

## 소형풍력발전 블레이드용 복합재료의 피로수명 분포에 대한 확률론적 평가<sup>§</sup>

강 기 원<sup>\*†</sup>

\* 군산대학교 도시형풍력발전원천기술연구센터

### Statistical Distribution of Fatigue Life of Composite Materials for Small Wind-Turbine Blades

Ki Weon Kang<sup>\*†</sup>

\* Break-through Technology Center for Urban Wind Energy System, Kunsan Nat'l Univ.

(Received May 16, 2011 ; Revised June 3, 2011 ; Accepted June 5, 2011)

**Key Words** : Composite Blade(복합재 블레이드), Fatigue Life(피로수명), Probabilistic Distribution Model(확률 분포 모델), Variation(변동성)

**초록**: 본 논문에서는 소형풍력발전시스템 블레이드 제작에 사용되는 복합재료의 피로수명 데이터에 대한 통계적 해석을 위하여 다양한 확률분포 모델의 적합성에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 삼축 유리섬유강화 복합재료를 대상으로 0°, 45° 및 90°의 하중방향에 대한 인장시험을 실시하였다. 또한 상기의 하중방향에 대하여 4 수준의 피로응력준에서의 피로시험을 수행하였다. 이를 통하여 획득한 피로수명 데이터를 대상으로 1) 전체 적합성, 2) 끝단 적합성 및 3) 피로물리 일치성의 기준을 이용하여 2 모수 Weibull, 3 모수 Weibull, 정규 및 대수정규분포의 적합성을 평가하였다. 또한 피로수명의 분산에 대한 하중방향 및 피로응력의 영향 역시 검토하였다.

**Abstract**: This paper deals with several statistical distribution functions for the analysis of fatigue life data of composite laminates for small wind-turbine blades. A series of tensile tests was performed on triaxial glass/epoxy laminates for loading directions of 0°, 45°, and 90°. Then, fatigue tests were carried out to determine the fatigue life at the aforementioned loading directions and the fatigue stresses at four levels. Two-parameter Weibull, three-parameter Weibull, normal, and log-normal distributions were used to fit the fatigue life data of the triaxial composite laminates. The three-parameter Weibull distribution most accurately described the fatigue life data measured experimentally for all the cases considered. Furthermore, the variation of fatigue life was simultaneously affected by the loading direction and fatigue stress level.

### 1. 서 론

풍력 발전시스템용 블레이드는 바람의 운동에너지를 회전에너지로 변환시켜서 발전기를 구동하는 부품으로서, 20년 이상의 설계 수명에 따른 피로 파손의 위험성이 상존하므로 구조물의 내구성 및 신뢰성을 확보하기 위해서는 우수한 피로저항성을 확보하여야 한다. 이를 위하여 비강도, 비강성 및

진동 특성 등이 우수한 섬유강화 복합재료가 블레이드의 재료로 주로 사용되고 있다.<sup>(1)</sup>

그러나 섬유강화 복합재료는 섬유 배열방향의 부정확성(fiber misalignment), 미소균열(microcrack) 및 공공(void) 등으로 인하여 이의 기계적 특성에 변동성(variation)이 존재하며 특히, 피로수명의 경우 복합재료 특유의 이방성(anisotropy) 등으로 인한 복잡한 피로손상 효과가 중첩되어 이의 변동성은 더욱 심각해진다.<sup>(2)</sup> 따라서 복합재료의 피로수명에 대한 다수의 확률론적 해석이 수행되어 피로수명의 분포 평가를 위한 확률론적 모델이 제시되고 있다.<sup>(3-6)</sup> 이러한 연구중 상당수의 연구는 정규분포(normal distribution) 또는 Weibull 분포(Weibull

§ 이 논문은 2011년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계 학술대회(2011. 5. 19.-20., 서울과기대) 발표논문임

† Corresponding Author, kwkang68@kunsan.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

distribution)을 이용하여 수행되었다. 특히 Weibull 분포의 경우 복합재료의 기계적 특성 및 피로수명 변동성 평가에 가장 적합하다고 언급되고 있다. 그러나 복합재료의 피로수명 및 이의 변동성은 복합재료의 구성요소(constituent material), 하중방향 (loading direction) 및 적층순서(stack sequence) 등에 따라 변화<sup>(7)</sup>하므로 이의 일반화는 의문의 여지가 있다.

본 논문에서는 블레이드용 복합재료의 피로수명에 대한 확률분포모델의 적합성에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 삼축(triaxial) 유리섬유강화 복합재료에 대한 인장 및 피로시험을 수행하였으며 1) 전체 적합효과(total fit effect), 2) 끝단 적합효과(tail fit effect) 및 3) 피로물리현상과의 일치성 (consistency with fatigue physics)의 기준을 이용하여 2 모수 Weibull, 3 모수 Weibull, 정규 및 대수정규 분포의 적합성을 평가하였다. 또한 피로수명의 변동성에 대한 하중방향 및 피로하중의 영향을 평가하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 재료 및 시험편

복합재료는 소형풍력발전용복합재 블레이드 제작에 적용되고 DBL600E 삼축 (triaxial) 유리섬유강화 복합재료(glass/epoxy 복합재료)로서 0°, +45° 및 +45°의 섬유 스트랜드가 모여 하나의 플라이 (ply)를 구성하는 스티칭(stitching)형태이다(Fig. 1). 시험편은 진공성형 핸드 레이업(vacuum assisted hand layup) 및 상온 경화 조건을 이용하여 제작하였다. 이의 기계적 특성은 Table 1 과 같다.

한편 시험편은 정적 및 피로특성에 미치는 삼축 (0°/+45°/-45°)의 섬유방향과 하중방향의 영향을 평가하기 위하여 0° 방향의 섬유를 기준으로 0°, ± 45° 및 90° 방향으로 구분하여 가공하였다. 여기서 하중 방향은 실제 블레이드 제작시 주로 사용되는 섬유 및 하중방향을 고려하여 선택하였다. 플라이의 수는 5 장으로서 시험편의 총 두께는 3mm 이다. 시험편의 제원은 Fig. 2 와 같다.

### 2.2 인장 및 피로시험

제작된 0°, 45° 및 90° 방향의 시험편에 대한 인장 및 피로시험을 실시하였다. 인장시험은 ASTM 규격<sup>(8)</sup>에 의거, 하중 방향 별 7 개의 시험편을 대상으로 2mm/min 의 변위제어조건(displacement control)하에서 실시하였으며 이를 통한 각 방향별 인장강도 결과는 Table 2 와 같다.

삼축 유리섬유강화 복합재료의 피로저항성 평가를 위하여 응력비  $R=0.1$  에서의 일정진폭 피로시험을 실시하였다. 부하된 일정진폭 피로하중의 수준은 각 방향별로 인장강도의 60%, 50%, 40% 및 35%의 4 수준에서 실시하였으며 각 수준에서 시험된 시험편의 수량은 각 7 개이다. 이때, 주파수는 시험편의 온도상승 및 이로 인한 백화현상을 최소화하기 위하여 2Hz 로 고정하였다. 여기서 무한수명은  $10^6$  으로 설정하였다. 사용된 시험 장비는 Instron 8801 유압식 피로시험기이다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 피로수명에 대한 확률분포모델의 적합성 평가

기계구조물 또는 부품의 피로수명분포는 특정한

Table 1 Mechanical properties of DBL600E

Longitudinal elastic modulus	$E_X$	17.80 GPa
Transverse elastic modulus	$E_Y$	8.50 GPa
Shear modulus	$G_{XY}$	5.04 GPa
Longitudinal Poisson's ratio	$\nu_{xy}$	0.25
Fiber volume fraction	$V_f$	36.5

Table 2 Mechanical properties of laminates

	0°	45°	90°
Tensile strength (MPa)	423.22	240.49	151.73
Failure strain (%)	4.48	2.08	3.59

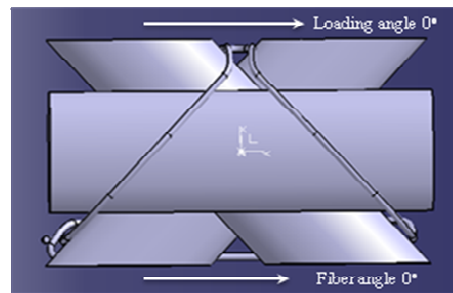


Fig.1 Configuration of triaxial composites

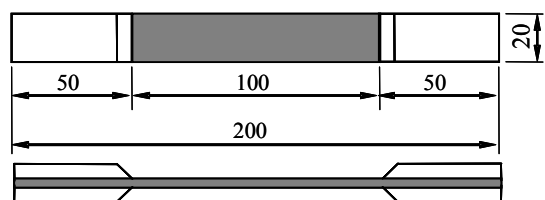


Fig.2 The configuration of test specimen(unit:mm)

**Table 3** Fatigue life according to loading direction

Loading direction	Stress level	Fatigue life						
		1	2	3	4	5	6	7
0°	60%	1,681	1,171	2,123	2,094	812	1,218	2,687
	50%	22,758	9,401	8,121	1,176	9,882	13,395	6,231
	40%	253,089	446,117	27,752	159,195	125,717	53,447	174,326
	35%	265,708	1,000,000	79,590	379,488	1,000,000	801,051	359,356
45°	60%	1,774	17,803	20,469	19,807	15,698	40,135	9,863
	50%	22,654	104,328	88,692	269,603	138,769	197,635	115,027
	40%	543,659	765,237	1,000,000	376,589	698,763	1,000,000	598,412
	35%	1,000,000	1,000,000	1,000,000	905,678	1,000,000	1,000,000	965,703
90°	60%	969	1,549	1,074	802	1,124	937	956
	50%	3,510	5,169	6,750	3,407	3,580	5,575	2,106
	40%	36,769	25,769	74,792	80,432	96,372	67,134	122,561
	35%	960,583	722,459	332,095	130,443	1,000,000	482,413	1,000,000

확률 분포로 가정하여 이의 특성을 평가하는 것이 대부분이다.<sup>(9)</sup> 그러나 제한된 파손수명 자료에 대한 분석은 오류 발생의 가능성이 있으므로 다양한 확률분포모델로부터 적합한 분포모델을 선택하는 것이 타당하다.<sup>(10)</sup> 이를 위하여 본 논문에서는 (1) 전체 적합효과, (2) 끝난 적합효과 및 (3)피로물리 현상과의 일치성의 기준을 이용하여 **Table 3**에 정리된 복합재 블레이드용 삼축 유리섬유강화 복합재료의 일정진폭 피로수명 자료의 확률론적 분석을 실시하였다. 이 때 사용된 확률분포모델은 2 모수 Weibull(2 parameter Weibull), 3 모수 Weibull(3 parameter Weibull), 정규 (normal) 및 대수정규분포(lognormal distribution)의 4 종류이다.

3.1.1 전체 적합효과(total fit effect)

일정진폭 피로시험을 통하여 획득된 피로수명 자료에 대한 전체 적합효과를 분석하기 위하여 상용소프트웨어인 Weibull++<sup>(11)</sup>에 통합되어 있는 4 가지 기준 즉 (1) 수정 KS(modified Kolmogorov-Smirnov), (2) L-K(log-likelihood), (3) 상관계수 r(correlation coefficient) 및 (4) 누적분포함수 선도(cumulative distribution function plot)를 사용하였다. 다음은 각 기준에 대한 간략한 설명이다.

수정 KS 법은 함수 G(x)와 평가된 누적 분포함수 F(x)간 절대값 차이의 최대값 D<sub>max</sub>를 이용한다. 여기서 G(x)는 주어진 값의 좌측에 대한 데이터의 비율을 나타내는 함수이다.

$$D_{max} = \max|G(x) - F(x)| \tag{1}$$

수정 KS 값은 D<sub>critical</sub> < D<sub>max</sub> 조건이 만족되는 확률을 나타낸다. 여기서 D<sub>critical</sub>는 위험검정률(significance level) 0.05에서의 허용 또는 임계 편차

를 의미한다. 따라서 100%에 가까운 값일수록 피로수명 자료와 이론적인 분포사이에는 중대한 차이가 존재한다는 의미이다.

또한 최우추정법(maximum likelihood estimation)을 이용하여 분포의 모수를 추정할 때, 식 (2)와 같은 L-K 함수를 이용하여 데이터에 대한 분포의 적합성 정도를 평가할 수 있다.

$$L - K = \sum_{i=1}^n \ln f(x_i; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) \tag{2}$$

여기서 f는 확률밀도함수(probability density function)이며 n과 θ는 각각 실험 데이터 및 최우추정인자(maximum likelihood estimator)이다. L-K 함수가 클수록 통계적으로 정확한 확률분포모델이 된다.

상관계수 r은 주어진 피로수명에 대한 선형 회귀모델의 분포 적합성을 나타내는 인자로서 이는 다음의 식 (3)과 같이 표현된다.<sup>(12)</sup>

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2][n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}} \tag{3}$$

여기서 x 및 y는 피로수명 및 순위값이다. 이러한 상관계수 r의 절대값이 1에 근접할수록 우수한 적합 결과를 나타낸다.

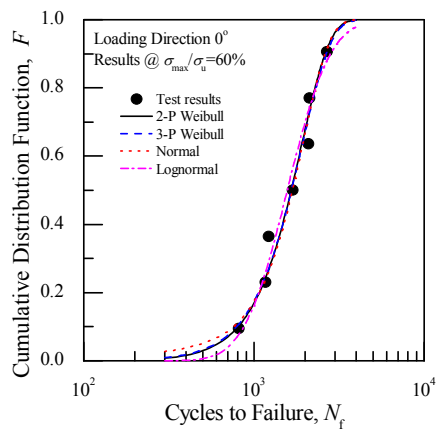
전체 적합효과에 대한 마지막 평가 기준인 누적 분포함수 선도를 사용하면 확률분포모델에 대한 시각적 평가가 가능하다. 분포 모수들이 평가되면 이에 대한 평가는 상당히 용이한 편이다.

이러한 평가기준을 이용하여 각 확률분포모델에 대한 전체 적합효과를 평가할 수 있으며 **Table 4 ~6**와 **Figs. 3~5**는 이의 결과를 종합한 것이다.

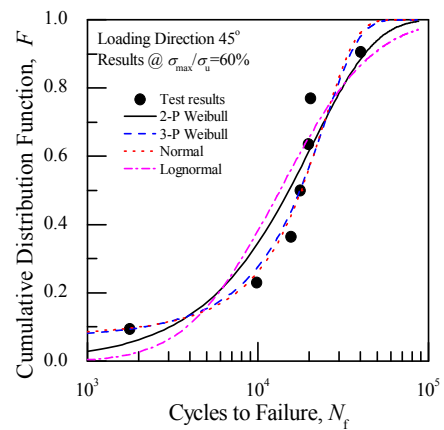
**Table 4** Estimated parameters and results for total fit effect of loading direction of 0°

Level	Distribution	Shape( $\beta$ )	Scale( $\alpha$ )	Location( $\gamma$ )	K-S(%)	L-K	r(%)
60%	2-P Weibull	2.62	1.90E+03	-	6.17E-05	-54.82	98.42
	3-P Weibull	2.53	1.91E+03	5.06	1.08E-05	-54.89	98.72
	<sup>a</sup> Normal	1.68E+03	7.24E+03	-	6.67E-04	-55.01	98.25
	<sup>a</sup> Lognormal	7.36	0.46	-	1.51E-04	-54.98	98.01
50%	2-P Weibull	1.23	1.17E+04	-	2.11E-01	-70.97	94.61
	3-P Weibull	2.55	1.89E+04	-4.46E+03	1.54E-01	-71.02	97.00
	<sup>a</sup> Normal	1.01E+03	7.14E03	-	5.75E-01	-71.20	95.24
	<sup>a</sup> Lognormal	8.96	0.94	-	3.93	-71.62	91.02
40%	2-P Weibull	1.16	1.99E+05	-	6.43E-08	-91.26	98.90
	3-P Weibull	1.04	1.92E+05	6.90E+03	4.35E-06	-91.27	98.87
	<sup>a</sup> Normal	1.77E+05	1.41E+05	-	3.05E-01	-92.49	94.73
	<sup>a</sup> Lognormal	11.77	1.02	-	4.17E-02	-91.46	97.84
35%	2-P Weibull	1.11	7.04E+05	-	4.35E-06	-72.79	*97.01
	3-P Weibull	1.18	7.48E+05	-2.65E+04	1.03E-04	-72.93	97.50
	<sup>a</sup> Normal	5.31E+05	3.74E+05	-	1.20E-01	-74.60	*91.43
	<sup>a</sup> Lognormal	13.12	1.25	-	5.50E-09	-72.54	*96.14

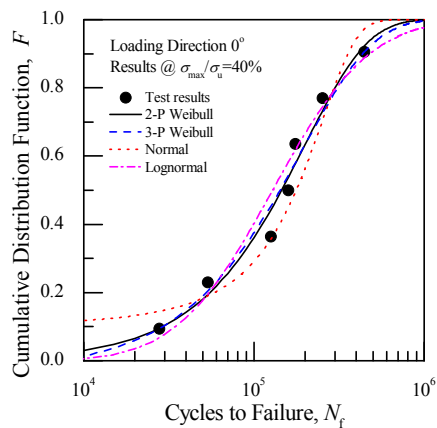
a) mean :  $m$ , standard deviation :  $\mu$  \* violation :  $r_c=97.41$  at significance level of 0.05



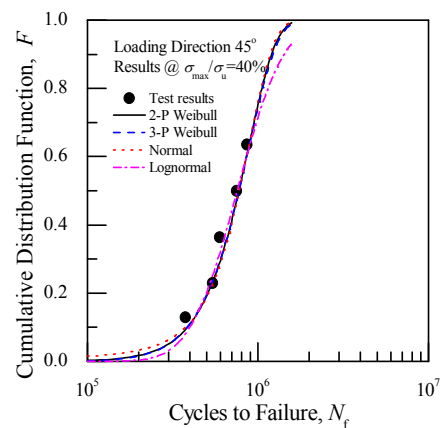
(a) Stress level = 60%



(a) Stress level = 60%



(b) Stress level = 40%



(b) Stress level = 40%

**Fig. 3** CDF for loading direction of 0°

**Fig. 4** CDF for loading direction of 45°

**Table 5** Estimated parameters and results for total fit effect of loading direction of 45°

Level	Distribution	Shape( $\beta$ )	Scale( $\alpha$ )	Location( $\gamma$ )	K-S(%)	L-K	r(%)
60%	2-P Weibull	1.17	2.08E+04	-	5.39E-01	-75.13	93.67
	3-P Weibull	2.67	3.52E+04	-1.30E+04	5.49E+00	-75.05	96.58
	<sup>a</sup> Normal	1.79E+04	1.24E+04	-	6.35E+00	-75.13	94.38
	<sup>a</sup> Lognormal	9.51	0.98	-	8.43E+00	-75.87	*89.32
50%	2-P Weibull	1.42	1.55E+05	-	1.13E-01	-87.72	96.11
	3-P Weibull	2.91	2.55E+05	-9.27E+05	1.18E-03	-88.47	97.87
	<sup>a</sup> Normal	1.34E+05	8.69E+04	-	3.87E-03	-88.57	97.55
	<sup>a</sup> Lognormal	11.59	0.82	-	2.95E+00	-89.00	93.11
40%	2-P Weibull	2.71	8.84E+05	-	1.00E-10	-70.91	99.42
	3-P Weibull	2.53	8.85E+05	3.39E+04	1.00E-10	-70.93	99.44
	<sup>a</sup> Normal	7.80E+05	3.14E+05	-	8.48E-08	-71.02	98.86
	<sup>a</sup> Lognormal	13.53	0.50	-	7.61E-08	-70.97	99.08
35%	2-P Weibull	15.00	1.06E+06	-	1.00E-10	-28.29	100
	3-P Weibull	15.10	1.06E+06	-5.78E+03	1.00E-10	-28.29	100
	<sup>a</sup> Normal	1.04E+06	1.05E+05	-	1.00E-10	-28.17	100
	<sup>a</sup> Lognormal	13.86	0.11	-	1.00E-10	-28.13	100

a) mean :  $m$ , standard deviation :  $\mu$  \* violation :  $r_c=90.56$  at significance level of 0.05

**Table 6** Estimated parameters and results for total fit effect of loading direction of 90°

Level	Distribution	Shape( $\beta$ )	Scale( $\alpha$ )	Location( $\gamma$ )	K-S(%)	L-K	r(%)
60%	2-P Weibull	5.83	1.13E+03	-	2.23E+00	-48.95	*89.67
	3-P Weibull	1.44	3.85E+02	7.25E+02	1.54E-02	-46.64	96.21
	<sup>a</sup> Normal	1.06E+06	2.42E+02	-	1.74E+00	-47.79	93.53
	<sup>a</sup> Lognormal	6.95	0.22	-	5.55E-02	-47.07	93.83
50%	2-P Weibull	2.85	4.83E+03	-	7.21E-01	-60.97	97.12
	3-P Weibull	2.29	4.33E+03	5.26E+02	1.83E-01	-61.07	97.19
	<sup>a</sup> Normal	4.30E+03	1.73E+03	-	1.38E+00	-61.15	97.26
	<sup>a</sup> Lognormal	8.30	0.42	-	5.83E-03	-61.09	96.88
40%	2-P Weibull	1.99	8.28E+04	-	1.03E-02	-82.46	98.19
	3-P Weibull	3.05	1.15E+05	-3.04E+04	3.42E-06	-82.48	98.47
	<sup>a</sup> Normal	7.19E+04	3.68E+04	-	2.38E-07	-82.48	98.72
	<sup>a</sup> Lognormal	11.07	0.59	-	1.89E+00	-82.85	96.09
35%	2-P Weibull	1.17	9.76E+05	-	1.00E-10	-73.43	99.82
	3-P Weibull	1.39	1.01E+06	-6.10E+04	1.00E-10	-73.48	99.90
	<sup>a</sup> Normal	7.29E+05	4.95E+05	-	4.55E-08	-73.91	**98.48
	<sup>a</sup> Lognormal	13.46	1.18	-	1.00E-10	-73.51	99.07

a) mean :  $m$ , standard deviation :  $\mu$  \* violation :  $r_c=90.56$  at significance level of 0.05, \*\*  $r_c=99.99$  at significance level of 0.05

단, 여기서 무한수명에 해당하는 피로수명을 갖는 경우, 파단 및 미파단 데이터를 모두 통계적으로 처리하기 위하여 Adjusted rank<sup>(13)</sup>를 적용하였다.

작용하중의 방향이 0° 인 경우, 평가된 모수 및 판단 인자의 결과를 나타낸 **Table 4** 와 60% 및 40% 수준의 피로하중이 작용하였을 경우의 누적 분포함수를 나타낸 **Fig. 3** 을 살펴보면, KS, L-K 함수 및 상관계수  $r$  기준을 토대로 판단한 결과 작용 피로하중의 수준에 관계없이 3 모수 Weibull 분포가 가장 우수한 결과를 보이고 있으며 2 모수 Weibull 분포가 그 다음 순위임을 알 수 있다. 특히 정규 및 대수정규분포는 0.05 의 위험검정률에

대한 상관계수값이 임계상관계수  $r_c$  보다 작은 경향을 나타내었다.

또한 작용하중의 방향이 45° 인 경우의 평가된 모수 및 판단 인자의 결과를 나타낸 **Table 5** 와 누적 분포함수를 나타낸 **Fig. 4** 를 살펴보면, **Table 4** 의 경우와 유사하게 3 모수 Weibull 분포가 가장 일정진폭 피로수명의 변동성을 묘사함에 있어 가장 적합한 확률분포모델임을 알 수 있다. 단, 피로하중의 수준이 가장 낮은 35%의 경우에는 파단데이터의 부족으로 정확한 평가는 곤란하다.

마지막으로 90° 의 하중방향에 대한 결과를 나타낸 **Table 6** 과 **Fig. 5** 를 살펴보면, 앞의 두 경우와

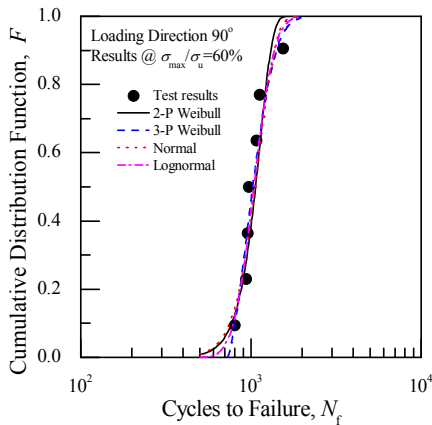
유사하게 3 모수 Weibull 분포가 가장 우수한 전체 적합 결과를 보이고 있다. 특히 앞의 두 경우에서 우수한 적합 결과를 보였던 2 모수 Weibull 함수의 경우 0.05 의 위험검정률에서의 임계 상관관계값보다 작은 결과를 도출하였다.

이상의 결과를 토대로 블레이드에 사용되는 삼축유리섬유강화 복합재료의 일정진폭 피로수명의 전체 적합 효과는 3 모수 Weibull 확률분포함수가 가장 적합한 결과를 보이고 있음이 확인되었다.

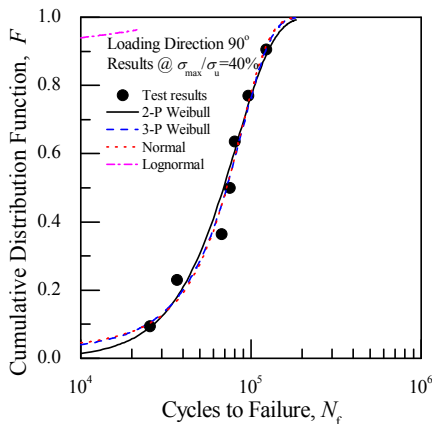
3.1.2 끝단 적합효과(tail fit effect)

확률분포의 끝단 영역(tail regions)은 피로수명의 신뢰성 분석을 위해 중요하므로 가정된 분포를 선택하기 전에 적합효과를 점검하여야 한다. 끝단 영역의 적합효과는 실제값과 이론값 사이의 오차모수(error parameter)인 식 (4) 및 식 (5)를 통하여 구할 수 있다.<sup>(9)</sup>

$$d_{f1} = \frac{1-0.3}{n+0.4} - F(N_1) \tag{4}$$



(a) Stress level = 40%



(b) Stress level = 40%

Fig. 5 CDF for loading direction of 90°

$$d_{f2} = \frac{1-0.3}{n+0.4} - F(N_2) \tag{5}$$

여기서  $N_1$  및  $N_2$  는 각 피로하중 수준에서 최저 수명과 다음 최저수명을 나타내며 오차모수가 음의 값을 가지며,  $d_{f1} < d_{f2}$  인 경우가 보다 안정적인 적합효과를 가진다.

Table 7 은 각 작용하중의 방향에 대한 끝단 적합효과를 판단하기 위하여 식 (4) 및 (5)에 의하여 구한 오차모수를 정리한 것이다. 표에서 알 수 있듯이 오차모수가 모두 음이며  $d_{f1} < d_{f2}$  인 확률분포 함수는 존재하지 않음을 알 수 있다. 그러나 작용하중의 방향 및 피로하중 수준별 자료를 종합적으로 판단하면, 3 모수 Weibull 분포가 가장 안정적인 끝단 적합효과를 가짐을 확인할 수 있다.

3.1.3 피로물리와의 일치성(consistency with fatigue physics)

일정한 하중단계에서 기계구조물 또는 부품의 파손률 곡선(failure rate curve)은 하중 반복수에 따라 증가하며, 확률밀도함수는 양의 비대칭성(positive skewness)를 가져야 한다.<sup>(9)</sup> 이러한 피로물리 일치성은 Weibull 분포의 형상모수와 비대칭계수(coefficient of skewness)  $g$  로 판단할 수 있다.

$$g_w = \frac{\Gamma(\frac{3}{\beta} + 1) - 3\Gamma(\frac{2}{\beta} + 1)\Gamma(\frac{1}{\beta} + 1) + 2\left[\Gamma(\frac{1}{\beta} + 1)\right]^2}{\left\{\Gamma(\frac{2}{\beta} + 1) - \left[\Gamma(\frac{1}{\beta} + 1)\right]^2\right\}^{3/2}} \tag{6}$$

$$g_n = \frac{\sqrt{\mu^2 - 1}}{\mu^2 + 2} \tag{7}$$

$$g_{log} = \frac{\sqrt{\exp(\mu^2) - 1}}{\exp(\mu^2 + 2)} \tag{8}$$

여기서  $\Gamma$  는 감마함수(Gamma function)이다.

Weibull 분포의 형상모수( $\beta$ )가 1 보다 작으며 피로의 물리적 현상에 위배되며 또한  $g$  의 값이 0 보다 작으면 음의 비대칭성을 나타낸다. Table 8 은 상기의 식들을 이용하여 각 분포의 비대칭계수를 정리한 것으로써 이와 각 확률분포모델의 모수를 정리한 Table 4 ~ 6 을 함께 검토하면 피로물리적 현상과의 일치성을 검토할 수 있다. 먼저 2 모수 Weibull 분포의 경우, 이의 형상모수는 모두 1 보다 크며 또한 하중방향 90° 및 피로하중 수준 60%일 경우를 제외하면  $g_w > 0$  이므로 양의 대칭성을 가짐을 알 수 있다. 3 모수 Weibull 분포의 경우

**Table 7** Failure probability differences for tail fit effect

Dir.	Level	2-P Weibull		3-P Weibull		Normal		Lognormal	
		$d_{f1}$	$d_{f2}$	$d_{f1}$	$d_{f2}$	$d_{f1}$	$d_{f2}$	$d_{f1}$	$d_{f2}$
0°	60%	-0.00700	-0.01437	-0.02220	-0.01957	-0.01961	-0.00957	0.01879	-0.03267
	50%	-0.03739	-0.13847	-0.07970	-0.07427	-0.02010	-0.06247	0.07179	-0.17857
	40%	-0.00100	0.03563	0.00029	0.02553	-0.06333	0.02663	0.02749	0.03423
	35%	0.04253	0.02831	0.03332	0.03461	0.01583	0.07572	0.05833	0.00661
45°	60%	0.04001	-0.11197	-0.02971	-0.02227	-0.00221	-0.02837	0.07489	-0.14647
	50%	0.03199	-0.13308	-0.00029	-0.07917	-0.00591	-0.07208	0.06629	-0.17297
	40%	0.04253	0.04931	0.03683	0.06302	0.04363	0.05401	0.05523	0.02901
	35%	0.20467	0.44283	0.19887	0.45653	0.20567	0.44753	0.21727	0.42253
90°	60%	-0.05421	-0.05147	-0.00931	-0.00480	-0.08961	-0.07767	-0.02200	-0.00879
	50%	-0.00479	-0.11097	-0.00029	-0.09497	-0.00731	-0.07277	0.03279	-0.11397
	40%	0.00379	0.05913	-0.01161	-0.05202	-0.00850	0.06043	0.03519	0.05630
	35%	0.03913	0.06811	0.03533	0.07831	0.01653	0.10372	0.01629	0.04931

**Table 8** Coefficients of skewness for consistency with fatigue physics

Dir.	Level	2-P Weibull		3-P Weibull		Normal		Lognormal	
		$d_{f1}$	$d_{f2}$	$d_{f1}$	$d_{f2}$	$d_{f1}$	$d_{f2}$	$d_{f1}$	$d_{f2}$
0°	60%	0.30644		0.34506		0.00138		0.14963	
	50%	1.46208		0.33530		0.00014		0.27009	
	40%	1.58782		1.88397		0.00001		0.28053	
	35%	1.70141		1.55313		0.00000		0.28687	
45°	60%	1.57822		0.28650		0.00008		0.27573	
	50%	1.16795		0.19842		0.00001		0.24782	
	40%	0.26835		0.34550		0.00000		0.16107	
	35%	-0.78752		-0.78945		0.00001		0.03743	
90°	60%	-0.35564		1.14447		0.00413		0.07194	
	50%	0.21972		0.45864		0.00058		0.13847	
	40%	0.52241		0.15693		0.00003		0.18942	
	35%	1.57903		1.20801		0.00000		0.28862	

역시 형상모수는 모두 양이며 모든 경우에 대하여  $g_w > 0$  임을 알 수 있다. 반면에 정규분포의 경우 확률밀도함수의 형상이 좌우대칭인 분포의 특성에 따라 비대칭계수 역시 0 에 근접함을 알 수 있다. 마지막으로 대수정규분포의 경우 비대칭계수는 모두 양이므로 양의 비대칭성을 가지나 그 크기는 Weibull 분포에 비하여 상당히 작음을 알 수 있다.

이상의 전체 적합효과, 끝단 적합효과 및 피로 물리와의 일치성을 종합적으로 검토한 결과, 복합재 블레이드에 사용되는 삼축 유리섬유강화 복합재료의 일정진폭 피로수명의 변동성 평가에는 3 모수 Weibull 분포가 가장 적합하다고 판단된다.

3.2 하중 작용 방향 및 피로하중 수준의 영향

Table 3 및 Figs. 3~5 에서 알 수 있듯이, 삼축 유리섬유강화 복합재료의 일정진폭 피로수명의 변동성은 하중 작용 방향과 피로하중의 수준에 따라 변화하고 있다. 이는 하중 작용 방향에 따라 발생할 수 있는 피로손상 기구(fatigue damage mechanism)의 변화와 작용 응력의 수준에 따라 피

로수명에 미치는 초기 손상량의 영향에 기인한다고 판단된다.<sup>(14)</sup> 이를 보다 명확히 판단하기 위하여, 3.1 절에서 복합재료의 일정진폭 피로수명 변동성에 가장 적합한 확률분포모델로 평가된 3 모수 Weibull 분포의 변동계수(coefficient of variation)를 평가하였다.

$$CV = \frac{\alpha \sqrt{\Gamma(\frac{2}{\beta} + 1) - \left[ \Gamma(\frac{1}{\beta} + 1) \right]^2}}{\alpha \Gamma(\frac{2}{\beta} + 1)} \tag{9}$$

여기서  $\alpha$  와  $\beta$ 는 크기(scale) 및 형상모수(shape parameter)이다.

먼저 피로수명의 변동성에 미치는 하중 작용방향의 영향을 평가하기 위하여, 변동계수 CV 를 하중 작용방향에 대하여 Fig. 6 에 도시하였다. 단, 미파단 데이터가 다수 존재하는 피로하중수준 35% 데이터는 평가에서 제외하였다.

그림에서 알 수 있듯이 피로수명의 변동성은 피로하중의 수준이 60%일 경우, 작용하중의 방향이

증가할수록 기하급수적으로 증가하는데 비하여 50%의 피로하중 수준에서는 거의 변화가 없음이 확인되었다. 특히 40%의 수준에서는 60%의 경우에 비하여 반대의 경향을 나타내고 있다. 이는 피로하중의 수준이 높고 하중이 0° 방향으로 작용하면 상대적으로 높은 하중 지지능력을 보유한 0° 방향의 섬유가 균일한 응력을 받기 때문이라고 판단된다. 이와 반면에 피로하중의 크기가 작으면 모재의 불균일성이 보다 큰 역할을 하기 때문이라고 판단된다.

이러한 경향을 보다 면밀히 평가하기 위하여, Fig. 7 에 피로수명의 변동성을 피로하중의 수준에 대하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 변동성은 0° 의 하중 작용방향의 경우, 피로하중의 수준이 작을수록 증가하고 있으며 90° 의 경우에는 이와 반대의 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 앞에서 언급한 바와 동일하게 하중 작용 방향 및 피로하중의 수준에 따라 피로손상에 대한 섬유와 모재의 영향 정도에 기인한다고 판단된다.

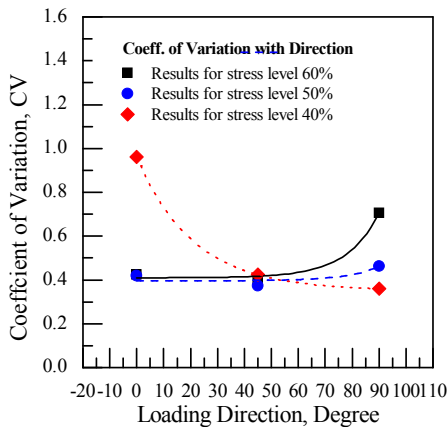


Fig. 6 Effect of loading direction on CV

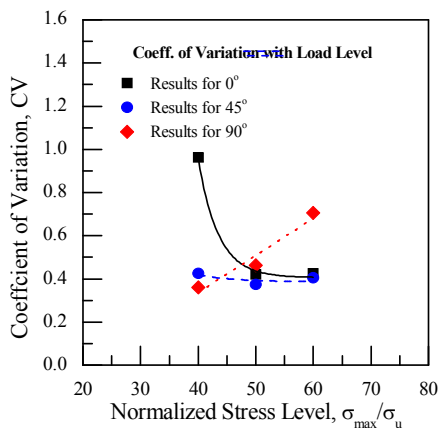


Fig. 7 Effect of stress level on CV

#### 4. 결 론

본 연구에서는 소형풍력발전발전시스템에 사용되는 블레이드용 복합재료의 피로수명에 대한 확률분포모델의 적합성에 대한 연구를 수행하였다.

(1) 전체 적합효과, 끝단 적합효과 및 피로물리적 현상과의 일치성 판단기준을 이용하여 섬유강화 복합재료의 일정진폭 피로수명의 변동성 평가에 가장 적합한 확률분포모델은 3 모수 Weibull 분포로 평가되었다.

(2) 일정진폭 피로수명의 변동성에 대한 하중방향과 피로하중의 영향을 평가한 결과, 하중방향 및 피로하중의 크기에 따라 섬유와 모재의 영향이 상이하며 이로 인한 변동성 변화가 확인되었다.

#### 후 기

본 연구는 2011 년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2009T100100576)

#### 참고문헌

- (1) Dong, K.M., Jung, S.N. and Shin, C., 2001 "Performance Prediction and Structural Analysis of Counter-Rotating Wind Turbine Blade," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, 2001, Autumn, pp.708~711
- (2) Kim, J.K., Lim, D.M., Yoon, I.S. and Kang, K.W., 2006, "Fatigue Analysis of Fiber-Reinforced Composites Using Damage Mechanics," *Transaction of KSME (A)*, Vol. 30, No. 2, pp.112-119
- (3) Kam, T.Y., Tsai, S.Y. and Chu, K.H., 1997, "Fatigue Reliability Analysis of Composite Laminates Under Spectrum Stress," *International Journal of Solids Structures*, Vol. 34, pp. 1441~1461
- (4) Yang, J.N. and Jones, D.L., 1980, "Effect of Load Sequence on the Statistical Fatigue of Composites," *AIAA Journal*, Vol.18, pp.1525~1531
- (5) Tanaka, S., Ichikawa, M. and Akita, S., 1984, "A Probabilistic Investigation of Fatigue Life and Cumulative Cycle Ratio," *Engineering Fracture and Mechanics*, Vol. 20, pp. 501~513
- (6) Liu, Y. and Mahadevan, S., 2005, "Probabilistic Fatigue Life Prediction of Multidirectional Composite Laminates," *Composite Structures*, Vol. 69, pp.11~19
- (7) Kang, K.W., Lim, D.M. and Kim, J.K., 2008, "Probabilistic Analysis for the Fatigue Life of Carbon/epoxy Laminates," *Composite Structures*, Vol. 85, pp.258-264



- (8) ASTM D 3039-00, 2000, "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials."
- (9) Zhao Y.-X., Gao Q., Sun X.-F., 1998, "A Statistical Investigation of The Fatigue Lives of Q235 Steel-Welded Joints," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 27, pp. 781~790.
- (10) Freudenthal, A. M., 1947, "The Safety of Structures," *Transactions of ASCE*, Vol. 112, pp. 125~180
- (11) Weibull++7, 2008, Users Manual, Reliasoft Inc.
- (12) Kang, K. W., Koh, S.K., Kim, D.K. and Kim, K.J., 2009, "Assessment of the Statistical Distribution of Flexural Strength of Woven-fabric Laminates with Impact-Induced Damage," *Composite Structures*, Vol. 90, pp.60~66
- (13) Abernethy, R. B., 1996, "The New Weibull Handbook," 2nd Edition, SAE Professional Development, pp. 2~7.
- (14) Sakin, R. and Ay, I., 2008, "Statistical Analysis of Bending Fatigue Life Data Using Weibull Distribution in Glass-Fiber Reinforced Polyester Composites," *Materials and Design*, Vol. 29, pp. 1170~1181.