<기술논문>

헤드램프용 필라멘트 램프 가속열화데이터 분석을 통한
로버스트 열화모형 연구

성 기 우*

현대자동차 내구기술팀

A Study of the Roust Degradation Model
by Analyzing the Filament Lamp Degradation Data

Kiwoo Sung*

Durability Technology Team, Hyundai-motor Company, 772-1 Jangduk-dong, Hwaseong-si, Gyeonggi 445-706, Korea
(Received 20 February 2012 / Revised 2 April 2012 / Accepted 11 July 2012)

Abstract : It is generally needed to test durability and lifetime when we develop parts in new technology. In this paper, the accelerated degradation analysis methods are developed to test them. This study is presented robust model estimation method that is less affected by outlier in regresstion model estimation. In addition, the lifetime can be predicted by Degradation-stress relationship in stress level.

Key words : Accelerated degradation test(가속열화시험), Degradation data(열화 데이터), Robust regression(로버스트 회귀), bulb(벌브), Outlier(이상치)

1. 서 론

기술의 발전 속도가 빨라짐에 따라 신기술 부품의 내구 및 수명 검증에 대한 필요성이 무엇보다 중요하게 대두되고 있다. 반면에 신뢰성 시험은 대부분 장기간 소요된다. 특히 수명을 확인 하고자 하는 수명시험 및 일부 환경시험의 경우에도 많은 시간을 필요로 한다. 최근에는 제품들의 신뢰성이 향상되어 가속수명시험을 실시하더라도 규정된 시험 시간 동안 고장을 발견할 수 없는 경우가 많이 발생하고 있다. 따라서 시험시간을 단축하여 빠른 시간 안에 신뢰성을 평가할 수 있는 가속열화시험에 대한 필요성이 증대되고 있다. 또한 현업에서는 성능열화에 대한 관심이 높아지고 있으며 특히 연료전지의 가속열화시험법 개발에 많은 관심이 증대되고 있다. 만약 고장이 발생하지 않는다고 해서 더 가속

한 스트레스를 인가하면 전혀 다른 고장 메커니즘이 나타날 수 있기 때문에 시험의 목적을 달성하기 곤란해진다. 이런 단점을 보완하기 위해 시간에 따라 정해진 시간마다 열화 특성을 갖는 특성치를 측정하여 수명을 예측하거나 신뢰성을 평가 하는 열화시험 또는 가속열화시험을 이용한다. 본 연구는 단기간에 내구수명을 검증 할 수 있는 열화데이터 분석방법과 프로세스를 협업에 맞게 정립하여 설계 또는 시험에서 용이하게 활용할 수 있도록 하였고, 실 사례로 벌브 열화모형을 만들고 벌브 단품가속열화시험법을 개발하였다. 또한 열화모형을 추정하는 방법에 로버스트 추정과 분위수 회귀추정 방법을 통해 좀 더 로버스트한 모형비용 측면에서 더 효율적이며, 이는 부품의 개발의 경제적 효과도 클 것이다.

가속열화모델 관련해서Meeker와 Escobar³⁾는 일반적 열화경로모델과 온도를 가속한 가속열화모형

*Corresponding author, E-mail: mynamu42@hyundai.com

등을 제시하였고 Viviane과 Enrico⁴⁾는 3가지 통계적 방법(근사적, 해석적, 수치적 방법)을 사용하여 열화데이터를 분석하는 연구를 하였다. 성능의 열화모델과 열화데이터의 통계적 분석방법에 관해서는 Meeker(1998), Bain(1978), Nelson(1990)²⁾등을 비롯한 많은 학자들에 의해 연구되었다.

2. 열화시험

2.1 열화시험이란

고장은 hard failure(고장: 생산품 기능 정지) 또는 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 열화 분석을 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

Fig. 1 Degradation analysis process

없을 때이다. 열화시험에 대한 연구는 Fig. 1과 같이 열화시험 설계, 열화데이터 수집 및 분석, 가속열화데이터 분석으로 진행된다.

2.2 열화시험방법

본 논문은 열화시험설계, 수집, 분석방법, 사례순서로 연구 하였다.

2.2.1 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 Fig. 2처럼 제시하였고, 단계별로 세부적인 내용은 다음과 같다.

부품선정에서는 열화분석이 가능한 부품을 선정한다. 다음단계로 메커니즘(고장물리) 분석을 통해 부품의 주요열화 인자를 찾는다. 이때 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 측

Fig. 2 Degradation test design process

정방법이 달라진다. 다음단계는 고장의 정의이다. 고장판정기준을 정의 해야 한다. 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.

2.2.2 열화 데이터 수집

데이터 분석시 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 확인해야 한다.

측정방법은 샘플을 투입하고 성능을 측정하는 방식에 따라 비복원측정법, 반복 측정법으로 구분된다. 비복원측정법에서는 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 성능치

Fig. 3 Non-repeated measurements

Fig. 4 Repeated measurements

를 측정하고, 측정된 부품은 다시 시험에 투입하지 않는 경우로 온도나 습도를 이용한 시험에 많이 사용된다. 반복측정법은 여러 개의 샘플을 투입하여 시험을 하되, 측정된 샘플을 다시 시험에 투입하는 경우이다.

2.2.3 비복원데이터 분석

비복원 측정법의 일반적인 분석방법인 2단계 추정법은 한 시점에서의 열화데이터 Y_i 에 대한 분석에서부터 시작하여, 이를 바탕으로 전체적인 열화 분포 Y_i 를 분석하는 것이다. 분석방법은 다음과 같다.

첫째, 각 시점별로 열화량의 분포를 결정한다. 이때 카이제곱 검정, 콜모고로프-스미르노프 검정 및 앤더슨-달링검정법을 사용한다. 둘째, 분포에 대한 모수를 추정한다. 셋째, 시점별 Y_i 분포함수 동일성 검정을 한다. 넷째, Y_i 에 대한 상수형 모수 β 의 추정을 한다. 폴링하여 상수모수에 대한 추정치 $\hat{\beta}$ 을 구한다. 다섯 번째, Y_i 에 대한 변수형 모수의 $\hat{\theta}_i$ 추정 및 신뢰성을 추정한다.

2.2.4 반복측정데이터 분석

반복 측정법에 수집된 데이터는 보통 열화경로 모형(Degradation Path Model)을 이용하여 분석하며, 이때 열화곡선의 모수가 상수 또는 확률변수인지에 따라 확정계수모형과 확률계수모형으로 구분된다. 대표적인 열화모형은 다음과 같다.

- (1) 선형모형 : $Y = at + b + \varepsilon_t$
- (2) 지수모형 : $Y = be^{-at} + \varepsilon_t$
- (3) 대수모형 : $Y = alnt + b + \varepsilon_t$
- (4) 멱승모형 : $Y = bt^a + \varepsilon_t$

Fig. 5 Analysis procedure

또한, 반복측정법은 2단계 추정법이며, 기본적인 분석방법은 다음과 같다.¹⁾

첫째로 적합한 열화곡선의 선택 및 적합성 확인이다. 시험시간을 x 축, 측정데이터를 y 축으로 하여 산점도 분석을 실시하여 가장 적합한 열화곡선을 선정한다. 선정된 열화곡선이 열화데이터의 형태와 적합한지 알아보기 위해 회귀분석을 실시한 후 적합성을 확인한다. 둘째로 모수에 θ 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 의 분포를 추정한다. 샘플에 따른 의 변화추이를 살펴 보고 변동이 있을 경우는 확률변수로 가정하여 모수의 분포를 추정한다. 넷째, 분포를 활용하여 신뢰성 지표를 추정한다. 고장분포함수를 구하여 신뢰성 지표 즉 평균수명이나 $\hat{B}_{10}$ 등을 구한다.

2.2.5 회귀식 추정방법

반복측정데이터 분석시 열화곡선이 열화데이터의 형태와 적합한지를 알아보고 열화모형을 만들기 위해 회귀분석을 실시한다. 그러나 모든 시험에는 측정 오차 가 존재한다. 따라서 단순 회귀분석은 이상치에 의해서 영향을 많이 받아 과추정 될 가능성이 크다. 이에 본 논문은 이상치에 영향을 덜 받은 로버스트 회귀모형, 분위수 회귀모형을 통해 가장 적합한 모델을 선택하여 벌브의 수명을 정확하게 추정하고자 한다.

회귀직선의 최소제곱 추정에 대한 로버스트적인 대안으로 후버의 M-추정(Huber's M-estimation)을 사용하였다. 즉 회귀계수 β_0, β_1 에 대한 M-추정치는

$$\min \beta_1 \beta_0 \sum_{i=1}^n \rho_1(\gamma_i / \sigma) \quad (1)$$

에서 나온다. 분위수 회귀 추정법(Quantile regression estimation) 분위수 회귀분석방법은 Koenker와 Bassett (1978)에 의해 소개된 방법으로 선형회귀모형에서의 회귀계수 추정을 위한 준모수적방법으로 이상치나 오차항의 분포에 민감하게 반응하지 않는다는 장점을 가지고 있다.

Fig. 6을 보면 이상치(20,3.8)의 값이 있을 때 최소 제곱 추정방법이 회귀직선의 결정에 막중한 영향을 미치게 된다. 위 3개의 적합 회귀직선은 최소 제곱 추정방법, 후버의 M-추정(Huber's M-estimation)방법, 분위수 회귀추정방법을 차례대로 적용해 보았다. 따라서 이상치가 있다고 판단시 이상치 영향을 최소화하는 방법을 사용함이 타당하다.

Fig. 6 Three linear regression fit (When outliers)

2.3 벌브의 동작원리 및 고장메커니즘

벌브는 할로젠 사이클이란 할로젠 필라멘트 램프는 흑화현상의 원인되는 텅스텐의 증발을 방지하기 위하여 유리관내에 할로젠족 원소(F, Cl, I, Br)가 봉입되어있는데, 증발된 텅스텐은 유리관벽 부근에서 봉입되어있는 할로젠과 결합하여 텅스텐 할라이드

Photo. 1 Filament lamp failure (disconnection) case

가 된다. 이 텅스텐 할라이드는 유리관내를 이동하여 온도가 높은 필라멘트 근방에서 텅스텐과 할로젠으로 분해되어 텅스텐은 필라멘트에 남고 할로젠은 유리관벽을 향해 확산된다. 확산된 할로젠은 앞의 반응을 반복한다.

벌브 단선 고장메커니즘은 다음과 같다. 일반적으로 자동차 외장램프 작동시 전압이 인가되면, 텅스텐이 증발된다, 이때 환경요인중 단속동작(On/OFF Cycle)은 주기적으로 에너지 충격을 인가함으로써 텅스텐 증발을 가속시킨다. 전압변동(Funtuation)은 불안정한 상태를 지속시켜 텅스텐 증발을 가속하며, 인가전압은 (Over Voltage) 고온을 유지하여 연속적인 텅스텐 증발을 유도한다. 여러가지 복합 스트레스에 의해 불균일 증발이 일어나고 직경이 감소한다. 또한 돌입전류는 크기에 따라 초기 필라멘트에 인가되는 에너지 충격을 가속하며, 특히 증발이 많이 발생된 부분에 큰 에너지 충격을 가속함을 실외등 내구신뢰성 개선 영역을 통해서 확인하였다. 특히 다양한 요인 중 실외등 수명에 영향을 주는 주요 팩터를 확인하였다.

벌브수명에 영향을 주는 인자의 기여율 확인 결과 인가전압에 대한 영향을 가장 큼을 알 수 있었으며 인가전압을 주요 가속스트레스로 선정하였다.

Fig. 7 Halogen Filament lamp disconnection mechanism

3. 벌브의 열화데이터 분석 사례

3.1 시험설계 및 데이터 수집

헤드램프 벌브 전압별 수명 시험 방법은 다음과

Photo. 2 Test equipment

Table 1 Test method

Voltage	Temperature	25°C
13.2 V (100%)		16ea
14.0 V (106%)		8ea
15.2 V (115%)		4ea

같다. 13.2V, 14.0V, 15.2V의 정전압으로 고장(단선)까지의 시간 측정하였고, 특성치는 전류값과 저항값으로 하여 8개월간 시험하였다. 벌브사양은 필립스/오슬람/GE 생산중인 H7LL 벌브를 사용하였다. 시험 장비 및 시험방법은 Photo. 2, Table 1과 같다.

시험결과 실제 필드 고품과 동일한 형태로 필라멘트의 말기 현상인 산화에 의한 필라멘트 소손 확인되었고, 필라멘트의 저항값은 벌브가 점등되어 할로젠 사이클이 시작되면 초기보다 상승되는 그래프를 보 이면서 단선 직전에는 초기 대비 저항값이 급격히 감소하며 단선되었다. 이는 텅스텐이 완전 증발하면서 기존성질이 변화하는 중요 포인트인 것으로 추정된다. 데이터 수집방법은 반복측정방법을 통해 데이터를 수집하였고, 저항값을 실시간으로 측정하여 정확도를 높였다. 각 정전압 별 시료수는 8개이다.

3.2 데이터의 열화유무 판정

데이터 분석에 앞서서 측정 데이터가 열화특성의 유무를 조사하였다. 즉 그래프 측정시간과 성능 특성치를 타점하여 시간에 따라 특성치가 증가 또는 감소하는지를 확인하였다. 그 결과 Fig. 8과 같으며,

Fig. 8 Resistance measurements (hourly)

Photo. 3 Filament lamp voltage test (chamber)

Photo. 4 Filament lamp failure sample

시간이 경과 됨에 따라 저항치가 증가하다가 어느 시점에서 감소하는 경향을 보였다. 이로써 열화 경향이 있다고 판단하였고, 증가 추세까지를 열화 증가 추세로 보고 저항치 3.32고장을 정의하였다.

3.3 열화모형 모수추정 및 선정

적합한 모형을 선정하기 위해 다음과 같이 고려하였다. 아래 Fig. 9를 보면 선형모형을 적합함을 알 수 있다. 선형모형은 $Y = at + b + e_t$ 형태이고 이때 Y는

Fig. 9 Voltage test result

Table 2 Degradation model parameter estimation results (13.2V)

NO	최소제곱법		분위수 회귀추정		후버의 M-추정	
	b	a	b	a	b	a
1	3.044	0.0045	3.045	0.0045	3.042	0.0046
2	3.044	0.0045	3.045	0.0045	3.042	0.0046
3	3.061	0.0041	3.061	0.0040	3.061	0.0041
4	3.058	0.0046	3.057	0.0044	3.057	0.0045
5	3.095	0.0034	3.096	0.0031	3.096	0.0033
6	3.095	0.0034	3.096	0.0031	3.096	0.0033
7	3.052	0.0044	3.055	0.0041	3.051	0.0044
8	3.052	0.0044	3.055	0.0041	3.051	0.0044

Table 3 AIC(Akaike Information Criterion) comparison (13.2V)

NO	최소제곱법	분위수 회귀추정	후버의 M-추정
1	-366	-359	-366
2	-366	-359	-366
3	-344	-313	-343
4	-350	-351	-350
5	-362	-364	-361
6	-362	-364	-361
7	-275	-275	-275
8	-275	-275	-275

시간에 특성치(저항값)를 나타내며 는 오차를 의미한다. 시료별로 선형 열화모형의 모수를 a, b를 회귀 분석을 이용하여 구하고, 3개의 적합 회귀직선은 최소 제곱추정방법, 후버의 M-추정(Huber's M-estimation) 방법, 분위수 회귀추정방법을 차례대로 적용해 보았다. Table 2는 열화모형 모수추정 결과를 표로 나타내었다.

Table 3은 모형 선택기준 통계량중 하나인 AIC값을 비교하였다. AIC통계량은 실제 Y의 분포와 회귀모형을 통해 예측된 Y의 분포사이의 차이를 기준으로 정의된 것이며, 그 차이가 작을수록 실제 Y를 잘 예측하는 회귀모형이라고 할 수 있다. 분석 결과 위 데이터는 이상치가 없어 최소제곱법과 로버스트 회귀추정방법에 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서 가장 간편한 최소제곱추정방법을 그대로 사용함이 타당하며 향후 이상치가 있는 데이터에서는 로버스트 회귀추정(후버의 M-추정)을 추천한다.

Fig. 10은 각 샘플별 모수를 추정하여 모수를 그래프 분석을 해본 결과 a, b 모수가 상수로 판단되

Fig. 10 Comparison of parameters (13.2V)

로 풀링 후 계산된 추정치를 사용하도록 한다. 따라서 13.2V 열화모형은 $Y=3.0626t+0.0042$ 이며, 14V 열화모형은 $Y=3.173t+0.0052$ 이다. 단품 정전압 시험의 열화모형을 스트레스별로 정의 하였다.

3.4 고장시간추정 및 수명분포의 선정

특성치(저항값) 3.32를 고장으로 판정한다. 이는 Y가 3.32가 되는 시점이다. 시간 t_i 는 다음과 같이 추정된다.

$$t_i = \frac{3.32 - \hat{b}_i}{\hat{a}_i} \quad (2)$$

Table 4는 시료별 고장시간 추정치이다.

고장시간 추정치에 적합한 수명 분포를 찾기하기 위해 Anderson-Darling(AD)을 비교하였다. AD는 작을수록 분포의 적합성이 좋음을 의미한다.

Table 4 Estimation of failure times (day)

시료수	T (시간, 13.2V)	T (시간, 14V)
1.0	60.3	29.9
2.0	60.3	36.7
3.0	62.3	28.2
4.0	55.9	28.2
5.0	66.2	26.3
6.0	66.2	26.3
7.0	60.6	27.0
8.0	60.6	27.3

Table 5 Goodness-of-fit test

	13.2V	14V
와이블	2.121	2.437
정규	2.04	2.387
로그정규	2.024	2.274

Table 5를 보면 로그 정규분포가 가장 적합한 것으로 나타났다.

3.5 수명분포의 모수 및 신뢰성 척도 추정

수명분포 적합도 분석결과 수명분포는 로그정규 분포이며, 분포의 모수 및 신뢰성 척도는 다음과 같다. 로그정규분포의 척도 및 위치모수는 최우추정 방법으로 추정하였다.

Table 6 Log-normal distribution parameters and Bx life

	위치모수	척도모수	B_1	B_{10}
13.2V	4.11841	0.05163	54일	57일
14V	3.3526	0.102671	22일	25일

4. 가속열화시험(ADT)

4.1 가속열화시험(Accelerated Degradation Test)

가속열화시험은 열화를 촉진하기 위하여 가혹한 스트레스 조건하에서 실시하는 열화시험을 말한다. 이때 가속스트레스로 활용되는 것은 온도, 습도, 전압, 진동등으로 가속수명시험과 동일하며, 분석방법도 가속수명시험 분석방법과 유사함으로 따로 언급하지는 않겠다.

4.2 벌브 가속열화데이터 분석 사례

본 연구에서는 가속 스트레스는 인가전압을 사용하였고, 고장의 정의는 저항값을 사용하여 정의하였다. 열화-스트레스 관계는 전압 스트레스 가속수명시험에 많이 사용되는 역누승관계(inverse power law relationship)를 사용하였다.

13.2V 정전압 시험시 평균수명은 61.67일 (1,480 시간)이며, 벌브의 1%, 3%가 고장난 시점은 각각 $B_1 = 50.88$, $B_3 = 52.76$ (1,266 시간)으로 추정되었다. 14V 정전압 벌브 시험시 평균 수명은 28.67일(688시간)이며, 벌브의 1%, 3%가 고장난 시점은 각각 $B_1 = 23.65$, $B_3 = 24.53$ (588시간)으로 추정되었다.

Table 7 Bx life by the voltage (day)

	13.2V	14V
B1	50.88	23.65
B3	52.76	24.53
B10	55.39	25.75
평균	61.67	28.67

Fig. 11 Probability plot (13.2V, 14V)

Fig. 12 Degradation-stress relationship

13.2V 정전압 시험시 H7LL 별브 요구수명인 3년 기준으로 =700시간이므로 요구수명을 만족한다. 14V 정전압시험은 13.2V 정전압시험보다 2.2배 (가속계수) 가속하다. 따라서 시험시간 단축을 위해 14V 정전압 시험을 추천하여, 기준 588시간을 만족하면 요구수명을 만족한다. 또한 위 열화-스트레스 관계를 통해 정전압시험 조건에 따라 수명을 예측할 수 있다.

5. 결 론

신기술 부품 개발시 내구 및 수명 검증이 필요하며, 단기간에 검증하기 위해 가속열화데이터 분석 방법을 본 논문에서 제시하였고, 연구결과 다음과

같은 결론을 얻었다.

- 1) 신기술 부품 개발시 내구 및 수명 검증이 필요하며, 단기간에 검증하기 위해 가속열화시험(ADT)이 가속수명시험(ALT) 보다 시간과 비용에서 효율적이다.
- 2) 별브 선형열화모형의 회귀모형 추정시 이상치에 영향을 덜 받는 강건한 모형추정방법 중 후버의 M-추정(Huber's M-estimation)방법, 분위수 회귀추정방법을 제시하였고, 후버의 M-추정방법이 가장 성능이 좋음을 확인하였다.
- 3) 단품 별브 정전압시험의 열화모형을 스트레스 별로 정의하였다.
정전압 13.2V 열화모형 : $Y = 3.062t + 0.0042$
정전압 14V 열화모형 : $Y = 3.173t + 0.0052$
- 4) 별브 가속열화데이터 분석을 통한 가속열화시험법을 개발하였고, 별브 단품 요구수명을 만족함을 알 수 있었다.
- 5) 또한 열화-스트레스 관계를 통해 정전압시험조건에 따라 수명을 예측할 수 있다.
- 6) 향후 가속열화시험을 통해 연료전지 및 신기술 단품 내구(수명)시험의 적용 가능하다.

References

- 1) RIC 04-05, Degradation Data Analysis Guideline, Suwon University Reliability Innovation Center, 2006.
- 2) W. Nelson, Accelerated Testing, John Wiley & Sons, New York, pp.521-548, 1990.
- 3) W. Q. Meeker and L. A. Escobar, "Accelerated Degradation Test Modeling and Analysis," Technometrics, Vol.40, No.2, pp.89-99, 1998.
- 4) V. R. B. De Oliveira and A. C. Enrico, "Comparison of Methods to Estimate the Time-to-Failure Distribution in Degradation Tests," Quality and Reliability Engineering International, Vol.20, pp.363-373, 2004.