

터빈설비의 정비이력을 이용한 고장확률 예측 및 정비주기 설정에의 응용[§]

송기욱^{*†}, 구재량^{*}, 최우성^{*}

* 한국전력공사 전력연구원

Determination of Maintenance Period and Failure Probability for Turbine Using Maintenance Record

Gee Wook Song^{*†}, Jae Raeyang Koo^{*} and Woo Sung Choi^{*}

* Korea Electric Power Corporation, Research Institute

(Received June 7, 2010 ; Revised July 16, 2010 ; Accepted July 22, 2010)

Key Words : Weibull Distribution(와이블 분포), Turbine Equipment(터빈설비), Failure Probability(고장확률), Maintenance Period(정비주기), Maintenance History(정비이력)

초록: 터빈설비 각 중요부품의 고장은 발전정지라는 큰 파급효과를 유발하며, 예기치 못한 고장으로 설비의 이용률이 감소하게 되면 막대한 경제적 손실이 발생한다. 현재 발전설비는 제작사에서 제시한 정비주기를 기준으로 보수적인 예방정비를 실시하고 있으나, 급변하는 경영환경에서 경쟁력을 유지하기 위해서는 신뢰도를 유지하면서 정비비용을 절감하는 신뢰도 기반 정비방법을 도입 해야 할 필요가 있다. 신뢰성 있는 정비주기를 선정하기 위해서는 설비의 고장이력에 대한 면밀한 분석을 통하여 고장확률을 예측해야 한다. 본 논문은 발전설비 중 터빈 각 부품들의 고장이력을 데이터베이스로 만들고, Weibull 함수를 이용하여 최적의 정비시점을 예측하며, 정비주기를 결정하는 방법에 대하여 연구하였다.

Abstract: The breakdown of any critical component of a turbine results in the outage of power plants. Unexpected failure decreases equipment utilization and causes enormous economic losses. Currently, we conduct conservative preventive maintenance for a maintenance period that is proposed by a vendor. In the rapidly changing business environment, reliability-based maintenance is required in order to remain competitive and reduce maintenance costs while maintaining the reliability of equipment. In order to determine an appropriate maintenance period for guaranteeing reliability, we must determine the failure probability by carefully analyzing the failure history of the equipment. In this study, we created a database of failure history for power-plant turbines, predicted the best repair time using the Weibull function, and investigated how the appropriate maintenance cycle can be determined.

- 기호설명 -

- α : shape parameter
- β : scale parameter
- t : time
- Γ : gamma function

1. 서 론

1.1 개요

현재까지 발전설비의 유지정비는 일정 운전시간

이 경과하면 설비를 분해 정비하는 TBM (Time Based Maintenance) 방식으로 시행하여 왔다.

그러나 전력산업의 경영환경이 급변함에 따라 기업효율을 극대화 하기 위해서는 설비 신뢰성을 고려한 상태기반 정비방법이 도입되어야 한다.⁽¹⁾

RCM(Reliability-Centered Maintenance)을 기초로 하는 정비방법은 시변고장율(TVFR : Time-Varying Failure Rate), 유지보수의 횟수 등을 고려하여 효과적인 정비주기를 결정 할 수 있다.⁽²⁾

신뢰성 있는 정비주기를 선정하기 위해서는 설비의 고장이력에 대한 면밀한 분석을 통하여 고장 기기와 고장확률을 예측하여야 한다, 현재 국내에서는 발전설비에 대한 고장이력 데이터베이스가

[§] 이 논문은 2010년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계학술대회 (2010. 5. 27.-28., 전남대 컨벤션홀) 발표논문임.

[†] Corresponding Author, gwsong@kepri.re.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

구축되어 있지 않으며, 적은 수의 자료마저도 발전사별로 분산되어 분석에 많은 어려움이 있다.

본 논문에서는 발전설비 중 터빈 각 부품들의 고장이력을 데이터베이스로 만들고, Weibull 함수를 이용하여 최적 정비시점을 예측하며, 정비주기를 결정하는 방법을 연구하였다. 또한 용이한 분석을 위하여 신뢰도 평가 프로그램을 개발하였다.

1.2 Weibull 분포

Weibull 분포는 기계공학에서 많이 사용되며 고장분석에 많이 이용하는 확률 분포도이다. Weibull 분포는 재료의 피로 데이터를 분석하기 위하여 고안되었으나, 지금은 다른 분야에도 널리 사용되고 있으며, 특히, 부품이 노후화 되어 고장률이 시간의 경과에 따라 증가하는 경우에 많이 사용된다.⁽³⁾ 많은 부품들로 구성되어 있는 제품에서 구성부품들 중 하나가 고장 난다고 가정하면, Weibull 분포가 제품의 수명분포에 가까운 근사를 나타낸다고 알려졌다.⁽⁴⁾ 표본의 수가 작은 경우에도 누적분포 함수를 구할 수 있어 발전설비와 같이 동일한 고장유형의 수가 적은 경우에도 사용 할 수 있다.

Weibull 함수는 다음과 같이 표현된다.⁽⁴⁾

$$F(x) = 1 - \exp[-(\frac{x - x_0}{\beta})^\alpha], x \geq x_0 \quad (1)$$

위 식은 β 는 척도 파라미터 또는 특성수명, α 는 형상 파라미터 또는 Weibull 경사라고 한다.

식 (1)에서 $x - x_0 = x'$ 라고 가정하면 2-Parameter Weibull 분포를 나타내며 다음과 같은 식으로 표현된다.⁽⁴⁾

$$F(x) = 1 - \exp[-(\frac{x}{\beta})^\alpha], x \geq 0 \quad (2)$$

확률밀도함수(probability density function)는 식 (2)를 미분하여 다음과 같이 표현한다.⁽⁴⁾

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{dF}{dx} = \frac{\alpha x^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} \exp[-\frac{x}{\beta}^\alpha] \quad (3)$$

2-Parameter Weibull 식에서 $\beta=1$ 로 가정하고 여러 α 값에 대한 Weibull 분포의 확률밀도함수를 나타낼 수 있다. 식 (3)에서 $\alpha=1$ 인 경우 Weibull 함수는 지수분포의 특성을 나타내고 $\alpha=2$ 인 경우

에는 Rayleigh 분포의 밀도함수를 나타낸다.

2. 터빈 정비이력의 Weibull 분석

2.1 터빈 정비이력 분석

우선적으로 국내표준석탄화력 터빈설비에 대한 고장이력 자료를 수집하여 터빈설비 별로 데이터베이스를 구축하였으며, 미국 NERC 데이터를 분석하여 국내 표준석탄화력과 동일한 출력, 압력, 온도를 가진 발전설비의 고장 데이터베이스를 만들고 국내 데이터와 비교하였다.

일반적으로 발전설비들은 높은 신뢰성을 갖고 있기 때문에 일반 상용부품과는 달리 고장 경험자료가 매우 적어 분석에 어려움이 있다

국내 표준석탄화력 발전소인 보령, 하동, 당진, 태안, 삼천포화력을 대상으로, 각 발전소의 건설 초기부터 정지 및 기동 이력, 불시정비와 긴급 정비 이력, 계획예방정비 기술정산서 등을 분석하고, 터빈기기 분류표를 적용하여 설비 별로 정비이력을 조사하였다.

Fig. 1 은 보령 287 개, 당진 81 개, 삼천포 309 개, 태안 180 개, 하동 125 개 등 총 982 개의 표준석탄화력 터빈설비의 고장 DB 를 보여주고 있다. Fig. 2 는 불시정비, 출력감발, 중간 정비시의 정비건수를 설비 별로 분류하여 정리한 터빈 부품들의 정비건수를 보여주고 있다.

터빈정비 횟수는 주로 Control Valve(4261), LP Bearing(4240), Steam Turbine Control System-Hardware Problem(4311)에서 많이 발생하였다.

선택	설비명	부속설비명	부품코드	부품명	발생년도	종류
<input type="checkbox"/>	터빈	LP	4220	Shaft seals	1998	1997
<input type="checkbox"/>	터빈	Condenser	4302	Turbine trip de...	1998	1997
<input type="checkbox"/>	터빈	IP	4140	Bearings	1998	1997
<input type="checkbox"/>	터빈	LP	4240	Bearings	1998	1997
<input type="checkbox"/>	터빈	Valve	4261	Control valves	1998	1997
<input type="checkbox"/>	터빈	LP	4240	Bearings	2003	1999
<input type="checkbox"/>	터빈	LP	4240	Bearings	2003	1999
<input type="checkbox"/>	터빈	Piping	4270	Crossover or ...	2003	1999
<input type="checkbox"/>	터빈	Valve	4261	Control valves	2003	1999
<input type="checkbox"/>	터빈	Valve	4261	Control valves	2003	1999
<input type="checkbox"/>	터빈	Piping	4270	Crossover or ...	2005	1999
<input type="checkbox"/>	터빈	IP	4140	Bearings	2005	1999
<input type="checkbox"/>	터빈	LP	4240	Bearings	2005	1999
<input type="checkbox"/>	터빈	HP	4041	Thrust bearings	2005	1999
<input type="checkbox"/>	터빈	HP	4040	Bearings	2005	1999
<input type="checkbox"/>	터빈	IP	4140	Bearings	2005	1999
<input type="checkbox"/>	터빈	LP	4240	Bearings	2005	1999
<input checked="" type="checkbox"/>	터빈	HP	4040	Bearings	2000	1998

Fig. 1 Failure database of turbine for power plants

표준석탄화력 발전소 터빈에서는 Valve 와 Bearing 이 다른 부품에 비해 상대적으로 고장이 많이 발생하고 있다. Control Valve 는 고온, 고압의 증기환경에서 사용되며, 터빈 Rotor 의 하중을 지탱하는 Bearing 은 기동시 면접촉이 발생하는 가혹한 환경에서 사용되어 정비수요가 많은 것으로 판단된다.

이중 정비 수요가 많은 베어링을 대상으로 정비이력이 Weibull 분포를 따르는지 확인하고자 미니탭을 사용하여 분석을 수행하였다.

Fig. 3, 4 에서 C1 은 베어링의 고장횟수를 나타내고 있다. Fig. 3 은 Weibull, 로그, 지수, 정규 분포 중에서 베어링의 고장분포가 Weibull 분포와 가장 높은 상관계수를 보여주고 있어, Weibull 분포로 가정함이 가장 적합한 것으로 나타났다.

Fig. 4 에서는 베어링의 시간에 따른 고장이력을 Weibull 분포로 가정하여 고장 확률밀도 함수와 고장확률 누적함수를 구하였다.

2.2 터빈설비의 고장확률

터빈 설비 부품중 고장이 자주 발생하는 고압, 중압, 저압터빈베어링, 저압터빈 Diaphragms, 주 증기정지 밸브, 주 증기 조절밸브등에 대하여 Weibull 함수의 필수인자 값을 구하였으며 그 결과를 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 은 터빈설비 부품의 고장이력을 Weibull 함수로 나타내기 위한 필수인자이다. 대부분의 부품에서 형상 파라메타가 1 보다는 크나, 그 차가 크지 않음을 알 수 있다.

저압터빈 베어링의 형상 파라메타 값은 타 베어링에 비해 1 보다 현저히 작게 나타나고 있어, 고장이력을 분석하여 보았다. 총 61 건이 고장 중 5 년 미만에 발생한 초기 고장건수가 31 건으로 약 48% 이상을 차지하고 있었다.

Table 1 Shape and characteristic life parameter of Weibull function for turbine equipment

품 명	Weibull 주요인자	
	형상 Parameter (α)	척도 Parameter (β)
고압터빈 Bearing	1.484	17.487
중압터빈 Bearing	1.552	14.390
저압터빈 Diaphragms	1.443	13.744
저압터빈 Bearing	0.364	22.975
주증기 정지 Valve	1.355	21.238
주증기 조절 Valve	1.556	34.365

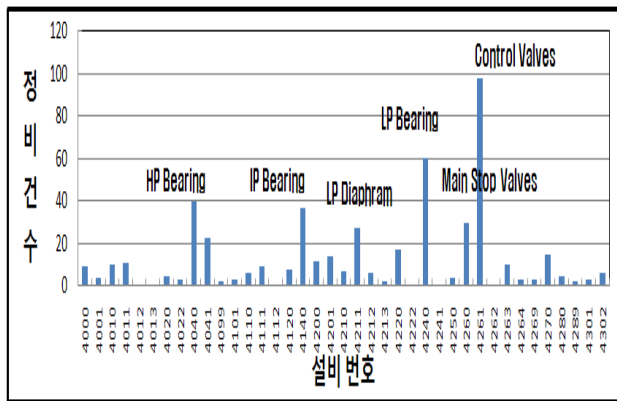


Fig. 2 Number of maintenance of each equipment

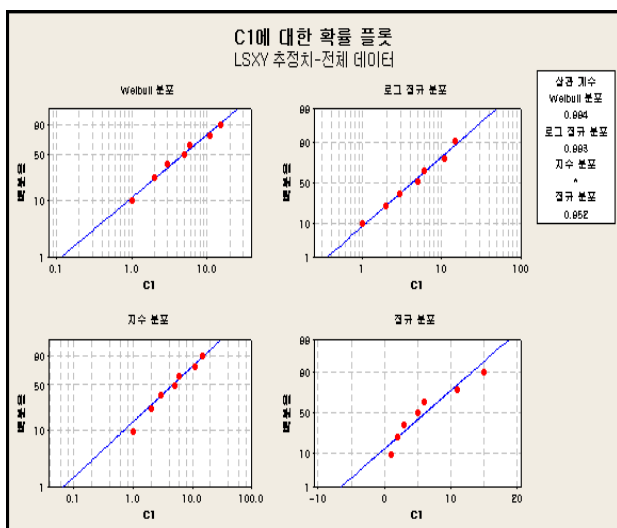


Fig. 3 Verification of distribution shape of bearing

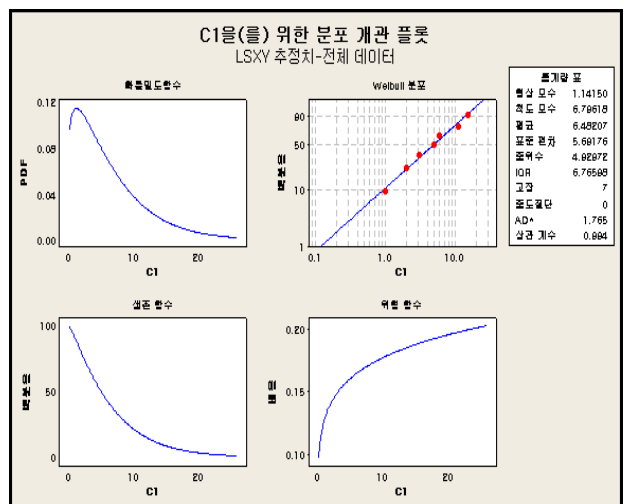


Fig. 4 Probability distribution function of bearing

Fig. 5, 6 에서 고압터빈 베어링의 Weibull 분포 함수를 그래프로 보여주고 있다. Fig. 5 의 연도별 고장확률을 보면 터빈 베어링 설치 초기부터 고장확률이 존재하며, 완만히 증가하여 운전 7 년 짜에 고장확률이 최고에 도달하고, 그 이후 고장 확률이 점차 줄어드는 경향을 가지고 있다.

Fig. 6 의 누적확률 그래프에서는 고압터빈 베어링의 누적 고장확률이 선형적으로 매년 거의 일정하게 증가하는 것으로 나타났다.

베어링 고장 특성상 사용 후 일정시간이 경과되면 사용한도에 가까워져 고장이 급격히 증가하는 경향을 가진다. Fig. 6 과 같은 선형적 증가는 초기 고장의 영향으로 분석되었다.

부품의 열화경향을 정확하게 판단하기 위해서는 제작이나 설치결함으로 인한 초기고장을 제거한 후 분석을 수행하여야 한다. 운전초기에 고장 확률이 높은 경향은 초기 고장의 영향으로 판단 되어, 설치 후

고장이 증가한 초기 4 년간의 구간을 초기 고장으로 설정하고 제거하였다.⁽⁵⁾

Fig. 7 은 고압터빈 베어링의 초기고장 제거 후 연도별 고장확률을 나타내고 있다. 베어링을 설치한 후 4 년부터 11 년까지는 연도별로 고장 확률이 급격히 증가하고, 11 년 이후에는 점차 감소하는 특성을 보여주고 있다.

Fig. 8 에서는 년도 별 누적 고장확률을 보여 주고 있다. 베어링 설치 후 3 년까지는 고장이 발생하지 않다가 서서히 고장확률이 증가하여 12 년째에 Weibull 함수의 특성 수명값인 63.2%를 나타내고 있고, 약 18 년 운전 이후에는 고장 확률이 1 에 수렴함을 보여주고 있다.

Table 2 는 터빈설비 각 부품에서 4 년 이내에 발생된 초기고장을 제거 후 분석한 Weibull 함수의 척도 파라미터와 형상 파라미터를 나타낸다. 초기고장 제거 후 형상 파라미터의 값은 평균적으로 1.79 증가하였다.

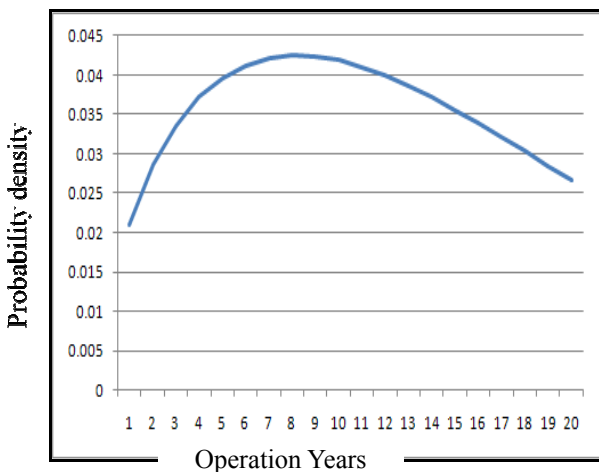


Fig. 5 Probability density function of bearing

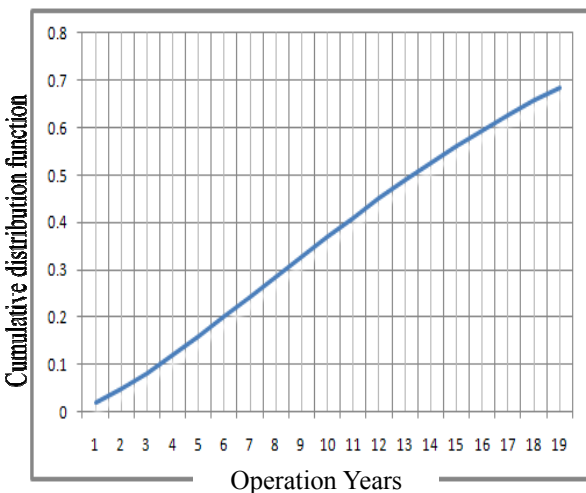


Fig. 6 Cumulative distribution function of bearing

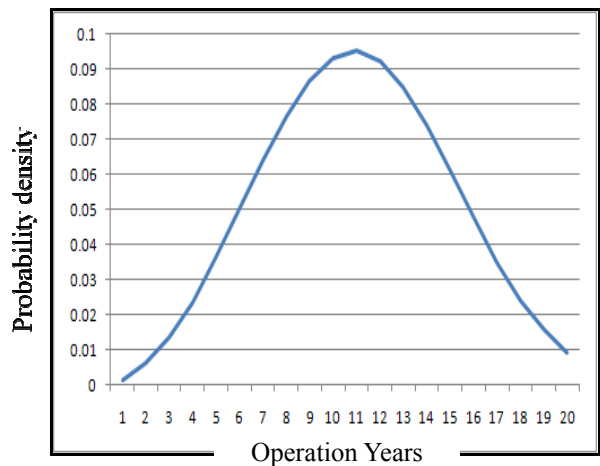


Fig. 7 Probability density function of bearing without the early failure

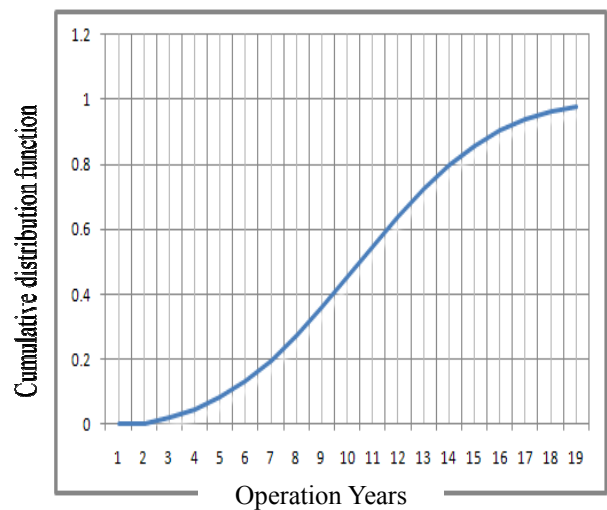


Fig. 8 Cumulative distribution function of bearing without the early failure

3. 고장확률 예측 프로그램

표준석탄화력 터빈 설비의 정비주기를 최적화하기 위하여 고장이력기반 터빈신뢰성 평가 프로그램을 개발하였다. Fig. 9 는 터빈 신뢰성 평가 프로그램의 flow diagram 을 보여주고 있다.

데이터베이스 관리를 통하여 국내 터빈 설비의 고장 데이터 관리가 가능하고, 터빈 각 기기별 고장확률 및 누적고장 확률을 계산할 수 있다. 또한, 국내 터빈설비의 고장 데이터의 수가 적어 신뢰성 있는 예측이 어려운 경우, 동일한 사양을

Table 2 Shape and characteristic life parameter of Weibull function for turbine equipment without early failure

품 명	Weibull 주요인자	
	형상 Parameter (α)	척도 Parameter (β)
고압터빈 Bearing	3.023	12.421
중압터빈 Bearing	3.590	11.927
저압터빈 Diaphragms	2.556	12.657
저압터빈 Bearing	2.754	16.967
주증기 정지 Valve	3.184	14.937
주증기 조절 Valve	2.790	20.601

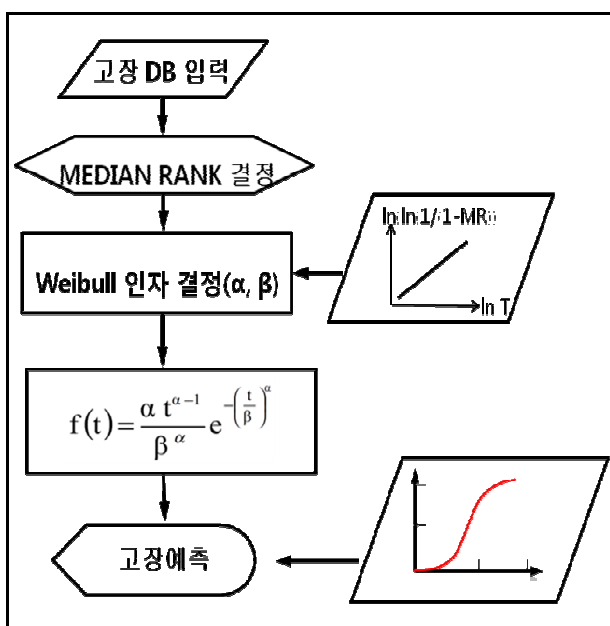


Fig. 9 Flow diagram of turbine failure history based reliability evaluation program

가진 발전소에서 추출된 미국 NERC 데이터와 베이지안 방법을 이용하여 데이터를 통합한 후, 고장확률을 계산하는 기능도 가지고 있다.

정비주기는 기기가 운전되기 시작하여 고장이 발생할 때 까지의 평균시간으로 나타낸다. 평균시간(Mean time to failure)은 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$MTTF = \int_{-\infty}^{\infty} tf(t)dt \quad (4)^{(3)}$$

식 (4)에 Probability density function 식 (3)을 대입하여 적분하면 다음과 같다.

$$MTTF = \beta\Gamma(1 + \alpha^{-1}) \quad (5)^{(3)}$$

정비이력을 Weibull 분포로 분석하면 식 (5)로부터 터빈설비의 정비주기를 결정할 수 있다.

Fig. 10 은 신뢰성 평가 프로그램의 고장 데이터 베이스를 수정하거나 추가할 수 있는 화면을 보여주고 있다. 설비 리스트에서 터빈기기를 클릭하고, 데이터의 기준년도를 입력한 후 [고장확률계산] 버튼을 누르면, 고장확률 및 누적확률의 계산값과 그래프가 화면에 표시된다. Fig. 11 은 고장확률 모델에서 계산된 누적고장확률을 보여주고 있다

터빈 신뢰성 평가 프로그램에서 계산된 누적고장확률로부터 Weibull 분포의 형상과 척도 파라미터를 구하여 식 (5)에 대입하면 터빈 기기의 정비주기를 선정할 수 있다. Table 3 는 현 정비주기와 프로그램에서 계산된 정비주기를 비교한 것이다. 제작사에 제시한 현 정비주기에 비하여 누적고장확률로부터 계산된 정비주기가 최소 1 년에서 최대 4 년까지 연장됨을 알 수 있다.

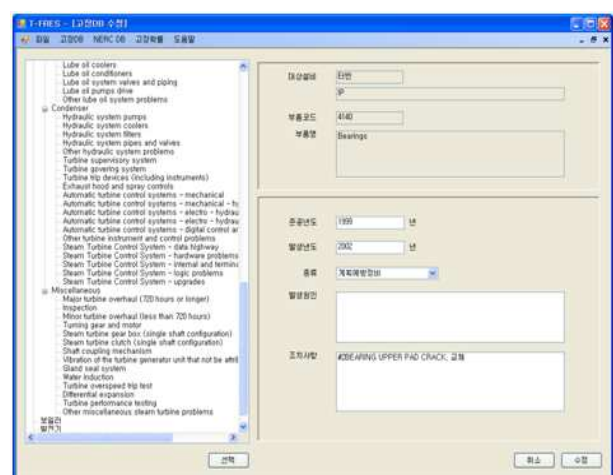


Fig. 10 Revision and addition of failure database

Table 3 Maintenance period by failure probability

부품명	현 정비 주기	고장확률에서 계산된 정비주기
HP Outer Casing	5	9
HP Bearing	6	10
IP Diaphragms	7	9
IP Inner Casing	6	7
LP Outer Casing	6	8
터빈 TRIP Device	6	7

각 기기들의 고장이력을 정리하여 데이터베이스를 구축하였다. 이 고장 DB 를 사용하여 통계적 기법인 Weibull 분포함수를 적용, 터빈 설비별 고장밀도함수와 누적고장확률을 계산하고 최적 정비주기를 제시하였다. 현재 발전설비의 정비 주기는 시간기반의 예방 정비방법을 사용하고 있으나 기존 정비이력의 통계적 분석을 통한 신뢰도기반 정비 방식을 도입하면 최적의 정비 주기 선정으로 정비 비용 절감과 설비 신뢰성 향상에 크게 기여 할 것이다.

후 기

본 연구는 2006 년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. R-2006-1-240-3)

참고문헌

- (1) Electric Power Research Institute, 2000, "Turbine-Generator Maintenance Interval Optimization Using a Financial Risk Assessment Technique," *EPRI, Palo Alto*, 1000820E204901, pp. 4~14
- (2) Smith, A. M., Vasudevan, R. V., Matteson, T. D. and Gaertner, J. P., 1986, "Enhancing plant preventive maintenance via RCM," *Proc. a. Reliab. Maintainab. Symp., Microelectronics Reliability*, Volume 27, Issue 4, 1987, p. 785.
- (3) Electric Power Research Institute, 2000, "Turbo-X User Manual Level 1," *EPRI*, 1000819, Palo Alto, pp. 6.1~6.7.
- (4) Song, J. H. and Bark, J. H., 2007, "An Introduction to Reliability Engineering for Mechanical Engineer," *Intervision*, Seoul, pp.176~186
- (5) Herder, P.M., van Luijk, J.A., Bruijnooge, J., 2008, "Industrial Application of RAM Modeling: Development and Implementation of a RAM Simulation Model for the Lexan® Plant at GE Industrial, Plastics", *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 93, Issue 4, pp. 501~508
- (6) Martorell, S., Muñoz, A. and Serradell, V., 1995, "An Approach to Integrating Surveillance and Maintenance Tasks to Prevent the Dominant Failure Causes of Critical Components," *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 50, Issue 2, pp. 179~187

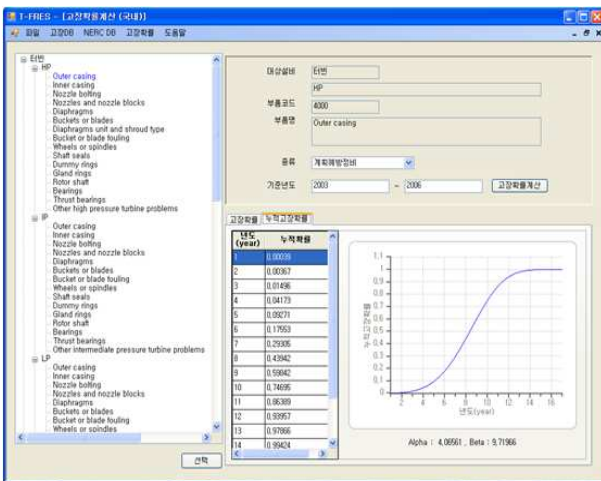


Fig. 11 Calculation of cumulative distribution function

4. 결 론

현재 발전설비는 제작사에서 제시한 정비주기를 기준으로 보수적인 예방정비를 실시하고 있으나, 급변하는 경영환경에서 경쟁력을 유지하기 위해서는 설비의 신뢰성을 유지하면서도 정비비용을 절감하는 새로운 신뢰도 기반 정비방법을 도입해야 할 필요가 있다. 신뢰도 기반 정비를 위해서는 발전설비 기기별 고장이력이 잘 정리되어 유용한 데이터로 사용되어야 하나, 고장 데이터베이스 구축과 활용 면에서 많은 부족한 점을 가지고 있어 향후에 개선할 필요가 있다.

본 논문에서는 표준석탄화력 터빈설비에 부속된