

# 섬유강화금속적층재의 강도에 대한 통계적 평가

The Statistical Evaluation of Strength in Fiber Reinforced Metal Laminates

손세원<sup>†</sup>, 장정원<sup>‡</sup>, 이혜형<sup>\*</sup>

Se-Won Sohn, Jeong-Won Jang, Hae-Hyoung Lee

<sup>†</sup>건국대학교 기계설계학과, <sup>‡</sup>건국대학교 대학원, <sup>\*</sup>건국대학교 산업대학원

**Abstract :** In this paper, the tensile strength in aluminum alloy 5052, Kevlar 49-fiber reinforced aluminum alloy laminates, and Glass-fiber reinforced aluminum alloy laminates, is statistically evaluated. Prepregs manufactured in Han Kuk Fiber is used and FRMLs is cured by Hot-Press. Standard statistical procedures are used to determine the distribution function which best fits FRMLs strength data. The normal, log-normal, and two-parameter Weibull distributions are evaluated using the Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit test. At the 5% significance level, none of these distribution is rejected. The strength of Aluminum alloy 5052 is best fits to a normal distribution. However, the strength of Kevlar 49-fiber reinforced aluminum alloy laminates and Glass-fiber reinforced aluminum alloy laminates is best fits to a two-parameter Weibull distribution.

## I. 서 론

복합재료(複合材料, Composite Materials)는 두 가지 이상의 성질이 서로 다른 물질을 결합하여 成形함으로써 단독 재료를 사용해서는 나타낼 수 없는 그 재료의 우수한 성질을 얻을 수 있는 재료를 말한다. 이러한 복합재료중의 하나가 섬유강화적층복합재료(纖維強化積層複合材料, Fiber Reinforced Laminate Composite Material)이고, 적층순서와 섬유방향, 다양한 모재(Matrix)와 섬유의 종류를 변화시킴으로써 우수한 기계적 성질 및 열적 성질의 특성조절이 쉽고, 하이브리드(Hybrid)효과를 얻을 수 있어서 그 응용이 날로 확대되고 있는 첨단신소재이다.[1,2]

현재는 이 첨단신소재를 개발하기 위하여 세계의 각국에서 치열한 개발경쟁을 벌리고 있으며, 그중 많은 판을 접착시켜 두꺼운 소재를 얻는 응용기술이 개발되었다. 이 응용기술에 기초하여 1978년에 아라미드강화에폭시(Aramid-fiber Reinforced Epoxy)에 고강도 알루미늄합금을 하이브리드(Hybrid)시킨 복합소재가 만들어져, 네덜란드 Delft 기술대학의 Vogelesang이 이것을 최적화했다. Delft 기술대학과 공동으로 Fokker는 얇은 판재의 접합으로 만들어진 많은 적층판소재가 단순판소재와 비교할 때, 우수한 피로균열성장 저항성과 더 큰 파괴인성을 가진다고 보고를 하였다. 70년대 중반, Fokker는 접착층에 고강도섬유를 결합시킴으로써 피로균열성장저항성을 얻을 수 있음을 발견하였으며, 이 재료를 섬유강화금속적층재(纖維強化金屬積層材, FR-MLs, Fiber Reinforced Metal Laminates)라고 명명하였다. 접착층이 균열성장에 대해 장애물을 형성하기 때문에 근접한 판재로 관통균열이 성장할 수 없다. 이 복합재료에서는 느린균열 성장율과 더불어 응력확대치가 적층소재에서 점차 감소유지된다. 위에서 언급한 피로균열저항의 향상은 금속층의 피로균열성장을 효과적으로 방해하는 섬유의 균열-브리징 효과(Crack-Bridging Effect)에 기인한다.[3]

여기서 적층(Laminates)을 한 목적은 알루미늄 합금과 섬유-수지(Fiber-Resin)복합재료의 각기 다른 단점을 보완시키고 장점을 살리기 위함이다. 즉, 알루미늄 합금의 역할은 정적 하중 하에서 FRMLs의 기계적 성질을 결정하며, 아울러 습기, 열, 충격 등의 환경적인 영향으로부터 섬유-수지부를 보호하며, 고강도 섬유의 주된 역할은 섬유강화방향으로 인장 강도를 향상시키고, 피로균열선단 후방부에서 브리지(Bridge)역할을 하여 균열전진속도를 저하시켜 피로특성을 향상시킨다.[3-7]

본 연구는 항공기용으로 개발된 FRMLs을 일반구조물에 응용할 수 있도록 한 기초연구이다. 여기서 사용한 재료는 직물 형태의 Kevlar 49와 Glass 섬유를 강화한 에폭시복합재료와 알루미늄 5052-H32를 하이브리드(Hybrid)시켜 FRMLs을 제작하였다. 이는 항공기용 단일방향 Kevlar 49를 강화한 에폭시복합재료와 고강도 알루미늄합금 2024-T3과 7075-T6을 대체한 것이며, 또한 경화공정시 Autoclave대신에 Hot-Press을 사용하였다.

현재 섬유강화복합재료의 강화재(reinforcement)로 쓰이고 있는 脆性纖維의 대부분은 인장강도의 변이성(variability)이 상당히 크게 나타나고 있으며, 변동계수(C.V.=(표준편차/평균강도)×100%)가 보편적으로 5%~25%로 나타난다. 본 연구는 이러한 강화섬유의 상당히 큰 변이성을 고려하여, FRMLs의 인장강도를 통계적으로 해석하고자 한다.[8]

## II. 통계적 해석

### II-1. 확률분포함수

본 연구에서 Table 1과 같은 確率分布函數(Probability Distribution Function)를 사용하였으며, 累積分布函數(Cumulative Distribution Function)는 Table 2와 같다.[9,10]

Table 1 Probability Distribution Function

Distribution	Probability Density Function, f(x)	Range of x
Normal	$\frac{1}{\sqrt{\pi} \sigma} \exp \left[ -\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right]$	$-\infty < x < \infty$
Log-Normal	$\frac{1}{\sqrt{\pi} \sigma x} \exp \left[ -\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right]$	$0 < x < \infty$
Weibull	$\frac{bx^{b-1}}{a^b} \exp \left[ -\left(\frac{x}{a}\right)^b \right]$	$x_0 \leq x \leq \infty$

Distribution	Expected Value, E(x)	Variance, $\sigma^2$	Comments
Normal	$\mu$	$\sigma^2$	$-\infty < \mu < \infty; \sigma > 0$
Log-Normal	$\exp(\mu + \sigma^2/2)$	$\exp(2\mu + 2\sigma^2) - \exp(2\mu + \sigma^2)$	$-\infty < \mu < \infty$
Weibull	$a\Gamma(1+1/b)$	$a^2[\Gamma(1+2/b) - \Gamma^2(1+1/b)]$	$\Gamma(\cdot)$ = Gamma Function a = Scale Parameter b = Shape Parameter

Table 2 Cumulative Distribution Function

Distribution	Cumulative Distribution Function, F(x)
Normal	$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt = \int_{-\infty}^x Z(t) dt,$ $Z = \frac{(X-\mu)}{\sigma}, \quad Z(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-x^2/2}$
Log-Normal	$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\ln x} e^{-t^2/2} dt = \int_{-\infty}^{\ln x} Z(t) dt,$ $Z = \frac{(\ln X - \mu)}{\sigma}, \quad Z(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-x^2/2}$
Weibull	$F(x) = 1 - \exp \left[ -\left(\frac{x}{a}\right)^b \right],$ a = Scale parameter, b = Shape Parameter

### II-2. K-S 적합도검정

(Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness-of-Fit)

적합도검정이란 실험을 통하여 얻어진 자료가 가정한 분포의 모집단에 적합한가를 검정하는 방법이다. 본 연구에서 사용한 3가지 분포와 인장강도 실험결과에 대한 적합도검정(Goodness-of-Fit)을 하기 위해서 여러 방법을 이용할 수 있다. 그 중에서 카이제곱(Chi-Square,  $\chi^2$ )검정과 Kolmogorov-Smirnov검정이 적합도검정으로 가장 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 카이제곱검정보다 효과적이라고 보고되는 Kolmogorov-Smirnov검정(K-S 검정)을 이용하여 적합도검정을 수행하였다.[9,10,11] K-S 검정을 Fig. 1과 같은 방법으로 수행한다. 만약 가정한 분포들이 모두 채택되었다면, 그 중에서 가장 작은  $D_N$ 을 가지는 분포가 실험자료가 가정한 분포에 적합하다.

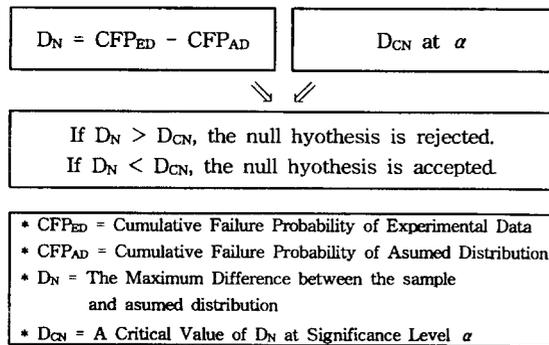


Figure 1 Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness-of-fit

### II-3 2-모수 Weibull분포의 모수추정

2-모수 Weibull분포의 모수를 추정하기 위하여 Talreja[12]가 제안한 Maximum Likelihood Method를 이용하였다. 중단 실험을 하지 않은 전 표본(Complete Sample)실험에서 얻은 강도에 대한 Weibull 형상모수(Shape Parameter) b와 규모모수(Scale Parameter) a를 추정하기 위한 Maximum Likelihood Equation은 Table 3과 같다.

Table 3 Maximum Likelihood Equation

Maximum Likelihood Equation	
Shape Parameter b	$\frac{1}{b^*} - \frac{\sum x_i^{b^*} \ln x_i}{\sum x_i^{b^*}} + \frac{\sum \ln x_i}{N} = 0$
Scale Parameter a	$a^* = \left[ \frac{\sum x_i^{b^*}}{N} \right]^{1/b^*}$

### III. 실험

#### III-1. 섬유강화복합소재(FRMLs) 제작

본 연구에서 섬유강화복합재료로 한국화이버(Han Kuk Fiber)에서 생산한 반경화상태의 Kevlar 49 및 Glass-Epoxy Resin Prepreg를 사용하였고, 금속재료는 알루미늄 5052-H32(두께 0.6 mm)를 사용하였다. Fig. 2와 같은 공정을 통해 FRMLs를 제작하였다. 본 논문에서 Kevlar 49 섬유로 강화한 FRMLs를 FRMLs(K)로, Glass 섬유로 강화한 FRMLs를 FRMLs(G)로 하였다.

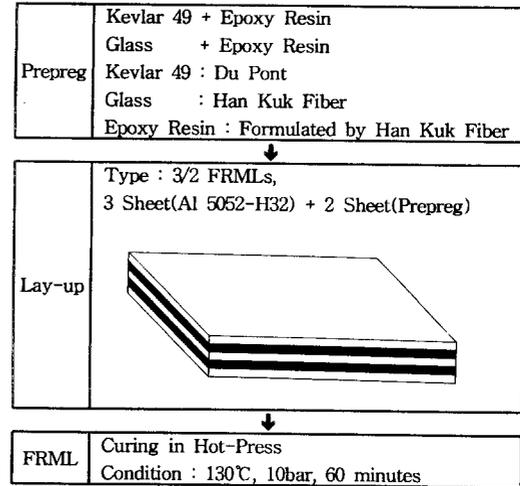


Figure 2 Manufacturing Process of FRMLs

#### III-2. 인장시편 제작 및 실험

통계적으로 신뢰할 수 있는 데이터를 얻기위해 본 실험에서는 Al 5052, FRMLs(K) 및 FRMLs(G)를 각각 50개씩 인장시편을 제작하였다. (시편규격 : ASTM E 577M-84, Fig. 3)

인장실험은 만능인장시험기(Universal Tensile Machine, Shimadzu DSS-10T)를 이용하였으며 Cross-Head Speed는 2mm/min으로 했다.

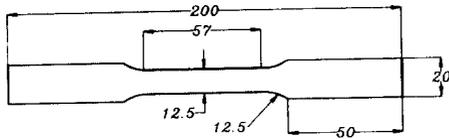
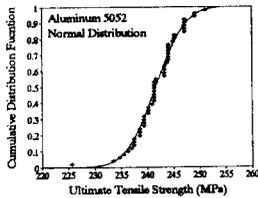


Figure 3 Tension Test Specimen with 50mm Gage Length (Dimension mm)

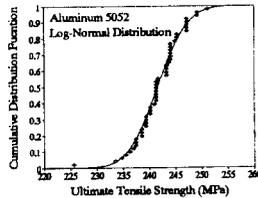
## IV. 실험결과 및 고찰

### IV-1. 적합도 검증

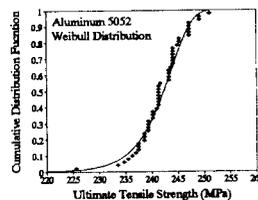
주어진 표본에 대해 평균순위법(Mean Rank)  $F(x) = i/(n+1)$ 에 기초하여 누적파단확률을 계산하여 누적분포함수의 표본분포와 정규, 대수-정규, Weibull분포결과를 비교하였다. Fig. 4, 5, 6은 Al 5052, FRMLs(K), FRMLs(G)의 인장강도에 대한 누적분포함수로서 가로축은 인장강도, 세로축은 누적분포함수를 나타낸다. Fig. 7은 Al 5052, FRMLs(K), FRMLs(G)의 정규, 대수-정규, Weibull분포에 기초한 파손확률로서 가로축은 인장강도, 세로축은 파손확률을 나타낸다.



(a) Normal Distribution



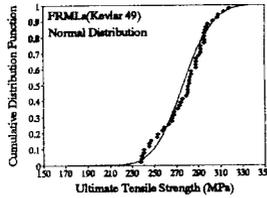
(b) Log-Normal Distribution



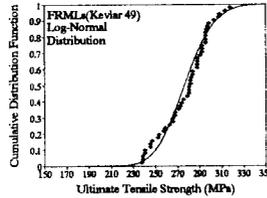
(c) Weibull Distribution

Figure 4 C.D.F.

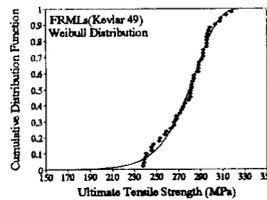
in Aluminum 5052



(a) Normal Distribution



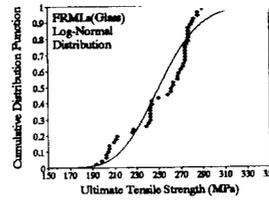
(b) Log-Normal Distribution



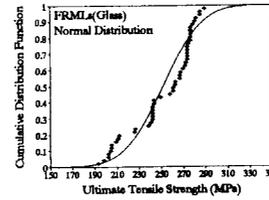
(c) Weibull Distribution

Figure 5 C.D.F.

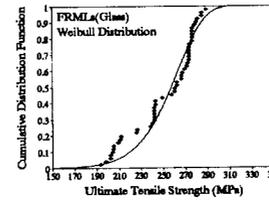
in FRMLs(Kevlar 49)



(a) Normal Distribution



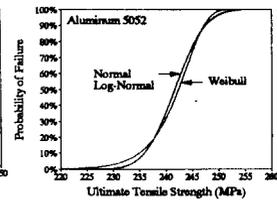
(b) Log-Normal Distribution



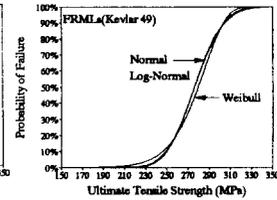
(c) Weibull Distribution

Fig. 6 C.D.F

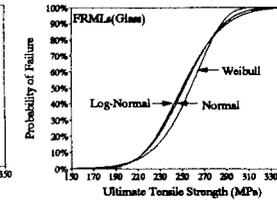
in FRMLs(Glass)



(a) Aluminum 5052



(b) FRMLs(Kevlar 49)



(c) FRMLs(Glass)

Fig. 7 Probability of Failure

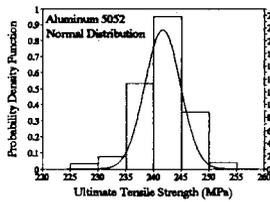
Fig. 8, 9, 10은 Al 5052, FRMLs(K), FRMLs(G)의 인장강도의 분포함수에 대해 히스토그램과 관련시킨 인장강도의 확률밀도함수(Probability Density Function)를 나타내었다. Fig. 11는 Al 5052, FRMLs(K), FRMLs(G)의 인장강도의 확률밀도함수(Probability Density Function)이다. 이러한 분포의 K-S 검정 결과치가 모두 95% 신뢰구간 즉, 유의수준  $\alpha = 0.05$ 에서 임계치  $D_{CN} = 0.1923$ 보다 작으므로 가정한 각각의 분포에 적합하다는 가설검정을 채택하였다. Table 4에 나타낸 Kolmogorov-Smirnov 검정 통계량의 계산 결과를 고찰해 보면, Al 5052는 정규분포의  $D_N$ 이 대수정규와 Weibull분포보다 작으므로 정규분포가 인장실험결과를 나타내는데 가장 적합하다. FRMLs(K)와 FRMLs(G)의 경우에 Weibull분포의  $D_N$ 이 정규, 대수-정규분포보다 작으므로 인장실험결과를 나타내는데 Weibull 분포가 가장 적합함을 알 수 있다. 따라서 FRMLs의 통계적 해석을 위해 앞으로 FRMLs의 시편에 대해 Weibull 해석으로 실험결과치를 분석하고자 한다.

Table 4. Result of the Kolmogorov-Smirnov Statistics Test

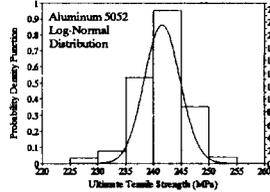
Specimen	Normal	Log-Normal	Weibull
Aluminum 5052	0.0733	0.0754	0.1129
FRML(Kevlar 49)	0.1141	0.1276	0.0642
FRML(Glass)	0.1559	0.1619	0.1108

Gage Length 50mm

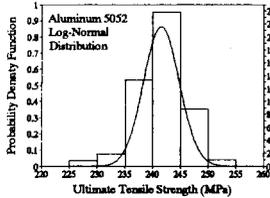
$D_{CN} = 0.1923$



(a) Normal Distribution



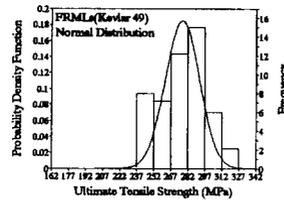
(b) Log-Normal Distribution



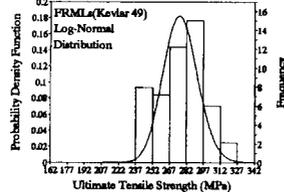
(c) Weibull Distribution

Fig. 8 K-S Tests  
for Al 5052

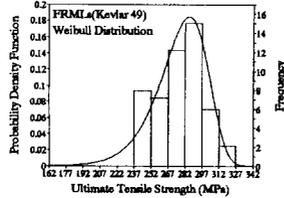
Average = 241.64 MPa  
Standard Deviation = 0.46



(a) Normal Distribution



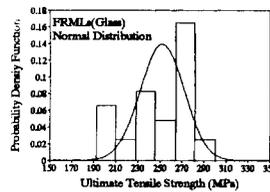
(b) Log-Normal Distribution



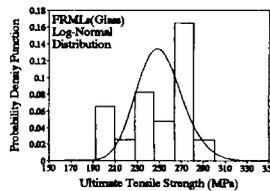
(c) Weibull Distribution

Fig. 9 K-S Tests  
for FRMLs(Kevlar 49)

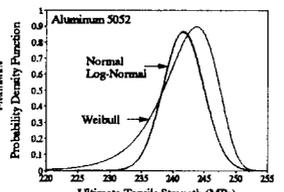
Average = 277.06 MPa  
Standard Deviation = 2.16



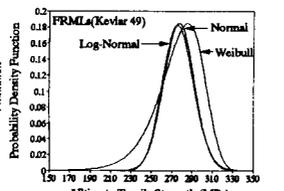
(a) Normal Distribution



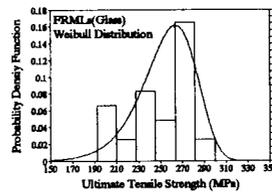
(b) Log-Normal Distribution



(a) Aluminum 5052



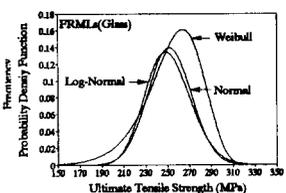
(b) FRMLs(Kevlar 49)



(c) Weibull Distribution

Fig. 10 K-S Tests  
for FRMLs(Glass)

Average = 281.12 MPa  
Standard Deviation = 2.87



(c) FRMLs(Glass)

Fig. 11 Probability Density  
Function

## IV-2. 2-모수 Weibull 분포의 모수추정

FRMLs의 강도분포에 대한 2-parameter Weibull분포 모수추정은 Fig. 12와 같이 수행했다. 2-parameter Weibull 분포의 각각의 parameter를 추정하기 위한 Maximum Likelihood Equation(MLE)를 풀기 위해서 Newton-Raphson Method를 이용하였으며, 반복계산 수행의 초기 추정치는 Least Square Analysis(LS)로부터 구한 각각의 parameter값을 초기치로 사용하여 방정식을 풀었다. 해석의 결과는 Fig 13과 같다.

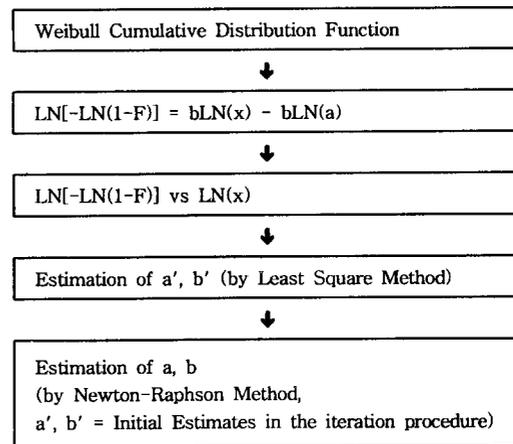
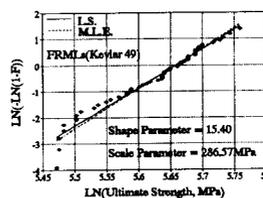
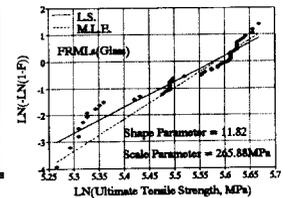


Figure 12 Estimation of Shape and Scale Parameters in 2-parameter Weibull Distribution Function



(a) FRMLs(Kevlar 49)



(b) FRMLs(Glass)

Figure 13 Weibull Plot for the Ultimate Tensile Strength

## V. 결론

섬유강화고속적층재(FRMLs)에 적합한 통계적 분포를 찾기 위해, 알루미늄 5052와 비교하여 Kevlar 49 섬유강화고속적층재 및 Glass 섬유강화고속적층재의 실험 및 통계적 평가를 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Kolmogorov-Smirnov 적합도검정결과, Al 5052는 정규분포에, FRMLs(K), FRMLs(G)는 Weibull분포로 해석하는 것이 적합함을 보였다.
2. 본 실험결과와 데이터에서 Al 5052의 경우, 표준편차가 0.46인데 비해, FRMLs(K)와 FRMLs(G)가 각각 2.16, 2.87로 크게 나타났다. 이는 본 연구에서 사용한 취성섬유 Kevlar 49와 Glass 섬유의 상당히 큰 변동계수(C.V.)에 기인한다.
3. Histogram상에서 Al 5052는 대칭형 분포인 정규, 대수-정규 분포가 적합함을 알 수 있었다. 이에 반해, FRMLs(K), FRMLs(G)의 경우 비대칭형인 Weibull분포가 적합함을 알 수 있었다.
4. FRMLs의 와이불분포해석 결과에서 볼 수 있듯이, FRMLs(K)의 형상모수(Shape Parameter)와 규모모수(Scale Parameter)가 FRMLs(G)의 것보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 형상모수가 크다는 것은 파손될 확률이 적다는 것을 의미하고, 규모모수가 크다는 것은 강도가 더 크다는 것을 의미한다.

## 참고문헌

1. P.K. Mallick, Fiber-Reinforced Composites, Materials, Manufacturing, and Design, Marcel Dekker Inc., 1988.
2. Krishan K. Chawla, Composite Materials, Springer-Verlag, New York Inc., 1987.
3. Glyn Lawcock, Lin Ye, and Yiu-Wing Mai, "Novel Fiber Reinforced Metal Laminates for Aerospace Applications", SAMPE Journal, Vol. 31, No. 1, pp. 23-31, 1995.
4. T. O. Williams, and M. J. Pindera, "The Effect of Mechanical Prestrain on the Creep Response of ARALL 4 Laminates", Journal of Composite Materials, Vol. 25, pp. 302-331, 1991.
5. R. Marissen, "Fatigue Crack Growth Predictions in Aramid Reinforced Aluminium Laminates (ARALL)", ICAS and AIAA, pp. 801-807, 1986.
6. R. O. Ritchie, Weikang Yu, R. J. Bucci, "Fatigue Crack Propagation in ARALL Laminates : Measurement of The Effect of Crack-Tip Shielding from Crack Bridging", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 32, No. 3, pp. 361-377, 1988.
7. R. Marissen, "Flight Simulation Behaviour of Aramid Reinforced Aluminium Laminates (ARALL)", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 19, No. 2, pp. 261-277, 1984.
8. H. Daniel Wanger, "Statistical Concepts in the Study of Fracture Properties of Fibres and Composites", Application of Fracture Mechanics to Composite Materials, Elsevier Science Publishers, 1989.

9. Mann. N. R., R. E. Schafer and N. D. Singpurwalla, Method for Statistical Analysis of Reliability and Life Data. New York : Wiley-Interscience (1974).
10. Irwin Miller, John E. Freund, Richard A. Johnson, "Probability and Statistics for Engineers", 4th ed. Prentice-Hall International Editions (1990)
11. Wayne W. Dadiel, "Applied Nonparametric Statistics", 2nd ed, PWS-KENT Publishing Company, 1990.
12. Talreja, Ramesh, "Estimation of Weibull Parameter for Composite Material Strength and Fatigue Life Data", Fatigue of Fibrous Composite Materials, ASTM STP 723, American Society for Testing and Materials, pp. 291~311, 1981.