

정수기 적용 열전모듈의 가속수명시험

문지섭*, 이성민*, 정선용*, 김명수***
코웨이 환경기술연구소*, 수원대학교 산업공학과**

An Accelerated Life Test of Thermoelectric Module for Water Purifier

Ji Seob Moon*, Sung Min Lee*, Seon Yong Jeong*, Myung Soo Kim***
*Environment Technology Institute, Coway Co., Ltd.**
*Dept. of Industrial Engineering, Univ. of Suwon***

<Abstract>

This paper presents an accelerated life test to estimate the lifetime of thermoelectric module for home water purifier. Clamping force and thermal cycle are selected as accelerating variables through the technical review about failure mechanism. It is assumed that its lifetime follows weibull distribution. The relationship, acceleration factor, and BP life at design condition are estimated by analyzing the accelerated life test data.

Key Words: Thermoelectric Module, Water purifier, Accelerated Life Test, Inverse Power Model

1. 서 론

종래의 정수기(Water Purifier)는 압축기를 이용하여 냉매를 압축, 순환시킴으로써 물을 냉각하는 방식을 사용하고 있다. 그러나 냉매압축 방식 정수기의 경우 냉매 배관, 열교환기 등의 부품들이 사용되기 때문에 제품의 소형화에 한계가 있고, 압축기를 사용하기 때문에 정수기 작동 시에 많은 소음이 발생하는 문제점이 있으며 환경 파괴의 원죄론에서 자유로울 수 없는 단점이 있다. 반면에 열전모듈(Thermoelectric Module)을 이용한 냉각 방식은 Peltier 효과를 이용하는 반도체 냉각 방식으로, 오존층 파괴와 온실효과를 일으키는 프레온 가스 등의 냉매를 사용하지 않기 때문에 환경 친화적이며, 구조가 간단하면서도 기계적 작동 부품이 없기 때문에 소음과 진동이 없는 등의 장점을 가지고 있다. 따라서 압축기를 사용하는 냉각 방식의 문제점을 해결하기 위해 업계에서는 수 년 전부터 열전모듈을 이용한 정수기를 개발해왔으며, 이미 몇몇 업

체에서는 열전모듈을 이용한 제품이 개발되어 시판되고 있다.

열전모듈의 주요 적용 분야는 회로의 국소 부위에 대한 선택적인 냉각이 가능한 장점을 가지고 있어, 전자부품의 소형화, 고전력화, 고밀도 실장화 추세에 부응하여 선진 각국에서 적외선 센서, 레이저 다이오드 및 CCD 소자의 focal plate 냉각 등 각종 전자기기나 IC 제품의 국부 냉각에 전자냉각방식이 적용되고 있으며, 과학 계측 장비, 의료용 장비뿐만 아니라 냉장고, 에어컨 및 열교환기 등의 가전산업 분야에도 점차 응용 범위가 확대되고 있다. 국내에서도 이미 전자냉각방식을 이용한 냉정수기, 김장독, 자동차용 냉온장고, 물수건제조기 등 다양한 가전제품 분야, 컴퓨터 CPU 칩의 cooler, 광통신용 레이저 다이오드 모듈레이터, 잉크젯 프린터 헤드의 항온제어 등 전자부품 분야와 이동통신 무인기지국, 통신용 전자부품 캐비닛 등에 전자냉각방식이 적용되고 있다. 더욱이 대기오염 물질인 프레온가스의 사용 규제에 따라 이를 대체한

* 교신저자 mskim@suwon.ac.kr

전자냉각방식의 소형 냉동 냉장고, 냉풍기 등 새로운 가전제품의 출현이 예상되며, 차세대에 출현이 예상되는 전기자동차는 구조상 컴프레서의 채용이 불가능하므로 전자냉각방식의 air conditioner로 대체될 것이 예상된다.

최근 기술 발전 속도가 빨라짐에 따라 제품의 수명 주기(life cycle)와 개발 기간이 단축되어 있으며, 개발기간 중에 신기술과 부품을 적용함에 따른 설계상의 문제와 신뢰성을 보증하기 위한 충분한 시간이 부족한 실정이다. 따라서 시험 시간을 단축하여 신뢰성을 빨리 평가할 수 있는 가속수명시험(Accelerated Life Test)의 요구되며(가속수명시험 Guideline (2004)), 이는 정수기의 경우도 예외는 아니다.

열전소자는 흡열부를 이용하여 정수의 물을 차갑게 유지시키는 핵심 부품이다. 국내 및 해외 정수기 시장에서 95% 이상이 압축기 방식을 이용하고 있으며, 열전소자를 이용한 제품 개발은 타사에 비해 기술적 우위를 점할 수 있다. 따라서 제품의 소형화, 친환경적인 제품으로 해외시장의 확대 및 제품의 소형화를 위해서는 열전소자의 신뢰성 확보가 중요하다. 본 논문에서는 열전소자의 FMEA 및 FTA분석 결과에 기초하여 열전소자의 흡열성능 열화를 가속하기 위한 가속수명시험을 설계하고 가속계수와 사용조건에서의 B₅ 수명을 추정한다.

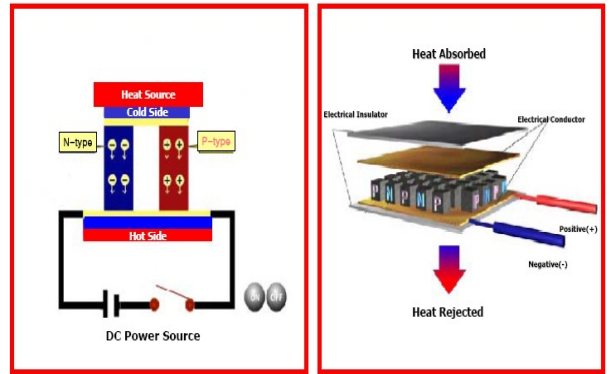
2. 열전소자의 원리 및 고장분석

2.1. Peltier 효과

Peltier 효과는 이종 재료의 양단에 직류 전류를 인가하면 한쪽 면이 발열하고 다른쪽 면이 흡열하는 현상으로, 1834년 Jean Peltier에 의해 발견되었으며 열전 모듈에 의한 냉각을 가능하게 하는 기본 개념이 되고 있다.

<그림 1>의 n-type 소자에 (+)방향의 DC 전류를 흘리면, p-type 소자 쪽에서 n-type 소자쪽으로 전자가 이동이 나타남과 동시에 cold side 열을 흡수하면서 온도가 떨어지게 된다. 또한 흡수한 열은 모듈의 hot side 쪽

으로 이동하게 되며 heat sink 주위로 방출되게 된다. 그리고 공급 전원의 극성을 바꾸게 되면 냉각과 발열 현상이 역전된다(이민재 외 (2007)).



<그림 1> 열전모듈의 원리

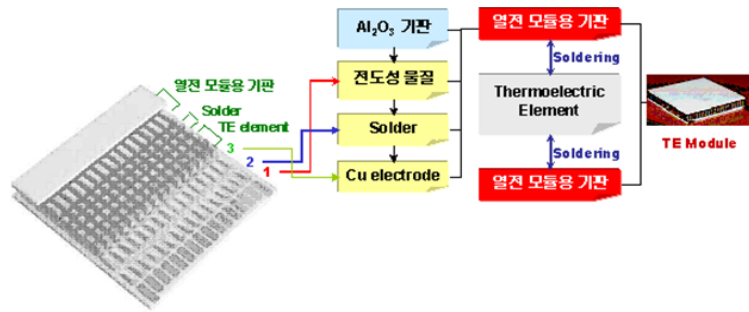
2.2. 열전모듈의 구조

2.2.1. 기존 soldering type 열전모듈의 구조

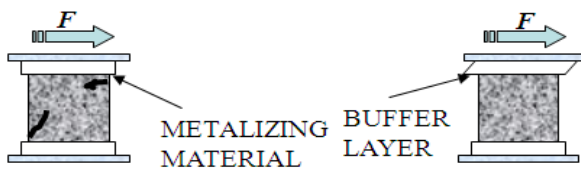
일반적인 단층 모듈은 그림에서 보는 바와 같이 두 개의 세라믹 기판 사이에 2개 이상의 p-type 및 n-type 열전 반도체소자(Bi-Te 계열)쌍 들이 solder에 의해 고정되어 있는 구조를 가진다. 이때 열전소자들은 전기적으로는 직렬 구조로 열적으로는 병렬 구조로 구성된다. <그림 2>는 일반적인 열전모듈 구조로서 세라믹 기판 위에 Ag, W, Mo, Mn 등의 전도성 물질을 인쇄 및 소결한 후 Sn 또는 Ni 도금 된 Cu plate를 soldering에 의해 부착하여 전기적 pattern을 형성한다. 이렇게 형성된 Cu electrode 위에 p형과 n형의 TE element를 soldering에 의해 접합하여 열전모듈을 완성한다.

2.2.2. 변경 Glue 열전모듈의 구조

p-type 및 n-type 열전 반도체소자 쌍들이 solder에 의해 고정되어 있는 구조를 세라믹 위에 동패턴을 올릴 때, <그림 3>과 같이 전도성을 가진 glue를 올려서 기계적 충격을 완충 작용하도록 하였다. 이 완충 작용은 열 응력뿐만 아니라 기계적 응력을 이완하는 역할을 하여 수평 crack에 대한 내구성이 향상될 것으로 예상되며 변경된 glue 열전모듈의 구조품에 대해서 가속수명시험을 진행하고자 한다.



<그림 2> 열전모듈의 구조



<그림 3> 열전모듈의 Buffer Layer

2.3. 열전모듈의 고장분석

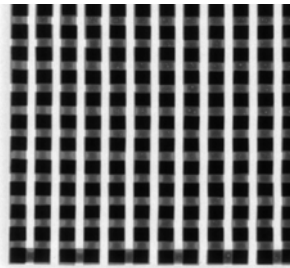
정수기용 열전모듈 선정을 위해 L사 및 H사 제품을 실사용 조건에서 내구성시험을 수행하였으며, 시험 후 발생한 고장 원인을 조사하기 위해 전기적 특성 검사를 수행한 결과, <표 1>과 같이 고장 형태는 저항값의 변화로 확인되었다. 고장의 판정 기준은 초기 저항값

대비 5% 변화로 정하였다. 기술적 검토 결과, 열전모듈은 이종 금속간 열팽창계수의 차이 및 온도구배에 의해 도입된 열충격에 의한 고장모드(Failure Mode)에 의해 쉽게 soldering layer에서 수평 crack이 일어남으로서 신뢰성에 약한 치명적인 한계를 안고 있으며(최형석 외 (2004)), 이와 같은 고장메커니즘을 규명하기 위하여 고장품에 대한 비파괴검사(X-ray 및 SAM) 및 파괴검사(Chemical Decap 및 OM)를 수행하였다.

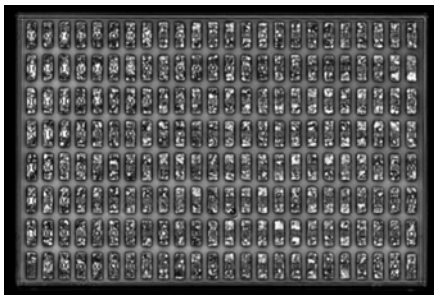
<그림 4> 및 <그림 5>는 X-ray 및 초음파 검사 결과로서, 다량의 void가 관찰되었으며 이는 soldering 부위의 void로 판명되었다.

<표 1> 실사용 조건에서의 내구성 시험 결과

시료번호	L社		H社		
	초기 저항값(Ω)	고장 저항값(Ω)	시료번호	초기 저항값(Ω)	고장 저항값(Ω)
L4A-1	3.0879	3.4087	H4A-1	3.0784	3.2678
L4A-3	3.1436	17.397	H4A-2	3.0419	3.2431
L4B-6	3.0814	3.2797	H4A-3	3.0714	3.2671
L4B-7	3.1135	3.9355	H4B-6	3.047	3.7815
L4B-8	3.0976	2.2151	H4B-7	3.039	3.2159
L4C-13	3.0981	3.2739	H4C-13	3.0474	3.3137
L4C-14	3.0815	3.3828	H4C-14	3.0644	11994
L4C-15	3.0876	3.3744	H4C-15	3.0436	3.2271
L4D-20	3.0906	12884	H4D-20	3.0477	3.2444
L4D-21	3.1098	3.3011	H4D-21	3.0628	3.2482
L4D-22	3.0881	3.2332	H4D-22	3.0426	14661
L4E-32	3.0899	3.6931	H4E-32	3.0531	3.6176
L4E-33	3.0864	3.6723	H4E-33	3.0339	3.2333
L4E-34	3.0675	3.2822	H4E-34	3.0703	3.2919
L4E-35	3.0927	3.7121	H4E-35	3.0459	3.6352

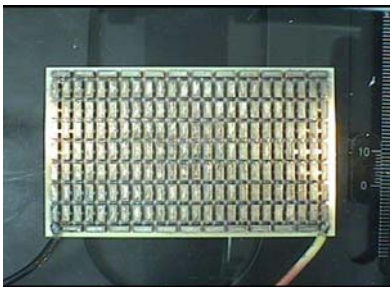


<그림 4> X-ray 검사 사진



<그림 5> 초음파(SAM) 검사 사진

열전소자 모듈 내부 관찰을 위해 발연질산 93%, 120°C 환경 하에서 개봉(Decap)하였다. <그림 6>은 개봉된 열전소자 모듈 내부를 보여주고 있다.



<그림 6> 개봉된 열전소자 모듈

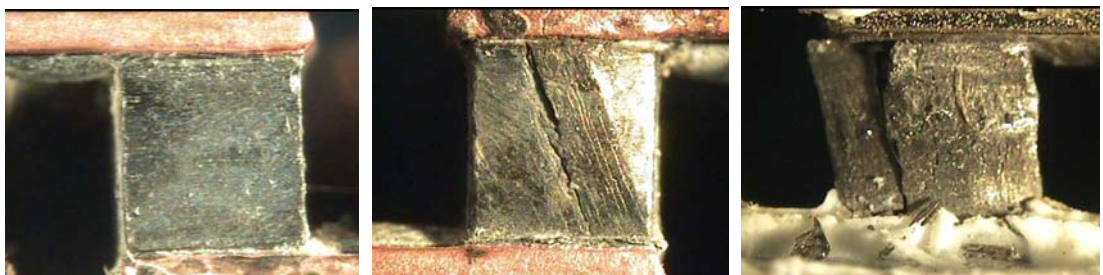
<그림 7>은 내구성시험 전/후 열전소자 표면을 현미경으로 관찰한 결과로서, 시험 전 대비 시험 후 열전소자 표면에 crack이 발생된 것을 알 수 있다. 열충격에 의한 shear stress가 solder 부위가 아닌 열전소자 자체에 집중되어 45° 방향으로 crack이 발생되었으며 <그림 7-b>, 이와 같은 crack으로 인하여 초기 대비 저항값이 상승한 것으로 보여진다. 또한, <그림 7-C>는 내구성 시험 중 발생한 open 고장 열전소자를 보여주고 있다.

3. 열전모듈의 가속수명시험

3.1. 가속수명시험 계획

고장분석에 의해 규명된 열전모듈의 주요 고장메커니즘에 따라 p-n 반도체의 직렬 연결 부위의 shear stress에 의한 crack을 가속할 수 있는 가속수명시험을 설계하기 위하여, <표 2> 및 <표 3>과 같이 2-stage QFD 설계를 실시하였다.

가속수명시험에서 재료의 물성이 변하지 않고, 고장 모드와 메커니즘이 사용 조건과 동일하도록 시험 조건을 설정하기 위하여 온도 Cycle은 0°C~90°C와 -10°C~90°C로 2수준을 선정하였으며, 체결력은 10kgf*cm와 12kgf*cm로 2수준을 선정하였다. <표 4>는 열전모듈 가속수명시험의 가속스트레스와 수준을 나타내며, 온도 cycle의 경우 순방향 및 역방향 전압에 의하여 흡열, 발열 위치가 바뀌므로 순방향 전압과 역방향 전압을 바꾸어가며 온도 사이클 시험을 수행하였다.(열전냉각소자 RS L 0002:2004 (2004)).



(a) 시험 전 시료 (b) 저항값 증가 시료 (c) Open 고장 시료

<그림 7> 내구성 시험 전/후 열전소자 표면 관찰 결과

<표 2> Two level quality function deployment Requirements and failure mode matrix

Stress \ 고장모드	저항 및 Z값 변화	단락(Short)	부식(Corrosion)	Crack
온도	◎	△	○	◎
체결력(전단응력)	◎	△	△	◎
습도	○	◎	◎	△
과전압	○	○	○	○
열충격	◎	○	△	◎
점수	21	13	13	19

(점수 척도 : ◎ 매우밀집 5점 / ○밀집 3점 / △보통 1점)

<표 3> Failure mode and test methods matrix

고장모드 \ 시험방법	열충격시험	내습시험	염수분무시험	과부하시험
저항 및 Z값 변화	◎	○	△	○
단락(Short)	○	◎	○	○
부식(Corrosion)	△	◎	◎	○
Crack	◎	△	△	○
점수	14	14	10	12

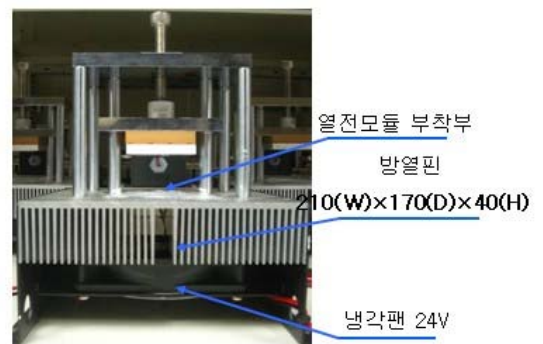
(점수 척도 : ◎ 매우밀집 5점 / ○밀집 3점 / △보통 1점)

<표 4> 가속 스트레스 수준

Stress	1수준	2수준	비고(사용조건)
온도	0~90℃(Δ90℃)	-10~90℃(Δ100℃)	-5~65℃(Δ70℃)
체결력	10kgf*cm	12kgf*cm	8kgf*cm

3.2. 가속수명시험 실시

가속수명시험은 온도를 측정하여 목표 온도에 도달하면 역전압을 인가할 수 있도록 <그림 8>과 같이 지그를 제작하여 수행하였으며, 일정 시간까지 목표 온도에 도달하지 못하는 경우는 횡수를 측정하였고, 그 측정기록에 따른 가속수명시험에서의 고장 시간은 <표 5>와 같다(열전냉각소자 RS L 0002:2003 (2004)).

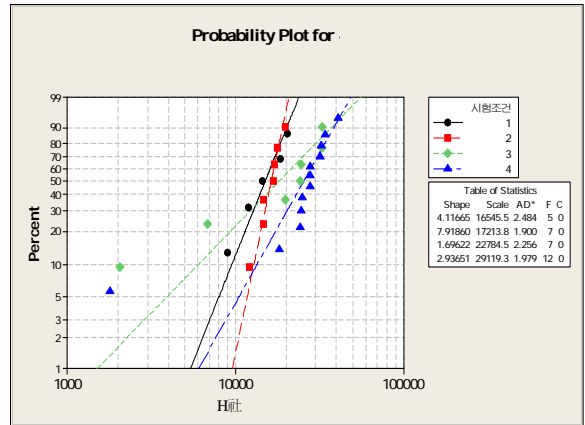
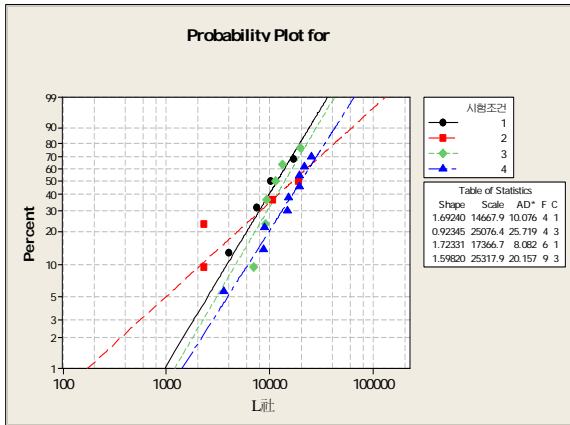


<그림 8> 열전모듈 가속수명시험 지그

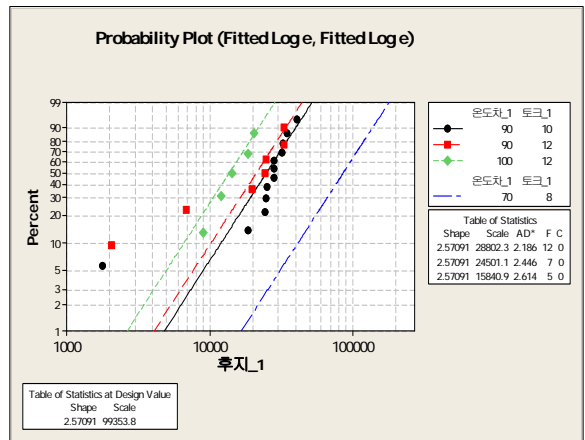
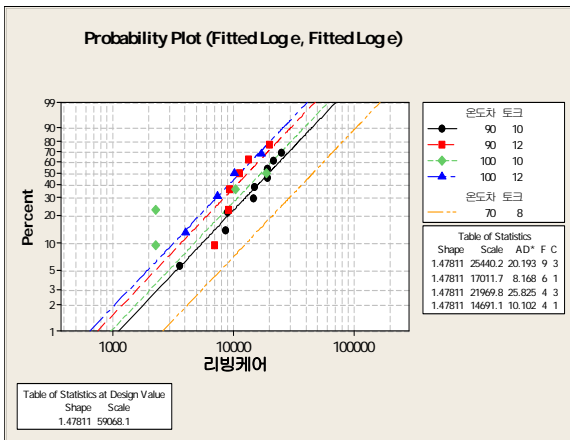
<표 5> 가속수명시험 데이터

시료 번호	가속 조건	L社 열전모듈(Cycle)				H社 열전모듈(Cycle)			
		△90℃, 10kgf*cm	△90℃, 12kgf*cm	△100℃, 10kgf*cm	△100℃, 12kgf*cm	△90℃, 10kgf*cm	△90℃, 12kgf*cm	△100℃, 10kgf*cm	△100℃, 12kgf*cm
1		3632	7064	18971	4031	34570	19868	12110	20459
2		25469	11358	2311	10262	40887	2061	14784	14499
3		19341	19922	10603	7468	1794	33183	16834	18733
4		8960	9306	2311	17184	28183	24544	17189	12046
5		21671	9158	21068(*)	20174(*)	32690	24768	17850	9087
6		14795	13424	21068(*)	-	28178	33080	19929	-
7		8724	31071(*)	21068(*)	-	28077	6826	14721	-
8		19462	-	-	-	25226	-	-	-
9		15169	-	-	-	32382	-	-	-
10		33178(*)	-	-	-	18472	-	-	-
11		33178(*)	-	-	-	24913	-	-	-
12		33178(*)	-	-	-	24451	-	-	-

(* : 정시중단)



[그림 9] Weibull 분포 확률용지에 타점 결과(가속성 검토)



<그림 10> 가속수명 DATA 분석(형상모수 동일)

3.3. 데이터 분석

가속수명시험을 통하여 수집된 데이터에 적합한 수명분포를 가정하기 위해 Anderson Darling(AD) 통계량과 결정계수를 확인한 결과, Weibull 분포에 가장 적합한 것으로 나타났다. 4개의 가속수명시험 조건의 데이터를 확률용지에 타점한 결과는 <그림 9>와 같다.

H社의 열전모듈 중에 시험조건인 $\Delta 100^{\circ}\text{C}$, $10\text{kgf}\cdot\text{cm}$ 의 수명분포 추정선의 기울기가 다른 조건과 확연하게 차이가 있음을 볼 수 있으며, 통계적 분석 결과 다른 조건과의 형상모수가 일치하지 않음을 확인하였다. 따라서 이 조건에서는 고장메커니즘이 다른 것으로 판단되어 가속수명시험 데이터 분석에서 제외하였다. <그림 10>은 $\Delta 100^{\circ}\text{C}$, $10\text{kgf}\cdot\text{cm}$ 를 제외한 나머지 3개 조건의 데이터를 확률용지에 타점하고 가속수명시험 데이터를 분석한 결과이다(서순근 (2002)).

가속수명시험 모델을 추정하기 위해서는 수명분포와 수명-스트레스 관계식을 가정해야 한다. 수명분포는 분포의 적합성 검토를 통해 선정된 Weibull 분포를

가정하였고, 중앙수명 $\eta(T)$ 가 온도(δT)와 체결력(F)에 대하여 다음과 같은 온도-비열(Temperature-Nonthermal) 관계를 만족한다고 가정하였으며, 그 형태는 Inverse Power Model이 곱해지는 형식으로 가정하였다.

$$\eta(T) = A(\Delta T)^{-\gamma} \times (F)^{-\delta} \quad (1)$$

식 (1)을 양변에 대수(ln)을 취하면 다음과 같이 나타낼 수 있다(가속수명시험 Guideline (2004)).

$$\ln[\eta(\Delta T, F)] = \ln A - \gamma \ln(\Delta T) - \delta \ln(F) \quad (2)$$

여기서 A , η , δ 은 상수이고, ΔT 는 절대온도, F 는 체결력(Torque)이다. 가속수명시험 데이터 분석 소프트웨어인 Minitab을 이용하여 Weibull 분포의 모수와 수명-스트레스 관계식의 모수들을 추정하면 <표 6>과 같으며, 가속계수는 <표 7>과 같다.

<표 6> Weibull 분포와 수명-스트레스 관계식의 모수 추정치

모수	L社 열전모듈			H社 열전모듈		
	점추정치	95% 양측 신뢰구간		점추정치	95% 양측 신뢰구간	
		신뢰하한	신뢰상한		신뢰하한	신뢰상한
β	1.47	1.04	2.09	2.57	1.80	3.66
A	21.49	-4.03	47.01	30.93	13.70	48.16
γ	-1.39	-6.93	4.14	-4.13	-8.38	0.10
δ	-2.20	-5.29	0.87	-0.88	-2.88	1.10

<표 7> 열전모듈의 가속계수 추정식

	L社 열전모듈	H社 열전모듈
가속계수(AF)	$(\Delta T_d / \Delta T_a)^{-1.391} \times (F_d / F_a)^{-2.20}$	$(\Delta T_d / \Delta T_a)^{-4.13} \times (F_d / F_a)^{-0.88}$

<표 8> 사용조건에서 열전모듈의 Bp 수명 추정

Bp 수명	L社 열전모듈			H社 열전모듈		
	점추정치	95% 양측 신뢰구간		점추정치	95% 양측 신뢰구간	
		신뢰하한	신뢰상한		신뢰하한	신뢰상한
5	7918	1153	54342	31292	10297	95096
10	12887	1984	83676	41403	14157	121086
50	46096	7659	277411	86153	31294	237181

가속성이 성립하지 않는 H社의 $\Delta 100^{\circ}\text{C}$, $10\text{kgf}\cdot\text{cm}$ 를 제외하고 온도와 압력에 의한 Bp 수명을 추정하면 <표 8>과 같고, H社의 열전모듈 제품이 신뢰성 측면에서 우수한 것으로 나타났다.

4. 결론

본 논문에서는 정수기용 열전모듈의 가속수명시험에 대해 다루었다. Shear stress에 의한 crack을 가속하기 위하여 온도 및 체결력을 가속하는 가속수명시험을 설계하였다. Weibull 분포와 온도-비열 수명-스트레스 관계를 가정하고 데이터를 분석하여 사용조건에서의 Bp수명을 추정하였다. 본 연구를 통해 열전소자 모듈의 평가 및 개발 기간을 단축할 수 있게 되었고, 부품의 보전 및 예비 부품 계획 수립 혹은 목표 신뢰도를 만족하는 적합한 부품 선정에 위한 자료로 유용하

게 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] 가속수명시험 Guideline - 1부 가속수명시험의 개요 (2004), 수원대학교 신뢰성혁신센터
- [2] 이민재, 공상운, 김종수 (2007), 열전소자를 이용한 가정용 의류 건조기의 성능에 관한 실험적 연구, 대한기계학회, pp. 2073-2076.
- [3] 최형석, 이태원, 이영호, 이명현, 서원석 (2004), 열전모듈의 가속수명시험과 고장분석을 통한 신뢰도 예측, 한국신뢰성학회, pp. 123-128.
- [4] 열전냉각소자 RS L 0002:2004, 산업자원부 기술표준원, 2004.
- [5] 서순근 (2002), 미니탭 신뢰성 분석, 이레테크.
- [6] 가속수명시험 Guideline - 3부 가속수명시험 데이터 분석 (2004), 수원대학교 신뢰성혁신센터