

몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 증기 터빈블레이드재의 확률론적 해석

김철수* · 정화영** · 강명수*** · 김정규†
(2002년 4월 8일 접수, 2002년 9월 5일 심사완료)

A Stochastic Analysis in Steam Turbine Blade Steel Using Monte Carlo Simulation

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

Key Words: Degradation(열화현상), Correlation Coefficient(상관계수), Coefficient of Skewness(비대칭성 계수), Error-Parameter(오차모수), Strength-Stress Interference Model(강도-응력 간섭 모델), Weibull Distribution(와이블 분포), Monte Carlo Simulation(몬테카를로 시뮬레이션), Characteristic Factor of Safety(특성 안전계수)

Abstract

In this study, the failure probability of the degraded LP turbine blade steel was performed using the Monte Carlo simulation to apply variation of applied stress and strength. For this purpose, applied stress under the service condition of steady state was obtained by theoretical stress analysis and the maximum Von-Mises stress was 219MPa. The fatigue strength under rotating-bending load was evaluated by the staircase method. Furthermore, 3-parameter Weibull distribution was found to be most appropriate among assumed distributions when the probabilistic distributions of tensile and fatigue strength were determined by the proposed analysis. The failure probability with various loading conditions was derived from the strength-stress interference model and the characteristic factor of safety was also estimated.

기호설명

$A(l)$: 블레이드의 단면적
 B : 저압 증기터빈 최종단의 블레이드 개수
 ρ : 블레이드재의 밀도
 ρ_1 : 증기의 밀도
 w : 터빈로터의 각속도
 Δv : 블레이드 마지막단의 증기 속도차
 Δp : 블레이드 마지막단의 압력차
 θ : 블레이드 루트와 블레이드날개의 각도

l_H : 터빈로터부터 블레이드 루트까지 거리
 l_T : 터빈로터부터 블레이드날개 끝까지 거리
 $\beta_r, \eta_r, \gamma_r$: 피로강도에 대한 3모수 와이블분포의 형상계수, 척도계수, 위치계수
 μ_r, σ_r : 피로강도의 평균과 표준편차
 μ_s, σ_s : 작용응력의 평균과 표준편차
 a, b : 신뢰구간에 따른 상수

1. 서론

증기터빈 블레이드는 디스크 원주위에 부착되어 증기 운동에너지를 기계적인 에너지로 전환시켜주는 고속·회전하는 발전소 주요 설비부품중의 하나이다. 이의 파손사고 발생수는 다른 설비부품보다 많은 것으로 보고되고 있으며,⁽¹⁾ 특히 저

* 회원, 한양대학교 대학원
 ** LG 이노텍
 *** 회원, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원
 † 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부
 E-mail : kimj@hanyang.ac.kr
 TEL : (02)2290-0563 FAX : (02)2291-6707

압 증기터빈 최종단은 블레이드 파손사례들 중 대부분을 차지하고 있다.⁽²⁾ 블레이드의 파손원인은 오랜 운전기간동안 증기 내에 불순물의 농축에 의한 피트(pitting)를 유발하는 부식과 회전시 발생하는 공진, 원심력 및 굽힘응력 등에 의한 피로로 인한 열화현상(degradation)으로 보고되고 있다.⁽²⁾ 따라서 이의 안전성을 위해서는 피로강도 및 수명평가가 필요하다.

국내외에서 터빈 블레이드에 관한 연구는 대부분 결정론적 관점에서 이론적인 해석을 통하여 수행되어왔다.^(2~5) 예를 들어, Congleton⁽³⁾ 등이 유한요소법(FEM)을 이용하여 블레이드 루트와 디스크의 접촉면에 대하여 응력해석을 수행하였고, Vyas⁽⁴⁾ 등은 터빈 블레이드 운전시 받는 동적 하중에 대하여 동역학적 관점에서 피로손상을 해석하였다. 또한 Thauvin⁽⁵⁾ 등은 부식피로하의 재료거동을 미시조직학적 관점에서 파악하였다. 한편 국내에서는 김효진⁽²⁾ 등이 터빈블레이드의 손상 메카니즘을 분석하고 이의 진단방법과 수명평가 기술을 소개하였다.

이상의 연구들은 결정론적인 관점에서 블레이드의 손상을 규명하고 건진성을 평가하였지만, 블레이드의 강도와 운전조건의 변동성을 고려한 확률론적인 해석 및 신뢰성을 평가한 연구는 매우 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 저압 증기터빈 블레이드의 최종단에서 채취된 신재 및 발전소에서 장시간 운전이력을 가진 열화재를 대상으로 피로시험을 수행하고, 강도 및 작용응력의 변동성을 동시에 고려할 수 있는 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 블레이드의 신뢰성을 평가하고자 한다.

2. 이론해석 및 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에서 사용된 재료는 12Cr강으로서 저압 증기터빈(low pressure steam turbine, LP turbine)의 마지막단에서 직접 채취한 것이다. 이 재료의 화학성분은 Table 1과 같다. Table 2는 블레이드의 기계적 성질을 나타낸 것으로 신재 및 열화재는 증기압 1.15MPa과 40~60℃의 온도범위에서 각각 1년 및 12년의 운전이력을 가진 것이다. 기계적 성질은 신재 및 열화재의 시험편(각각 6개, 8개)에 대하여 ASTM E8M-97규정에 따라 속도

Table 1 Chemical composition (wt %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
0.2~0.26	Max. 0.5	0.3~0.8	Max. 0.025	Max. 0.02	11.0~12.5	0.8~1.2	0.3~0.8	0.25~0.35

Table 2 Mechanical properties

Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HB)	Reduction area (%)
Raw mat.	778	993	20.1	304	46
Degraded mat.	750	990	20.3	297	47

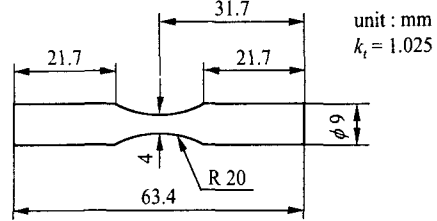
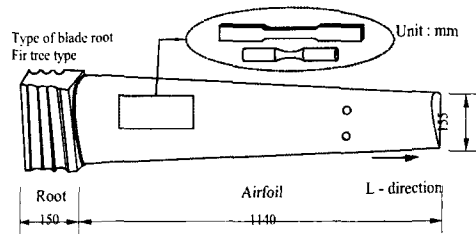


Fig. 1 Configuration of fatigue specimen



Rotor diameter : 230 . Disc diameter : 2200
Length from rotor to blade root (L_r) : 1250 . Length from rotor to blade airfoil (L_a) : 2390

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

0.4mm/min의 변위 제어로써 인장시험으로 얻은 평균값이다. Fig. 1은 피로강도를 얻기 위한 회전 굽힘 피로시험편의 형상을 나타낸 것이다. 인장 및 피로시험편의 채취방향은 블레이드의 회전에 따른 원심력에 의한 지름방향으로 변형이 발생하고 증기압에 의한 굽힘력이 작용하므로 Fig. 2와 같이 채취하였다.

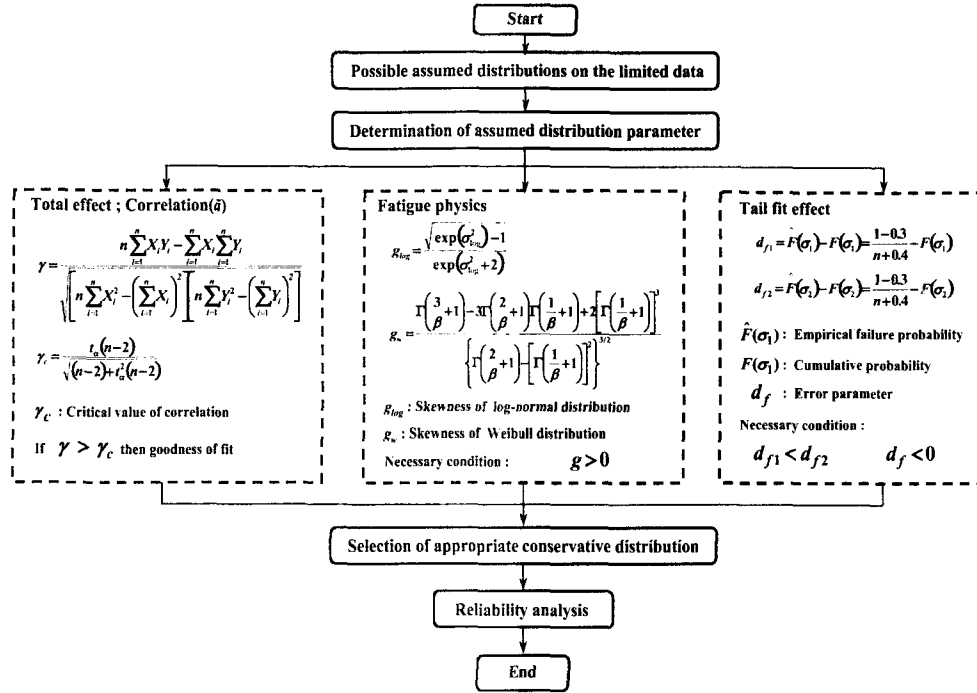


Fig. 3 Process of probabilistic analysis

2.2 피로시험

피로시험은 상운의 대기 중에서 최대굽힘모멘트 30N·m, 회전수 2870rpm인 전기모터식 회전굽힘 피로시험기를 사용하였고, 이 때 응력비 $R = -1$ 이다. 신재 및 열화재의 피로강도에 대한 확률론적 해석을 위한 시험 방법은 계단식 시험법⁽⁶⁾(staircase test method)으로 수행하였다.

2.3 블레이드의 응력해석

블레이드의 주된 작용하중 형태는 회전에 의한 길이방향의 원심력과 증기압력으로 인해 발생하는 굽힘력이며 그 중에서 원심력이 지배적이다.^(7,8) 블레이드의 원심응력 σ_c (centrifugal stress)는 식 (1)에 의하여 얻어지고, 굽힘응력 σ_b (bending stress)는 식 (2)와 식 (3)으로부터 식 (4)에 의하여 얻어진다.⁽⁷⁾

$$\sigma_c A(l) = \int_l^{l_r} \rho w^2 A(l) dl \tag{1}$$

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

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

$$\begin{aligned} M_{xx} &= M_z \cos \theta + M_\theta \sin \theta \\ M_{yy} &= M_\theta \cos \theta - M_z \sin \theta \end{aligned} \tag{3}$$

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

여기서 $A(l)$ 은 블레이드 단면적, B 는 블레이드의 개수이며, ρ 및 ρ_1 은 각각 블레이드재의 밀도와 증기의 밀도이다. 그리고 M_z , M_θ 는 블레이드 주축 단면에 작용하는 굽힘모멘트이며, x_{max} , y_{max} 는 각 축으로부터의 최대거리를 나타낸다. 이들 식으로부터 블레이드의 운전조건을 고려하면 이에 작용하는 응력을 구할 수 있다.

2.4 피로강도의 확률론적 해석

피로강도에 대한 연구결과^(6,9)에 따르면, 피로강도분포는 특정한 확률 분포로 가정하여 이의 특성을 평가하는 것이 대부분이다. 그러나 실제로 수 개의 파손수명 자료로서는 특정한 확률분포를 가정하는 것은 불충분하므로 다양한 확률

Table 3 Service condition for LP steam turbine of last stage

ρ (kg/mm ³)	7.70E-6
ρ_i (water : kg/mm ³)	9.83E-07
w (rev/min)	1800
Δv (mm/s)	10005.96
Δp (kPa)	101.6
v_0 (mm/s)	900000
Number of blade, B	145

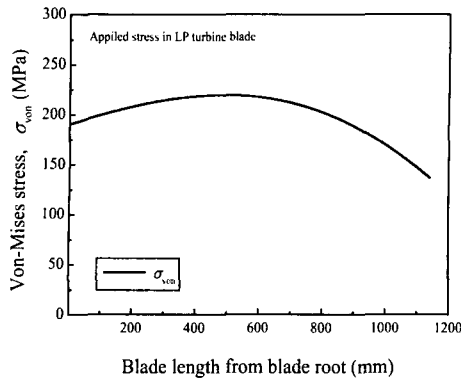


Fig. 4 Von-Mises stress for LP steam turbine of last stage

분포로부터 적합한 분포를 선택하는 것이 타당하다.^(10,11) Freudenthal⁽¹²⁾은 적합한 확률분포는 반드시 물리적 현상에 대한 이해를 기반으로 만족해야 한다고 지적하였으며, Zhao 등⁽¹¹⁾은 유한 수명 영역에서 수개의 데이터로부터 피로수명에 대한 적합한 확률분적 분포의 선택을 보고하였다. Fig. 3은 적합한 확률분포의 선택과정에 대한 흐름도를 나타낸 것이다. 각각의 확률분포들은 흐름도 중간에서 보는 바와 같이 세 가지 사항에 대하여 해석된 후 물리적 현상에 적합한 분포가 선택된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 블레이드의 작용응력

블레이드의 신뢰성해석을 위해서는 실제운전 조건을 고려한 작용응력의 검토가 필요하다. Table 3은 블레이드의 정상상태 운전조건을 나타낸 것이며, Fig. 4는 이의 조건에서 식 (1) ~ (4)를 이용하여 블레이드의 응력을 구하고, 이들 값을 길이방향에 따라 나타낸 것이다. 이 그림에서

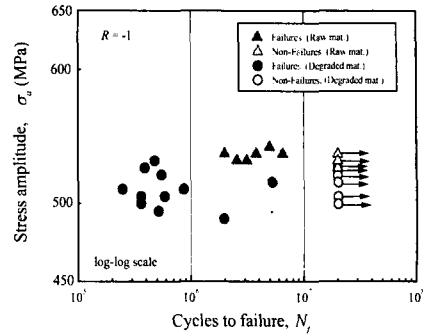


Fig. 5 Results of rotating bending test for raw and degraded material

Table 4 Fatigue test of raw and degraded material obtained from staircase test

Stress amplitude i (MPa)	Sequence (Raw mat.)					0	X
3 540				X		0	1
2 535		X		0	X	X	1
1 530	X	0	X	0		0	3
0 525		0		0			2
Sum						6	6

Stress amplitude i (MPa)	Sequence (Degraded mat.)					0	X
8 530					X	0	1
7 525		0	X			1	1
6 520	0		X			1	1
5 515	0			X		1	1
4 510				X	X	0	2
3 505					0	X	X
2 500						0	X
1 495							X
0 490						X	0
Sum						5	11

(X:Failure, 0 :Non-failure)

정상상태로 운전할 시 블레이드에서 받는 주된응력은 원심력에 의한 것이며, 이때 원심응력과 굽힘응력을 고려한 최대 Von-Mises 응력값은 블레이드 길이방향의 약 1/3 지점에서 219.4MPa로 평가되었다. 최대응력의 발생지점은 이전 연구⁽⁸⁾의 해석결과와 일치하였다.

3.2 고수명영역에서 피로강도의 확률론적 특성

Fig. 5는 2×10^7 사이클에 대한 피로강도를 얻기 위하여 $R = -1$ 에서 응력과 피로수명과의 관계인 $S-N$ 선도를 나타낸 것이다. 이 그림에서 삼각형점($\blacktriangle, \triangle$)은 신재, 원형점(\bullet, \circ)은 열화재의

결과이다. 여기서 2×10^7 사이클에 대한 피로강도는 Table 4와 같이 12개의 신재 시험편과 16개의 열화재 시험편에 대한 계단식 시험⁽⁶⁾의 결과로부터 구하였다. 이에 대한 신재 및 열화재의 피로강도 평균값⁽⁹⁾은 각각 532MPa, 515MPa이다.

한편 Fig. 5의 신재 및 열화재의 피로강도로부터 적합한 확률분포를 구하기 위해서는 Fig. 3의 절차에 따라 평가하여 선택되어야 한다. 또한 계단식 평가법으로 구한 파단 및 미파단된 데이터를 모두 통계적으로 처리하기 위해서 Adjusted rank⁽¹³⁾를 사용하는 것이 타당하다. Table 5~7은 신재 및 열화재를 대상으로 Fig. 3에서 제시한 조건에 따라 2, 3모수 와이불분포(2, 3 parameter Weibull distribution)와 대수정규분포(Log-normal distribution)에 대한 전체 적합효과(total fit effect),^(10,11) 피로 물리적 현상의 일치성(consistency with fatigue physics),⁽¹⁰⁻¹²⁾ 분포끝영역의 적합효과(tail fit effect)^(10,11)의 값을 정리한 것이다. Table 5에서 신재 및 열화재의 3가지 분포에 대한 전체 적합효과(total fit effects)를 살펴보면, 이들의 상관계수값(correlation, γ)은 모두 위험검정률(significance level) $\alpha = 0.001$ 에 대한 임계 선형상관계수(critical correlation coefficient, γ_c)보다 큰 값을 나타내고 있다. 특히 분포들중에서 3모수 와이불분포의 상관계수값(correlation, γ)이 가장 크며, 이는 가정된 분포들 중에서 가장 좋은 적합성을 의미한다. Table 6은 이들 재료의 3가지 분포에 대한 피로 물리적 현상의 일치성(the consistency with fatigue physics)을 검토한 것이다. 2모수 와이불분포의 경우, 비대칭성 계수(coefficient of skewness, g)는 음의 값($g < 0$)이 나타나며, 대수정규분포는 비대칭성이 0에 근접하므로 분포의 형상이 좌우대칭임을 알 수 있다. 이는 비가역적 누적손상(irreversible cumulative damage)⁽¹⁰⁾에 의해 피로로 적합한 분포라고 할 수 없다. Table 7은 이들 재료의 3가지 분포에 대한 끝영역에서 적합효과를 정리한 것이다. 이는 실험값과 이론적인 값 사이의 오차모수(error-parameter, d_f)⁽¹⁰⁾로부터 평가된다. 각 분포의 d_f 가 0보다 작고, 임의의 단계에서 d_{f1} 이 그 다음단계에서 d_{f2} 보다 작은 경우에 끝 영역에서 적합효과는 보다 안정적이다. 열화재의 경우를 살펴보면 적합효과는 3가지 분포에서 적합하지만, 신재의 대수정규는

Table 5 The correlation coefficients of three distribution for fatigue strength

	3모수 Weibull	2모수 Weibull	Log-normal
Raw mat.	0.9442	0.9245	0.9423
Degraded mat.	0.9950	0.9792	0.9931

(Significance level $\alpha = 0.001$, critical value = 0.8199)

Table 6 The coefficients of skewness for fatigue strength

	3모수 Weibull	2모수 Weibull	Log-normal
Raw mat.	0.1677	-1.1057	0.0026
Degraded mat.	0.2759	-1.0181	0.0098

Table 7 The failure probability differences at minimum and sub-minimum stress σ_1 and σ_2 of the three distribution for fatigue strength

	3모수 Weibull		2모수 Weibull		Log-normal	
	d_{f1}	d_{f2}	d_{f1}	d_{f2}	d_{f1}	d_{f2}
Raw mat.	-0.0375	0.0578	-0.0279	0.0674	-0.0217	-0.2860
Degraded mat.	0.0004	0.0084	-0.0180	0.0076	-0.0048	0.0110

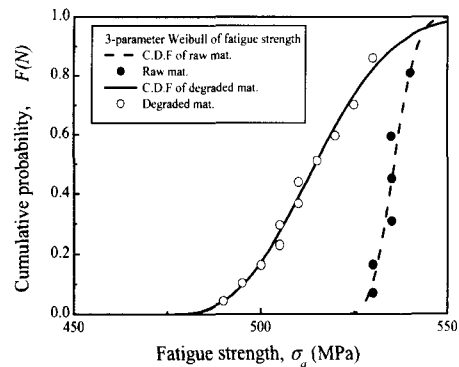


Fig. 6 Cumulative probability of the three parameter Weibull for fatigue strength

d_{f1} 이 d_{f2} 보다 큰 값을 가지므로 평가된 2, 3모수 와이불분포가 보다 안정적이라 할 수 있다. Fig. 6은 $R = -1$ 에 있어서 신재 및 열화재에 대한 3모수 와이불분포의 누적확률값과 데이터들을 나타낸 것이며, 이들의 누적확률밀도함수는 식 (5)과 같다.

신재:
$$F_r(r) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{r - 523.1}{14.3} \right)^{3.0} \right]$$

$$\text{열화재: } F_r(r) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{r - 476.3}{43.9} \right)^{2.7} \right] \quad (5)$$

여기서 r 은 피로강도를 의미한다.

3.3 몬테카를로 시뮬레이션

블레이드는 재료의 불균질성 및 열화로 인한 강도의 변동성과 기동 및 운전미속으로 인한 공진 발생으로 운전조건의 변동성⁽¹⁾이 존재하므로 이들을 동시에 고려한 신뢰성 평가가 필요하다. 따라서 재료의 인장 및 피로강도 그리고 작용응력의 변동성을 동시에 고려하는 파손확률을 평가하기 위하여 이의 가장 유용한 방법인 몬테카를로 시뮬레이션⁽¹⁵⁾(Monte carlo simulation)을 이용하였다. Fig. 7은 재료강도 및 운전조건의 변동성을 함께 고려한 몬테카를로 시뮬레이션 과정에 대한 흐름도를 나타낸 것이다. 여기서 블레이드가 받는 응력은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 인장응력성분을 가진 원심응력이 지배적이다. 따라서 같은 응력비에서 작용응력과 피로강도를 비교하기 위하여 식 (5)의 신재 및 열화재의 피로강도로부터 $R = 0$ 으로 인장강도의 확률분포특성에 준한 Goodman 식⁽¹⁶⁾을 사용하여 변환하였다. 그리고 신재 및 열화재에 대한 인장강도의 변동성은 Table 8에 보는 바와 같이 상관계수가 가장 큰 3모수 와이불분포로서 가정하였다. 인장강도의 누적확률밀도함수는 식 (6)과 같다.

$$\text{신재: } F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - 989.3}{4.7} \right)^{1.8} \right]$$

$$\text{열화재: } F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - 910.4}{82.9} \right)^{13.7} \right] \quad (6)$$

여기서 t 는 인장강도이다.

식 (5)와 식 (6)을 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하고 $R = 0$ 에 대한 신재 및 열화재의 피로강도값을 구하였다. 식 (7)은 이의 결과로서 신재 및 열화재의 누적확률밀도를 나타낸 것이다.

$$\text{신재: } F_r(r) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{r - 339.1}{6.9} \right)^{3.6} \right]$$

$$\text{열화재: } F_r(r) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{r - 318.2}{23.9} \right)^{3.4} \right] \quad (7)$$

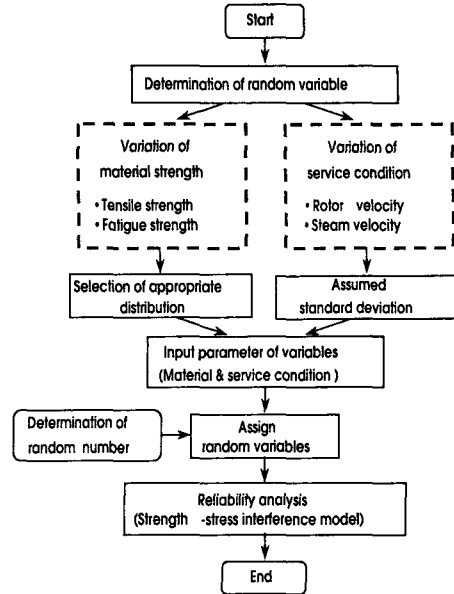


Fig. 7 Process of Monte carlo simulation for reliability analysis

Table 8 The correlation coefficients of three distribution of tensile strength

	3모수 Weibull	2모수 Weibull	normal
Raw mat.	0.9938	0.9364	0.9732
Degraded mat.	0.9912	0.9889	0.9882

Table 9 Variation of service condition for Monte carlo simulation

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
Variation of angular velocity of rotor	0.1%	0.1%	0.1%	3%	4%	5%
Variation of steam velocity	0.1%	10%	20%	0.1%	0.1%	0.1%
Mean of applied stress distribution	252.6	252.6	252.6	252.9	253.3	253.3
Standard deviation of applied stress distribution	0.54	1.62	3.13	15.98	21.46	26.31

여기서 r 은 피로강도이다.

한편 작용응력의 변동성은 실제 측정된 운전이력의 불충분으로 인하여 Table 3의 정상상태조건을 평균값(mean)으로 정하고, 기동 및 운전시 발생하는 로터각속도와 증기속도의 변동성을 0.1%~20%의 분산으로 하는 정규분포로서 가정하였다. 이와 같은 조건을 이용하여 몬테카를로 시

시뮬레이션을 수행하였으며, Table 9는 각 경우에 대한 시뮬레이션의 결과를 평균 및 표준편차로 정리한 것이다.

3.4 신뢰성 해석

블레이드는 초기에 충분히 안정적으로 설계되었지만, 오랜 기간 운전으로 인한 재료열화 및 비정상 운전으로 발생하는 작용응력의 변동성으로 파손이 일어날 수 있다. 따라서 블레이드의 안전성을 검토하기 위하여 적합한 피로강도분포와 작용응력의 확률분포 특성으로부터 강도-응력 간섭모델⁽¹³⁾을 이용하여 신재 및 열화재의 파손확률을 평가하였다.

파손확률 (F_p)은 작용응력이 기계요소의 강도를 초과하여 파손이 발생하는 확률이며, 식 (8)⁽¹⁴⁾과 같다.

$$F_p = P(r \leq s) = 1 - \Phi\left(\frac{\gamma_r - \mu_s}{\sigma_s}\right) - \frac{\eta_r}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \times \int_0^\infty \exp\left\{-\left[\frac{1}{2}\left(\frac{w\eta_r}{\sigma_s} + \frac{\gamma_r - \mu_s}{\sigma_s}\right)^2 + w^2\right]\right\} dw \quad (8)$$

여기서 β_r , η_r 및 γ_r 는 3모수 와이불분포의 형상계수, 척도계수 및 위치계수이고, 첨자 r 와 s 는 각각 강도와 작용응력인 경우를 표현한다. 또한 μ_s 와 σ_s 는 정규분포의 평균과 표준편차이

고, $w = \frac{s - \gamma_r}{\eta_r}$, $dw = \frac{ds}{\eta_r}$ 이다.

그리고 기계요소의 내구설계 관점에서 작용응력의 상위응력(upper-range stress)과 피로강도의 하위응력(lower-range stress)을 비교하는 특성안전계수(characteristic factor of safety, n_k)는 식 (9)에 의하여 얻어진다.⁽¹⁵⁾

$$n_k = \frac{r_k}{s_k} = \frac{\mu_r - a\sigma_r}{\mu_s + b\sigma_s} \quad (9)$$

여기서 r_k 와 s_k 는 각각 피로강도와 작용응력의 특성값이다.

Table 10은 식 (8)과 식 (9)에 의해서 Table 9의 각 경우에 대한 파손확률 및 특성안전계수를 정리한 것이다. 로터각속도의 변동성을 0.1%로 고정하고 증기속도의 변동성을 증가시킨 case1~case3의 경우 신재와 열화재의 파손확률은 각각

Table 10 Simulation results for characteristic factor of safety and failure probability

		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Raw mat.	C. F. S.	1.35	1.34	1.32	1.18	1.13	1.09
	F_p (%)	0.2479	0.2479	0.2479	0.2479	0.2484	0.2661
Degraded mat.	C. F. S.	1.27	1.26	1.24	1.12	1.07	1.03
	F_p (%)	0.2483	0.2483	0.2483	0.2488	0.2550	0.3297

F_p (%) : Failure probability

C. F. S. : Characteristic Factor of Safety

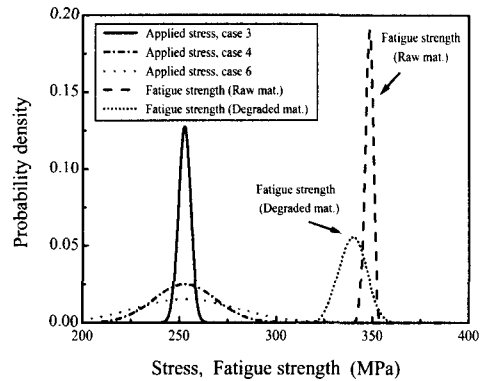


Fig. 8 Comparison of probability density between fatigue strength and applied stress in 3, 4, 6

0.2479%와 0.2483%로 일정하지만, 로터각속도의 변동성을 증가시킨 case4~case6에서는 파손확률이 증가되고 있다. 이는 Fig.4에서 보는바와 같이 전체 블레이드의 응력은 대부분 로터각속도에 의한 원심력이 차지하기 때문이다. 또한 시뮬레이션 결과, 열화재의 파손확률은 신재보다 높으며, 특성안전계수는 신재가 열화재보다 높다. Fig. 8은 case 3, 4, 6에 대한 블레이드의 작용응력과 피로강도의 확률밀도값을 함께 나타낸 예이다.

4. 결론

본 연구에서는 1년 및 12년 운전이력을 갖는 저압 증기터빈 최종단 블레이드에서 채취된 신재 및 열화재를 대상으로 피로시험을 수행하고, 적합한 피로한도의 확률분포를 평가하였다. 또한 강도 및 작용응력의 변동성을 동시에 고려할 수 있는 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 열화된 블레이드의 파손확률을 평가하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 정상상태 운전조건에서 터빈 블레이드에 작용하는 최대응력은 von-Mises 이론으로부터 검토한 결과 219.4MPa이다

(2) 신재 및 열화재의 2×10^7 사이클에 대한 피로강도는 응력비 $R = -1$ 에서 계단식 시험법을 이용하여 구하였으며, 이에 대한 신재 및 열화재의 피로강도 평균값은 각각 532MPa, 515MPa로 평가되었다.

(3) 신재 및 열화재에 대한 피로강도의 확률론적 특성(correlation, fatigue physics, tail fit effect)을 평가한 결과, 가장 적합한 분포는 3모수 와이블분포임을 알 수 있었다.

(4) 운전조건에 따른 작용응력, 인장 및 피로강도에 대한 각각의 변동성은 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 고려되었으며, 강도-응력 간섭모델에 의하여 신재와 열화재의 파손확률과 특성안전계수를 구하였다.

후 기

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

참고문헌

- (1) KEPCO Power Research Institute, 1997, "The Technical Report of Reliability in Turbine Blade (in KOREA)," pp. 11~19.
- (2) Hyo-Jin Kim, 1998, "Technique of Life Assessment for Extending Design Life of Turbine," *Proceedings of the KSME 1998 Material & Fracture Part 1 Meeting(in KOREA)*, pp. 5~10.
- (3) Congleton J. and Chen W., 1990, "The Fatigue Life of a 13%Cr Turbine Blade Steel," *Int. J. of Fatigue*, Vol. 12, pp. 91~98.
- (4) Vyas N. S. and Sidharth, Rao J. S., 1997, "Dynamic Stress Analysis and a Fracture Mechanics approach to Life Prediction of Turbine Blades," *Mech. Mach. Theory*, Vol. 32, No. 4, pp. 511~527.
- (5) Thauvin G. and Vittement B., 1996, "Improvement of Fatigue Limit in Steam Turbine Blade," *Proceedings of the Sixth International Fatigue Congress, Fatigue 96*, Vol. 2, pp. 1171~1176.
- (6) John R., et al. 1996, *Metals Handbook Ninth Edition Vol. 8 Mechanical Testing*, American Society for Metals, pp. 701~706.
- (7) Kerrebrock J. L., 1989, *Aircraft Engines and Gas Turbines*, The Massachusetts Institute of Technology, pp. 189~195.
- (8) Grant J., Hopkinson D., 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.
- (9) Japan Society of Mechanical Engineers, 1994, 統計的疲勞試驗方法, JSME S 002, pp. 8~45.
- (10) Zhao Y.-X. and Gao Q., Wang J.-N., 2000, "An Approach for Determining an Appropriate assumed Distribution of Fatigue Life under Limited DATA," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 12, pp. 1~7.
- (11) Zhao Y. X., Gao Q. and 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.
- (12) Freudenthal, A. M., 1947, "The Safety of Structures," *Transactions of ASCE* Vol. 112, pp. 125~180.
- (13) Abernethy, R. B., 1996, *The New Weibull Handbook*, 2nd Edition, SAE Professional Development, pp. 2~7.
- (14) Shu H. D. and Ming O. W., 1992, *Reliability Analysis in Engineering Applications*, Van Nostrand Reinhold, pp. 22~24.
- (15) Haldar A. and Mahadevan S., 2000, *Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering Design*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 250~261.
- (16) Dowling, N. E., 1993, *Mechanical Behavior of Materials*, Prentice-Hall International Editions, pp. 444~450.
- (17) Kececioglu D., 1993, *Reliability and Life Testing Handbook*, Vol. 1, Prentice-Hall International Editions, pp. 373~463.