

# 저역필터 어셈블리에 대한 신뢰성시험 결과의 해석

백 재 욱

한국방송통신대학교 정보통계학과

## Analysis of reliability test results of low-pass filter assembly

Jaiwook Baik

Department of Information Statistics, Korea National Open University

### <Abstract>

Thermal shock tests at two stress levels were performed to see the life (cycles) of LPF ASSY (low pass filter assembly) at normal stress level. In this case Coffin-Manson relationship is generally used to describe the relationship between the temperature difference and the life, together with the Weibull distribution describing the life at each stress level. So for given data Coffin-Manson is fitted to predict the life at normal stress level. However, different types of models are appropriate for this type of test. Hence, a more appropriate model such as General log-linear model which can also incorporate the duration at the highest and lowest temperatures and acceleration time will be introduced.

**Key Words:** Thermal shock test, Coffin-Manson relationship, Inverse power law, Weibull distribution, General log-linear model.

## 1. 서 론

출하된 LPF ASSY (low pass filter assembly, 저역필터 어셈블리)에서 불량률이 발생하여 고객의 요청에 의하여 보증 방안을 강구하였다. LPF ASSY에 대한 열충격 시험이 두 스트레스 수준(수준 1:  $-40^{\circ}\text{C}$ (30분) ~  $+85^{\circ}\text{C}$ (30분), 이동시간 1분, 수준 2:  $-25^{\circ}\text{C}$ (30분) ~  $+60^{\circ}\text{C}$ (30분), 이동시간 1분)에서 이루어졌다. 전자의 조건에서 10개를 200 사이클까지 돌렸는데 4개의 NG(no good)가 발견되었고, 후자의 조건에서는 10개를 200 사이클까지 돌렸는데 NG를 하나도 발견하지 못했다. 이에 본 사례분석에서는 앞의 시험결과로 볼 때 LPF ASSY가 사용조건인  $-20^{\circ}\text{C}$ (30분) ~  $+50^{\circ}\text{C}$ (30분)에서 앞으로 몇 개월 또는 몇 년 후에 고장 날 것인지 예측해보고자 한다. 이에 2절에서는 앞에서 언급한 시험에 대해 좀 더 구체적으로 설명하면서 시험조건과 시험 장비에 대해서 살펴보고, 열충격시험의 경우 어떤 형태의 데이터가 우리에게 주어진 것인지 알아본다. 3절

에서는 현 시험상황에 적합한 모형을 제시하고 이에 근거하여 여러 사용조건에서 앞으로 몇 개월 또는 몇 년 후에 LPF ASSY가 고장 날 것인지 예측해본다. 마지막으로 4절에서는 본 사례분석을 요약하고 앞에서 적합시킨 모형의 문제점을 짚어보면서 새로운 모형과의 적합여부를 판단할 수 있는 시험을 제시한다. 2절과 3절은 가속수명시험에서 통상적인 모형을 제시하고 시험 데이터를 어떻게 분석할 수 있는 보여주고 있으며, 마지막 4절은 본 시험에 맞는, 보다 일반적인 모형인 General log-linear을 이용하여 시험 데이터를 어떻게 분석할 수 있는지 설명한다.

## 2. 시험 소개

### 2.1 시험조건

LPF ASSY에 대한 시험은 다음과 같은 조건에서 진행되었다.

High Temperature =+85℃, Low Temp.= -40℃ (스트레스 수준 1의 경우임)

Each Time : 30 Min. Thermal Shock

Test Cycle : 200 Cycle

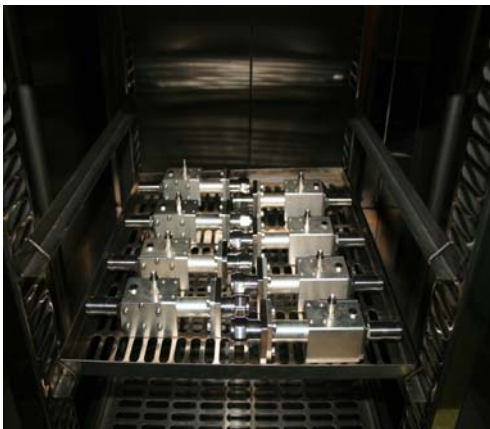
RF Function Test Time : 24 hours cycle

Environment : Temperature 15~35℃, Humidity 25~75% RH

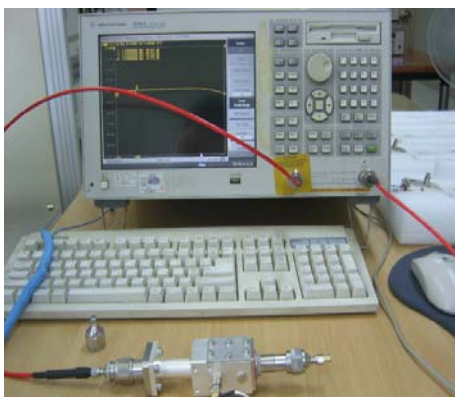
## 2.2 시험장비

LPF ASSY에 대한 시험은 열충격시험과 RF function test로 이루어져 있으며, 다음은 이들 시험에 이용되는 장비이다.

장비	모델번호	제조회사	other
열충격시험기	KR-5002	Korea QMS	-
ENA Series Network Analyzer	E5062A	Aglient	-



<그림 1> 열충격시험



<그림 2> RF Function Test

## 2.3 열충격시험

LPF ASSY가 열충격에 얼마나 잘 견디는지 알아보기 위해 두 가지의 조건(수준)에서 시험이 이루어졌다.

### 스트레스 수준 1

- 온도의 폭: -40℃ ~ +85℃ {85℃-(-40℃)=125℃의 차이}
- -40℃와 +85℃에서의 지속시간: 30분
- -40℃에서 +85℃까지 그리고 +85℃에서 -40℃까지의 이동시간: 1분

이 시험결과 10개의 LPF ASSY 중 4개의 LPF ASSY가 110, 158, 182, 200 사이클에서 고장 났다.

### 스트레스 수준 2

- 온도의 폭: -25℃ ~ +60℃ {60℃-(-25℃)=85℃의 차이}
- -25℃와 +60℃에서의 지속시간: 30분
- -25℃에서 +60℃까지 그리고 +60℃에서 -25℃까지의 이동시간: 1분

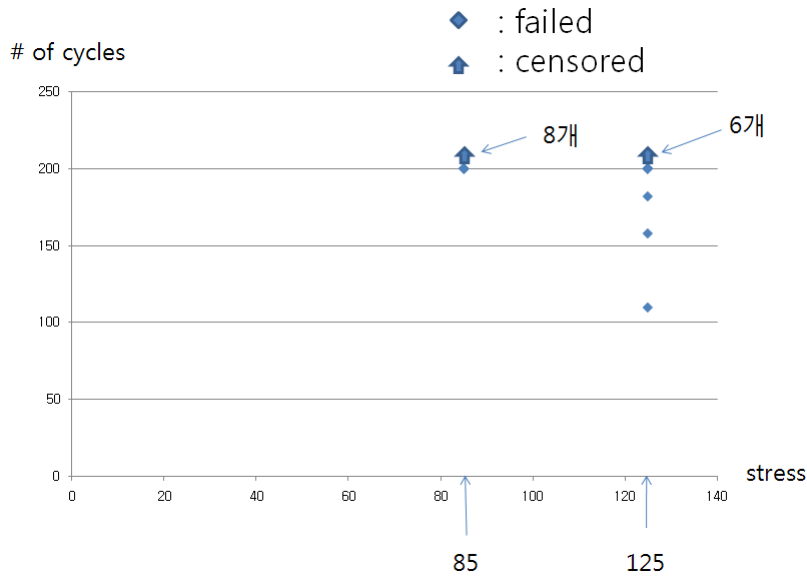
이 시험결과 8개의 LPF ASSY 중 아무 것도 200 사이클까지 고장 나지 않았다.

본 사례연구에서는 온도의 폭을 스트레스 수준으로 보았으며, 따라서 첫 번째 125℃의 차이인 스트레스 수준 1이 두 번째 85℃의 차이인 스트레스 수준 2보다 더욱 가속조건임을 알 수 있다. 앞의 시험으로부터 나온 데이터를 그림으로 나타내면 <그림 3>과 같다.

## 3. 모형화 및 예측

### 3.1 사이클 수의 모형화

고장 날 때까지의 사이클 수  $t$ 는 신뢰성분석에 널리 사용되는 와이블분포를 가정한다. 박동호 외 (2010) 및 신민경 외 (2008)의 설명에서와 같이, 와이블분포는 사이클 수  $t$ 에 따라 고장률이 증가, 감소 또는 일정한 경우 적합시킬 수 있으므로 신뢰성분석에 많이



<그림 3> LFP ASSY에 대한 열충격시험 데이터

사용된다. 와이블분포의 경우 확률밀도함수와 신뢰도 함수는 각각 다음과 같다.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, \quad (1)$$

$\eta, \beta > 0, t \geq 0$

$$S(t) (= P(T > t)) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

따라서  $n$ 개의 시료 중  $r$ 개가 고장 난 경우 Lawless (2002)에 의하면 우도함수(likelihood function)는 다음과 같다.

$$L = \prod_{i=1}^r f(t_i) \prod_{i=r+1}^n S(t_i) \quad (2)$$

$$= \prod_{i=1}^r \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t_i}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^\beta} \prod_{i=r+1}^n e^{-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^\beta}$$

여기서  $n-r$ 은 시험이 중도중단된(censored) 시료의 수를 나타낸다.

### 3.2 스트레스-수명의 모형화

Nelson (1989)과 Kececioglu (2002)에 의하면 스트레스 수준과 수명과의 관계는 아레니우스, 아일링 모형 등 여러 가지가 있으나 스트레스가 본 사례에서와 같

이 온도의 변화(thermal cycling)인 경우 코핀-맨슨 모형이 많이 사용된다.

$$N = \frac{C}{(\Delta T)^\gamma} \quad (3)$$

여기서  $N$ 은 고장까지의 사이클 수이며  $C$ 와  $\gamma$ 는 모수이다.

앞의 코핀-맨슨 모형은 사실 다음의 일반적인 역제곱공식(inverse power law)과 같다.

$$L(V) = \frac{1}{KV^n} \quad (4)$$

여기서  $L(V)$ 는 스트레스 수준  $V$ 에 따른 수명을 나타내며,  $K$ 와  $n$ 은 모수를 나타낸다. 따라서 (3)과 (4)의 관계식으로부터 다음의 관계가 성립된다.

$$K = 1/C, \quad V = \Delta T, \quad n = \gamma \quad (5)$$

### 3.3 결합모형을 이용한 예측

Bagdonavicius and Nikulin (2001), Chan and Englert (2001)과 백재욱 (2007)에 의하면 가속수명시험에서 결합모형이란 각 스트레스 수준에서의 수명에 대한 모형과 스트레스-수명에 대한 모형을 결합한 모형을 말한다. 이들 결합모형의 예를 들면 아레니우스-와이블 모형, 아일링-감마 모형 등 여러 가지가 있다. 본 사례에서는 앞에서 설명한 바와 같이 스트레스의 각 수준

에서 수명(사이클 수)을 (1)에서와 같이 와이블분포를 가정하고, 스트레스의 여러 수준간의 관계를 (4)에서와 같이 역거듭제곱 모형(따라서 코핀-맨슨 모형)을 가정한다. 이때 이 두 모형을 결합하는 방식은 (2)의 우도함수에서 척도모수  $\eta$ 를 일정한 스트레스 수준  $V$ 에서의 수명  $L(V)$ 와 같다고 놓는 것이다.

$$\eta = L(V) = \left( \frac{1}{KV^n} \right) \quad (6)$$

이제 <그림 3>과 같은 시험 데이터가 주어진 경우 ReliaSoft ALTA 7을 이용하면 LPF ASSY의 사용조건이  $-20^{\circ}\text{C}$ (30분) ~  $+50^{\circ}\text{C}$ (30분)(따라서  $70^{\circ}\text{C}$ 의 차이)일 때 시간(사이클 수)에 따른 신뢰도는 <그림 4>와 같다.

따라서 하루에 200사이클 정도를 예상하는 경우 90% 신뢰도에서 5.5년 정도의 수명을 보장할 수 있다. 왜냐하면  $t = \eta[-\ln(R(t))]^{1/\beta} = 401,180$ 이며  $401,180 / (365 \times 200) = 5.5$ 이기 때문이다. 한편, 스트레스-수명의 관계를 나타내면 <그림 5>와 같다. 여기서 수명은  $\eta$

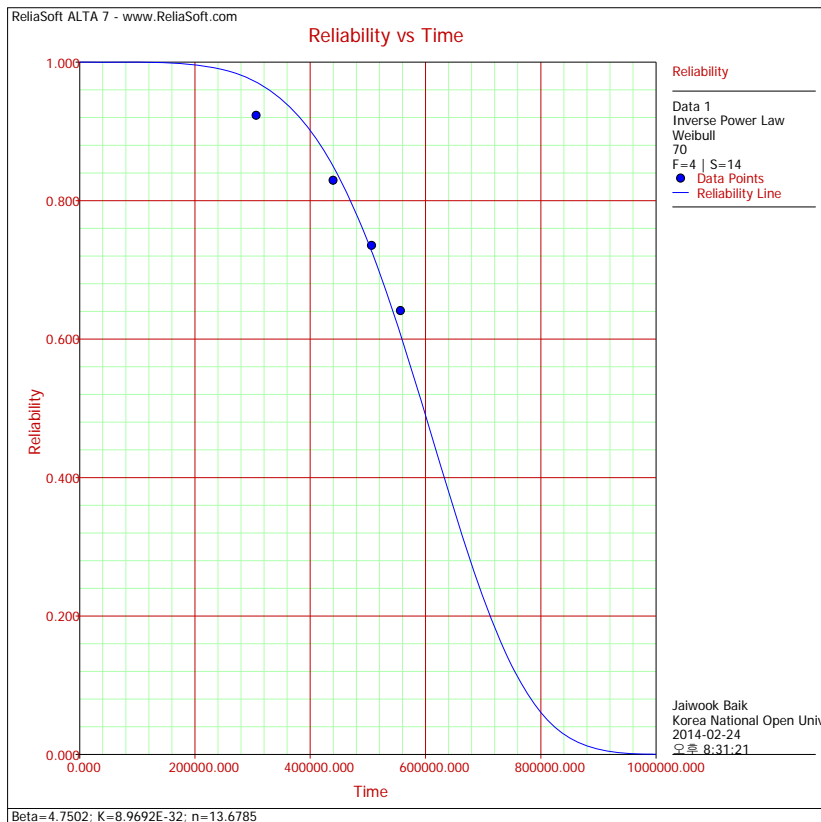
로 나타낸 것이다. <그림 5>에서는  $125^{\circ}\text{C}$ 와  $85^{\circ}\text{C}$ 에서의  $\eta$ 점을 볼 수 있다. 한편, 사용조건인  $-20^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ (즉,  $70^{\circ}\text{C}$ 의 차)에서의  $\eta$ 점은

$$\eta = \frac{1}{KV^n} = \frac{1}{(8.969 \times 10^{-32}) \times 70^{13.6785}} = 644,292 \text{임을 알 수 있다.}$$

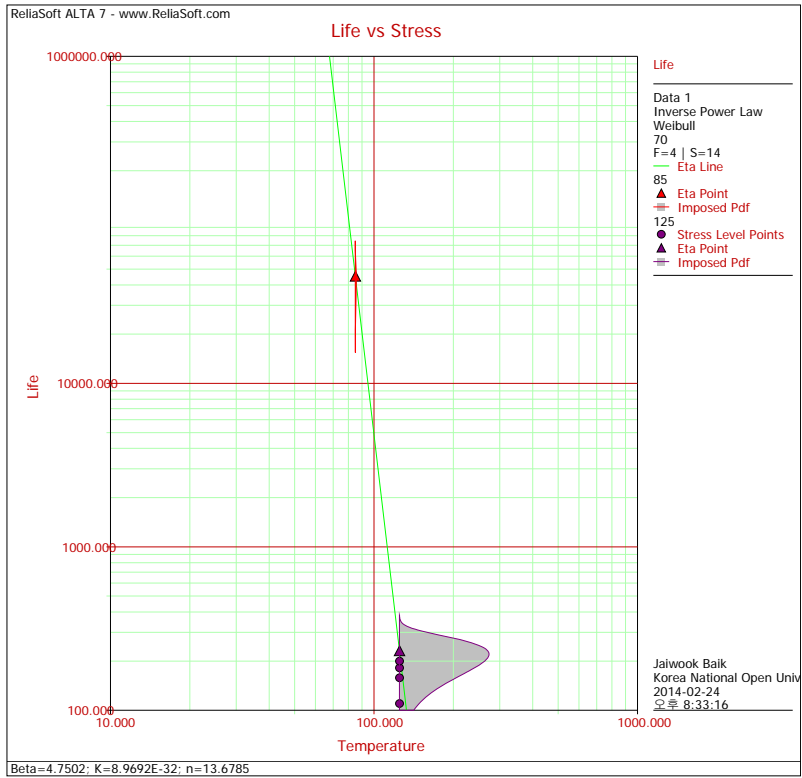
마지막으로 가속계수를 나타내는 그림은 <그림 6>과 같다. 사실 역거듭제곱 모형의 경우 가속계수 (Acceleration Factor,  $AF$ )는 다음과 같다.

$$AF = \left( \frac{V_A}{V_u} \right)^n \quad (7)$$

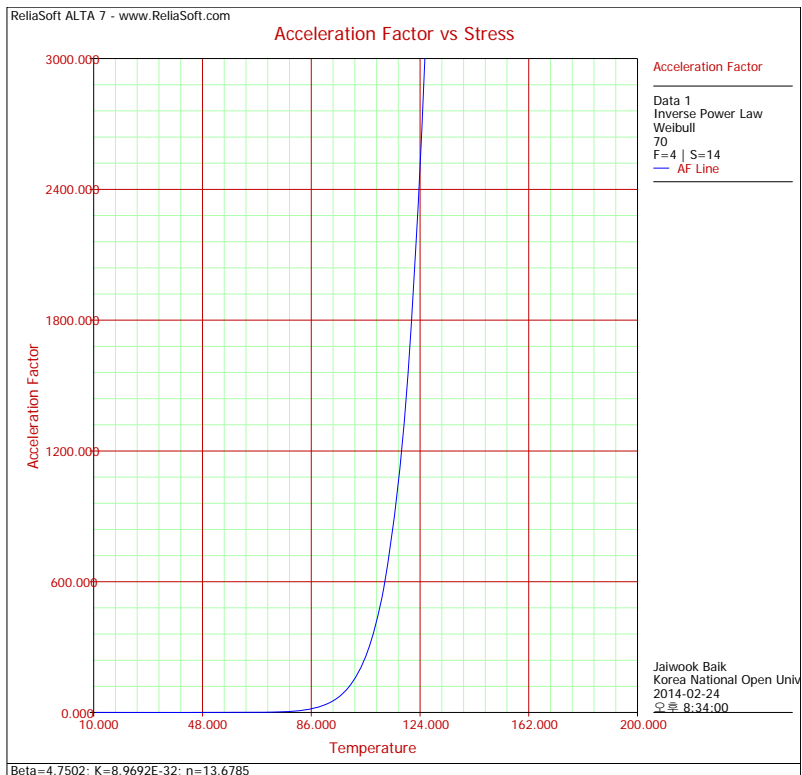
여기서  $V_A$ 와  $V_u$ 는 각각 가속조건과 사용조건에서의 스트레스 수준을 나타낸다. 예를 들어 가속조건  $125^{\circ}\text{C}$ 에서의  $AF = \left( \frac{124}{70} \right)^{13.6785} = 2,493$ 이다.



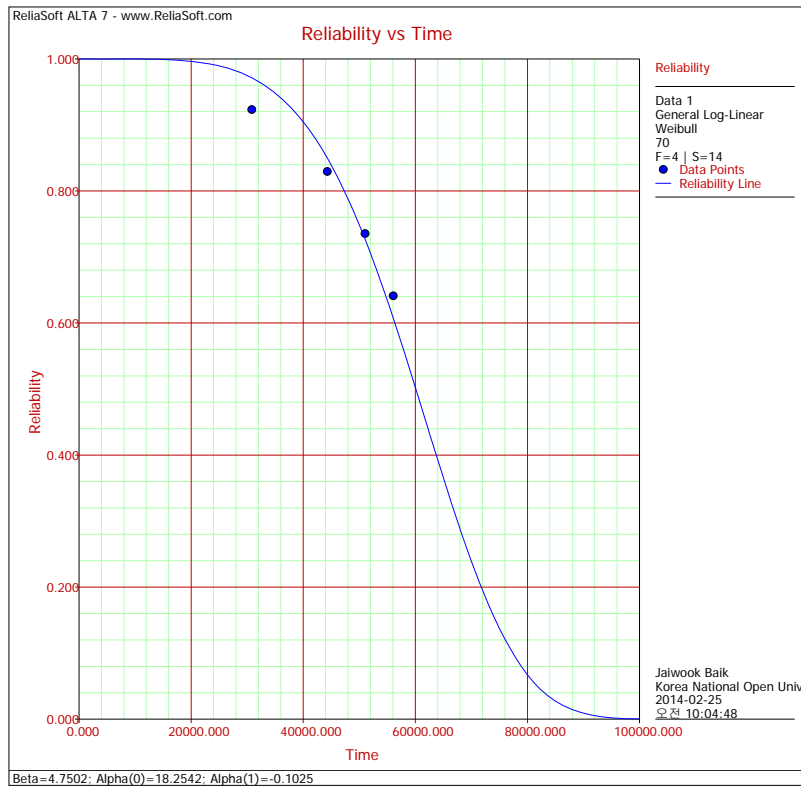
<그림 4> 사용조건이  $-20^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 인 경우 시간(사이클 수)에 따른 신뢰도 (역거듭제곱 모형 적용)



<그림 5> 사용조건이  $-20^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 인 경우 스트레스-수명의 관계



<그림 6> 사용조건이  $-20^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 인 경우 가속계수



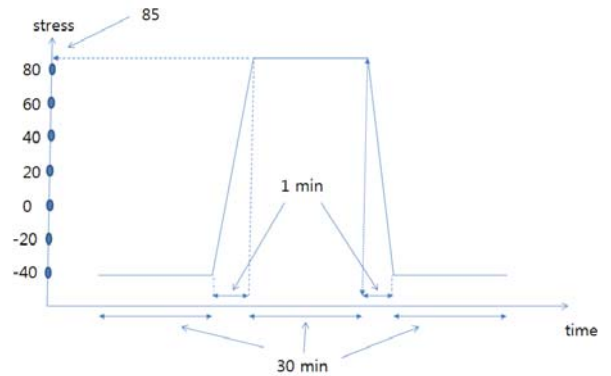
<그림 8> 사용조건이 -20℃ ~50℃인 경우 시간(사이클 수)에 따른 신뢰도(General log-linear 모형 적용)

### 4. 논의

지금까지의 분석을 요약하면, LPF ASSY에 대한 열 충격시험 결과에 역거듭제곱-와이블 모형을 적용할 경우 사용조건이 -20℃(30분) ~ +50℃(30분)(70℃의 차)이고, 하루에 200사이클 정도를 예상하면 <그림 4>에서와 같이 90% 신뢰도에서 5.5년 정도의 수명을 보장할 수 있다. 본 사례의 경우 코핀-맨슨 모형을 이용하므로 <그림 5>에서와 같은 스트레스-수명의 관계를 볼 수 있으며, <그림 6>에서와 같은 가속계수를 구할 수 있다.

하지만 수명(사이클 수)은 앞의 모형에서 고려한 온도의 차(수준 1의 경우 -40℃ ~ +85℃(125℃의 차), 수준 2의 경우 -25℃ ~ 60℃(85℃의 차))에 의해서 영향을 받지만 이외에 다른 요인들에 의해서도 영향을 받을 수 있다. 예를 들어, 제일 높고 그리고 제일 낮은 온도에서 머문 시간이라든지 제일 낮은(높은) 온도에서 제일 높은(낮은) 온도로 바뀌는 시간 등에 의해서

도 수명이 영향을 받는다. 따라서 이들 요인들을 모두 고려할 수 있는 모형이 필요하다. 현 시험에서 수준 1의 상황을 그림으로 나타내면 <그림 7>과 같다.



<그림 7> 현 시험에서 수준 1의 상황

따라서  $x_1, x_2, x_3$ 를 각각 다음과 같이 정의하면  
 $x_1$ : 온도의 차(제일 높은 온도 - 제일 낮은 온도)  
 $x_2$ : 제일 높은 온도 및 제일 낮은 온도에서 머문 시간

$x_3$ : 제일 낮은(높은) 온도에서 제일 높은(낮은) 온도로 바뀌는 시간

$x_1$ 이나  $x_2$ 가 높을수록 수명(사이클 수)  $t$ 는 낮아지고  $x_3$ 가 높을수록 수명(사이클 수)  $t$ 는 높아질 가능성이 많다. 따라서 이들 요인의 효과를 점검할 수 있는 모형이 필요하다. General log-linear 모형은 이들의 효과를 고려할 수 있는 모형이다.

General log-linear 모형은 다음과 같이 표현된다.

$$L(\underline{x}) = e^{\alpha_0 + \sum \alpha_i x_i} \tag{8}$$

여기서  $L(\underline{x})$ 은 식 (4)와 같은 수명  $x$ 는 스트레스 벡터  $\alpha_i$ 들은 모형의 모수들을 나타낸다.

$x_1, x_2, x_3$  중  $x_1$ 만을 고려하는 경우 식 (8)은

$$L(x) = e^{\alpha_0 + \alpha_1 x_1} \tag{9}$$

가 된다. 앞에서 주어진 열충격시험 데이터의 경우 식 (9)를 스트레스-수명의 모형으로 잡는다면 그 결과는 <그림 8>과 같이 나와 시간(사이클 수)에 따른 신뢰도는 <그림 4>와 거의 같음을 알 수 있다.

하지만 General log-linear 모형은 앞에서와 같이 수명에 영향을 미치는 각 인자의 주효과뿐만 아니라 인자들간의 상호작용효과도 고려할 수 있다. 앞에서  $x_1, x_2, x_3$ 의 주효과이외에 두 인자들간의 상호작용효과까지도 고려한다면 모형은 다음과 같이 쓸 수 있을 것이다.

$$L(\underline{x}) = e^{\alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \alpha_4 x_1 x_2 + \alpha_5 x_1 x_3 + \alpha_6 x_2 x_3 + \alpha_7 x_1 x_2 x_3} \tag{10}$$

물론 식 (10)을 적용하여 신뢰성분석을 할 때에는 Condra (2001)에서와 같이 각 인자의 주효과 및 두 인자들간의 상호작용효과를 제대로 파악할 수 있는  $2^3$ 요인배치법과 같은 정교한 실험계획이 필요할 것이다.

지금까지 출하된 LPF ASSY에 대한 열충격 시험이

두 스트레스(온도의 차) 수준에서 이루어지는 경우 통상적인 역거듭제곱-와이블 모형을 적용하면 사용조건에서 고장까지 몇 사이클이 걸린 것인지 살펴보았다. 하지만 4절에서 언급한 바와 같이, 본 시험의 결과는 온도의 차이 이외에 다른 여러 조건(높거나 낮은 온도에서 머무는 시간, 높은 온도에서 낮은 온도로 바뀌는 시간 등)에 의해서도 영향을 받을 수 있으므로 이들 모든 요소를 고려할 수 있는 General log-linear 모형이 더욱 적합해 보인다. 이들 모든 요소의 영향력을 평가하기 위한 구체적인 실험계획은 다음 연구로 미룬다.

### 참고문헌

- [1] 박동호, 백재욱, 이우준, 박정원 (2010), 신뢰성공학, 한국방송통신대학교출판부.
- [2] 백재욱 (2007), 가속수명시험, 한국방송통신대학교출판부.
- [3] 신민경, 위신환, 김형민 (2008), 가속수명시험을 통한 자동차용 파워렛램프의 비교평가, 신뢰성응용연구, 8권 2호, pp.75-85.
- [4] ALTA version7, Accelerated Life Testing Reference, ReliaSoft.
- [5] Bagdonavicius, V. and M. Nikulin. (2001), Accelerated Life Models: Modeling and Statistical Analysis. Chapman & Hall.
- [6] Chan, H.A. and P.J. Englert. (2001), Accelerated Stress Testing Handbook. IEEE Press.
- [7] Condra, L.W. (2001), Reliability Improvement with Design of Experiments, Marcel Dekker.
- [8] Kececioglu, D. (2002), Reliability Engineering Handbook, Volume 2.
- [9] Lawless, J.F. (2002), Statistical Model and Methods for Lifetime Data, Wiley.
- [10] Nelsom W. (1990), Accelerated Testing, Wiley.