

가속시험에 의한 릴레이의 기계적 수명평가에 관한 연구

Mechanical Life Prediction of a Relay by Accelerated Life Tests

권영일* 한인수**
(Kwon, Young-Il Han, In-Su)

Abstract

In this paper, accelerated life testing(ALT) method and procedures for a are developed and applied to assess the reliability of the product. Relay is a device that can open and close the electric circuit electrically and is used for protecting and controlling the load. In this study, an accelerated life test method for predicting the mechanical life of a relay is developed using the relationship between stresses, failure mechanism and life characteristics of products. Using the ALT method, we performed life tests and analyzed the tests results. The proposed method and procedures may be extended and applied to testing similar kinds of products to reduce test times and costs of the tests remarkably.

1. 서론

정보화 사회가 진전될수록 장비와 기계를 포함한 시스템의 복잡성은 증대하고 있으나, 이와

* 정주대학교 산업정보시스템공학과 교수

** 자동차부품연구원 신뢰성센터 연구원

반비례해 그 신뢰도는 급속하게 감소한다. 정보화 사회로의 지속적인 발전과 취약한 국내 산업기반의 혁신을 위해 반드시 넘어야 할 관문인 부품과 제품의 원천기술 확보를 위한 신뢰성 기술이 절실히 요구되고 있다. 2002년 7월 1일부터 시작된 제조물 책임(PL)법도 시행 2년 차를

맞이하러 그 영향이 전기·전자 업체를 중심으로 조금씩 구체화 되어 가고 있다. 기존의 제조 공정 및 검사 중심의 품질관리 기법을 활용하는 것도 한 방법이나 제품을 특정 품질기준이나 규정에서 벗어나지 않도록 규제하거나 생산 공정에서 불량 발생하지 않도록 하는 수준으로는 한계가 있다. 이제는 품질경영시대로서 품질에 대한 보다 원류단계의 관리측면인 기획·연구개발 단계에서 신뢰성 품질을 확보하고, 기업들은 품질보증 활동을 재평가하여 앞으로 신뢰성의 사고방식과 기법을 도입하여 적극적으로 활용하여야 할 것이다.

제품의 수명을 추정하는 것은 그 제품의 보증기간, 가격, 그리고 신 모델을 개발해야 할 시점을 결정하는데 매우 중요하다. 제품의 수명을 추정하면서 많은 시간과 비용을 소비한다면 경제성 문제로 효과를 보기 힘들 수 있다. 주어진 시간 내에 수명에 대한 데이터를 얻기 위해서 제품을 사용조건보다 더 열악한 조건에서는 시험하는 가속수명시험(ALT : Accelerated Life Test)이 널리 이용된다. 가속수명시험은 제품이나 부품 또는 재료 등의 신뢰성의 열화를 단기간에 판단할 목적으로 사용 상태에서 보다 높은 스트레스를 적용하여 시험함으로써 단기간에 이들이 사용되는 상태에서의 수명 혹은 고장률을 추정하는 시험이다.

본 연구는 가속시험에 의한 릴레이의 기계적 수명평가에 관해 다루고 있다. 릴레이는 코일에 전류를 흘리면 자석이 되는 성질을 이용하여 철판에 붙여 있는 스위치 부의 접점을 닫거나 여는 전기적 스위치를 말한다. 릴레이 기계적 수명평가는 작동 전압만을 인가하여 개폐 가속 시험하여, 릴레이에 대한 신뢰성관련 수명특성을 빠른 시간 내에 산출하기 위한 것이다.

적절한 수명분포 및 고장 데이터를 수집 분석하고 시험방법과 시험결과를 활용하여 신뢰성 보증 시험시간을 단축하고 제품의 개발단계 일정의 축소와 시험비용 감소 및 제품의 보증수명 증대를 기할 수 있다.

II. 릴레이의 가속수명시험

II-1. 릴레이의 기능 및 시료사진

릴레이란 코일에 전류를 흘리면 자석이 되는 성질을 이용하고 있다. 코일이 전자석으로 되었을 때 철판을 끌어 당겨, 그 철판에 붙어 있는 스위치부의 접점을 닫거나 여는 전기적 스위치를 말한다. 릴레이가 좋은 점은 전기적으로 독립된 회로를 연동시킬 수 있다는 점이다.

5V와 같은 저 전압계로 구성된 회로의 동작에 의해 AC 100V계의 회로를 ON/OFF시키든가, 대 전류의 회로를 ON/OFF시킬 수 있다.

릴레이는 기계적으로 접점을 닫거나 열기 때문에 일반적으로 고속 동작은 할 수 없다. (특수 용도로 고주파 릴레이라는 것도 있어 고속 동작이 가능한 릴레이도 있다.)

릴레이도 여러 가지 종류가 있으며, 코일에 가하는 전압(구동전압), 접점용량 등에 따라 적절한 것을 선택할 필요가 있다.

본 실험에 제어용릴레이는 각종의 제어 회로에 사용되는 것을 목적으로 한 릴레이를 사용하였다. 예를 들면 각종 생산 설비·공작기계 등의 산업용기기, 자동판매기·복사기 등 업무용 기기 또는 TV·에어콘·스테레오 장치 등의 이른바 가전제품에 이르기까지 각종 제어 회로에 사용되며, 가장 일반적으로 코일의 구동전압이 각각 DC 5V, 접점 용량이 10A AC 120V, 10A DC 24V인 소형 릴레이이다.

II-2. 릴레이의 주요 고장원인

가속수명시험을 설계하기 이전에 전기 기계적 계전기(통신용 계전기) 신뢰성평가기준서와 전기 기계적 계전기 해설서, 업체의 규격서, 시험 성적서, 예비실험을 통해 주요 고장모드와 릴레이에 관련된, 시험항목, 시험조건, 성능요건 등

을 조사하여 가속수준에 대한 결정을 하였다.

Table 1. 릴레이의 주요 고장모드와 고장원인

고장모드	고장원인
단선	-코일 단선 -접점 마모 -코일 기자력의 감소 -판 스프링의 탄성의 마모
단락	-접점의 용착 -접점의 온도 상승 -접점 재료의 도금불량 -접점의 전이 -판 스프링의 압력차이
접촉저항증가	-접점의 아크 발생 -접촉표면의 축소로 집중저항 발생 -경계저항(피막저항)발생 -습도증가에 의한 유화에 의한 장애 -코일의 온도 상승으로 기자력 감소
동작 및 복귀 시간증가	-코일의 온도상승 -접점의 마모 -가동 스프링의 탄성의 마모
채터링	-가동스프링과 접촉자에 작용하는 흡입력과외 불일치 -접점 표면의 이물질 -아마추어 -코어 사이의 이물질

II-3. 릴레이의 가속수명시험절차

릴레이의 수명평가를 위한 가속수명시험은 다음과 같은 절차에 따라 추진되었다.

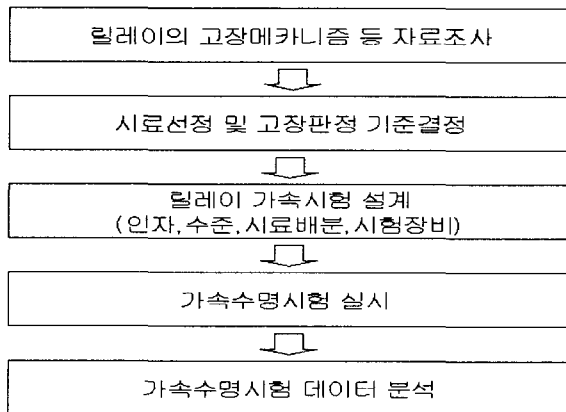


Fig. 1. 릴레이의 가속수명시험의 절차

II-4. 시험방법 및 장비의 구성

릴레이의 주요 고장모드 및 고장 메카니즘은 접점의 ON/OFF 반복에 의한 피로현상이므로 접점의 ON/OFF 반복시험을 실시한다. 이 때 일반적으로 현장에서 사용하는 ON/OFF 주기보

다 짧은 주기로 ON/OFF 반복시험을 실시한다.

가속인자로서는 릴레이나 마크네틱 스위치의 기계적 수명시험에 널리 적용되는 전압을 적용하였다. 사용조건보다 높은 전압을 가함으로써, 온도증가에 의한 코일의 단선, 강한 자력에 의한 충격량 증가로 예상되는 접점의 파괴/마모, 가동스프링의 탄성 상실/파손 등의 고장모드가 발생할 것으로 예상하였다.

PCB 기관용 소형릴레이의 릴레이소켓이 없으므로 PCB 만능기판을 이용하여 30개의 릴레이를 동시에 시험할 수 있도록 직접 제작하여 각각의 릴레이마다 LED를 달아 릴레이의 작동상태를 LED로 표시, 고장발생시 LED가 깜박하지 않는다.

PLC를 이용하여 개폐빈도를 시간당 12,000번으로 작동 제어장치 역할을 하며, 카운터기를 부착하여 개폐 횟수를 나타낸 준다. 직류전원공급기를 이용하여 전압의 세기를 조절하여 가속 시험을 하였다.

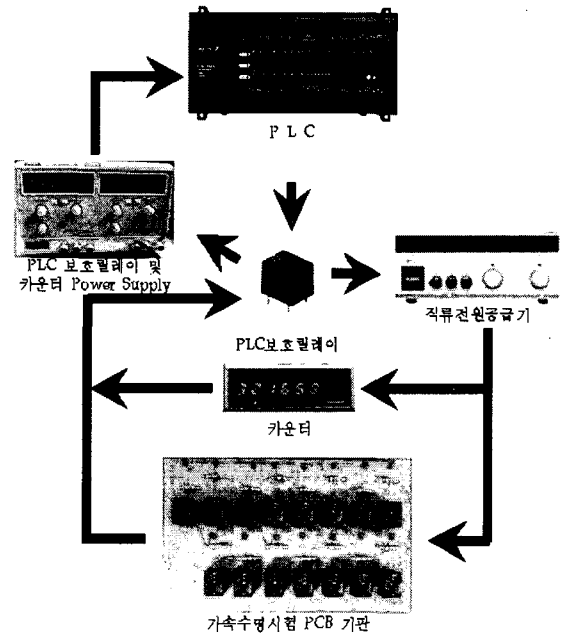


Fig. 2. 가속수명시험 실험장비 구성도

한번에 30개의 릴레이를 동시에 시험하였으나, 제어장치 역할을 하는 PLC의 고장으로 PLC를 보호할 수 있는 보호릴레이를 달아 실험하게 되

었다.

II-5. 예비시험 및 고장의 형태

H사와 O사의 릴레이 각각 24V, 21V, 18V 으로 예비시험 하였으나, 24V이하의 전압으로는 고장이 발생하기까지 시험기간이 매우 길게 되어 현실적으로 시험을 진행할 수 없었다. 전압을 높여서 최대 33.9V로 시험하였으나, 코일의 급격한 온도상승으로 코일이 타 녹아버렸다.

30V, 26V, 24V로 3수준으로 30개씩 시험하여 고장횟수를 관측하여 확률지와 EXCEL 프로그램을 이용하여 고장 모드를 분석하였다.

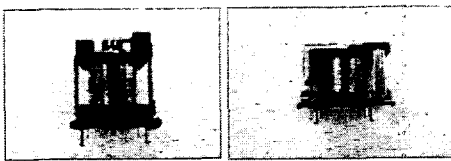


Fig. 3. 일본 O사의 30V



Fig. 4. 일본 O사의 26V



Fig. 5. 일본 O사의 24V



Fig. 6. 한국 H사의 30V



Fig. 7. 한국 H사의 26V

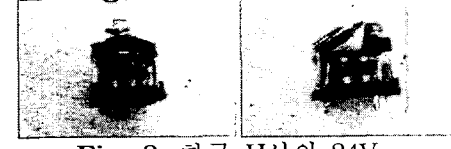


Fig. 8. 한국 H사의 24V

시험결과 관측된 고장모드는 주로 열 발생에 의한 코일의 단선으로 나타났다. 점접과피나 가동스프링 탄력상실 등 기타 고장모드는 전혀 발

생하지 않았다.

분석결과 수명분포는 Weibull 분포가 가장 적합한 것으로 추정되었으며, 그림에서 나타난 것과 같이 코일의 급격한 온도상승으로 코일이 녹아버리는 고장형태 보여주고 있다.

II-6. 가속수명시험 DATA

Table 2는 H사의 제품을 대상으로 각 전압 수준별로 30개씩의 시료를 시험하여 7번째 고장이 관측될 때까지 시험한 자료이다. 이러한 유형의 고장데이터를 정수중단데이터라고 한다.

Table 2. 한국 H사의 가속수명시험

가속조건 고장순번	고장 횟수 (Cycle)		
	30V	26V	24V
1	1,451	4,088	10,559
2	1,451	4,389	10,589
3	1,474	4,478	10,725
4	1,510	4,583	10,764
5	1,535	4,614	11,098
6	1,536	4,727	11,306
7	1,563	4,786	11,326

Table 3은 O사의 제품을 대상으로 시험하였으며, 30개씩의 시료를 사용하여 그 중 20개가 고장 나는 시험까지 시험한 자료이다.

Table 3. 일본 O사의 가속수명시험

가속조건 고장순번	고장 횟수 (Cycle)		
	30V	26V	24V
1	1,308	3,162	3,000
2	1,314	3,293	3,421
3	1,315	3,307	4,247
4	1,342	3,371	4,402
5	1,347	3,373	4,910
6	1,348	3,477	5,082
7	1,360	3,488	5,535
8	1,362	3,532	6,009
9	1,367	3,535	6,549
10	1,375	3,549	7,103
11	1,403	3,592	7,148
12	1,406	3,609	7,911
13	1,411	3,657	8,025
14	1,411	3,701	8,201
15	1,411	3,718	8,543
16	1,420	3,837	9,274
17	1,422	4,043	9,320
18	1,437	4,169	9,488
19	1,451	4,425	10,021
20	1,458	4,525	10,630

II-7. 가속수명시험 DATA 분석

신뢰성 관련분석에 많이 활용되고 있는 소프트웨어 중의 하나인 MINITAB을 이용하여 시험 데이터분석을 하였다.

II-7-1. 한국 H사의 가속수명시험 DATA분석

(1) 분포의 적합성 검토

Maximum Likelihood Estimation방법을 이용하여 8가지 주요 수명분포 중에 적합 시켜 작은 A-D 검정 값(Anderson Darling)을 가지면서 자료와 경험치와의 타당성, 분석의 용이성 등을 고려하여 적정분포를 선택하였다.

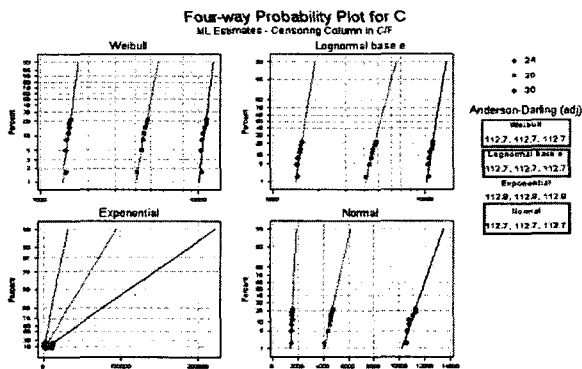


Fig. 9. 수명분포의 추정

Fig. 9의 수명분포에 대한 추정결과 A-D 통계량 값이 가장 적은 값을 갖는 것은 30V, 26V, 24V에서 각각 112.7, 112.7, 117.8로 Weibull, Lognormal base e, Normal분포가 비슷비슷하게 수명 데이터에 적합한 분포임을 보여주고 있다.

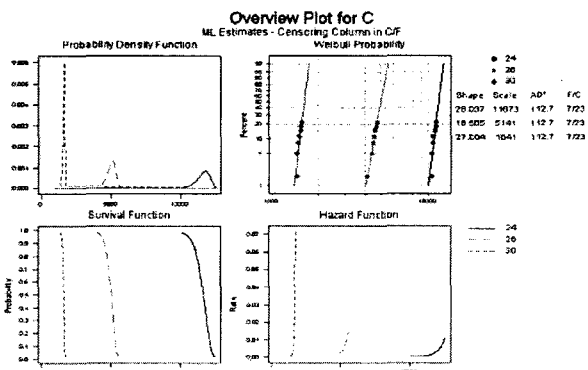


Fig. 10. 와이블분포의 Distribution Overview Plot 결과

Fig. 10과 같이 선정된 수명분포의 확률밀도 함수(Pdf), 확률지 도시, 신뢰도 또는 생존함수

(sf), 고장률함수(hf)의 도시, 모수의 추정 값을 확인할 수 있다.

(2) 수명분포의 모수추정

Weibull분포를 적용하여 한국 H사의 데이터를 최우추정법(maximum likelihood estimation : MLE)를 이용하여 가정한 분포의 모수추정 값(점 추정과 구간추정) 및 기초통계량 값, 관심 있는 분위수의 추정 값을 구한다.

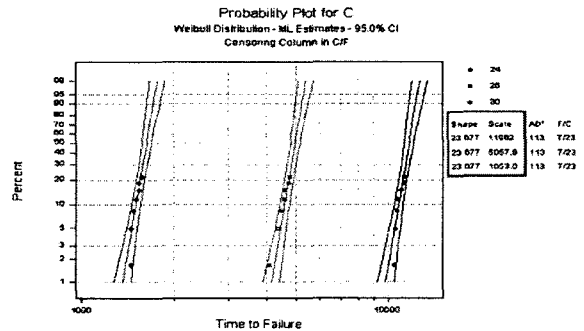


Fig. 11. 각 스트레스 수준별 모수추정

그 결과 형상모수(sharp parameter : m)는 30V 26V, 24V에서 각각 23.677, 23.677, 23.677의 값을 가지며 척도모수(scale parameter : η)는 11982, 5057.8, 1653.0의 값을 가짐을 알 수 있다. 다음 Table 4는 형상모수의 동일성을 검정한 것이다. P값이 0.672로서 형상모수가 동일한 것으로 나타났으며, 여기서 적용한 전압의 범위에서 가속성이 성립함을 알 수 있다.

Table 4. 형상모수(Chi-Square)의 동일성 검정결과

Chi-Square (검정통계량)	DF (자유도)	P-value
0.794	2	0.672

(3) 가속모델의 적용

제품 수명을 가속화 스트레스의 함수로 모형화 시키는데 널리 사용하고 전압, 전력, 압력 등과 같이 주로 비열가속인자를 적용하는 역승모델 적용하였다.

역승모델의 관계식은 $L(V) = \frac{1}{K V^n}$ 같이 표현되며, 양변에 대수를 취하면 $\ln(L(V))$ 와

$\ln(V)$ 는 아래의 수식과 같이 수명과 스트레스 사이의 관계를 직선관계가 됨을 알 수 있다.

$$\ln(L(V)) = -\ln(K) - n \ln(V)$$

Weibull분포에서 $L(V)$ 는 척도모수를 뜻한다.

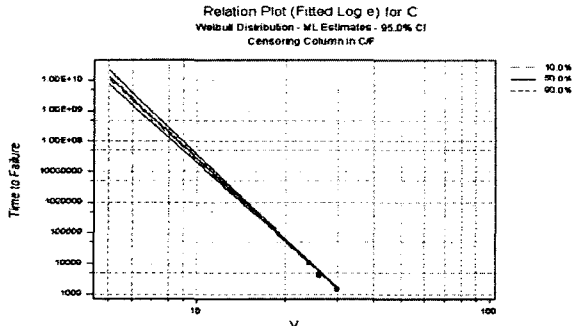


Fig. 12. 역승모델 및 백분위수

Fig. 12의 그래프로부터 두 변수간의 관계가 거의 직선을 만족함을 알 수 있고, 그 결과 역승모델이 적합한 것으로 사료된다.

(4) 가속시험 분석결과

Accelerated Life Testing: C versus V

Response Variable: C

Censoring Information	Count
Uncensored value	21
Right censored value	69
Censoring value: C/F = C	

Estimation Method: Maximum Likelihood
Distribution: Weibull
Relationship with accelerating variable(s): Log base e

Regression Table

Predictor	Standard Coef	Error	Z	P	95.0% Normal CI	
					Lower	Upper
Intercept	37.4407	0.5327	70.29	0.000	36.3967	38.4847
V	-8.8195	0.1625	-54.27	0.000	-9.1380	-8.5010
Shape	12.515	2.422			8.565	18.287

Log-Likelihood = -189.903

Anderson-Darling (adjusted) Goodness-of-Fit

At each accelerating level

Level	Fitted Model
24	112.8
26	112.8
30	112.8

Table of Percentiles

Percent	V	Percentile	Standard Error	95.0% Lower	Normal CI Upper
10	5.0000	1.0414E+10	2843812810	6097830799	1.7785E+10
50	5.0000	1.2106E+10	3288298394	7108511366	2.0616E+10

MINITAB 의한 가속시험 data 분석결과에서 역승모델의 기울기와 절편이 각각 $n = 8.8195$,

$-\ln K = 37.4407$ 이며 유의성 검정결과 P값이 모두 0.000으로서 모두 유의함을 나타내고 있다.

(5) 사용수준의 백분위수의 검·추정

Table 5. 사용수준의 배분위수의 검·추정

Percent	Voltage (V)	Percentile	Standard Error	95% Normal CI	
				Lower	Upper
5%	5	9,831,919,952	2,698,304,884	5,741,584,293	1.6836E+10
10%	5	1.0414E+10	2,843,812,810	6,097,830,799	1.7785E+10
50%	5	1.2106E+10	3,288,298,394	7,108,511,366	2.0616E+10

Table 5 사용수준의 백분위수의 검·추정 결과로 B10수명의 95% 신뢰구간이 6,097,830,799에서 1.7785E+10사이임을 알 수 있으며, 릴레이의 기계적 요구수명인 B10수명 1000만회 이상을 충분히 만족시킴을 보여주고 있다.

(6) 사용수준의 모수 추정

Fig. 13은 역승모델에 의한 가속성이 성립함으로 동일한 기울기로 확률지에 도시하고 모수를 추정한 결과이다.

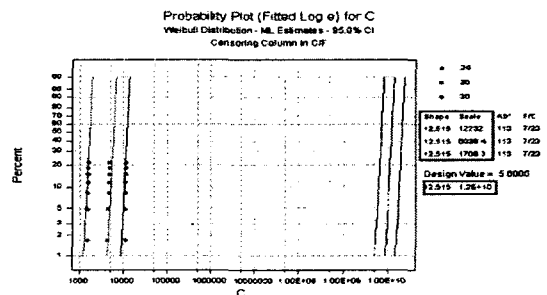


Fig. 13. 사용수준의 모수추정과 신뢰구간 도시

각 스트레스 수준별 척도모수는 30V에서 12,232, 26V에서 6,038.4, 24V에서 1,709.3으로 추정된다. 또한 사용수준에서의 모수의 추정 결과는 형상모수는 12.515이고 척도모수는 1.2×10^9 로 추정 된다

II-7-2. 일본 O사의 가속수명시험 DATA분석

한국 H사제품과 동일하게 MINTAB으로 분석 결과 분포의 적합성 검토결과 Weibull, Lognor-

mal base e, Normal분포가 비슷비슷하게 수명 데이터에 적합하였으나, 선행연구와 실험결과를 볼 때 릴레이 수명은 Weibull분포를 적용하여 분석하였다. 이제품의 경우 적용전압이 높아질 수록 형상모수 값(기울기)도 증가하는 경향을 나타내며, 앞에서와 같은 근거로 역승모형을 적용하여 두 변수간의 관계가 거의 직선을 만족함을 알 수 있었고, 그 결과 역승모형이 적합한 것으로 사료된다.

(1) 가속시험 분석결과

Accelerated Life Testing: Cycle versus V
Response Variable: Cycle

Censoring Information	Count
Uncensored value	60
Right censored value	30
Censoring value: C/F = C	

Estimation Method: Maximum Likelihood
Distribution: Weibull
Relationship with accelerating variable(s): Log base e

Regression Table		Standard			95.0%	Normal CI
Predictor	Coef	Error	Z	P	Lower	Upper
Intercept	35.5590	0.9327	38.13	0.000	33.7310	37.3870
V	-8.3048	0.2845	-29.19	0.000	-8.8624	-7.7472
Shape	4.6024	0.5202			3.6878	5.7438

Log-Likelihood = -522.667
ProbPlot for Cycle

Anderson-Darling (adjusted) Goodness-of-Fit
At each accelerating level

Level	Fitted Model
24	62.58
26	63.07
30	64.89

Table of Percentiles						
Percent	V	Percentile	Standard Error	95.0% Lower	95.0% Upper	Normal
5	5.0000	2280190654	1120210206	870549682	59723982	
10	5.0000	2666219847	1296932694	1027649259	69174654	
50	5.0000	4014775412	1913533118	1577463334	1.0218E+	

MINITAB에 의한 가속시험 data 분석결과는 역승모형의 기울기와 절편이 각각 $n = 8.3048$, $-\ln K = 35.5590$ 이며 유의성 검정결과 P값이 모두 0.000으로서 모두 유의함을 나타내고 있다.

(2) 사용수준의 백분위수의 검 · 추정

Table 6 사용수준의 백분위수의 검 · 추정 결과로 B10수명은 95% 신뢰구간이 1,027,649,259에서 6,917,465,480사이임을 알 수 있으며, 릴레이 기계적 요구수명인 B10수명 1000만회 이상

을 충분히 만족시킴을 보여주고 있다.

Table 6. 사용수준의 배분위수의 검 · 추정

Percent	Voltage (V)	Percentile	Standard Error	95% Normal CI	
				Lower	Upper
5%	5	2,280,190,654	1,120,210,206	870,549,682	5,972,398,277
10%	5	2,666,219,847	1,296,932,694	1,027,649,259	6,917,465,480
50%	5	4,014,775,412	1,913,533,118	1,577,463,334	1.0218E+10

(3) 사용수준의 모수 추정

역승모형에 의한 가속성이 성립함으로 동일한 기울기로 확률지에 도시하고 모수를 추정한 결과이다. 각 스트레스 수준별 척도모수는 30V에서 9,564.5, 26V에서 4,920.0, 24V에서 1,499.1으로 추정된다. 또한 사용수준에서의 모수의 추정 결과는 형상모수는 4.6024이고 척도모수는 4.3×10^8 로 추정된다.

III. 결론 및 차후연구과제

릴레이에 대한 기계적 수명평가는 작동전압만을 인가하여 개폐 가속수명시험하여 릴레이에 대한 신뢰성 관련 수명특성을 빠른 시간 내에 산출하고 적절한 수명분포 및 가속모형을 파악하기 위한 가속수명시험을 실시한 결과를 분석, 검토하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

Table 7. 모수추정과 형상모수의 동일성

구분	한국 H사			일본 O사		
	30V	26V	24V	30V	26V	24V
형상모수 (sharp parameter : m)	23.677	23.677	23.677	2.659	6.356	24.717
척도모수 (scale parameter : n)	11,982	5,057.8	1,653.0	10,192	4,381	1,449
Chi-Square (검정통계량)	0.794			65.812		
DF (자유도)	2			2		
P	0.672			0.000		

수명분포에 대한 적합성을 검토하기 위해 최우 추정법(Maximum Likelihood Estimation)을 이

용하여 한국의 H사와 일본 O사의 제품을 분석한 결과 Weibull, Lognormal base e, Normal분포가 비슷비슷하게 수명 데이터에 적합한 수명 분포임을 확인할 수 있었다. Weibull분포를 적용하여 한국의 H사와 일본 O사의 제품을 분석모수 추정하여 Table 7 같은 값을 가짐을 알 수 있었다.

전압, 전력, 압력 등과 같이 주로 비열가속인자를 적용하는 역승모델을 적용하여 사용수준 전압 5V 에서의 B10 수명의 95% 신뢰구간을 추정해본결과 한국 H사의 릴레이는 신뢰구간 하한 값이 60억회(6,097,830,799) 이상이고, 일본 O사의 릴레이는 신뢰구간 하한 값이 10억회(1,027,649,259) 이상으로 릴레이의 기계적 수명의 1000만회 이상을 충분히 만족시킴을 Table 8에서 보여주고 있다.

Table 8. 사용수준의 B10수명과 형상모수 신뢰도

회사별	구분	Percentile	Standard Error	95% Normal CI	
				Lower	Upper
한국 H사	B10수명	1.0414E+10	2,843,812,810	6,097,830,799	1.7785E+10
	형상모수	12.515	2.422	8.565	18.287
일본 O사	B10수명	2.6662E+9	1,296,932,694	1,027,649,259	6.9174E+9
	형상모수	4.6024	0.5202	3.6878	5.7438

두 제품의 기계적 수명 분석결과, 동일한 규격의 제품이더라도 공통형상모수 및 스트레스 수준별 형상모수의 변화추이 등이 크게 다를 수 있다. 따라서 소형릴레이에 대한 수명보증이나 신뢰성 평가 시 해당제품에 대한 수명특성을 충분히 시험 검토하여 그 제품에 적합한 시험방식을 설계해야 할 것이다.

차후 연구과제로는 점점의 기계적수명의 끊어짐이나 마모, 사용 환경과 사용조건에 따라 모두 고려한 릴레이에 대한 각 스트레스별 가속수명시험의 설계 및 적용이 필요하겠다.

본 연구에서 시험방법과 시험결과를 활용하여 신뢰성 보증 시험시간의 단축을 통한 제품의 개발단계 일정의 축소와 시험비용 감소 및 제품의

보증수명 증대로 인한 국내 중소기업에서 주로 생산하고 있는 소형 릴레이의 경쟁력확보에 크게 기여할 것이다.

참 고 문 헌

1. Meeker, W.Q., 「A comparison of accelerated life test plans for Weibull and Lognormal life distribution」, Technometrics, 26, 157-172, 1984
2. Nelson, W., 「Accelerated Testing - Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis」, Wiley, New York, 1990
3. 윤상운, 「신뢰성 분석」, 자유아카데미, 1996.
4. 권영일 외 1인, 「신뢰성 전문가 과정」, 성균관대학교 품질혁신센터, 1997.9.
5. 배도선, 「최신 통계적 품질관리」, 영지문화사, 1997.
6. 김우철 외 7인, 「통계학 개론」, 영지문화사, 1998.
7. 정해성 외 3인, 「신뢰성 분석과 응용」, 영지문화사, 1999.
8. 산업자원부 기술표준원, 신뢰성평가 전문인력양성과정 교재 - 신뢰성분석 및 시험과정, 2001.
9. 전기 기계적 계전기(통신용계전기) RS C 0006: 2001, 산업자원부 기술표준원, 2001.
10. 전기 기계적 계전기(통신용계전기)해설서 RS C 0006: 2001, 산업자원부 기술표준원, 2001.
11. 서순근, 「MINITAB 신뢰성 분석」, 이레테크, 2002.
12. 권영일, 유영철 “소형계전기에 대한 가속수명시험 설계 및 분석”, 한국신뢰성학회논문집, 제4권 제1호, 2004, pp.1-14