

가속수명시험을 이용한 릴레이의 전기적 수명에측

김재중[†] · 장석원* · 손영갑**

(2008년 1월 28일 접수, 2008년 4월 14일 심사완료)

Electrical Lifetime Estimation of a Relay by Accelerated Life Test

Jae Jung Kim, Seog Weon Chang and Young Kap Son

Key Words: Relay(릴레이), Accelerated Life Test(가속수명시험), Inrush Current(돌입전류), Lamp(램프), Contact Welding(용착), Material Transfer(전이), Erosion(소모), Short(단락)

Abstract

This paper proposes a way to predict electrical lifetime of a relay using Accelerated Life Testings (ALTs). The relay of interest mounting on printed circuit boards is usually under an inrush current stress. The inrush current is generated and accelerated through controlling a lamp switching device in the ALT. We find that the dominant failure mechanism under high levels of inrush current would be contact welding in the contact surface of the relay and the contact welding process is accelerated according to increase in inrush current. The electrical lifetime model based on Inverse Power Law in term of inrush current is proposed, and parameters characterizing relay's lifetime distribution are statistically estimated using ALTA 6 PRO software.

기호설명

η : 척도모수(Scale Parameter)

β : 형상모수(Shape Parameter)

1. 서론

최근에 정보화 사회로의 지속적인 발전과 취약한 국내 산업 기반의 혁신을 위해 반드시 넘어야 할 관문인 부품과 제품의 원천기술 확보를 위한 신뢰성 기술이 절실히 요구되고 있다.⁽¹⁾ 그러므로 신뢰성 엔지니어는 제품이 언제, 왜 고장 나는지 또는 신뢰성을 어떻게 개선 할 것인지에 대한 해결책을 찾으려고 노력하고 있다. 이러한 목표를 효율적으로 달성하기 위해서는 재료 및 공정 분

석을 위한 기술적 평가, 잠재 고장 부위와 고장 메커니즘 규명, 가속수명시험, 전산해석(유한요소 해석 등), 그리고 고장분석(Failure analysis) 등의 활동이 종합적이고 유기적으로 수행 되어져야 한다.⁽²⁾

릴레이는 전자석의 원리를 이용하여 접점을 개폐하는 스위칭역할을 하는 부품으로서, 전기적으로 독립된 회로를 만들 수 있기 때문에 비교적 적은 입력으로 큰 전기적 회로를 동작시킬 수 있다. 즉, 5V의 저전압으로 250VAC/30VDC의 대전압 또는 대전류 회로를 ON/OFF 시킬 수 있다. 그러나 릴레이는 기계적으로 동작하기 때문에 특수한 경우를 제외하고 고속 동작은 어렵다.

릴레이는 자동제어부품으로 자동차 및 가전산업에서 광범위하게 사용되고 왔으며, 릴레이의 고장에 관한 여러 가지 연구들이 수행되어져 왔다. Laurent⁽³⁾은 스위치가 On이 될 때 릴레이의 접점에서 수십 μ s 시간동안에 수십 μ m 높이의 바운스(bounce)가 발생하고, 바운스 과정에서의 큰 돌입전류(램프 부하) 및 아크에 의한 물질 이동, 용

[†] 책임저자, 회원, 한양대학교 신뢰성분석연구센터

E-mail : kimjaejung@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2282-1685 FAX : (02)2220-0218

* 회원, 한양대학교 신뢰성분석연구센터

** 회원, 안동대학교 기계공학부

작을 연구하였다. Schoepf and Franz⁽⁴⁾는 여러 종류의 접점에 대하여 25℃와 85℃에서 On/Off 실험결과, 85℃에서 이른 시간에 용착이 발생하며, 이는 은금속산화물(silver metal oxide) 접점에서 온도에 의한 silver 와 metal oxide 성분의 분리는 용착을 더욱 빨리 발생하도록 한다는 것을 보였다. 권영일 등⁽¹⁾은 릴레이의 고장은 코일에서 발생하는 열에 의한 단선으로, 사용조건보다 높은 전압을 이용하여 코일의 급격한 온도상승으로 코일이 녹아버리는 고장형태를 보였다. 차훈용⁽⁵⁾등은 전류 및 온도를 가속인자로 선정하여 가속시험시 코일에 흐르는 전류에 의해 발생된 고온이 코일 단선고장의 원인인 것을 보였다.

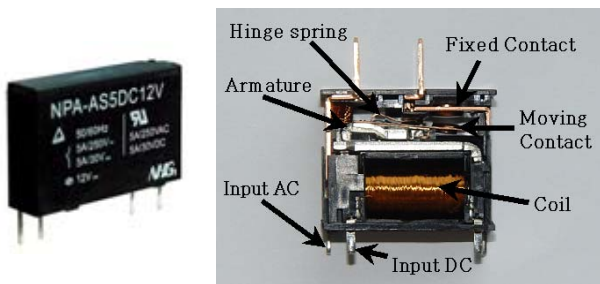
지금까지의 연구들은 릴레이의 용착고장 또는 코일단선고장 등의 고장원인 분석에 관한 것이 대부분으로 릴레이의 수명에 관한 정보를 제공하기에는 부족하였다.

따라서 본 연구에서는 가전제품의 PCB에 주로 사용되는 릴레이를 대상으로 가속수명시험을 실시하여 릴레이의 고장모드 및 고장메커니즘을 규명하고, 가속수명시험에서 측정된 고장 데이터를 이용하여 릴레이의 수명-스트레스 관계식, 가속계수 및 B₁₀ 수명을 추정하여 실제 부하에 맞는 릴레이 선정에 도움을 주고자 한다.

2. 릴레이의 고장분석

2.1 릴레이의 구조 및 특성

전자 회로 내부 또는 외부에 연결되어 있는 압축기나 모터 등의 전자기기를 구동 할 경우, 가장 많이 사용되는 인터페이스는 릴레이이며, 가전제품에 주로 사용되는 릴레이는 파워용 전자릴레이이다. 파워용 릴레이에는 플런저 릴레이 방식의 수십 암페어를 개폐하는 대형릴레이도 있지



(a) Figure (b) Structure
Fig. 1 Typical power relay

만, 본 연구에서는 PCB(프린터기판)에 실장할 수 있는 약 25A 이하의 릴레이를 대상으로 선정하였으며, 이를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 릴레이는 DC 전압에 의해 작동되는 코일 단을 가지고 있으며, 일정한 값(동작 전압)이상의 전압이 공급되면 코일은 아마추어(접점을 열거나 개폐시키는 부분)를 움직이게 한다. 코일에 전압이 인가되었을 때 자기장이 형성되고, 이 마그네틱 힘으로 스위치가 동작한다.

2.2 고장모드 및 고장메커니즘

일반 가전제품의 PCB에 사용되는 릴레이를 조사하여 사용 중에 고장이 발생한 시료를 수거하여 고장분석을 실시한 결과, 릴레이의 고장은 크게 접점부와 코일에서 발생하였다. 접점부에서 발생하는 주요 고장은 접촉불량 및 Fig. 2에서 살펴 볼 수 있듯이 접점에 물질의 전이(Material transfer)와 소모(Erosion)가 발생한 접점의 용착(Contact welding)이며, 코일에서 발생하는 고장은 코일의 단락에 의한 단선(Open)이다. 릴레이 고장의 대부분은 접점부의 고장이었으며, 코일고장은 우발적으로 발생하며, 극소수에 불과하였다.

고장분석을 토대로 릴레이의 주요 고장모드와 고장메커니즘에 관한 FTA(Fault Tree Analysis)를

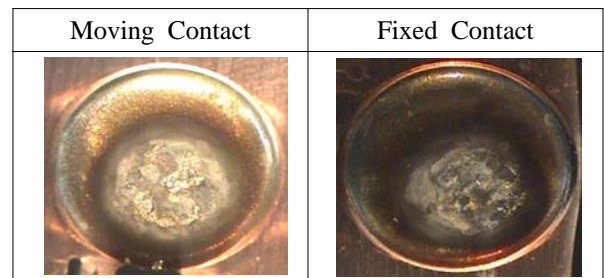


Fig. 2 Contact surfaces of failed relay

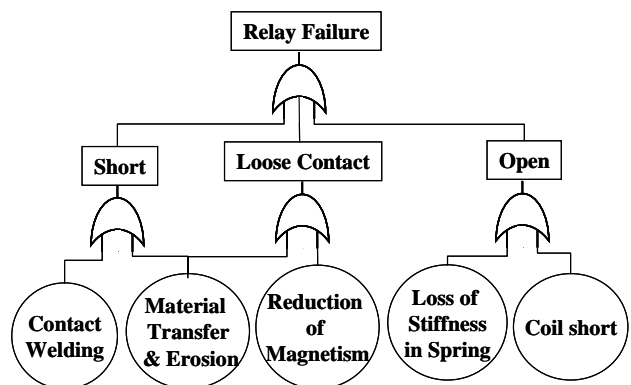


Fig. 3 FTA with relay

실시하여 Fig. 3에 나타냈다. 그림에서 나타났듯이 릴레이의 주요 고장모드는 접점의 소모, 전이 및 용착에 의한 Short와, Coil short 및 스프링의 탄성손실에 의한 Open이다.

3. 릴레이의 가속수명시험

3.1 2단계 품질기능전개

릴레이의 가속수명시험에 적합한 시험방법을 결정하기 위하여 2단계 품질기능전개(2-Stage Quality Function Deployment, QFD)를 수행하여 Fig. 4에 나타내었다. 그림의 (a)에서는 요구환경 및 조건과 고장메커니즘의 관계를 분석하였고, (b)에서는 고장모드 및 메커니즘과 시험방법과의 관계에 대하여 분석하였다. 그리고 각 항목에 대한 점수를 계산하여 효과적인 가속수명시험 방법을 결정하였다. QFD 분석결과에 따라 Electrical Test에 의한 가속수명시험이 릴레이의 수명시험에 가장 적합하다고 판단하였다.

3.2 시료의 Specification 및 고장판단기준

가속수명시험에 사용 할 시료의 동작 및 접점에서의 물성데이터 및 고장판단기준을 Table 1에 나타내었다. 표에서 보듯이 연구대상 릴레이는 동작전류, 최대 돌입전류 및 전기적 동작수명이 각각 25A, 70A 및 100,000회 이며, 고장판단기준은 릴레이가 올바른 스위치 동작을 할 수 없는 Short, Loose Contact 및 Open이 발생했을 경우로 결정하였다.

3.3 돌입전류에 의한 가속시험

2-Stage QFD의 결과에 따라 릴레이에 가장 적합한 스트레스를 인가하기 위하여 시험에 이용할 가속인자를 Electrical Test의 돌입전류(inrush current)로 결정하고 시험회로를 구성하여 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보듯이 Power supply는 릴레이의 동작전압인 12VDC로, Timer & Counter는 2초의 On, 180초의 Off동작을 하고 On/Off, 1 cycle마다 카운트 할 수 있도록 구성되어 있다. 본 연구에서는 가속인자인 돌입전류를 만들기 위해 램프부하를 사용하여 실온에서 실험을 수행하였다. 램프부하의 특징은 램프의 필라멘트가 차가운 온도에서는 저항이 낮고 정상상태의 전류에 10배~20배에 이르는 돌입전류를 만든다고 이미

Table 1 Relay specification and criteria

| Item | Spec. | Criteria |
|-----------------------------------|---------------------|------------------------------------|
| Contact Material | Ag-SnO ₂ | Malfunction of Relay (Short, Loose |
| Operation Voltage | 12VDC | |
| Operation Temperature | -44~55°C | |
| Max. Switching Voltage | 300VAC | Contact, Open) |
| Max. Switching Current | 25A | |
| Max. rushing current | 70A | |
| Min. Life Expectancy (Electrical) | 100,000 | |

| | | Mechanisms | | |
|-------------------------|--|---|------------|-----------------------------|
| | | Contact Welding Material Transfer & Erosion | Coil Short | Loss of Stiffness in Spring |
| Requirements / Stresses | Moderate Pickup/Release Voltage & Contact Resistance | ● | | |
| | Operating life : 100,000 times | ● | △ | ○ |
| | Temp : -10°C to 55°C | △ | ○ | |
| | Humidity : 40 to 85% RH | | | |
| | Score | 11 | 4 | 3 |

(a) Matrix 1 - Modes / Mechanism

| | | Test Methods | | |
|--------------|---|-----------------|-----------------|--------------------------------|
| | | Mechanical Test | Electrical Test | Bias with Hot temp. & Humidity |
| Mechanism | Contact Welding Material Transfer & Erosion | 11 | ● | |
| | Coil Short | 4 | △ | △ |
| | Loss of Stiffness in Spring | 3 | ● | |
| Score | | 16 | 59 | 20 |

(b) Matrix 2 - Test Method

Fig. 4 2-Stage QFD result

알려져 있다.⁽⁶⁾

또한, 2초의 On 시간을 설정한 이유는 돌입전류가 발생하는 수백 μs에 비교하면 충분히 긴 시간이기 때문이며, 180초의 Off 시간을 설정한 이

유는 2초간의 On 후, 램프의 필라멘트를 냉각용 Fan을 사용하여 초기상태로 충분히 냉각시키는 위함이다.⁽⁶⁾

가속수명시험을 실시하기 전에 Oscilloscope를 사용하여 램프에 의해 발생하는 돌입전류의 세기를 측정하였으며, 이를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 보듯이 1개의 램프는 8.32A의 돌입전류를 발생시키는 것을 알 수 있다. 이를 토대로 램프의 수에 따른 돌입전류의 세기를 추정하였다.

본 가속수명시험 방법의 적정성을 확인하기 위해 예비 가속시험을 실시하였다. 예비 시험에서 고장이 발생한 시료에 대하여 CT(Computerized Tomography)촬영을 통한 비파괴 검사를 하였다. 관측된 고장메커니즘은 접점의 용착인 것을 확인할 수 있었다.

부가적으로 두 개의 릴레이를 사용하여 동일한 On/Off 실험을 반복한 후, 고장 즉, 용착이 발생하기 전 접점의 변화를 광학현미경으로 관측한 사진을 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 1번 릴레이는 1,800회, 2번 릴레이는 15,000회까지 166.4A의 돌입전류 하에서 실험을 실시하였다. 두 개의

릴레이를 비교해보면 접점이 닿는 부분을 중심으로 전이와 소모가 점점 전체로 퍼져 가는 것을 알 수 있다. 이 과정을 통해 마지막으로 용착이 발생하고 릴레이의 고장으로 이어짐을 예상 할 수 있다.

이를 토대로 릴레이의 수명을 추정하기 위해 Table 2와 같은 돌입전류를 스트레스 인자로, 3수준의 시험조건으로 가속수명시험을 실시하였다. 표에서 각 수준별 시료수는 10개씩이며, 램프 25개일 경우는 돌입전류가 208A이며, 35개일 경우는 돌입전류가 291A이다.

가속수명시험에서 관측된 고장시간을 시험조건별로 Table 3에 나타냈으며, 고장이 발생한 릴레이에 대하여 CT촬영을 통한 비파괴 검사를 실시하였다. 비파괴 검사결과, 관측된 고장메커니즘은 예비 실험과 동일하게 접점의 용착인 것으로 확인되었으며, 광학현미경으로 분석한 고장시료의 접점사진을 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 보듯이 접점에서 전이와 소모가 발생한 것을 알 수 있었다. 또한, 돌입전류의 세기가 강할수록 용착이 빨리 발생하는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 본 연구에서 수행한 가속시험이 릴레이의 단선

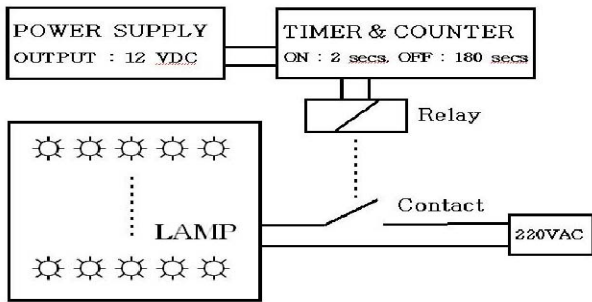


Fig. 5 Experimental circuit for ALT

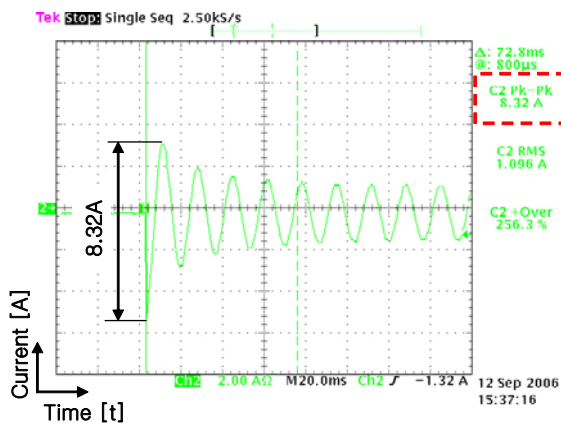


Fig. 6 Measurement of inrush current

Table 2 Test matrix

| Exp. | No. of Lamp [EA] | Inrush current [A] | No. of Sample [EA] |
|------|------------------|--------------------|--------------------|
| 1 | 25 EA | 208 A | 10 EA |
| 2 | 30 EA | 249.6 A | 10 EA |
| 3 | 35 EA | 291.2 A | 10 EA |

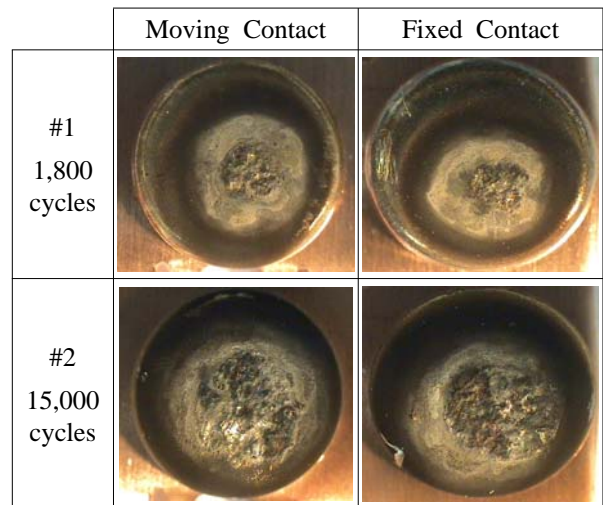


Fig. 7 The degradation of contact surfaces according to no. of cycles

Table 3 Failure times by ALT [unit : cycles]

| Inrush Current | | | | | |
|----------------|-----|--------|-----|--------|----|
| 208A | | 249.6A | | 291.2A | |
| #1 | 110 | #11 | 30 | #21 | 11 |
| #2 | 148 | #12 | 54 | #22 | 22 |
| #3 | 264 | #13 | 81 | #23 | 32 |
| #4 | 267 | #14 | 88 | #24 | 37 |
| #5 | 312 | #15 | 92 | #25 | 39 |
| #6 | 332 | #16 | 98 | #26 | 43 |
| #7 | 356 | #17 | 111 | #27 | 49 |
| #8 | 381 | #18 | 139 | #28 | 68 |
| #9 | 431 | #19 | 152 | #29 | 74 |
| #10 | 737 | #20 | 176 | #30 | 84 |

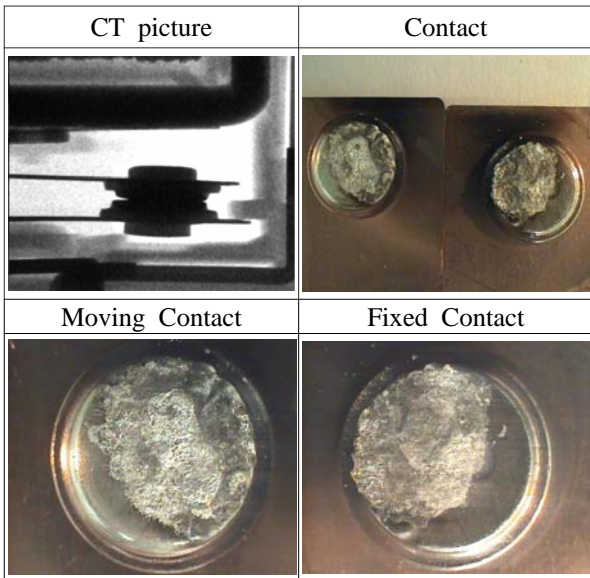


Fig. 8 Observation of contact surfaces by CT & Microscope

고장을 재현하는 적합한 시험임을 확인 할 수 있었다.

3.4 가속수명시험 결과 분석

3.4.1 수명분포의 적합성 검토 및 가속성 검정

가속수명시험을 통하여 얻은 결과에 적합한 수명분포를 가정하기 위하여 와이블, 지수, 대수정규분포의 우도함수(Likelihood Function)값을 비교하여 Table 4에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 우도함수 값이 가장 큰 와이블 분포가 가장 적합하다는 것을 알 수 있다. 가속수명시험결과를 와이블 확률용지에 타점하여 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 돌입전류의 세기 별로 데이터들이 직선에 가깝게 타점되어 있고, 각각의 수명분포 추정선이 서로 평행하게 나타난다는 것을 알 수 있다. 이로부터 와이블 분포가 릴레이

Table 4 Conformance test result for life distribution

| Life Distribution | Weibull | Exponential | Lognormal |
|---------------------|----------|-------------|-----------|
| Likelihood Function | -161.202 | -172.668 | -162.400 |

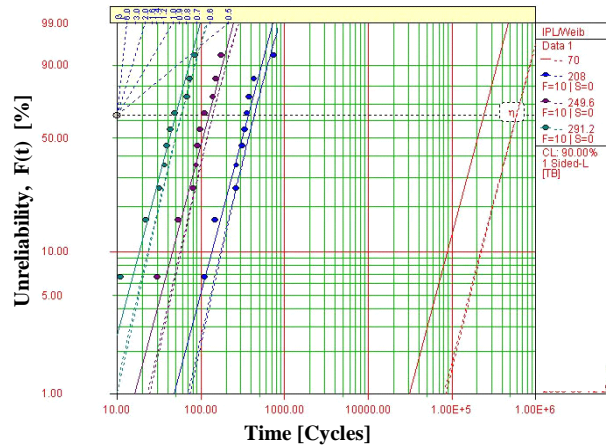


Fig. 9 Weibull probability paper plot

의 수명분포에 적합하고 돌입전류 세기에 따라 가속성이 성립한다는 것을 알 수 있다.⁽⁷⁾

3.4.2 가속수명시험 모델

릴레이의 수명추정에 적합한 모델은 스트레스가 1개일 때 적용되는 모델인 역승모델(Inverse Power Law)⁽⁸⁾이 적합하며, 본 연구에서는 아래의 식 (1)과 같이 척도모수(η), 돌입전류(I) 사이의 관계식을 역승모델에 적용하였다.

$$\eta(I) = \frac{1}{K \cdot I^n} \tag{1}$$

여기서, K 와 n 는 재료 및 시험방법 등에 따라 결정되는 상수이다.

3.4.3 와이블 형상모수와 수명-스트레스 관계

와이블 분포와 식 (1)의 수명-스트레스 관계식을 가정하고, ALTA 6 PRO⁽⁹⁾ 프로그램을 이용하여 가속수명시험 데이터를 분석한 결과 형상모수 (β) 및 각각 상수의 추정치는 아래와 같다.

$$\beta = 2.263, K = 4.5590E-17, n = 5.9430$$

따라서, 릴레이의 돌입전류에 의한 수명-스트레

스 관계식은 아래의 식 (2)와 같고, 가속계수에 대한 식은 (3)과 같다.

$$\eta(I) = \frac{1}{4.5590 \times 10^{-17} \cdot I^{5.9430}} \quad (2)$$

$$AF(I) = (I_a/I_d)^{5.9430} \quad (3)$$

식 (2)를 통하여 돌입전류(I)에 대하여 릴레이의 와이블 수명을 추정할 수 있고, 식 (3)에서는 정상조건 돌입전류 70A(I_d)에 대한 가속조건 돌입전류(I_a)의 가속계수를 구할 수 있다.

아울러 전자부품의 신뢰성을 평가할 수 있는 신뢰성 척도인 B₁₀ 수명은 식 (2)를 이용하여 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$B_{10} = \eta \cdot (-\ln(1 - 0.1))^{1/2.263} \quad (4)$$

3.5 시험결과의 해석

돌입전류에 대한 수명-스트레스 관계를 Fig. 10에서 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 돌입전류의 세기가 커짐에 따라 점점의 응착 발생시간 즉, 수명의 감소가 더욱 가속화 된다는 것이다. 고장시료들은 각 수준의 분포 안에서 타점됨을 알 수 있다.

돌입전류의 가속계수에 대한 영향을 Fig. 11에서 나타내었다. 그림에서 점선은 신뢰수준 90%에서의 추정치이며, 돌입전류의 세기가 커짐에 따라 가속계수의 크기가 지수적으로 증가함을 알 수 있다.

가속계수는 돌입전류 200A까지는 완만히 증가하다가 200A 이상에서는 급격하게 증가함을 알 수 있다.

릴레이의 B₁₀ 수명을 Fig. 12에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 돌입전류의 세기에 따른 B₁₀ 수명은 지수함수적으로 감소하며, 돌입전류 80A까지는 B₁₀ 수명이 급격히 감소하다가 80A 이상의 돌입전류에서는 B₁₀ 수명 감소폭이 완화된 것을 알 수 있다. 가속시험에서 스트레스 수준인 208A, 249.6A, 291.2A의 돌입전류에서 각각의 B₁₀ 수명은 107회, 36회, 14회로 추정할 수 있다. 그리고 본 연구대상 릴레이 Spec.에서 제시된 최대 돌입전류, 70A에서 추정되는 B₁₀ 수명은 69,230회로서 릴레이의 최소 전기적 수명목표치인 10만회를 만족하지 못하였다. 또한, 10만회의 B₁₀ 수명을 보장하기 위해서는 66A이하의 돌입전류에서 사용하여야 한다.

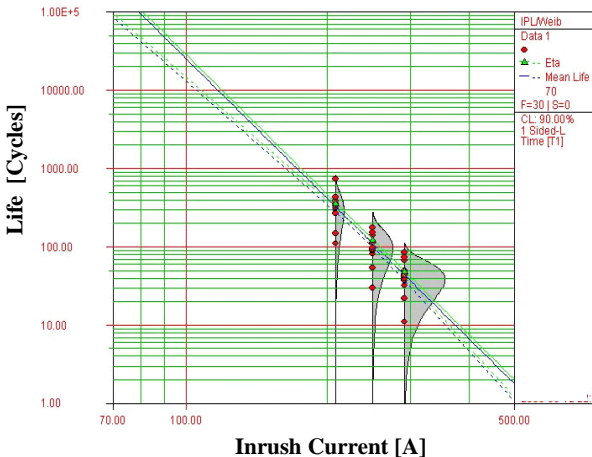


Fig. 10 Life vs. Stress(Inrush Current)

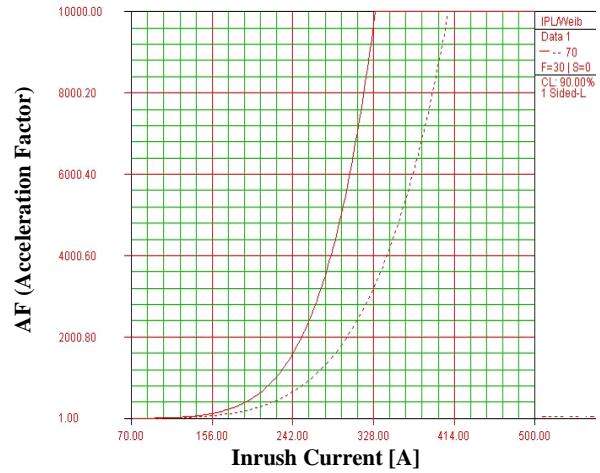


Fig. 11 AF vs. Stress(Inrush Current)

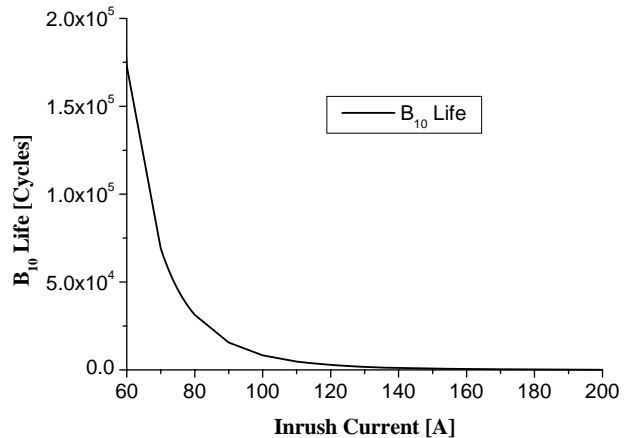


Fig. 12 B₁₀ Life vs. Stress(Inrush Current)

4. 결 론

본 연구에서는 접점부를 가지는 스위치류에서 주로 발생하는 용착 고장에 대하여 고찰하였으며, 특히 가전제품의 전자기판에 사용되는 릴레이를 대상으로 가속수명시험을 실시하였다.

용착 메카니즘은 접점에서 고전류로 인하여 물질의 전이, 소모 등으로 인해 양쪽 접점이 접촉되는 현상이며, 본 연구에서는 용착 고장메커니즘을 재현하기 위해 가속시험에서 램프장치를 이용하였다. 가속시험에서 고장이 발생한 시료를 수거하여 CT분석결과, 접점에서 용착 고장이 발생했음을 확인 할 수 있었다.

회로설계자들이 릴레이 선정시, 적용될 기기의 실제부하에서 돌입전류를 측정 후 본 연구에서 제안된 B_{10} 수명식을 활용하여 수명 예측을 할 수 있다. 또한, 본 연구에서 제시된 가속수명시험 절차는 릴레이 이외에도 여러 전자부품의 신뢰도를 평가하는데 이용될 수 있다.

참고문헌

- (1) Kwon, Y. I. and Han, I. S., 2005, "Mechanical Life Prediction of a Relay By Accelerated Life Tests," *Journal of Industrial science researches*, Vol. 22, No. 1, pp. 75~78.
- (2) Lee, J. K., Kim, J. W., Shin, J. C. and Kim, M. S., 2004, "An Accelerated Life Test for Burnout of Tungsten Filament of Incandescent Lamp," *The Korean Reliability Society*, pp. 129, 134~137.
- (3) Laurent, M., Nouredine, B. J. and Didier, J., 2000, "Make Arc Erosion and Welding in the Automotive Area," *IEEE Trans. on Components and Packaging Technologies*, Vol. 23, No. 1, pp. 240~246.
- (4) Schoepf, Thomas. J. and Franz, H., 2005, "Effects of Different Loads on the Surface of Silver Metal Oxide Contacts for General-purpose Relays," *IEEE Trans. on Components and Packaging Technologies*, Vol. 28, No. 4, pp. 728~732.
- (5) Cha, H. Y., Park, Y. S., Kim, J. J., Son, Y. G., Chang, S. W. and Kwack, K. D., 2007, "Mechanical Lifetime Estimation of A Relay using Accelerated Life Testing," *Fall Annual Proceedings of the KSME*, pp. 27~34.
- (6) Leung, C. H. and Anthony, L., 1991, "Contact Erosion in Automotive DC Relays," *IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, Vol. 28, No. 4, pp. 101~106.
- (7) ReliaSoft Corporation-Tucson, 2002, "Modeling and Analysis of Time-Dependent Stress Accelerated Life Data," *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 343~348.
- (8) Nelson, W., 1990, "Accelerated Testing - Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses," Wiley, New York.
- (9) Korea Reliability Technology Service, Inc., <http://www.korts.co.kr>.