

# A Study on Reliability Prediction of System with Degrading Performance Parameter

Yon Soo Kim<sup>†</sup> · Young-Bae Chung

Department of Industrial and Management Engineering, Incheon National University

## 열화되는 성능 파라미터를 가지는 시스템의 신뢰성 예측에 관한 연구

김연수<sup>†</sup> · 정영배

인천대학교 산업경영공학과

Due to advancements in technology and manufacturing capability, it is not uncommon that life tests yield no or few failures at low stress levels. In these situations it is difficult to analyse lifetime data and make meaningful inferences about product or system reliability. For some products or systems whose performance characteristics degrade over time, a failure is said to have occurred when a performance characteristic crosses a critical threshold. The measurements of the degradation characteristic contain much useful and credible information about product or system reliability. Degradation measurements of the performance characteristics of an unfailed unit at different times can directly relate reliability measures to physical characteristics. Reliability prediction based on physical performance measures can be an efficient and alternative method to estimate for some highly reliable parts or systems. If the degradation process and the distance between the last measurement and a specified threshold can be established, the remaining useful life is predicted in advance. In turn, this prediction leads to just in time maintenance decision to protect systems. In this paper, we describe techniques for mapping product or system which has degrading performance parameter to the associated classical reliability measures in the performance domain. This paper described a general modeling and analysis procedure for reliability prediction based on one dominant degradation performance characteristic considering pseudo degradation performance life trend model. This pseudo degradation trend model is based on probability modeling of a failure mechanism degradation trend and comparison of a projected distribution to pre-defined critical soft failure point in time or cycle.

**Keywords** : Reliability Prediction, Degrading System, System Performance Parameter, Remaining Useful Life

### 1. 서 론

오늘날 경쟁적인 비즈니스 환경에서 제품 신뢰성 테스트에 허용되는 시간은 점점 감소되어 가고 있으며, 제

품이나 시스템은 점점 제조역량의 향상이나 기술발전에 힘입어 고장이 거의 발생하지 않게 되었다. 제품 수명이 급격히 증가됨에 따라 전무한 수명 데이터(Lifetime data) 또는 최소한 고장 데이터로 제품이나 시스템의 신뢰성에 대한 의미 있는 추론을 한다는 것이 점점 불가능한 경우가 되어가고 있다.

신제품의 신뢰성을 중심으로 기업에서 추구하여야 할 일은 첫째 고객의 요구사항을 맞추는 것이고, 둘째는 영

Received 30 October 2015; Finally Revised 7 December 2015;  
Accepted 8 December 2015

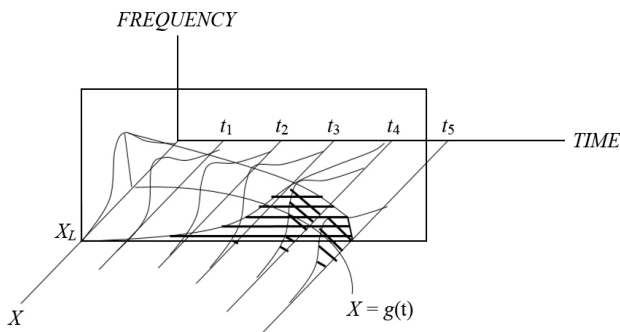
<sup>†</sup> Corresponding Author : yonskim@inu.ac.kr

속기업으로서 흑자구현을 하기 위하여 고 신뢰성 제품을 적은 비용으로 설계에 반영하여 라이프사이클(life cycle)에 걸친 비용을 최소화하는 프로세스를 구현하는 것 일 것이다. 최근 부품 소재 기술 및 설계 기술의 급격한 발전과 진보로 고객의 요구를 맞추며 경쟁 제품 보다 좋은 성능을 보이는 제품은 고 신뢰성 제품으로 신뢰성 평가 및 예측이 전통적인 방법으로는 특정 제품군에서는 매우 어렵거나 불가능 한 경우가 있다[12].

신제품의 정상적 수명(Lifetime) 혹은 가속 수명(Accelerated lifetime) 데이터를 통한 제품의 신뢰성 평가 및 예측이 어려운 경우, 시간 또는 사이클이 지남에 따라 제품이나 시스템의 성능(Performance)이 저하되는 성능 자료는 정해진 제품이나 시스템의 특성에 따라 성능이 치명적 수준(Critical level; Failure level)까지 저하될 경우를 고장으로 판정하여 제품의 수명 자료를 대신할 수 있는 경우이다. 이런 경우 제품이나 시스템의 주 된 성능을 나타내는 열화되는 성능정보(Degrading performance information)를 사용하여 기존의 신뢰성 정보를 간접적으로 예측할 수 있게 된다.

주어진 제품, 장비, 시스템, 서브시스템, 부품레벨에서 운영되는 성능 파라미터(Performance parameter)를 측정할 수 있으면 그러한 파라미터를 이용한 건진성 평가 및 건강 상태(Health Evaluation and State of Health) 신뢰성 척도를 시간 축에서 실제 성능 파라미터를 사용한 신뢰도 척도에 대한 개념과 모델링 방법을 필요로 하고 있다. 기존의 시간 도메인에서 성능 도메인으로의 1:1 맵핑(Mapping)에 대한 방법론이 필요하다[11].

본 연구에서는 <Figure 1>에서와 같이 성능 파라미터는  $X(t) = g(t)$ , 고장 수준을 나타내는 임계값은  $X_L$ 로 표현하는 경우,  $X(t)$ 는 시간에 따라 열화 됨에 따라  $X_L$  지점에서 고장이 발생하고 그 때까지의 시간이 수명이 된다. 전체 시스템이나 제품에 대한 고장 확률 분포는 전면에 수평으로 친 빗금 부분에 해당한다.



<Figure 1> Typical Parameter Degradation Toward a Critical Limiting Value[3, 7]

본 논문에서는 이와 같은 상황에서 성능을 나타내는 여러 파라미터 중 고장진단 및 고장예측에 사용할 수 있는 열화되는 주 된 성능 파라미터를 감지하고 추적할 수 있으면 이를 근거로 신뢰도를 예측하여 다음 고장 직전까지의 잔여 수명을 예측할 수 있는 확률 개념의 신뢰도 지표로 표현되는 신뢰도 예측 모델링 방법론에 대하여 다루며 이를 활용하여 제품이나 시스템의 보전(Maintenance) 및 유지 노력에 효율적으로 적용 가능여부를 검토하고자 한다[4, 5, 10].

이러한 신뢰도 예측 방법을 사용하게 되면 실제 성능 정보의 성능 파라미터의 값을 이용하여 제품이나 시스템의 신뢰도를 최적으로 예측하여 제품이나 시스템의 최대 수명까지 운영할 수 있게 된다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 성능(Performance)에 기반한 신뢰도 척도

고급 품질 및 신뢰도를 갖는 신제품의 개발과 제품의 신뢰성 향상, 그리고 소비자의 다양한 요구사항을 제품에 반영하기 위해서는 제품의 개발 및 설계 단계에서부터 제조 그리고 사용되어 폐기에 이르기까지 수명에 관련된 다양한 정보의 수집과 정확한 신뢰성 분석이 필요하다. 부품·소재 및 시스템·제품 등이 주어진 사용 환경 또는 조건에서 일정기간 동안 고장 없이 최초의 품질(성능)을 유지하는 특성을 신뢰성이라고 하는데, 이러한 신뢰성을 측정하는 척도가 시간 도메인(Time domain)에서는 고장시간을 고려하여 측정된 시간 영역에서의 확률적인 척도는 고장 또는 비고장의 이분법적인 상태만을 나타내며 실제 운영되는 현장에서의 제품, 장치, 시스템의 여러 가지 상태정보를 나타내는 성능정보는 고려하지 않고 있다. 신뢰도는 시간 도메인(Time domain)과 빈도 도메인(Frequency domain)에서 정의되며 시간 도메인에서 신뢰도  $R(t)$ 는 ‘제품이나 시스템이 일정기간 접하게 되는 사용조건하에서 의도된 임무 또는 기능을 완수하는 능력 또는 성질을 나타내는 확률’로  $T$ 가 수명을 나타내는 확률변수 일 때, 식 (1)로 정의된다[6, 9].

$$R(t) = \Pr(T > t) \tag{1}$$

성능 도메인(Performance domain)에서는

$$R(t) = \Pr(\text{Performance, } X(t) > X_L \mid \text{operating condition, } T > t) \tag{2}$$

로 정의된다.

신뢰도를 나타내는 지표는 0에서 1사이의 확률로 정의되고 일반적으로 모든 운영조건이나 환경조건은 동일하다는 가정 하에서 시스템의 고장시간 즉 수명의 분포에서 구해지는데 제조환경에서는 시스템의 상태를 나타내주는 파라미터를 센서를 통하여 계속하게 되고 모니터링할 수 있다. <Table 1>은 시스템 파라미터로 사용될 수 있는 센서 측정량의 예를 보여주고 있다. 이러한 제품이나 시스템의 물리적 특성을 나타내는 성능신호는 시간에 따라 열화되고 제품이나 시스템의 신뢰도를 측정할 수 있는 중요한 정보가 된다. 이러한 열화되는 신호 중에서 소비자가 가장 민감하게 반응하는 특성을 가진 열화 정보가 주된 시스템 성능 파라미터가 된다. 예를 들면 진동, 전류, 이동속도, thrust 등과 같은 시스템의 건강 상태(SOH, state of health)를 나타내는 시스템 파라미터는 고장시점이 다가옴에 따라 열화되어 파라미터의 값이 상승하거나 하강하게 되며 제품의 품질이나 가공조건에 따라 어느 시점에서(a certain point of time) 고장으로 정의되는 임계점(Critical Value)에서 고장이 발생하였다고 하며 이때의 시간을 시스템의 수명(Lifetime)이라 한다. 이때 임계점은 각각 사용목적, 품질 정도, 제품의 가공 정도에 따라 다르게 설정되게 된다. 이를 약소 고장(Soft failure)이라고 한다.

<Table 1> Sensor Measurands Example for System Performance Parameter[12]

| Domain            | Examples                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Thermal           | Temperature(range, cycles, gradients, ramp rates), heat flux, heat dissipation                                                                                                                           |
| Electrical        | Voltage, current, resistance, inductance, capacitance, dielectric constant, charge, polarization, electric field, frequency, power, noise level, impedance                                               |
| Mechanical        | Length, area, volume, velocity or acceleration, mass flow, force, torque, stress, strain, density, stiffness, strength, direction, pressure, acoustic intensity or power, acoustic spectral distribution |
| Humidity          | Relative humidity, absolute humidity                                                                                                                                                                     |
| Biological        | pH, concentration of biological molecule, microorganisms                                                                                                                                                 |
| Chemical          | Chemical species, concentration, concentration gradient, reactivity, molecular weight                                                                                                                    |
| Optical (radiant) | Intensity, phase, wavelength, polarization, reflectance, transmittance, refractive index, distance, vibration, amplitude, frequency                                                                      |
| Magnetic          | Magnetic field, flux density, magnetic moment, permeability, direction, distance, position, flow                                                                                                         |

## 2.2 물리적인 열화 모델

열화되는 과정에서 열화되는 비율 그 자체는 스트레스 변수의 함수로 표현될 수 있다. 제품이나 시스템의 성능을 나타내는 Performance 함수로 사용될 수 있는 일반적으로 널리 통용되는 열화 관계식으로 사용될 수 있는 모델은 다음과 같다[9].

### 2.2.1 아레니우스(Arrhenius) 열화 모델

스트레스가 온도인 경우에 다음과 같은 아레니우스 모델이 사용될 수 있다.

$$v = A \exp(-B/T) \tag{3}$$

v : 고장나는 프로세스 율, 반응 률

T : 절대온도

A : 비온도 상수 팩터

B :  $E_a/K$ , 활성화에너지/볼츠만 상수

K :  $8.623 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$

시간 t에서의 시스템 파라미터의 관측값  $X_t$ 은

$$X_t = \alpha + tA \exp(-B/T) \tag{4}$$

로 표현될 수 있다.

고장 시간 예측치는

$$\hat{t} = [(X_t - \alpha)/A] \exp[B/T] \tag{5}$$

### 2.2.2 일반화 Eyring 모델

고장 프로세스를 온도와 다른 스트레스 변수로 표현되며 고장 시간 예측치는

$$\hat{t} = (A/T) \exp[B/(KT)] \cdot \exp VC + (D/KT) \tag{6}$$

A, B, C, D는 관측 데이터로부터 추정되는 계수이며 K는 볼츠만 상수, T는 절대온도이다. 예를 들면 이 모델은 스트레스 변수가 전압, V이라면 전기장치 분석에 사용될 수 있으며 열화 프로세스 성능 관측치  $X_t$ 는

$$X_t(T, V) = \alpha - tA' \exp[-(B'/T) - C'V - D'(V/T)] \tag{7}$$

$A', B', C', D'$ 는 제품이나 시스템의 열화 특성을 나타내는 계수이다.

2.2.3 Coffin-Manson 모델

크랙이나 재료의 피로나 변형에 의한 기계적 고장 모델로 스트레스 변수의 사이클이나 온도 변화 나 사이클의 주기 변화를 설명하는 모델이다. 신뢰도 분석에서는 반복된 온도 사이클에 기인한 솔더 크랙킹(solder cracking) 모델로 사용되며 관계식은 식 (8)과 같다.

$$N_f = Af^\alpha (1/\Delta T)^\beta G(T_{max}) \quad (8)$$

- $N_f$  : 주어진 고장 퍼센트까지의 사이클 수
- $f$  : 사이클 빈도
- $\Delta T$  : 온도 범위
- $G$  : 사이클로 도달되는 최대 온도에 의존하는 팩터
- $\alpha, \beta$  : 상수

이 모델을 사용하면 시스템 파라미터는 식 (9)로 표현되며 A, B,  $K_1$ ,  $K_2$ 가 열화 프로세스를 특징짓는 계수일 때

$$X_t = \alpha - At^{K_1+1} + Bt^{K_2+1} \quad (9)$$

고장시간  $t$ 는

$$\hat{t} = \exp[\log(X_t/AB\alpha)/(K_1 + K_2 + 2)] \quad (10)$$

2.2.4 역 거듭제곱 모델

제품이나 시스템의 수명 스트레스 변수의 역 거듭제곱 함수로 표현될 수 있다. 이런 경우 특성 수명은 식 (11)로 표현 된다.

$$\theta = 1/(KV^n) \quad (11)$$

V는 스트레스 변수 이며 K와 n은 제품이나 시스템의 열화 특성을 나타내는 계수이다.

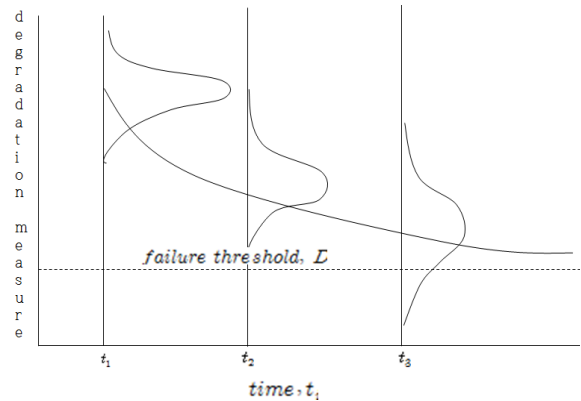
제품이나 시스템의 열화 고장의 특징을 나타내는 시스템 파라미터의 관측 값은 고장 물리 법칙에 기반 한다면 위와 같은 특정 모델을 사용하여야 한다. 사용시간/빈도(Usage or Cycle)에 따라 열화(Degradation)되는 정도를 데이터로부터 추정하여야 하며 그렇지 않은 경우는 시스템 파라미터의 경향선을 자료로부터 예측하고 또한 관련된 계수를 추정하여야 한다. 이렇게 수립된 경향선은 제품이나 시스템의 가상 라이프(pseudo life)를 제공하여 주는 역할을 하게 된다[12].

2.3 기존 열화 모델링 연구

열화되는 모델링에 따라 신뢰도를 예측하기 위해서는 고장 물리 메커니즘이 명확하게 이해되어야 한다. 제품의

성능을 특징 짓는 시스템 파라미터의 관측값은 해당 시점에서 전체 모집단으로 부터의 한 관측치이며 확률변수이다. 시스템 파라미터의 값에 대한 고장으로 미리 한정된 약소고장(Soft failure)값에 도달 하는 고장시간에 대한 확률 분포 모델을 통해서 수명분포를 예측하는 많은 연구가 선행 되어 왔다.

Lu와 Meeker[8]는 열화 모델링을 통하여 신뢰도를 예측하기 위한 첫 번째 성공적인 응용 사례를 제공해 주고 있다. 그들은 고장시간 분포를 추정하기 위하여 고정된 스트레스 변수의 수준에서 열화 데이터 분석을 위하여 회귀분석 모델을 사용하였다. n개의 랜덤 샘플의 각 유닛에 대하여 열화되는 시스템 파라미터의 값을 <그림 2>에서와 같이 미리 지정한  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_s$ 에서 관측한다고 가정하고 미리 정한 중도절단 시간  $t_s$ 까지 관측하거나 시스템 파라미터 값이 미리 정한 약소고장(Soft failure) 지점에 도달할 때 까지 시간을 관측하여 사용하였다. 열화 모델은 비선형 모델을 포함 할 수 있도록 구성되어 있다. 시스템 파라미터는 2가지 유형으로 나누어지는데 모든 유닛에 공통으로 나타나는 고정효과  $\phi$ 와 각 유닛의 특성을 반영하는 랜덤 효과  $\theta_i$ 로 구성되며, 혼합효과를 추정하기 위하여 2단계 방법론을 사용한다. 고장 시간 분포 함수 추정을 위하여 몬테칼로 시뮬레이션이 사용되었으며, 그들은 신뢰구간 산정을 위하여 부트스트랩 방법을 추천하고 있다.



<Figure 2> Pseudo System Parameter Degradation Path[1]

Lu와 Kolarik[7]은 다수의 고장 모드를 고려하여 시스템 파라미터를 추적하여 실시간(real-time)으로 성능 신뢰도(Performance reliability)를 예측하는 모델을 개발하였다. 온라인 다변량 모니터링과 시스템 파라미터의 예측을 통하여 조건부 성능 신뢰도 예측치를 제공하고 있다. 여기서 시스템 파라미터의 관측치는 이를 추적하기 위하여 다변량 시계열 데이터로 취급되어 state-space 방법과 다변량 시계열 분석 방법을 동원하고 있다.

### 3. 성능 파라미터 및 열화 성능 모델링

#### 3.1 기호 정의

- A : 시스템 성능 파라미터 값이  $X - \Delta X \leq X \leq X + \Delta X$ 인 사건
- B : 시스템 파라미터 값이 임계값에 도달하여 약소 고장(Soft failure)이 일어난 사건
- t : t시간 또는 사이클
- $X_t$  : 시간 t에서의 성능 파라미터의 값
- $X_0$  : 시작점에서의 초기 파라미터의 값
- $X_L$  : Soft failure가 일어나는 임계값
- $g(t)$  : 시간 t에서의 열화 프로세스 Performance 설명 함수
- $X_{\mu(t)}$  : 시간 t에서의 성능 파라미터의 중심위치 값
- $X_{\sigma^2(t)}$  : 시간 t에서의 성능 파라미터의 값의 분산

#### 3.2 열화 모델링 전제조건

- 신뢰도 예측을 위한 모델을 구성하기 위해서는 우선 전제 조건은 다음과 같다[2, 3].
- 1) 고장 예측을 위한 제품이나 시스템으로부터 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 제품이나 시스템의 상태를 대변하는 관측값으로 비교적 애러없이 관측할 수 있어야 하며 대략 그 시점에서 특정한 분포를 갖을 수 있지만 와이블분포, 대수정규분포 또는 정규분포를 한다고 가정한다.
  - 3) 약소 고장(Soft failure)의 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(Median)으로 모집단의 50%가 이 Critical Value 값 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.

#### 3.3 열화 성능 경향 추적(Performance Trend Trace) 모델

제품이나 시스템은 사용시간/빈도(Usage or Cycle)에

따라 열화(Degradation)되는 경우가 많다. 그러한 경우 시스템의 상태를 나타내는 성능 파라미터는 설비의 능력을 대변해 주는 지표가 된다. 제품이나 시스템의 주된 성능 특성을 나타내는 변수가 하나일 경우 시간 t에서의 시스템 파라미터의 중심위치는 식 (12)~식 (14)에 의하여 표현될 수 있다. k는 열화률에 따라 설정되는 상수 값이며,  $\beta_i$ 는 시간에 따라 증가 또는 감소하는 기울기이다.

$$X_{\mu(t)} = X_0 + (X_L - X_0)(1 - e^{-kt}) \quad (12)$$

$$X_{\mu(t)} = X_0 + \beta_1 t \quad (13)$$

$$X_{\mu(t)} = X_0 - \beta_2 t \quad (14)$$

열화특성치가 증가하는 경우는 식 (12)와 식 (13)의 경우이고 이와 유사하게 특성치가 감소하는 경우는 식 (14)로 표현 될 수 있다.

시간 t에서 특성치의 분포함수는 와이블 분포, 대수 정규 분포, 정규분포를 고려 할 수 있다. 특성치를 관측하는 시간  $t_i, i = 1, n$ 에서의 분포의 분산은 식 (15)과 같이 등분산이거나 식 (16)과 같이 증가 하는 경우이다.

$$X_{\sigma^2(t)} = \sigma^2 \quad (15)$$

$$X_{\sigma^2(t)} = \sigma^2 + \beta_3 t \quad (16)$$

고장으로 정의되는 약소 고장(Soft failure) 임계점에서 고장이 발생하였다고 하면 이때의 시간을 제품이나 시스템의 수명(Lifetime)이라 한다.

#### 3.4 신뢰도 척도 계산

제품이나 시스템은 사용시간이나 사이클에서의 열화(Degradation)되는 성능 특성치의 분포 함수는 식 (17)과 같다.

$$\Pr(X < x, t) = F(x|t) \quad (17)$$

<그림 1>에서 전면에 투영된 고장시간에 대한 확률 밀도 함수는 식 (18)과 같다.

$$f(x|t) = \frac{\partial F(x|t)}{\partial x} \quad (18)$$

시스템의 상태를 나타내는 성능 파라미터의 관측값이 A일 때 고장 임계값에 도달할 확률은 <Figure 1>에서 전면에 투영된 고장시간까지의 누적 분포 함수로 표현될 수 있고 이는 식 (19)에서 식 (22)로 표현 될 수 있다.

$$\Pr(A \cap B) = \sum_{j=1}^n P(A_j B) \quad (19)$$

$$P(A \cap B) = \sum_{j=1}^n P(B|A_j) f(X_j|t) \Delta X \quad (20)$$

$$\lim_{\substack{m \rightarrow \infty \\ \Delta x \rightarrow 0}} P(A \cap B) = F_x(t) \quad (21)$$

$$F_x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} P(B|X) f(x|t) dx \quad (22)$$

시간 t에서의 Performance 관측 값이 임계 값에 도달하는 비율은 다음 식 (23)으로 표현되고 이를 활용하여 시스템 파라미터의 관점에서 고장이 발생하는 시간 축으로 1:1 대응이 이루어진다.

$$f_x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} P(B|X) \frac{\partial f(x|t)}{\partial t} dx \quad (23)$$

평균 고장 시간 간격(MTTF)은 다음 식 (24), 식 (25)와 같이 계산된다.

$$MTTF = \mu = \int_0^{\infty} t f_x(t) dt$$

$$\mu_X = \int_0^{\infty} t \int_{-\infty}^{\infty} P(B|X) \frac{\partial f(x|t)}{\partial t} dx dt \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \mu_X &= \int_0^{\infty} R(x|t) dt \\ &= \int_0^{\infty} [1 - F(x|t)] dt \\ &= \int_0^{\infty} [1 - \int_{-\infty}^{\infty} P(B|X) f(x|t) dx] dt \end{aligned} \quad (25)$$

고장률(hazard rate)는 식 (26)과 식 (27)을 통하여 계산된다.

$$h_x(T=t) = \frac{f_x(t)}{R_x(t)} = \frac{f_x(t)}{1 - F_x(t)} \quad (26)$$

$$h_x(t) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} P(B|X) \left[ \frac{\partial f(x|t)}{\partial t} \right]_{T=t} dx}{1 - \int_{-\infty}^{\infty} P(B|X) f(x|t) dx} \quad (27)$$

### 3.5 열화 신뢰도 예측 방법

제 3.4절에서 유도된 방법을 사용하여 제품의 열화되는 성능 정보를 사용하여 예측 하는 과정은 다음과 같다.

- 1) 제품이나 시스템을 주된 특성을 나타내는 시스템 파라미터 결정
- 2) 고장 조건의 정의와 약소 고장(Soft failure) 임계값 결정.

- 3) 시간 t에서의 시스템 파라미터 관측치에 대한 조건부 확률밀도 함수 결정
- 4) 시스템 파라미터 관측치를 추적하여 주는 시스템 파라미터 성능 함수 결정. 관측 자료로부터 시간 t에서의  $X_{\mu(t)}$ 와  $X_{\sigma^2(t)}$ 를 산정하여 관측치의 분산이 등분산인지, 증가하는지를 결정하고 등분산이 아니면 매 관측시점마다  $X_{\sigma^2(t)}$  분산 값 산정.

이 과정에서 관측치의 분포 함수에 따라 와이블 분포, 대수 정규 분포, 정규분포 함수 중 택일하여 MLE(Maximum likelihood estimation)방법을 사용하여 우도함수(Likelihood function)와 관련된 함수의 계수(Coefficients) 추정.

- 5) 다음 식 (28)의 신뢰도 예측 값 산정

$$\begin{aligned} \widehat{R}(t) &= \Pr(X > X_L) \\ &= 1 - F_x(x|t) \end{aligned} \quad (28)$$

### 3.6 열화 신뢰도 예측 계산

에너지 소스원 장치의 전원이  $X_0(2.95V)$ 에서 시작하여 시스템 파라미터의 값이 열화될 때  $X_L(1.80V)$ 를 약소 고장(Soft Failure)이라 가정하여 각 관측 시점에서 시스템 파라미터는 등분산이며  $X_t = X_0 - \beta t$ 의 경향으로 열화되는 정규분포를 적용하면 사용시간이나 사이클 t에서의 열화(Degradation)되는 성능 특성치의 분포 함수는 식 (29)와 같다.

$$f(X|t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{X - \bar{X} + \beta t}{\sigma} \right)^2} \quad (29)$$

시스템 파라미터의 관측값 확률변수 X의 특정값 x에 대하여 고장 시간에 대한 누적분포 함수는 식 (30)과 같다.

$$F_x(t) = \int_{x_0}^x \left( \frac{x-m}{x-X_L} \right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{X - \bar{X} + \beta t}{\sigma} \right)^2} dm \quad (30)$$

시스템 파라미터가 x이고 시간 t에서의 열화 신뢰도는 식 (31)으로 계산된다.

$$R_x(t) = 1 - \int_{x_0}^x \left( \frac{x-m}{x-X_L} \right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{X_0 - \bar{X} + \beta t}{\sigma} \right)^2} dm \quad (31)$$

와이블 분포와 대수정규 분포일 때는 각각 식 (32)와 식 (33)을 적용하게 된다.

$$R_x(t) = e^{-\left(\frac{x}{x_0 - \beta t}\right)^\beta} \quad (32)$$

$$R_x(t) = \Phi\left[\frac{\ln(x) - x_0 + \beta t}{\sigma_x}\right] \quad (33)$$

SAS JMP와 MATLAB같은 상용 소프트웨어를 활용하여 관측된 기본 데이터를 가지고 위의 과정을 자동화하는 과정을 거치게 된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 제품이나 시스템의 건강 상태(SOH)를 나타내는 주된 특성을 대변하는 시스템 성능 파라미터가 시간이나 사이클이 지남에 따라 열화하는 경우 성능도메인(Performance domain)에서 실제 성능 정보를 시간도메인(Time domain)에서의 대응 관계를 확률 분포 모델을 이용하여 기존의 신뢰도 개념의 신뢰도 모델로 1:1 대응 관계에 대하여 살펴보았다. 실제로 현장에서 적용하기에는 너무 많은 계산과정이 필요하며 많은 시뮬레이션 데이터를 통하여 검증 작업이 필요하다. 이는 추후 연구에서 진행하여 이를 소프트웨어 모듈화 하여 자동화 되면 실제 운용 데이터를 이용하여 실시간으로 적용하려 한다.

제조 생산 시스템의 건전성 상태(Health of System)를 기존의 모니터링 데이터와 현재의 실시간 정보를 추적하기 위한 열화 모델을 형성하기 위하여 기존의 시간도메인 성능도메인으로 개념의 전환을 가져오면 실제 사용할 수 있고 이해하기 쉬운 실제 제품 시스템 장비의 열화되는 파라미터 정보를 이용하기 때문에 쉬운 건전성 신뢰성 척도를 개발하여 사용하게 된다. 더 나아가 모니터링 시스템과 연계하면 시스템 형태, 고장 모드, 운영 환경에 따라 고장시점을 온라인으로 예측하면 이를 시스템의 운영 정보에 반영하여 정확한 고장시점을 예측할 수 있어 최적의 예방보전시기와 방법을 결정할 수 있도록 고장 예측을 위한 잔여수명의 분포에 대한 건전성 신뢰성 정보가 제공될 수 있다.

#### Acknowledgement

This work was supported by Incheon National University

research grant in 2013.

#### References

- [1] Coit, D.W., Evans, J.L., Vogt, N.T., and Thompson, J.R., A Method for Correlating Field Life Degradation with Reliability Prediction for Electronic Modules. *Qual. Reliab. Engng, Int*, 2005, Vol. 21, pp. 715-726.
- [2] Kim, Y.S. and Chung, Y.B., Condition Parameter-based On-line Performance Reliability. *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2007, Vol. 30, No. 3, pp. 103-108.
- [3] Kim, Y.S. and Chung, Y.B., Performance Reliability Monitoring and Prediction. *Journal of the Korean Institute of Plant Engineering*, 1998, Vol. 3, No. 2, pp. 373-386.
- [4] Knezevic, J., Condition Parameter Based Approach to Calculation of Reliability Characteristics. *Reliability Engineering*, 1987, Vol. 19, pp. 29-39.
- [5] Kumar, D., Proportional Hazards Modelling of Repairable Systems. *Quality and Reliability Engineering International*, 1995, Vol. 11, pp. 361-369.
- [6] Lewis, E.E., *Introduction to Reliability Engineering*, 2nd ed., New York, John Wiley and Sons, 1992.
- [7] Lu, S., Lu, H., and Kolarik, W.J., Multivariate Performance Reliability Prediction in Real-time. *Reliability Engineering and System Safety*, 2001, Vol. 72, pp. 39-45.
- [8] Meeker, W.Q. and Escobar, L.A., Accelerated Degradation Tests : Modeling and Analysis. *Technometrics*, 1998, Vol. 40, No. 2, pp. 89-99.
- [9] Park, D.H, Baik J.W., Park, J.W., and Song, B.S., *Reliability Engineering*, KNOU Press, 2010.
- [10] Pau, L.F., *Failure Diagnosis and Performance Monitoring*, New York, Marcel Dekker, 1981.
- [11] Pecht, M.G., *Prognostics and Health Management of Electronics*, Wiley and Sons, 2008.
- [12] Yang, G., *Life Cycle Reliability Engineering*, Wiley and Sons, 2007.

#### ORCID

Yon Soo Kim | <http://orcid.org/0000-0001-6947-718X>  
 Young-Bae Chung | <http://orcid.org/0000-0003-4259-6677>