

## 열화된 증기 터빈블레이드의 피로강도에 대한 확률론적 해석

김철수\* · 정화영\*\* · 김정규\*\*\*

### A Stochastic Analysis in Fatigue Strength of Degraded Steam Turbine Blade Steel

Chul-Su KIM, Hwa-Young JUNG and Jung-Kyu KIM

**Key Words:** Degradation(열화현상), Correlation Coefficient(상관계수,  $\gamma$ ), Coefficient of Skewness(비대칭성 계수) Error-Parameter(오차모수,  $d$ ) Strength-Stress Interference Model(강도-응력 간섭 모델), Weibull distribution(와이블 분포), Monte Carlo Simulation(몬테카를로 시뮬레이션)

#### Abstract

In this study, the Reliability of degraded steam turbine blade was evaluated using the limited fatigue data. The statistical estimation of limited fatigue data implies that some unknown uncertainties which may be involved in fatigue reliability analysis. Therefore, an appropriate distribution in the fatigue strength was determined by the characteristic distribution - linear correlation coefficient, fatigue physics, error parameter. 3-parameter Weibull distribution is the most appropriate distribution to assume for infinite region. The load applied on the blade is mainly tensile. The maximum Von-Mises stress is 219.4 MPa at the steady state service condition. The failure probability( $F_p$ ) derived from the strength-stress interference model using Monte carlo simulation under variable service condition is 0.25% at the 99.99% confidence level

#### 1. 서론

증기터빈 블레이드는 디스크 원주위에 부착되어 증기 운동에너지를 기계적인 에너지로 전환시켜주는 고속·회전하는 설비로서, 특히 저압 증기터빈 최중단(L-0)은 블레이드 파손사례들 중 대부분을 차지하고 있다.<sup>(1)</sup> 이의 원인은 오랜 운전기간동안 증기 내에 불순물의 농축에 의한 피트(pitting)를 유발하는 부식과 회전시 발생하는 공진, 원심력 및 굽힘응력 등에 의한 피로 등으로 인하여 열화현상(degradation)으로 보고되고 있다.<sup>(2)</sup> 따라서 블레이드

의 파손 방지 및 잔여수명예측을 위하여 열화제를 대상으로 피로강도 및 수명평가가 필요하다.

국내외에서 터빈 블레이드에 관한 연구는 대부분 이론적인 해석을 통하여 수행되어왔다. 예를 들어, Congleton<sup>(3)</sup> 등이 유한요소법(FEM)을 이용하여 블레이드 루트와 디스크의 접촉면에 대하여 응력 해석을 수행하였고, Vyas<sup>(4)</sup> 등은 터빈 블레이드 운전시 받는 동적하중에 대하여 동역학적 관점에서 피로손상을 해석하였다. 또한 Thauvin<sup>(5)</sup> 등은 터빈 블레이드재를 대상으로 부식피로하의 재료거동을 미시조직학적 관점에서 파악하였다. 한편 국내에서는 남승훈<sup>(6)</sup> 등이 증기터빈 블레이드의 균열성장특성을 분석하였고, 김효진<sup>(1)</sup> 등은 터빈의 손상 메카니즘을 분석하고 이의 진단방법과 수명평가 기술을 소개하였다.

\* 회원, 한양대학교 대학원

\*\* 비회원, 한양대학교 대학원

\*\*\* 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail: kimj@email.hanyang.ac.kr

Tel: (02) 2290-0563, FAX: (02) 2291-6707

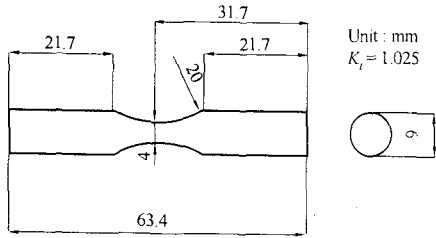


Fig. 1 Configuration of fatigue specimen

Table 1 Chemical composition (wt %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
Test mat.	0.21	0.3	0.42	0.023	0.001	11.77	0.92	0.61	0.27
SUH 616B	0.25	0.4	0.82	0.016	0.005	11.40	0.9	0.6	0.28

Table 2 Mechanical properties

Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HB)	Grain size (No.)
Test mat.	778	993	20.1	304	5~6
SUH 616B	794	1013	15	—	5.9

이상의 연구들은 건전재(raw material)를 대상으로 결정론적인 관점에서 블레이드의 손상을 규명하고 건전성을 평가하였지만, 열화재(degraded material)에 대한 강도와 운전조건의 변동성을 고려한 확률론적인 해석은 대단히 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 증기터빈 최종단 저압 블레이드에서 채취된 열화재를 대상으로 고사이클 피로시험을 수행하여 이의 피로강도 및 신뢰성을 평가하였다.

## 2. 이론해석 및 실험방법

### 2.1 재료 및 시험편

본 연구에서 사용된 재료는 12Cr강으로써 저압 증기터빈(low pressure steam turbine, LP turbine)의 마지막단에서 직접 채취한 것이다. 이 재료는 증기압 1.15MPa과 40~60℃의 온도범위에서 약 12년의 운전이력을 갖는 열화재이다. 이 열화재 및 화학조성이 유사한 건전재 SUH 616B<sup>(7)</sup>의 화학성분 및

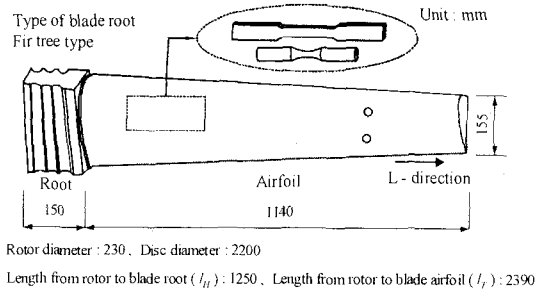


Fig. 2 Schematic representation of tensile and high cycle fatigue specimen extracted from LP turbine blade

기계적 성질은 Table 1 및 2와 같다. 기계적 성질은 ASTM E8M-97규정에 따라 속도 0.4mm/min의 변위 제어로서 7개 시험편에 대한 인장시험으로 얻은 평균값이다.

Fig. 1은 S-N 선도를 얻기 위한 회전 굽힘 피로 시험편의 형상을 나타낸 것이다. 인장 및 피로시험편의 채취방향은 블레이드의 회전에 따른 원심력에 의한 지름방향으로 변형이 발생하고 증기압에 의한 굽힘력이 작용하므로 Fig. 2와 같이 채취하였다.

### 2.2 피로시험

피로시험은 상온의 대기 중에서 최대굽힘모멘트 30 N·m, 회전수 2870 rpm인 전기모터식 회전굽힘 피로시험기를 사용하였고, 이 때 응력비 R는 -1이다. S-N선도를 이용한 피로강도의 평가에 있어서는 무한수명영역인 수평부에서 총 26개의 피로시험편을 사용하여 계단식 시험법<sup>(8)</sup>(Staircase Test Method)으로 시험을 수행하였다.

### 2.3 블레이드의 응력해석

블레이드의 주된 작용하중 형태는 회전에 의한 길이방향의 원심력과 증기압력으로 인해 발생하는 굽힘력이며 그 중에서 원심력이 지배적이다.<sup>(9,10)</sup> 블레이드의 원심응력( $\sigma_c$ )과 굽힘응력( $\sigma_b$ )는 각각 식 (1)~(4)에 의하여 얻어진다.<sup>(9)</sup>

$$\sigma_c A(l) = \int_0^{l_r} \rho \omega^2 A(l) dl \quad (1)$$

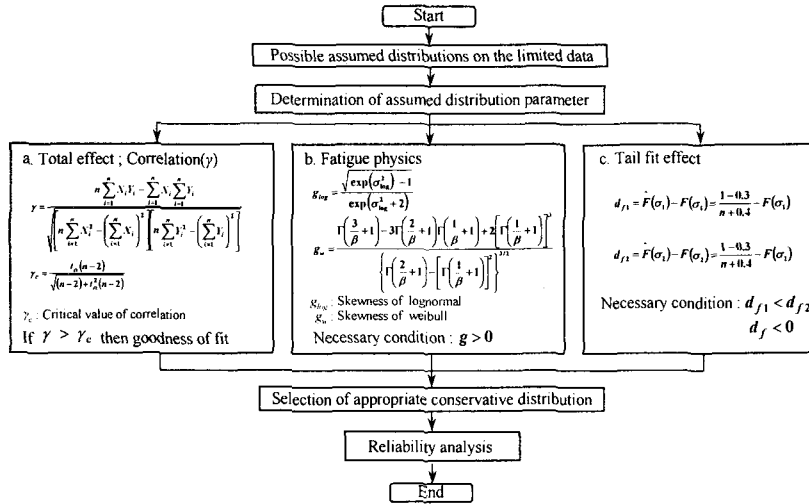


Fig. 3 Process of probabilistic analysis

$$BM_Z = \int_{l_H}^{l_T} 2\pi\rho_1 w l(\Delta v)(l - l_H) dl$$

$$BM_\theta = \int_{l_H}^{l_T} 2\pi l(\Delta p)(l - l_H) dl \quad (2)$$

$$M_{xx} = M_z \cos \theta + M_\theta \sin \theta$$

$$M_{yy} = M_\theta \cos \theta - M_z \sin \theta \quad (3)$$

$$\sigma_b = [(M_{xx} y_{max}) / I_{xx}] + [(M_{yy} x_{max}) / I_{yy}] \quad (4)$$

여기서  $A(l)$ 은 블레이드 단면적,  $B$ 는 블레이드의 개수이며,  $\rho$ ,  $\rho_1$ 는 블레이드체의 밀도와 물의 밀도이다. 또한  $w$ 는 로터의 각속도이고,  $\Delta v$ ,  $\Delta p$ 는 증기속도차와 압력차를 나타내며,  $\theta$ 는 주축과 이루는 각도를 말한다. 이로부터 각각의 응력들은 블레이드의 운전조건을 고려하여 구할 수 있다.

#### 2.4 피로수명의 확률론적 해석

기계구조물의 강도와 작용하중에 의한 신뢰성 평가를 위해서는 임의의 피로강도에 대한 확률론적 특성을 정확히 결정하는 것이 매우 중요하다. 이에 대한 기존의 보고<sup>(8,11)</sup>에 따르면 특정한 확률분포로써 가정하여 이의 특성을 평가하는 것이 대부분이다. 그러나 실제로 수개의 파손수명 자료로서는 적합한 확률분포를 가정하는 것은 불충분하다

로 다양한 확률분포로부터 합리적인 분포를 선택하는 것이 타당하다.<sup>(12,13)</sup> Freudenthal<sup>(14)</sup>은 적합한 확률분포는 반드시 물리적 현상에 대한 이해를 기반으로 만족해야 한다고 지적하였으며, Zhao 등<sup>(15)</sup>은 유한 수명영역에서 수개의 데이터로부터 피로수명에 대한 적합한 확률론적 분포의 선택을 보고하였다. Fig. 3은 적합한 확률분포의 선택과정에 대한 흐름도를 나타낸 것이다. 흐름도 중간에서 보는 바와 같이 각각의 확률분포들은 세가지 사항에 대하여 해석된 후 물리적 현상에 적합한 분포가 선택된다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 블레이드의 작용응력

블레이드의 신뢰성해석을 위해서는 실제운전조건을 변동성을 고려한 작용응력의 검토가 필요하다. Table 3은 블레이드의 정상상태 운전조건을 나타낸 것이며, Fig. 4는 이로부터 얻어진 블레이드의 응력을 식 (1)~(4)로부터 구하고 이들 값을 길이방향에 따라 나타내 것이다. 이 그림에서 정상상태로 운전할 시 내부에서 받는 주된 응력은 원심력으로 발생하는 응력이며, 이때 원심응력과 굽힘응력을 고려한 최대 Von-Mises 응력값은 블레이드 길이방향의 약 1/3지점에서 219.4 MPa로 나타났다. 이의 위치는 이전 연구<sup>(15)</sup>의 해석결과와 일치하였다.

Table 3 Service condition for LP steam turbine of last stage

12Cr steel density ( $\rho$ ) kg/mm <sup>3</sup>	7.70E-6
$\rho_1$ (water) : kg/mm <sup>3</sup>	9.83E-07
Angular velocity of Rotor	1800 rpm
$\Delta v$ (mm/s)	10005.96
$\Delta p$ (kPa)	101.6
$v_0$ (mm/s)	900000
Number of blade, B	145

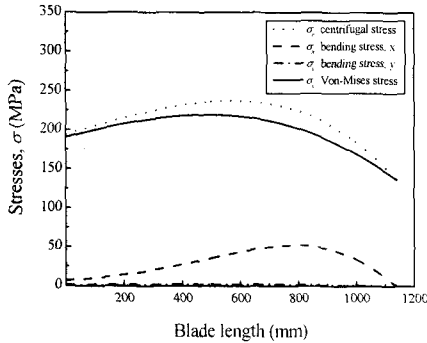


Fig. 4 Von-Mises stress for LP steam turbine of last stage

3.2 고수명영역에서의 피로강도의 확률론적 특성  
블레이드의 신뢰성평가를 위해서는  $S-N$  선도상에 수평부, 즉 피로한도의 확률분포가 정확히 평가되어야 한다. 따라서 이를 위하여 가장 많이 적용되는 계단식 시험법에 따라 평가하였다.

Fig. 5는  $R=-1$ 에서 응력과 피로수명과의 관계인  $S-N$  선도를 나타낸 것이다. 이 그림에서 삼각형점 ( $\blacktriangle, \triangle$ )은 Table 1과 같이 화학적 조성이 유사한 SUH 616B강의 회전굽힘시험 결과<sup>(7)</sup>를 나타낸 것이다. 본 시험편의 무한수명( $2 \times 10^7$ 사이클이상)에서 피로한도의 평균값,  $\sigma_w$ 은 약 500 MPa이고, 운전이력이 없는 SUH 616B강의 경우 약 539MPa이다. 따라서 운전이력이 없는 SUH 616B강을 원재료라고 보면, 피로한도는 열화로 인하여 약 8% 감소된 것으로 사료된다.

한편 유한한 수개의 데이터로부터 적합한 확률분포를 구하기 위해서는 가정한 분포들 중에서 Fig. 3의 절차에 따라 평가하여 선택되어야 한다. 또한 계단식 평가법으로 구한 파단 및 미파단된 데이터를 모두 통계적으로 처리하기 위해서 Adjusted rank<sup>(15)</sup>를 적용하는 것이 타당하다. Table 4~6는 Fig. 3에서 제시한 조건에 따라 가정한 분

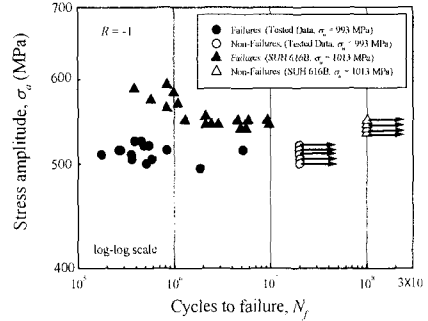


Fig. 5 Results of rotating bending test for turbine blade steel and SUH 616B

포들의 해석결과를 정리한 것이다. Table 4에서 분포의 전체 적합효과(total fit effects)를 살펴보면, 가정한 분포들의 상관계수값(correlation,  $\gamma$ )은 모두 위험검정률(significance level)  $\alpha = 0.01$ 에 대한 임계 선형상관계수(critical correlation coefficient,  $\gamma_c$ )보다 큰 값을 나타내고 있다. 특히 분포들중에서 2모수와 3모수 와이블분포의 상관계수값(correlation,  $\gamma$ )이 가장 크며, 이는 가정한 분포들 중에서 가장 좋은 적합성을 의미한다. Table 5는 피로 물리적 현상의 일치성(the consistency with fatigue physics)을 검토한 것으로 2모수 와이블분포의 경우, 비대칭성 계수(coefficient of skewness,  $g$ )는 음의 값( $g < 0$ )이 나타난다. 이는 비가역적 누적손상(irreversible cumulative damage)에 위배되므로 적합한 분포라고 할 수 없다. Table 6은 각각의 분포 끝영역에서 적합효과에 대한 결과를 정리한 것이다. 이는 실험값과 이론적인 값 사이의 오차모수(error-parameter,  $d_f$ )로부터 평가된다. 가정한 분포의  $d_f$ 가 0보다 작고, 임의의 단계에서  $d_{n1}$ 이 그 다음단계에서  $d_{n2}$ 보다 작은 경우에 끝영역에서 적합효과는 보다 안정적이다. 따라서 각각의 분포중에서 3모수 와이블분포가 이에 해당된다. 결론적으로 Table 4~6로부터 본 재료의 수평부에서 피로강도는 3모수 와이블분포가 가장 적합하다고 할 수 있으며, 이의 각 모수를 평가한 누적확률밀도함수는 식(5)과 같이 구하였다.

$$F_r(r) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{r - 413.18}{137.19} \right)^{3.59} \right] \quad (5)$$

Table 4 The correlation coefficients of three distribution and relevant critical values at given significance levels for stress amplitude data

3모수-Weibull	2모수-Weibull	Log-normal	Significance level	Critical value
0.9855	0.9853	0.9653	0.01	0.8343

Table 5 The coefficients of skewness for stress amplitude data

3모수-Weibull	2모수-Weibull	Log-normal
0.10638	-0.64854	0.00723

Table 6 The failure probability differences at minimum and sub-minimum stress  $\sigma_1$  and  $\sigma_2$  of the three distribution for stress amplitude data

3모수-Weibull		2모수-Weibull		Log-normal	
$d_{\beta_1}$	$d_{\beta_2}$	$d_{\beta_1}$	$d_{\beta_2}$	$d_{\beta_1}$	$d_{\beta_2}$
-0.1185	-0.1117	-0.00218	0.00813	0.00859	0.0134

### 3.3 피로한도의 신뢰성해석

블레이드는 초기에 충분한 안전성으로 설계하였지만, 재료의 열화로 인하여 작용응력이 피로한도를 초과하는 경우나 비정상 운전으로 발생하는 작용응력의 변동성으로 파손이 일어날 수 있다. 따라서 블레이드의 절대적인 안전성을 검토하기 위하여 확률론적 평가로부터 얻어진 적합한 피로강도 분포와 작용응력의 확률분포특성으로부터 강도-응력 간섭모델<sup>(15)</sup>을 이용하여 파손확률을 평가하였다.

파손확률( $F_p$ )은 작용응력이 기계요소의 강도를 초과하여 파손이 발생하는 확률이며, 식(6)<sup>(16)</sup>과 같다.

$$F_p = P(\gamma \leq \sigma_s) = 1 - \Phi\left(\frac{\gamma_r - \mu_s}{\sigma_s}\right) - \frac{\eta_r}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \times \int_0^\infty \exp\left\{-\left[\frac{1}{2}\left(\frac{w\eta_r}{\sigma_s} + \frac{\gamma_r - \mu_r}{\sigma_s}\right)^2 + w^{\beta_r}\right]\right\} dw \quad (6)$$

여기서  $r, s$ 는 강도와 작용응력을 의미하고  $\beta_r, \eta_r$  및  $\gamma_r$ 는 형상계수, 척도계수 및 위치계수를 나타낸다. 또한  $\mu_s$ 와  $\sigma_s$ 는 정규분포의 평균과 분산을 의미하고,  $w = \frac{s - \gamma_r}{\eta_r}$ ,  $dw = \frac{ds}{\eta_r}$ 이다.

한편 블레이드는 재료의 강도저하와 기동 및 운

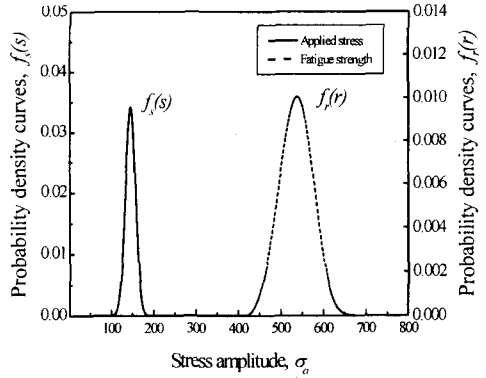


Fig. 6 Comparison of probability density function between fatigue strength and applied stress

전미속으로 인한 공진발생으로 파손<sup>(1)</sup>이 나타날 수 있다. 이와 같은 변동성을 고려한 블레이드의 신뢰성 평가를 위하여 이의 가장 유용한 방법인 몬테카를로시뮬레이션<sup>(17)</sup>(Monte carlo simulation)을 이용하였다. 여기서 기동 및 운전시 발생하는 로터속도와 증기속도의 변동성은 임의로 정규분포로 가정하고 정상상태값에서 각각 10%와 0.1%의 분산으로 가정하였다. 이와 같은 확률론적 특성을 고려하여 난수를 발생하였으며, 시뮬레이션의 결과인 작용응력은 응력해석결과와 같이 인장력이 지배적이므로 이를 고려하여  $R=0$ 에서 Goodman 식<sup>(18)</sup>을 사용하여 변환시켰다. 이로부터 작용응력의 누적확률밀도함수는 식(7)과 같이 평가하였다.

$$F_s(s) = \int_{-\infty}^s \frac{1}{11.68\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{s-144.96}{11.68}\right)^2\right] ds \quad (7)$$

Fig. 6은 식 (5)과 식(7)에 나타난 모수들을 이용하여 식 (1)~(4)로 평가한 블레이드의 작용응력과 피로강도의 확률밀도함수를 함께 나타낸 것이다. 이로부터 식(6)에 의하여 파손확률을 평가하면 운전조건의 변동성을 고려한 블레이드의 파손확률은 99.99%의 신뢰구간에서 0.25%로서 매우 안전하다.

## 4. 결론

본 연구에서는 12년 운전이력을 갖는 저압 증기터빈 최종단 블레이드재를 대상으로 피로시험을 통하여 작용응력에 대한 블레이드재의 피로강도와

신뢰도를 평가하였다.

1. 12년 열화된 터빈블레이드재의 피로강도를 평가한 결과  $R = -1$ 에서의 피로한도의 평균값은 다음과 같다.

$$\sigma_w \approx 500 \text{ MPa}$$

2. 확률분포의 특성(correlation, fatigue physics, tail fit effect)에 의하여 피로강도를 평가한 결과, 가장 적합한 분포는 3모수 Weibull 분포임을 알 수 있었다.

3. 원심력 및 증기압력으로부터 터빈블레이드에 작용하는 하중을 검토한 식으로 정상상태 운전조건에서 최대 Von-Mises 응력값은 219.4 MPa로 나타났다.

4. 운전조건의 변동성을 고려하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션(Monte carlo simulation)을 이용하였으며, 로터속도와 증기속도의 변동성을 10%와 0.1%로 가정하였다. 시뮬레이션의 결과와 재료강도의 변동성을 고려한 신뢰성평가를 위해 강도-응력 간섭모델을 이용하여 안전성을 평가한 결과, 블레이드의 파손확률은 99.99%의 신뢰구간에서 0.25%로서 매우 안전하였다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) 한전사업단 전력연구소, 1997, 터빈 블레이드 신뢰성확보 기술, pp.11~19.
- (2) 김효진, 1998, 대한기계학회, 재료 및 파괴부문 1차 학술대회 논문집, pp. 5~10.
- (3) J. Congleton, W. Chen, 1990 *Int J Fatigue*, Vol.12, pp.91~98.
- (4) N. S. Vyas, Sidharth, J. S. Rao, 1997, *Mech. Mach. Theory*, Vol.32, No.4, pp.511~527.

- (5) G. Thauvin, B. Vittement, 1996, *Proceedings of the Sixth International Fatigue Congress, Fatigue* 96, Vol.2, pp.1171~1176.
- (6) 남승훈, 이주진 외 3명 1990, 대한금속학회지, Vol.28, No.10, pp.685~690.
- (7) The Society of Materials Science, Japan, 1996 *Data book on Fatigue Strength of Metallic Materials*, Elsevier Science Vol.2, pp.1257~1259.
- (8) John R. et al. 1996, *Metals Handbook Ninth Edition Vol.8 Mechanical Testing*, American Society for Metals, pp. 701~706.
- (9) Jack L. Kerrebrock, 1989, *Aircraft Engines and Gas Turbines*, The Massachusetts Institute of Technology, pp. 189~195.
- (10) J. Grant, D. Hopkinson. et al. 1988, *Titanium Steam Turbine Blading, Workshop Proceedings Palo Alto, California 9-10 November, EPRI ER-6538* prepared for the Electric Power Research Institute, pp. 149~168.
- (11) Japan Society of Mechanical Engineers, 1994 *S-N Test Method*, JSME S 002, pp. 8~16.
- (12) Y.-X. Zhao, Q. Gao, J.-N. Wang, 2000, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 12, pp.1~7.
- (13) Y.-X. Zhao, Q. Gao, X.-F. Sun, 1998, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol.27, pp.781~790
- (14) Freudenthal, A.M., 1947, *Transactions of ASCE* Vol. 112, pp125~180.
- (15) Abernethy, R. B., 1996, *The New Weibull Handbook*, 2<sup>nd</sup> Edition, SAE Professional Development, pp. 2-7.
- (16) Shu-Ho Dai, Ming-O Wang, 1992, *Reliability Analysis in Engineering Applications*, Van Nostrand Reinhold, pp. 22~24.
- (17) Achintya Haldar, Sankaran Mahadevan, 2000, *Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering Design*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 250~261.
- (18) Dowling, N. E., 1993, *Mechanical Behavior of Materials*, Prentice-Hall International Editions, pp. 444~450.