

고속전철 내장부품용 유리섬유 직조 페놀수지 복합재료 적층판의
인장-인장 피로특성 및 인장-인장 베어링 피로특성
**Tension-Tension Fatigue and Tension-Tension Bearing Fatigue
Characteristics of Glass Fabric/Phenol Composite Laminates for the
Internal Components of the High Speed Trains**

김진봉* , 황병선** , 이상관*** , 박지상**** , 조정미*****

Kim, Jin-Bong Hwang, Byung-Sun Lee, Sang-Kwan, Park, Ji-Sang, Cho, Jeong-Mi

Abstract

This paper contains the tension-tension and the tension-tension bearing fatigue characteristics of glass fabric/phenol composite laminates. The experimental results show that the bearing 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. The experimental data are also compared with the results of glass fabric/epoxy composite laminates.

1. 서론

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 제작시에 설계자로 하여금 설계에 유연성을 가지도록 한다. 철도차량에 사용될 수 있는 복합재료는 난연성/불연성 및 화재시에 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.

* 한국기계연구원, 복합재료그룹, 선임연구원, 055-280-3317, kjb1697@kmail.kimm.re.kr
** 한국기계연구원, 공정연구부장, 공학박사, 055-280-3400, hbs@kmail.kimm.re.kr
*** 한국기계연구원, 복합재료그룹, 선임연구원, 055-280-3314, lsk6167@kmail.kimm.re.kr
**** 한국기계연구원, 복합재료그룹, 선임연구원, 055-280-3316, lsk6167@kmail.kimm.re.kr
***** (주)한국화이버 복합재료연구소, 이사, jmcho@fiber-x.com

본 연구는 새롭게 개발된 유리섬유/페놀 직조 복합재료 적층판의 피로특성에 대한 연구결과를 통하여 피로설계에 대한 기초적인 물성을 제공한다.

2. 피로수명평가

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 얻어진 S-N 선도는 문제가 많다. 이러한 문제로 인하여 이중인자 Weibull 분포추정법을 도입하고, 피로수명, N_i 을 Weibull 인자인 β_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, α 와 위치인자, β 의 Weibull 분포를 가졌다고 한다.

$$F_x(x) = P_r \{ X \leq x \} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{\beta} \right)^\alpha \right] \quad (2)$$

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 α , β 를 아래와 같이 얻는다.

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

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

$f(\hat{\alpha}) = 0$ 의 해답을 얻기 위한 효과적인 반복해법은 Newton-Raphson 법을 사용하는 것이다.

여기서 (j+1)번째 연속적인 근사치, \hat{a}_{j+1} 는 \hat{a}_j 로부터 아래의 식으로 주어진다.

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

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

$$\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{ij}^{\hat{\alpha}} \ln y_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{ij}^{\hat{\alpha}}} - \frac{1}{\hat{\alpha}} - \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \ln y_{ij}}{n \cdot m} = 0 \quad (7)$$

$$\hat{\beta}_i = \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}^{\hat{\alpha}} \right]^{1/\hat{\alpha}} \quad (8)$$

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

식 (7)과 식 (8)은 식 (4)와 식 (5)와 마찬가지로 *Newton-Raphson* 법을 이용하여 구할 수 있다.

3. 실험

3.1 시편제작 및 시험방법

본 연구에서는 (주)한국화이버에서 제작한 유리섬유/페놀 직조 프리프레그(#650 E-glass fabric/phenol prepreg, $v_f=45\%$)와 유리섬유/에폭시 직조 프리프레그(#650 E-glass fabric/epoxy prepreg, $v_f=45\%$)를 각각 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) 피로시험을 수행하였다. 시험은 세 개의 하중점에서 수행되었고 각 하중점당 다섯 개의 시편이 사용되었다. S-N 선도에서 피로하중 값은 정적시험을 통해 얻어진 인장강도와 베어링 강도에 대한 각 피로하중에서의 최대값의 비율(%)로 나타내었다. 표 1은 사용된 시편의 정적강도이다.

표 1. 복합재료의 정적 강도 [MPa]

재료	시험종류	강도
유리섬유/페놀 직조 적층판	인장 강도	260
	핀 베어링 강도	317
유리섬유/에폭시 직조 적층판	인장 강도	308
	핀 베어링 강도	302

시험에 사용된 피로하중은 반복하중수가 10^3 사이클과 10^6 사이클 사이에서 세 개의 피로응력을 갖도록 하였다. 각 피로응력에 해당하는 하중점에 5 개의 시편이 소요되었다. 쿠폰에 걸리는 피로

응력은 인장-인장 피로시험의 경우 정적 인장강도의 75%, 55%, 45%를 가지며, 인장-인장 핀 베어링 피로시험의 경우 정적 핀 베어링강도의 80%, 70%, 60%를 가지도록 하였다.

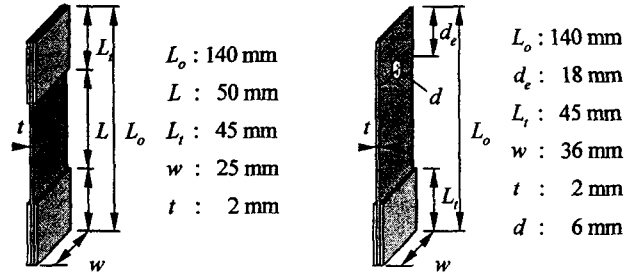


그림 1. 피로시험에 사용된 시편의 형상

3.2 유리섬유/페놀 직조 복합재료 시편의 피로시험

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 피로시험결과 및 각 Stress-level에서의 α_i 및 β_i 값을 나타낸다. α_i 및 β_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 이 값을 이용하여 식 (8)을 통하여 β_i 을 다시 계산하면 표 3의 결과를 얻을 수 있다.

표 2. 유리섬유/페놀 직조 복합재료의 시험 결과

stress-level (%), S_i	시편번호					α_i β_i
	1	2	3	4	5	
45	351,087	397,841	521,590	561,241	996,800	2.62 638,969
55	91,850	116,303	177,715	207,430	252,309	3.27 189,474
75	11,085	12,692	14,070	16,053	16,797	7.94 15,048

표 3. Pooled estimated \hat{a} , β_i

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

표 3의 결과를 식 (1)에 대입하면 식 (9)와 같은 S-N 선도에 대한 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \log_{10} \beta_i &= -b \log_{10} S_i - \log_{10} K \\ b &= 7.58 \\ \log_{10} K &= -18.404 \end{aligned} \quad (9)$$

2) 인장-인장 핀 베어링 피로시험 결과

핀 베어링 피로시험의 경우 핀 홀에서의 피로파손이 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.

표 4. 유리섬유/페놀 직조 복합재료의 시험 결과

stress-level (%) S_i	시편번호					α_i β_i
	1	2	3	4	5	
60	275,757	346,200	493,220	564,767	573,888	4.61 496,224
70	29,880	30,310	30,810	47,410	49,610	4.64 41,217
80	3,210	3,260	5,360	5,620	7,880	3.20 5,673

표 5. Pooled estimated \hat{a} , β_i

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

인장-인장 피로시험결과와 동일한 방법으로 식(10)과 같은 S-N 선도를 유도할 수 있다.

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

3) 인장-인장 피로시험 및 인장-인장 핀 베어링 피로시험결과와 비교

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

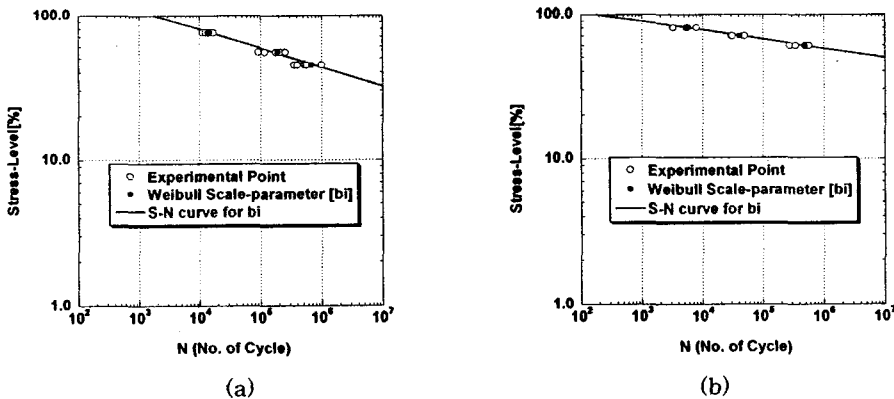


그림 2. 유리섬유/페놀 직조 복합재료의 (a) 인장-인장 피로시험 결과 및 (b) 인장-인장 핀 베어링 피로시험 결과

3.3 유리섬유/에폭시 직조 복합재료 시편의 피로시험

유리섬유/페놀 직조 복합재료의 피로성능을 평가하기 위하여 가장 일반적인 복합재료의 일종인 유리섬유/에폭시 직조 복합재료 피로시험결과와 비교하였다. 유리섬유/에폭시 직조 복합재료의 피로시험은 유리섬유/페놀 직조 복합재료의 결과 중 최대 피로수명을 얻은 하중점으로만 수행되었다. 표 6과 표 7은 각각 인장-인장 피로시험 및 인장-인장 편 배어링 피로시험결과를 나타낸다.

표 6. 유리섬유/에폭시 직조 복합재료의 인장-인장 피로시험 결과

stress-level (%), S_i	시편번호					a_1 β_1
	1,6	2,7	3,8	4,9	5,10	
55	95,637	127,869	149,522	152,388	168,672	3,149 212,440
	182,228	196,412	224,770	292,629	307,880	

표 7. 유리섬유/에폭시 직조 복합재료의 인장-인장 편 배어링 피로시험 결과

stress-level (%), S_i	시편번호					a_1 β_1
	1	2	3	4	5	
70	887,920	999,729	1,003,450	1,189,582	1,343,486	7,131 1,156,617

유리섬유/에폭시 직조 복합재료의 경우 인장-인장 피로시험과 인장-인장 편 배어링 피로시험결과가 각각 212,440 사이클과 1,156,617 사이클로 유리섬유/페놀 직조 복합재료의 피로시험결과인 190,272 사이클과 40,585 사이클보다 우수한 특성을 보임을 알 수 있다.

4. 결론

유리섬유/페놀 직조 복합재료에 대한 인장-인장 피로시험과 인장-인장 편 배어링 피로시험을 수행하고 그 피로수명에 대한 S-N 선도를 구하였다. 인장-인장 편 배어링 피로시험결과 인장-인장 피로시험보다 피로강도가 더 우수한 것으로 나타났다. 따라서, 기계적 접합부의 설계시에 접합부를 위한 별도의 강화가 필요하지 않음을 알 수 있었다. 그러나, 유리섬유/페놀 직조 복합재료의 피로수명이 유리섬유/에폭시 직조 복합재료의 피로수명에 비하여 좋지 않음을 알 수 있었다.

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