

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.9.831>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

전자파 차폐 도어용 핑거 스트립의 가속수명시험 및 유효성 평가

이주홍* · 김도식* · 장무성* · 조해용**†

* 한국기계연구원 신뢰성평가센터, ** 충북대학교 기계공학부

Accelerated Life Testing and Validity Evaluation of Finger Strips Used for Electromagnetic Shielding Doors

Joo Hong Lee*, Do Sik Kim*, Mu Seong Chang* and Hae Yong Cho**†

* Reliability Assessment Center, Korea Institute of Machinery & Materials,
** Dept. of Mechanical Eng., Chungbuk Nat'l Univ.

(Received February 9, 2015 ; Revised July 8, 2015 ; Accepted July 16, 2015)

Key Words: Finger Strip(핑거 스트립), Accelerated Life Test(가속수명시험), B₁₀ Life(B₁₀ 수명), Accelerated Factor(가속계수), Shielding Door(차폐 도어)

초록: 사람과 전자기기들은 우리 주변의 환경 속, 특히 병원의 자기 공명 영상(Magnetic resonance imaging, MRI) 장비 또는 군용으로 사용되는 전자기 펄스(Electromagnetic pulse, EMP) 장비, 그리고 수많은 전자파를 만들어 내는 장치들에 노출되는 경우가 잦아졌다. 이러한 전자파는 사람과 전자기기에 유해하고, 이를 차폐하기 위해 사용되는 것 중에 하나가 핑거 스트립이다. 핑거 스트립은 열전도성이 좋기 때문에 전자파를 흡수하여 열로 변환한다. 이 특징을 효과적으로 이용하여 전자파 차폐가 필요한 실내의 특수 문짝에 핑거 스트립을 설치해서, 전자파로부터 사람과 전자기기를 보호한다. 본 연구에서는 핑거 스트립의 주 고장모드에 영향을 주는 가속인자로 하중을 선택하여 가속수명시험을 실시한다. 가속수명시험의 결과로부터 핑거 스트립의 실사용조건 수명을 예측하며, 동일한 조건에서 실시한 수명시험 결과와 비교하여 가속수명시험의 유효성을 평가하고자 하였다.

Abstract: Many persons and electronic devices are exposed to electromagnetic (EM) waves generated from magnetic resonance imaging (MRI) equipment, EM pulses (EMPs), and many other kinds of EM wave devices. Finger strips are used to provide shielding from these EM waves. Because of the high thermal conductivity of finger strips, they are used in the design of specialized doors that are installed in shielded rooms. In this study, we perform an accelerated life test using the load acceleration stress, which affects the main failure mode of finger strips. We predict the life of the finger strip under normal usage conditions based on the results of the accelerated life test. We compare the results with those predicted from the life test under normal usage conditions to evaluate the validity of accelerated life testing.

1. 서론

전자파는 컴퓨터나 전자기기의 오작동에서부터 공장의 전소 사고에 이르기까지 그 피해가 다양하게 나타나고 있으며, 나아가 인체에까지 부

정적인 영향을 미치기 때문에 이에 대한 우려와 관심이 높아지고 있다. 일반적으로 알려진 전자파의 사회적 문제로는 인체에 대한 건강 장애, 전자기기의 오작동, 전자파의 도감청에 의한 보안상의 문제 등을 들 수 있다.

이렇게 해로운 전자파를 차폐하기 위한 기술은 크게 두 가지 방법으로 나눌 수 있는데, 외부의 전자파 발생원으로부터 내부의 인체나 장비를 보호하는 방법, 그리고 의료기기분야 등에서 많이

§ 이 논문은 대한기계학회 2014년도 추계학술대회(2014. 11. 11.-14., 김대중컨벤션센터) 발표논문임.

† Corresponding Author, hycho@chungbuk.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

사용되는 전자파 발생원 주변을 차폐하여 외부 장비를 보호하는 방법이 있다.

전자파 차폐 기술의 연구 분야는 주로 전자파를 차폐할 수 있는 재료의 개발, 전자파를 흡수하여 열에너지로 전환시키는 흡수체 기술, 마지막으로 전자부품의 목적 신호와 노이즈를 분리하는 필터링 기술 등이 있다. 이 중에서 병원의 자기 공명 영상장비와 정밀검사기기가 있는 영사실의 전자파 차폐 도어는 전자파 흡수 기술을 이용한 것으로서, 현재 연구와 상용화가 활발히 진행되고 있는 분야이다.

자기 공명 영사실의 출입구에는 전자파의 노출을 막기 위해 핑거 스트립(Finger Strip)이 사용되는데, 핑거 스트립 개스킷이라고도 불린다. 금속 클립 형태로 스테인리스 강, 인칭동 그리고 베릴륨동 등으로 만들어지며, 경우에 따라 니켈, 주석이나 금도금 처리를 하기도 한다. 핑거 스트립은 높은 열전도성을 갖고 있기 때문에 전자파를 열에너지로 변환시키고, 또한 강한 탄성력으로 인해 전자 방해 잡음(Electromagnetic interference, EMI) 차폐기능이 우수하다. 따라서 의료기기뿐만 아니라 군용 전자기 펄스 또는 핵무기로부터 발생하는 전자기 파동을 막기 위한 전자기 펄스 방호용 차폐 도어⁽¹⁾에도 많이 사용된다.

핑거 스트립은 Fig. 1과 같이 차폐용 도어에 설치되어 사람의 출입 시에 반복적으로 작동되기 때문에, 도어의 개폐로 인한 고장 인자가 내재되어 있다. 기계적 결함 발생으로 인한 전자파의 누설은 전자파 차폐시설 전체에 지대한 영향을 끼치게 된다. 따라서, 핑거 스트립의 정확한 수명 예측과 이를 바탕으로 한 주기적인 교체기간의

설정은 전자파 차폐도어의 안전과 신뢰성 향상에 무엇보다 중요하다.

본 연구에서는 핑거 스트립의 주 고장모드에 영향을 주는 가속인자로 부하를 선택하여 가속수명시험을 하였다. 3가지 스트레스 수준에서의 가속수명시험 결과로부터 핑거 스트립의 사용조건 수명을 예측하였고, 보증수명의 만족여부도 평가하였다. 또한 이를 사용조건의 수명시험 결과와 비교하여 가속수명시험의 유효성을 평가하고자 하였다.

2. 수명분석 및 시험장비 구성

2.1 핑거스트립의 작동 구조

핑거 스트립은 두 개가 한 쌍으로 Fig. 2와 같이 문틀에 조립되어 전자파의 누설을 막는 부품이다. 자기 공명 영상 차폐도어용 핑거 스트립은 고속실장 제작이 가능하며 원형으로 말려있어, 도어에 조립 시 굽힘, 파손 등이 발생할 수 있다. 그리고 전자기 펄스 방호도어에 사용되는 핑거 스트립은 클립-온(Clip-on) 타입으로 방호도어의 두께에 따라 여러 형태로 제작되고 조립이 용이하다. Fig. 2와 Fig. 3에 핑거 스트립의 구조 및 조립상태를 나타내었다.

핑거 스트립은 베릴륨동⁽²⁾을 가장 많이 사용하는데, 피로에 강하고 탄성이 우수하기 때문에 접지 또는 차폐용으로 유리하다. 또한 핑거 스트립은 접촉저항이 작아 차폐효과가 우수하며, 탁월한 내구성과 열전도성을 가지고 있다. 또한, 고온에 강하고, 습기를 흡수하지 않기 때문에 표면에 흰색 곰팡이가 발생하지 않고, 방사능, 자외선, 오존 등에 영향을 받지 않아 내환경성이 우수하

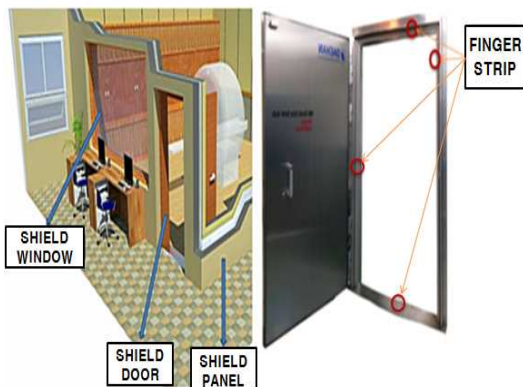


Fig. 1 Application of finger strip to shielded the room

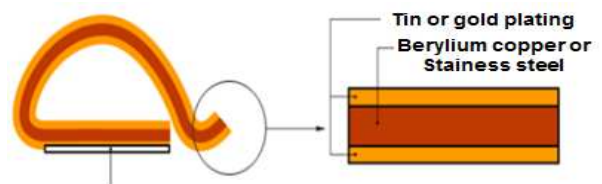


Fig. 2 Finger strip & the detailed structure

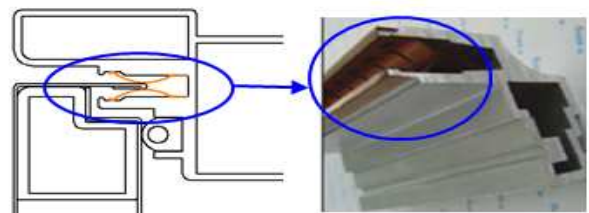


Fig. 3 Finger strips installed in the door frame

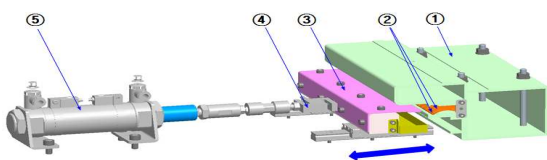
다. 핑거스트립의 재료로 가장 많이 사용되는 베릴륨동의 주성분은 Table 1과 같다.

Table 1 Components of beryllium copper

Primary Components	Composition
Be	1.8~2.0%
Co+Ni	more than 0.2%
Co+Ni+Fe	less than 0.6%
Po	less than 0.02%
Cu	balance

Table 2 Failure modes and failure mechanisms

Primary Components	Function	Failure Modes	Failure Mechanisms	Failure Causes	Failure Effects
Finger Strip	Electro Magnetic Shield	Wear	Repeated Friction	Repeated friction between dissimilar metals.	Resistance change, Decreased elasticity
		Plastic Deformation	Fatigue	Material defects, poor assembly	Inability of the closure
		Broken	Fatigue	Material defects, poor assembly	Inability of the closure



- ① Door frame
- ② A pair of finger strip
- ③ Knife(door)
- ④ Load cell
- ⑤ Air cylinder

Fig. 4 Operating mechanism of the finger strips under the test equipment



Fig. 5 Test equipment of the finger strip

2.2 핑거스트립의 고장자료 수집 및 고장분석

핑거 스트립의 주요 고장은 표면과 나이프(Knife)(Fig. 4의 ③번 부품)의 삽입에 따른 이종 금속간의 마모에 의한 소성변형 및 피로 파단 등으로 조사 되었다.⁽⁷⁾ 자기 공명 영상 차폐도어용 핑거 스트립은 0.1 mm 내외의 얇고 긴 롤 형태로 설치되며, Table 2와 같이 반복적인 마찰에 의한 마모와 금속피로에 의한 소성변형 및 파손⁽³⁾이 주요 고장모드이다. 핑거 스트립의 고장모드는 Table 2와 같다.

2.3 핑거스트립의 시험장비 구성

가속시험 장비의 개념도와 외형은 각각 Fig. 4와 Fig. 5와 같다. 핑거 스트립의 고장 모드 재현을 위한 가속수명시험 장비는 실제 자기 공명 영상 차폐도어를 일정부분 절단하여 현장조건과 동일하게 구성하였다. 현장의 전자파 차폐 도어 개폐를 모사하기 위해 동일한 조건으로 문틀의 안쪽에 핑거 스트립 한 쌍을 설치하고, 공기압 실린더의 왕복운동으로 도어의 개폐를 재현하였다. 공기압 실린더와 연결된 나이프(도어의 일부분)가 문틀에 설치된 핑거 스트립 사이로 삽입되어 핑거 스트립이 압축-회복 운동을 반복할 수 있도록 하였다. 시험 중 모든 시료가 소성변형으로 인해 핑거 스트립과 나이프 사이에 갭이 발생하거나, 파단발생 시까지 가속수명시험을 하였다.

3. 가속수명시험

3.1 가속수명시험 설계⁽⁴⁾

핑거 스트립의 주요 고장모드를 가속화 할 수 있는 가속 스트레스 인자(가속 인자)는 부하로 선정하였다. 이에 따라 가속 모델은 역승 모델(Inverse Power Law Model)⁽⁵⁾로 선정하였으며, 수명과 가속 인자와의 관계는 식 (2)와 같다.

Table 3 Design condition of Accelerated test

Acceleration Stress Factor	Stress Level(%)	Sample Quantity
Load	1st - 125%	5
	2nd - 140%	5
	3rd - 150%	5

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

여기서, L 은 와이블 분포의 특성수명이고, K 는 모델의 상수, n 는 부하 가속지수, V 는 가속 인자(부하)이다.

가속 인자로 선정된 부하는 핑거 스트립의 수직 변형량에 비례하다. 따라서 나이프에 의해 생기는 수직 변형은 핑거 스트립의 스트레스 요인이 된다. 그러므로 핑거 스트립이 수직방향으로 변형되는 양을 변화시켜 가속 수준을 결정할 수 있다. 실제 핑거 스트립의 작동 조건은 한 쌍의 핑거 스트립이 나이프(두께는 3 mm)에 의해 눌러 부하를 받는 상태로, 한쪽의 핑거 스트립은 각각 1.5 mm 씩 눌리게 된다. 이때 각 핑거 스트립에 걸리는 부하는 약 40 ~ 50 N 이다.

본 가속시험의 가장 높은 수준인 150%는 자기 공명 영상 차폐 도어를 시뮬레이션 한 결과 도어에 의해 핑거 스트립이 최대 부하를 받는 가장 가혹한 수준⁽⁶⁾으로 정하였고, 가속 수준 140%는 전자파 차폐 도어의 신뢰성 평가기준⁽⁷⁾에서 도어의 고장 판정기준을 참고로 하였다. 나머지 가속 수준 125%는 시험시간을 고려하여 임의로 정해 Table 3과 같다.

3.2 가속수명시험 결과

핑거 스트립의 가속수명시험은 각기 다른 세 수준에서 수행 하였고, 실사용 조건과 같은 방식으로 도어의 개폐를 모사하였다. 각각의 수준에서 시료의 고장(파손, 변형)이 발생할 때까지 시험한 결과는 Table 4 ~ 6과 같다.

3.3 가속수명시험 결과 분석

핑거 스트립의 세 수준에서 가속시험한 결과에 대한 신뢰성 분석 결과, 와이블 분포의 형상모수는 2.8694, 형상모수에 대한 95% 신뢰구간은 (1.9422, 4.2392)이다. 그리고 핑거 스트립에 적용한 역승 모델 상수 K 는 1.0935×10^{-27} 이며, 하중에 대한 가속지수 n 은 10.3569 이고, n 에 대한 95% 신뢰구간은 (8.1918, 12.5220)로 추정되었다.

핑거 스트립의 가속수명시험으로 예측한 수명은 Table 7과 같으며, 각 스트레스 수준별 가속계수는 Table 8과 같다.

Table 4 Test results of 1st stress level

Sample No.	Load Level	Failure Cycles
#1	125%	180,076
#2	125%	41,014
#3	125%	161,752
#4	125%	211,680
#5	125%	229,270

Table 5 Test results of 2nd stress level

Sample No.	Load Level	Failure Cycles
#1	140%	45,200
#2	140%	46,110
#3	140%	46,050
#4	140%	23,210
#5	140%	54,700

Table 6 Test results of 3rd stress level

Sample No.	Load Level	Failure Cycles
#1	150%	44,015
#2	150%	25,680
#3	150%	17,575
#4	150%	18,270
#5	150%	19,710

Table 7 Estimates of the lifetimes under normal use conditions from accelerated life test

	Point Estimate	95% Lower Confidence Limit	95% Upper Confidence Limit
Characteristic Life(η)	1,767,700	864,630	3,613,000
Shape Parameter(β)	2.8694	1.9422	4.2392
Acceleration Index(n)	10.3569	8.1918	12.5220
MTTF	1,575,500	770,350	3,222,300
B ₁₀ Life	806,860	372,820	1,746,200

Table 8 Acceleration factor for different load stress levels

Stress Level (Load)	Acceleration Factor (AF)
100%	1.0
125%	10.1
140%	32.6
150%	66.7

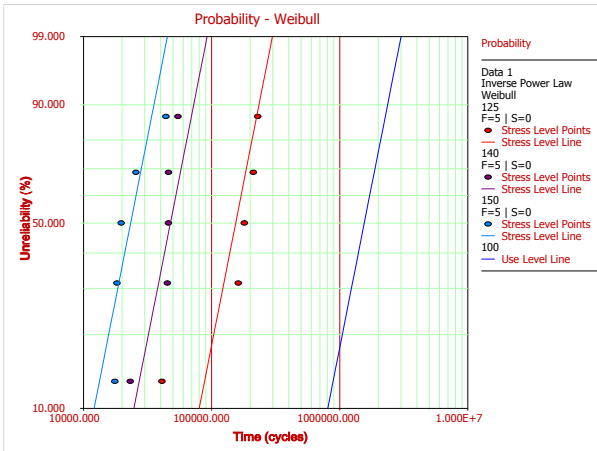


Fig. 6 Weibull plot of failure cycles obtained from the 3 different stress levels

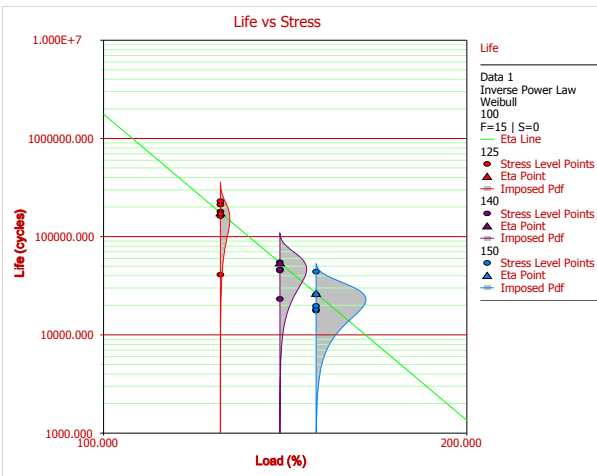


Fig. 7 Life-load relationship plot of failure cycles obtained from the 3 different stress levels

3가지 스트레스 수준에서 실시한 가속수명시험 결과로부터 얻은 고장 사이클에 대한 와이블 플롯은 Fig. 6과 같으며, 스트레스 수준과 수명과의 관계는 Fig. 7과 같다.

3.4 가속시험의 유효성 확인

가속수명시험 결과로 실사용 조건(부하 100%)에서의 수명을 Table 7과 같이 예측하였으며 가속수명시험의 유효성 확인을 위해 실사용 조건에서 수명시험을 추가로 실시하였다.

실사용 조건과 동일한 조건에서 얻은 고장 사이클에 대하여 와이블 확률지 상에서 Fig. 8과 같이 분석하였다. 형상모수는 1.81, 척도모수(특성수명)는 1,366,676 사이클, B_{10} 수명은 394,381 사이클로 나타났다.

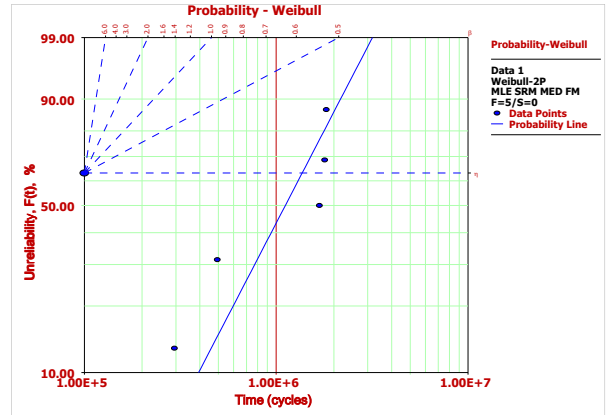


Fig. 8 Weibull plot for normal use condition data

Test for Shape and Scale Equal to 2.8694 and 1767700		
Chi-Square	DF	P
1.82679	2	0.401
Test for Shape Equal to 2.8694		
Chi-Square	DF	P
1.36832	1	0.242
Test for Scale Equal to 1767700		
Chi-Square	DF	P
0.989132	1	0.320

Fig. 9 Equality test results of shape and scale parameters

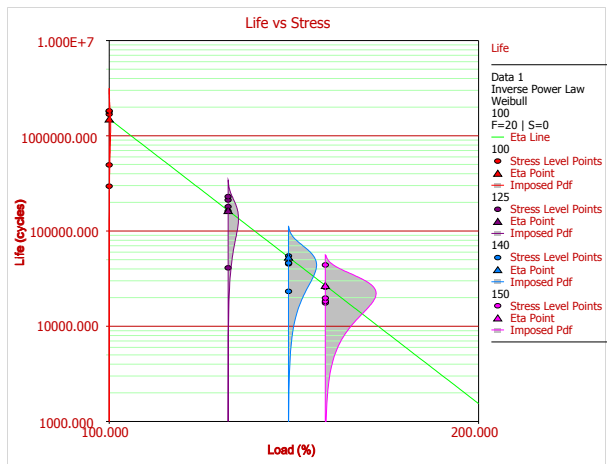


Fig. 10 Life-load stress relationship plot for combined data (accelerated and normal use condition)

가속수명시험 결과의 유효성 확인을 위해 가속 모델로부터 추정된 사용조건에서의 수명과 실사용 조건에서 수명시험으로 얻은 수명을 비교하기 위해 와이블 분포의 형상모수와 척도모수에 대한

동일성 검정을 실시하였다. 즉, 실사용 조건에서 얻은 시험 데이터들의 형상모수가 2.8694, 척도모수가 1,767,700 값을 가지는지 아닌지를 검정하는 것이다. 여기서, 2.8694와 1,767,700은 가속모델로부터 추정된 형상모수와 척도모수를 나타낸다. 동일성 검정의 귀무가설(H_0)과 대립가설(H_1)은 아래와 같다.

H_0 : 형상모수=2.8694 & 척도모수=1,767,700

H_1 : Not H_0

분석은 Wald 검정방법을 적용하는 미니탭 소프트웨어를 활용하였다. 유의수준 5%, 양측결과에서 P 값(P-value)이 0.1보다 크면 두 비교집단은 유의한 차이를 보이지 않는다고 할 수 있다. P 값은 귀무가설이 옳을 때 실제 샘플로부터 관측될 확률을 의미한다. Fig. 9의 첫 번째 P 값은 형상모수와 척도모수 모두에 대한 검정결과이며, 두 번째와 세 번째의 P 값들은 각각 형상모수와 척도모수 각각에 대한 검정결과이다. 따라서 Fig. 9로부터 가속수명시험의 유효성이 검증되었다고 할 수 있다.

실사용 조건에 대한 시험데이터가 추가적으로 확보되었기 때문에 기존 형상모수와 가속모델의 모수를 수정할 수 있다. 즉, 3 가지 스트레스 조건의 데이터와 사용조건의 데이터를 결합, 분석하여 형상모수와 가속모델의 모수를 추정하는 것이다. 따라서 최종 분석결과는 Fig. 10과 같으며, 와이블 분포의 형상모수는 2.56이며, 형상모수에 대한 95% 신뢰구간은 (2.0213, 3.2434)이다. 그리고 핑거 스트립에 적용한 역승 모델의 상수 K는 9.0627×10^{-27} 이며, 부하에 대한 가속지수 n은 9.93이며, n에 대한 95% 신뢰구간은 (9.1873, 10.6779)로 추정되었다.

3.5 보증수명 예측결과

전자과 차폐용 자기 공명 영상 도어는 하루 약 30회, 연간 1만회를 작동하고, 일반적으로 10년 작동으로 보증수명은 10만 사이클이다. 따라서 핑거 스트립의 목표 보증수명은 신뢰수준 90%에서 B_{10} 수명으로 보장되어야 한다. 그리고, Weibull++ 신뢰성 소프트웨어를 이용하여 구한 사용조건 B_{10} 수명의 90% 신뢰하한은 452,780 사이클이다. 따라서 시험결과로부터 핑거 스트립의 보증수명인 10만 사이클을 충분히 만족하는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 핑거 스트립의 수명을 예측하기 위해 가속수명시험을 하였다. 가속수명시험의 결과로부터 사용조건 수명을 예측하였으며, 보증수명의 만족여부도 평가하였다. 그리고 가속수명시험의 예측 결과와 사용조건에서 실시한 수명시험 결과와 비교하여 가속수명시험의 유효성도 평가하였다. 본 연구의 결론은 아래와 같다.

(1) 핑거 스트립의 가속인자는 부하로 선정하였으며, 이에 따라 가속모델은 역승 모델로 적용하였다. 3가지 부하 스트레스 수준에서 실시한 가속수명시험의 결과 분석을 통해 형상모수 2.87, 가속지수 n은 10.4를 얻었다. 또한 사용조건의 척도모수를 예측한 결과 1,767,700사이클로 나타났다.

(2) 가속수명시험을 통해 예측된 수명의 유효성 확인을 위해 실사용 조건과 동일한 조건으로 수명 시험하여 형상모수 1.81, 척도모수(특성수명)는 1,366,676 사이클로 추정되었다.

(3) 가속수명시험 결과와 사용조건 시험 결과를 비교하기 위해 형상모수와 척도모수에 대한 동일성 검정을 실시하였으며, 검정결과는 모수가 통계적으로 서로 다르지 않다는 결론을 얻을 수 있었다.

(4) 3가지 부하 스트레스 조건에서의 시험결과와 실사용 조건의 시험결과를 결합, 분석하여 최종적으로 얻은 형상모수는 2.56, 부하에 대한 가속지수 n은 9.93으로 추정되었다. 또한 사용조건에 대한 B_{10} 수명의 90% 신뢰하한이 452,780 사이클로 핑거 스트립의 보증수명인 10만 사이클을 충분히 만족하는 것을 알 수 있다.

참고문헌 (References)

- (1) Seo, M. J., Chi, S. W., Kim, Y. J., Park, W. C., Kang, H. J. and Huh, C. S., 2014, "Electromagnetic Wave Shielding Effectiveness Measurement Method of EMP Protection Facility," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering Science*. Vol.25, No.5, pp. 548~558.
- (2) Park, S. S., Hwang, K. B., Kim, J. B. and Kim, J. H., 2010, "Investigation of Deep Drawability and

- Product Qualities of Ultra Thin Beryllium Copper Sheet Metal,” *Transactions of Materials Processing*, Vol.19, No.3, pp. 179~184.
- (3) Heinz P. Bloch and Fred K. Geitner, Machinery Failure Analysis and Troubleshooting, Gulf Professional Pub, 3rd edition, Vol. 2.
- (4) Jeong, H. S., 2007, “A Study on Optimal of Accelerated Life Tests,” *International Research of Reliability Application*, Vol.7, No.2, pp. 57~72.
- (5) Lee, G. H., Kim, H. E. and Kang, B. S., 2003, “Development of Accelerated Life Test Method for Mechanical Components Using Weibull-IPL(Inverse Power Law) Model,” *Proceedings of the 2003 KSME Spring Conference*, pp. 445~450.
- (6) Kim, D. S. and Sung, B. J., 2014, “Accelerated Life Evaluation of Propeller Shaft for Forklift Truck,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 38, No. 11, pp. 1221~1229.
- (7) Reliability Assessment Criteria, 2013, "Electromagnetic Shielding Doorsets," RS-KIMM-2013-0195.