

# 불연성 복합재의 기계적 접합부 설계 허용치 도출을 위한 실험적 절차

이창훈\*·김진봉\*·박지상\*·황병선\*

## Experimental Procedure for Design Allowances of Mechanical Joint in Non-flammable Composites

Chang-Hun Lee, Jin-Bong Kim, Ji-Sang Park and Byung-Sun Hwang

**Key Words:** Mechanical joint(기계적 접합부), Non-flammable composites(불연성 복합재)

### Abstract

This paper contains the tension-tension, the tension-tension bearing and the tension-tension steel bolt joint fatigue characteristics of glass fabric/phenol composite laminates. The experimental results show that the bearing and the steel bolt joint fatigue characteristics of the material is so excellent compared with the simple tension fatigue characteristics, that there are no needs of additional strengthening for mechanical joint parts when the parts are properly designed.

### 1. 서 론

복합재료는 냉전시대에 전투항공기와 같은 첨단방위산업에 개발 적용되기 시작하였으며 현재에는 민간 산업분야에도 그 사용량이 점차 널리 확대되고 있다. 복합재료는 비강도, 비강성이 크고 일반적으로 피로특성이 우수하여 경량이 요구되는 구조물 제작 시에 설계자로 하여금 설계에 유연성을 가지도록 한다. 철도차량에 사용될 수 있는 복합재료는 난연성/불연성 및 화재 시에 발생하는 유독가스 발생에 대한 우수한 특성이 요구되는데, 이러한 문제를 해결할 수 있는 방안으로 선진국에서는 불연성 페놀 수지를 이용한 경량의 복합재료를 개발하여 적용하고 있다. 이러한 복합재료가 국내의 철도차량의 내·외장재 제작에 사용되기 위해서는 기초적인 물성치에 대한 연구결과가 필요하다.

본 연구는 (주)한국화이버에서 새롭게 개발된

유리섬유/페놀 직조 복합재료의 피로특성에 대한 연구결과를 통하여 본 재료를 위한 기계적 접합부의 피로설계에 대한 기초적인 물성을 제공한다.

### 2. 피로수명 평가

#### 2.1 S-N Curve

일반적으로 재료의 피로거동은 피로응력과 피로수명 즉, 피로사이클수의 관계로 표현된다. 복합재료의 S-N 선도는 고전지수법칙(classical power law)인 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$KS^bN=1 \quad (1)$$

식 (1)에서 양변에  $\ln$  을 취하면  $\ln S$  와  $\ln N$  에 대한 선형방정식을 얻을 수 있는데, 시험결과로 얻은 각 하중점,  $S_i$  에 대한 피로수명,  $N_i$  에 대하여 최소자승법(least square method)을 이용하여  $K$  와  $b$  를 계산함으로써 S-N 선도를 얻을 수 있다.

일반적으로 복합재료의 피로수명결과는 분산이 매우 크다. 따라서 단순히 평균수명시간으로만

\* 한국기계연구원 복합재료그룹

얻어진 S-N 선도는 문제가 많다. 이러한 문제로 인하여 이중인자 Weibull 분포추정법을 도입하고, 피로수명,  $N_i$ 을 Weibull 인자인  $\beta_i$ 로 치환하여 S-N 선도를 얻는다.

## 2.2 이중인자 Weibull 분포

무작위 변수(random variable),  $X$ 가 아래 식과 같은 누적분포를 가질 때, 형상인자,  $\alpha$ 와 위치인자,  $\beta$ 의 Weibull 분포를 가졌다고 한다.

$$F_x(x) = P_r \{ X \leq x \} \quad (2)$$

$$= 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x}{\beta} \right)^\alpha \right]$$

여기서  $x > 0$  이고  $F_x(x)$ 는  $x$ 보다 작거나 같을 수 있는  $X$ 의 가능성을 나타낸다. 시험결과로부터  $n$ 차원의 데이터( $x_1 \leq x_2, \dots, \leq x_n$ )가 주어졌을 때에 medium rank 방법을 도입하여 아래와 같이  $i$ 번째의 데이터까지의 누적생존확률을 가정한다.

$$F_x(x_i) = 1 - \frac{i-0.3}{n+0.4} \quad (3)$$

최대근사법(maximum-likelihood method)으로 medium rank 방법으로 얻어진 데이터로부터 Weibull 인자인  $\alpha$ ,  $\beta$ 를 아래와 같이 얻는다.

$$\frac{\sum_{i=1}^n x_i^\alpha \ln x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^\alpha} - \frac{1}{\alpha} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln x_i}{n} = 0 \quad (4)$$

$$\beta = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^\alpha \right]^{1/\alpha} \quad (5)$$

$f(\hat{\alpha}) = 0$ 의 해답을 얻기 위한 효과적인 반복해법은 Newton-Raphson 법을 사용하는 것이다. 여기서 (j+1)번째 연속적인 근사치,  $\hat{\alpha}_{j+1}$ 는  $\hat{\alpha}_j$ 로부터 아래의 식으로 주어진다.

$$\hat{\alpha}_{j+1} = \hat{\alpha}_j - f(\hat{\alpha}_j) / f'(\hat{\alpha}_j) \quad (6)$$

형상인자,  $\alpha$ 가 전체시편에 대해 동일하다고 가정하면,  $\alpha$ 의 pooled estimation은 각 하중점의 피로시험 데이터를  $y_{ij} = x_{ij} / \beta_i$ 와 같이 표준화함으로써 구할 수 있다. 표준화된 값들의 최대근사방정식은,

식 (7)은 식 (4)와 식 (5)와 마찬가지로 Newton-

Raphson 법을 이용하여 구할 수 있다.

$$\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{ij}^\alpha \ln y_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{ij}^\alpha} - \frac{1}{\alpha} - \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \ln y_{ij}}{n \cdot m} = 0$$

$$\beta_i = \left[ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}^\alpha \right]^{1/\alpha} \quad (7)$$

where  $i=1, 2, \dots, m$

## 3. 실험

### 3.1 시편제작 및 시험방법

본 연구에서는 (주)한국화이버에서 제작한 유리섬유/페놀 직조 프리프레그(#650 E-glass fabric/phenol prepreg,  $v_f=45\%$ )를 적층한 복합재료에 대한 피로시험을 수행하였다. 시험은 각 하중점에서 피로에 의한 강성저하에도 불구하고 일정한 최대하중과 최소하중을 가하게 하는 하중제어(load control)방식으로 수행하였으며,  $R = 0.1$ 인 인장-인장 피로시험과 인장-인장 핀 베어링(Pin bearing) 피로시험, 그리고 인장-인장 Steel bolt joint 피로시험을 수행하였다. Steel bolt joint를 제외한 시험은 세 개의 하중점에서 각 하중점당 다섯 개의 시편이 사용되었고, Steel bolt joint의 경우 하나의 하중점에서 하나의 시편이 소요되었다. S-N 선도에서 피로하중 값은 정적시험을 통해 얻어진 인장강도와 베어링 강도, 그리고 Steel bolt joint 강도에 대한 각 피로하중에서의 최대값의 비율(%)로 나타내었다. 표 1은 사용된 시편의 정적특성이다.

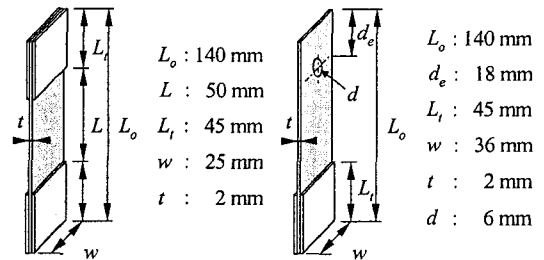


그림 1. 피로시험에 사용된 시편의 형상

시험에 사용된 피로하중은 반복하중수가  $10^3$  사이클과  $10^6$  사이클 사이에서 세 개의 피로응력을 갖도록 하였다. 쿠폰에 걸리는 피로응력은 인

장-인장 피로시험의 경우 정적 인장강도의 75%, 55%, 45%를 가지며, 인장-인장 핀 베어링 피로시험의 경우 정적 핀 베어링강도의 80%, 70%, 60%, 그리고 Steel bolt joint 피로시험의 경우 정적 Steel bolt joint 하중의 80%, 67%, 60%, 53%를 가지도록 하였다.

표 1 복합재료의 정적특성

재료	시험종류	특성
유리섬유/페놀 직조 적층판	인장	260MPa
	핀 베어링	317MPa/3.8kN
	Steel bolt joint	7.3kN

표 2 인장-인장 피로시험 결과

Stress-Level (%) , $S_i$		45	55	75
시 편 번 호	1	351,087	91,850	11,085
	2	397,841	116,303	12,692
	3	521,590	177,715	14,070
	4	561,241	207,430	16,053
	5	996,800	252,309	16,797
$\alpha_i$		2.62	3.27	7.94
$\beta_i$		638,969	189,474	15,048

표 3 Pooled estimated  $\hat{a}$ ,  $\beta_i$

Stress-Level (%) , $S_i$		45	55	75
shape parameter		$\hat{a} = 3.375$		
scale parameter		$\beta_1=673,428$	$\beta_2=190,272$	$\beta_3=14,498$

### 3.2 불연성 복합재료 시편의 피로시험

#### 3.2.1 인장-인장 피로시험 결과

인장시험시 시편의 피로파손은 시편의 완전한 파단이 발생할 시점에서 급격하게 일어나게 된다. 따라서 피로수명은 시편의 완전한 인장파단이 발생하는 시점으로 하였다. 표 2는 피로시험 결과 및 각 Stress-level에서의  $\alpha_i$  및  $\beta_i$  값을 나타낸다.  $\alpha_i$  및  $\beta_i$  값은 각 Stress-level에서의 피로수명 값을  $x_i$ 에 대입하고, 식 (4)에서부터 식

(6)을 통하여 계산할 수 있다. 식 (7)을 이용하여 Pooled estimated  $\hat{a}$ 을 얻고,  $\beta_i$ 을 다시 계산하면 표 3의 결과를 얻을 수 있다.

표 3의 결과를 식 (1)에 대입하면 식 (8)과 같은 S-N 선도에 대한 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Log}_{10} \beta_i &= -b \text{Log}_{10} S_i - \text{Log}_{10} K \\ b &= 7.58 \\ \text{Log}_{10} K &= -18.404 \end{aligned} \quad (8)$$

표 4 인장-인장 핀 베어링 피로시험 결과

Stress-Level (%) , $S_i$		60	70	80
시 편 번 호	1	275,757	29,880	3,210
	2	346,200	30,310	3,260
	3	493,220	30,810	5,360
	4	564,767	47,410	5,620
	5	573,888	49,610	7,880
$\alpha_i$		4.61	4.64	3.20
$\beta_i$		496,224	41,217	5,673

표 5 Pooled estimated  $\hat{a}$ ,  $\beta_i$

Stress-Level (%) , $S_i$		60	70	80
shape parameter		$\hat{a} = 3.931$		
scale parameter		$\beta_1=489,862$	$\beta_2=40,585$	$\beta_3=5,845$

#### 3.2.2 인장-인장 핀 베어링 피로시험 결과

핀 베어링 피로시험의 경우 핀 홀에서의 피로 파손이 발생한 후에 곧바로 시편의 완전한 파단으로 이어지지 않는다. 따라서 본 연구에서는 시편의 피로시험 중 최대하중에서의 Actuator의 위치의 이력을 기록하고, 최대하중에서의 Actuator의 위치가 갑자기 급격하게 증가하는 시점을 시편의 피로수명으로 결정하였다. 표 4와 표 5를 인장-인장 피로시험과 동일한 방법으로 얻었다.

인장-인장 피로시험결과와 동일한 방법으로 식 (9)와 같은 S-N 선도를 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Log}_{10} \beta_i &= -b \text{Log}_{10} S_i - \text{Log}_{10} K \\ b &= 15.41 \\ \text{Log}_{10} K &= -33.082 \end{aligned} \quad (9)$$

### 3.2.3 인장-인장 Steel bolt joint 피로시험 결과

피로수명은 각 시편의 복합재료 부분에서의 완전한 파단이 발생하는 시점으로 결정하였다. 일반 피로시험 시편과 마찬가지로 피로수명이 다할 때까지 특이한 소리나 파손 등의 거동을 보이지 않다가, 피로파단이 일어나는 시점에서 갑자기 완전한 파단을 일으키게 된다. 표 6은 인장-인장 Steel bolt joint 피로시험의 결과이다.

식 (10)은 유도된 S-N 선도이다.

$$\begin{aligned} \log_{10} N_i &= -b \log_{10} S_i - \log_{10} K \\ b &= 16.09 \\ \log_{10} K &= -34.218 \end{aligned} \quad (10)$$

표 6 인장-인장 Steel bolt joint 피로시험 결과

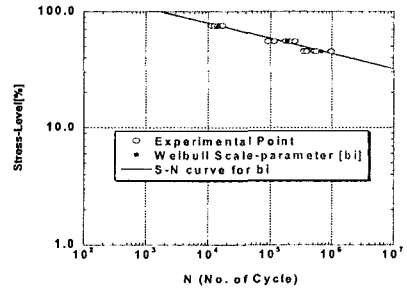
Stress-Level (%) , $S_i$	Fatigue Life
80%	3,024
67%	116,230
60%	270,586
53%	12,000,000(no failure)

### 3.2.4 피로시험결과의 비교

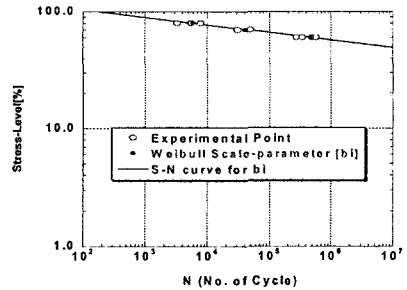
그림 2는 식 (8), 식(9) 및 식(10)의 결과를 그린 그림이다. 인장-인장 피로수명의 경우  $10^6$  사이클에서 약 43%의 피로강도를 보이나 인장-인장 핀 베어링 피로수명은 같은 사이클에서 약 57%의 강도를 보이고, 인장-인장 Steel bolt joint 피로수명은 약 60%의 강도를 보이므로 유리섬유/페놀 복합재료를 이용하여 제작된 구조물의 기계적 접합부분이 규정된 형상으로 설계되었을 때에는 피로에 대한 추가적인 강화가 필요하지 않음을 알 수 있다.

## 4. 결론

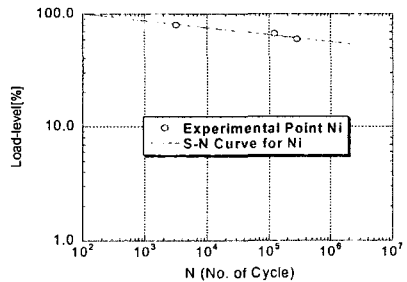
유리섬유/페놀 직조 복합재료에 대한 인장-인장 피로시험과 인장-인장 핀 베어링 피로시험을 수행하고 그 피로수명에 대한 S-N 선도를 구하였다. 인장-인장 핀 베어링 피로시험결과 인장-인장 피로시험보다 피로특성이 더 우수한 것으로 나타났다. 따라서, 기계적 접합부의 설계시에 접합부를 위한 별도의 강화가 필요하지 않음을 알 수 있었다.



(a) 인장-인장 피로시험 결과



(b) 인장-인장 핀 베어링 피로시험 결과



(c) 인장-인장 Steel bolt joint 피로시험 결과

그림 2. 피로시험결과의 비교

## 후 기

이 논문은 산업자원부 경남메카노21사업의 신지식 기계설비기술개발사업(2000~2003)의 지원에 의하여 연구되었으며 산업자원부, 경상남도, 한국화이바 등 관계기관에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Engineering Materials Handbook COMPOSITES, ASM International, pp. 437 ~ pp. 444
- (2) H. T. Hahn and R. Y. Kim, "Fatigue Behavior of Composite Laminate", J. Composite Materials, Vol.10, (April 1976), p.156