

Al 2024-T3 판에 AFRP를 접착한 복합재료의 인장강도에 대한 통계적 특성

윤한기* · 안원기** · 허선철***

(1999년 10월 13일 접수)

Statistical Properties for Tensile strength of Composite Materials Patched with AFRP on 2024-T3 Aluminum Alloy plate

Han-Ki Yoon, Won-Ki An and Sun-Chul Huh

Key Words: APAL(알루미늄판에 아라미드섬유를 접착한 복합재료), AFRP(아라미드 섬유강화 복합재료), Tensile Strength(인장강도), Two-Parametric Weibull Distribution(2모수 와 이블 분포)

Abstract

A hybrid composite APAL(Aramid Patched Aluminum alloy), consisting of Al 2024-T3 aluminum alloy plate sandwiched between two aramid/epoxy laminates, was developed. The characteristics of tensile strength were investigated and statistical properties of tensile strength were studied in terms of Weibull distribution probability with number of AFRP laminates. The tensile strength of APAL was inproportional to number of AFRP laminates and followed the two-parametric Weibull distribution.

1. 서론

복합재료(Composite Materials)는 두 가지 이상의 성질이 서로 다른 물질을 결합하여 성형함으로써 단독 재료를 사용해서는 나타낼 수 없는 그 재료의 우수한 성질을 얻을 수 있는 재료를 말한다. 이러한 복합재료 중 항공기 구조물의 경량화 및 결합 부위의 보강을 위한 목적으로 적층순서와 섬유방향, 다양한 모재와 섬유의 종류를 변화시킴으로써 우수한 기계적 성질 및 열적 성질의 특성조절이 쉽고, 하이브리드 효과를 얻을 수 있는 적층 형태의 하이브리드 복합재료에 대한 연구^(1,2)가 다양하게 시도되고 있다.

적층형 하이브리드 복합재료는 복합재-복합재(Composite to Composite : C/C) 및 복합재-금속재(Composite to Metal : C/M)로 대별되는데, 후자의 C/M 형태에 대한 연구는 최근 관심을 받는 분야로서, 오 등⁽³⁾은 Al 2024-T3 판에 아라미드/에폭시 프리프랙을 접착한 APAL재를 제작하고, 피로균열전파거동에 미치는 접착방법과 응력비의 영향을 조사하였고, 윤 등⁽⁴⁾은 알루미늄 합금 판에 FRP 라미네이터를 보강한 APAL 및 CPAL 재의 균열전파속도 거동을 고찰하였다.

한편, 실제 고체의 파괴강도와 이상적 파괴강도와의 사이에는 큰 차이가 존재하고, 그 차이를 설명하기 위하여 그리피스(Griffith) 균열⁽⁵⁾에 의한 실제 고체의 파괴모델이 제안되었다.

이와같이 현실적인 재료강도를 좌우하는 것은 재료조직 내에 존재하는 고유의 초기결함이라고 하는 불완전성이고, 그것이 재료강도를 불확정하게 하고 있기 때문에 재료강도를 확률변수로 인식해야 한다. 뿐만 아니라, 재료강도의 측정치

* 회원, 동의대학교 기계공학과
E-mail : hkyoon@hyomin.dongueui.ac.kr
TEL : (051)890-1642 FAX : (051)890-1619
** 지세포 중학교
*** 회원, 경상대학교 수송기계공학과

는 일정치로 나타나지 않고 반드시 분포를 가진다. 재료강도가 분포를 갖는 원인은 시험편, 시험기의 준비, 조정의 잘못, 시험기술의 우열 등에 기인하는 실험오차에 의한 것도 있으나 이들의 외에도 재료강도의 분포에 영향을 주는 인자가 많으므로 재료강도의 평가에는 반드시 확률·통계적인 접근 방법이 필요하다.

이와 관련된 연구로서 김 등⁽⁶⁾은 탄소섬유강화 복합재료(CFRP)에 대해서 인장시험 및 파괴인성시험을 행하고, 적층방법에 따른 인장강도의 분포특성과 온도변화에 따른 파괴인성치의 확률분포를 검토하였으며, 下河 등⁽⁷⁾은 카본/폴리아미드 복합재료의 인장강도에 대한 통계적 특성을, 황 등⁽⁸⁾은 유리섬유 강화 에폭시 복합재료의 파괴강도와 피로수명을 다양한 분포함수에 접근시켜 실험결과와 비교하였으나, 알루미늄에 FRP를 적층한 하이브리드 복합재료의 정적 및 피로강도에 대한 통계적 특성 평가는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 AI/FRP 적층형 하이브리드 복합재료의 정적 및 피로강도에 대한 통계적 접근법의 시도로서 아라미드/에폭시 프리프랙을 AI 2024-T3 시험편에 접착한 APAL재를 제작하고 인장시험을 행한 후, 이를 통계적 평가방법인 와이블 분포(Weibull distribution) 이론을 적용하여 적층수 및 적층방향에 따른 APAL재의 통계적 특성을 연구하였다.

2. 이론적 배경

2.1 Weibull 분포

Weibull이 제안한 최약링크모델(Weakest link model)⁽⁹⁾은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 강도가 x

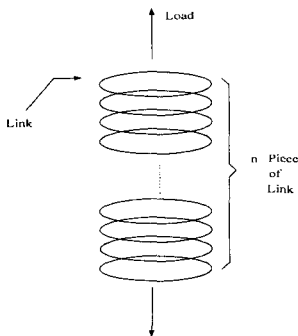


Fig. 1 Weakest link model of Weibull distribution

인 n개의 고리(link)로 된 사슬을 생각하고, 이 사슬의 강도는 가장 약한 고리의 강도에 의해 결정되며, 이러한 생각을 큰 재료의 강도에 연장하여 적용한 것이다.

따라서 최약링크설의 적용은 다음과 같은 가정하에서 전개된다.

가정 : 재료는 통계적으로 균일하며, 임계결함에 의한 파괴는 전체의 파괴를 가져온다.

위와 같은 가정으로부터 가장 약한 강도를 지닌 고리를 결함이라고 생각하고, n개의 결함(고리)을 갖는 재료의 파괴가 일어날 확률은 다음과 같다.

1개의 고리일 때, $F_1(x)$ 은 x의 응력하에서 파괴가 일어날 확률이고, $1-F_1(x)$ 은 x의 응력하에서 파괴가 일어나지 않을 확률이다.

따라서 n개의 고리일 때, x의 응력하에서 파괴가 일어날 확률은 $F_n(x)=1 - (n개의 고리중 파괴가 일어나지 않을 확률)$ 이라 할 수 있다.

그러므로 중첩법칙에 의하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F_n(x) = 1 - \{1 - F_1(x)\}^n \quad (1)$$

$$1 - F_n(x) = \{1 - F_1(x)\}^n \quad (2)$$

만약, n값이 충분히 크다면

$$1 - F_n(x) = \{1 - F_1(x)\}^n = \exp\{-nF_1(x)\} \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있다. $F_1(x)$ 은 1개의 고리일 때의 함수이며 고리 개수와는 무관하다.

또한 고리의 수는 재료의 체적에 비례하므로 식 (3)은

$$F_n(x) = 1 - \exp\{-V\phi(x)\} \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. $F_n(x)$ 를 $P(f)$ 로 고치면

$$P(f) = 1 - \exp\{-V\phi(x)\} \quad (5)$$

로 된다.

식 (4), (5)에서 $\phi(x)$ 는 미지함수이나 Weibull은 $\phi(x)$ 을 다음과 같은 실험식으로 나타내었다.

$$\phi(x) = \left\{\frac{x}{b}\right\}^m \quad (6)$$

여기서 x : 작용응력

m : 형상모수(shape parameter)

b : 척도모수(scale parameter)

따라서 x의 응력을 가할 때 파괴가 일어날 확률은

$$P(f) = 1 - \exp\left[-V\left\{\frac{x}{b}\right\}^m\right] \quad (7)$$

과 같다. 식 (7)의 양변에 log를 두 번 취하면

$$\ln \ln[1/(1 - P(f))] = \ln V + m \ln x - m \ln b \quad (8)$$

가 된다. 이때, $\ln x$ 와 $\ln \ln[1/(1 - P(f))]$ 를 plot하면

Table 1 Chemical compositions of Al 2024-T3 aluminum alloy (wt.%)

| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | Al |
|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 0.11 | 0.23 | 4.46 | 0.58 | 1.44 | 0.04 | 0.03 | 0.02 | Bal |

Table 2 Mechanical properties of Al 2024-T3 aluminum alloy

| Yield strength (MPa) | Tensile strength (MPa) | Elongation (%) | Hardness (Hv) | Density (g/cm ³) |
|----------------------|------------------------|----------------|---------------|------------------------------|
| 340 | 475 | 18.3 | 146.5 | 2.8 |

직선이 되며, 그 기울기가 m이다.

여기에서 파괴될 확률 P(f)는 N개의 시편 중에서 x의 응력하에서 n개가 파괴되면 $P(f)=n/(N+1)$ 이 되며, 일반적으로 m이 감소할수록 더욱 취성적인 재료임을 나타낸다.

3. 시험편 및 실험방법

본 연구에 사용한 하이브리드 복합재료는 Al 2024-T3 판재의 측면에 아라미드 섬유강화 복합재료(이하 AFRP Aramid Fiber Plastic)를 보강한 형태이며, 아라미드/에폭시 프리프랙(aramid/epoxy prepreg)을 측면에 부착하고 큐어링(curing)하여 접합한 것이다.

이 재료를 편이상 AFRP/Aluminum 하이브리드 복합재료 APAL(Aramid Patched Aluminum alloy) 재료 명명하였다.

APAL의 제작에 사용한 Al 2024-T3 판재의 화학적 성분은 Table 1, 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.

아라미드/에폭시 프리프랙은 (주)한국화이버에서 제조한 제품명 HK285/RS1222이다.

프리프랙은 FRP 제품의 원자재처럼 취급되는 성형의 기본 반제품이며, 완성된 프리프랙 테이프(prepreg tape)의 두께는 약 0.3mm 이다.

AFRP의 물성치는 아라미드/에폭시 프리프랙을 다층으로 부착하고 Al 2024-T3 판재에 접착할 경우와 동일한 조건으로 큐어링하여 순수 AFRP를 제작하고 측정하였다.

접착공정은 준비된 프리프랙을 적층한 후 Fig. 2와 같은 오토클레이브(autoclave)에서 성형하였다. 성형조건은 Fig. 3과 같이 오토클레이브 내부에 압력을 2kg/cm²으로 유지한 상태에서 1.5°C/min

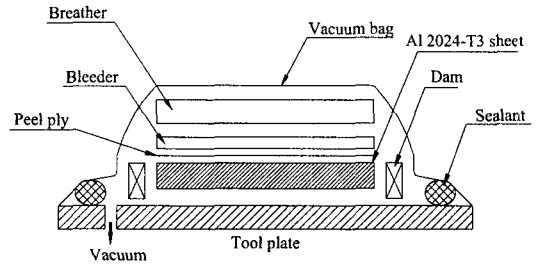


Fig. 2 Schematic illustration of bagging system

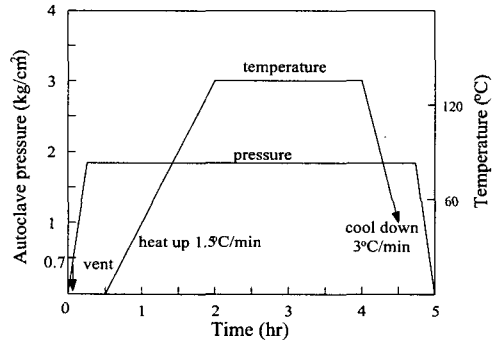


Fig. 3 Diagram of autoclave curing procedure

Table 3 physical properties of aramid/epoxy prepreg (HK 285/RS 1222)

| | |
|--------------------------|------------------------|
| Density | 1.35 g/cm ³ |
| Volatile content | 0.28 % |
| Fiber content | 52.17 % |
| Resin flow (at 0.35 MPa) | 28.72 % |
| Gel time (at 135±1°C) | 4 min 48 sec |

Table 4 Mechanical properties of aramid/epoxy laminate (HK 285/RS 1222)

| Fiber pattern | Warp(0°) | Fill(90°) | ±45° |
|-----------------------------|--------------------|--------------------|-------|
| Properties | (MPa) | (MPa) | (MPa) |
| Tensile strength | 567.50 | 512.41 | - |
| Tensile modulus | 30×10 ³ | 31×10 ³ | - |
| Compression strength | 224.14 | 227.59 | - |
| Compression modulus | 29×10 ³ | 29×10 ³ | - |
| Flexural strength | 513.79 | 510.35 | - |
| Interlaminar shear strength | 63.45 | - | - |

의 승온속도로 127°C까지 130분 동안 큐어링하고, 성형이 완료된 후 시편의 휨을 방지하기 위해 압력을 유지한 상태에서 3°C/min의 냉각속도로 서서히 상온까지 냉각하였다.

Table 3은 아라미드/에폭시 프리프랙의 물리적

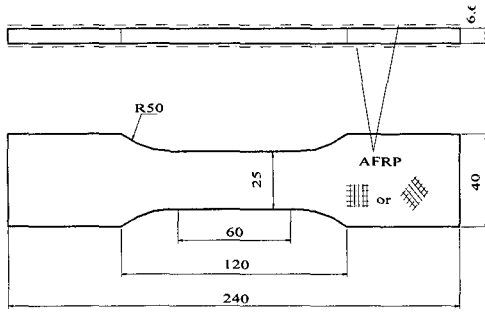


Fig. 4 Configuration of tensile specimen for APAL materials

성질을 Table 4는 기계적 특성을 나타낸 것이다. Fig. 4는 APAL재의 인장시험편의 형상과 치수를 나타낸 것이다.

두께 6.6mm인 AI 2024-T3 판재를 L-T 방향으로 채취하여 각각의 시험편 형태로 가공 및 접착하여 AFRP/Aluminum 하이브리드 복합재료 APAL재를 제작하였다.

실험에 사용한 APAL재 시험편의 종류는 AFRP의 경사(warp) 방향이 하중 방향(0°)인 종류 APAL-0/90재 및 경사 방향과 위사(fill) 방향이 하중 방향에 각각 ±45°인 APAL±45°재, 또 AI 2024-T3시험편의 단일면에 접합한 APAL-SS(Single Side)재 및 양면에 접합한 APAL-DS(Double Side)재, 그리고 1층으로 접합한 APAL-1P재 및 2층으로 접합한 APAL-2P재 등으로 구분하였다.

APAL재의 인장강도는 ASTM D 3039 규정¹⁰⁾을 참고하여 시험하였으며, 각 조건당 10개의 시험편을 실험하고 결과값을 평균하여 인장강도를 결정하였다. 정적인장은 변위제어모드로 실시하였으며, 크로스헤드 속도는 0.5mm/min이었다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 5은 AFRP 라미네이트 적층방위(±45°, 0°/90°), 적층수 및 적층면(DS, SS)에 따른 APAL재의 인장실험의 결과를 나타낸 것으로, 각 레벨당 10개의 시험편을 사용하여 그 평균값으로 APAL재의 인장강도를 결정하였다.

그림에서 알 수 있듯이 APAL재의 인장강도는 알루미늄 모재에 비해 높은 강도를 가지고 있고, AFRP 라미네이트 적층수가 많을수록 증가하고 있으며 APAL-0/90재가 APAL±45°재보다 인장강도가 높다.

이와 같이 APAL재의 인장강도가 증가하는 것은 AI 2024-T3 판재에 접착된 AFRP 라미네이트

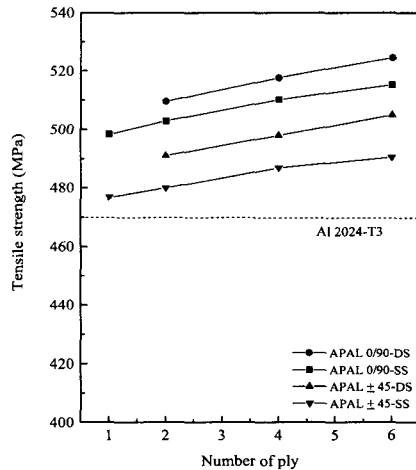


Fig. 5 Tensile strength according to number of AFRP laminates in APAL materials

가 AI 2024-T3 판재에 작용하는 하중의 일부를 분담하기 때문이며, 적층수가 늘어날수록 그 분담력이 증대된 결과이다.

또, 적층방위 0°/90°의 AFRP 라미네이트는 ±45°보다 인장강도가 높기 때문에 APAL 0/90재의 저항력이 APAL±45°재보다 더욱 증대된 것이다. 또한 알루미늄의 단일면에 접착한 APAL-SS(Single Side)재보다도 양면에 접착한 APAL-DS(Double Side)재의 인장강도가 높게 나타나 알루미늄의 양면에 AFRP 라미네이트를 접착하는 것이 더 효과적인 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 AI 2024-T3 판재에 2개의 AFRP 라미네이트를 적층한 APAL재의 인장강도의 분포를 AFRP 라미네이트 적층방위(±45°, 0°/90°)에 따라 Weibull 확률지에 플롯한 것이다.

인장강도의 분포는 Weibull 확률지 상에 거의 직선으로 나타났으며 이와 같은 분포상태가 Weibull 분포에 적합함을 알아보기 위하여 Kolmogorov-Smirnov 검정(K-S 검정)¹¹⁾을 시도하였다.

즉, 인장강도의 데이터를 $x_1 < x_2 < x_3 \dots < x_n$ 의 형태로 순차적으로 배열해 놓은 뒤 실제분포의 누적분포함수와 이론분포의 누적분포함수의 차이는 APAL±45°SS재에서 D_N 이 0.065이며 APAL±45°DS재에서는 0.048, APAL-0/90SS재는 0.082, APAL-0/90DS재는 0.074로서 90% 신뢰구간 즉, 유의수준 $\alpha = 0.1$ 에서 임계치 $D_{CN} = 0.369$ 보다 작으므로 APAL재의 인장강도의 분포는 2모수 Weibull 분포에 적합하다고 할 수 있다.

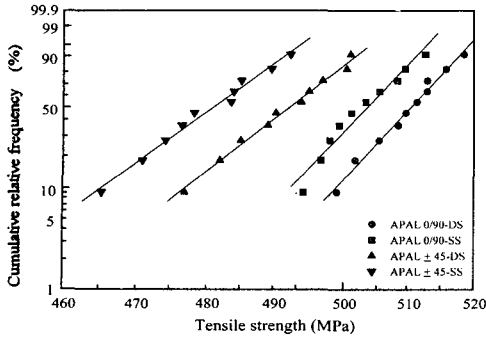


Fig. 6 Weibull distribution of APAL materials according to direction of AFRP laminates

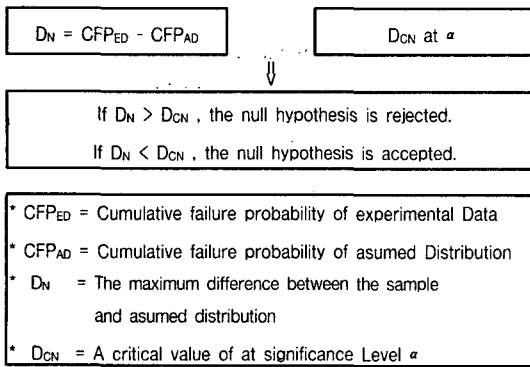


Fig. 7 Kolmogorov-Smirnov test for Goodness-of-fit

Fig. 7는 K-S에 의한 적합도 검정절차를 나타낸 것이다.

Table 5는 Fig. 6에서 구한 와이블 분포의 두 모수 및 K.S(kolmogorov smirnov) 검정결과를 나타낸 것이다.

Fig. 8과 Fig. 9는 APAL-0/90 SS재 및 DS재에 대해서 AFRP 라미네이트 적층수에 따른 인장강도의 분포를 Weibull 확률지에 플롯한 것이다.

그림에서 보듯이 인장강도의 분포는 2모수 Weibull 분포를 잘 따르고 있으며 적층수가 증가함에 따라 인장강도가 증가함으로써 Weibull 분포곡선은 오른쪽으로 이동하고 있다.

2모수 Weibull 분포는 2개의 모수를 가지고 있으며, 이중 형상모수(shape parameter)는 강도의 변동을 나타내는 계수로서 일반적으로 재료정수로 취급하는 경우가 많다.

Table 5 The values of Weibull parameters and K-S testing ($\alpha = 0.1$)

| Materials | Weibull parameter | | D_N | D_{CN} |
|-------------------|-------------------|--------|-------|----------|
| | m | b | | |
| APAL ± 45 -DS | 61.61 | 494.97 | 0.048 | 0.369 |
| APAL ± 45 -SS | 57.16 | 484.10 | 0.065 | 0.369 |
| APAL 0/90-DS | 84.79 | 512.55 | 0.074 | 0.369 |
| APAL 0/90-SS | 86.01 | 505.83 | 0.082 | 0.369 |

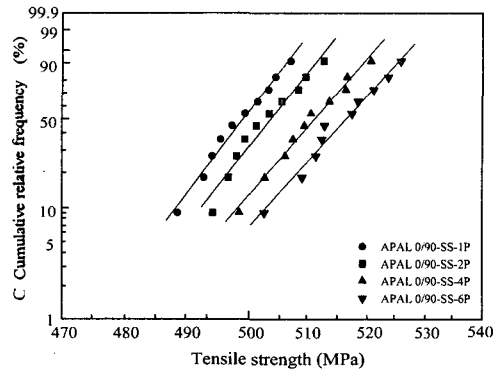


Fig. 8 Weibull distribution of APAL-0/90-SS according to number of AFRP laminates

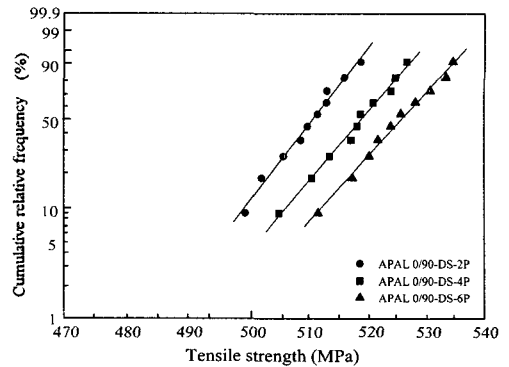


Fig. 9 Weibull distribution of APAL-0/90-DS according to number of AFRP laminates

또한 척도모수(scale parameter)는 강도의 크기를 결정하며, 본 연구에서는 두 모수를 상관관계수법⁽¹²⁾에 의해 구하였다.

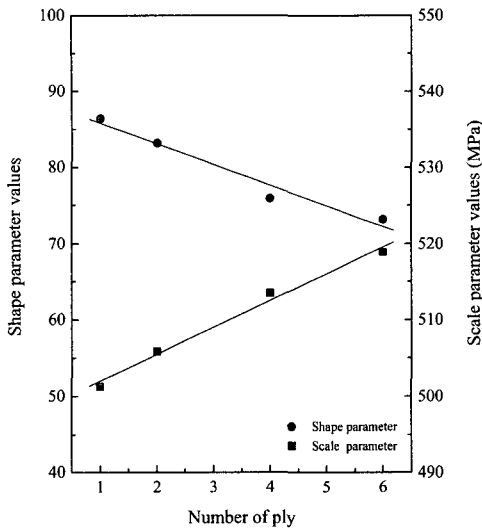


Fig. 10 Variation of Weibull parameters according to number of AFRP laminates in APAL-0/90 SS materials

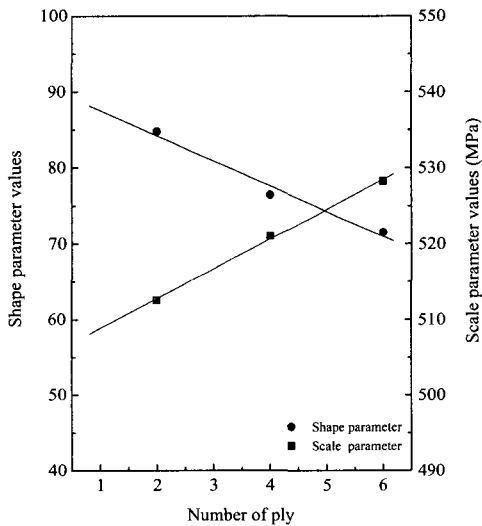


Fig. 11 Variation of Weibull parameters according to number of AFRP laminates in APAL-0/90 DS materials

Fig. 10과 Fig. 11은 APAL-0/90 SS재 및 DS재의 적층수에 따른 Weibull 분포곡선의 두 모수의

Table 6 Statistical properties of tensile strength (APAL-0/90-SS)

| Number of ply | 1 | 2 | 4 | 6 | |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Number of sample | 10 | 10 | 10 | 10 | |
| Mean value (MPa) | 498.42 | 502.95 | 510.18 | 515.34 | |
| Standard deviation | 5.81 | 5.99 | 6.77 | 7.07 | |
| Coefficient of variation (%) | 1.17 | 1.19 | 1.33 | 1.37 | |
| Weibull distribution parameter | m | 86.38 | 86.01 | 75.95 | 73.22 |
| | b | 501.25 | 505.83 | 513.47 | 518.89 |

Table 7 Statistical properties of tensile strength (APAL-0/90-DS)

| Number of ply | 2 | 4 | 6 | |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Number of sample | 10 | 10 | 10 | |
| Mean value (MPa) | 509.61 | 517.78 | 524.65 | |
| Standard deviation | 6.04 | 6.79 | 7.35 | |
| Coefficient of variation (%) | 1.19 | 1.31 | 1.40 | |
| Weibull distribution parameter | m | 84.79 | 76.43 | 71.56 |
| | b | 512.55 | 521.08 | 528.27 |

변화를 나타낸 것이다.

APAL-0/90 SS재 및 DS재 모두 척도모수의 값은 적층수의 증가와 더불어 상승하고 있으며, 형상모수는 이와 반대로 하강 경향을 보이고 있다. 이것은 형상모수가 와이블 분포곡선의 산포 및 기울기를 의미하고 있다고 한다면 적층수가 증가할수록 와이블 분포곡선의 산포는 증가하며 따라서 형상모수의 값은 낮아지고 있다.

Table 6과 7은 APAL-0/90 SS재 및 DS재의 통계적 특성치를 나타낸 것으로, 두 재료 모두 변동계수(Coefficient of variation)는 2% 이하로 인장강도의 평균값에 대한 편차가 적었으며 적층수가 증가할수록 변동계수의 값도 증가하고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 아라미드/에폭시 프리프랙을 A1 2024-T3 시험편에 접착한 APAL재를 제작하고 인장강도시험을 행한 후, 와이블 분포(Weibull distribution) 이론을 적용하여 적층수 및 적층방향에 따른 APAL재의 통계적 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) APAL재의 인장강도는 AFRP 라미네이트의 적층방위별로 적층수에 비례하여 증가하는 거동을 보였다.

(2) AFRP 라미네이트 적층방위에 따른 APAL재인장강도는 K-S 검정에 의해 확인된 결과 2모수 Weibull 분포를 잘 따르고 있었다.

(3) AFRP 라미네이트 적층수에 따른 인장강도의 Weibull 분포곡선은 적층수가 증가함에 따라 인장강도의 증가방향으로 이동하고 있다. 그리고 형상모수는 적층수에 따라 감소하며 척도모수는 증가하는 거동이 나타났다.

참고문헌

(1) Ritchie, R.O., Yu, W. and Bucci, R.J., 1989, "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.

(2) 芳我 攻, 小山 秀夫 外2人, 1992, "殘留應力制御によるAl/CFRPハイブリッド複合材料の疲勞特性改善," 日本材料學會論文集, 第41卷, 第464號, pp. 734~739.

(3) Oh, S.W, Yoon, H.K, Park, W.J, Lee, K.B and Hue, C.W, 1994, "The Effect of Bridging on Fatigue Crack Growth Behavior in Aramid Patched Aluminum Alloy(APAL)," *J. of KSME*, Vol. 8, No. 1, pp. 375~384.

(4) 윤한기, 정해용 外2人, 1995, "알루미늄 합금 판재에 FRP 라미네이트를 보강한 APAL 및 CPAL 재의 균열전파속도 거동," 대한기계학회 논문집, Vol. 19, No. 4, pp. 1013~1022.

(5) Anderson, T.L, Ph.D., 1995, "Fracture Mechanics," CRC Press, Inc., pp. 36~41.

(6) 김선진, 이상국 外2人, 1996, "탄소섬유강화 복합재료 강도데이터의 통계적 특성에 관한 연구," 대한기계학회논문집, Vol. 20, No. 2, pp. 511~519.

(7) 下河 利行, 濱口 泰正 外4人, 1994, "カーボン/ポリイミド複合材料における引張機械的性質の統計的評價," 日本複合材料學會誌, 第20卷, 第5號, pp. 195~204.

(8) 황운봉, 한정섭, 1988, "복합재료 피로 수명 분포에 대한 고찰," 대한기계학회논문집, Vol. 12, No. 4, pp. 790~805.

(9) Weibull, W., 1951, "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability," *ASME J. Applied Mechanics*, Vol. 18, pp. 293~297.

(10) ASTM D 3039, "Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber-Resin Composites".

(11) 塩見 弘, 三疇 武 外2人, 1984, "信頼性における確率紙のつかい方," 日科技連, pp. 149~159.

(12) 酒井達雄, 田中道七, "3母數ワイブル分布の母數推定について," 日本材料學會論文集, 第29卷, 第316號, pp. 17~23.