

열전발전용 Bi-Te Module에서 미끄럼에 따른 열응력 완화 특성

論 文

52C-1-3

A Characteristic of Fluid-Assisted Sliding on Stress Relaxation of Bi-Te Modules in Thermoelectric Generation System

禹 炳 哲* · 李 熙 雄*

(Byung-Chul Woo · Hee-Woong Lee)

Abstract - Recently the research for utilization of waste heat produced from electric power plants, casting factories, heat treating factories or commercial building are being afforded by the need for energy saving. The objective of this study is to develop a thermoelectric generation system which converts unused energy from close-at-hand sources such as garbage incineration heat and industrial exhaust etc. into electricity. This paper presents a thermoelectric technology on a optimum system design method and efficiency and cost effective thermoelectric element on order to extract the maximum power output from energy conversion of waste energy. It is shown that the longitudinal stresses of module contacted with two point constrained Al tubes could be released more than those with a one-point constrained.

Key Words : Thermoelectric generator, Seebeck effect, Thermal stress, Sliding, Non-linear contact

1. 서 론

화력발전소나 압력용기장 등의 구조물은 중력, 압력, 잔류 응력 등과 외부와 내부 사이에서 발생한 온도차로 인해서 열응력이 발생하게 된다[1][2]. 이러한 열응력은 급격한 온도 변화에 의해서 발생하는 열충격(Thermal Shock), 급격하지는 않지만 온도변화가 심해서 외부와 내부 또는 입구와 출구 사이의 온도차로 인해 발생하는 열응력(Thermal Stress), 그리고 고정된 구조물이나 고정된 구조물에 부착된 상태에서 고정부의 미세 이동이나 온도변화로 인해서 발생하는 열기계응력(Thermo-Mechanical Stress) 등으로 인해 발생되며 단순한 금속학적인 측면과 열응력 문제 또는 열피로 문제로 많이 다루어지고 있는 실정이다[2]. 열전발전기(Thermoelectric Generator)는 온도차에 의해서 기전력이 발생된다는 제벡(Seebeck)효과를 이용한 DC발전방식이며 고온부와 저온부의 온도차로 인해서 열응력이 필수적으로 발생하게 된다[3]. 본 논문에서는 이러한 열응력을 완화할 수 있는 구조를 제시하며 온도차가 발생하는 핵심부분의 온도 분포와 열응력 해석을 통해서 제시된 형상의 유용성을 확인하고자 하였다[4]. 또한 온수와 냉수를 이용한 열전발전기에 있어서 Al tube는 고온부와 저온부의 온도차로 인해서 약 0.6mm의 변위가 발생하게 되며 열전모듈의 파손을 방지하기 위해서 고강도 섬유강화 플라스틱(High Strength Fiber Reinforced Plastic)로 제작된 키 연결부(Key Joint)를 사용하였다. 키 연결부는 고온부와 저온부를 연결하는 역할을 하고 있기 때문에 열전달계수가 낮고 강도가 우수한 재료인

고강도 저열전도도를 갖는 플라스틱 제품을 선택하였다. 양쪽에 키로 구속된 Al tube의 양단에 온수와 냉수를 흐르게 하면 양단간의 온도차로 인해서 온수부는 늘어나게 되는데 키에 의해서 고온부와 저온부가 같이 늘어나게 되어 열팽창 성분은 완화하게 되지만 길이의 직각방향 변위성분은 더 크게 만드는 역할을 하게 된다. 이와 더불어 Al tube와 열전모듈(Thermo Electric Module, TEM)사이의 접합부위는 열그리스(Thermal Grease)를 사용하여 고온부와 저온부의 Al tube에 미끄럼(Sliding)이 발생할 수 있도록 설계하였다[4][6][7].

본 논문에서는 열전모듈을 사용하여 열전발전기를 제작하고 제벡 효과에 의해서 발생하는 발전특성을 파악하고 양단간의 온도차에 의해서 발생하는 전기적 부하와 동시에 온도 변화특성과 고온부와 저온부에서 발생한 열응력을 완화할 수 있을 확인하고자 하였다. 또한 이로 인해서 얻어지는 열응력 완화효과와 열전모듈에 미칠 수 있는 변위특성을 평가하였다[3][4][7].

2. 실험방법

2.1 DC 300V급 열전발전기의 제작

열전발전에서는 열전냉각과 달리 n형과 p형 소자의 carrier의 동작이 거꾸로 되기 때문에 펨티어 소자에서의 전류방향과 반대방향으로 전류가 흐르게 된다. 또한 개발된 열전발전기는 Bi-Te계 열전재료를 사용한 열전모듈을 직렬로 연결하는 방식을 택하였으며 양단의 온도차를 이용하여 발전하는 방식을 택하여 DC 전압을 높였다[8][9][10].

열전발전기에 원활한 열에너지를 전달하기 위해 열전달 특성이 우수하고 가공성이 좋은 6063계 알루미늄 합금을

* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 신소재응용연구그룹
接受日字 : 2002年 1月 14日
最終完了 : 2002年 9月 27日

36x23x350(mm)의 크기로 열전달관을 제작하였으며 열전달 특성을 양호하게 하기 위해 내부에 돌기를 두었고 냉간 압출법으로 제조하였다. 압출과정 중 정확한 평면을 유지하기 위해서 수차례의 압출 다이 수정작업을 행하였으며 열전달 특성을 향상시키기 위해 특수표면처리(Anodizing)과정으로 제작하였다. 본 냉간압출로 제작한 열전달관의 표면 조도는 밀링작업으로 제작한 열전달관과 거의 유사한 표면 조도 특성을 얻을 수 있었다[5][9].

이러한 관의 양쪽은 8000계 알루미늄을 가공하여 용접하고 7x3x86(mm)의 key 홈을 가공하고 섬유강화 플라스틱으로 제조된 key를 사용하였다. 이것은 열전발전기의 고온부의 온도가 약 90℃ 이상이고 저온부는 약 20℃이므로 큰 열팽창이 발생하게 되므로 이를 구속하기 위해서 양 끝단에 두 개씩 가공하였다.

이 형상에서 온수와 냉수를 흘리고 그 사이에 열전모듈을 위치하도록 제작하였다. 가장 아래쪽에 냉수를 두고 열전모듈, 온수, 열전모듈, 냉수의 구조로 8층의 열전모듈 층으로 설계하였다. 또한 각 열전모듈과 알루미늄 사이는 표면 조도를 낮추어 열전달 특성을 향상시키면서 열응력을 완화하기 위해서 열 그리스(Shin-Etsu chemical사의 KS-612)를 얇게 도포하였다[11][12].

그림 1은 본 연구에서 제작한 열전발전기의 형상이다. 열전모듈은 254개의 n, p형 반도체로 구성되어 있으며 열적으로 병렬 조건, 전기적으로 직렬조건으로 구성되어 있다. 또한 사용된 열전모듈은 각 층 당 16개씩 총 128개의 열전모듈을 사용하였다.

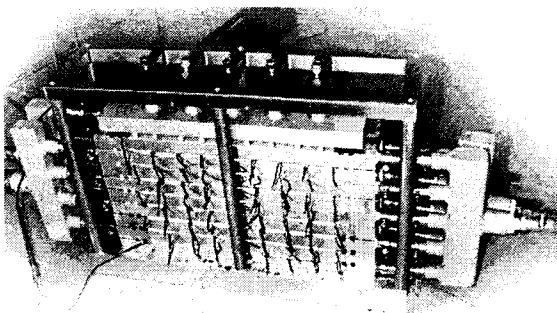


그림 1 열전발전기의 형상
Fig. 1 Configure of thermoelectric generator

그림 2는 열전모듈의 최소단위인 2개의 열전모듈의 형상을 나타내고 있으며 3차원 열해석용 모델의 형상에서도 그림 2와 같은 형상을 사용하였다.

2.2 열전모듈의 3차원 열해석 모델

3차원 열해석과 열응력 해석모델은 전극의 형상과 배치 등을 고려하였고 특성분석은 해석용 프로그램인 ANSYS를 사용하였다.

먼저 열전모듈의 형상을 정확히 파악하고 열전재료, 전극, Al₂O₃층을 구분하여 측정하고 좌우 대칭조건을 고려하여 해석모델을 결정하였다. 그림 4는 열전모듈의 3차원 해석 모델의 개략도를 나타내고 있으며 사용된 열전재료, 전극, 알루미늄의 열응력 관련 특성치는 표 1과 같다.

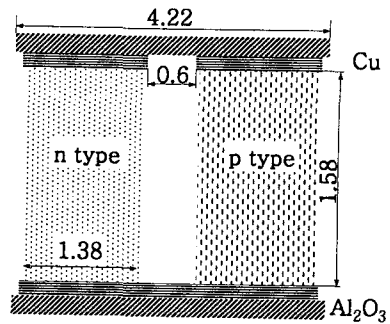


그림 2 2차원 해석용 열전모듈의 형상
Fig. 2 2D model of thermoelectric module(mm)

표 1 열전모듈의 열전도 특성

Table 1 Thermal conductivities of module

material property	Al ₂ O ₃	Cu	n type	p type
Conductivity (W/mK)	0.026	0.4	0.00156	0.00152

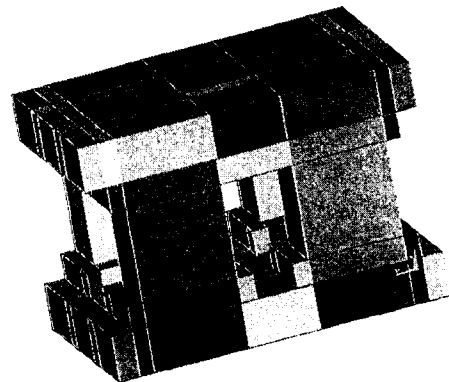


그림 3 3차원 해석용 열전모듈의 형상
Fig. 3 3D simulation model of thermoelectric module

그림 3의 열전모듈은 3차원 8절점 요소를 사용하였으며 열전발전기의 실제구속조건과 같이 구속하여 계산하였다. 이 해석에는 열전모듈의 효율 4%로 정하여 식(1)을 이용하면서 열용량을 설계하였다.

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{g_o}{k} = 0 \tag{1}$$

경계조건은 T=100℃는 고온부, T=20℃는 저온부이다.

또한 2.4에서 계산된 알루미늄의 최대 전단력과 모듈의 수직응력이 5kgf/cm²의 조건으로 모듈을 구속하였다.

2.3 알루미늄관의 열응력 해석모델

본 연구의 대상인 열전발전기의 온수와 냉수의 흐름은

그림 1에서 설명한 바와 같이 알루미늄관을 통해서 흐르므로 온수와 냉수사이에 열전모듈이 있는 구조이다.

따라서 열전모듈의 열해석과 열응력 해석은 모듈의 상단과 하단을 고정경계조건으로 두고 내부의 열발생과 열흡수를 계산한다.

본 절에서는 실제 외부의 구속조건을 그대로 적용하고 알루미늄과 열전모듈간의 열응력을 완화해 보고자 key를 설치한 결과를 비교, 분석하였다.

본 연구에서는 20℃와 100℃의 물이 순환될 때 열에 의한 팽창을 계산하면 0.62mm가 된다. 이 값은 6063계 알루미늄의 열팽창 계수가 $23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 이고 328mm의 길이에 70℃의 온도차가 발생한 수치이다. 이 결과는 모듈의 크기가 40x40x3.95(mm)이고 n, p형 반도체의 크기가 1.38x1.38x1.58(mm)이므로 반도체 cell 크기의 39%의 길이팽창이다. 그러므로 취성이 강한 열전재료와 알루미늄사이에 미끄럼이 발생하지 않는다면 파괴되는 결과를 초래하게 된다[8][10].

그림 4는 본 실험에서 사용한 열전발전기의 열전달부의 형상을 나타낸 것이며 key 유무에 따라 열응력 해석을 실시하였다.

그림 4와 같이 냉, 온수를 이용하여 고온과 저온을 형성하고 그 사이에 열전모듈을 두어 열전달에 의한 열전발전이 가능하였다. 본 모델에서 열전발전에 의해서 구해진 전력을 역으로 효율로 환산하여 흡수하는 열량을 열전모듈의 전체 체적당 열흡수로 시뮬레이션 하였다. 또한 열전모듈에 가해지는 가압력은 알루미늄 관의 상부를 일정한 압력으로 누르고 있는 형상을 취하였다. 여기서 계산된 압력을 열전모듈의 단면적에 가해지는 압력이 5kgf/cm²이 되게 하였다.

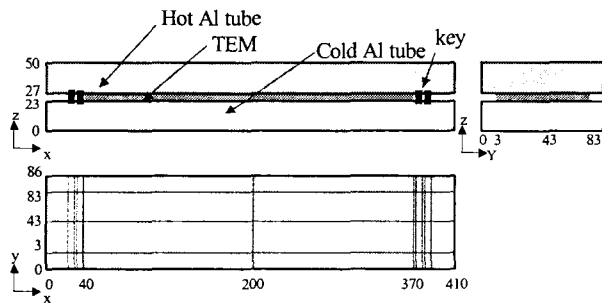


그림 4 알루미늄 관과 열전발전기의 구성
Fig. 4 Configure of aluminum tube and TEM

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 300V급 열전발전기(TEG)의 특성

본 연구에서 제작한 열전발전기의 형상은 그림 2와 같으며 고온수는 상온에서 95℃까지 가열하고 저온수는 20℃를 유지하면서 열전발전특성을 조사하였다. 열전모듈의 내부는 완전 직렬로 배치되어 있어 실제 발생하는 전압은 온도에 따라 큰 DC 전압특성을 나타내었으며 4set를 조합하여 다음 그림과 같은 결과를 얻었다.

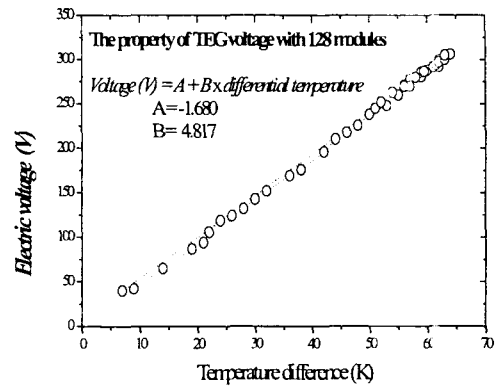


그림 5 온도차에 따른 열전발전기의 기전력
Fig. 5 Variation of TEG voltage with temperature difference

그림 6과 같이 냉수와 온수의 온도차에 따라 DC 전위차도 거의 직선으로 변화하고 있음을 알 수 있다. 본 시험에서 사용한 재료와 모듈의 cell당 제백계수는 각각 $2.3 \times 10^{-3}\text{V/K}$, $2.0 \times 10^{-3}\text{V/K}$ 이었다[5]. 그러나 열전발전기를 적용하면서 $1.48 \times 10^{-3}\text{V/K}$ 로 떨어졌고 식(2)와 같이 정리할 수 있다.

$$V = -1.680 + 4.817 \text{ dT} \quad (2)$$

여기서 V는 voltage(V)이고 dT는 양단간 온도차(K)를 의미한다.

발생 기전력의 저하는 열전모듈의 조립과정에서 solder층과 알루미늄 층의 열저항으로 인해서 약 10%의 손실이 발생하고 마찬가지로 열전발전기의 제작과정에서 알루미늄 층과의 표면요철의 열저항으로 약 25%의 손실이 발생하고 있다[6][10].

3.2 열전모듈의 2차원 열해석 분석

열전발전은 양단의 온도차를 이용하는 발전방식이므로 온도차의 의해서 발생하는 열팽창문제를 해결하지 않고서는 양단간의 온도차를 크게 하는 것은 불가능하다고 할 수 있다. 그래서 열해석을 기본으로 열팽창, 가압력, 구속조건 등을 기준으로 어느 정도의 내부응력을 받으며 팽창과 수축의 정도 그리고 응력이 집중되는 부분에 대해서 알아보려고 열해석을 수행하였다. 열응력 해석은 알루미늄과 알루미늄으로 구성된 열전소자에 대해 수행하였으며 발생한 수 있는 열응력을 계산하여 열전소자 외부의 구속조건과 초기조건으로 입력하여 해석하였다. 양단의 조건은 앞의 해석과 마찬가지로 100℃, 20℃로 고정하고 발생하는 열을 흡수 계산하였다. 또한 열발생율의 계산은 효율 4%이고 36W의 출력을 얻었을 때를 기준으로 계산하였다.

그러나 열전재료는 전류가 가해지면 전류에 의해서 주열이 발생하게 되므로 내부에서 발생하는 열은 양단간의 온도차에 의해서 얻어지는 열전발전 효율, 4%를 근거로 계산하였다. 또한 여기서 얻어진 에너지는 열에서 얻어지는 열

과이며 거꾸로 열이 흡수되는 조건으로 계산한다면 열발생율의 값이 음의 값으로 변환된다. 이러한 열발생의 유무에 따라서 열전발전기에서 얻어지는 온도특성을 조사하고 이로 인해서 발생하는 열응력 특성을 알아보았다.

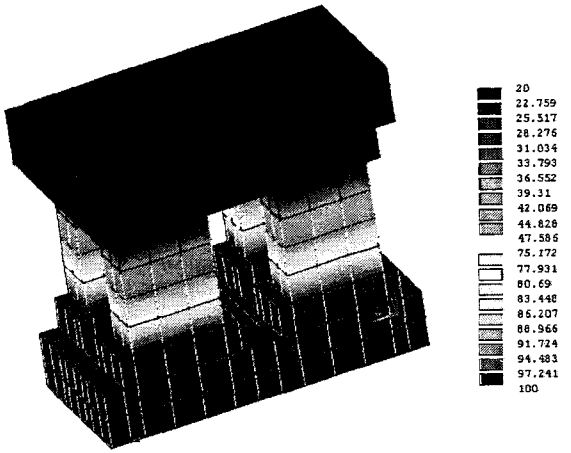


그림 6 열전모듈의 온도특성
Fig. 6 Temperature profile of thermoelectric module

3.3 열전발전기의 3차원 열응력 해석

열전발전기는 양단간의 온도차에 의해서 얻어지므로 온도차에 의해서 열응력이 발생하게 된다. 이러한 열응력은 열전모듈의 손상시킬 수 있으므로 본 절에서는 이를 완화할 수 있는 가능성을 알아보고 열전모듈의 내부에 치명적인 손상이 일어나지 않게 설계하기 위한 방법을 알아보았다.

열전발전기의 열응력 해석은 앞에서 설명한 모델과 달리 열전모듈의 형상은 균일한 재료로 보고 Al tube와 열전모듈 사이에서 발생하는 열해석과 열응력에 대한 특성치로 해석하였다. 기본적인 형상은 높이 방향과 폭 방향으로 대칭성을 가지고 있고 길이방향으로는 key의 유무에 따라서 달라지므로 대칭성을 적용하지 않고 열응력 해석을 시행하였다. 적용된 구속조건은 Al tube에서 물이 흐르는 조건과 같이 적용하기 위해서 물이 흐르는 부분의 온도를 물의 온도로서 구속하였으며 대칭조건을 단면조건으로 적용하여 열해석을 수행하였다.

높이 방향인 z 방향은 최저점인 z=0점에서 구속시키고 상부에서 가압력을 가하는 구조로 해석하였으며 폭 방향인 y 방향은 중심부인 y=42.5에서 구속하였다. 또한 유한요소 수를 늘때 중심부가 정확히 정해질 수 있도록 짝수의 요소를 발생시켰으며 이로 인해서 홀수의 요소점이 얻어진다. 이와 달리 길이 방향인 x 방향은 x=0, 200에 key가 존재하므로 key가 있을 때는 양 쪽을 모두 고정하고 없을 경우에는 한 쪽만 고정하는 방법을 사용하였다. 또한 열전모듈과 Al tube 사이에서 미끄럼이 일어나는 조건을 적용하기 위해서 미끄럼 해석을 수행하였다.

3-3-1 내부 열발생이 있고 한쪽을 구속한 경우

열전발전에서 얻어지는 기전력은 부하의 조절에 의해서

얻어지는 전력 특성을 분석하여 전체적인 부하의 크기를 적절하게 사용할 수 있어야 하며 비교적 큰 출력을 얻기 위해서는 각각의 부하를 조절할 필요가 있다. 즉 전류의 일정량을 각각의 열전발전기의 부하와 일치시켜 전체적으로 우수한 열전발전기가 될 수 있게 설계하여야 한다.

그림 7은 열전발전기의 내부에 열이 발생하고 있고 양단을 구속하지 않고 한쪽만을 구속한 경우에 해당된다.

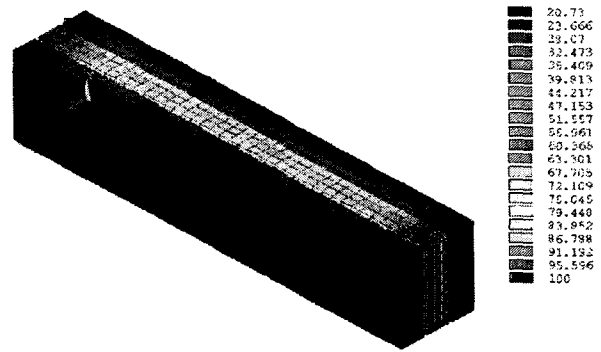


그림 7 Al tube와 열전모듈사이의 온도분포
Fig. 7 Temperature profile between Al tube and thermoelectric module

그림 8은 열전모듈이 있는 끝단의 단면을 절단한 위치에서의 온도분포를 나타내고 있으며 고온부와 저온부에 따라 열전모듈의 양단에 고온 및 저온으로 분포하고 있음을 알 수 있다. 또한 같은 온도대인 고온부에서도 외측과 내측의 온도분포가 다르며 열전모듈에 전해지는 온도역시 균일하지 않다. 이러한 온도 분포는 안쪽과 바깥쪽 사이의 온도 편차를 발생시키고 내부에서 발생하는 기전력과 가장자리에서 발생하는 기전력 사이의 편차를 발생시킨다. 이러한 온도편차는 DC로 출력되는 전기적인 부하에 영향을 미친다고 알려져 있으며 전원의 noise로도 작용하고 주위의 측정장치의 계측기에 영향을 미치는 것으로 알려지고 있다.

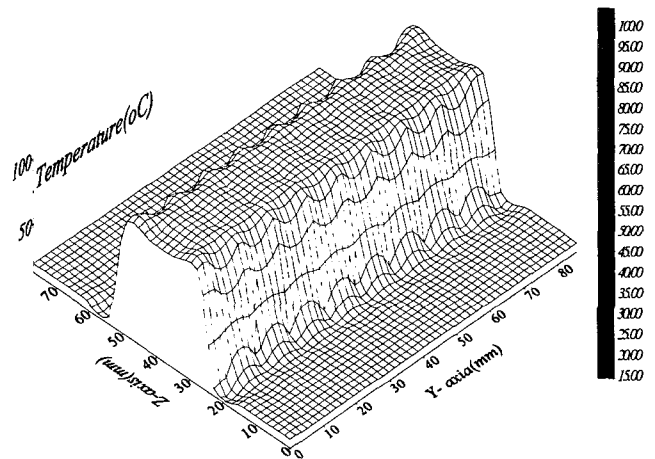


그림 8 x=370 위치에서의 온도분포
Fig. 8 Temperature profile at x=370

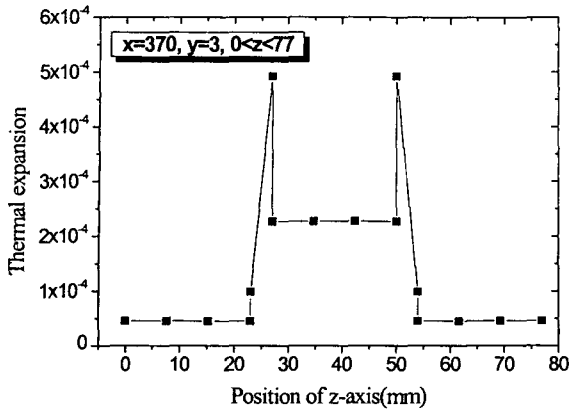


그림 9 열발생에 따른 수직방향의 열팽창
Fig. 9 Thermal expansion with vertical axis as heat generation

그림 9에서 알 수 있듯이 열전소자가 위치하는 부근에서 급격한 열팽창의 차이를 보여주고 있고 Al tube에 해당되는 영역에서는 거의 균일한 열팽창 특성을 보여주고 있다.

열전발전에서 사용된 고온과 저온부의 영향으로 양단간의 열전달관에서는 열팽창이 수반되고 이로 인해서 열응력을 발생시켜 열전모듈의 수명을 저하시키는 역할을 하게 된다. 다음 그림은 고온단과 저온단의 열팽창을 알아보기 위해서 한쪽단을 고정시킨 경우 맞은편 단에서 발생하는 열팽창을 나타내었다[1][2].

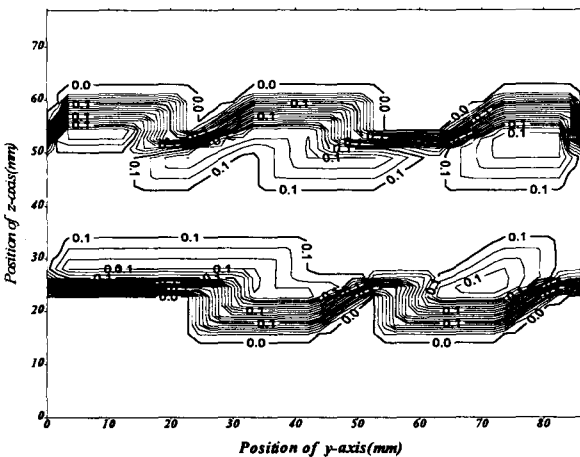
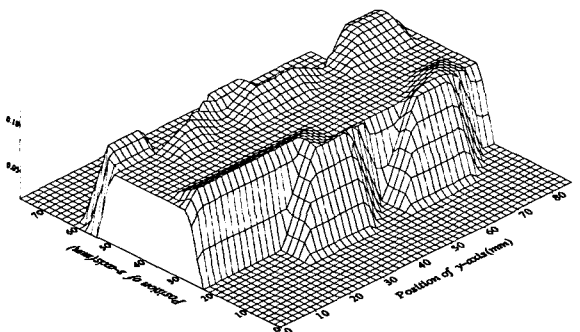


그림 10 한쪽 고정시 x축 끝단의 변위특성
Fig. 10 Displacement of end position as single constrained tube(x=370, 0<y<86, 0<z<77)

그림 10은 열전모듈과 Al tube 가 만나는 끝 부분의 단면을 절단한 다음 양단간의 온도가 100℃와 20℃일 때 x 방향으로 늘어난 변위의 크기를 3차원으로 나타낸 그림이다. 중심부는 고온부로서 큰 변위성분을 나타내고 있으며 열전모듈의 위치를 기준으로 y 방향으로 따라 급격한 변위 증분이 발생하고 있음을 알 수 있다.

그림 11은 x방향의 응력특성으로 고온부는 열팽창이 작아 압축응력이 작용하고 저온부에서는 열전모듈과 Al tube 사이에 인장응력이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이것은 고온부와 저온부의 온도차에 의해서 미끄럼이 발생하고 이로 인해서 열전모듈의 상단과 하단에서 급격한 응력이 발생한다.

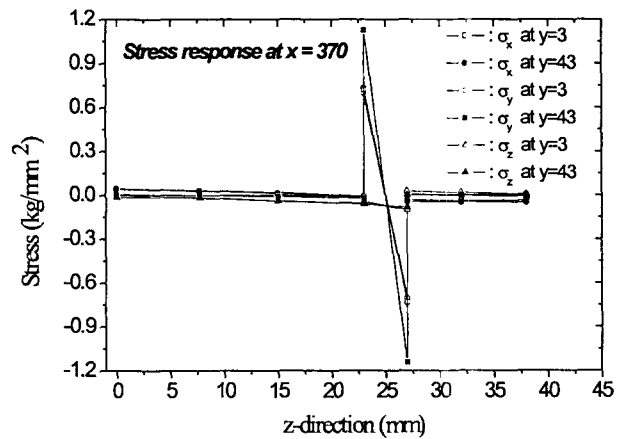
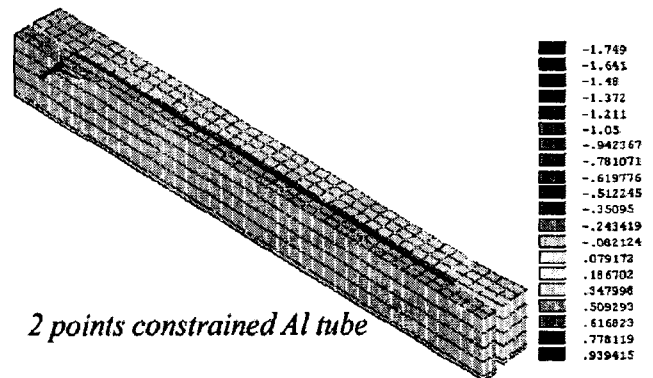


그림 11 한쪽이 고정된 경우 끝단의 응력변화
Fig. 11 σ_x of end position as single constrained tube

3-3-2 내부 열발생이 있고 양쪽을 구속한 경우

열전발전기 특성 중 부하가 걸리지 않은 상태에서는 외부에서 전달된 열에너지를 사용하지 않기 때문에 외부의 온도차와 거의 같은 상황이지만 부하가 걸려 열에너지를 흡수하는 상황에서는 에너지를 흡수하게 되어 양단간의 온도차는 작아지고 표면에서는 온도편차가 커지게 된다. 즉 균일한 분포도의 열전도 현상이 일어나다가 양단에 부하가 가해지면 급격한 열의 흡수로 인해 열전재료와 Al tube 사이에 빠른 열의 흐름이 발생한다.



2 points constrained Al tube

그림 12 양쪽이 고정된 경우 x축 끝단의 응력변화
Fig. 12 σ_x of end position as double constrained tube

그림 12는 양단 고정시 발생하는 x 방향의 열응력 특성으로 고온단과 저온단에 해당되는 Al tube 는 뚜렷하게 확인할 수는 없지만 인장과 압축을 받고 있으며 열전재료의 상하면에서 최소와 최대의 인장과 압축응력이 발생하고 있다.

온도차에 의해서 발생한 미끄럼은 비선형 접촉요소를 사용하였으며 이때 사용한 강성값은 Young's modules의 10배에 해당하는 값으로 정의하였고 이로 인해서 열전재료가 Al tube를 압착시키는 현상은 발생하지 않았다[1][4].

그림 13은 x=370에서 x방향의 변위를 고정시킴으로 인해서 발생하는 각 방향의 응력성분을 열전모듈의 모서리 점 (y=0)과 중심점(y=43)에서의 특성을 나타내었으며 양단고정으로 인해서 Al tube에서는 큰 응력을 가진다. Al tube에서 발생하는 응력은 흡수가 가능한 성분이지만 열전모듈에서는 취성이 강한 열전재료로 인해서 파손의 가능성이 크기 때문에 여러 층의 구조로 조합한다면 고온부에서 발생하는 응력성분을 저온부가 분산시켜주는 역할을 하게 된다.

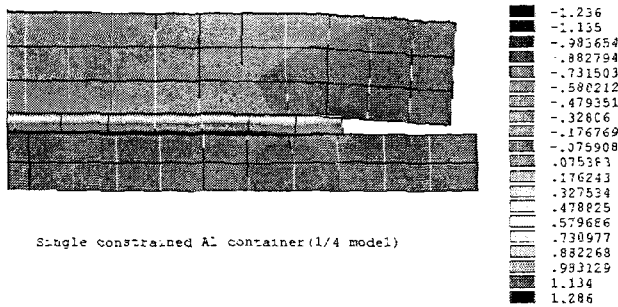


그림 13 양단 고정시 Al tube 중심점의 x축방향 응력
Fig. 13 σ_x of end position as double constrained tube

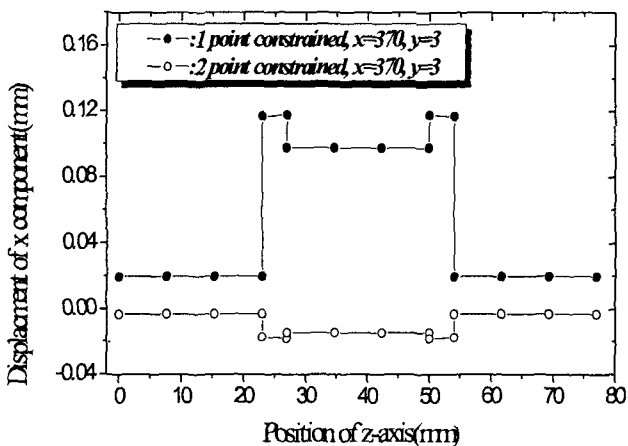


그림 14 양단 고정시 x축 끝단에서의 변위특성
Fig. 14 Displacement of end position as two constrained models

그림 14는 고정방법에 따른 Al tube와 열전모듈 사이의 변위를 나타낸 그림으로서 x 방향의 변위차가 약 10배 가까이 발생되고 있음을 알 수 있다. 본 그래프는 x=370, y=3인

위치에서 z 방향에 따른 x 방향의 변위를 나타낸 것으로 양단 고정시 x=370인 점에서 윗면과 아래 면이 coupling 되어 있지만 모서리 부근이라 외력에 의해서 약간의 변위가 발생함을 알 수 있다. 그러나 길이방향과 직각방향에서는 그 반대현상을 초래하게 되지만 열전모듈에는 길이방향의 응력을 감소시키는 것이 수명을 연장시킬 수 있는 방법으로 알려져 있다[6].

4. 결 론

열전냉각용으로 널리 사용되고 있는 열전모듈을 사용하여 열전발전특성을 측정하고 해석한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 열전냉각용으로 많이 사용중인 열전재료를 이용하여 300V급 열전발전기를 제작할 수 있었으며 기전력과 온도차의 관계는 식(2)와 같으며 열전재료의 열전특성보다 25% 손실이 증가하였다.
- (2) 열전발전기를 구성하기 위해 제작된 Al tube로 온수와 냉수를 흘리는 경우 열전모듈의 양단에 큰 온도차가 발생하여 열응력을 발생시키는 것을 확인하였으며 열전재료 내부에 치명적인 손실을 입힐 수 있다.
- (3) 양단고정에 따른 길이방향의 변형은 줄일 수 있었지만 폭방향의 응력은 증가하였으며 구속에 의해서 열전재료의 손상을 줄일 수 있음을 확인하였다.
- (4) 열전발전기의 내구성을 위해서 양단이 고정된 Al tube로 설계하였으며 취성이 강한 열전모듈의 수명 향상에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] C. M. Suh and B. C. Woo, "Simulation of Thermal Stress on Thermoelectric Generator Using Constrained Aluminum Tube as Key Joints" International Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol.2, No.2, pp.26-34, 1999
- [2] 우병철, 이희용, 서창민, "온수를 이용한 열전발전기에서 유량변화에 따른 발전 특성" 대한기계학회논문집 B권, 26, 10, pp.1333-1340, 2002
- [3] A. F. Ioffe, "Semiconductor thermoelements and thermoelectric cooling", Inforsearch Ltd, London, 1957
- [4] C. M. Suh, B. C. Woo, "Simulation of thermal stress on thermoelectric generator using constrained aluminum tube as key joints", International journal of ocean engineering and technology, Vol.2, No. 2, pp.26-34, 1999
- [5] 우병철, 이희용, 이동운, "열전냉각소자와 열전발전소자의 발전특성", 한국전기전자재료학회 하계학술대회 논문집, pp.448-452, 2000
- [6] D.M. Rowe, 1995, "Thermoelectrics", CRC Handbook
- [7] 우병철, 이희용, "열전관의 두께변화에 따른 열전발전기의 발전특성", 대한전기학회 하계학술대회논문집, pp. 1319-1321, 2001
- [8] 이길근 宮島雅史, "기계적 분쇄공정에 의해 제조된

- Bi_2Te_3 소결체의 열전특성”, 대한금속학회지, 37, 1, pp.64~69, 1999
- [9] 苙井正行, 残留熱應力解析による熱電變換モジュール用FGM
コンプライアントバツドの傾斜組成設計, 日本機械學會
論文集(A), 62, 594, pp.190~194, 1996
- [10] M. Niino, T. Ohshima and K. Matsubara, “Research
project on the effective use of untapped thermal
energy from garbage incineration etc.”, International
conference on thermoelectrics, pp. 539~546, 1997
- [11] Danil T. Allen, “Thermoelectric self-powered hydronic
heating demonstration”, International conference on
thermoelectrics, pp. 571~574, 1997
- [12] B.C. Woo, D.Y. Lee and H. W. Lee, “Characteristic
of maximum power with temperature difference for
Thermoelectric generator”, ICT 2001, p.64 2001

저 자 소 개



우 병 철 (禹炳哲)

1963년 7월 22일생. 1989년 영남대 기계
공학과 졸업. 2001년 경북대학교 기계공
학과 졸업(공박), 1991년~현재 한국전기
연구원 신소재응용연구그룹 선임연구원

Tel : 055-280-1632, Fax : 055-280-1590

E-mail : bcwoo@keri.re.kr



이 희 응 (李熙雄)

1955년 2월 28일생. 1977년 서울대 금속
공학과 졸업. 1990년 동 대학원 졸업(공
박) 1979~1985 홍익전문대 금속과 조교
수, 1985~현재 한국전기연구원 신소재응
용연구그룹장

Tel : 055-280-1630, Fax : 055-280-1590

E-mail : hwlee@keri.re.kr