

열전소자를 이용한 열교환기 특성 고찰

박용근*, 권동호, 김성도, 전재수, 오범규(명지전문대 기계설계과),
김상민(미래냉동공조)

Study on Characteristics of Heat Exchangers Using Thermoelectric Modules

Y.K.Park*, D.H.Kwon, S.D.Kim, J.S.Jeon, B.K. Oh(Dept of Mechanical Design, Myongji College),
and S.I.Kim(Mirae Refrigeration)

ABSTRACT

This paper presents the investigation and development of heat exchangers incorporated with thermoelectric modules. Firstly, the characteristics of the modules themselves are evaluated with respect to the applied DC power. Then, the modules-based heat exchangers with an amplification apparatus to enhance cooling effects are designed and developed. The cooling performance of the proposed heat exchangers is experimentally investigated with respect to the magnitude and pattern of input DC power, along with cooling liquids. The results denote that the heat exchangers using thermoelectric modules can be effectively used in the field of the various cooling system.

Key Words : Peltier effect(펄티어 효과), Heat exchanger(열 교환기), Thermoelectric modules(열전 소자), Cooling performance(냉각성능), Input DC power(입력 직류전력)

1. 서론

열 교환기(heat exchanger)는 온도가 다른 두 매체에서 지속적으로 열을 한 매체로부터 다른 매체로 전달해줌으로써 발생하는 열 평형상태를 이용한 장치로써, 냉각/가열 효과를 발생시키므로 냉난방 시스템에서 필수적이다. 더욱이, 생활수준의 향상으로 쾌적한 생활공간을 추구함에 따라 냉난방 설비에 대한 수요 급증과 더불어 특히, 전자 통신장비 등의 전자 소자 사용 증가에 따라 냉각 시스템 구축 필요성이 날로 증대되고 있다. 일반적으로 냉동 사이클은 크게 압축, 응축, 팽창, 증발 과정으로 이루어진다. 압축기는 동관 속에 있는 프레온가스와 같은 냉매를 압축하여 냉매의 압력과 온도를 높여 상온에서 액화가 쉽게 만들고, 응축기는 증발효과를 얻기 위해 냉매가스를 응축된 냉매 액체로 액화, 팽창밸브는 냉매 압력을 낮추어 액체냉매가 쉽게 실온에서 증발이 일어나도록 하고, 증발기는 팽창밸브에서 나온 저온, 저압 냉매 액체를 기화시키면서 주변에 열을 흡수하여 냉각효과를 발생시킨다. 이러한 냉각

시스템에서 압축기는 콤프레샤 구동을 통해 매체를 순환시킴으로써 부가장치, 필요공간, 진동 및 소음, 압축효율, 고장 등에서 많은 문제점 및 사용 냉매에 따른 대기 환경에 대한 악영향은 심각하다. 이에 반해 본 연구에서 제시된 열전소자를 이용한 열 교환기는 압축기, 응축기, 증발기 등이 없을 뿐만 아니라 냉매도 없으며, 움직이는 부품이 없고, 저 소음, 소형이고 수명은 반영구적이다. 열전소자는 열 에너지를 전기에너지 또는 전기에너지를 열에너지로 변환하는 에너지 직접변환특성을 갖는데 P형과 N형 반도체를 서로 접합시키고 양단에 온도차를 부여하면 기전력이 발생하는데 이를 Seebeck effect라하며 이 효과를 이용하여 전기에너지를 얻는 방법을 열전변환이고, 이 현상의 역현상으로서 복합재료(Bi2TE3)로 구성된 요소에 직류를 흘려주면 전류의 방향에 따른 Peltier cooling/ Joule heating이 냉/난방을 발생시킨다. 이렇게 열전소자에 간단한 직류 전원공급 및 극성변화를 통해 간편하게 냉각과 발열이 동시에 가능하고 직류 전원을 통해 일정 온도로 유지되게 할 수 있고, 아울러 국소 부위부터 광범위한 범위까지 냉/난방이 가

능하다. 또한, 실제로 필요한 부위만 선택하여 냉/난방이 가능하기 때문에 기존 열교환기에 비해 소요 전력이 감소 및 효율성, 장착용이성, 정밀 온도제어 가능, 고신뢰 저소음, 안정된 시스템 구현, 무중력 하에서 작동, 또한 프레온 가스 등과 같은 냉매를 탈피할 수 있어 환경 친화적이다. 한편, 열전소자는 공급되는 직류 전원 및 극성에 의해 냉/난방을 발생시키지만, 직류 전원 공급에 따른 발열부에 열 펌핑 현상이 일어나 온도상승을 초래하기 때문에 효과적인 전원공급과 발열부에 대한 효과적인 냉각 시스템이 필요하다. 또한, 어느 일정부분이 아닌 큰 시스템 전체를 열전소자 자체 표면에 의한 냉/난방 효과를 발생시키는 것은 성능계수가 가스압축 냉각방식에 비해 낮으므로 효율적인 냉각 증폭 메카니즘 개발이 요구된다.

본 논문은 이러한 독특한 성질을 가진 열전소자를 이용한 열교환기를 개발하고 이에 대한 성능을 고찰하고자한다. 먼저, 열전소자 자체에 대한 특성을 고찰한 후, 열전소자 냉각 효율 증대를 위한 냉각 증폭 장치를 제작한다. 그리고, 열전소자를 기본으로 하는 열교환기를 제작한 후, 입력 전력과 냉매 액체에 따른 냉각 효과를 실험적으로 입증한다. 이러한 실험을 통해 제안된 열교환기를 향후 산업 시스템 적용 가능성을 입증하고자 한다.

2. 열전소자 특징

프랑스 물리학자 ATHANASE PELTIER (171845) 에 의해 발견된 현상으로 서로 다른 금속으로 루프를 형성하고 루프 중간에 전류를 흘리면 한 쪽 접합부에서는 열이 발생하고 다른 한쪽에서는 열을 흡수하는 현상을 말한다. 금속과 반도체를 접합하여 구성하면, 전류가 흐르지 아니할 때는 에너지 구조는 전체적으로 수평으로 되어 있지만 전압을 가하면 페르미(Fermi) 준위는 반도체 내부에서 경사를 이루고 양쪽 금속 사이 반도체 내부에 경사가 이루고 전위차가 발생한다. 이 때 전자의 운동은 금속에 있는 전자가 에너지 준위가 높은 반도체 전도대로 이동하기 위해서는 전위차를 뛰어 넘을 만큼 평균 운동에너지가 ΔE 만큼 증가되어야 하기 때문에 전자는 주위로부터 열에너지를 흡수해서 이동하고 접합부는 온도가 떨어져 흡열이 발생한다. 반대로 반도체에서 금속으로 이동하려면 낮은 에너지 준위로 떨어지는 것이 되므로 에너지를 방출하게 된다. 이 방출 에너지는 발열 작용으로 나타난다. P형 반도체와 N형 반도체는 흡열과 발열 현상이 반대적으로 발생하고, 인가되는 전압 방향에 따라 Peltier 효과는 가역적이다.

한편, P형 또는 N형 한 개의 반도체만 사용하면, 실제 산업 현장 및 생활 현장에서 냉각 효과가 미약하므로 여러 개의 P형, N형 반도체를 서로 쌍으로 결합하면 보다 큰 흡열/발열 효과를 얻을 수 있다. P형, N형 결합 시, 흡열 부분은 흡열(냉각)끼리, 발열 부분은 발열부분끼리 서로 일관성 있게 배열하여 효과를 증폭시킨다. 일반적으로 Bi₂Te₃가 열전달 용량이 크고, 흡열과 발열부 사이의 열전도를 억제하기 때문에 열전소자 모듈에서 많이 사용되는 반도체 물질이고, Fig. 1은 열전소자 모듈 형태를 나타낸다.

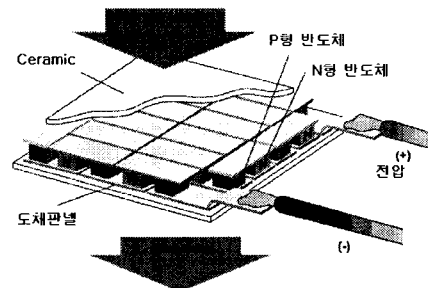


Fig.1 Thermoelectric modules

Bi₂Te₃계 열전재료는 단체금속과 dopant의 혼합물을 용융하여 일방향 응고시키는 방법과 인고트를 분말화하여 얻은 분말을 이용하는 냉간 프레스 소결법과 열간 프레스법에 의해 제조되어 왔고, 최근에는 새로운 제조방법으로 열간 압출법을 이용한 Bi₂Te₃계 열전재료를 제조하는 방법도 등장하고 있다. 한편, 열전소자 모듈은 세라믹 기판 위에 납땜을 이룬 후, 그 위에 열전도용 구리판을 용접하고, 다시 납땜 후 열전소자를 부착한다. 또 다시, 그 위에 납땜 후 동판을 부착 후, 다시 납땜 후 세라믹 기판을 부착한다. 이 세라믹은 기계적 강도, 전기적 저항, 열 전도성 등에서 장점이 있다. 일반적으로 hot 부분과 cold 부분의 거리는 4mm 정도 밖에 안되므로 hot 부분이 cold 부분에 열전도가 안 되도록 하는 것이 매우 중요하다. hot부분과 cold 부분에 있어서 hot 부분의 열 펌핑을 없애주는 heat sink는 열저항을 작게 함으로써 hot부분은 빨리 식히고, cold 부분은 냉각 효과를 증대시킬 수 있도록 동판이나 알루미늄 판이 열전소자 부착에 많이 사용된다. 접착 판은 충분히 두껍고, 변형이 없어야 열전 효과가 증대되고, 접착판 평판도를 0.02mm정도를 유지하고, 열전저항을 줄이기 위해 방열 그리스를 사용한다. 수분이 반도체 내부에 스며들어가지 않도록 세라믹 판 사이에 epoxy sealing을 하였고, 200,000 시간정도의 내구성을 지닌다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 실험장치 구현

Fig.2는 본 연구에서 사용된 열전소자로서 (Kryotherm TEM 러시아 제품: FROST-71) 자세한 사양은 Table 1에 표시한다. 254개의 P, N 반도체가 결합되어있고 -50°C에서 +150°C 사이에도 잘 견딜 수 있고 외부 진동(2g 가속도)에도 잘 견딜 수 있도록 되어있다. Fig.3은 열전모듈에 입력 전압에 따른 전류변화를 hot부분과 cold 부분의 온도차이에 따라 나타낸 것이다. 입력 전압에 따라 전류도 비례적으로 증가됨을 알 수 있고, hot 부분과 cold부분의 온도차이가 작을수록, 즉 cold 부분에서 hot부분으로 열 펌핑에 따라 전류 증가폭이 크게 됨을 알 수 있다. 그리고, Fig.4는 입력 전류에 따른 hot부분과 cold부분 온도차이에 따른 cold부분에서의 냉각 흡수 열량을 나타낸다. 온도차이가 클수록 냉각 흡수 열량이 작아지고, 온도차이가 작아지면서 흡수 열량이 증가됨을 알 수 있다. 즉, 최대 온도차이가 유지되는 상태는 냉각부위에서 흡수 열량이 없는 것을 의미한다.

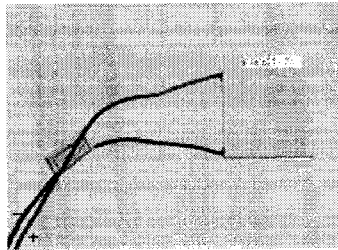


Fig.2 The employed modules of FROST-71

Table 1 Specifications of the proposed modules

Specification	Unit	Value
length	mm	40
width	mm	40
height	mm	4
max. current	A	6
max. voltage	V	16
temp. difference	°C	71
max. heat capacity	Watt	61
resistance for 22°C	Ohm	2

Fig. 5는 본 연구에서 수행한 실험 장치로 크게 열전소자 부착 assembly 부분, hot side 방열/ cold side 냉각 부분, 직류전원공급 부분으로 크게 구성 되어진다. 열전소자 모듈 4개를 직렬 연결하여, 각각 cold 부분과 hot부분이 서로 쌍으로 되도록 배치 하여, 알루미늄 판에 방열 그리스를 도포 한 상태에서 일정 압력(약 10-15 kgf/cm²)으로 조여서 부착하였다. 열전소자 부착은 주변 냉각 및 순환 장치에

보다도 냉각 효율을 결정하는 주요한 변수가 된다. Cold 부분 냉각 온도를 낮추기 위해 hot부분의 효과적인 열 발산을 위해 hot부분 알루미늄 부착 판 크기를 cold 부분 보다 크게 하였다. 열전소자 모듈 부착 시 hot부분과 cold부분 사이 두께가 4mm이기 때문에 그 사이에 열전달이 안되도록 실리콘으로 단열 시켰다. 한편, hot 부분의 열저항을 줄이기 위해 비열이 큰 물 냉각수를 강제 유체 순환을 실행하였다. 냉각수 저장 탱크는 3리터로 펌프(12 liter/ min) 강제 순환하였고, 탱크 앞에는 효율 증대를 위해 냉각 코일과 팬을 설치하였다. Cold 부분에는 냉각된 물의 저온을 유지하기 위해, 냉각수가 지나는 동관에는 차가운 열에너지를 보존하기 위한 보온 tube를 설치하였다. 써모커플을 이용하였는데 냉각수 두 곳 온도와 냉각 팬 두 곳 온도를 측정하였다.

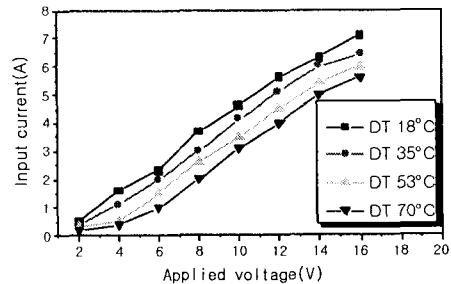


Fig. 3 Input current with respect to applied voltage

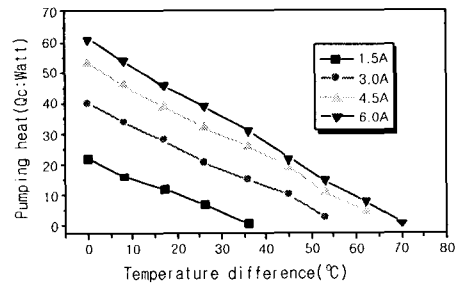


Fig. 4 Pumping heat at cold side

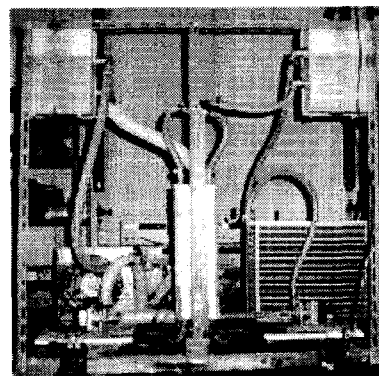


Fig.5 Experimental set-up

3.2 결과 및 고찰

냉방 효과를 얻기 위해 cold 부분을 순환하는 물의 양은 0.8 liter를 기준으로 실험하였고, 입력 DC 전원은 열전소자 개별 최대 전압 16V의 90%를 기준으로 하여 한 개 당 15V, 5A로 하였을 때 4개 직렬이므로 60V, 5A로 인가하였다. Fig. 6은 열전소자에 60분 동안 지속적으로 인가하였을 때와 5분 간격으로 on/off하였을 때 cold 부분 순환 물의 온도 변화를 나타낸다. 주변온도는 24.5°C이고, cold 부분 순환 냉각수는 온도가 2°C일 때 냉각수 코일 앞 팬의 온도는 12°C 이었다. 시간에 따라 냉각수 온도가 내려감을 알 수 있다. 그러나 열전소자의 cold 부분 열 흡수 열량은 온도차이가 작을수록 크므로 전원 인가 초기에 온도 하강 기울기가 큼을 알 수 있었다. 그래서 5분 간격 on/off 하였을 때 온도 하강이 커짐을 알 수 있는데, 이는 hot 부분에 대한 효과적인 열 발산으로 cold 부분 열 흡수량이 크기 때문이다. 향후, 효율적으로 열전소자를 배분하여 부착한 후 전원공급을 교번 한다면 냉각 성능 지수가 향상될 수 있음을 보여준다. Fig. 7은 cold 부분 유체가 물, 소금물, 알콜에 따른 온도 변화를 나타낸다. 비열이 낮을수록 온도 하강이 커짐을 알 수 있다. 향후, 냄새 및 취급성, 환경성에 대해 장점이 있으면서 비열이 낮은 유체를 선택하면 냉방 성능지수가 증가될 수 있다. 이때 cold부분 냉각수 순환 시 보온 유지가 큰 변수로 작용된다.

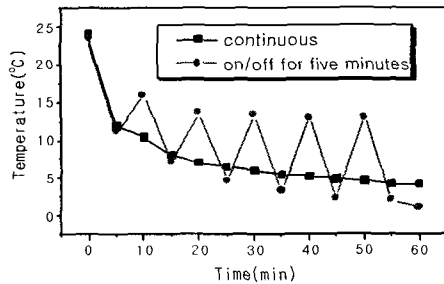


Fig. 6 Temperature of cold reservoir

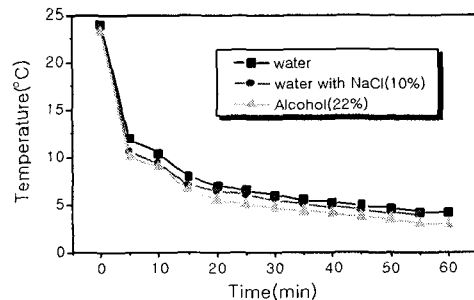


Fig. 7 Temperature at different liquids

4. 결론

냉각 유체 종류 및 유량, 입력 전원 효율적 분배, 열전소자 배열 및 접촉과 더불어 hot 부분 방열 및 cold 부분에 대한 온도 유지 등에서의 문제점을 보완하면, 본 연구에서 제시된 열전소자를 이용한 열교환기가 산업 현장에서 매우 잠재력 있는 냉각 시스템으로 사용될 수 있음을 알았고, 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) cool 부분의 온도는 hot 부분의 열 분산 시스템에 의해 절대적으로 좌우된다.
- 2) 열전소자 부착, 부착 재료, 평면도 등 기계적 요소와 hot 부분과 cold 부분 사이의 단열이 냉방 효율에 중요한 변수가 된다.
- 3) 전도성을 효율적으로 이용하는 열교환기 방식이 효과적이다.
- 4) cool 부분에 대한 열에너지 이용과 더불어 hot 부분의 열에너지 이용에 대한 연구가 요구된다.

후기

본 연구는 2002년도 산·학·연 공동 기술 개발 컨소시엄 과제로 연구된 결과이다.

참고문헌

1. Yunus A. Cengel, "Thermodynamics," McGraw-Hill, pp. 626-673, 1996.
2. Rowe, D.W., "CRC Handbook of Thermoelectrics," McGraw-Hill, pp. 517-521, 1995.
3. Buist, R.J., "Design and Engineering of Thermoelectric Cooling Devices," 10th International Conference on Thermoelectrics, Cardiff, Wales, 1991.
4. Buist, R.J., "A New Method for Testing Thermoelectric Materials and Devices," 11th International Conference on Thermoelectrics, Arlington, Texas, U.S.A., 1992.
5. Lau, P.G. and Buist, R.J., "Temperature and Time Dependent Finite Difference Model of Thermoelectric Pallet and Couple," 15th International Conference on Thermoelectrics, Pasadena, California, U.S.A., 1996.