

상태 파라미터 기반의 온라인 성능 신뢰도

김연수[†] · 정영배

인천대학교 산업경영공학과

Condition Parameter-based On-line Performance Reliability

Yon Soo Kim[†] · Young Bae Chung

Department of Industrial & Management Engineering, University of Incheon

This paper presents the conceptual framework for estimating and predicting system's susceptibility to failure as function of condition parameter value which is representing the current status of performance measure using on-line performance reliability. The performance of such system depends on one parameter with a probability distribution that degrades with time gracefully. Performance reliability represents the probability that physical performance will remain satisfactory over a finite period of time or usage cycles in the future. An empirical physical performance function is constructed to incorporate explanatory variables (operating and environmental conditions) over a time or usage dimension. This function enables one to model device performance and the associated classical reliability measures simultaneously, in the performance domain and time domain. The conditional performance reliability structure developed represents a tool to predict system performance over time or usage for next usage period. By enabling such a framework, it can bring us more efficient planning and execution in system's operation control as well as maintenance to reduce costs and/or increase profits.

Keywords : Condition Parameter, Physical Performance, Performance Reliability, Performance Degradation, Empirical Performance Function.

1. 서 론

부품·소재 및 시스템·제품 등이 주어진 사용 환경 또는 조건에서 일정기간 동안 고장 없이 최초의 품질(성능)을 유지하는 특성을 신뢰성이라고 하는데 이러한 신뢰성이 고부가가치 산업으로 떠오르고 있는 부품·소재 산업 발전을 위한 필수 요소로 인식되면서 그 중요성이 점점 강조되는 상황이다. 신뢰성 확보는 부품·소재 산업뿐 아니라 전자전기, 자동차, 기계, 우주항공, 설비 플랜트 등 모든 산업에 필요하다.

최신의 신기술을 반영한 신제품이나 첨단 기계류 제품, 장치, 시스템 등은 고도로 복잡하고, 높은 정밀도를

유지하여야 하며, 다 기능의 많은 서브 시스템, 부품 및 요소들로 결합되어 있어 이들의 사용환경도 점차 고속 운전 환경 및 지능형 시스템 하에서 운영되고 있다. 이러한 신뢰성을 측정하는 척도가 고장시간을 고려하여 측정된 시간 영역에서의 확률적인 척도는 고장 또는 비고장의 이분법적인 상태만을 나타내며 이러한 제품의 수명 데이터에서 얻어진 모집단 전체의 특성을 나타내는 분포를 정하고 이들로부터 시간 또는 사이클에서의 신뢰도를 활용하게 된다. 이러한 신뢰도 수치는 시스템의 디자인이나 제품 설계에 유용한 정보를 제공하지만 현장에서의 고가의 장비를 운영하는 경우의 각 개별 시스템 레벨의 실제 운영되는 현장에서의 제품, 장치,

[†] 교신저자 yonskim@incheon.ac.kr

※ 본 연구는 2005년도 인천대학교 자체 연구비 지원에 의해 수행되었음.

시스템의 여러 가지 상태정보(Condition-based Information)를 나타내는 정보는 고려하지 않고 있다. 이러한 시스템의 성능이 생산 현장에서 주어진 제품, 장비, 시스템, 서버 시스템, 부품 레벨에서 운영되는 상태 파라미터(Condition-based Parameter)를 측정할 수 있으면 그러한 파라미터를 이용한 신뢰성 척도를 시간 축(Time Domain)과 실제 성능정보 축(Performance Domain)을 동시에 사용한 성능 신뢰도(Performance Reliability) 척도를 사용하여 모집단 전체 레벨의 사후에 얻어지는 신뢰도 데이터가 아닌 개별 시스템 레벨의 신뢰도를 예측하여 각 시스템에 대한 상태를 알 수 있고 개별 시스템의 예측된 조건부 신뢰도를 통하여 조치를 취할 수 있게 된다.

성능 신뢰도 척도(Performance Reliability Measure)를 사용하게 되면 실제 성능 정보의 상태 파라미터(Condition Parameter)의 값을 이용하여 시스템 설비의 신뢰도를 최적으로 예측하여 설비의 최대 수명까지 운영할 수 있게 된다.

설비보전 및 유지비용을 최소로 줄이며 설비의 가동률을 항상 최대로 유지하기 위해서는 돌발 고장 같은 것을 방지하고 설비의 다음 고장상태까지의 잔여 유효수명을 정확하게 예측하는 것이다. 그러한 방법은 설비 상태 정보를 끊임없이 감시하여 이를 반영, 고장을 고장직전 시점에 방지하게 하고 각 생산설비의 요소단위는 물론 시스템 전체의 신뢰성과 보전성을 확보하여 설비를 정상상태로 유지하는 것이 관건이다.

상태 파라미터를 이용한 성능 신뢰도 방식의 설비보전 및 유지 방법을 적용하는 경우 생산설비의 상태를 나타낼 수 있는 열화되는 성능정보를 감지하여 설비의 상태를 진단하여 열화되는 성능의 수준이 주의수준, 위험수준 그리고 고장수준에 이르는 과정에서 정확히 다음 고장시점을 예측하여 고장시점 바로 직전에 설비보전을 실시하여 그에 따른 비용 및 유지 노력을 최소로 유지하는 방식을 사용한다. 이러한 방법에서는 고장예측을 위한 성능신뢰도 모델에 의하여 생산설비의 신뢰도를 예측하여 관리시점을 설정하고 이를 근거로 하여 이상검출, 정밀진단, 수리시점 상태를 판정하여 수리시점 상태에 각 설비에 맞는 보전활동을 실시하여 각 생산설비를 최적의 상태를 유지하여 가동율을 최대로 유지하도록 하고 있다.

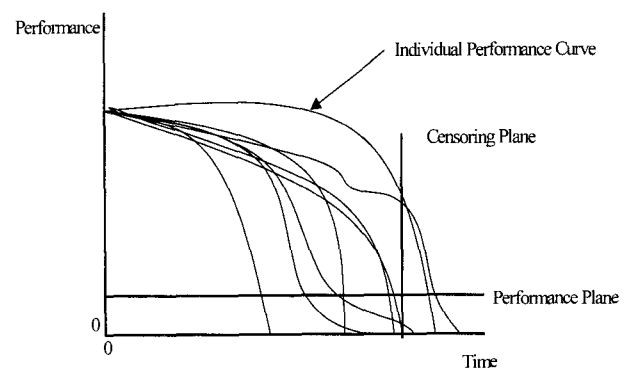
본 연구에서는 성능(Performance)을 나타내는 여러 파라미터 중 고장진단 및 고장예측에 사용할 수 있는 열화되는 특징적인 성능 파라미터가 존재하고 이에 따른 고장모드가 하나인 경우에 시스템의 현재 상태를 측정할 수 있는 성능 파라미터(Condition Parameter)감지하고 추적하여 이를 근거로 성능 신뢰도를 예측하여 다음 고

장 직전까지의 잔여 수명을 예측할 수 있는 확률 개념의 신뢰도 지표로 표현되는 온라인 성능 신뢰도 모델링 방법에 대하여 다루며 이를 활용하여 설비보전 및 유지 노력에 효율적으로 적용 가능여부를 검토하고자 한다.

2. 상태 파라미터에 기초한 성능 신뢰도

2.1 성능 신뢰도 개념도

기계설비는 사용시간/빈도(Usage or Cycle)에 따라 열화(Degradation)되는 경우가 많다. 그러한 경우 설비 상태를 나타내는 성능 파라미터는 설비의 능력을 대변해주는 지표가 된다. 설비의 신뢰도를 나타내는 지표는 0에서 1사이의 확률로 정의되고 일반적으로 모든 운영조건이나 환경조건은 동일하다는 가정 하에서 설비의 고장시간 즉 수명의 분포에서 구해지는데 CIM같은 제조 환경에서는 설비의 상태를 나타내주는 상태 파라미터, 예를 들면 진동, 전류, 이동속도, thrust등과 같은 설비의 성능(Performance)은 <그림 1> 성능에 기초한 신뢰도 개념도에 나타난 바와 같이 각 시스템의 운영조건이나 다양하게 변화하는 그날 그날의 시스템의 조건에 따라 다양하게 시간 축에 따라서 시스템의 고장 상태를 짐작하게 하여 주는 주된 성능 파라미터의 값이 열화되어 점점 커지는 방향 또는 점점 작아지는 방향으로 성능 레벨이 퇴화되고 있으며 특정 성능 레벨(Performance Plane)을 지나면 더 이상 시스템으로 작동 불가능한 것으로 간주되는 고장 상태를 의미하게 되며 Type I, Type II Censoring 개념도 적용할 수 있도록 할 수 있다. 성능 곡선은 고장시점이 다가옴에 따라 열화되어 파라미터의 값이 상승하거나 하강하게 되며 제품의 품질이나 가공 조건에 따라 어느 시점에서(a certain point of time) 고장으로 정의되는 임계점(Critical Value)에서 고장이 발생하



<그림 1> Performance Reliability Concept

였다고 하며 이때의 시간을 설비의 수명(Lifetime)이라한다. 이때 이 임계점은 각각 사용목적, 품질 정도, 제품의 가공 정도에 따라 다르게 설정되게 된다.

정해진 각 설비의 상태를 나타내는 시스템 성능 파라미터값(value of a given system performance parameter)이 열화되는 정도를 설비 상태 모니터링 시스템(Condition Monitoring System)에 의하여 감시하여 설비의 성능 파라미터 값이 설비 고장상태로 판단되어 지는 정해진 시점, 경고 수준(Warning Level)과 고장 수준(Failure Level)에 도달되는 시점이 결정 되는데 이는 설비의 상태를 나타내는 통계적 모델의 기반이 된다. 이 통계적 모델은 설비의 상태 지표에 대한 중심위치에 대한 척도(Location Measure)와 산포를 나타내는 척도(Dispersion Measure)를 제공하게 된다. 이들 지표들을 이용하여 설비의 신뢰도를 예측하게 되면 잔여 수명 시점을 확률적으로 예측이 가능하게 된다. 각 설비의 개별 조건을 반영한 성능 정보를 대변하는 성능 파라미터의 값을 시간 축과 동시에 고려하여 시스템의 고장가능서의 정도를 상태 파라미터의 값으로 예측할 수 있게 된다[1, 2, 4].

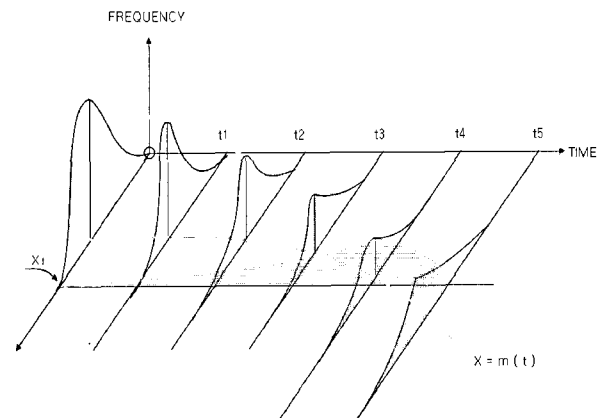
2.2 성능 파라미터(Performance Parameter)에 기초한 성능 신뢰도 적용시의 전제 조건

고장 예측을 위한 성능 신뢰도 모델을 구성하기 위한 전제 조건은 다음과 같다.

- ① 고장 예측을 위한 시스템 또는 설비로부터 시스템 또는 설비의 이상 유무를 판단 할 수 있는 열화 파라미터를 정기적으로 측정 또는 자동계측 장비로 계속할 수 시스템에 온라인으로 연결되어 있어야 한다.
- ② 이러한 열화 파라미터의 일정시점 t에서 관측된 값은 그 시점에서의 그 특정 시스템이나 설비의 상태를 대변하는 관측값으로 비교적 어려없이 관측할 수 있어야 하며 대략 그 시점에서 특정한 분포를 갖을 수 있지만 정규분포를 가정한다.
- ③ 고장의 정의에 관해서 명확한 기준이 되는 파라미터의 값을 기술적 근거 혹은 경험에 의해서 제시되어야 하며 고장이라고 간주되는 파라미터의 값과 동시에 정상이라고 판단되는 기준치 또는 표준값은 파라미터 값의 분포의 중간값 혹은 평균값으로 모집단의 50%가 이 Critical Value값 이하가 되며 동시에 50%가 이상이 된다고 가정한다.
- ④ 열화정도가 서서히 일어나는 경우이고 열화 경향선이 올라가는 형태의 것(The smaller is better)이나 내려가는 것(The larger is better)이나 임계점(Critical Value)에서 고장이 일어난다고 가정한다.

3. 상태정보에 의한 성능 신뢰도 모델 (Performance Reliability Model)

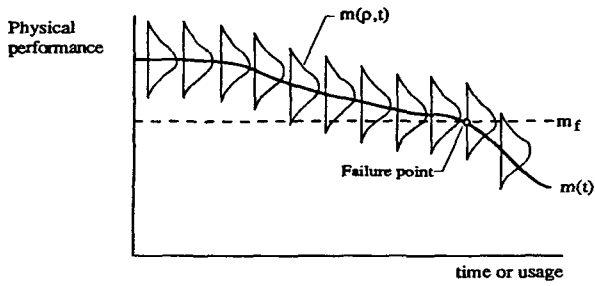
<그림 2>에서 같이 시스템 또는 설비의 신뢰도를 나타내는 주된 상태 파라미터가 하나이고 그에 따른 고장 모드가 하나라고 하면 시스템의 성능 파라미터, $m(t)$ 는 시스템의 사용시간 또는 사이클 수와 운영 및 환경 조건에 따라 서서히 감소되어 고장기준점인 X_f 에 도달하면 고장나게 되고 성능 파라미터의 값을 측정하게 되면 그 값과 지금까지의 성능 정보와 곡선에 의하여 잔여 수명과 그에 따른 시스템이나 설비의 신뢰도를 예측하게 된다. 여기에 각 시간 축 t_i 에서 성능 파라미터의 값은 분산 σ^2 을 가지고 분포를 하게 되고 각 시간 축에서 X_f 를 넘는 영역이 각 시간 축에서 성능 불신뢰도(Performance Unreliability)를 의미하게 되고 이들 값은 성능 파라미터의 분포의 기반이되고 <그림 2>에서 t_4 지점에서 불 신뢰도 50%에서 이르게 되고 분포 곡선이 하강하게 된다. 앞면에 프로젝션된 분포를 사용하여 상태 파라미터 정보에 기반한 신뢰도 예측이 가능하게 된다.



<그림 2> 상태 파라미터 값의 변화에 따른 성능 분포

이를 시간 축과 성능 축에서 자세히 보여주는 <그림 3>에서와 같이 설비의 상태를 나타내는 물리적인 성능 파라미터의 값이 작으면 작을수록 설비는 열화되어 고장에 가까이 다가가는 경우이며 측정된 설비 파라미터의 한계값(m_f)에서 고장이 나는 경우이다.

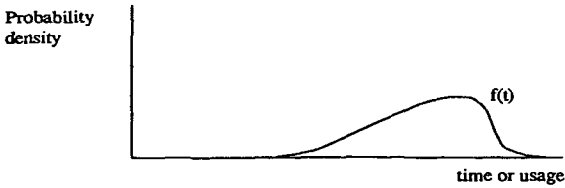
$m(t)$ 를 시간 t 에서 측정된 설비의 상태를 나타내는 파라미터의 측정된 값이라하자. m_f 값이하에서는 고장이 발생하는 경우이고 그 이상의 값에서는 설비가 작동되는 상태를 가리킨다. 시간 t 에서 측정되는 각각의 $m(t)$ 값은 일정한 분산 σ^2 를 갖는 분포를 한다고 하고, $m(\mu, t)$ 를 설비의 상태정보 값의 분포로 표현한다. 열화되는 정도의 강도(intensity)는 다음식으로부터 구할 수 있다.



a. Higher is better performance response plot.



b. Performance degradation intensity plot.



c. Normalized probability density function plot.

<그림 3> 상태정보를 이용한 Performance Reliability Modeling 개념

$$P\{m(\rho, t) < m_f\} = \int_{-\infty}^{m_f} m(\rho, t) d\rho, \quad m(t) > m_f \dots (1)$$

$$P\{m(\rho, t) > m_f\} = \int_{m_f}^{\infty} m(\rho, t) d\rho, \quad m(t) < m_f \dots (2)$$

열화되는 정도의 강도를 g(t)로 표현하면 설비의 상태 정보를 나타내는 m(t) 값이 한계값 m_f에 이를 때 까지를 추적하여 주는 Normalized된 확률분포 g 함수값 f(t)는

$$f(t) = g(t) / \int_0^{\infty} g(\xi) d\xi, \quad t \geq 0 \dots (3)$$

구하여진 함수값 f(t)를 사용하면 누적 분포 함수 F(t)와 R(t)는 t시점에서의 불신뢰도와 신뢰도를 나타내고 다음 식으로 구할 수 있다.

$$F(t) = \int_0^t g(\xi) d\xi, \quad t \geq 0 \dots (4)$$

$$R(t) = 1 - F(t), \quad t \geq 0 \dots (5)$$

그리고 고장률 함수(instantaneous failure rate or hazard rate)는 h(t) = f(t)/R(t) 로부터 구할 수 있다.

설비가 t1시점까지 고장 없이 유지되었을 때 t2까지 고장 없이 쓸 수 있는 조건부 신뢰도는 다음과 같이 구

할 수 있다[5, 7].

$$R(t_2 | t_1) = R(t_2)/R(t_1), \quad t_2 > t_1 > 0 \dots (6)$$

4. 온라인 성능 신뢰도 모델

Weibull 모델의 경우, 신뢰도 함수 R(t), 확률밀도 함수 f(t), 고장률 함수 h(t)는 다음과 같다.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\delta}, \quad t \geq 0 \dots (7)$$

$$f(t) = \frac{\delta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\delta-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\delta}, \quad t \geq 0 \dots (8)$$

$$h(t) = \frac{\delta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\delta-1} \dots (9)$$

Parameter의 평균과 분산은

$$\mu = \theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\delta}\right) \dots (9)$$

$$\sigma^2 = \theta^2 \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\delta}\right) - \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\delta}\right)\right]^2 \right\} \dots (10)$$

θ = scale parameter 혹은 characteristic life

δ = shape parameter (δ=1인 경우는 지수모델)

감마함수 Γ(w)는

$$\Gamma(w) = \int_0^{\infty} \zeta^{w-1} e^{-\zeta} d\zeta \text{로 계산된다.}$$

R(t|T_0)를 설비가 T_0시간동안 고장 없이 운영되었을 때 t 시점에서의 조건부 신뢰도라면

$$R(t | T_0) = P(t' > T_0 + t | t' > T_0) \dots (11)$$

$$= \frac{P(t' > T_0 + t)}{P(t' > T_0)} \dots (12)$$

t' = t + T_0는 설비 운영된 후의 사용시간

$$R(t | T_0) = \frac{R(t + T_0)}{R(T_0)} \dots (13)$$

$$= e^{-\int_{T_0}^{t+T_0} h(u) du}$$

가 되고 여기서 T_0는 설비의 과거 사용시간을 나타내며 t는 앞으로의 설비의 사용시점을 의미한다고 하며 설비의 신뢰도 수준을 0.95와 같은 수준에서 Warning level을 유지하고 0.99와 같은 수준에서 Critical level Reliability를 유지한다고 하며 현재 시점에서 설비의 다음 고장시간을 예측 가능하게 하여준다.

예를 들면 $R(tf|tc) = \frac{R(tc+tf)}{R(tc)}$ 일 때,

$tc = 0$ 이라면 $R(tc) = 1$ 이므로
 $R(tf|tc) = R(tf)$:..... (14)

Weibull 분포를 따른다면,

$R(tf|tc) = e^{-\frac{(tc+tf)^\delta}{\theta}} = e^{-\frac{tf^\delta}{\theta}}$ (15)

다음까지 걸리는 시간의 추정치는

$tf = \theta[\ln(\frac{1}{1-\alpha_w})]^\frac{1}{\delta}$ 이고, (16)

고장시간까지의 추정치는

$tf = \theta[\ln(\frac{1}{1-\alpha_c})]^\frac{1}{\delta}$ (17)

- tf = future time
- tc = current time
- $1-\alpha_w$ = warning level reliability
- $1-\alpha_c$ = critical level reliability

On-line으로 모니터 되는 설비의 Performance를 추적하는 성능추적곡선을 예측하면 이 예측 식으로부터 설비의 performance에 가해지는 failure plane의 level(고장기준이 되는 performance의 값)에 따라서 warning 및 critical level까지의 소요시간이 현재시점 t 를 기준으로, 역으로 계산하여 예측하게 되며 일반적으로 Warning Level에서 보전작업지시를 일정계획에 반영하게 된다. 성능 추적곡선은 Regression Type의 다중 회귀식 이나 Polynomial 함수 식으로 fitting 시켜 이 곡선을 성능의 시간 t 에서의 중심위치의 대표 값으로 사용하거나 지수 평활법을 사용하여 최근 시점의 자료에 비중을 두어 설비의 상태를 추적하기 위한 성능추적곡선의 예측 식을 구성하게 된다[3, 6].

6. 예 제

상태 파라미터에 기준한 온라인 성능 신뢰도를 활용 예를 보이기 위하여 가정용 2D 사이즈 알카라인 건전기를 사용하는 특정기기의 상태는 1.95V이하로 Voltage Performance가 저하되면 고장이라고 정의된다. 4종류의 배터리에 대해서 A/D 보드를 통하여 컴퓨터에서 자동으로 전압이 측정되었고 이를 통하여 퍼포먼스 곡선이 예측되었다.

$\hat{m}_t = 2.7174 - 0.2363 t + 0.0347 t^2 - 0.0020 t^3$
 $\hat{\sigma} = 0.0339$ volts. (18)

$t = 4$ 에서의 알카라인 배터리의 성능 신뢰도는 현재 운영 및 환경 조건에서 분산 0.0339볼트하에서 성능곡선 (18)을 따른다고 하면 성능 신뢰도는 고장 조건이 각각 1.95볼트, 2.2볼트일 때 $\hat{R}(4) = 0.958333$ if $m_f =$

1.95 volts $\hat{R}(4) = 0.616385$ if $m_f = 2.2$ volts

특정기기를 $t = 5$ 에서 현재 운영 및 환경 조건에서 고장없이 운영할 성능 신뢰도는:

$\hat{R}(t_2 = 8 | t_1 = 5) = 0.494650$ if $m_f = 1.95$ volts

$\hat{R}(t_2 = 8 | t_1 = 5) = 0.148368$ if $m_f = 2.20$ volts

이에 대한 계산 결과는 <표 1>에 나타나있다.

<표 1> 고장 기준이 1.95볼트일 때 알카라인 배터리의 계산된 성능 신뢰도

Time(Hr)	Gm(t)	f(t)	F(t)	R(t)
0.0	0	0	0	1
0.2	0	0	0	1
3.4	0	0	0	1
3.6	0.1389	0.012430	0.012430	0.987569
3.8	0.1556	0.013924	0.026354	0.973645
4.0	0.1711	0.015311	0.041666	0.958333
4.2	0.1855	0.016600	0.058266	0.941733
4.4	0.1989	0.017799	0.076066	0.923933
4.6	0.2115	0.018927	0.094993	0.905006
4.8	0.2233	0.019982	0.114976	0.885023
5.0	0.2346	0.020994	0.135970	0.864029
5.2	0.2455	0.021969	0.157939	0.842060
5.4	0.2560	0.022909	0.180849	0.819150
5.6	0.2664	0.023839	0.204689	0.795310
5.8	0.2766	0.024752	0.229442	0.770557
6.0	0.2870	0.025683	0.255125	0.744874
6.2	0.2976	0.026632	0.281757	0.718242
6.4	0.3084	0.027598	0.309356	0.690643
6.6	0.3198	0.028618	0.337974	0.662025
6.8	0.3317	0.029683	0.367658	0.632341
7.0	0.3444	0.030820	0.398478	0.601521
7.2	0.3579	0.032028	0.430506	0.569493
7.4	0.3723	0.033316	0.463823	0.536176
7.6	0.3879	0.034712	0.498536	0.501463

7.8	0.4048	0.036225	0.534762	0.465237
8.0	0.4229	0.037845	0.572607	0.427392
8.2	0.4426	0.039608	0.612215	0.387784
8.4	0.4639	0.041514	0.653729	0.346270
8.6	0.4870	0.043581	0.697310	0.302689
8.8	0.4880	0.043670	0.740981	0.259018
9.0	0.4611	0.041263	0.782245	0.217754
9.2	0.4320	0.038659	0.820904	0.179095
9.4	0.4006	0.035849	0.856754	0.143245
9.6	0.3668	0.032824	0.889578	0.110421
9.8	0.3305	0.029576	0.919155	0.080844
10.0	0.2915	0.026086	0.945241	0.054758
10.2	0.2497	0.022345	0.967586	0.032413
10.4	0.2050	0.018345	0.985932	0.014067
10.6	0.1572	0.014067	1	0
10.8	0	0	1	0

5. 결론 및 요약

상태 파라미터에 기준한 온라인 성능 신뢰도를 활용하면 시스템 각자의 운영 환경하에서 각 시스템의 상태 정보를 나타내는 파라미터를 사용하여 각 파라미터의 계량치를 통하여 시스템의 상태를 신뢰도의 관점에서 고장시점을 정확히 예측할 수 있게 되고 설비신뢰도 모델과 설비 관리 정보시스템과 연계 사용하면 보전비용의

최소화를 가져올 뿐 아니라 첨단 생산설비의 가용도(Availability)을 극대화할 수 있으며 기업내 각종장비 및 설비들을 전체 시스템 수준에서 총체적으로 관리 운영하면 더 효율적인 운영 방안이 될 수 있다.

참고문헌

- [1] Kim, Yon S.; "Performance and Tool Reliability for Metallic Composites," PhD Dissertation, 1991, Texas Tech University, Lubbock, Texas, USA.
- [2] Knezevic, J.; "Condition Parameter Based Approach to Calculation of Reliability Characteristics," *Reliability Engineering*, 19 : 29-39.
- [3] Lewis, E. E.; *Introduction to Reliability Engineering*, 2nd ed., New York, John Wiley & Sons, 1992.
- [4] Lu, H., Kolarik, W. J., and Lu, S. S., "Real-time Performance Reliability Prediction," *IEEE Transaction on Reliability*, 50(4) : December 2001.
- [5] Nelson, Wayne, *Accelerated Testing : Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis*, John Wiley & Sons, New York, 1990.
- [6] Neter, J., Wasserman, W., and Kutner, M. H., "Applied Linear Statistical Models," Second Ed., Irwin, Homewood, Illinois, 1985.
- [7] Pau, L. F., *Failure Diagonosis and Performance Monitoring*, New York, Marcel Dekker, 1981.