열전모듈의 가속수명시험과 고장분석을 통한 신뢰도 예측

최형석*, 이태원**, 이영호***, 이명현****, 서원선*****

요업기술원 신뢰성평가분석센터
Reliability Assessment & Materials Evaluation Center
Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology
서울시 금천구 가산동 233-5
233-5, Gasan-Dong, Guemcheon-Gu, Seoul, 153-801, Korea
* hschoi@kicet.re.kr
** rel@kicet.re.kr
*** yhlee@kicet.re.kr
**** mhlee@kicet.re.kr
***** wsseo@kicet.re.kr

Abstract

본 논문에서는 가속 수명 시험을 통하여 열전소자의 수명 분포, 모수 등을 규명하였으며 고장 분석을 통하여 열전 소자의 수명 증가를 위한 대책 방안을 논의하였다.

가속 수명 시험 결과 열전 소자는 형상 모수 3.6인 Weibull 분포를 따름을 알 수 있었다. 열전 소자가 반도체 부품임에도 불구하고 형상 모수가 큰 이유는 반복 Bending에 의한 피로 파괴가 발생하기 때문임을 고장 분석을 통하여 규명하였다. 위의 고장 메커니즘을 설명할 수 있는 가속 모델식은 Coffin-Manson식으로 설명되어 질 수 있으며 가속수명시험 결과 재료 상수는 1.8임을 알 수 있었다.

1.서론

열전 소자는 peliter 효과에 의해 열전소자에 직류 전압을 가하면 소자의 한쪽 면은 발열을, 한쪽 면은 흡열을 하는 소자로서 전기 에너지와 열에너지를 서로 교환할 수 있는 일종의 열펌프로서의 역할을 한다. 열전 현상은 전기에너지와 열에너지를 서로 변환할 수 있는 현상을 통틀어 일컫는 것으로 1821년 독일의 Seebeck에 의해 처음 발견되었다. 그후, 1948년이 되어서야 이의 응용연구가 급격히 발전하게 되어 1950년대에 실용화에 이르렀다. 이후 열전 소자는 주로 군수용 및 우주 탐사용 등의 고신뢰성을 요구하는 분야에서 주로 사용되었으며 1980년대에 이르러서야 상업용 제품에 응용되기 시작하였다.

이 소자는 크기가 작고 전기에너지를 이용해 능동적인 온도 제어를 할 수 있는 장점이 있으나 에너지 효율이 적어 활발한 응용이 이루어지지 않았다.

그러나 꾸준한 연구에 의해 에너지 효율이 향상되어 최근 소형 가전제품에서는 기존의 대형 Compressor 방식을 대체하고 있으며 전자 제품, 특히 정확성이 요구되는 광통신 분야에서 능동 온도 보정을 위한 대안으로 주목 받고있다.

열전소자는 n-형과 p-형의 열전 반도체로 구성 되어지며 주로 Bi_2Te_3의 재료를 이용해 만들어진다.(그림 ? 참조) 본 논문에서는 상온용 열전냉각소자인 Bi_2Te_3 계열의

연구만을 진행하였다.

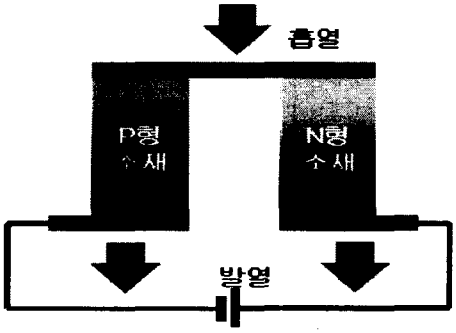

그림 1 열전소자의 개략도

복수개의 p-n 열전 반도체를 열적으로는 병렬로, 전기적으로는 직렬로 연결하고 상하부에 세라믹 기판을 접합시켜 실제 사용 가능하도록 제작된 unit를 열전모듈(Thermoelectric Module)이라고 한다. (그림 2, 3 참조)

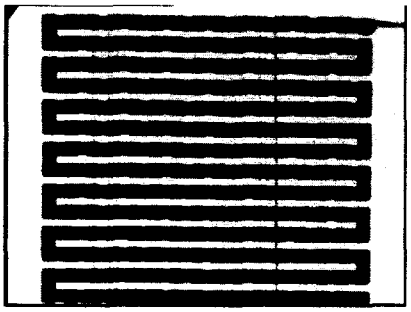

그림 2 열전소자가 배열된 모듈

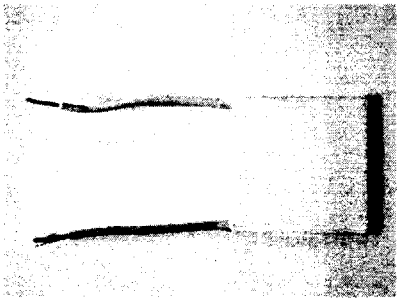

그림 3 열전모듈의 실제 모습

2.열전모듈의고장메커니즘

열전모듈은 모듈자체가 발열 및 흡열이 동시에 이루지기 때문에 온도 구배가 발생하게 된다.(그림 4 참조) 이러한 온도 구배는 세라믹 기판의 팽창과 수축을 유발하여 내부의 열전 소자와 Soldering 부위에 Shear Stress를 발생시키게 된다.

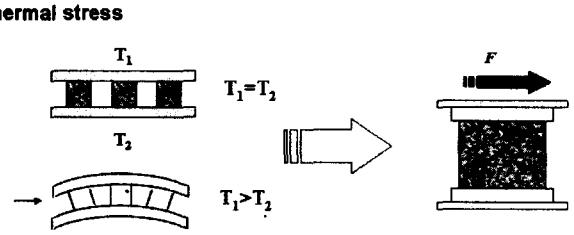

그림 4 열전 모듈의 Shear Stress

또한 일반적으로 127쌍의 열전 p-n 반도체 쌍의 직렬 연결로 인해 하나의 소자가 고장날 경우 전체모듈의 고장이 되므로 신뢰성 면에서 취약한 설계 구조를 가지고 있다.

3.열전소자의고장분석

열전모듈의 고장 메커니즘을 규명하기 위하여 고장품에 대한 비파괴 검사(Visual Inspection, X-ray)와 파괴 검사(SEM, EDS)를 수행하였다.(그림 5 참조)

우선 양품, 불량품의 고장을 검사하기 위하여 육안 및 OM(Optical Microscopy)를 이용하여 검사를 하였다. 그리고 고장의 종류를 추정하기 위하여 전기적 특성 검사를 하였으며 그 후에 비파괴 시험과 파괴 시험을 하였다. 모든 검사를 완료한 후에 Data를 상호 참조해 가며 고장 메커니즘을 추적할 수 있었다.[4]

X-ray 검사 결과 내부에 Void와 Crack, Positioning Error 등 공정상의 Defect가 다량 발견되었다.(그림 6 참조)

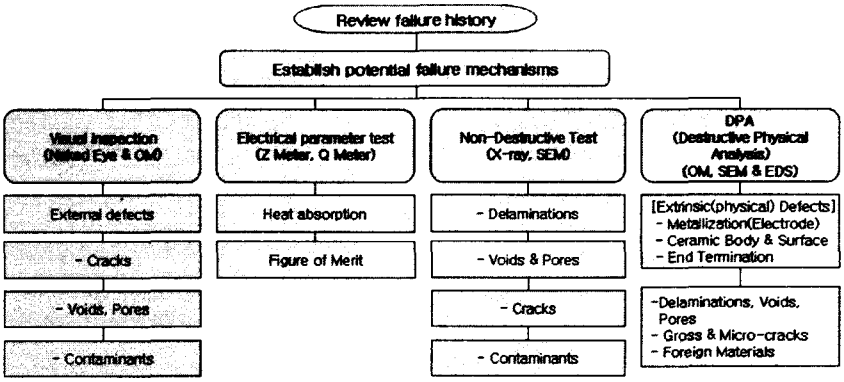

그림 5 고장 분석 Flow chart

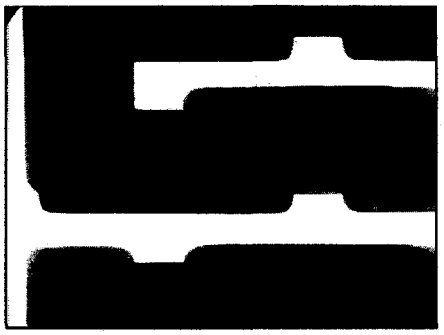

그림 6 X-ray 검사 결과

이러한 Soldering 부위의 Defect는 향후 장기 cycle의 bending이 일어날 경우 Crack Propagation의 시발점의 역할을 하므로 공정상 주의하여야 한다. 이는 그림 7에서 확인할 수 있었다.

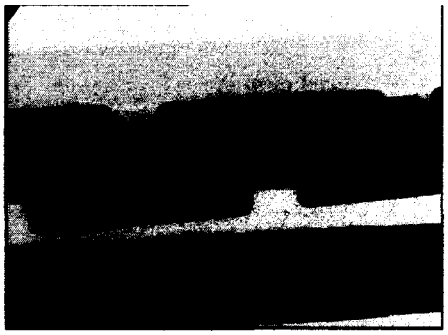

그림 7 Bending Stress에 의한 열전 소자의 밀림 현상

그림 7에서는 열전 소자가 주기적인 Bending Stress에 의해 밀려 나와 있는 모습을 볼 수 있다. 이러한 밀림 현상이 열전 모듈의 가장 자리 부분에서만 발견되는 것은 Bending Stress에 의한 고장이라는 것을 확인시켜 준다. 가장자리에 위치한 열전 소자일수록 열팽창량의 차이는 커지므로 Shear Stress의 양도 커지기 때문이다.

열전 모듈은 n,p형 반도체로 장기 사용시 carrier가 양측의 전극 부위인 solder, flux. Cu 등에 확산되는 현상이 발생한다. 이를 확인하기 위하여 파괴 검사로는 SEM과 EDS를 이용하여 성분 분석을 하였다.(그림 8 참조)

분석 결과 Diffusion한 Carrier 농도가 오

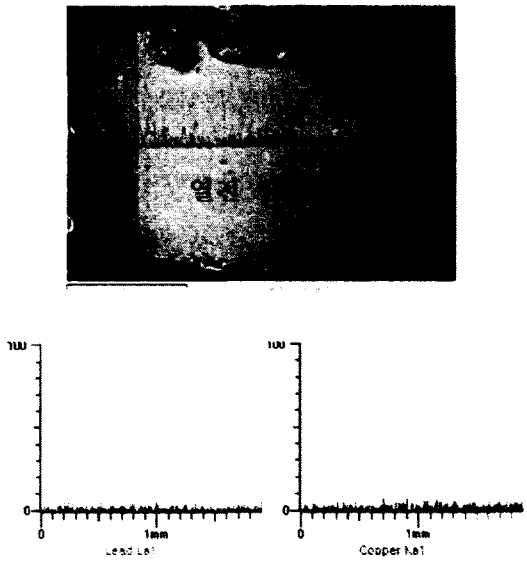

그림 8 SEM&EDS에 의한 Diffusion 분석

차 범위 이하로 나타나 Diffusion에 의한 성능 저하는 없는 것으로 판명되었다.

4.고장메커니즘과 고장모델

고장 분석에 의해 규명된 열전 모듈의 주요 고장 메커니즘은 아래와 같다.

온도 구배에 의해 Bending이 발생하고 이 Bending에 의해 내부 소재 중 가장 Brittle 한 Solder 부위에 Shear Stress가 집중되게 된다. 비파괴 검사 결과 Solder 부위에 다량의 Voide와 Defect가 검출되었으며 따라서 장기 Cycle 동작함에 따라 Solder 부위의 Defect 부위가 피로 파괴 및 Crack Propagation되어 Open이 된다. 더욱 장기 사용이 되면 Crack 부위와 열전 반도체 부위의 마찰에 의해 열전 반도체의 마모가 발생하게 된다.

습기에 의한 Short나 반도체 carrier의 diffusion에 의한 성능 저하는 발견되지 않았다.

이러한 고장 메커니즘은 Coffin-Manson 모델에 의해 적절하게 설명되어질 수 있다.[3],[5]

Coffin-Manson식은 Inverse Power Model의 일종으로 온도 주기(Thermal cycling)에 의한 금속의 피로 고장(fatigue failure)에 많이 사용되고 있으며 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$N=(\frac{\alpha}{\Delta T})^{\beta} \qquad (1)$$

여기서 N은 동작 cycle 수, α는 일반 상수이며 β는 재료 상수이다. 이 모델식에 의해 가속 모델을 구하면 식 (2)와 같다.

$$AF=(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2})^{\beta} \qquad (2)$$

여기서 AF는 가속계수(Acceleration factor)이며 ΔT_1, ΔT_2 는 각각 온도 조건에서의 스트레스 조건이다.

5.가속수명시험

5.1 Two stage QFD

열전모듈의 수명 시험을 위하여는 QFD 설계가 필요하다.[7]

Failure mode / Requirements (stress and performance)	단락 (short)	저항 및 Z값 변화	Corrosion	파괴, crack
온도	○	◎	◎	○
습도	◎	◎	◎	
과전압	○	○	○	○
stress	○	○		○
Migration	○	○	○	
열충격	◎	◎		○
점수	22	24	16	12

표 1 Two level quality function deployment - Requirements(stresses and performance) and failure mode matrix

Test methods / Failure mode	내환경 시험					수명 시험
	열충격 시험	내습 시험	진동 시험	염수분무 시험	과부하시험	
단락	○	○	○	◎	◎	○
저항 및 Z값 변화	○	○	○	○		◎
Corrosion	○	○		○		◎
crack, 파괴	○		○	○	○	○
점수	12	9	9	14	8	16

표 2 Failure modes and test methods matrix

QFD 설계 결과 열전모듈의 고장에 가장 영향을 미치는 항목은 수명 시험인 것으로 판단되었다.

5.2가속수명시험방법

가속수명시험은 3가지로 구분할 수 있다. Cycle 수를 증가시키는 방법과 외부 Stress를 가속시키는 방법, 자체 성능 수준을 약하게 잡으므로서 빨리 고장을 판정하는 방법 등이다. 열전 모듈의 경우 Cycle수를 증가시키는 방법을 사용하였으며 외부 Stress인 사용 온도 범위(ΔT)를 가속시켜 수명식을 구하였다.

자체 발열 및 흡열에 의한 온도 cycle시험 조건만으로 한정하였다. 가속 시험 방법은 그림 12와 같다.

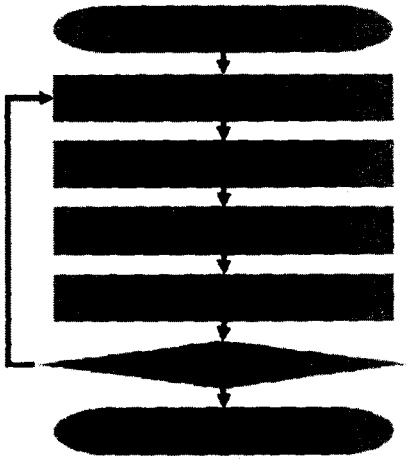

그림 12 가속수명시험 방법

열전 모듈은 순방향 및 역방향 전압에 의하여 흡열, 발열 위치가 바뀌므로 순방향 전압과 역방향 전압을 바꾸어 가며 온도 사이클 시험을 수행하였다. 온도 가속 조건은 표 3과 같다.

Factor / Run	Temperature(℃)	No. of Sample
1	20℃~90℃	8
2	10℃~90℃	8

표 3 Test Matrix

5.3.가속수명시험결과

가속 시험 결과 열전 모듈은 형상모수 3.6인 Weibull 분포를 따르는 것으로 밝혀졌다.(그림 13 참조)

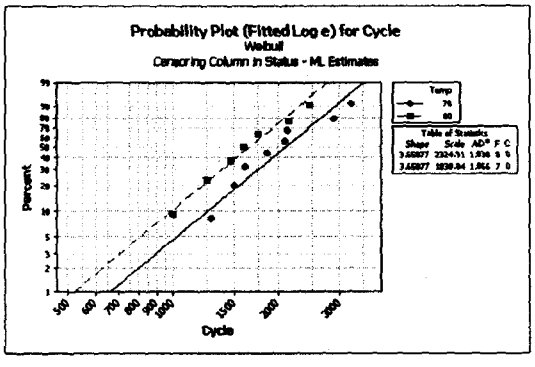

그림 13 열전냉각모듈의 가속 수명 Data

주기적인 Stress에는 수명 모델로서 Coffin-Manson Model을 적용하였다.(식3, 4 참조)

가속수명시험 결과를 Coffin-Manson Model에 적용한 결과 α는 4,651,000, β는 1.78914로 계산되었다. 일반적으로 Solder의 경우 Coffin-Manson Model에서 재료상수가 2에서 3인 것을 감안한다면 수명시험의 결과는 적절하다고 판단된다. 실험에 따른 수명식은 식 (3)과 같다.

$$N=(\frac{4,651,000}{\Delta T})^{1.78914} \quad (3)$$

식 4에 의하면 가속식을 구할 수 있다.

$$AF=(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2})^{1.78914} \quad (4)$$

6.신뢰도분석

그림 14는 식(3)에 의하여 구하여진 온도 사이클 범위에 따른 예상 cycle(N)의 그래프이다. 정상적인 조건에서의 열전 모듈의 온도범위는 ΔT=50℃(40℃~90℃)이므로 4,245cycle 임을 예측할 수 있다.

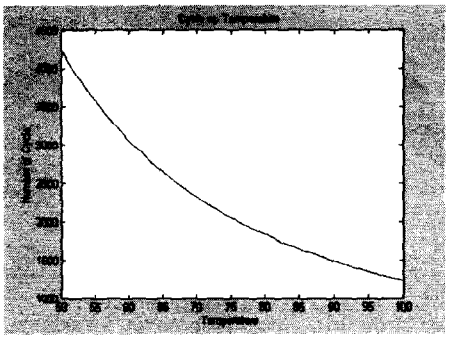

그림 14 ΔT에 따른 평균 동작 cycle

그림15는 ΔT에 따른 가속계수 그래프이다.

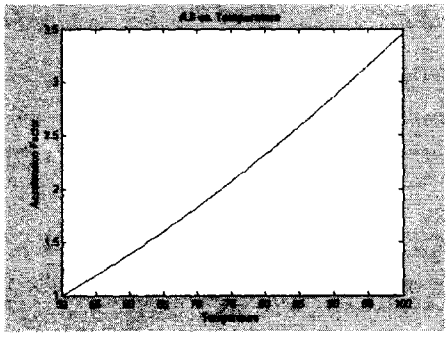

그림 15 ΔT에 따른 평균 가속계수

일반적으로 전자 부품의 수명 분포는 지수 분포인 것이 일반적이다. 더구나 3.6이란 숫자는 Weibull 분포의 형상 모수로도 큰 숫자로서 이는 마모 메커니즘이 상당히 우세하다는 의미이며 이는 고장품에 대한 고장 분석 결과에서 확인 되었다. 열전모듈은 전자 부품이므로 수명이 지수 분포가 되는 것이 정상이나 열전 모듈의 온도 구배에 따른 기계적 스트레스에 의해 형상 모수가 커지게 된다.

7.결론

본 논문의 연구 결과 열전모듈의 고장 메커니즘을 규명할 수 있었다. 이에 기초로 한 가속 시험 방법을 수립하여 가속 수명 시험을 하였으며 열전 모듈의 수명 분포와 형상 모수를 밝혀내어 가속 모델을 수립할 수 있었다. 본 논문의 결과들은 향후 새로운 열전 모듈을 개발할 때 신뢰성 향상을 위해 도움이 될 것으로 기대된다.

Reference

[1] 배도선, 전영록(1999), 신뢰성분석, 대우학술총서

[2] 배도선 외 7명(2003), 통계학 이론과 응용, 청문각

[3] 서순근(2002), 미니탭 신뢰성분석, 이레테크.

[4] John W. Evans and Jilian Y. Evans(2001), Product Integrity and Reliability in Design, Springer

[5] Patrick D. T. O'connor(1991), Practical Reliability Engineering, John Wiley & Sons

[6] W.Q. Meeker and g. J. Hahn(1995), How to Plan an Accelerated Life Test - Some Practical Guidelines, Vol. 10 of the ASQC Basic References in Quality Control: Statistical Techniques

[7] T. L. Tran, and J. S. Sherif(1995), "Quality Function Deployment (QFD): An Effective Technique for Requirements Acquisition and Reuse," *IEEE Second International Conference on Engineering Software Standards*, Montreal, Canada