

열전발전용 Bi-Te module에서 미끄럼에 따른 열응력 완화 특성

서창민 · 우병철*

경북대학교 기계공학부, *한국전기연구소 신소재응용연구그룹

A Effect of Fluid-assisted Sliding on Stress Relaxation of Bi-Te Modules in Thermoelectric Generation System

CHANG-MIN SUH AND BYUNG-CHUL WOO*

Kyungpook National University, 1370 SanKyuk-dong, Puk-gu, Taegu 702-701, Korea

*Korea Electrotechnology Research Institute, 28-1 Sungju-dong, changwon 641-120, Korea

KEY WORDS: Thermoelectric generator 열전발전기, Seebeck effect 제벡효과, Thermal stress 열응력, Sliding 미끄럼, Non-linear contact 비선형 접촉

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.

1. 서 론

화력발전소나 압력용기강 등의 구조물은 중력, 압력, 잔류응력 등과 외부와 내부사이에서 발생된 온도차로 인해서 열응력이 발생하게 된다. 이러한 열응력은 급격한 온도변화에 의해서 발생하는 thermal shock, 급격하지는 않지만 온도변화가 심해서 외부와 내부 또는 입구와 출구 사이의 온도차로 인해 발생하는 thermal stress, 그리고 고정된 구조물이나 고정된 구조물에 부착된 상태에서 고정부의 미세 이동이나 온도변화로 인해서 발생하는 thermo-mechanical stress 등으로 인해 발생되며 단순한 금속학적인 측면과 열응력 문제 또는 열피로 문제로 많이 다루어지고 있는 실정이다. 열전발전기(thermoelectric generator)는 온도차에 의해서 기전력이 발생된다는 제벡(Seebeck)효과를 이용한 DC발전방식이며 고온부와 저온부의 온도차로 인해서 열응력이 필수적으로 발생하게 된다(A. F. Ioffe, 1957; D.M. Rowe, 1995). 본 논문에서는 이러한 열응력을 완화할 수 있는 구조를 제시하며 온도차가 발생하는 핵심부분의 온도분포와 열응력 해석을 통해서 제시된 형상의 유용성을 확인하고자 한다. 또한 온수와 냉수를 이용한 열전발전기에서 Al tube로 제작된 고온부와 저온부의 온도차로 인해서 약 0.6mm의 변위가 발생하게 되므로 열전재료의 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 강

도가 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(thermoelectric module)사이의 접합부위는 열 그리스(thermal grease)를 사용하여 고온부와 저온부의 Al tube에 sliding이 발생할 수 있도록 설계하였다(하 등, 1994; 巖井正行, 1999).

본 논문에서는 열전모듈을 사용하여 열전발전기를 제작하고 제벡 효과에 의해서 발생하는 발전특성을 소개하고 양단간의 온도차에 의해서 발생하는 전기적 부하와 동시에 온도변화특성과 고온부와 저온부에서 발생하는 열응력을 완화할 수 있는 형상을 소개하고자 한다. 또한 이로 인해서 얻어지는 열응력 완화효과와 열전모듈에 미칠 수 있는 변위특성을 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 DC 300V급 열전발전기의 제작

열전발전에서는 열전냉각과 달리 n형과 p형 소자의 carrier의 동작이 거꾸로 되기 때문에 펠티어 소자에서의 전류방향과 반대방향으로 전류가 흐르게 된다(A. F. Ioffe, 1957). 또한 개발된 열전발전기는 Bi-Te계 열전재료를 사용한 열전모듈을 직렬로 연결하는 방식을 택하였으며 양단의 온도차를 이용하여 발전

하는 방식을 택하여 DC 전압을 높였다.

열전발전기에 원활한 열에너지를 전달하기 위해 열전달 특성이 우수하고 가공성이 좋은 6061계 알루미늄 합금을 86x23x350(mm)의 크기로 열전달관을 제작하였으며 열전달 특성을 양호하게 하기 위해 내부에 돌기를 두었고 냉간 압출법으로 제조하였다. 압출과정중 정확한 평면을 유지하기 위해서 수차례의 압출 다이 수정작업을 행하였으며 열전달 특성을 향상시키기 위해 특수표면처리(Anodizing)과정으로 제조하였다. 본 냉간압출로 제작한 열전달관의 표면 조도는 밀링작업으로 제작한 열전달관과 거의 유사한 표면 조도 특성을 얻을 수 있었다.

이러한 관의 양쪽은 8000계 알루미늄을 가공하여 용접하고 7x3x86(mm)의 키 홈을 가공하고 섬유강화 플라스틱으로 제조된 키를 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 표면조도를 낮추어 열전달 특성을 향상시키면서 열응력을 완화하기 위해서 thermal grease(Shin-Etsu chemical사의 KS-612)를 얇게 도포하였다.

Fig. 1는 본 연구에서 제작한 열전발전기의 형상이다. 열전모듈은 254개의 n, p형 반도체로 구성되어 있으며 열적으로 병렬조건, 전기적으로 직렬조건으로 구성되어 있다. 또한 사용된 열전모듈은 각 층당 16개씩 총 128개의 열전모듈을 사용하였다.

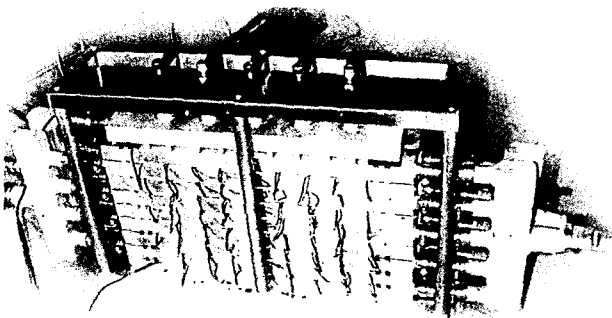


Fig. 1 Configure of thermoelectric generator

2.2 열전모듈의 2차원적 형상

Fig. 2는 열전모듈의 최소단위인 2개의 열전모듈의 형상을 나타내고 있으며 이것을 이용해 3차원 열해석용 모델로 사용하였다.

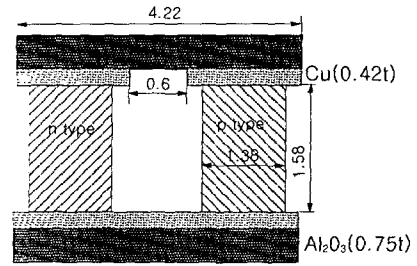


Fig. 2 2D model of thermoelectric module(mm)

2.3 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 해석 모델을 결정하였다. Fig. 4는 그림은 열전모듈의 3차원 해석 모델의 개략도를 나타내고 있으며 사용된 열전재료, 전극, 알루미늄의 열응력 관련 특성치는 Table 1과 같다.

Table 1 Thermal conductivities of module

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

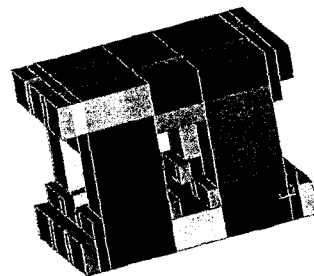


Fig. 3 3D simulation model of thermoelectric module

Fig. 3의 열전모듈은 3차원 8절점 요소를 사용하였으며 열전발전기의 실제구속조건과 유사하게 계산하였다. 또한 제조사에서 측정된 열전모듈의 효율 4%로 정하여 식(1)을 이용하면서 열용량을 설계하였다(이 등, 1999; 서 등, 1991; Suh et al., 1999).

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

경계조건은 T=100℃는 고온부,

T=20℃는 저온부이다.

또한 2.4절에서 계산된 알루미늄의 최대 전단력과 모듈의 수

직응력이 5kgf/cm²의 조건으로 모듈을 구축하였으며 이 결과는 가압에 따른 열전달 특성측정 결과에 의거한 결과이다(D.M. Rowe, 1995).

2.4 알루미늄관의 열응력 해석모델

본 연구의 대상인 열전발전기의 온수와 냉수의 흐름은 Fig. 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 키이를 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 23x10⁻⁶/℃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 열전 재료와 알루미늄사이에 sliding이 발생하지 않는다면 파괴되는 결과를 초래하게 된다.

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

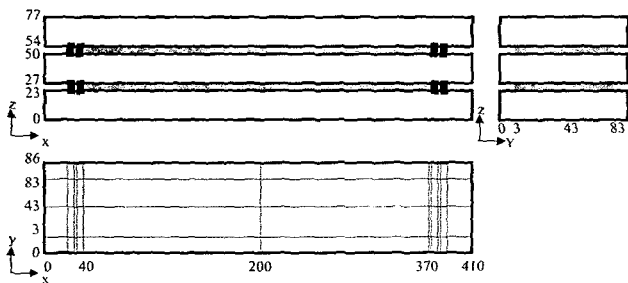


Fig. 4 Configure of aluminum tube and TEM

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 300V급 열전발전기(TEG)의 특성

본 연구에서 제작한 열전발전기의 형상은 Fig. 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 조합하였다. 본 시험에서 사용한 재료와 모듈의 cell당 제백계수는 각각 2.3x10⁻³V/K, 2.0x10⁻³V/K이었다. 그러나 열전발전기를 적용하면서 1.48x10⁻³V/K로 떨어졌고 식(2)와 같이 정리할 수 있다.

$$V = -1.680 + 4.817 dT \tag{2}$$

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 표면오철의 열저항으로 약 25%의 손실이 발생하고 있다.

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 알아보고자 열응력 해석을 수행하였다. 열응력 해석은 알루미늄과 알루미늄으로 구성된 열전소자에 대해 수행하였으며 발생할 수 있는 열응력을 계산하여 열전소자 외부의 구속조건과 초기조건으로 입력하여 해석하였다. 양단의 조건은 앞의 해석과 마찬가지로 100℃, 20℃로 고정하고 발생, 흡수되는 열량을 계산하였다. 또한 열발생율의 계산은 효율 4%이고 36W의 출력을 얻었을 때를 기준으로 계산하였다.

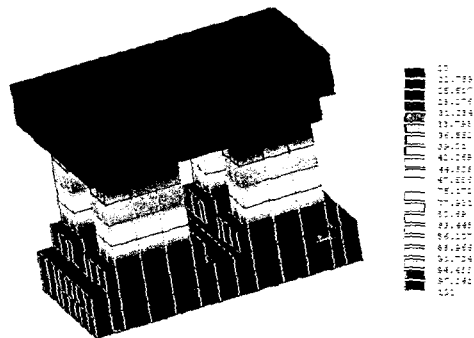


Fig. 5 Temperature profile of thermoelectric module

그러나 열전재료는 전류가 가해지면 전류에 의해서 주열열이 발생하게 되므로 내부의 열발생이 발생하는 것으로 계산하였으나 양단간의 온도차에 의해서 발전하는 열전발전의 효율이 4%로 계산하였으므로 발생하는 에너지량은 열에서 얻어지는 결과이며 거꾸로 열이 흡수되는 조건으로 계산한다면 열발생율의 값이 음의 값으로 변환된다. 이러한 열발생의 유무에 따라서 열전발전기에서 얻어지는 온도특성을 조사하고 이로 인해서 발생하는 열응력 특성을 알아보았다.

3.3 열전발전기의 3차원 열응력해석

앞 절에서 설명한 열전모듈의 열해석은 모듈의 고온과 저온 단에서 전달되는 열에너지의 분포를 알아보기 위한 해석으로서 열전재료의 양단간의 온도분포로서 결정되는 기전력의 특성을 알아보기 위함이었다. 그러나 열전발전기에서는 양단간의 온도차에 의해서 발생하는 열응력을 완화할 수 있는 가능성을 알아보고 열전모듈의 내부에 치명적인 손상이 일어나지 않게 설계하기 위함이다.

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 대칭조건 단열조건으로 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 요소분할(mesh)시 중심부가 정확히 정해질 수 있도록 짝수의 element를 발생시켰으며 이로 인해서 홀수의 node가 얻어진다. 이와는 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 sliding이 일어나는 조건을 적용하기 위해서 nonlinear 해석을 수행하였다.

가. 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(이 등, 1999; 渡邊泰夫, 1993).

Fig. 6은 열전발전기의 내부에 열이 발생하고 있고 양단을 구속하지 않고 한쪽만을 구속한 경우에 해당된다.

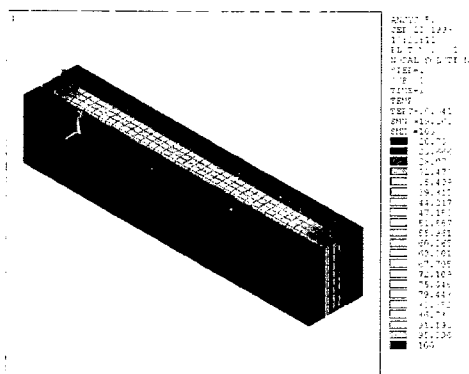


Fig. 6 Temperature profile between Al tube and thermoelectric module

Fig. 7은 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.

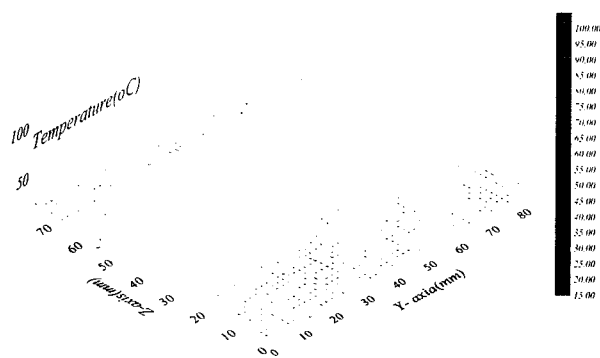


Fig. 7 Temperature profile at x=370

Fig. 8에서 알 수 있듯이 열전소자가 위치하는 부근에서 급격한 열팽창의 차이를 보여주고 있고 Al tube에 해당되는 영역에서는 거의 균일한 열팽창 특성을 보여주고 있다.

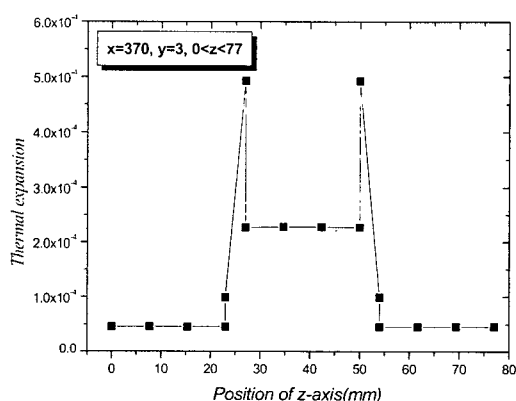


Fig. 8 Thermal expansion with vertical axis as heat generation

열전발전에서 사용된 고온과 저온부의 영향으로 양단간의 열전달면에서는 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.

Fig. 9는 열전모듈과 Al tube 가 만나는 끝 부분의 단면을 절단한 다음 양단간의 온도가 100°C와 20°C일 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.

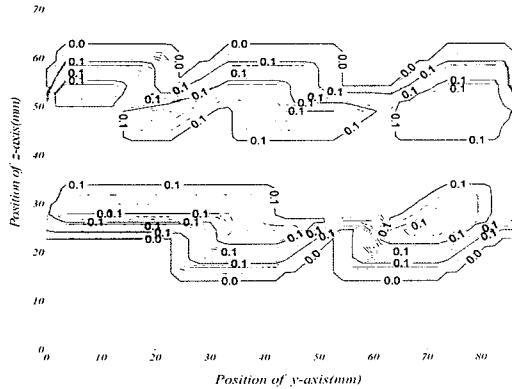


Fig. 9 Displacement of end position as single constrained tube(x=370, 0<y<86, 0<z<77)

Fig. 10은 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.

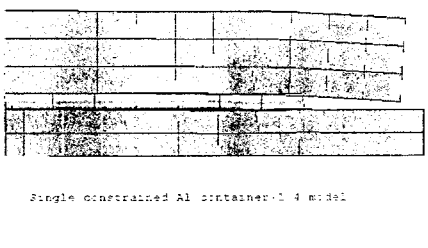


Fig. 10 σ_x of end position as single constrained tube

나. 내부 열발생이 있고 양쪽을 구속한 경우
열전발전기 특성중 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.

Fig. 11은 양단 고정시 발생하는 x 방향의 열응력 특성으로 고온단과 저온단에 해당되는 Al tube 는 뚜렷하게 확인 할 수

는 없지만 인장과 압축을 받고 있으며 열전재료의 상하면에서 최소와 최대의 인장과 압축응력이 발생하고 있다.

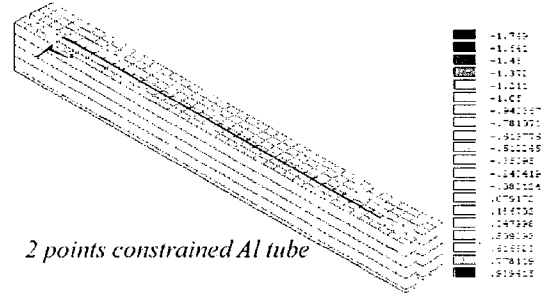


Fig. 11 σ_x of end position as double constrained tube

온도차에 의해서 발생한 미끄럼은 비선형 contact element를 사용하였으며 이때 사용한 stiffness 값은 Young's modulus의 10 배에 해당하는 값으로 정의하였고 이로 인해서 열전재료가 Al tube를 압착시키는 현상은 발생하지 않았다.

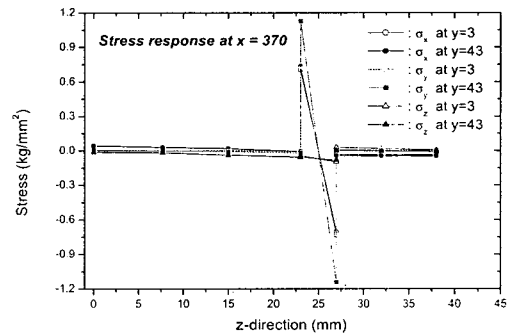


Fig. 12 σ_x of end position as double constrained tube

Fig. 12는 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 하게된다.

Fig. 13은 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 양단고정시 x=370인 점에서 윗면과 아래 면이 coupling 되어 있지만 모서리 부근이라 외력에 의해서 약간의 변위가 발생할 수 있다. 그러나 길이방향과 직각방향에서는 그 반대현상을 초래하게 되지만 열전모듈에는 길이방향의 응력을 감소시키는 것이 수명을 연장시킬 수 있는 방법으로 알려져 있다(이 등, 1999; Suh et al., 1999; 菅井正行, 1999).

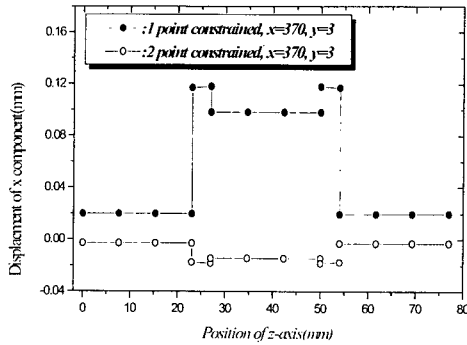


Fig. 13 Displacement of end position as two constrained models

4. 결 론

열전발전기의 핵심인 모듈의 열적변형과 응력완화에 대한 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 열전냉각용으로 많이 사용중인 열전재료를 이용하여 300V 급 열전발전기를 제작할 수 있었으며 기전력과 온도차의 관계는 식(2)와 같다.
- (2) 열전발전기를 구성하기 위해 제작된 Al tube로 온수와 냉수를 흘리는 경우 열전모듈의 양단에 큰 온도차가 발생하여 열응력을 발생시키는 것을 확인하였으며 그 변위는 1.38mm인 열전재료를 파손시킬 수 있는 크기이었다.
- (3) 양단고정에 따른 길이방향의 변형은 줄일 수 있었지만 폭방향의 응력은 증가함을 확인하였다.
- (4) 열전발전기의 내구성을 위해서 양단고정을 Al tube로 설계하였으며 취성이 강한 열전재료의 수명 향상의 가능성을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2000년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

서창민, 우병철(1991). "2 1/4 -1Cr강의 형활재상의 미소한 표면

피로균열의 성장특성", 한국해양공학회지, 제4권, 제3호, pp 100~111.

우병철, 이희용(1995). "1kW급 TEG 열전발전시스템 개발 (I)" 보고서, 통산산업부.

이길근, 宮島雅史(1999). "기계적 분쇄공정에 의해 제조된 Bi₂Te₃ 소결체의 열전특성", 대한금속학회지, 제37권, 제1호, pp 64~69.

하정수, 김건영, 안희돈, 오장우, 고승기(1994). "변형을 분할법에 의한 12Cr 단조강의 열피로 수명 예측에 관한 연구", KSME, 제18권, 제5호, pp 1192~1202.

Danil, T. A.(1997). "Thermoelectric self-powered hydronic heating demonstration", International conference on thermoelectrics, pp 571~574.

Ioffe, A. F.(1957). "Semiconductor thermoelements and thermoelectric cooling", Inforsearch Ltd., London.

Niino, M., Ohshima, T. and Matsubara, K. (1997). "Research project on the effective use of untapped thermal energy from garbage incineration etc.", International conference on thermoelectrics, pp 539~546.

Rowe, D. M.(1995). "Thermoelectrics", CRC Handbook.

Suh, C. M., Lee, J. J., Kang, Y. G., Ahn, H. J. and Woo, B. C.(1992). "A simulation of the fatigue crack propagation in type 304 stainless steel at 538°C", Fatigue Frat. Engng Mater. Struct., Vol. 15, No. 7, pp 671~684.

Suh, C. M., Woo, B. C.(1999). "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.

志井正行(1999). "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(A), Vol. 62, No. 594, pp 190~194.

渡邊泰夫(1993). "半導體を利用した熱電變換技術の可能性に関する調査" 報告書.

2000년 4월 28일 원고 접수

2000년 9월 30일 수정본 채택