

**제품 신뢰성 확보를 위한 배전 계통에 사용되는 전자개폐기 가속스트레스시험에 관한 연구**

류 행 수\*, 박 상 용\*, 한규환\*, 권 영 일\*\*, 윤남식  
 LS산전 전력시험기술센터\*, 청주대학교 산업공학과\*\*, 충북대학교 전기공학과

**To Ensure A Product Reliability The Study on Accelerated Stress Tests for Magnetic Switch Used in Power Distribution System**

Haeng-Soo Ryu\*, Sang-Yong park\*, Gyu-Hwan Han\*, Young-Il Kwon\*\*, Nam-Sik Yoon  
 LSIS PT&T\*, Chongju University\*\*, Chungbuk National University

**Abstract** - In this paper, accelerated stress test(AST) for Magnetic Switch (MS) are applied to assure specified reliability 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, AST for product assembly are developed in order to improve the weak point so that increase the product reliability. Also we will show the basic information for the accelerated life test(ALT). The proposed AST results 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 the world markets.

보이는 바와같이 전자접촉기(MC)와 계전기(Relay)가 서로 결합되어 하나의 형태로 구성되어진다. 과전류제한기(Overcurrent Relay)에는 열동형(Thermal)과 전자형(Electronic)이 있다.

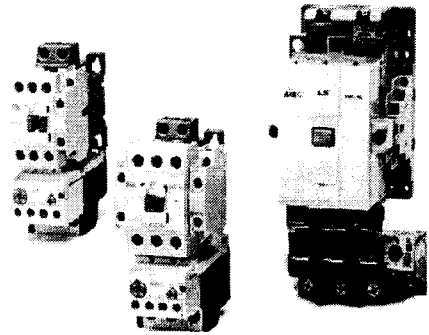


그림 1. Magnetic Switch의 구조 (LS산전)

**1. 서 론**

본 논문은 배전계통에서 많이 사용되고 있는 전자개폐기(MS)의 신뢰성 확보를 위한 가속스트레스(Accelerated Stress Test) 시험에 대한 연구이다. MS는 전자접촉기(MC)와 계전기(Relay)의 조합으로 구성되며, 전자접촉기는 모터 등의 부하를 운전/정지 시킴으로써 부하를 보호, 제어하는 목적으로 사용되고 계전기는 부하에 일정이상의 과전류가 흐르면 이를 감지하여 전자접촉기의 조작전원을 차단시키는 역할을 한다. 본 연구에서는 Assembly를 대상으로하는 계단형 스트레스(Step Stress)를 적용하여 설계상의 약점을 발견하여 개선함으로써 신뢰성을 향상시키는 가속스트레스 시험방법을 제시하고, 또한 가속수명시험을 위한 기본자료로 활용하는 것에 대해서도 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.

**2. Magnetic Switch**

본 논문에서 고려하는 가속스트레스시험 대상은 MS이다. 전자개폐기라 불리는 MS의 구조(LS산전)는 그림 1과 같고 제품 하단이 계전기를 나타낸 것이며, 사진에

**3. 수명분포와 가속시험 모형**

**3.1 수명분포**

신뢰성 분야에서 주로 사용되는 수명분포는 지수분포, 와이불분포, 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.

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

**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, 콤프레서, 펌프, 윤활유 등을 포함한 많은 기계류 부품의 수명이 와이불 분포를 따르는 것으로 알려져 있다. 와이불 분포의 확률밀도 함수는 다음과 같다.

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

### 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. 수명 특성이란 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) 모델

아레니우스 모형은 스웨덴의 물리화학자 아레니우스(Arrhenius)가 제안한 온도와 반응물의 관계식(활성화 에너지, 온도와 반응속도의 관계)에서 도출되었다. 이는 수명이 반응물의 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 모델

아이링 모델은 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

### 3.2.4 누적 피로 모델(Cumulative Damage)

누적 피로 모델은 시간에 따라 스트레스 변하는 가속인자를 적용하는 경우 사용된다.

$$L(V) = C \cdot e^{-\frac{B}{x(t)}} \quad (7)$$

L : 정량적 수명속도(평균수명, 중앙수명, characteristic life 등)  
 x(t) : Time-varying Stress  
 C, B : 결정해야 할 모델의 모수(아레니우스 모델의 모수 C, B)

## 4. 가속시험

### 4.1 가속시험 개요

시간을 단축시킬 목적으로 사용조건 보다 가혹한 조건에서 수행하는 시험을 총칭하여 가속시험이라 한다. 가속시험은 가속수명시험과 가속스트레스시험으로 구분함.

#### 4.1.1 가속수명시험

부품 또는 간단한 어셈블리를 대상으로 하여 사용조건 보다 가혹한 일정 스트레스 조건에서의 시험데이터들을 분석하여 수명-스트레스 관계식을 추정하고, 이로부터 사용조건 수명을 추정하기 위한 시험.

#### 4.1.2 가속스트레스시험

PBA(Printed Board Assembly) 또는 어셈블리를 대상으로 계단형 스트레스와 복합 스트레스를 적용하여 설계상의 약점을 발견하여 개선함으로써 신뢰성을 향상시키기 위한 시험으로 HALT(Highly Accelerated Life Test)라고 부른다.

### 4.2 가속스트레스시험 절차

#### 4.2.1 사전준비

설계 엔지니어와 제품특성을 충분히 논의하여 인가 스트레스와 가용한 시료수를 결정하고, 측정항목, 파라미터 및 고장판정 기준을 결정한다.

#### 4.2.2 고정장치의 장비 준비

시험 제품에 에너지의 전달을 확실하게 하기 위한 진동

고정장치와 최대한으로 온도를 변화 시키기 위한 Air ducting을 설계, 시험 제품에 맞도록 챔버를 조율하고, 열전대를 부착하며, 모든 시험장비와 케이블을 준비한다.

#### 4.2.3 계단형 스트레스 시험 실시

온도의 임의진동 스트레스를 계단형으로 인가하여 작동 한계와 파괴한계를 찾기 위한 계단형 스트레스 시험을 실시한다.

##### 4.2.3.1 온도 계단형 스트레스 시험

온도 계단형 스트레스 시험은 cold step과 hot step으로 구분된다. cold step stress 시험은 온도를 계단형으로 낮추어가며 시험하고, hot step stress 시험은 온도를 계단형으로 올려가며 시험한다. 일반적으로 온도 계단형 스트레스 시험은 cold step을 먼저 실시하고 이후에 hot step을 실시한다. 한편 고장을 가속할 수 있는 제품 스트레스인 전원, cold step 중 power cycling, 입력 전압, 부하 주파수 변동 등도 함께 인가한다.

시험은 상온(20℃)에서 시작하여 온도를 10℃씩 계단형으로 감소(또는 증가)하고 동작한계 또는 파괴한계에 가까워지면 온도를 5℃ 간격으로 감소(또는 증가)하며, 기본 기술한계(Fundamental Limit of Technology: FLT)에 도달할 때까지 시험을 한다. 여기서 FLT는 현 기술 수준의 한계로 시정조치가 이루어질 수 없고 기술혁신이 되어야 확장될 수 있는 작동 또는 파괴한계를 의미한다. 만일 FLT가 만족스럽지 않으면 기술변경이 요구될 수도 있다. 각 온도수준에서 유지시간은 10분 이상이며, 기능의 수행여부를 확인하기 위한 측정을 한다.

##### 4.2.3.2 빠른 온도변화 시험

온도계단형 스트레스 시험에서 확인된 동작한계의 5℃ 이내에서 온도범위를 설정하고, 가능한 빨리 온도를 변화시킨다. 이때, 온도 계단형 스트레스 시험과 마찬가지로 제품 스트레스도 함께 인가를 한다. 온도변화는 적어도 10분동안 계속하며, 최대 온도변화를 제품이 견디지 못하면 작동한계를 찾을 때까지 분당 10℃씩 온도변화율을 감소시킨다.

##### 4.2.3.3 진동 계단형 스트레스 시험

진동 계단형 스트레스 시험은 온도 계단형 스트레스 시험의 hot step과 유사한 방법으로 진행한다. 즉, 진동을 계단형으로 올려가며 시험하며, 제품 스트레스도 함께 인가한다. 시험은 3 - 5 grms에서 시작하여 계단형으로 3 - 5 grms씩 증가시키며, FLT에 도달할 때까지 시험을 수행한다.

##### 4.2.3.4 온도·진동 복합시험

온도 계단형 스트레스와 빠른 온도변화 시험에서 결정된 온도의 동작한계와 유지시간 및 온도변화율을 사용하

여 온도 프로파일을 개발한다. 이때, 전압 cycling과 같은 제품 스트레스도 합병하여 프로파일을 개발한다. 대략 5 grms의 진동수준에서 온도 프로파일에 따라 시험을 진행한다. 그리고, 진동 계단형 스트레스 시험중에 결정된 진동 증분에 따라 계단형으로 진동을 올리면서 온도 프로파일을 적용하여 시험을 한다.

#### 4.2.4 시험 후 처리 및 관리

HALT에서 발생한 모든 고장은 근본원인(root cause)을 확인해야 하며, 설계 엔지니어와 HALT의 근본원인 분석 결과를 논의해야 한다.

### 5. 사례연구

#### 5.1 적용시험 개요

앞서 서술한 온도 계단형 스트레스 시험을 적용하여 가속스트레스 시험을 실시하고, 그 결과를 ALTA PRO 6 Software를 활용하여 정량적 결과로 변환 분석했다.(2004년 3월 - 10월 시험실시) 수명분포는 시간에 따른 열화수명에 적합한 Weibull 분포를 적용하였으며, 가속모델은 ALTA 6 PRO 에서 제공하는 Cumulative Exposure(Damage)를 적용하였다.

#### 5.2 시험 조건 및 Layout

**작품모델: GMC-9**  
**사용온도: -25~40℃**  
**코일부 UOL: 140℃ 이상**  
**유지시간: 하기 그림 참조**  
**계배빈도: 7200회/Hr, 시험전압 264 V**  
**시험: 6대 시험**  
**온도기록계로 Cell 부 온도 측정 및 원온환출도 Offset 조정후 시험**

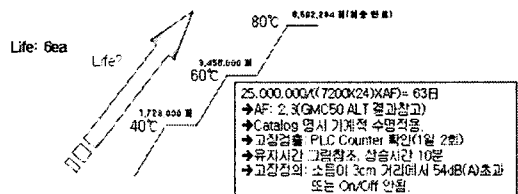


그림 2. 시험조건

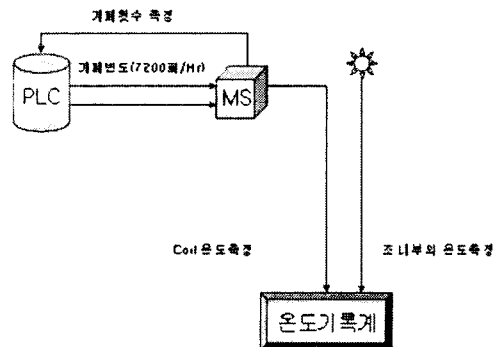


그림 3. 시험 Layout

### 5.3 시험 결과 및 데이터 분석

Reliasoft사의 ALTA 6 PRO를 활용하여 시험결과를 분석 하기위한 시험데이터 및 Stress Profile은 다음과 같다.

표 2. 시험 Data

Num	Life	Fail Temperature
1	4,774,624	353K
2	4,872,347	353K
3	5,227,245	353K
4	5,394,429	353K
5	5,926,651	353K
6	6,592,284	353K

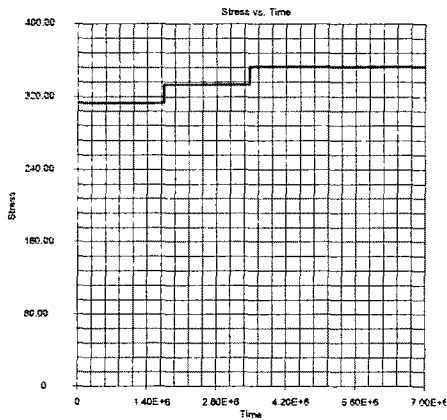
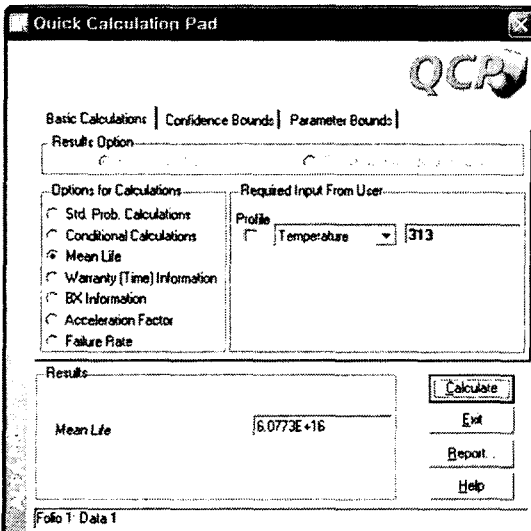
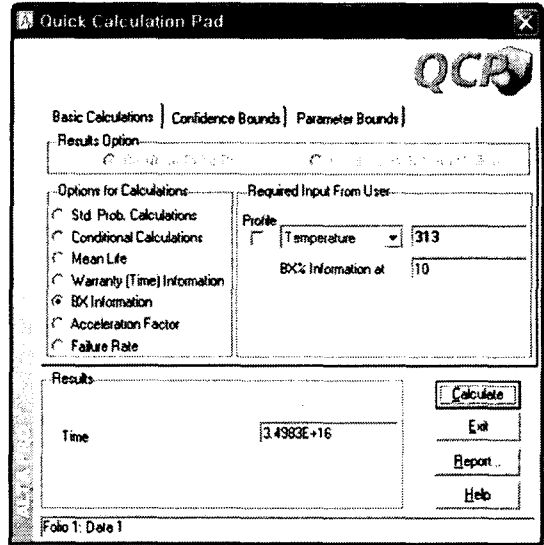


그림 4. Stress profile

분석결과 와이블 분포의 형상모수와 가속모델의 모수는  $\beta = 3.4136$ ,  $B = 6.6657 \times 10^7$ ,  $C = 2.1976 \times 10^{-76}$ 이며 사용조건(313K)에서의 평균수명은  $6.0773 \times 10^{16}$ 이다.



또한 사용조건(313K)에서의 B10 수명은  $3.4983 \times 10^{16}$ 이다.



### 6. 결론 및 향후계획

이상에서 본 바와같이 시간-중속 스트레스인 계단형 스트레스를 인가하여 가속수명시험 데이터를 얻은 후 ALTA 6 PRO를 활용하여 정량적인 수명을 추정해 보았다. 또한 가속조건에서의 고장모드를 분석한 결과 사용조건과 일치함을 확인하여 가속 스트레스 수준 설정의 적절함을 확인할 수 있었다. 끝으로 ALTA 6 PRO를 활용하여 평균수명 및 B10 수명을 분석한 결과가 일반적인 수명치보다 상대적으로 높았으나 계단형 스트레스 시험에 대한 시험법, 접근 방법 및 분석 방법을 확보했다는 데 그 의미를 둘 수 있겠다. 향후계획은 본 연구결과와 후속으로 고장물리(Failure Physics)를 활용한 고장메커니즘 규명 및 온도-전압에 의한 가속계수를 도출할 계획이다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] H. Anthony Chan, Paul J. Englert, "Accelerated Stress Testing Handbook", IEEE Press, 2001.
- [2] Nelson, W., "Accelerated Testing - Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses", Wiley, New York, 1990.
- [3] Reliasoft, "ALTA PRO Manual, Reliasoft Publishing", 2004.
- [4] 류행수, 한규환, 권영일, "배전선로에 사용되는 전자개폐기의 가속수명시험에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 536 - 540, 2002
- [5] 산업자원부 기술표준원 신뢰성과, "신뢰성용어해설서", 산업자원부 기술표준원, 2003.