

## 회귀분석을 이용한 전자접촉기의 접점소모 분석에 대한 고찰

김명석, 유행수, 한규환  
LG산전주식회사 전력시험기술센터

### A study on Analysis of Contact erosion at a Magnetic Contactor with the Use of Regression Analysis

Myoung-Seok Kim, Haeng-Su Ryu, Gyu-Hwan Han  
Power testing and Technology Institute(PT&T) of LG Industrial Systems Co., Ltd.

**Abstract** - This paper describes a Accelerated Life Test (ALT) with the electrical contact erosion suitable to the evaluations of high-reliability and durability devices such as magnetic contactor. Recently, an electrical devices company was interested in accelerated life test (ALT), the product liability (PL) and the short-term testing model of electrical life test (ELT). In order to estimate a model for testing fee and period, need to the statistical analysis method with the acceleration factor(AF). Usually customers/manufacturer regard their device failure to the over-current or heavy duty condition, while devices view shape of contact erosion owing to operational duty problem. In this paper, additional method of evaluation estimated the operated cycles by weight of contact erosion with a used of regression analysis by MINITAB.

#### 1. 서 론

제어계통과 전력계통에 사용되는 접점형 전자개폐기의 수명은 개폐 횟수로 평가하며, 평가 항목으로 기계적수명과 전기적수명이 있다. 이러한 기기의 수명을 평가하기에는 약 6개월~2년의 시험시간이 소요된다. 따라서, 조기에 수명평가를 위해서는 가속인자를 선정하여 수명 시험에 대한 통계적인 수법을 적용한다. 수명평가를 위해 사용하는 통계적 해석방법으로 가속 신뢰성 평가법이며, 회귀분석을 사용한 수명 예측도 이용된다. 신뢰성 평가를 위해서는 고장인자를 도출하고, 여러 인자 중 측정 가능한 방법을 사용하여, 통계적 수법을 통하여 수명을 예측한다.

본 논문에서는 전자개폐기의 구조와 용도 및 수명분류를 통하여, 규격을 알아보고, 전기적 수명시험에 대한 측정인자로 접점소모량을 선정하여 스트레스 수준을 달리하여 실험을 실시하였고, 특히 접점 소모량은 매우 작으므로 측정기기의 계측정도의 선정도 중요하며, 각 시험의 측정방법도 표준화가 시험계획에 포함되어야 한다. 일련의 시험절차를 고찰함으로써 재현시험을 가능하도록 표준화되어야 한다. 실증한 결과는 수명횟수에 대한 정시중단법으로 전기적 가속수명을 통한 접점소모량을 측정하여, 이에 대한 분석절차와 통계적 해석으로 시험결과와 유효성을 평가하고 수명에 대한 회귀분석을 사용하여 분석하였다.

#### 1.1 전자개폐기의 특징

저압 배전계통의 전력계통을 개폐하는 기기에는 진공 차단기, 기중차단기, 배선용차단기, 가스개폐기 및 전자개폐기 등이 있다. 전력계통 단말의 부하제어를 위해

널리 사용되고 있는 전자개폐기는 다음과 같은 특징을 갖고 있다. 전자개폐기는 자동제어, 원격제어, 집중제어가 가능하고, 제품 선정에 있어 주회로의 다양한 전압과 전류에 대응이 가능하며, 제품수명이 긴 것이 장점이다. 대부분의 전자개폐기는 전동기의 주회로를 개폐함으로써 전동기의 운전과 정지에 사용한다.

#### 1.2 전자개폐기의 구조

전자접촉기와 바이메탈을 이용한 기계식 열동 과부하계전기 또는 전자식 과부하계전기와 조합된 구조로 주회로 개폐는 전자접촉기가 담당하고, 주회로의 과전류에 대한 부하의 보호는 과부하계전기가 담당하는 구조로 구성되어 있다. 전자개폐기의 수명에 대한 규정은 개폐동작시의 소모에 의한 접점부 및 기구부의 내구성에 대하여 제조자가 표준화를 도모하기 위해 KS C4504(교류 전자개폐기)에 개폐 내구성을 기계적, 전기적 호칭으로 분류하였다.

전자개폐기의 전자접촉기는 단상, 삼상의 주회로를 페로/개로하는 접점부와 이를 기구적으로 동작할 수 있는 조작전자 코일과 전자식 등으로 구성되어 있고, 특히 접점부는 가동접점부와 고정접점부로 분류되며, 각각 은합금의 접점과 동합금의 통전부와 접합된 구조로 되어 있다. 전자접촉기의 상세 구조는 그림 1에 나타내었다.

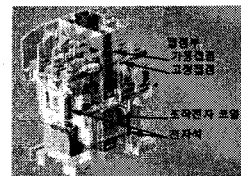


그림 1. 전자접촉기의 구조

#### 1.3 전자접촉기의 수명 분류

전자개폐기의 수명은 전자접촉기의 기계적 개폐내구성과 전기적 개폐 내구성으로 분류되며,

(1)기계적 개폐 내구성(수명): 주회로는 통전하지 않고 부품 및 손질 또는 조작전자 코일의 교환 없이 조작전자 코일에는 조작회로의 정격사용 전압으로 개폐한 경우의 기계적 소모에 의한 개폐내구성을 말한다.

(2)전기적 개폐 내구성(수명):

주회로에 통전 하며, 조작전자 코일에는 정격사용 전압을 인가하여 규정된 조건에서 개폐한 경우의 전기적 소모에 의한 개폐 내구성을 말한다.

(3)전기적 내구성을 평가하기 위한 부하의 종류 분류

- 1)AC1:비유도성 또는 소유도성 저항부하의 개폐
- 2)AC2B:권선형 유도전동기의 시동, 운전중인 권선형 유도전동기의 주회로 차단
- 3)AC2:권선형 유도전동기의 시동, 역상제동

(Breaking), 역전 및 인칭(Inching)

4)AC3:농형 유도전동기의 시동, 운전중인 농형 유도전동기의 주회로 차단

5)AC4:농형 유도전동기의 시동, 역상제동(Breaking), 역전 및 인칭(Inching)

(4)전기적 수명시험 평가방법

일반적으로 전자개폐기의 수명표기 방법으로 AC3급과 AC4급 수명횟수를 표기한다. 주회로 개폐조건을 비교하면 그림 2와 같다.

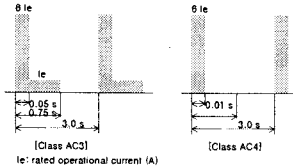


그림 2. 전기적수명 시험조건

## 2. 본 론

### 2.1 스트레스 가속시험의 필요성

가속수명시험은 실사용 조건보다 엄격한 조건으로 시험을 하여 단시간에 적은 시료로 평가하는 방법으로 부품과 재료의 수명에 관한 정보를 이용하여 요구하는 수명 목표를 정량적으로 수립을 위한 평가로 수명기간이 긴 경우 즉, 고장률이 작은 경우에는 시험/측정에 소요되는 시간과 비용이 증가하게 된다. 따라서 시간과 비용을 절감할 필요성이 있다. 본 논문에서는 스트레스 수준별 측정 데이터를 점점무게를 고장모드로 결정하여 시험시간의 단축을 위해 고장까지 측정하지 않고 회귀분석을 통한 시험결과를 도출하였다.

### 2.2 스트레스 가속시험 설계

시험평가를 위한 시험설계의 절차는 그림 3과 같은 순서를 따른다. 수명분포 및 가속모델의 결정은 시험결과 고장이 발생한 경우, 시간과 고장수로 적합한 수명분포 즉, 와이블 분포, 지수분포, 정규분포, 대수정규분포 등을 Plotting하여 가장 적합한 수명분포를 선정하여 분석한다. 가속모델에는 가속인자에 따라 모델을 적용한다.

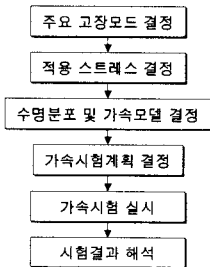
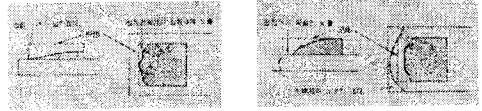


그림 3. 스트레스 가속시험 설계절차

### 2.3 주요 고장모드의 결정

전기적 수명시험에 있어 고장모드는 절연파괴, 점점부의 고장 등이 있고, 점점부의 고장의 원인은 전기적 개폐에 따른 점점의 손상으로 나타나며, 점점의 소모에 따라 전기적 통전용량은 저하되어 점점부의 수명이 감소한다. 따라서 점점의 소모량을 통하여 수명을 예측할 수 있다. 본 논문에서는 임의 관측중단(arbitrary censoring) 시점인 개폐횟수 30,000회 주기로 점점무게를 측정하여, 4Ie는 120,000회, 5Ie는 60,000회, 6Ie는 30,000회에서 시험중단하고, 이때의 점점무게를 측정한다.

데이터를 기준으로 점점 무게를 1.94 g을 임의 관측중단(고장으로 가정)하고 가속수명을 평가하였다. 점점소모량은 점점의 무게의 차와 같다. 또한 평가에 있어, 접점이 일정량 이상이 소모될 경우, 차단시의 아크(Arc)에 의한 절연파괴 현상이 발생되며, 이런 경우, 점점소모량을 측정하는 것은 매우 어렵다. 시험조건에 따라 점점 소모 형태는 그림 4와 같다.



[Class AC3] [Class AC4]

그림 4 점점 소모형태

### 2.4 적용 스트레스, 시험계획

수명시험에 적용되는 스트레스는 전류의 크기로 수준을 정하였고, 수준은 표 1과 같이 3수준으로 설정하였다.

표 1. 적용 스트레스 수준

수준	전류의 크기 (전압 일정)
1	4 Ie
2	5 Ie
3	6 Ie

Ie: rated operational current(정격 사용 전류)

시험 전압은 교류 3상, 60 Hz, 440±10 V와 전류의 크기만을 가속인자로 선정하였고, 그림 2의 Class AC4를 사용하였다. 시험시료는 소용량 전자접촉기로 평가하였다.

### 2.5 스트레스 가속시험 결과와 회귀분석

시험전 시료의 점점무게에 대한 정규성 검정 결과 정규분포를 따르며, 각 각의 데이터에 대한 평균과 표준편차를 표 2에 나타내었다. 가속에 따른 열화인자로 점점무게(점점소모량)로 측정하였다. 적용 스트레스의 크기에 대한 변수인 점점소모량과 관련성을 규명하기 위해 단순 회귀분석(simple regression)을 적용하였다.

표 2. 각 수준의 점점소모량 평균 및 표준편차 (단위: g)

개폐 횟수	4Ie 점점무게	개폐 횟수	5Ie 점점무게	개폐 횟수	6Ie 점점무게
0	x-bar= 2.0506 s=0.01085	0	x-bar= 2.0554 s=0.00680	0	x-bar= 2.0580 s=0.00364
30,000	x-bar= 2.0289 s=0.01167	30,000	x-bar= 2.0156 s=0.01014	30,000	x-bar= 2.0106 s=0.0260
60,000	x-bar= 1.9958 s=0.01268	60,000	x-bar= 1.9913 s= 0.02611	60,000	censoring
120,000	x-bar= 1.9786 s=0.01626	120,000	censoring	120,000	censoring

단순회귀분석의 추정식은 식 1과 같이 예측변수(predictor variable), x(스트레스 수준) 1개와 반응변수(response variable), y(점점소모량) 1개가 직선으로 가정한다. 이때, x와 y간의 함수관계의 의미를 분석하기 위해 회귀 방정식을 분산분석을 통하여 F-검정을 실시한다.

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x, \quad \beta_1 = \frac{S_{(xy)}}{S_{(xx)}}, \quad \beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x} \quad (1)$$

### 2.6 시험결과 해석

#### 2.6.1 각 스트레스 수준의 회귀식

분산분석 결과를 표 3에 나타내었고, 각 스트레스 수준

이 검정통계량(P-value)가 0.05보다 작으므로 회귀직선이 매우 유의함을 알 수 있다. 스트레스 수준 간의 회귀직선에 대한 그래프와 회귀식은 그림 6과 같다.

표 3. 스트레스 수준별 단순 회귀분석을 위한 분산분석

4Ie 요인	자유도 DF	제곱합 SS	평균제곱합 MS	분산비 F-value	검정통계량 P-value
인자	1	0.0261489	0.0261489	117.167	0.000
잔차	34	0.0075880	0.0002232		
계	35	0.0337369			

5Ie 요인	자유도 DF	제곱합 SS	평균제곱합 MS	분산비 F-value	검정통계량 P-value
인자	1	0.0184961	0.0184961	65.9385	0.000
잔차	25	0.0070126	0.0002805		
계	26	0.0255087			

6Ie 요인	자유도 DF	제곱합 SS	평균제곱합 MS	분산비 F-value	검정통계량 P-value
인자	1	0.0101294	0.0101294	29.3169	0.000
잔차	16	0.0055282	0.0003455		
계	17	0.0156576			

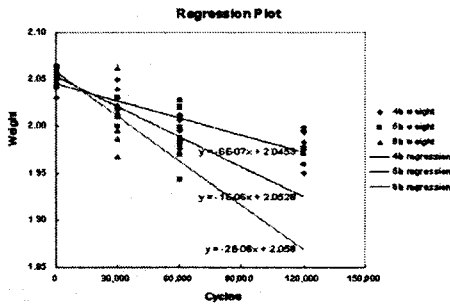


그림 6. 스트레스(4Ie, 5Ie, 6Ie)와 개폐횟수간의 회귀식

### 2.6.2 스트레스 수준과 접점소모량간의 회귀식

접점소모량과 관측시점의 접점무게의 차와 같으므로, 회귀식과 그래프는 측정데이터를 직접 사용한 접점무게를 사용하여 표현하였다. 스트레스 수준과 접점소모량간의 회귀방정식을 구하기 위해서 기준을 Censoring되지 않은 개폐횟수 30,000회 시점에서 측정된 자료를 바탕으로 회귀방정식의 분산분석과 회귀방정식은 표 4와 그림 7과 같이 구하였고, 분산분석 결과 표 4와 같이 검정통계량이 0.05보다 작으므로 회귀방정식은 유의하다. 전체 변동 중 회귀방정식에 의해 설명되는 변동이 17%로 나타났다. 즉, 총변동(스트레스 수준간, 접점소모량의 변동) 중에 회귀식으로 Fitting된 선까지의 변동의 비율로  $\hat{y}$ 값에 영향을 주는 유의하지 않은 인자 또는 잠재변수인 측정오차, 실험조건 등의 요인으로 결정계수( $R^2 = SS_{\text{regression}}/SS_{\text{total}}$ )값이 낮게 나타났으며, 이는 표 2에서 높은 전류 스트레스에서의 접점소모량의 산포가 증가한 것으로 해석된다. 또한 개폐횟수에 따라 접촉저항이 증가되고, 스트레스 수준 간에 주울에너지(Joule energy:  $\int i^2 \cdot dt$ )의 차이에 따라, 전류의 제공으로 주울열이 증가되어 접점재질의 활성화에너지가 소모량의 산포에 영향을 미친 것으로 해석된다.

표 4. 스트레스 수준과 접점소모량 간의 회귀분석을 위한 분산분석

요인	자유도 DF	제곱합 SS	평균제곱합 MS	분산비 F-value	검정통계량 P-value
인자	1	0.0015125	0.0015125	5.08403	0.033
잔차	79	0.0074375	0.0002975		
계	80	0.0089500			

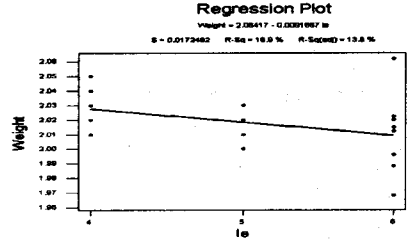


그림 7. 스트레스 수준과 접점소모량 간의 회귀식

### 3. 결 론

임의 관측중단(측정 목표수명: 고장으로 가정)과 스트레스 수준과의 관계에서,

1) 접점소모량을  $y=1.94$  g일 경우 관계식은,

$$4Ie: \hat{y} = 2.0453 - 6 \times 10^{-7} x \quad (3)$$

$$5Ie: \hat{y} = 2.0528 - 1 \times 10^{-6} x \quad (4)$$

$$6Ie: \hat{y} = 2.058 - 2 \times 10^{-6} x \quad (5)$$

여기에서  $\hat{y}$ 는 접점소모 추정량,  $x$ 는 개폐횟수이다.

$$\text{따라서, } 4Ie \text{ 개폐횟수} \leq \frac{2.0453 - \hat{y}}{6 \times 10^{-7}} \approx 175,000$$

$$5Ie \text{ 개폐횟수} \leq \frac{2.0528 - \hat{y}}{10^{-6}} \approx 113,000$$

$$6Ie \text{ 개폐횟수} \leq \frac{2.058 - \hat{y}}{2 \times 10^{-6}} \approx 59,000 \text{ 과 같이}$$

개폐횟수를 예측할 수 있다.

2) 접점소모량과 스트레스 수준과의 관계는 회귀방정식  $\hat{y} = 2.06417 - 9.1667 \times 10^{-3} Ie$  (6)

여기서,  $\hat{y}$  접점소모 추정량,  $Ie$  스트레스 수준으로, 정격사용전류로 30,000회 개폐 시험한 경우 접점의 무게는 약 2.055 g로 추정할 수 있다.

본 논문에서는 접점 소모량을 가속수명의 열화인자로 선정하고, 임의 관측중단(측정 목표수명)에 의해 정격전류의 4배~6배로 전류 스트레스를 각각 인가하여, 일정 개폐횟수에서 측정된 접점소모량과 측정시점의 개폐횟수와의 회귀식 및 시험전류간의 회귀식이 성립됨을 알 수 있었다. 시험결과를 바탕으로 시험시료의 접점무게를 측정용 함으로써 개폐횟수 및 고장까지의 횟수를 추정할 수 있게 되었다. 향후 논문에서는 스트레스 수준을 6Ie~8Ie 이상으로 선정하여 절연파괴까지의 개폐횟수를 통한 시료의 고장까지 개폐횟수를 측정하여 가장 적합한 수명분포를 찾아 가속계수를 산출함으로써 수명예측 방법에 대하여 분석할 예정이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] KS C4504, "교류전자개폐기", 표준협회, 2000
- [2] IEC, "IEC 60947-4-1", Low-voltage switchgear and controlgear Part4 contactor and motor starters, 2001
- [3] 서순근, "MINITAB 신뢰성분석", (주)이레테크, 2002
- [4] 이레테크 미니텔사업부, 새한미디어(주) 공저, "MINITAB 실무완성", (주)이레테크, 2001
- [5] 이상용, "신뢰성 공학", 형설출판사, 1995
- [6] MINTAB Inc, "MINITAB User's Guide 2: Data Analysis and Quality Tools", MINTAB Inc, 2000
- [7] 長大野, "전자구동력의 크기를 변화시킨 경우의 주행 아크 에 의한 전극 소모량", EP-77-32, p1654, 일본 전기학회, 1977
- [8] 眞野國夫, "접촉부품의 신뢰성", 총합전자출판사, pp1977
- [9] Ragnar Holm, "Electric Contacts Theory and Application", Springer-Verlag, 1967
- [10] Keiichi Suhara, "Analysis of Metallic Phase Arc Duration at a Break Contact with the Use of Weibull Distribution Method", IEEE Inc., 1997