Society of Korea Industrial and Systems Engineering Vol. 37, No. 2 : 70-76, June 2014 ISSN : 2005-0461(print)
http://dx.doi.org/10.11627/jkise.2014.37.2.70 ISSN : 2287-7975(online)

A Study on Performance Reliability Analysis Device of Primary Battery

Yon Soo Kim† · Young-Bae Chung

Department of Industrial and Management Engineering, Incheon National University

1차 전지의 성능 신뢰도 분석 장치에 관한 연구

김연수† · 정영배

인천대학교 산업경영공학과

In industrial situation, electronic and electro-mechanical systems have been using different type of batteries in rapidly increasing numbers. These systems commonly require high reliability for long periods of time. Wider application of battery for low-power design as a prime power source requires us knowledge of failure mechanism and reliability of batteries in terms of load condition, environment condition and other explanatory variables. Battery life is an important factor that affects the reliability of such systems. There is need for us to understand the mechanism leading to the failure state of battery with performance characteristic and develop a method to predict the life of such battery. The purpose of this paper is to develope the methodology of monitoring the health of battery and determining the condition or fate of such systems through the performance reliability to predict the remaining useful life of primary battery with load condition, operating condition, environment change in light of battery life variation.

In order to evaluate on-going performance of systems and subsystems adopting primary batteries as energy source, The primitive prototype for performance reliability analysis device was developed and related framework explained.

Keywords : Reliability Prediction, Primary Battery, Reliability Analysis, Performance, PHM.

1. 서 론

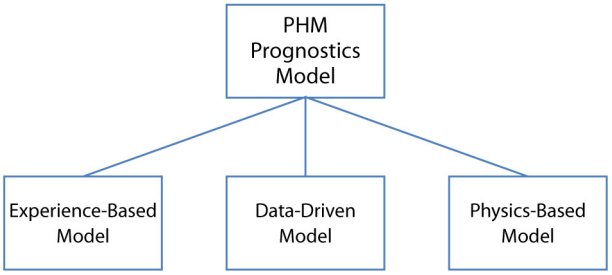
배터리는 교통, 신재생 에너지, 전력 저장, 전력 균형, 대체 장치 및 연속 전원공급기와 같이 다양한 분야에서 점차 사용이 증가되고 있다. 전기 자동차, 철도, 해양 및 항공 운송의 안전 및 신뢰성은 사용되는 배터리의 품질에 의존하고 있다[1].

또한 배터리는 에너지소스 원으로써 다양한 산업용 전자 또는 전자기계 시스템에 적용되어 사용되며 그러한 시스템의 기능적 역할에 핵심 부분을 담당하고 있으며, 일상생활에서 그 사용량도 날로 증가함에 따라 배터리의 안전, 성능 및 내구성이 매우 중요하게 되었다. 따라서 배터리의 고장 또는 성능 저하는 관련 시스템의 성능 및 운영 능력 손상을 가져 올 수 있으며, 돌발적인 고장을 야기 할 수 있어 배터리의 신뢰성은 매우 중요하다[4, 12].

다양한 산업용 어플리케이션에서 파워소스로서 미션 크리티컬(Mission-critical)한 장치나 시스템에서 많이 활용되는 배터리의 신뢰도를 예측하고 평가 할 수 있는 성능 파라메터(Performance parameter) 데이터를 기반으로 한 배터리 성능 신뢰도(Performance Reliability)를 산정하고 예측할 수 있는 능력은 미션크리티컬(Mission-critical) 한 시스템에 매우 중요한 요소이며, 관련된 여러 파라메터 인자 운영상태 인자의 영향을 모니터 할 수 있는 다양한 센서들을 개발하고 모델링할 수 있고 이를 평가 산정 할 수 있는 실험 장치들이 다양한 응용분야에서 개발되어

Received 11 June 2014; Accepted 19 June 2014
† Corresponding Author : yonskim@incheon.ac.kr

활용되고 있으며 최근에는 시스템의 예지와 건강관리(Prognosis and Health Management; PHM) 분야로 <Figure 1>과 같이 경험기반의 모델, 측정 자료 기반의 모델 그리고 고장물리 기반의 모델을 중심으로 많은 활성화된 연구 결과를 내놓고 있다[2, 13, 15].



<Figure 1> PHM Prognostics Models

특히, 배터리 PHM 관련 연구들이 미국 NASA를 중심으로 한 여러 연구기관에서 오래 전부터 행하여져 왔다. 1차 전지이외에 현재는 전기 자동차와 여러 모바일 장치들에 사용되는 2차 전치의 연구가 활발히 진행되고 있다.

이러한 산업 생산 현장에서 사용되어 지는 제품, 장비, 시스템, 서브 시스템, 부품 레벨에서 운영되는 상태 파라메터(Parameter)를 측정할 수 있으면 그러한 파라메터를 이용한 신뢰성 척도를 시간 축에서 실제 성능정보를 사용한 성능 신뢰도 척도에 대한 개념과 모델링 방법을 필요로 하고 있다.

배터리의 상태를 나타낼 수 있는 열화 되는 성능 정보를 감지하여 현재의 상태를 진단하여 열화 되는 성능의 수준이 사용자가 설정한 주의수준, 위험수준 그리고 고장수준에 이르는 과정에서 정확하게 다음 고장시점을 예측하여 고장시점 바로 직전에 필요 조치를 하여 그에 따른 전체 시스템의 비용 및 유지 노력을 최소로 유지할 수 있는 프레임웍이 가능하다. 궁극적으로 배터리의 현재 상태에 기반 한 품질 평가 및 수명 예측이 가능하도록 한 시험 장치의 설계와 개발을 통하여 배터리 신뢰도 측정 프레임웍(Battery Reliability Testing Framework)을 제공할 수 있게 된다.

본 연구에서는 1차 전지의 성능(Performance)을 나타내는 여러 파라메터 중 성능진단 및 고장예측에 사용할 수 있는 열화 되는 성능 파라메터를 감지하고 추적하여 이를 근거로 성능 신뢰도를 예측하여 다음 고장 직전까지의 잔여수명을 예측할 수 있는 확률 개념의 신뢰도 지표로 표현되는 성능 신뢰도 모델링 방법에 대하여 다루며 이를 활용할 시험 장치 하드웨어를 설계하고 그 방법론을 제안하고자 한다.

배터리의 상태 정보를 추적하기 위한 하드웨어 모델의 개발을 통하여 기존의 시간 도메인(Time Domain)에서 성능 도메인(Performance Domain)으로 개념의 전환을 가져오고 실제 사용할 수 있고 이해하기 쉬운 배터리의 열화 되는 파라메터 정보를 실시간으로 이용할 수 있는 배터리 신뢰도 측정 장치를 통하여 쉬운 신뢰성 척도를 개발하면 현장 작업자들 또는 보전이나 정비 작업자에 대한 쉬운 관리 척도를 제공하게 된다.

부착된 센서를 활용한 온라인의 실시간 모니터링 시스템과 연계하면 시스템 형태, 고장 모드, 운영 환경에 따라 고장시점을 온라인으로 예측하면 이를 시스템의 운영 정보에 반영하여 정확한 고장 시점을 예측 할 수 있어 잔여수명의 분포에 대한 정비, 보전 및 신뢰성 정보가 제공될 수 있다.

2. 이론적 배경

2.1 1차 전지(Primary Battery)

전지는 1차 전지와 2차 전지로 구분한다. 1차 전지는 충전이 불가능해 1회 사용으로 수명이 다하는 전지를 말하는데 여기서는 '일반형 전지'로 구분한다. 2차 전지는 용량이 다되면 충전시켜 다시 사용할 수 있는 전지를 말하며 여기서는 '충전형 전지'로 구분한다[3].

일반적으로 모든 전지는 내부에 들어 있는 화학 물질(활물질)의 화학 에너지를 전기 에너지로 변환하는 장치이다. 전지는 보통양극(활물질), 음극(활물질), 분리막(양극과 음극을 서로 분리시키는 막)과 전해질(두 전극 사이의 이온 전달을 가능토록 함) 등으로 이루어져 있다. <Table 1>에는 AA사이즈의 여러 전지의 특징을 비교해 놓은 전지별 차이점이 기술되어 있다.

<Table 1> Characteristics of Different Batteries Available in AA Format[1]

	Carbon-zinc	Alkaline	Lithium(Li-FeS2)
Capacity[mAh]	400~1,700	1800~2800	2500~3400
Nominal V	1.50	1.50	1.50
Discharge Rate	Very low	Low	Medium
Shelf Life	1~2years	7years	10~15years
Leak resistance	Poor	Good	Superior
Rechargeable	No	No	No
	NiCd		NiMH
Capacity[mAh]	600~1000		800~2700
Nominal V	1.20		1.20
Discharge Rate	Very high		Very high
Shelf Life	3~5years		3~5years
Leak resistance	Good		Good
Recharge-able	Yes		Yes

2.2 배터리 성능 특성

배터리의 수명에 영향을 미치는 파라메터는 내부 파라메터와 외부 파라메터로 나눌 수 있으며 내부 파라메터는 제조업체와 관련된 품질 수준 내용이며 외부 파라메터는 배터리의 사용 및 운용에 관련된 내용이다. 외부 파라메터는 1) 온도 2) Charge 방법 3) Discharge방법 4) 사용 모드(Operating mode) 5) 사용습관(Usage pattern) 등이다.

여기서는 통상적으로 사용되는 외부 파라메터의 성능을 측정할 수 있는 파라메터를 대상으로 하며 성능을 모니터링 하기 위하여 많이 사용되는 파라메터를 <Table 2>와 같이 정리될 수 있다. 모니터링 한 파라메터에 따라서 배터리의 상태를 SOC(State of Charge)와 SOH(State of Health)를 지표로 하여 배터리의 신뢰도를 표현 할 수 있다.

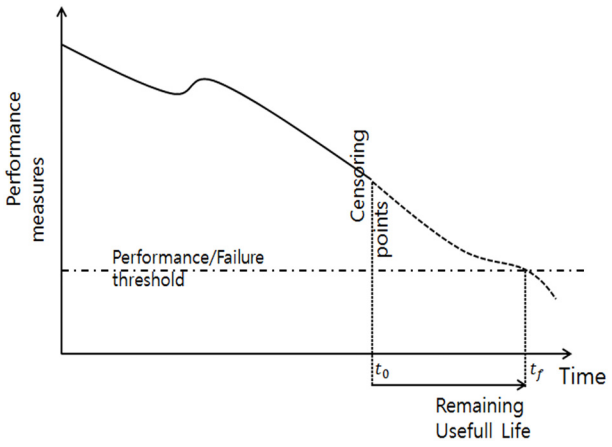
<Table 2> Some Common Battery Monitoring Parameters[15]

Categories	Objectives	SOC/SOH
Voltage (Cut-off, High/low)	Indicate rectifier	Indicate state of charge, cannot predict capacity
Battery Conductance	Find weak Cells	No need for battery discharge to indicate relative state of health
Temperature/ Temperature Difference	Show high battery temperature	Combine with other data to verify battery fault
Battery Discharge	Indicate discharge is in progress	Capacity prediction is based on history. Only reports what has happened
Run Time	Require battery discharge and history	Complex and variable calculations needing time, temperature, DC current, and history
Offline Battery Alarm	Detects battery availability	No capacity prediction (indicates battery is connect to system)

2.3 배터리 고장 정의

배터리의 고장은 고객이 요구하는 정해진 환경과 동작 조건 하에서 부품, 유니트 및 제품이 필요한 성능을 수행할 능력에 미달하는 성능의 한계점(Performance/Failure Threshold)으로 각각의 어플리케이션 마다 다르게 정의된다. <Figure 2>에서와 같이 배터리의 전압이 일정 수준 이하로 떨어지면 그 지점까지의 지속시간이 수명(Product Life)이 되며 특정시점에서 열화 되는 정도와 운영조건과 환경 조건에 따라서 각각 다른 잔여수명을 예측하고 예지할 수 있게 된다. 일정 시점에서 시스템의 운영을 중단할 수 있으며, 고장 조건 성능 한계점을 설정 할 수 있어 중도 절단(Censoring)이 가능해 진다.

부하 프로파일(Load Profile), 시간 축에 따른 에너지 가용도등 사용자의 요구사항, 실내온도, 설치환경, 운영정책, 배터리 디자인과 크기에 따라서 성능이 좌우되는 배터리의 운영 조건(Operating Condition), 전압, 전류, 온도, SOC에 따라서 배터리의 스트레스 요인이 결정된다. 이를 반영하여 부품, 유니트 그리고 제품이나 이들 시스템의 노출 되는 환경에 따라 서로 다른 스트레스를 인가하게 되고 이들 운영 환경에서의 신뢰도 모델은 이들의 스트레스 효과를 산정하는 방법론과 계량적 신뢰성 계산 모델이 필요하다.



<Figure 2> Defined Performance/Failure Points

2.4 배터리 수명 분포(Life Distribution) 모델

1차 전지의 신뢰도를 산정하기 위해서는 여러 가지의 고장모드가 존재하고 이들의 각 고장모드를 유연하게 적용할 수 있는 일반적인 수명 분포 모델인 와이블 분포(Weibull Life Distribution) 모델을 활용하도록 한다. 와이블 모델의 경우, 불신뢰도 함수 F(t), 신뢰도 함수 R(t), 확률밀도 함수 f(t), 고장률 함수 h(t)는 다음과 같다[4, 12].

$$F(t) = 1-e^{[-(\frac{t}{\theta})^{\delta}]} \quad t \geq 0 \tag{1}$$

$$R(t) = e^{[-(\frac{t}{\theta})^{\delta}]} \quad t \geq 0 \tag{2}$$

$$f(t) = dF(t)/dt = \frac{\delta}{\theta}(\frac{t}{\theta})^{\delta-1} e^{[-(\frac{t}{\theta})^{\delta}]} \quad t \geq 0 \tag{3}$$

$$h(t) = \frac{\delta}{\theta}(\frac{t}{\theta})^{\delta-1} \tag{4}$$

Θ = 척도모수(scale parameter) 혹은 특성 수명(characteristic life)
δ = 형상모수(shape parameter)

랜덤 고장인 경우는 δ = 1이고 이 경우는 지수 분포 모델이 된다.

N개의 구성요소가 직렬로 구성된 배터리 시스템의 경우 서로 독립적으로 작동한다고 하면, 배터리 시스템의 경우 형상모수와 척도모수는 식 (5)와 식 (6)과 같다.

$$\delta_N = \delta_1 \quad (5)$$

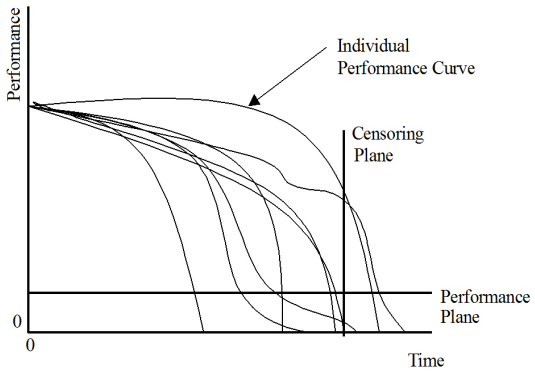
$$(1/\Theta)_N = (1/\Theta)_1/(N)^{1/\delta} \quad (6)$$

3. 성능 신뢰도 분석 장치

3.1 성능 신뢰도(Performance Reliability)

성능 신뢰도는 특정 운영 환경과 스트레스 요인이 정해진 상황에서 시스템의 성능이 특정 고장으로 정의된 임계값(Critical Value : C.V.)보다 크고, 정의에 의하여 지정된 고장시점(t_f)보다 클 확률로 정의 한다.

$$Pr(Performance > C.V \mid Operating\ Condition,\ t > t_f) \quad (7)$$



<Figure 3> Performance Reliability Concept[7]

배터리와 같이 현재의 각 시스템의 상태를 나타내주는 예를 들면 전압 강하(Voltage Drop)와 같은 시스템 성능 파라메터 값(value of a given system performance parameter)의 열화 되는 정도를 시스템에 부착된 센서시스템을 통하여 열화 되는 특성 치 파라메터를 성능 신뢰도 측정 장치에 의하여 모니터링 하여 시스템의 성능 파라메터 값이 시스템 성능 고장상태로 판단되어 지는 정해진 시점에 도달되는 시점이 결정 되는데 이는 시스템의 상태를 나타내는 통계적 데이터 모델의 기반이 된다. 이 통계적 데이터 모델은 시스템의 상태 지표에 대한 중심위치에 대한 척도(Location Measure) 와 산포를 나타내는 척도(Dispersion Measure)를 제공하게 된다. 이들 지표들을 이용하여 시스템의 신뢰도를 예측하게 되면 잔여 수명 시점을 확률적으로 예측이 가능하게 된다. 성능에 기초한 신뢰도 개념도가 <Figure 3>에 나타나 있다. 각 곡선은 각각의 배터리의 열화 특성을 나타내고 궁극적으로 이들 모집단의 전체에 대한 신뢰도를 측정 예측하고자 한다[5, 7, 8, 10, 11].

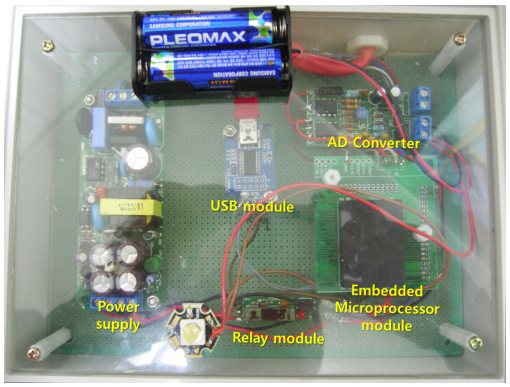
본 연구논문에서 성능 신뢰도에 대한 가정으로

1) 부품, 유니트 또는 제품이나 시스템은 열화 되는 성능 파라메터를 가지고 있다.
2) 두 개의 모수를 갖는 와이블 분포를 따른다고 가정한다.
3) 수리가 불가능 경우로만 한정한다. 1차 전지만 고려한다.
4) 부품, 유니트, 또는 제품이나 시스템은 다음 <Figure 3>과 같은 사용자의 요구조건에 맞는 고장에 해당하는 성능 평면(Performance Plane)에서 고장이 발생한다고 가정한다.
5) 부품, 유니트, 또는 제품이나 시스템은 파라메터는 오류 없이 계측된다고 가정한다.

3.2 성능 신뢰도 분석 장치 프로토타입

성능 파라메터를 모니터링 해주는 장치의 프로토타입(Prototype)이 <Figure 4>에 나타나 있고 그 장치의 구성을 나타내는 구성도가 <Figure 5>에 보여 지는데 A/D 보드를 중심으로 센서 신호를 실시간으로 계측하고 관련된 예측치를 저장하고 분석 예측하는 시스템으로 구성되어 진다.

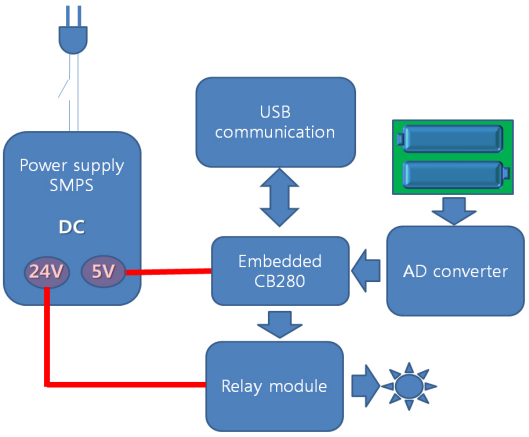
1차 전지의 전압 등 성능 특성 치를 계측하여 관련 데이터를 로깅 할 수 있게 해주며 기존 데이터에 기반 해서 성능 모델이 학습되어 개발되면 성능 모델에 따라서 각 개별 측정치가 비교되어 성능에 기반 한 시스템의 상태를 알려 주도록 하는 신뢰도 산정과 예측이 주 임무이다.



<Figure 4> Performance Reliability Analysis Device : Hardware Prototype

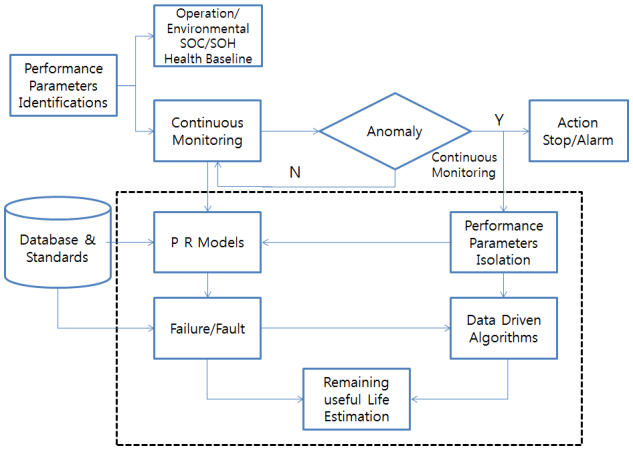
3.3 성능 신뢰도 분석 방법론

1차 전지 같은 경우는 개발된 프로토타입이 최소화되어 해당 시스템에 모듈단위로 부착되어 독자적인 모델 학습을 통하여 모니터링과 통계 모델 학습, 성능 신뢰도



<Figure 5> Performance Reliability Analysis Device : Diagram of Hardware Setup

모델을 통하여 각 측정치의 성능 신뢰도를 계산하게 된다. 부품, 유니트, 또는 제품이나 시스템 레벨에서 성능 측정 장치가 부착이 되면 <Figure 6>과 같은 절차를 거쳐 배터리의 건강상태(State Of Health)가 결정되는데 성능 신뢰도 산정을 위한 방법론이 제시되어 있다.



<Figure 6> Performance Reliability-Enabling Methodology

랜덤 고장인 경우는 δ = 1이고, 총 N개의 셀을 가진 배터리 시스템 신뢰도를 R_s라 하면

$$R_s = \prod_{i=1}^{N} R_i(t_i) \tag{8}$$

각 부품, 유니트, 또는 제품이나 시스템 마다 서로 다른 스트레스 환경인자, 관련 설명변수들이 서로 다르기 때문에 각자의 고유 라이프 프로파일에 맞는 설명 변수를 p개의변수라 하면

$$X = (X_1, X_2, X_3, \cdots, X_p) \tag{9}$$

이들 데이터를 가지고 구한 회귀계수를

$$\beta = (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \cdots, \beta_p) \tag{10}$$

라 하면 고장률(λ_i)을 기본 고장률(λ_{0i})에다 설명 변수들의 영향을 반영하면

$$\lambda_i(t_i, X) = \lambda_{0i} g(X, \beta) \tag{11}$$

$$g(X, \beta) = e^{\sum_{k=1}^{p} \beta_i X_i} \tag{12}$$

$$R(t_i, X) = e^{-e^{\sum_{i=1}^{p} \beta_i X_i}} \tag{13}$$

식 (8)과 식 (13)을 통하여 계측된 성능 데이터를 동원하여 현재의 스트레스환경, 운영 상태에서의 부품, 유니트, 또는 제품이나 시스템의 성능 신뢰도 예측 모델을 작성 할 수 있게 된다[9].

3.4 성능 신뢰도 산정

제 2.4절에 있는 식 (1)~식 (4)와 같은 와이블 분포를 따르는 모델을 사용하는 경우는 기존의 측정된 데이터로부터 성능 데이터를 사용하여 비례 위험 모델(Proportional Hazards Model)을 적용하여 스트레스와 운영 조건 인자들을 설명 변수로 하여 X는 설명변수 벡터이고 β가 회귀계수 벡터인 경우 형상모수는

$$\theta = e^{X\beta} \tag{14}$$

이며 분포함수와 신뢰도 함수를 다음과 같이 얻게 된다.

$$f(t) = \delta t^{\delta-1} e^{(-X\beta)^{\beta}} e^{(-te^{(-X\beta)^{\beta}})} \tag{15}$$

$$R(t) = e^{(-te^{-X\beta})^{\beta}} \tag{16}$$

잔여수명을 예측하기 위해서는 조건부 신뢰도 함수를 사용하여 현재 시점 t_c에서 t_f까지의 신뢰도는

$$R(t_f|t_c) = \frac{R(t_c + t_f)}{R(t_c)} \tag{17}$$

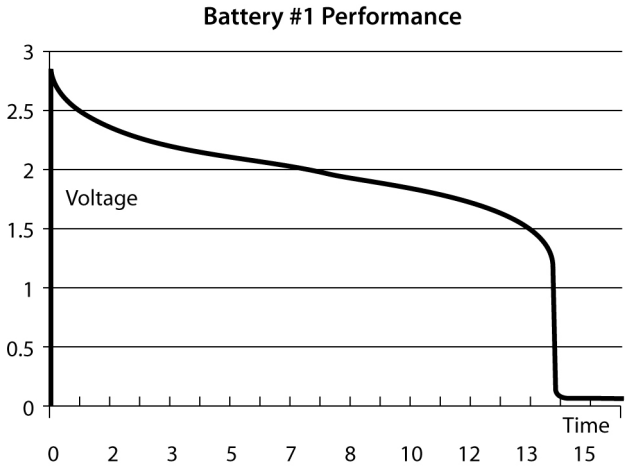
일때,

Weibull 분포를 따른다면,

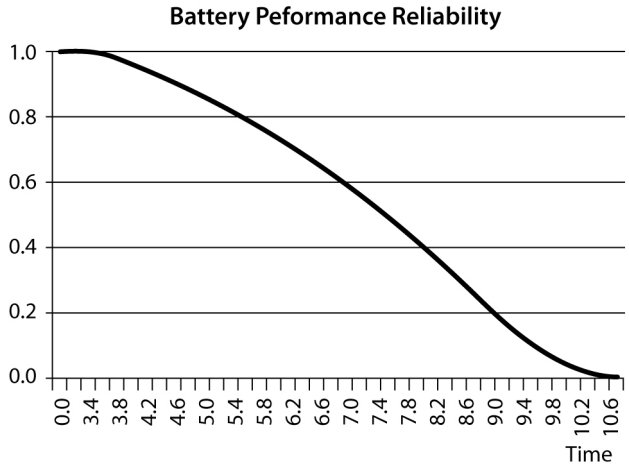
$$R(t_f|t_c) = e^{-(\frac{t_c+t_f}{\theta})^{\delta}} = e^{-(\frac{t_f}{\theta})^{\delta}} \quad (18)$$

에서 식 (14)와 식 (16)을 활용한다[6, 7].

부하(Load)가 1.2 Ohm인 경우 2개의 특정 D 사이즈 알카라인 배터리 세트의 측정된 성능 곡선이 <Figure 7>과 같다. 이들 1차 전지 조합의 고장이 1.95V로 정의된 경우 이들 성능 측정 치 에 해당하는 신뢰도 척도는 <Figure 8>에 나타나 있다. 성능 파라메터의 특성 치 도메인에서 확률 기반의 0과 1사이의 기존 신뢰도 도메인으로 변화시켜 주는 성능 신뢰도를 사용하면 해당 시스템의 상태 정보를 더 쉽게 이해하고 파악 할 수 있게 된다.



<Figure 7> Observed Battery Performance Measures When Load is 1.2 Ohm



<Figure 8> Observed Battery Performance Reliability When Failure is defined at 1.95V

4. 결 론

주어진 제품, 장비, 시스템, 서브 시스템, 부품레벨에서 운영되는 배터리 상태 파라메터를 측정할 수 있으며 그러한 파라메터를 이용한 신뢰성 척도를 시간 축에서 실제 성능정보를 사용한 성능 신뢰도 척도에 대한 개념과 모델링 방법을 정립하기 위한 시험용 성능 신뢰도 측정 장치를 고안 하였다.

1차 전지의 전류, 방전시간, 배터리의 부하등 여러 운영상태 인자의 영향을 계측할 수 있으며 자동적으로 Logging 할 수 있으며 데이터 관리가 가능한 성능 신뢰도 산정을 할 수 있는 측정 장치이며 배터리 신뢰성에 영향을 미치는 스트레스 인자들을 규명하고 인자별로 시스템 성능 신뢰도 모델링할 수 있으며, 제안된 방법론에 따라 예측 모델을 사용하여 배터리의 현재 상태의 건강정보와 잔여 수명에 대한 평가를 할 수 있는 정확한 신뢰도 분석 모델의 수립이 가능하다고 할 수 있다.

연구의 주안점은 첫째, 이들 미션 크리티컬한배터리의 신뢰도를 평가 산정 할 수 있는 배터리 수명 실험 장치의 설계와 제작이다. 둘째로는 이들 하드웨어 장치를 드라이빙할 수 있는 소프트웨어인 사용자 인터페이스와 배터리 성능 신뢰성 분석 프레임웍의 개발이다.

추후 과제로는 개발 된 장치를 통하여 실시간으로 실제 배터리 성능 정보의 다양한 상태 파라메터의 값을 이용하여 배터리의 신뢰도를 최적으로 예측하여 관련 시스템의 최대 수명까지 운영할 수 있게 하는 소프트웨어와 최적의 모델을 개발하는 것이다.

미션크리티컬한 시스템 및 장치의 가동률을 항상 최대로 유지하기 위해서는 돌발 고장 같은 것을 방지하고 사용자 기준으로 설정한 요구되는 배터리 성능의 다음 고장상태까지의 잔여 유효수명을 정확하게 예지하는 것이다. 그러한 방법은 배터리 상태 정보를 끊임없이 감시하여 이를 반영, 고장을 고장직전 시점에 방지하게 하고 각 시스템의 요소단위는 물론 시스템 전체의 신뢰성을 확보하여 배터리 성능을 정상상태로 유지하는 것이 관건이다.

Acknowledgement

This work was supported by Incheon National University research grant in 2012.

References

[1] Electropaedia, Battery and Energy Technology, http://www.mpoweruk.com.

[2] Goebel, K., Saha, B., Saxena, A., Celaya, J.R., and Christophersen, J., Prognostics in Battery Health Management. *Instrumentation and Measurement Magazine*, *IEEE*, 2008, Vol. 11, No. 4, p 33-40.

[3] Jeong Heon, A Performance Testing Device of Drycell. *Journal of Institute of Control*, *Robotics and Systems*, 2011, Vol. 17, No. 2, p 171-175.

[4] Lewis, E.E., Introduction to Reliability Engineering, 2nd ed., New York, John Wiley and Sons, 1992.

[5] 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, p 373-386.

[6] Kim, Y.S. and Chung, Y.B., A Study on Non-Operting Reliability Analysis. *Journal of the Korean Institute of Plant Engineering*, 2013, Vol. 18, No. 3, p 5-13.

[7] 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, p 103-108.

[8] Knezevic, J., Condition Parameter Based Approach to Calculation of Reliability Characteristics. *Reliability Engineering*, Vol. 19, p 29-39.

[9] Kumar, D., Proportional Hazards Modelling of Repairable Systems. *Quality and Reliability Engineering International*, 1995, Vol. 11, p 361-369.

[10] Meeker, W.Q. and Escobar, L.A., Accelerated Degradation Tests : Modeling and Analysis. *Technometrics*, 1998, Vol. 40, No. 2, p 89-99.

[11] Pau, L.F., Failure Diagnosis and Performance Monitoring, New York, Marcel Dekker, 1981.

[12] Park, D.H, Baik J.W., Park, J.W., Song, B.S., Reliability Engineering, KNOU Press, 2010.

[13] Saha, B., Goebel, K., Poll, S., and Christophersen, J., Prognostics Methods for Battery Health Monitoring Using a Bayesian Framework. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, Vol. 58, No. 2, p 291-296.

[14] Yang, G.B., *Life Cycle Reliability Engineering*, Wiley and Sons, 2007.

[15] Yinjiao Xing, Qiang Miao, Tsui, K.-L., and Pecht, M., Prognostics and Health Monitoring for Lithium-ion Battery, Intelligence and Security Informatics(ISI), *IEEE International Conference*, 2011, p 242-247.