

## 온도차를 이용한 열전발전기의 sliding에 따른 열응력 특성

우병철, 이희용, 이동윤, 김봉서, 김병걸, 서창민\*  
한국전기연구소 전기재료연구부, 경북대학교 기계공학부\*

### Characteristics of thermal stress for thermoelectric generator with sliding

B. C. Woo, H. W. Lee, D. Y. Lee, B. S. Kim, B. G. Kim, C. M. Suh\*  
Korea Electrotechnology Resaerch Institute, Kyungpook National University\*

**Abstract** - The purpose of this study is to manufacture and test a thermoelectric generator which converts unused energy from close-at-hand sources, such as garbage incineration heat and industrial exhaust, to electricity.

A manufacturing process and the properties of a thermoelectric generator are discussed before simulating the thermal stress and thermal properties of a thermoelectric module located between an aluminum tube and alumina plate.

It was shown that the electric voltage of a thermoelectric generator with 128 thermoelectric modules was 4.8 voltage per Kelvin, and the longitudinal stresses of an aluminum tube with a two-point constrained tube could be released more than those with a one-point constrained tube.

### 1. 서 론

Thermoelectric generator는 양단의 온도차에 의해서 발생되는 기전력을 이용하는 발전방법이며 Seebeck 효과에 따른 결과이다. 이러한 열전발전은 기본적으로 온도차를 이용하여 전기를 얻을수 있기 때문에 경제성을 고려하지 않는다면 지구상에 존재하는 어떤 종류의 열도 열원으로 이용할 수 있다. 즉 태양열, 지열 등의 자연에너지와 화석연료를 이용한 가열에너지 및 도시배열, 산업폐열 등의 폐열 에너지 등이 모두 열전발전의 주 에너지원으로 사용할 수 있다. 이러한 열전발전기는 구동부가 없어 소음이나 진동이 없으며 수명이 길고 신뢰성이 높으며 회전부가 필요 없다는 장점이 있으나 변환효율이 최고 10%선이고 가격이 높다는 단점이 있다. 이러한 장점과 단점에도 불구하고 선진외국에서는 수십에서 MW급까지 다양하게 개발되어 군용, 산업용, 우주용으로 많이 이용되고 있다.

열전발전에 관련된 연구는 주로 미국과 러시아를 중심으로 많은 연구가 진행되고 있으며 SNAP-3B, SNAP-9A, Apolio12-17, Viking1-2, Pioneer10-11, Galileo, Voyager1-2호 등의 우주선과 Space station용인 SP-100 등에서 많이 이용되었다. 특히 러시아에서는 핵추진 잠수함에서도 대규모의 열전발전모듈을 사용하여 발전하였다고 알려져 있으며 최근에서 Solar Pond, 해수, 지열 온도차를 이용한 발전 등에서 많은 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 국내에서 생산되는 열전모듈을 이용하여 평판형 열전발전기를 설계, 제작하였으며 열응력의 완화를 위해서 thermal grease를 사용하였으며 온도상승으로 발생된 응력을 미끄럼방생으로 완화하려고 하였다.

이러한 특성은 실제 어떤 양상으로 변화될 것인지

simulation으로 확인하고자 하였으며 ANSYS package를 이용하여 열해석하고 이에 따른 결과를 이용하여 열응력 특성을 조사하였다. 또한 미끄럼 stiffness와 마찰계수의 변화에 따른 특성변화를 조사하였고 미끄럼 방향과 반대 방향의 응력특성에 대해서도 연구하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 열전현상

열전현상(Thermoelectric effect)은 열과 전기사이의 에너지 변환을 의미하며 변환소자의 양쪽에 온도차가 있을 때 소자 내부의 carrier가 이동함으로써 기전력이 발생하는 현상이다. 열전현상은 1900년도 초부터 연구가 시작되어 구소련의 Ioffe가 약 4%의 변환효율을 얻을수 있게 연구가 진행되어 현재 약 10%이상의 변환효율을 가지고 있다. 이러한 열전은 양단간의 온도차를 이용하여 기전력을 얻어내는 Seebeck효과, 기전력으로 냉각과 가열을 하는 Peltier효과, 도체의 선상의 온도차에 의해 기전력이 발생하는 Tomson효과로 나눌수 있으며 Peltier효과를 이용하여 가습기, CPU냉각, 냉정수기, 냉장고가 개발되어 있으며 Seebeck효과를 이용하여 열전대, 열전발전, 센서 등에 많이 이용되고 있다.

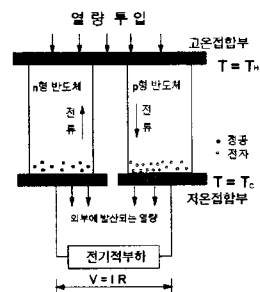


Fig. 1 Appearance of thermoelectric effect

#### 2.2 열전발전의 제자

열전발전에서는 열전냉각과 달리 펠티어 소자에서의 carrier의 동작이 거꾸로 되기 때문에 전류방향이 반대로 흐르게 된다. 본 연구에서는 국내에서 제조된 열전모듈을 직렬로 연결하는 방식을 택하여 전압을 높이 냉수와 온수를 이용하여 발전하는 방식을 택하였다. 열전달을 위하여 6063계 알루미늄을 압출 제작하고 열전소자 사이에 두어 발전하였으며 알루미늄과 알루미늄 표면의 열전달 특성을 향상시키기 위하여 밀링과 연삭과정을 거쳐 제작하였다. 또한 고, 저온부의 온도가 약 90℃, 20℃일 때 얻어진 전압특성과 열적인 특성을 조사하여 가압력과 온도에 따른 열팽창특성을 고려하여 고정조건에 따른 열응력을 해석하였다.

다음 그림은 열팽창에 따라 얻어지는 열전발전기의 형상이며 ANSYS를 이용한 3차원 열응력 해석을 실시하였다.

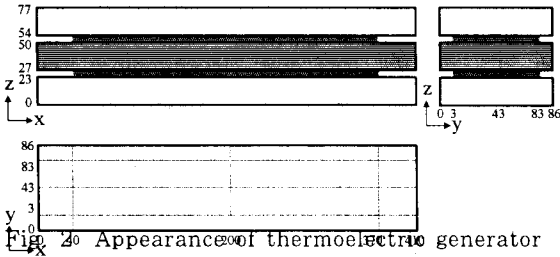


Fig. 2 Appearance of thermoelectric generator

### 2.3 알루미늄관과 열전발전기의 열응력 특성

열전모듈의 열응력 문제는 외부의 열전달에 의해서 전달된 열에너지의 흐름으로 인해서 발생된다. 그래서 외부의 알루미늄 관에서 온수와 냉수의 흐름을 실제와 유사하게 흐름이 있는 두께만큼 경계를 두어 그 내부의 온도가 20℃와 100℃로 설정하고 열전모듈에서 발생하는 변형과 응력을 확인하였다. 다음 그림은 16개씩 32개의 열전모듈과 알루미늄 관 사이에서 발생하는 열해석 결과이다. 그림과 같이 중심부는 온수이고 잘려진 단면의 중심을 기준으로 열전모듈과 냉수를 두고 있다.

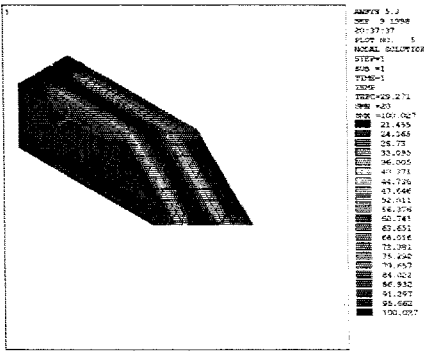


Fig. 3 Temperature profile of aluminum tube and TEM

Fig. 3에서 열전모듈은 열전재료, 공기층, 전극, 알루미늄관 등으로 구성되어 있으나 열전재료의 열전도계수가 매우 낮기 때문에 모듈전체에 열전재료의 열전도계수를 적용하였다. 또한 알루미늄관의 비틀림과 처짐 등을 고려하였으며

다음 그림은 이러한 온도차와 구속조건에 따른 열응력의 분포도이다.

열전모듈의 열응력해석에서 적용한 것과 같이 열전재료에 5kg/cm<sup>2</sup>의 압력이 발생하게 알루미늄관의 외부에 가압하였으며 양단이 고정된 구조로 설정하였다. 이러한 양단 고정된 구조에서는 고온부에서 팽창한 길이가 저온부와 같이 팽창하여야 하기 때문에 온수부에서는 압축응력이 적용되고 냉수부에서는 인장응력이 발생하게 되어 이론적으로 발생한 팽창길이의 66%를 해소하는 결과를 가져온다. 다음 그림은 열팽창으로 늘어나는 길이방향의 응력분포도이다.

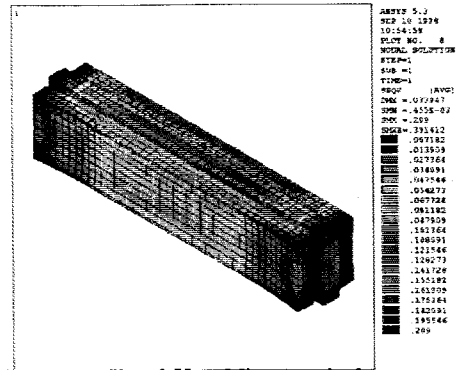


Fig. 4 Profile of Von Mises equivalent stress

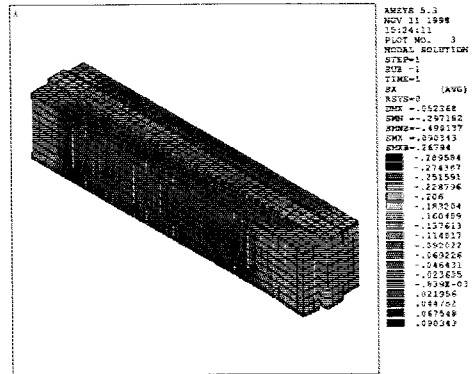


Fig. 5 Stress profile of longitudinal axis

Fig. 4에서 계산된 응력 성분은 길이가 긴 길이방향의 열응력을 완화하는 역할을 하지만 이로 인해서 폭방향의 응력을 크게 한다. 그러나 열전모듈과 알루미늄관 사이에 발생하는 응력을 완화하기 위해서 thermal greese나 thermal pad를 사용하므로 자연스럽게 sliding이 발생하게 되고 이러한 문제는 전혀 문제가 되지 않는다. 하지만 길이방향의 팽창은 온도차가 80℃라면 0.62mm의 늘어나게 되어 sliding이 발생한다고 하더라도 일정마찰력은 계속해서 발생하게 되어 피로하중을 받게 된다. 이러한 피로하중은 줄이기 위해서는 마찰계수와 압력을 줄이면 가능하지만 일정압력이상이 작용하여야 열전달을 원활히 할 수 있으므로 동시에 만족하기는 어렵다.

Fig. 5에서는 고온단과 저온단으로 구성된 열전발전기의 길이방향(x방향)의 열팽창을 나타내었으며 바깥쪽에 위치한 저온단과 하나로 구성되어 있는 고온단의 열전달에서 예상할 수 있듯이 고온단에서 큰 압축응력이 발생되고 있음을 확인하였다. 이 결과는 저온단의 인장응력의 크기와 비교하여 절대값이 약 3배에 가까운 값으로서 실제 설계시 이러한 문제를 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

본 논문에서는 이러한 피로하중으로 인한 손상을 알아보기 위해서 발생하는 변위의 차를 알아보고 실제 피로손상을 분석하기 위한 데이터로서 이용하고자 하였다.

다음 그림은 알루미늄관과 열전모듈의 중심단면을 절단한 경우 응력 분포를 도시하였다. 본 그림은 Von Mises 상당응력의 분포도로서 열전모듈과 알루미늄관의 sliding이 전혀 일어나지 않는다는 조건에서 해석하였다.

Fig. 6과 같이 열전모듈에 작용되는 응력은 고온쪽에 높은 응력이 발생되고 저온에는 낮은 응력이 발생되고 있다. 이것은 열팽창으로 인해 발생한 고온단의 열응력이

원인이지만 약간의 미끄럼이 발생한다면 그다지 큰 문제가 되지 않는다.

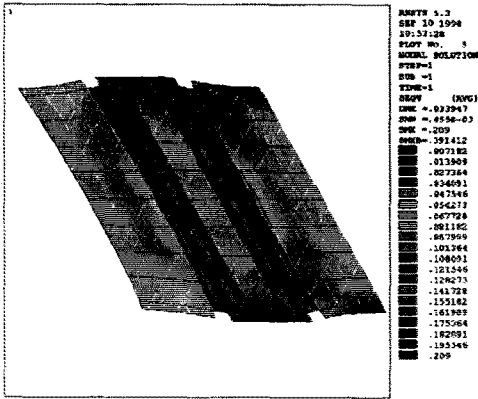


Fig. 6 Stress profile of cross section area

또한 인장과 압축응력을 수반하는 양단고정의 구조는 길이방향의 변형은 줄일 수 있지만 접평면의 반대방향의 변형은 더욱 크게 만드는 문제를 가진다. 그러나 길이에 비해 폭 방향의 길이가 짧아 전체 변형은 작으므로 열전 모듈에 작용하는 변형을 작게 된다.

양단고정의 형태에서 가압력을 균등하게 적용하면 중심부와 가장자리 사이에 응력편차가 발생하는데 열전소자에 가해지는 압력과 상쇄되어 중심부에서 낮은 응력이 작용하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 균일한 압력이 아닌 응력편차를 주어 제조하여야 한다.

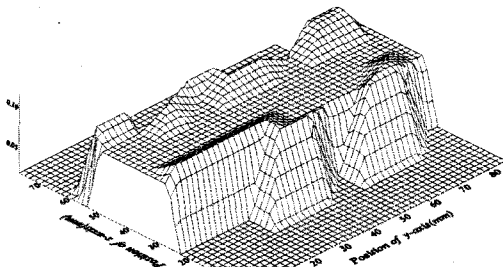


Fig. 7 Profile of displacement at x=370

그림 7은 양단고정에서는  $x=370$ 인 단면에서 고정하였으므로  $x$ 방향으로 변형이 균일하지만 이 지점에서 고정하지 않은 경우에는 약 0.1mm의 변형차가 발생하고 있음을 알 수 있다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 고온수로 버려지는 열에너지를 이용할 목적으로 thermoelectric generator의 제작과 열응력 완화를 목적으로 시뮬레이션과 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 국내 T사의 열전모듈을 32개 사용하여 32W의 열전발전이 가능한 열전발전기를 제작할 수 있었으며 열응력을 완화할 수 있는 구조로 설계하였다.
- (2) 열전발전기의 실제 형상을 모델로 3차원 열응력 해석에서 내부의 열흡수를 적용하고 외부의 가압력을 준 경우 발생하는 내부응력은 열전모듈의 표면과 AI판의 표

면에서 최대로 발생하였다.

(3) 균일가압력과 양단고정으로 구축한 알루미늄판과 열전모듈사이에서 발생하는 변형특성은 한쪽만 고정된 결과와 비교하여 약 0.1mm의 편차가 발생하고 있음을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

- (1) A. F. Ioffe, 1957, "Semiconductor thermoelements and thermoelectric cooling", Inforssearch Ltd, London
- (2) T.J. Seebeck, 1822, Abhandlungen der Deutschen Akademie der Wissenschaften 쾰 Berlin, p.265
- (3) J.C.A. Peltier, 1834, Ann. Chem. Phts., 56, p.371
- (4) 우병철, 이희웅, 이동운, 1998, "열전모듈을 이용한 열에너지 변환기술과 응용", 98에너지공학회 춘계학술대회 논문집, pp.125-130
- (5) D.M. Rowe, 1995, "Thermoelectrics", CRC Handbook
- (6) 이길근 宮島雅史 등, 1999, "기계적 분쇄공정에 의해 제조된  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  소결체의 열전특성", 대한금속학회지, 37, 1, pp.64~69
- (7) 우병철, 이희웅 등, 1995, "에너지 절약형 열전발전 시스템 개발 기획에 관한 최종 보고서", 통산산업부
- (8) 심재동, 현도빈, 하현필 등, 1994, "전자냉각재료 개발" 보고서, 과학기술처
- (9) Danil T. Allen, 1997, "Thermoelectric self-powered hydronic heating demonstration", International conference on thermoelectrics, pp. 571~574
- (10) 荻井正行, 残留熱應力解析による熱電變換モジュール用 FGMコンプライアントパッドの傾斜組成設計, 日本機械學會論文集(A), 62, 594, pp.190~194
- (11) 황창원, 홍인근, 백동규, 최승철, 1994, "가압소결된 다결정  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ - $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  열전재료의 열전특성", 한국결정성장학회지, 4, 4, pp.363~369
- (12) C. M. Suh, J. J. Lee, Y. G. Kang, H. J. Ahn and B. C. Woo, 1992, "A simulation of the fatigue crack propagation in type 304 stainless steel at 538°C", Fatigue Frat. Engng Mater. Struct. 15, 7, pp.671-684
- (13) 서창민, 우병철, Peltier module을 이용한 열전발전기의 제작과 특성, 대한기계학회지 투고, 1999.