

소형 계전기에 대한 가속수명시험 설계 및 분석

권영일*, 유영철**

*청주대학교 산업정보시스템공학과

**한국기계연구원 신뢰성평가센터

Design and Analysis of Accelerated Life Tests (ALT) for Small Power Relays

Kwon, Young Il*, Yoo, Young Chul**

*Department of Industrial & Information Systems Engineering, Chongju University

**Reliability Analysis Center, Korea Institute of Machinery & Materials

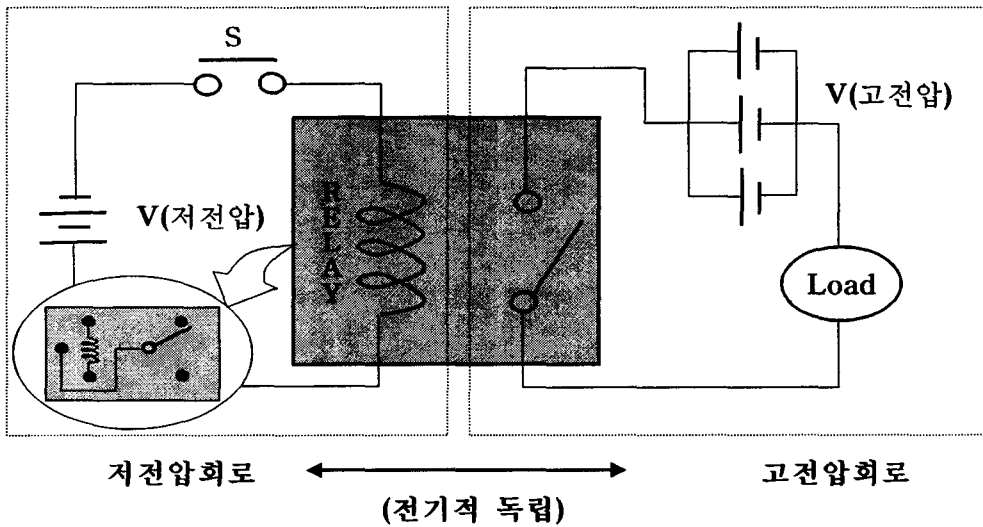
Abstract

Accelerated life test models and procedures are developed to assess the reliability of typical power relays. The main function of relays is to control high voltage circuits by operating low voltage circuits. The accelerated life test method and test equipments are developed using the relationship between stresses and life characteristics of the products. Using the developed accelerated life test method, the parameters of the ALT model and lifetime distribution are estimated and the reliability of the relays at use condition is assessed. The proposed accelerated life test method and procedure may be extended and applied to testing similar kinds of products to reduce test time and costs of the tests remarkably.

1. 서론

1.1 계전기의 구조와 기능

계전기(Relay)란 코일에 전류를 흘리면 자석이 되는 성질을 이용하여 철판에 붙어 있는 스위치 부의 접점을 닫거나 여는 전기적 스위치로서 자동차, 가전제품을 비롯한 각종 산업용 장치에 광범위하게 사용되는 부품이다. 계전기의 장점은 <그림 1>과 같이 전기적으로 독립된 회로를 연동시킬 수 있다는 점이다. 예를 들면 5V의 저전압계로 구성된 회로의 동작에 의해 AC 120/220V 또는 DC 30V의 대전압 또는 대전류 회로를 제어할 수 있다. 또한 이러한 계전기를 이용한 회로의 독립적 구성은 감전과 같은 위험요소를 분리시켜 안전사고를 예방할 수 있는 안전장치로서의 역할도 한다.



<그림 1> 계전기의 적용회로 및 구조

본 실험에 사용한 계전기는 코일의 구동전압이 DC 5V, 접점 용량(rated load)이 10A AC 120V, 10A DC 30V인 소형 계전기로, 접점은 1개가 있으며 은합금(silver alloy)으로 구성되어 있다.

1.2 고장정의 및 스트레스수준 결정

가속수명시험을 설계하기 이전에 FMEA에 의한 고장 해석, 업체의 규격서와 기술자료[4, 8], 시험서, 예비실험 등을 통해 주요 고장모드와 이와 관련된 시험항목, 주요 성능 및 특성치를 <표 1>과 같이 정리하였다. <표 1>에 정리된 5가지 시험 항목 중 높은 신뢰도가 요

구되는 가장 중요한 품질특성이 전기적 수명으로 파악되어 이를 시험항목으로 결정하였다.

계전기의 전기적 특성은 전압, 전류 등에 의하여 결정되며, 이중 고장을 유발하는 인자는 전압에 의한 영향보다는 전류에 의한 고장이 많이 발생하는 것으로 밝혀졌다. 자동차의 경우 전압은 배터리로부터 12V의 안정된 전압만 공급되는 반면 전류는 라이트, 와이퍼 모터, 파워 윈도우 등의 유도부하(inductive load)에 따라 전류의 세기 다르고, 초기 작동 시 순간적으로 발생하는 돌입전류(inrush current)에 의하여 전류의 세기가 순간적으로 수십 배씩 증가하는 경우도 발생한다.

계전기의 전기적 수명에 영향을 주는 주요 고장모드는 크게 두 가지가 있다. 스파크(spark)에 의한 그림의 발생으로 점점에 이물질이 생겨 전기의 흐름을 차단하는 고장과 과도한 전류로 인해 점점이 녹아 붙는 용착고장이 있다. 그밖에 점점의 전이현상, 이상마모 등이 있으나 예비시험 분석 및 관련 문헌조사 결과 돌입전류에 의해 점점이 녹아 붙는 용착고장이 가장 많이 발생하는 것으로 판명되었다. 따라서 전류를 스트레스로 결정하였으며 가속시험에서의 스트레스의 수준은 사용조건(5A)은 초과하되 설계한계(30A)는 초과하지 않아야 하므로, 계전기의 설계용량, 시험시간, 비용 및 시험설비의 능력을 고려하여 스트레스수준은 12.6A, 16.8A, 21.0A의 3수준으로 선택하였다. 또한 스트레스 부과방식은 세 수준의 스트레스를 시험 종료 시까지 일정하게 유지하는 방법을 선택하였다.

<표 1> 시험항목 및 목표 신뢰도

No.	시험 항목	목 표 치	시험 방법	시행
1	전기적 수명	최소 11만회 이상	전기적 부하를 인가하여 개폐	○
2	기계적 수명	1000만회 이상	작동 전압만을 인가하여 개폐	×
3	사용 온도	-40℃ ~ +70℃	오븐을 이용하여 측정	×
4	절연 저항	100 MΩ Min.	개폐 후 절연저항 측정	×
5	접촉 저항	100 mΩ Max	DC 6V 1A의 부하에서 측정	×

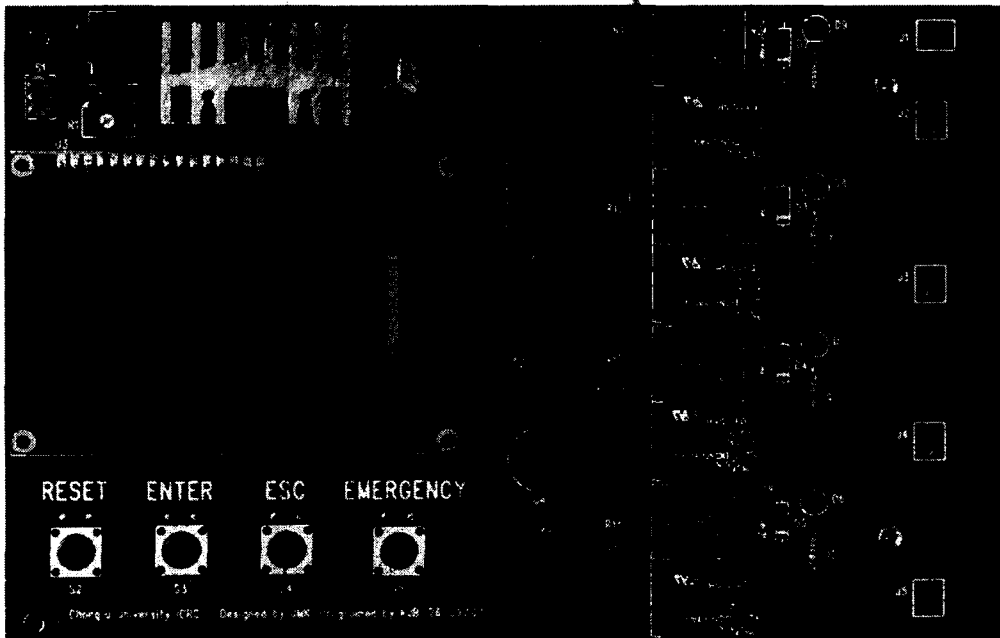
2. 계전기(relay)의 가속수명시험 설계

2.1 시험장비의 개발 및 구성

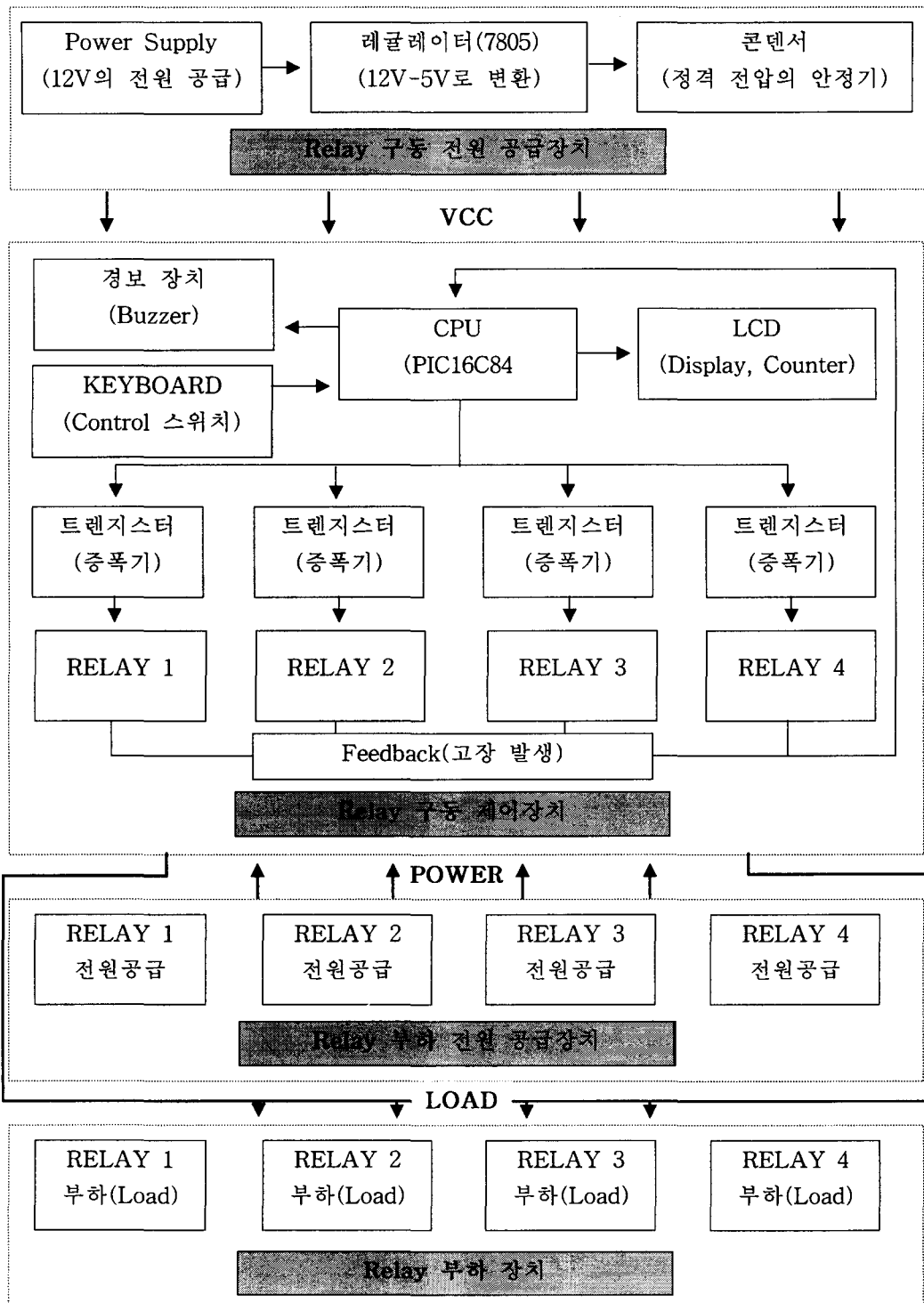
시험장비는 전자공학 분야의 전문가의 조언을 받아 계전기의 구동을 담당하는 프로그램 및 장치를 직접 설계, 제작하였다. 계전기의 시험장비는 구동을 담당하는 저전압 회로(low voltage circuit)와 계전기의 부하를 담당하는 고전압 회로(high voltage circuit)로 <그림 2>의 블록 다이어그램과 같이 크게 두 부분으로 나누었으며, 두 부분은 전기적으로 서로 독립

적으로 작동하게 구성하였다.

계전기의 구동을 담당하는 저전압 회로는 전원공급장치(power supply)를 이용하여 12V의 전압을 공급하였으며, 기판 내부에 흐르는 전원은 레귤레이터, 콘덴서를 통해 12V의 전압을 5V의 정격전압으로 낮추어 시스템에 안정적으로 공급하도록 구성하였다. 계전기 수명(고장)을 기록할 제어시스템은 <그림 3>과 같이 PCB기판을 이용하여 4개의 계전기를 동시에 시험할 수 있는 4개의 소켓과 고장 횟수 및 고장 발생 정보를 표시할 수 있는 디스플레이 장치, 고장의 발생 및 회로의 이상을 알려주는 경보장치(buzzer), 회로의 작동을 제어할 수 있는 제어 스위치, 계전기의 작동전압 5V를 인가하여 3초/Cycle로 구동시키고 고장상태를 피드백(feedback) 하는 프로그램을 포함한 마이크로프로세스(CPU)로 구성하였다. 또한 안전과 회로를 보호하기 위해 모든 기능을 일시에 정지시킬 수 있는 비상버튼을 가지고 있다.



<그림 3> 가속수명시험 장비 PCB 기판



<그림 2> 가속수명시험 장비의 block diagram

그리고 디스플레이를 통해 현재까지 측정된 고장 횟수를 표시하고 4개의 계전기 중 몇 번째에서 고장이 발생했는가를 나타내는 고장 정보 메시지를 보여준다. 또한 고장 횟수를 중앙처리장치에 임시 저장하여 고장이 발생한 계전기를 새로운 계전기로 교체한 후 다시 시험으로 복귀할 경우 고장이 발생하지 않은 나머지 계전기의 관측된 작동횟수를 다시 이용하는 자동화된 구조로 되어 있다.

고전압 회로의 부하는 계전기의 적용 분야의 한 부분인 자동차의 조명 시스템을 바탕으로 모의 실험하는 방법을 택하였다. 자동차의 안개등(12V 70W N사)에 사용되는 할로겐 램프를 부하로 사용하였다. 정확한 계측기를 사용하여 사용전압 12V에서의 전류 소모량을 측정해 본 결과 4.2A로 나타났으며, 이를 병렬로 구성하여 12.6A, 16.8A, 21.0A의 전류를 발생 시키도록 구성하였다.

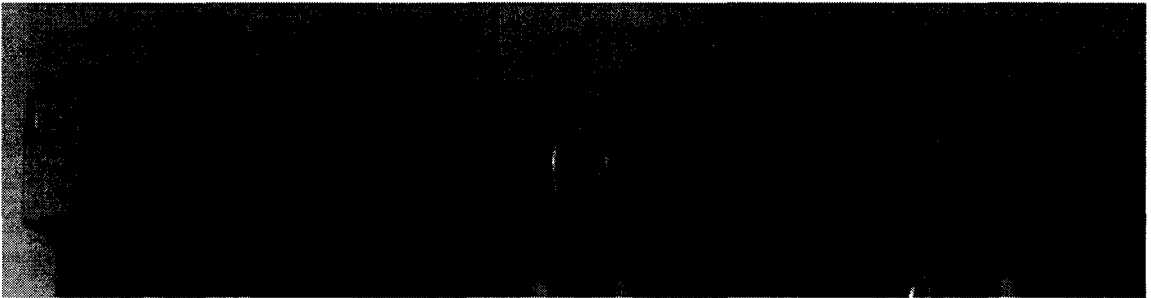
또한 암페어미터를 부착하여 규정된 전류가 변동이 없이 흐르는지를 항상 감시하였다. 부하 측의 공급전원은 컴퓨터 전원 공급장치(350W 12V 26A E사 : power supply)를 병렬로 연결하여 12V의 정격전압과 100A 이상의 충분한 전류를 공급하였다.

2.2 예비시험

10개의 시료를 랜덤 샘플링하여 12V 12.6A, 16.8A에서 각각 5개씩 시험하여 고장 모드를 분석해 본 결과 사용상태의 고장모드와 일치함을 파악하였다. 확률지와 EXCEL 프로그램을 이용하여 정량적으로 분석한 결과 수명분포는 와이블 분포가 가장 적합한 것으로 추정되었으며, 예비시험의 실시결과는 본 시험에 소요되는 시간 및 시료수를 결정하는데 중요한 자료가 되었다.

2.3 고장의 형태

계전기는 전류의 세기에 따라 마모/열화 현상이 있는 제품으로 고장률이 증가하는 경향을 갖는다. 또한 전류의 세기가 증가하면 접점의 녹는 면적이 증가하고 이로 인해 접점이 달라 붙는 고장의 발생 시간이 단축된다. <그림 4>는 정상상태의 계전기와 고장이 발생한 계전기를 분해하여 접점 부위를 확대한 사진이다. 그림에서 나타나 것과 같이 정상상태의 계전기(사진의 좌측)는 접점이 녹지 않고 깨끗함을 알 수 있으나 전류의 세기가 증가함에 따라 접점이 녹는 부위가 커짐을 알 수 있다. 그림의 가운데 것은 12.6A의 부하에서 고장 난 계전기의 접점을, 우측은 21A에의 부하에서 고장 난 계전기의 접점 사진이다.



(좌측: 정상, 가운데 및 우측: 고장)
 <그림 4> 정상 및 고장 계전기의 접점

3. 가속시험 자료 분석

3.1 시험 DATA

가속시험에 의해 계전기의 신뢰성 관련 특성치를 평가하기 위하여 품질검사(성능시험)에서 합격한 제품 90개를 랜덤 샘플링하여 가속수명 시험 시료로 사용하였다. 가속 수준은 12.6A, 16.8A, 21A의 3수준으로 하였으며 각 수준별로 30개씩의 시료를 시험하여 고장시간(사이클)을 관측하였다. 그 결과 <표 2>와 같은 데이터를 얻었으며 모두 관측중단이 없는 완전데이터(completed data)를 구하였다.

3.2 가속시험 DATA의 분석

(1) 분포의 적합성 검토

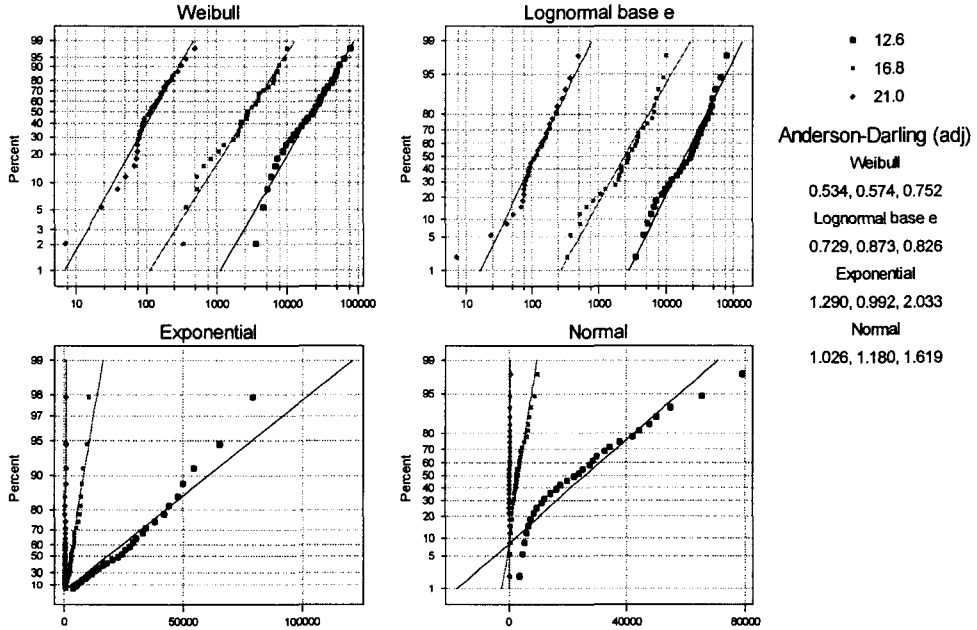
MINTAB을 사용하여 <그림 5>와 같이 해당 고장 데이터에 적합한 분포를 검토하였다. 분포의 적합성을 나타내는 척도로 Anderson Darling(AD) 값을 사용하였다. 이 AD값은 분석자에게 관측된 자료가 어떤 분포에 가장 잘 적합한지를 판단하는 정보를 제공해 주며 동일한 수명자료를 대상으로 다수의 분포를 적합시켰을 경우 AD값이 가장 작은 값을 갖는 분포가 가장 적합하다는 것을 의미한다. <그림 5>의 수명분포의 적합성 검토 결과는 Weibull 분포가 가장 적합함을 나타내고 있다.

<표 2> 가속수명시험 데이터

가속조건 고장순번	고장 시간 (Cycle)		
	21.0 A	16.8 A	12.6 A
1	7	332	3,542
2	23	365	4,582
3	39	521	5,237
4	51	529	5,932
5	69	663	6,647
6	73	825	7,245
7	75	1,067	8,623
8	76	1,249	9,632
9	78	1,756	11,194
10	81	1,950	12,468
11	87	2,021	14,345
12	88	2,177	16,353
13	91	2,197	17,584
14	96	2,652	19,883
15	106	2,756	22,346
16	116	2,771	24,116
17	123	3,102	25,387
18	137	3,520	27,554
19	142	3,714	28,754
20	161	3,900	30,027
21	162	3,930	32,763
22	180	4,537	34,221
23	182	5,326	37,797
24	199	6,267	41,862
25	227	6,558	44,324
26	240	6,618	47,742
27	283	7,121	49,865
28	313	7,616	54,539
29	369	9,129	65,208
30	484	9,865	79,076

Four-way Probability Plot for Cycle

ML Estimates - Complete Data



<그림 5> 적합한 수명분포의 검토

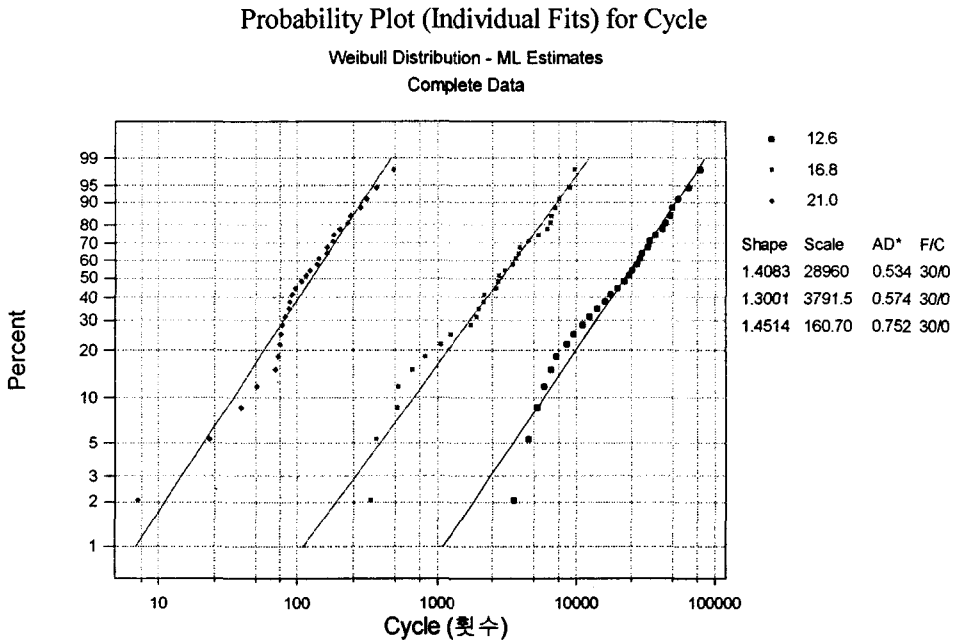
(2) 수명분포의 모수 추정

Weibull 분포를 적용하여 최우추정법으로 각 가속조건별 형상모수(shape parameter)와 척도모수(scale parameter)를 추정하였다(<그림 6>). 형상모수는 12.6A 16.8A, 21.0A에서 각각 1.4083, 1.3001, 1.4514으로 추정되었으며, 척도모수는 각각 28960, 3791.5, 169.79으로 추정되었다. 또한 각 가속수준에서의 기울기가 비슷하게 나타나고 있으며, 이는 각 수준에서의 형상모수 값이 동일해야 한다는 가속시험모델의 가정을 만족함을 뜻한다.

이를 확인하기 위해 세 스트레스수준에서 형상모수 β_i 에 대한 동일성 검정을 실시하였다. 공통의 형상모수의 추정치를 β^* , 그리고 각 수준에서의 형상모수 추정치 및 그 분산을 각각 $\hat{\beta}_i, V_i$ 라 할 때 검정 통계량은

$$Q = \sum_{i=1}^3 \frac{(\hat{\beta}_i - \beta^*)^2}{V_i} \tag{1}$$

이고, 이는 근사적으로 자유도가 2인 카이제곱분포를 따른다. 카이제곱 검정결과(<표 3> 참조) p-value 가 0.854로서 세 수준에서의 형상모수가 동일한 것으로 나타났다.



<그림 6> 스트레스수준별 모수의 추정

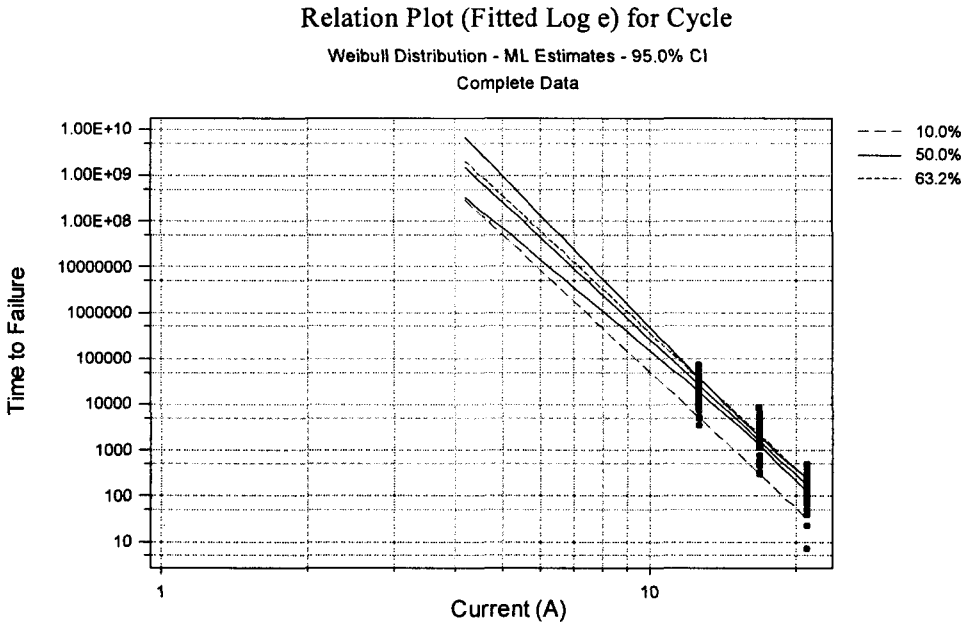
<표 3> 형상모수에 대한 동일성 검정결과

Chi-Square (검정통계량)	자유도	p-value
0.316	2	0.854

(3) 가속 모델의 적용

여기서는 계전기와 유사한 구조 및 고장특성을 지니는 마그네틱 스위치에 대한 가속수명 시험 선행연구[1]에서도 사용된 바 있는 역승모형(Inverse Power Law Model)을 적용하여 가속수명시험자료를 분석하였다.

가속인자와 Weibull 분포의 척도모수와의 관계를 나타내는 역승모델을 적용하여 두 변수 간(수명과 스트레스)의 관계를 직선 관계식으로 나타내면 <그림 7>과 같다.



<그림 7> 역승모델에서 전류세기와 고장시간 관계

역승모델에서 스트레스 V 와 수명 $L(V)$ 의 관계는

$$L(V) = \frac{1}{K V^n} \tag{2}$$

와 같이 표현되며, 양변에 대수를 취하면 $\ln(L(V))$ 와 $\ln(V)$ 는 식 (3)과 같이 선형관계가 됨을 알 수 있다. 여기서 V 전류의 세기(A)를, $L(V)$ 는 와이불 분포의 척도모수를 뜻한다. 참고로 역승모델을 비롯한 다양한 가속시험모델의 이론적 전개와 적용에 대해서는 참고문헌 [5], [6]과 [7]에서 자세히 다루고 있다.

$$\ln(L(V)) = -\ln(K) - n \ln(V) \tag{3}$$

이 모델의 모수 K 와 n 은 최우추정법을 사용하여 추정하였다.

<그림 7>의 그래프로부터 두 변수간의 관계가 거의 직선을 만족함을 알 수 있고, 그 결과 역승모델이 적합한 것으로 사료된다.

<그림 8>은 역승모델에 의한 가속성이 성립함으로 동일한 형상모수로 설정하여 가속수준 및 사용수준에서의 수명분포를 확률지에 도시하고 각 모수를 추정한 결과이다. 공통의 형상모수 값이 $\beta = 1.1431$ 로 추정되었으며, 각 스트레스 수준별 척도모수는 $\eta_{12.6A} = 38,652$, $\eta_{16.8A} = 2,227.8$, $\eta_{21.0A} = 243.55$ 로, 그리고 사용수준(12V 4.2A)에서의 형상모수 및 척도모수는 각각 1.1431과 2.1×10^8 회로 추정되었다. 여기서 공통의 형상모수 값은 역승모델 하에서 세 수준의 시험데이터로부터 구한 최우추정값으로서, 역승모델의 관계를 반영하지 않고 단지 세수준의 시험데이터만으로 구한 형상모수 값들의 추정치들과는 다소 다른 결과가 얻어짐을 알 수 있다.

공통의 형상모수의 값이 1보다 크다는 것($\beta = 1.1431$)은 계전기의 고장이 시간의 경과에 따라 증가하는 증가고장률 함수의 형태를 가짐을 뜻한다.

4. 결 론

본 연구에서는 계전기에 대한 신뢰성 관련 수명특성을 빠른 시간 내에 산출하기 위해 적합한 수명분포 및 가속모델을 파악하여 가속수명시험방식을 설계하고 가속시험 결과를 분석하였다. 사용조건 전류 4.2A에서의 Weibull 수명분포의 모수와 B_{10} 수명은 <표 5>와 같이 추정되었다.

<표 5> 신뢰성 관련 특성치

구 분	수명관련 특성치	95% 신뢰구간	
		하한	상한
형상모수	1.14313	0.97913	1.33460
척도모수	2.1×10^9	0.47×10^9	9.3×10^9
B_{10} 수명	291,677,673	62,920,284	1,352,121,427
신뢰도	1.0000	0.9999	1.0000

한편 점점 용량 10A에서는 B_{10} 수명의 최우 추정값이 53,433.84회로서 11만회에 미치지 못하는 것으로 나타났다. 일반적으로 계전기 제조업체에서 제공하는 보증수명은 돌입전류가 발생하지 않는 일정한 전류수준(저항부하 사용)에서의 수명을 나타낸다. 그러나 램프나 모터, 콘덴서, 솔레노이드 등 실제 계전기가 사용되는 환경의 부하에서는 각기 다른 패턴과 크

기의 돌입전류가 발생하므로 이때의 계전기 수명은 제조업체에서 제시한 보증수명보다 훨씬 단축될 수밖에 없다. 따라서 실제 사용환경에서의 계전기 수명을 정확히 추정하기 위해서는 해당 계전기의 사용환경, 즉 부하의 종류에 따른 돌입전류의 유형과 크기를 충분히 반영하여 가속시험을 설계하고, 그 시험 결과로부터 계전기의 신뢰성을 평가하는 것이 중요하다고 하겠다.

참고 문헌

- [1] 유행수, 한규환, 권영일(2002), “배전선로에 사용되는 전자개폐기의 가속수명시험에 관한 연구”, 「2002년도 대한 전기학회 하계학술대회 논문집」, 2002. 7.10-12.
- [2] Lawless, J.F.(1982), *Statistical models and Methods for lifetime data*, Wiley, New York.
- [3] Meeker, W.Q.(1984), “A comparison of accelerated life test plans for Weibull and Lognormal life distribution”, *Technometrics*, 26, 157-172.
- [4] Matsushita Electric Works(2000), *Relay Technical Information*.
- [5] Nelson, W.(1972), “Graphical Analysis of Accelerated Life Test Data with Inverse power model”, *IEEE Trans. on Rel.*, R-21, 2-11.
- [6] Nelson, W(1990)., *Accelerated Testing - Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses*, Wiley, New York.
- [7] ReliaSoft(2001), *Accelerated Life Testing Reference*, ReliaSoft Publishing.
- [8] WWW.1728.COM (2000), *Basic Electricity : Part 2-Relays*, 1728 S/W Systems.