유강화 복합재료에 대한 피로수명의 분포특성과 파단 수명을 예측하고, 실험 결과와 비교 분석함으로써 그 타당성의 검증은 복합재료의 신뢰성을 향상시키고, 안전수명 설계를 위한 자료의 축적과 피로손상 거동의 손상허용 평가를 위한 유효한 방법의 제시라는 측면에서 매우 큰 의의가 있다.

본 연구에서는 탄소섬유강화 복합재료를 이용하여, S-N 곡선 및 수명분포 특성, 피로 사이클의 변화에 대한 강성의 감소정도를 고찰함으로써 탄소 섬유강화 복합재료에 대한 실험적 자료를 축적하고 피로수명분포 및 그 특성을 파악하는데 목적이 있다.

* 충남대학교 대학원

** 충남대학교

*** 국방과학연구소

2. 시험방법

2.1 시험편 제작

본 연구에서 사용된 복합재료 적층재는 탄소섬유/에폭시 프리프랙스 $[(\pm 45)(0/90)_2]_s$ 로 6ply를 적층하고 autoclave에서 Fig. 1과 같은 온도와 압력에 서 적층판을 두께 1.3mm으로 성형하였다. 성형된 적층판은 다이아몬드 휠톱을 사용하여 ASTM D3479 규정에 의거하여 Fig. 2와 같은 형상 및 치수로 제작하였다.

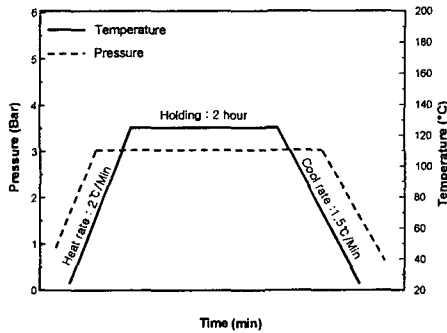


Fig. 1 Curing cycle of specimens' manufacturing

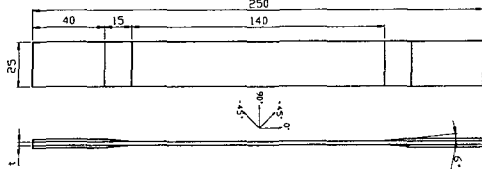


Fig. 2 Configuration of test specimen

2.2 시험방법

본 실험은 전기유압식 피로시험기(SHIMAZU사 : Model EHR-20), A/D 변환기를 이용하였다. 피로실험은 일정하중 제어방식으로 수행하고, 파형은 정현파(Sine파), 응력비 $R=0.1$ 로 하였다. 그리고 피로최대응력(S)은 극한강도(S_u)의 0.5, 0.6, 0.7, 0.8로 4종류의 응력 수준을 선택하였다. 탄소 섬유강화 복합재료의 피로시험에서 주파수가 15~30Hz 범위에서 온도의 영향을 무시할 수 있는 것으로 보고[1]되고 있기 때문에 본 실험에서는 주파수를 5Hz로 실험하였다. 실험 중 응력-변위 곡선의 히스테리시스 루프에 대한 데이터는 각 응력 수준에서 각 반복수마다 변화하므로 A/D 변환기를 이용하여 일정구간마다 측정하여

취득하였다.

피로실험에서 정확한 변위와 변형율의 측정은 강성저하 해석에 매우 중요하고 기본적인 자료이므로 Fig. 3과 같이 치구를 부착하여 clip gage를 이용하여 수행하였다. 제작된 치구는 시편 전체에 대한 게이지 길이를 측정할 수 있기 때문에 시편 전체의 변위를 파손시까지 큰 오차없이 측정할 수 있다.

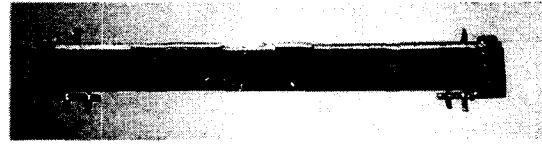


Fig. 3 Guide of clip gage

3. 시험결과 및 고찰

일반적으로 섬유강화 복합재료가 갖는 분포특성을 보면, 정규분포, 로그정규분포, 와이불분포를 갖는 것으로 알려져 있다. 피로수명특성을 평가하기 위하여 다음의 3종의 분포함수를 사용하였다. 각각의 측정분포함수를 보면 다음과 같이 표시된다.

1) 정규분포(Normal distribution)

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{(x-\bar{x})/\sigma} \text{Exp}(-t^2/2) dt$$

$$= \Phi[(x-\bar{x})/\sigma] \quad (1)$$

여기서, \bar{x} : 평균, σ : 표준편차

2) 로그 정규분포(Lognormal distribution)

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\ln}^2}} \int_0^{\ln x} (1/t) \text{Exp}[-\frac{1}{2\sigma_{\ln}^2}(\ln t - \overline{\ln x})^2] dt$$

$$= \Phi[(\ln x - \overline{\ln x})/\sigma_{\ln}] \quad (2)$$

여기서, $\overline{\ln x}$: $\ln x$ 의 평균, σ_{\ln} : $\ln x$ 의 표준편차

3) Weibull 분포

$$F(x) = 1 - \text{Exp}[-(x/\beta)^\alpha] \quad (3)$$

여기서, α : 형상계수(shape parameter)

β : 위치계수(scale parameter)

4) 중앙 순위(median rank)

$$P = \frac{j-0.3}{n+0.4} \quad (4)$$

여기서, P : 파손 확률, n : 전체 시편 수

j : 파손 순서

3.1 정적 인장실험

정적 인장실험으로부터 극한강도, 탄성계수 등의 기계적 성질을 측정하여 Table 1에 극한 강도를 나타낸 것이다. 대표적인 응력-변형률 곡선은 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 응력-변형률곡선은 700 MPa까지 거의 선형적인 관계를 나타내고 있다. Table 1에서 극한강도는 어느 정도의 편차를 나타내었다. 이러한 특성을 분석하기 위해서 식 (1), (2), (3)의 3가지 분포함수를 이용하여 통계적인 측면을 고려하였다. 여기서, 실험 파손확률은 통계에서 일반적으로 사용되고 있는 식 (4)를 사용하였다.

인장실험에 대한 분포 특성을 Fig. 5, 6에 나타냈다. Fig. 4는 축적분포함수와 정적 인장강도와 의 관계를 나타내는데, 축적분포함수가 중요시 되는 영역(20~80%)에서는 와이불분포가 잘 일치하는 경향을 보이지만, 전영역에서는 로그정규 분포함수의 경향을 갖는다.

Fig. 5의 중앙순위에 의한 분포특성에서도 Fig. 4와 같은 경향을 보이고 있다.

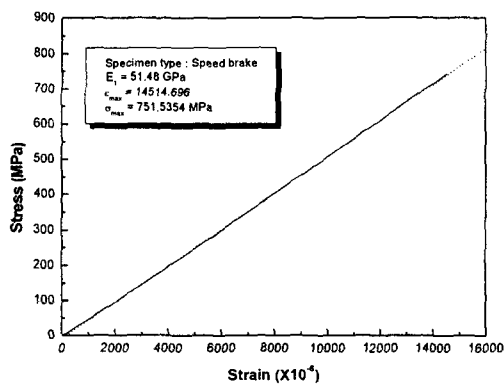


Fig. 4 Stress-stran curve for Carbon/epoxy

Table 1. Results of tensile test for Carbon/ epoxy [(±45)(0/90)₂]_s

No	Ultimate strength (Mpa)	No	Ultimate strength (Mpa)
1	760.2	6	783.2
2	755.3	7	770.6
3	801.9	8	774.6
4	796.1	9	787.2
5	767.9	10	765.1
Average :776.2			
Standard deviation : 51.9			

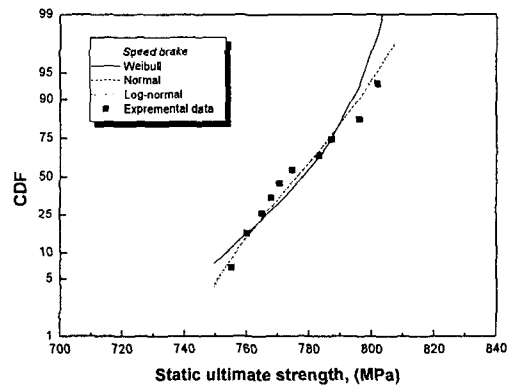


Fig. 5 Comparison of 3 distribution functions for static ultimate strength

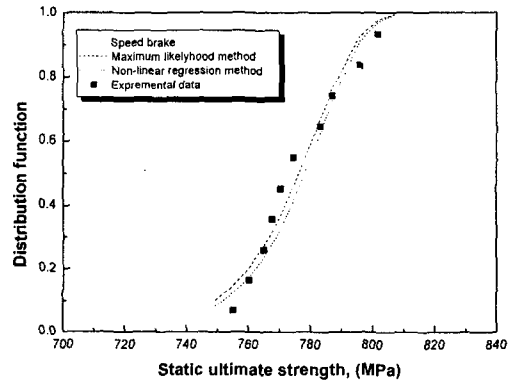


Fig. 6 Distribution function of ultimate strength

Table 2는 와이블 분포의 파라미터를 결정하는데, 가장 많이 사용되고 있는 최우추정법(Maximum likely-hood method)과 비선형 회귀 분석법(Non-linear regression method)으로 파라미터를 결정한 것이다. 이들 파라미터들은 ASTEX-Weibull Analysis V1.0 및 SPSS 8.0을 이용하여 결정하였다.

Table 2 Parameters of Weibull distribution function for composite laminates

Stress level	Weibull distribution			
	M. L. M		N. R. M	
	α	β	α	β
Static	53.126	876.238	55.170	878.16
0.6	1.460151	225723.5	1.597	216999.4
0.7	1.5	22368.81	1.436	21690.83
0.8	1.66	3360.96	1.58222	3289.8

M. L. M : Maximum likelyhood method

N. R. M : Non-linear regression method

3.2 피로수명 예측실험

피로수명분포의 특성은 응력수준(0.5, 0.6, 0.7, 0.8)에서 인장강도와 동일한 방법으로 정규분포, 로그정규분포, 와이블분포를 이용하여 해석하였다. Table 3은 일정한 응력수준에서 피로실험에 의해 얻어진 피로수명의 결과를 나타낸 것이다.

Table 3. Fatigue life data for carbon/epoxy

Stress level (Mpa)	Fatigue life
610.9 (0.8)	6163, 3467, 3698, 1109, 3391, 1647, 4479, 1812, 1119, 695
534.6 (0.7)	6886, 3873, 16581, 36108, 37806, 18729, 43280, 11451, 9671, 8314
458.2 (0.6)	98530, 120112, 108897, 118156, 330152, 394454, 190655, 189095, 137043, 46034
381.8 (0.5)	1000000, 1000000

Fig. 7은 각 함수들의 축적분포와 각 응력수준에서의 실험으로 얻어진 결과에 대한 파손확률을 비교한 것으로, 정규분포와 로그정규분포보다는 와이블분포가 잘 부합됨을 알 수 있다. Fig. 8은 각 응력수준에서의 피로 수명 데이터를 이용하여 파라미터를 결정하는 방법인 비선형 회귀법과 최우추정법에 따라 와이블 분포로 나타낸 것이다. 여기서도 실험값의 파손확률은 식 (4)에 의해 정의된 중앙순위를 이용하여 환산하였다. 이 비교에서 보면 최우 추정법은 피로수명의 경우 모든 응력수준에서 분산성이 적은 것으로 평가되고 있으나, 인장강도의 경우는 분산성이 큰 것으로 평가되고 있다. 반면에, 모든 영역에서 비선형 회귀법은 인장강도 및 피로수명에 대해서 비교적 정확하게 평가하고 있다.

Fig. 9는 하중 반복수에 따른 히스테리시스 루프를 나타낸것으로, 10^4 사이클까지는 강성의 변화가 거의 없으나, 10^5 사이클 부터는 강성의 저하가 크게 나타남을 알 수 있다.

Table 4는 Hwang[2]에 의해 제안된 피로수명 예측 모델을 나타낸것이고 이를 그림으로 나타낸 것이 Fig. 10이다. Fig. 10을 보면, 1, 2 및 4식은 피로수명을 비교적 잘 예측하나, 반면에 3, 5식은 실제 실험데이터와 상당한 차이를 보이고 있어 부적합한 것으로 판단된다. 또한 S-N곡선과 Basquin 관계식을 살펴보면, 적용응력의 모든 범위에서 피로수명을 잘 예측하고 있다. 결과적으로 이 재료의 피로수명 평가에 사용될 수 있는 수명 관계식은 1, 2, 4와 S-N곡선, Basquin 관계식이라고 사료된다.

Table 4 Summary of fatigue life prediction equations

1	$N = \{M(1 - q^B)\}^{1/C} \quad (M = F_0^B/A)$
2	$N = \{M(1 - q)\}^{1/C} \quad (M = F_0/A)$
3	$N = M(1 - q^B) \quad (M = F_0^B/A)$
4	$N = \left[-\frac{1}{A} \ln q\right]^{1/C}$
5	$N = \exp[M(1 - q^B)] \quad (M = F_0^B/A)$
6	$N = q^{-1/A}$

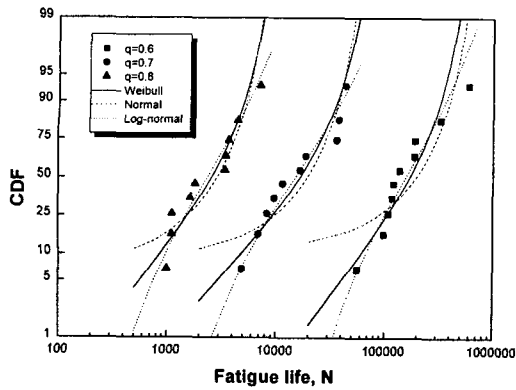


Fig. 7 Comparison of distribution functions for fatigue test at the applied stress level

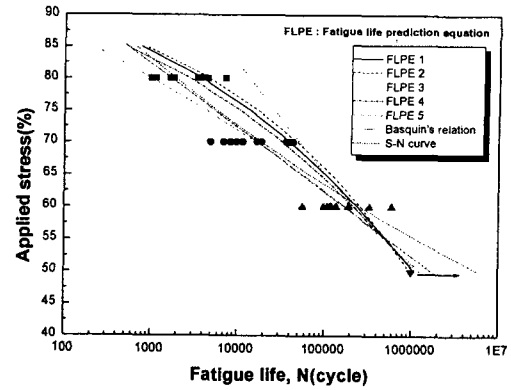


Fig. 10 Comparison of experiments and predictions of fatigue life for stress level

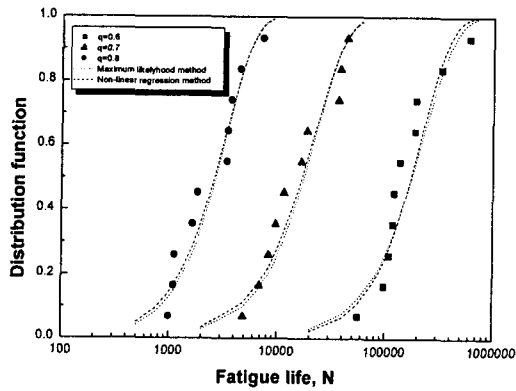


Fig. 8 Weibull distribution functions for fatigue test at the applied stress level

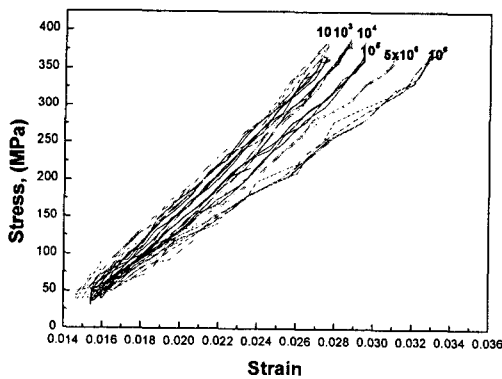


Fig. 9 Hysteresis loop for fatigue test

4. 결론

탄소섬유/에폭시 복합재료를 이용하여 피로수명을 측정하고 이에 대한 분포 특성을 통계적 측정분포함수와 중앙순위에 의한 파손확률을 이용하여 해석한후 피로수명에 대한 예측값과 실험결과를 비교 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 정적 인장강도 및 피로수명을 분포함수로 해석한 결과, 정적 극한강도는 로그정규분포, 피로수명은 와이블 분포의 경향을 갖는다.
2. 극한 강도의 50%에서의 히스테리시스루프를 보면 10^4 사이클까지는 강성의 감소가 미소한 변화를 보이거나 10^5 사이클이 지나서는 큰 강성감소가 있다.
3. Hwang의 관계식들과 S-N곡선 및 Basquin 관계식을 이용하여 피로수명을 예측한 결과 S-N 곡선과 Basquin관계식이 유용한 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) H. T. Hahn, 1979, "Failure characterization of a Graphite/Epoxy Laminate Through Proof Testing", Composite Materials : Testing and Design, ASTM STP 787, pp. 247~273
- (2) W. B. Hwang and K. S. Kim, 1986, "Fatigue of Composite-Fatigue Modulus Concept and Life Prediction.", J. of Composite Materials", Vol. 20, pp. 154~165