

## 배전선로에 사용되는 전자개폐기(Magnetic Switch)의 가속수명시험에 관한 연구

유 행 수\*, 한규환\*, 권 영 일  
LG산전 전력시험기술센터\*, 충주대학교 산업공학과

### A Study on Accelerated Life Tests for Magnetic Switch Used in Distribution System

Haeng-Soo Ryu\*, Gyu-Hwan Han\*, Young-Il Kwon  
LGIS PT&T\*, Chongju University

**Abstract** - In this paper, accelerated life test (ALT) models and procedures for Magnetic Switch (MS) are developed and applied to assure specified reliability of the products at development phase and guarantee the life of the products. Magnetic contactor that functions with over-current relay is called MS. Magnetic contactor closes and opens the motor load with ON/OFF switch of electronic contactor. It is also used for protecting and controlling the load. Magnetic contactor detects the over-current flow in the load with a over-current relay and disconnects the load by opening its control power. In this study, ALT models for MS are developed using the relationship between stresses and life characteristics of products. Using the ALT models, we performed life tests and analyzed the tests results. The proposed ALT models and procedures may be extended and applied to testing similar kinds of products to reduce test times and costs of the tests remarkably. Finally the results of this study will contribute to improving reliability of products and strengthening competitiveness of our products in world markets.

## 2. Magnetic Switch

본 논문에서 고려하는 가속수명시험 대상은 MS이다. 전자개폐기라 불리는 MS의 구조((LG산전)는 그림 1과 같고 원안의 사진은 계전기를 나타낸 것이며, 사진에 보이는 박와같이 전자접촉기(MC)와 계전기(Relay)가 서로 결합되어 하나의 형태로 구성되어진다. 과전류계전기(Overcurrent Relay)에는 열동형(Thermal)과 전자형(Electronic)이 있다.

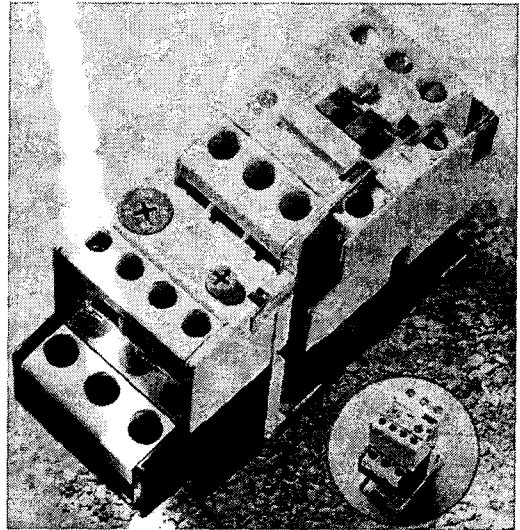


그림 1. Magnetic Switch의 구조 (LG산전)

## 1. 서 론

본 논문은 배전계통에서 많이 사용되고 있는 전자개폐기(MS)의 신뢰성 확보를 위한 개발단계에서의 시험과 더불어 제품의 수명을 보증하는 시험에 있어서의 가속수명시험법의 개발 및 적용에 관한 것이다. MS는 전자접촉기(MC)와 계전기(Relay)의 조합으로 구성되며, 전자접촉기는 모터 등의 부하를 운전/정지시킴으로써 부하를 보호, 제어하는 목적으로 사용되고 계전기는 부하에 일정이상의 과전류가 흐르면 이를 감지하여 전자접촉기의 조작전원을 차단시키는 역할을 한다. 본 연구에서는 확률론적인 방법으로 접근하여 해당 제품의 수명분포와 수명-스트레스의 관계에 의한 가속수명시험모델을 개발하고 이 모델에 의한 가속시험결과를 분석, 제시하고자 한다. 본 연구결과를 해당 제품 또는 유사제품의 신뢰성 시험에 활용함으로써 제품의 수명보증 시험기간의 단축과 함께 시험비용이 대폭 절감되며, 나아가 제품의 신뢰성 보증 및 제고에 의한 경쟁력 향상에도 크게 기여할 것으로 사료된다.

## 3. 수명분포와 가속시험 모형

### 3.1 수명분포

신뢰성 분야에서 주로 사용되는 수명분포는 지수분포, 와이블분포, 그리고 대수정규분포이다.

#### 3.1.1 지수분포(Exponential Distribution)

지수분포는 신뢰성 분야에서 가장 널리 사용되는 분포이며 사용시간에 따라 마모나 열화가 없는 고장률이 일정한 경우의 수명이 지수분포를 따른다. 또한 수많은 부품으로 이루어진 시스템 제품의 수명도 지수분포를 따르는 것으로 알려져 있다. 지수분포의 확률밀도함수(Probability Density Function)는 다음과 같다.

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, t > 0 \quad (1)$$

### 3.1.2 와이불 분포(Weibull Distribution)

와이불 분포는 증가, 감소, 상수(지수분포) 고장률을 모두 다룰 수 있는 응용범위가 매우 넓은 분포이며 앞으로 신뢰성 분야에서 지수 분포를 대체할 분포로 인식되고 있으며 그 사용이 확대되고 있다. 또한 각종 베어링류, 클러치, 피스톤, 모터, 밸브류, 압력용기, 콤프레셔, 펌프, 윤활유 등을 포함한 많은 기계류 부품의 수명이 와이불 분포를 따르는 것으로 알려져 있다. 와이불 분포의 확률밀도 함수는 다음과 같다.

$$f(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta}, t > 0 \quad (2)$$

### 3.1.3 대수정규분포(Lognormal Distribution)

수명  $T$ 의 로그 값  $\ln T$ 가 정규분포를 따를 때, 수명  $T$ 는 대수정규분포를 따른다고 하며 대수정규분포 역시 다양한 형태를 갖기 때문에 많은 유형의 데이터에 잘 맞는 것으로 알려져 있다. 예를 들어 금속 피로수명이나 전기 절연체의 수명데이터 해석에도 자주 사용되고 있다. 대수정규분포에서  $\mu$ 를 로그평균(log mean) 또는 위치모수(location parameter),  $\sigma$ 를 로그표준편차(log standard deviation) 또는 척도모수라고도 부른다.  $\ln T$ 가 평균이  $\mu$ , 분산이  $\sigma^2$ 인 정규분포를 따를 때  $T$ 의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma t}} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}}, t > 0 \quad (3)$$

## 3.2 수명-스트레스 관계

시험 데이터에 적합한 분포가 선택되면, 다음은 스트레스 수준과 수명특성의 관계를 규명, 결정해야 한다. 수명특성이란 평균수명, 중앙수명, 신뢰도, 불신도 등을 의미한다. 지수, 와이불, 대수정규분포에서 주로 사용되는 수명특성들은 표 1과 같다.

표 1. 수명분포와 수명특성들의 관계

분포	모수	수명특성
지수(Exponential)	$\lambda$	평균수명(MTTF) $\frac{1}{\lambda}$
와이불(Weibull)	$\theta, \beta$	척도모수 $\theta$
대수정규(Lognormal)	$\mu, \sigma$	중앙수명 $e^\mu$

### 3.2.1 아레니우스(Arrhenius) 모형

아레니우스 모형은 스웨덴의 물리화학자 아레니우스(Arrhenius)가 제안한 온도와 반응률의 관계식(활성화 에너지, 온도와 반응속도의 관계)에서 도출되었다. 이는 수명이 반응률의 역수에 비례한다는 내용이다.

$$L(V) = Ce^{-\frac{B}{V}} \quad (4)$$

L : 정량적 수명속도(평균수명, 중앙수명, characteristic life 등)  
V : 스트레스 수준(절대온도)  
C, B : 결정해야 할 모델의 모수

### 3.2.2 Eyring 모형

아이링 모형은 양자역학원리에서부터 도출되었으며 가속인자로 열-스트레스(온도)를 적용하는 경우 주로 사용되나 습도 등 열 이외의 스트레스에 대해서도 사용할 수 있다.

$$L(V) = \frac{1}{V} e^{-(A - \frac{B}{V})} = \frac{1}{V} Ce^{\frac{B}{V}}, (C = e^{-A}) \quad (5)$$

L : 정량적 수명속도(평균수명, 중앙수명, characteristic life 등)  
V : 스트레스 수준(온도)  
A, B : 결정해야 할 모델의 모수

### 3.2.3 역승모델(Inverse Power Law : IPL)

역승모델은 전압 등과 같이 주로 비열 가속인자를 적용하는 경우 사용된다.

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

L : 정량적 수명속도(평균수명, 중앙수명, characteristic life 등)  
V : 스트레스 수준(온도)  
K, n : 결정해야 할 모델의 모수

## 4. 가속수명시험 설계

### 4.1 가속시험절차

가속수명시험을 준비하고 수행하기 위한 일반적 절차는 다음과 같다.

#### 4.1.1 주요 고장모드 결정

- (1) 사용환경(IEC-300-3-2 기준), 사용 스트레스 분석
- (2) 고장 해석, 주요 고장 모드, 주요 스트레스 파악  
-Field Data 해석, FMEA, QFD, 고장물리

#### 4.1.2 적용 스트레스 결정

- (1) 고장물리, 고장해석, FMEA, FTA
- (2) 주요 스트레스 및 범위
- (3) 사용조건 스트레스 수준
- (4) 스트레스 적용방법  
-Constant, Step-Stress, Ramp

#### 4.1.3 수명분포 및 가속 모델 결정

- (1) 수명분포 : 지수, 와이불, 대수정규, 기타
- (2) 가속모델 : 아레니우스, 역거듭제곱, 아이링
- (3) 가속모델 검증 : 가속계수, 문헌조사 등
- (4) 데이터 해석법 : 그래프, MLE, S/W 등

#### 4.1.4 가속시험계획 수립

- (1) 스트레스 수준 결정
  - 스트레스 관련 제품 규격, 가속관계 유지 범위
- (2) 시료수 결정 : 결과의 정확도, 비용, 시간 고려
- (3) 샘플링 방법 : 시료의 대표성, 정상품 여부 체크방식
- (4) 인증시험 시 샘플링 검사방식
- (5) 복원/ 비복원 시험, Censoring 방식
- (6) 시험장비 결정, 사용법, 데이터 기록

#### 4.1.5 가속시험 실시

- (1) 시험장비 점검
  - 주 장비, 성능측정 장비 등의 관리상태, 정밀도
- (2) 시험환경 검토
  - 전원공급장치, 고장 발생시 영향, 발열, 소음, 진동, 안전 등.
- (3) 전담인원, 관측방식, 데이터 기록 방식 확인
- (4) Pilot 시험
- (5) 시험, 데이터 기록

#### 4.1.6 시험결과 해석

- (1) 해석을 위한 S/W, 데이터 기록양식, 확률지등 준비
- (2) 시험 데이터의 예비 분석
  - 이상치 파악, 고장모드가 Field 시험자료와 일치하는가?, 분포 적합도 검정, 모델 적합도 검정
- (3) 데이터 해석
  - 가속모델 파라미터 추정, 가속계수 산출, 사용 조건 수명 추정, 샘플링 검사 시 합격여부 판정
- (4) 결과 보고서 작성 및 종합 검토

#### 4.2 고장정의 및 가속시험항목 선정

먼저 가속수명시험을 설계하기 이전에 Field Service Data 분석과 FMEA에 의한 고장해석을 통해 주요고장모드를 규명하고 이들 주요 고장모드와 관련된 주요 성능 및 특성치를 파악하였다. 이 결과로부터 도출된 시험항목과 목표수명/특성치는 표 2와 같으며 표에 정리된 3가지 시험항목 중 전기적 수명이 높은 신뢰도가 요구되는 가장 중요한 품질특성이므로 이에 대한 가속수명시험을 설계, 실시하고 그 결과를 분석하였다.

표 2. 시험항목과 목표신뢰도

No	항목	목표치	방법	실시여부
1	전기적수명	100만회 이상	정격전류를 인가하여 개폐	○
2	기계적수명	1,000만회 이상	조각회로판 구성하여 개폐	×
3	절연저항	5MΩ	개폐후에 절연저항 측정	×

이 시험에 사용된 설비는 그림 2와 같으며, 시험 조건

은 개폐빈도 1,200회/Hr, 사용율 : 25%에서 정격전류의 500,400,300,200%로 가속하여 시험한다. 이 시험에서 고장은 수명시험에서 오접촉 및 기계적 파손에 의해 접촉 불량 발생하는 것으로 정의된다. 고장 관측 주기는 Counter를 연결하여 횟수를 측정하며 고장 관측방법은 육안확인을 한다.

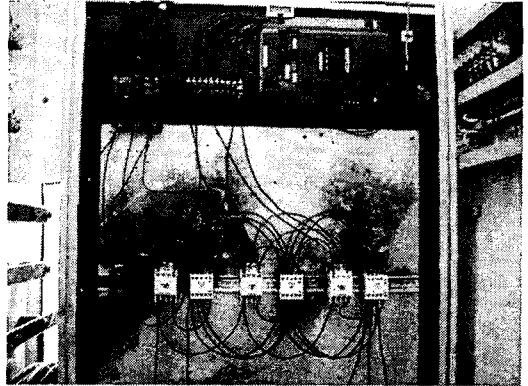


그림2. 전기적 수명시험대 (LG산전 PT&T)

## 5. 사례연구

### 5.1 시험 Data

MS의 수명분포를 찾아내기 위하여 인정시험 단계에서 합격된 제품 6대를 Random Sampling하여 가속수명시험을 실시하였다. 제품에 대한 사용환경, 고장분석, 특성분석을 통해 전류를 가속인자로 선정하였으며 가속수준은 시간과 비용을 절감하고 시험설비능력을 고려하여 65A, 52A, 39A, 26A의 4수준으로 정하였다. 각 수준별로 시험한 결과를 다음의 표 3에 정리하였다. 괄호안의 수치는 관측중단(Censoring)된 시점을 나타낸다.

표 3. 가속시험 데이터

가속조건 고장순서	고 장 시 간(횟수)			
	65A	52A	39A	26A
1	5	19	610	51,000
2	7	32	634	54,500
3	13	62	931	(55,000)
4	18	65	932	(55,000)
5	42	154	936	(55,000)
6	42	155	4,500	(55,000)

### 5.2 시험 Data의 분석

MS의 가속수명시험에 관한 연구는 LG산전의 경우 처음 시도되는 것은 아니다. 과거 80년대 후반에 많은 신뢰성활동들이 이루어졌으나, 90년대 이후부터는 지지부진한 상태에 처해 있었으며, 2001년 후반 LG산전 전력시험 기술센터(PT&T)내에 신뢰성시험연구팀을 조직하여 신뢰성 분야에 활발한 활동을 하고있다. 본 사례에서는 시험데이터를 바탕으로 가속시험 Data 분석용 S/W를 사용하여 최우추정법에 의한 방법으로 분석하였고 그 결과를 확률지를 사용한 분석결

과와 비교하였다. 확률지에 의한 분석은 가설검정이나 구간추정을 할 수 없다는 제약이 있으나 S/W를 활용한 해석적 방법을 적용하면 시험 데이터로부터 관심있는 모수에 대한 구간추정이 가능하다. 현재 국내에서 6-Sigma 활동에 의하여 기업에 널리 보급되어있는 MINITAB의 최우추정법에 의한 가속시험 분석방법을 적용하여 분포의 적합성과 수명-스트레스 관계식에 의거한 가속수명시험 모델을 검토하였다. 먼저 분포의 적합성을 검증하여 적합한 수명분포를 결정한 후, 전압등과 같은 비열 가속인자일 경우 널리 적용되는 역승모델(Inverse Power Law)을 사용하여 가속시험 데이터를 분석해 보기로 한다.

### 5.3 분포의 적합성

MINITAB에서 분포를 추정하는 대표적 방법으로 최우 추정법(Maximum Likelihood Estimation)과 최소자승 추정법(Least Squares Estimation)이 있다. 이 두 결과를 다음의 그림 3에 도시하였다.

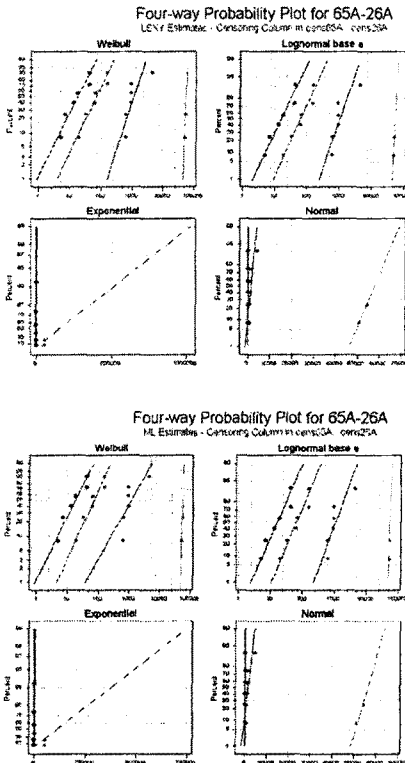


그림 3. 분포의 적합성

위의 결과는 와이불 및 대수정규 분포가 얻어진 수명 데이터에 적합함을 보여주고 있다. 시험대상 제품은 그 특성상 마모/열화현상이 있는 제품이므로 고장율이 사용시간에 따라 증가하는 형태를 갖는다. 증가고장률을 갖는 제품의 수명분포로 적용할 수 있는 대표적인 분포가 와이불분포이며, 동일 제품에 대한 과거 수명

시험 경험에 따르면 와이불 분포가 적합한 것으로 나타났다. 본 논문에서는 와이불 분포를 사용하여 수명데이터를 분석하기로 한다.

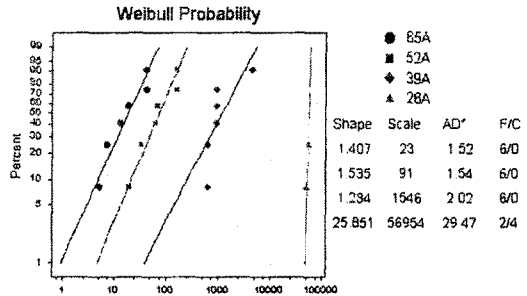


그림 4. 와이불 확률지에 의한 모수추정

가속시험데이터에 대해 와이불 분포를 적용하여 각 가속조건 별 형상모수 및 척도모수를 추정한 결과가 위의 그림 4에 주어졌다. 그리고 가속인자와 와이불 분포의 척도모수와의 관계를 나타내는 가속모델을 구하기 위하여 두 변수간의 관계를 직선관계로 가정하고, 역승모델을 적용하여 분석한 결과가 그림 5에 주어졌다. 표 4는 10%, 50% 백분위수 및 척도모수에 해당하는 63.2% 백분위수  $t_{10}, t_{50}, t_{63.2}$ 를 나타내고 있다. 참고로 100% 백분위수란 전체 제품 중 100%가 고장나는 시점을 말한다. 제품의 설계수명으로서 일반적으로 10% 백분위수나 5% 백분위수가 사용되며 고도의 신뢰도를 요하는 제품에 대해서는 1% 백분위수가 사용되기도 한다. 이를 10%, 5%, 1% 백분위수라 하며 각각  $B_{10}, B_5, B_1$  수명이라고도 부른다. 그래프로부터 두 변수간의 관계가 직선을 만족함을 알 수 있고, 그 결과 역승모델이 적합한 것으로 사료된다.

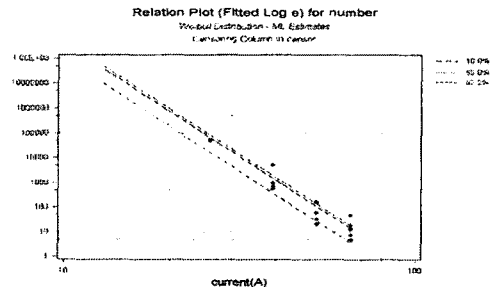


그림 5. 역승모델

표 4. 백분위수

Percent	current (A)	Percentile	Standard Error	95.0% Normal CI	
				Lower	Upper
10.0	13.0000	9406003	6114955	2630442	33634223
50.0	13.0000	36806167	23926041	10294200	131597792
63.2	13.0000	47983758	31652511	13170392	174819470

위의 결과로부터 사용조건(13A)에서의 수명분포를 도

출해 낼 수 있으며, 그 때의 형상모수 및 척도모수 또한 구할 수 있다. 이것을 다음의 그림 6에 도시하였다.

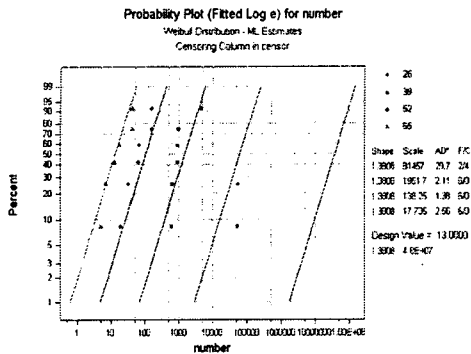


그림 6. 사용조건에서의 수명분포 및 모수

위의 모든 결과로부터 수명분포가 와이불 분포를 따를 때 사용상태의 형상모수는 1.3808이고, 척도모수는 48,000,000이다. 이와 같은 결과로부터 모집단의  $B_{10}$ 수명은 95% 신뢰구간이 약 263만회 이상이고 3,300만회 미만임을 알 수 있다.  $B_{10}$ 수명에 대한 95% 신뢰구간의 신뢰하한이 약 263만회로서, 이는 처음 목표로 했던 전기적 수명 100만회 이상을 충분히 달성함을 의미한다.

## 6. 결론

본 논문에서는 MS에 관한 가속수명 시험 데이터에 대해 MINITAB에서의 최우추정법을 적용하여 분석해 보았으며 수명분포로는 와이불분포를, 수명-스트레스 관계는 역승모델을 가정하였다. 분석 결과는 다음의 표 5와 같다.

표 5. 분석결과

구분	Software
형상모수	1.3808
척도모수	48,000,000
MTTF	$13,170,392 < \mu < 174,819,470$

또한 사용조건과 가속조건을 비교하여 가속계수 AF(Acceleration Factor)를 구할 수 있다. 수명분포를 와이불로 가정했으므로, 이것은 그림 6에 나타난 척도모수를 이용하여 구할 수 있으며 다음의 표 6에 나타낸 것과 같다.

표 6. 가속계수(AF)

가속조건 ( $\eta_2$ ) \r\n사용조건 ( $\eta_1$ )	가속계수 ( $\eta_1 / \eta_2$ )			
	26A	39A	52A	65A
13A	589	24,593	347,197	3,706,512

위의 표를 좀 더 설명하면, MS에 52A의 전류를 흘린 상태에서 1회 개폐 시험을 한다면 이는 정상조건(13A)에서 347,197회 개폐 시험하는 효과가 있다는

것을 말한다. 따라서 이 결과는 시험시간의 단축이라는 효과를 의미한다. 위의 결과는 과거 확률지에 의한 분석결과와 다소 차이가 있는 것으로 나타났는데 그 이유는 첫째, 확률지에 의한 분석은 결과가 분석자에 따라 다소 주관적일 수가 있고, 둘째, 확률지에 의한 시험데이터 분석의 경우 스트레스 수준에 따라 와이불 분포의 형상모수가 다소 변하는 것으로 나타났으나 최우추정법에 의한 결과는 스트레스 수준에 관계없이 형상모수가 일정하다는 가정 하에 이루어졌기 때문으로 풀이된다. 따라서 실제로 확률지에 의한 분석과 같이 스트레스 수준에 따라 형태모수가 변하는 경우를 고려한 가속시험분석방법의 연구도 현실적으로 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있겠다.

본 연구 결과 와이불 수명분포와 역승모델에 따른 분석으로부터 MS에 정격전류보다 큰 전류를 적용할 경우 전류의 크기와 수명간에 가속관계가 성립함을 알 수 있었다. 향후 계획은 지금까지의 분석 경험을 바탕으로 체계적인 가속시험절차에 따라 실제로 MS 및 MCCB(Molded Case Circuit Breaker)에 관한 가속수명시험을 설계, 실시하고 그 결과를 분석해 볼 예정이다. 또한 향후 연구에서는 가속수준을 사용조건에 근접(약 19A~46A)하게 하여 적용해 볼 예정이다. 본 연구결과를 해당 제품 또는 유사제품의 신뢰성 시험에 활용함으로써 제품의 수명보증 시험기간의 단축과 함께 시험비용이 대폭 절감되며, 나아가 제품의 신뢰성 보증 및 제고에 의한 경쟁력 향상에도 크게 기여할 것으로 사료된다.

## (참고 문헌)

- [1] Lawless, J.F., Statistical Models and Methods for Lifetime Data, Wiley, New York, 1982
- [2] Meeker, W.Q., "A Comparison of Accelerated Life Test Plans for Weibull and Lognormal Life Distribution", Technometrics, 26, 157-172, 1984
- [3] Meeker, W.Q. and Han, G.J., How to Plan An Accelerated Life Test - Some Practical Guidelines, Volume 10 of the ASQC Basic References in Quality Control: Statistical Techniques, 1985
- [4] Nelson, W., "Analysis of Accelerated Life Test Data - Part I : The Arrhenius Model and Graphical Methods", IEEE Trans. on Electrical Insulation, EI-6, 165-181, 1971
- [5] Nelson, W., "Analysis of Accelerated Life Test Data - Part II : Numerical Methods and Test Planning", IEEE Trans. on Electrical Insulation, EI-7, 36-55, 1972
- [6] Nelson, W., "Graphical Analysis of Accelerated Life Test Data with Inverse Power Model", IEEE Trans. on Rel., R-21, 2-11, 1972
- [7] Nelson, W., Accelerated Testing - Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses, Wiley, New York, 1990.