

# 가속열화데이터 분석방법과 적용에 관한연구

## A Study on the Analysis Method and Application of Accelerated Degradation Data

김 종 곁\* · 성 기 우\*\*

Jong-Gurl Kim\* · Ki-Woo Sung\*\*

### Abstract

기술 발전 속도가 빨라짐에 따라 부품의 개발기간이 단축 되고 있다. 더욱이 최근에는 제품들의 신뢰성이 향상되어 가속수명시험을 실시하더라도 규정된 시험 시간 동안 고장을 발견할 수 없는 경우가 많이 발생하고 있다. 또한 현업에서는 성능열화에 대한 관심이 높아지고 있으며 특히 친환경차에 대한 관심이 많아지면서 연료전지 및 납-배터리의 가속열화시험법개발에 많은 관심이 증대되고 있다. 만약 고장이 발생하지 않는다고 해서 더 가혹한 스트레스를 인가하면 전혀 다른 고장 메커니즘이 나타날 수 있기 때문에 시험의 목적을 달성하기 곤란해진다. 따라서 이런 단점을 보완하기 위해 시간에 따라 정해진 시간마다 열화 특성을 갖는 특성치를 측정하여 수명을 예측하거나 신뢰성을 평가 하는 열화시험, 가속열화시험을 이용한다. 본 연구는 열화데이터 분석 방법을 정리하여 현업에 적용 가능한 분석 과정을 제안하고 향후 연료전지 및 납-배터리 가속열화시험 적용방향을 제시하고자 한다.

**Keywords:** Accelerated Degradation test (ADT), Characteristic(특성치), Degradation data analysis, degradation model

### 1. 서 론

기술발전속도가 빨라짐에 따라 제조업체들은 고신뢰도의 부품을 짧은 시간에 개발하고 있다. 반면에 신뢰성 시험은 대부분 장기간 소요된다. 특히 수명을 확인하고자 하는 수명시험은 물론 일부 환경시험의 경우에도 많은 시간을 필요로 한다. 최근에는 제품들의 신뢰성이 향상되어 가속수명시험을 실시하더라도 규정된 시험 시간 동안 고장

\* 성균관대학교 시스템경영공학과

\*\* 성균관대학교 산업공학과

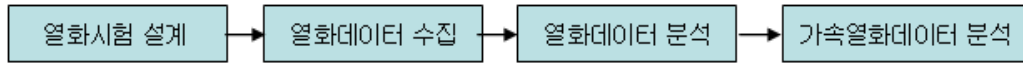
을 발견할 수 없는 경우가 많이 발생하고 있다. 따라서 시험시간을 단축하여 빠른 시간 안에 신뢰성을 평가할 수 있는 가속시험에 대한 필요성이 증대되고 있다. 특히 자동차 제조업체의 경우 친환경차량에 대한 관심이 많아지면서 연료전지 및 납-배터리의 가속 열화시험법개발에 많은 관심이 증대되고 있다. 기존 가속수명시험보다 가속열화시험의 시험의 시간 및 비용 측면에서 더 효율적이며, 이는 제품의 개발의 경제적 효과에도 큰 영향을 준다.

본 논문에서는 가속열화시험 설계 및 분석방법에 대해서 자세히 알아보고, 연료전지 및 납-배터리의 열화데이터를 수집부터 분석까지의 과정 및 연구방향을 정리하고자 한다. 열화시험에 대한 연구는 열화시험 설계, 열화데이터 수집 및 분석, 가속열화데이터 분석으로 구분할 수 있다. Meeker와 Escobar[3]는 일반적 열화경로모델과 온도를 가속한 가속열화모형 등을 제시하였고 Viviane과 Enrico[8]는 3가지 통계적 방법(근사적, 해석적, 수치적 방법)을 사용하여 열화데이터를 분석하는 연구를 하였다. 성능의 열화 모델과 열화데이터의 통계적 분석방법에 관해서는 Meeker(1998), Bain(1978), Nelson(1990)등을 비롯한 많은 학자들에 의해 연구되었다.

## 2. 열화시험이란

고장은 hard failure (고장 : 생산품 기능 정지) or soft failure (성능열화) 두 가지로 표현되며, 전통적인 신뢰성 평가에서는 hard failures를 다루었다. 그러나 높은 신뢰성 설계는 시험하는 동안에 hard failure가 거의 나타나지 않는다. 따라서 이런 경우 성능 열화분석을 통해 많은 정보를 얻을 수 있다.

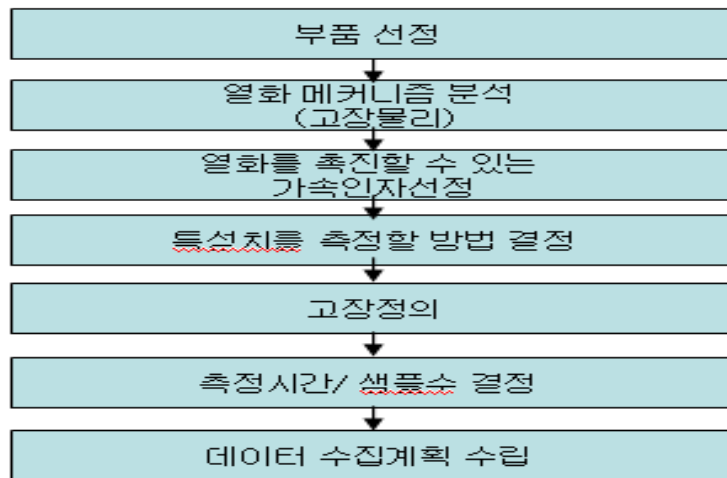
열화시험의 목적은 첫째, 각 부품들의 열화를 유발하는 물리적인 메커니즘을 설명하고 둘째, 열화유발 스트레스를 규정하는 모수들을 추정 하며 셋째, 부품들의 모집단의 열화에 대한정보를 제공한다. 열화시험의 장점은 고장이 없거나 적을 때 열화데이터는 전통적인 고장시간데이터보다 더 좋은 신뢰도 정보를 제공해주며, 고장모드만을 기록하거나 수명시험만을 실시하는 경우보다 고장메커니즘에 대한 많은 정보를 제공한다. 또한 수명시험보다 신뢰도가 높은 예측이 가능하며, 부품의 특성과 고장모드를 확인할 수 있다. 열화시험의 적용범위는 첫째, 마모 등의 열화현상이 나타나거나 기대될 수 있을 때 둘째, 특성치의 직접 또는 간접측정이 가능하고 용이할 때 셋째, 신제품특성의 시간적 변화를 파악하고자 할 때 넷째, 수명시험의 적용이 불가능할 정도로 시험시간의 한계가 있을 때 다섯째, 반응지연, 진동, 크리프, 실 누설과 같은 현상 등으로 고장을 정의하기 어려울 때이다. 즉 열화시험은 금속의 크리프(변형), 틈 확대, 마모, 부식, 산화 플라스틱 반도체, 전자부품에 주로 사용된다. 열화시험을 적용할 수 없는 경우는 첫째 상수형 고장률과 같이 고장이 시간에 무관할 때, 둘째, 특성치를 직접 또는 간접적으로 측정할 수 있는 방법이 없을 때이다. 열화시험에 대한 연구는 아래 [그림1]과 같이 열화시험 설계, 열화데이터 수집 및 분석, 가속열화데이터 분석으로 구분할 수 있다.



[그림 1] 열화분석 단계

## 2.1 열화시험 설계

열화시험 및 가속열화시험 설계는 짧은 시간 안에 가속조건에서 얻어진 시험결과로 정상 사용조건에서의 결과를 유추하는 것이므로 처음부터 계획을 잘 세워야 한다. 현업에서 적용 가능한 열화시험 설계 프로세스를 [그림 2]처럼 제시하였고, 단계별로 세부적인 내용은 다음과 같다.



[그림 2] 열화시험설계

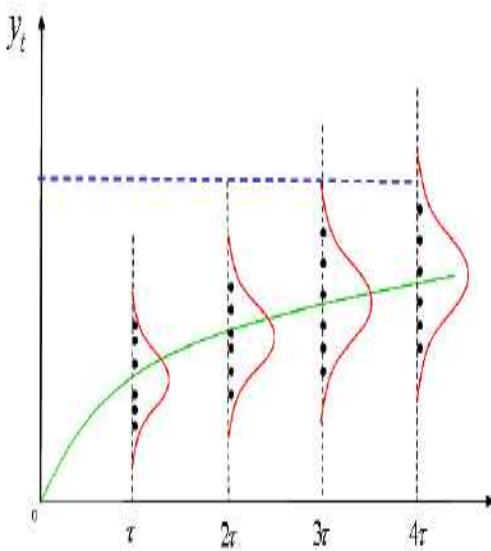
부품선정에서는 열화분석이 가능한 부품을 선정한다. 다음단계로 메커니즘(고장물리) 분석을 통해 부품의 주요열화 인자를 찾는다. 열화메커니즘과 전혀 다른 스트레스를 찾아 분석하는 오류를 범해서는 안 된다. 그 다음 열화를 촉진할 수 있는 가속인자를 선정한다. 예를 들어 LED의 경우 주요 열화인자는 온도이다. 다음으로 특성치를 측정할 방법을 결정해야 한다. 방법은 여러 가지가 있겠지만, 직접 특성치를 측정하는 방법과 간접적으로 측정할 수 있는 방법이 있겠다. 이에 따라서 시험의 측정방법이 달라진다. 그다음은 고장의 정의이다. 고장판정기준을 정의해야한다. 이때는 엔지니어의 관점보다는 고객이 느끼는 성능열화를 기준으로 해야 한다. 그 다음으로 측정시간 및 샘플수 결정은 비용에 관련된 사항이므로 부품이 특성에 맞게 정하되 충분히 데이터를 확보 할 수 있어야 한다. 측정시간 간격 또한 중요하다. 초기 열화 곡선의 모양에 따라 변화가 많은 구간은 촘촘히 측정하고 변화가 적은 구간은 넉넉히 측정하는 것도 하나의 방법일 것이다.

## 2.2 열화데이터 수집

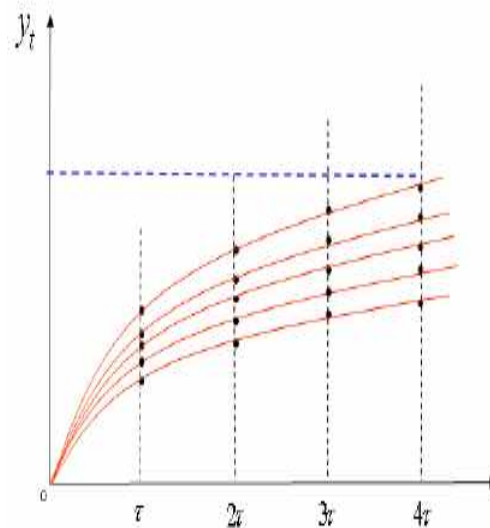
데이터 수집과정은 다음과 같이 몇 가지를 유의해야 한다. 우선 보다 정밀한 새로운 측정방법이 필요하다. 즉 측정 장비의 성능 및 시험환경을 컨트롤하여 간접 오차를 줄여야 한다. 간접 또는 대체 특성을 이용한 측정을 필요할 때에는 간접변수와 직접변수의 상관관계에 대한 명확한 근거가 있어야 한다. 만약 그렇지 않다면 시험자체의 결과의 정확도 및 신뢰도를 높이기 어려울 것이다. 또한, 측정시 측정오차를 줄이도록 해야 하며 측정방법이 데이터에 영향을 주는지 확인해야한다.

측정방법은 샘플을 투입하고 성능을 측정하는 방식에 따라 비복원측정법, 반복 측정법으로 구분된다. 비복원 측정법에서는 각 시점에서 얻어진 자료가 서로 독립이라는 가정을 할 수 있지만, 반복 측정법을 적용하면 하나의 부품에 대하여 여러 번 측정을 실시하게 되므로, 각 시점마다 얻어진 데이터는 독립이라고 할 수 없다.

비복원측정법은 시험에 N개의 부품을 투입한 다음 정해진 시점마다 일부 부품을 추출하여 성능치를 측정하고, 측정된 부품은 다시 시험에 투입 하지 않는 경우로 온도나 습도를 이용한 시험에 많이 사용된다. 반복측정법은 여러 개의 샘플을 투입하여 시험을 하되, 측정된 샘플을 다시 시험에 투입하는 경우이다. 예를 들면, 배터리 분석, 타이어 마모분석, 타이어 공기압 분석 등이 있다. 즉 성능 측정이 열화에 아무런 영향을 주지 않는 경우에 적용할 수 있는 방법이다.



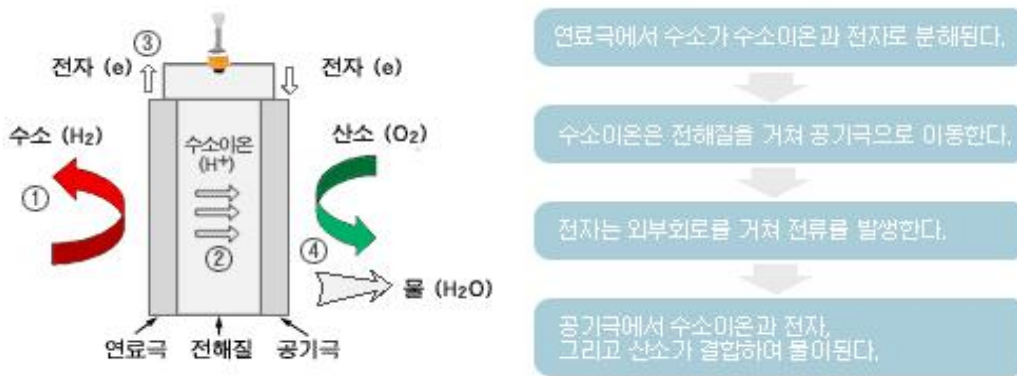
[그림 3] 비복원측정법



[그림 4] 반복측정법

### 2.2.1 연료전지 및 납-배터리의 열화데이터 수집

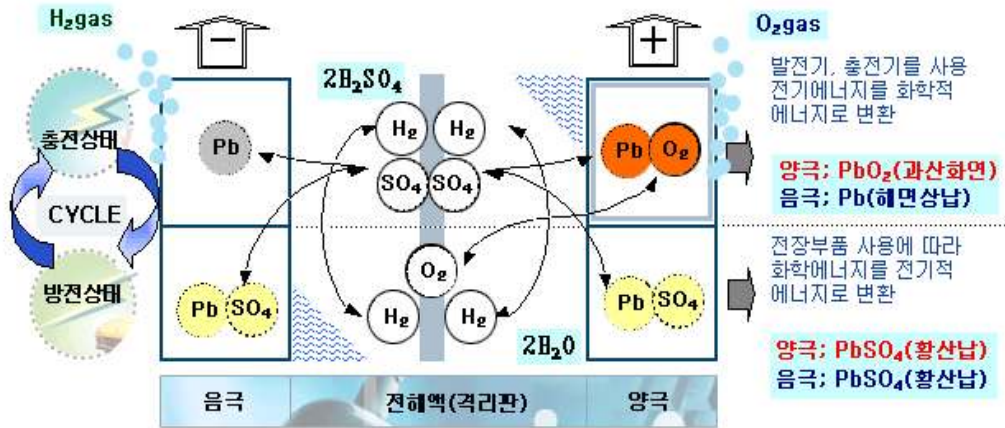
연료전지는 연료인 수소가 가진 화학적 에너지를 전기에너지로 직접 변화 시키는 에너지 변환장치이다. 연료전지의 작동원리는 산소와 수소가 결합해 물을 생성하면서 전류를 발생시키는 것이다. 연료전지 스택은 1 V 내외의 단위전지를 원하는 전압으로 수백 장 적층한 구조로 차량의 구동에너지원인 전력을 생성하는 엔진의 역할을 수행한다.



[그림 5] 연료전지 동작원리

[그림 5]는 연료전지의 구조 및 동작원리를 나타낸 기본셀 (Cell) 그림이다. 기본셀은 연료의 산화와 환원반응이 일어나는 연료극(anode)과 공기극(cathode) 그리고 이 2개의 전극사이에서 이온의 전달을 도와주는 전해질로 구성된다. 외부에서 공급되는 연료는 연료극(anode)에서 산화되어 e<sup>-</sup> 와 H<sup>+</sup>가 발생되고 각각 외부도선과 전해질에 의해 공기극(cathode)로 전달되고 공기중의 산소와 반응하여 물이 생성된다. 이때 두전극의 전위차와 외부도선으로 흐르는 전류를 전력원으로 사용하게 된다. 이때 열화치(특성치)는 전류밀도 또는 셀(Cell)당 출력전압으로 가능하다. 전류밀도는 도체(導體)의 단위 면적에 흐르는 전류의 크기를 말하며 단위는 A/m<sup>2</sup> 이다. 출력전압은 전기 계통 장치에서 신호나 전력을 외부에 공급할 때의 전압이다.

배터리(Storage Battery)는 자연에 존재하는 물질들(원자 혹은 화합물)의 고유특성 중 하나인 화학 반응성 즉, 산화 및 환원성의 차이를 이용한 것으로, 이들 물질들의 화학적 에너지(chemical energy)를 전기적 에너지(electrical energy)로 변환시켜 전기를 뽑아 쓸 수 있게 한 장치로 2차 전지를 말한다. 특히 납-배터리(Lead-Acid Battery)는 납과 묽은 황산으로 구성된 배터리로 이온화 경향이 큰 음극(Pb-해면상납)과 이온화 경향이 적은 양극 (PbO<sub>2</sub>-과산화 납)을 전해액(묽은 황산농도≒37%)에 넣어 회로를 만든 것으로 화학반응에 의해 전기적인 기전력이 발생하며, 자동차의 전원으로 사용된다. 주요 특성치로는 CCA(Cold Cranking Ampere)가 있으며, 납-배터리가 생산이 되면 CCA값이 정해지고, 사용과 동시에 CCA값은 점차 떨어진다.



[그림 6] 납-배터리 작동원리

연료전지 및 납-배터리의 경우 챔버에서 전기적 특성열화를 측정할 수 있으며, 연료전지의 경우 전류밀도 또는 셀(Cell)당 출력전압을 특성치로 납-배터리의 경우 특정치 CCA를 특성치로 설정하여 반복측정법을 사용할 수 있다. 특히 연료전지의 경우 비용이 고가이므로 반복측정법을 요하며 비복원측정법에 비해 샘플수를 적게 작게 설정 할 수 있다.

### 2.3 열화데이터 분석

열화데이터 분석방법에는 수집방법에 따라 비복원측정법 및 반복측정법의 분석방법 이 있다. 특히 연료전지 및 납-배터리에 사용될 반복측정법의 분석방법에 대해서 자세 히 알아보자.

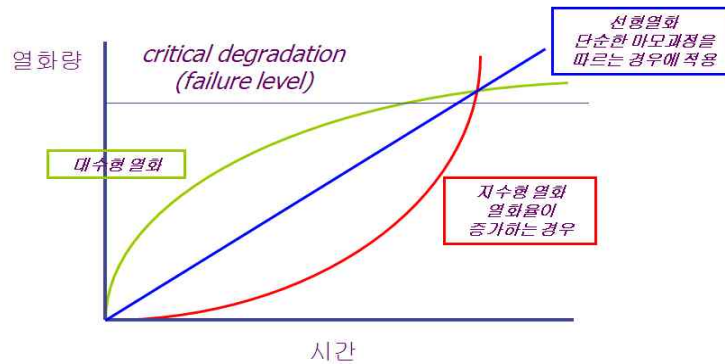
#### 2.3.1 비복원측정법의 분석

비복원 측정법의 일반적인 분석방법인 2단계 추정법은 한 시점에서의 열화데이터  $Y_j$ 에 대한 분석에서부터 시작하여, 이를 바탕으로 전체적인 열화분포,  $Y_t$ 를 분석하는 것이다. 분석방법은 다음과 같다[7]. 첫째, 각 시점별로 열화량의 분포를 결정한다. 이 때 카이제곱 검정, 콜모고로프-스미르노프 검정 및 앤더슨-달링검정법을 사용한다. 둘째, 분포에 대한 모수를 추정한다. 셋째, 시점별  $Y_j$  분포함수 동일성검정을 한다. 넷째,  $Y_t$ 에 대한 상수형 모수  $\beta$ 의 추정을 한다. 풀링하여 상수모수에 대한 추정치  $\hat{\beta}$ 을 구한다. 다섯 번째,  $Y_t$ 에 대한 변수형 모수  $\hat{\theta}_t$ 의 추정 및 신뢰성을 추정한다.

### 2.3.2 반복 측정법의 분석

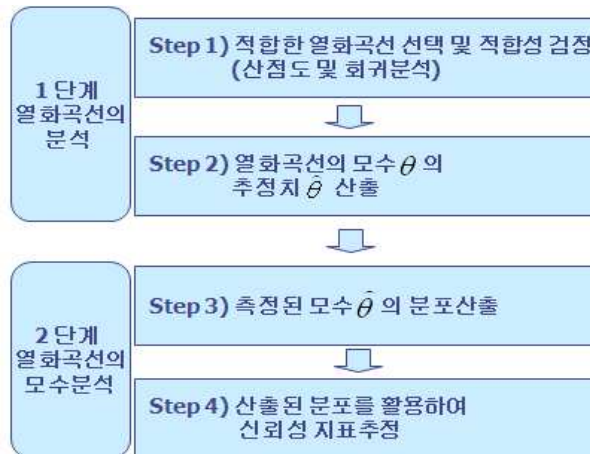
반복 측정법에 수집된 데이터는 보통 열화경로모형 (Degradation Path Model)을 이용하여 분석하며, 이때 열화곡선의 모수가 상수 또는 확률변수인지에 따라 확정계수모형(Deterministic Coefficient Model)과 확률계수모형( Random Coefficient Model)으로 구분된다. 대표적인 열화모형은 다음과 같다.

- (1) 선형모형 :  $Y_t = a + bt + \epsilon_t$
- (2) 지수모형 :  $Y_t = ae^{bt} + \epsilon_t$
- (3) 대수모형 :  $Y_t = b \cdot \ln(t) + a + \epsilon_t$
- (4) 멱승모형 :  $Y_t = a \cdot t^b + \epsilon_t$



[그림 7] 열화경로모형 (Degradation Path Model)

또한, 반복측정법은 2단계추정법이며, 기본적인 분석방법은 다음과 같다.



[그림 8] 반복측정법 2단계추정법

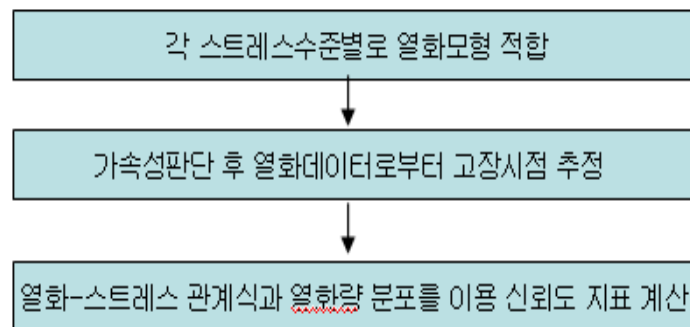
첫째로 적합한 열화곡선의 선택 및 적합성 확인이다. 시험시간을 x 축, 측정데이터를 y축으로 하여 산점도 분석을 실시하여 가장 적합한 열화곡선을 선정한다. 선정된 열화곡선이 열화데이터의 형태와 적합한지 알아보기 위해 회귀분석을 실시한 후 적합성을 확인한다. 둘째로 모수  $\theta$  에 대한 추정치  $\hat{\theta}_i$  산출한다.(  $1 < i < N$ 에 대하여 반복) 하나의 샘플에 대해 시간변화에 따른 열화곡선의 모수  $\hat{\theta}$  를 추정한다. 산출결과가 적합하다면 나머지 샘플에 대해서도 추정과정을 반복하여  $\hat{\theta}_i$ 를 산출한다. 셋째, 추정된  $\hat{\theta}_i$ 의 분포를 추정한다. 샘플에 따른  $\hat{\theta}_i$ 의 변화추이를 살펴보고 변동이 있을 경우는 확률변수로 가정하여 모수의 분포를 추정한다. 넷째, 분포를 활용하여 신뢰성 지표를 추정한다. 고장분포함수를 구하여 신뢰성 지표, 즉 평균수명이나  $B_{10}$  등을 구한다.

### 2.3.3 연료전지 및 납-배터리 반복측정법 모델 선택

연료전지 및 납-배터리의 경우 특성치의 특성을 고려하여 감소형 지수모형, 선형모형, 대수형등을 고려할 수 있다. 또한 간단히 회귀분석 및 시계열을 통해서도 열화모형을 적합 시킬 수 있다. 백지호[2]는 리튬이온전지의 열화모형을 선형으로 적합 시켰으며, 배석주[4][5]는 연료전지의 열화모형을 bi-exponential 모델을 사용하였다. 검정 방법은 평균제곱오차 (Mean Square Error : MSE)합이 가장 작은 모형을 최종적으로 선정할 것이다.

## 3. 가속열화시험 (Accelerated Degration Test : ADT)

가속열화시험은 열화를 촉진하기 위하여 가혹한 스트레스 조건하에서 실시하는 열화시험을 말하며, 이때 가속스트레스로 활용되는 것은 온도, 습도, 전압, 진동 등 가속수명시험과 동일하다. 또한 열화-스트레스관계식도 가속수명시험과 동일하다. 가속열화시험데이터를 분석하여 사용조건에서의 신뢰도 지표를 추정하기 위해서는 열화량 분포와 열화-스트레스 관계가 필요하며 분석 과정은 아래와 같다[1].



[그림 9] 가속열화시험 분석 방법



우선, 각 스트레스수준별로 열화모형을 적합 시킨다. 이때 분포열화모형이나 모수열화모형의 형태의 동일성을 보고 가속성판단을 한다. 그다음 열화모형을 적합 후 고장시점을 추정한다. 다음단계로 추정된 고장시점을 열화-스트레스 관계식과 열화량 분포를 이용하여 신뢰도 지표를 계산한다. 가속열화량분포는 와이블분포, 대수정규분포, 정규분포 등이 많이 사용되며, 열화-스트레스관계식은 아레니우스, 역거듭제곱, 아이링모형등을 사용한 다. 가속수명시험에서의 수명과 스트레스의 관계식을 대부분 그대로 사용할 수 있다.

(1) 아레니우스 관계

$\xi(T) = A \exp\left(\frac{E_a}{\kappa T}\right)$  여기서 T는 절대온도,  $E_a$ 는 활성화에너지(Activation Energy),  $\kappa$ 는 볼츠만 상수 ( $8.1671 \times 10^{-5}$  eV/°C), A는 상수이다.

(2) 역거듭제곱 관계

$\xi(T) = \frac{A}{V^\gamma}$  여기서 V는 가속스트레스(전압 등)이고, A 와  $\gamma$ 은 상수이다.

(3) 아이링관계

$\xi(T) = \frac{A}{T} \exp\left(\frac{E_a}{\kappa T}\right)$  기호는 아레니우스와 동일하다.

(4) 온습도 모형

$\xi(T) = A \exp\left(\frac{E_a}{\kappa T}\right) \exp\left(-\frac{B}{RH}\right)$  여기서 T는 절대온도,  $E_a$ 는 활성화에너지(Activation Energy),  $\kappa$ 는 볼츠만 상수 ( $8.1671 \times 10^{-5}$  eV/°C), RH는 상대습도이고, A와 B는 상수이다[6].

### 3.1 연료전지 및 납-배터리 가속열화시험모형 설정

연료전지 및 납-배터리의 가속열화시험모형은 다양한 열화량 분포 및 열화-스트레스관계 중에서 선정 가능하다. 배석주[6]는 연료전지를 와이블-아레니우스 모델을 이용하여 가속열화분석을 하였다. 따라서 열화량 분포의 경우 와이블분포 또는 대수정규분포에 적합 가능하며 열화-스트레스 관계는 아레니우스 또는 온습도관계가 적합할 것으로 판단된다.

## 4. 결론

본 논문은 열화분석이 무엇인지 그리고 열화데이터를 측정하는 방법 및 가속열화시험방법에 대해서 다루었다. 세부적으로는 열화분석 데이터 수집의 프로세스와 여러 가

지 모형을 통해 열화모형을 설정하고, 분석하는 일련의 과정을 살펴보았으며, 또한 가속개념을 포함한 가속열화시험방법 및 모형설정에 대해서 알아보았다. 이를 통해 다음과 같은 연료전지 및 납-배터리의 가속열화수명시험분석에 적용 방향을 도출하였다.

- 1) 열화시험설계는 현업 특성에 맞고 시간과 비용을 단축시킬 수 있는 열화시험 프로세스를 제시하였다.
- 2) 연료전지 및 납-배터리의 경우 챔버에서 전기적 특성열화를 측정할 수 있으며, 연료전지의 경우 전류밀도 또는 셀(Cell)당 출력전압을 특성치로 납-배터리의 경우 특정치 CCA를 특성치로 설정하여 반복측정법을 사용할 수 있다. 특히 연료전지의 경우 비용이 고가이므로 반복측정법을 요하며 비복원측정법에 비해 샘플수를 적게 작게 설정 할 수 있다.
- 3) 연료전지 및 납-배터리의 경우 특성치의 특성을 고려하여 감소형 지수모형, 선형모형, 대수형등을 고려할 수 있으며 또한 간단히 회귀분석 및 시계열을 통해서도 열화모형을 적합 시킬 수 있다. 연료전지의 열화모형을 선형 및 bi-exponential 모델로 적합시킨 사례가 있다. 모델 검정 방법은 평균제곱오차 (Mean Square Error:MSE)합이 가장 작은 모형을 최종적으로 선정할 것을 제시한다.
- 4) 연료전지 및 납-배터리의 가속열화시험모형은 와이블-아레니우스 모델을 이용하여 가속열화분석을 한 사례가 있다. 따라서 열화량 분포의 경우 와이블분포 또는 대수정규분포에 적합 가능하며 열화-스트레스 관계는 아레니우스 또는 온습도관계가 적합할 것으로 판단된다.

## 5. 참 고 문 헌

- [1] 백재욱, 가속수명시험 , 2010. 7. 9.
- [2] 백지호, "Degradation Data Analysis of a Lithium Ion Battery", 대한설비학회, 2009.
- [3] RIC 04-05, 열화데이터 분석 Guideline, 수원대학교 신뢰성혁신센터, 2006.
- [4] Suk Joo Bae, "A Nonlinear Random-Coefficients Model for Degradation Testing" American Society for Quality Technometrics, Vol 46, No4. 2004.
- [5] Suk Joo Bae, "Lifetime prediction through accelerated degradation testing of membrane electrode assemblies in direct methanol fuel cells" International journal of hydrogen energy ,2010
- [6] W. Nelson, Accelerated Testing, John Wiley & Sons, PP.521-548 , 1990
- [7] W.Q.Meeker and L.A.Escobar. "Accelerated Degradation test modeling and analysis", Technometrics, Vol. 40, No.2 , pp.89-99, May 1998.
- [8] Viviane R. B. De Oliveira and Enrico A.C., "Comparision of Methods to Estimate the Time-to-Failure Distribution in Degradation tests" Quality and Reliability Engineering International. Vol. 20, pp, 363-373, 2004

## 저 자 소 개

### 김 종 결

서울대학교 계산통계학에서 석사  
한국과학기술원 산업공학과에서 박사학위  
현재 한국품질보증/PL 연구회 회장으로 활동  
성균관대학교 시스템경영공학과 교수로 재직

주소:경기도 수원시 장안구 천천동 300번지 성균관대학교 시스템경영공학과 27416호

### 성 기 우

고려대학교 통계학과를 졸업  
고려대학교 통계학과 석사  
성균관대학교 산업공학과 박사과정  
관심분야: 신뢰성공학, 보증데이터 분석, ADT, ALT

주소:경기도 수원시 장안구 천천동 300번지 성균관대학교 시스템경영공학과26418B호