

# 熱電式 熱펌프의 原理와 應用

朱 海 浩

<嶺南大學校 機械設計學科 教授>

## 1. 머리 말

두 종류의 다른 금속을 接合시켜 接合部에 電流를 통하게 하면 전류의 방향에 따라 그 部位에서 주열熱(Joule heat) 이외에 熱의 發生 또는 吸收가 생기는 現象이 있다. 이 現象을 1834년 프랑스의 과학자 C.A. Peltier 氏가 發見하여 이 現象을 “펠티어效果”라 하고 이 효과를 이용하여 熱을 발생시키고 혹은 흡수할 수 있도록 고안한 것이 熱電式 熱펌프(thermoelectric heat pump)이다.

펠티어效果(Peltier effect)에 의한 제벡係數(Seebeck coefficient)는 두 금속의 종류에 따라 다르다(표 1 참조). Fe-Cu 경우에는  $13.7\mu\text{V}/\text{K}$ , Sb-Bi 경우에는  $109\mu\text{V}/\text{K}$  정도인데 이것으로 工學的 應用에는 實用化 될 수가 없었다. 1911년 Altenkirch 氏가 이것으로 냉장고를 만들어 보았으나 열효율이 불과 1% 미만이었기 때문에 實用化 되지 못했다.

그러나 최근에 와서 半導體 材料가 급속히 개발되면서 반도체 재료와 다른 금속을 잘 배합하여 熱電效果가 상당히 높은 열펌프재료가 개발되었다.  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ (Bismuth-Telluride)의 *p*-型 半導體와 *n*-型 半導體를 접합했을 때 제벡계수는  $423\mu\text{V}/\text{K}$ 가 되고  $\text{Si}_{0.78}\text{Ge}_{0.22}$ (Silicon-Germanium)의 *p*-형 반도체의 *n*-형 반도체를 접합하면 제벡계수는  $646\mu\text{V}/\text{K}$ 나 된다. 이 열펌프로 냉장고를 제작할 경우 경제성이 있다는 것이 판명되

었다.

펠티어효과가 100여년 전에 발견되었으나 이것을 工學分野에 응용되기 시작한 것은 반도체 재료가 개발되기 시작한 1950년경부터 실용화되기 시작하였다. 이러한 열전식 열펌프를 이용하여 냉각시스템을 만들 경우 제대식인 기계식 냉동시스템과 비교해 볼 때 여러가지 長點이 있다. 열전식 냉동방법은 電子가 한 반도체에서 다른 반도체로 이동하면서 그 주위의 열과 함께 이동하는 原理를 이용한 것이기 때문에 기계식 냉동시스템의 중요한 構成品인 압축기, 증발기, 응축기, 용매제와 같은 부품이 전혀 필요가 없다. 움직이는 부품이 없기 때문에 소음이 없고 信賴性이 높다. 100W 보다 적은 熱出力에 대해서는 무게가 적고 부피가 적은 장점이 있다. 또한 混度 制御가 정확하고 전류의 방향만 바꾸워 주면 쉽게 냉동에서 加熱로 전환이 된다. 作動 混度범위는 제품에 따라 다르지만 대개  $+100^\circ\text{C} \sim -125^\circ\text{C}$ 까지 가능하다. 이러한 장점때문에 가장 많이 응용되고 있는 분야는 군사무기인 관성항법유도무기의 전자부품실을 냉각시켜 주는 데 사용되고 그 외에 용도는 다양하다.

本 稿에서는 열전식 열펌프의 原理와 그 應用에 대해서 가능한 상세히 설명하여 앞으로 이 分野에 대한 研究에 보탬이 되고저한다.

## 2. 原 理

그림 1(a)와 같이 棒狀物體의 一端을 高溫으로

로, 他端을 低溫으로 유지할 때 電子 또는 正孔 (positive hole)이 熱擴散 效果에 의해 高溫側으로부터 低溫側으로 이동하여 電位差가 발생하는데 이것을 熱起電力(thermoelectric motive force)이라 한다. 電位差에 의하여 생긴 힘과 熱擴散에 의한 힘이 균형을 이룰때 電子의 이동이 중지하게 된다.

材料가  $p$ -형 반도체일 때는 高溫側이 負가 되고  $n$ -형 반도체일 때는 高溫側이 正이 된다.

그림 1(b)와 같이 다른 두 개의 材料를 接合하는 경우에는 각각의 열기전력이 다르기 때문에 回路에 電位差가 發生하며 전류가 흐르게 된다. 이 現象을 제벡效果(Seebeck effect)라 한다. 열기전력을  $V$ 라 하면 온도의 差  $\Delta T$ 와는 다음 식이 성립된다.

$$V = \alpha \Delta T \quad (1)$$

이와 반대로 서로 다른 두 材料의 接合部에 電流를 흘리면 그 부분에서 主熱 이외에 熱의 發生 또는 吸收가 일어난다. 이 現象을 펠티어效果라 한다. 그림 1(b)에 電流가 그림과 같은 方向으로 흐를 때 재료 A로부터 電子이동에 따라 熱流量  $\dot{Q}_A$ 가 接合部로 흐르고 接合部로부터 熱流量  $\dot{Q}_B$ 가 재료 B로 흐르게 된다. 電子 이동의 에너지 레벨이 두 材料사이에서 서로 다르기 때문에  $\dot{Q}_A$ 는  $\dot{Q}_B$ 보다 클수도 있고 작을수도 있다. 接合部의 溫度를 一定하게 유지하기 위해서는 주위로부터 혹은 주위로 熱이 이동한다. 材料 A와 B의 接合面에서 單位 時間當 發生 또는 吸收하는 熱量  $H$ 는 電流密度  $J_i$ 에 비례한

다. 즉,

$$H = (\pi_A - \pi_B) J_i = \pi_{AB} J_i \quad (2)$$

式 (2)에서  $\pi_{AB}$ 는 材料 A, B의 接合面에서 單位時間, 單位電流에 대하여 發生 또는 흡수하는 열을 나타내며 이것을 펠티에係數(Peltier coefficient)라 부르고 이 係數는 제벡계수와 溫度와의 사이에 다음 식이 성립된다.

$$\pi = \alpha T \quad (3)$$

이 관계식은 Kelvin에 의하여 예측되었고 L. Onsanger에 의하여 理論적으로 증명되었다. 接合된 두 材料에 따라 제벡계수가 다르므로 제벡계수가 클수록 펠티에계수가 크고 따라서 接合面에 열의 發生 혹은 흡수의 능력이 커진다. 이러한 펠티에效果를 이용하여 加熱 혹은 冷却시키는 要素를 熱電式 熱펌프라 하고 實用 可能性이 있는 열펌프는  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  반도체와  $\text{Si}_{0.78}\text{Ge}_{0.22}$  반도체로 된 두 종류가 있다. 표 1은 두 다른 材料를 接合했을 때 제벡계수와 펠티에熱을 비교한 것이다. 이 數値는 동일한 조건하에서 측정된 값이기 때문에 상대적인 평가로 참고해야 한다.

표 1 제벡係數와 펠티에熱의 比較

材 料	제벡係數 ( $\mu\text{V}/\text{K}$ )	펠티에熱 (W)
Fe-Cu	13.7	0.74
Sb-Bi	109	5.9
$\text{Bi}_2\text{Te}_3(p)$ - $\text{Bi}_2\text{Te}_3(n)$	423	23
$\text{Si}_{0.78}\text{Ge}_{0.22}(p)$ - $\text{Si}_{0.78}\text{Ge}_{0.22}(n)$	646	35

### 3. 構造와 理論式

그림 2는  $n$ -型和  $p$ -型の 半導體로 구성된 熱電式 熱펌프의 구조도이다. 열펌프는 냉각과 가열의 두 기능을 갖고 있다. 냉각 모드에서 直 流電流는  $n$ -型 반도체에서 부터  $p$ -型 반도체로 흐른다.

이때 接合部의 온도  $T_c$ 가 내려가고 주위로부터 熱을 흡수하게 된다. 이 熱의 吸收는 電子가  $p$ -型 반도체내의 低에너지 레벨로부터  $n$ -型 반도체내의 高에너지 레벨로 이동하기 때문이다.

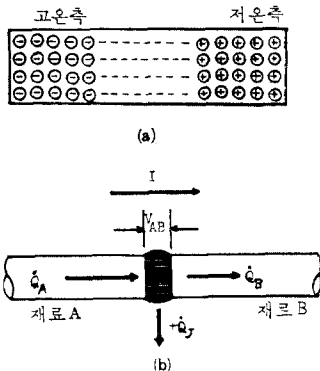


그림 1 溫度勾配에 의한 熱起電力

■ 解 說

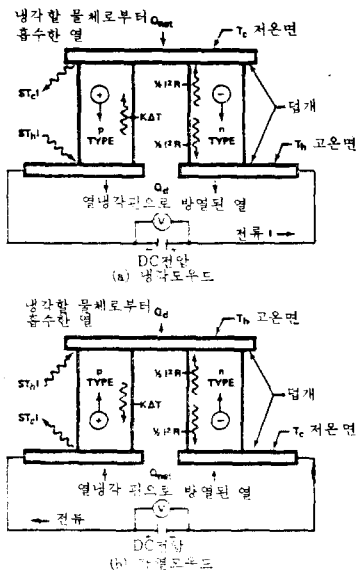


그림 2 熱電式 熱펌프의 개략도

이 熱은 전자이동으로 반도체를 지나 다른 접합부의 끝,  $T_h$ 로 전달된다. 그리고는 전자는  $p$ -형 반도체내의 低에너지 레벨로 되돌아간다.

펠티어계수는 電流가  $n$ -형에서부터  $p$ -형반도체로 흐를 때 냉각의 효과를 나타내고 電流가  $p$ -형에서부터  $n$ -형 반도체로 흐를 때 加熱의 효과를 나타내는 계수이다. 理想的으로는 低溫面(cold side)에서 吸收되는 熱의 量은 펠티어계수  $ST_c$ 와 電流  $I$ 의 곱에 따라 다르다. 여기서  $S$ 는 熱電能(thermoelectric power) 혹은 제벡계수이고  $T_c$ 는 냉각면의 온도를 의미한다. 그러나 實際적으로는 펠티어熱( $Q_p = ST_c I$ )이외의 주울熱  $Q_j$ 와 傳導熱(conduct heat)  $Q_c$ 가 발생되므로 純粹 열량  $Q_n$ 은 式 (4)와 같다.

$$Q_n = Q_p - Q_j - Q_c$$

$$= ST_c I - \frac{1}{2} I^2 R - K(T_h - T_c) \quad (4)$$

여기서  $S$ 는 각 반도체 재료의 총 열전능이고  $R$ 는 총 전기저항,  $K$ 는 총 열전도계수이다.

주울열은 반도체 내부로 電流가 흐를 때 발생되는 열이고  $I^2 R$ 으로 표시된다. 이 중 半은 냉각면으로 전달되고 나머지 半은 高溫面(hot side)으로 전달된다. 전도열  $Q_c$ 는 高溫面에서 低溫面으로 熱傳導에 의하여 전달된다.

高溫面에서 발산되는 순수열,  $Q_d$ 는 式 (5)로 표시된다.

$$Q_d = ST_h I + \frac{1}{2} I^2 R - K(T_h - T_c) \quad (5)$$

요구되는 入力 電力  $P$ 는 高溫面에서 방열되는 열량과 低溫面에서 흡수한 열량과의 差異가 된다. 이것은 양면의 溫度差에 의한 제벡效果 혹은 熱起電力의 疊이고 式 (6)으로 표시된다.

$$P = Q_d - Q_n = S(T_h - T_c)I + I^2 R \quad (6)$$

열펌프를 가장 효율적으로 이용하기 위해서는 열의 발생 혹은 흡수가 최대가 되도록 작동시켜야 하고 성능계수, COP(coefficient of performance)가 최대가 되도록 작동시켜야 한다. 성능계수(COP)는 순수열량을 入力 電力으로 나눈 값이다. 즉,

$$COP = Q_n / P$$

$$= \frac{ST_c I - I^2 R / 2 - K(T_h - T_c)}{S(T_h - T_c)I + I^2 R} \quad (7)$$

최대 열량을 吐出하기 위한 電流  $I_{max}$ 는  $dQ_n/dI = 0$ 에서부터

$$I_{max} = ST_c / R \quad (8)$$

이 된다.

열펌프에 의하여 얻을 수 있는 최대 온도차는 式 (8)을 式 (4)에 代入하고  $Q_n = 0$ 일때  $\Delta T_{max}$  값을 구할 수 있다. 즉,

$$\Delta T_{max} = (T_h - T_c)_{max} = \frac{1}{2} z T_c^2 \quad (9)$$

여기서  $z$ 를 “피규어 오브 메리트”(Figure of Merit)라 하고 다음 式으로 표시된다.

$$z = \frac{S^2}{RK} \quad (10)$$

이  $z$ 는 熱電效果를 갖고 있는 材料의 性質에 左右되기 때문에 대단히 중요한 파라미터이다. 열펌프에 인가되는 電壓  $V$ 는 제벡電壓과 材料의 저항에 의한 電壓의 疊으로 표시된다.

$$V = S(T_h - T_c) + IR \quad (11)$$

열펌프의 성능계수가 최대가 되는 電流  $I_{COP}$ 는  $dCOP/dI = 0$ 로부터

$$I_{COP} = \frac{K(T_h - T_c)}{S(T_h + T_c)/2} [\sqrt{1 + z(T_h + T_c)/2} + 1] \quad (12)$$

式 (12)의  $I_{COP}$ 를 式 (7)에 代入하건 COP의 最大値를 구할 수 있다.

$$COP_{max} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \cdot \frac{\sqrt{1+z(T_h+T_c)/2} - T_h/T_c}{\sqrt{1+z(T_h+T_c)/2} + 1} \quad (13)$$

위 式들이 熱펌프를 이용한 시스템 설계에 사용 되는 理論式들이다.

#### 4. 熱펌프의 種類와 選擇基準

한개의  $n$ -형 반도체와  $p$ -형 반도체로 구성된 열펌프 要素만으로는 제구실을 다할 수 없으므로 여러개의 要素를 전기적으로는 직렬로, 熱적으로는 並列로 연결한 모듈(module)을 만들었을 때 열펌프의 기능을 발휘한다. 제작회사에 따라 모듈의 種類가 다양하다. 가장 적은 미니 모듈로는 4개의 要素로 구성된 Melco 社<sup>(4)</sup> 제품인 FC 0.45-4-05 單層모듈(single stage module)이다.

이것의 크기는 대략 1.6(3.3) W × 3.3 L × 2.4 H mm 정도이고, 최대전류 0.8 A, 최대전압 0.48 V, 온도차  $\Delta T = 67.5^\circ C$ , 최대열량 0.22 W이다. 가장 큰 모듈로서는 31개의 要素로 구성된 Melco 社의 CP 5-31-06 L 제품이다. 크기는 55 W × 55 L × 4.7 H mm 정도이고 최대전류 60 A, 최대전압 3.75 V, 최대열량 130 W, 온도차  $67.5^\circ C$ 이다. 이 중간에 수십가지의 다른 특성을 갖는 모듈이 있다.

모듈에는 單層으로 구성된 單層모듈 열펌프가 있고 이것은 溫度差가  $70^\circ C$ 이하인 경우에 사용되고 그 이상이 요구될 때는 單層모듈로서는 용량이 부족하므로 다층모듈을 여러개 겹쳐서 만든 多層모듈(multi-stage module)을 사용해야 한다. 다층모듈에는 2층에서 14층까지 만들어진 것이 있다. 다층모듈 열펌프는 다층모듈을 수직으로 여러개 쌓아 올린 피라밋 형태로 되어 있다. 그림 3은 Marlow 社 제품인 다층모듈 MI 1022 T 모델의 개략도 (a)와 성능곡선 (b)이고 그림 4는 6층 모듈 MI 6030 모델의 개략도 (a)

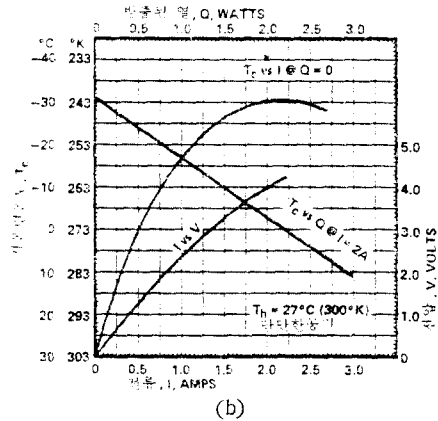
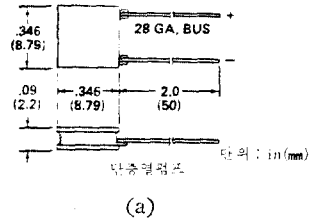


그림 3 MI 1022 T 열펌프

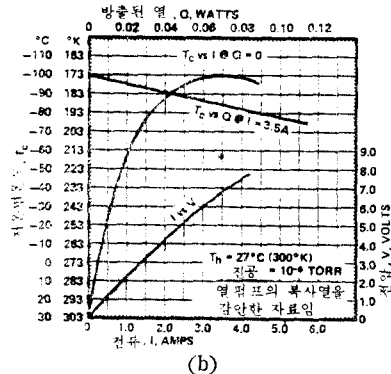
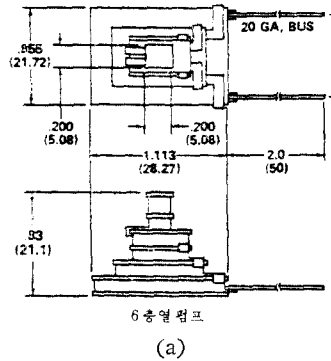


그림 4 MI 6030 열펌프

## ■ 解 說

와 성능곡선 (b)를 표시한다.

열펌프의 선택은 어디에다 응용하는가에 따라서 적절한 열펌프의 특성이 요구된다. 열펌프의 기본적인 작동특성은 저온면과 고온면의 온도, 저온면에서 열의 흡수능력, 고온면에서의 열의 발산능력, 입력 전류와 전압이다. 이러한 특성이 응용분야에 따라 적절히 선택되는 것 이외에 가격, 신뢰성, 최대성능계수 등을 고려하여야 한다. 열펌프의 고·저온면의 온도차는 열펌프가 공기 중에서 보다 진공 상태에서 작동할 때 온도차가 더 커진다.

일반적으로 열펌프의 가격은 모듈의 층이 많을수록 비싸지기 때문에 열펌프를 선택하는 데 이 점을 고려해야 한다. 그러나 모듈의 층이 많아지면 가격은 비싸나 성능계수(COP)는 향상되므로 가격과 COP 양면을 잘 절충하여 선택해야 한다.

모듈의 층이 결정되면 이 열펌프가 요구하는 열량을 흡수(혹은 발열) 할 수 있는가를 알아봐야 한다. 이것은 각 제작회사 모델마다 다르므로 그 제품의 특성곡선에서부터 결정해야 한다. 그림 5는 단층 모듈의 열펌프의 열흡수 능력과 저온면의 온도와의 관계를 모델별로 표시한 성능곡선의 한 예이다.

열펌프 선택 기준의 또 다른 요소는 소요 전류이다. 소요 전류가 클수록 전원 공급원이나 온도 조절기의 가격이 비싸지므로 가능한 소요 전류가 적은 열펌프를 선택하는 것이 좋다. 응용분야에 따라서 적절한 열펌프를 선택하기 위하여 개개의 열펌프가 갖는 성능특성을 알아야 한다.

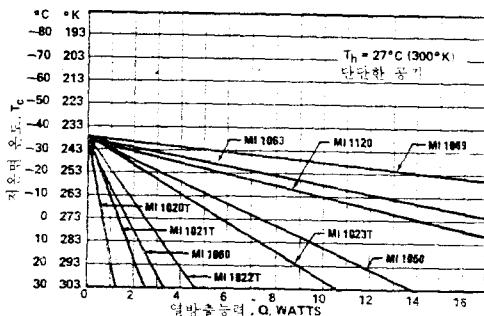


그림 5 열흡수능력과 저온면의 온도

## 5. 熱泵의 性能特性 및 信賴性

그림 3(b)와 그림 4(b)는 열펌프 모델의 성능 특성을 표시한 곡선도이다. 이 성능곡선은 高温面의 온도  $T_h=27^{\circ}\text{C}$ 를 기준으로 산출한 값들이다. 低温面의 온도  $T_c$ 와 電流  $I$ 와의 관계를 나타내는 곡선은 실제 열하중  $Q=0$ 일 때  $T_c$ 가  $I$ 의 함수로 표시된 곡선이고 다른 두 곡선은 전류가 최대일 때  $T_c$ 와  $Q$ 와의 관계, 그리고 電流와 電壓의 관계를 표시한 것이다.

전류와 전압의 관계는  $p$ -형과  $n$ -형 반도체의 결합부에서 발생하는 열기전력 때문에 직선적으로 비례하지 않는다.

단층모듈 열펌프의 성능곡선은 실내 공기온도 중에서 측정된 것이고 다층모듈 열펌프는 진공 상태에서 측정된 값이다.

열펌프가 熱電式으로 작동되기 때문에 기계적인 냉동시스템에 비하여 신뢰성이 뛰어난다. 고장이 나기 쉬운 곳은 두 다른 반도체를 용접한 접합부이다. 그러나 平均故障間隔(MTBF)은 제작회사에 따라 다르기는 하지만 조사에 의하면 30萬 時間까지 기록이 나와 있다.

고장 분석에 의하면 취급부주의로 인한 기계적인 손상과 과전류를 흘려 과열로 인한 손상이 주 원인이다. 열펌프가 충격과 진동 환경에도 강한 잇점을 갖고 있다.

엄격한 군사규격(MIL-STD-718 B)에 만족된다. 1000 g의 충격과 주파수범위 50~3000Hz에서 60 g의 임의 진동과 50 g의 정현파 진동에도 견딘다. 열펌프가 인장력과 압축력에 강하나 전단력에는 약하므로 설계상 전단력을 많이 받지 않도록 주의해야 한다.

## 6. 應用 分野

열펌프를 사용하면 최소 16 cm<sup>3</sup>의 공간내에 냉동장치의 설치가 가능하고 重量面에서도 재래식 기계방식의 냉동장치보다 가볍고 움직이는 부품이 없어 소음이 없고 신뢰성이 높고 정밀한

온도제어가 가능한 장점 때문에 많은 분야에 응용되고 있다.

(가) 軍事 宇宙항공 분야

열펌프가 설치장소의 방향이나 고도에 관계없이 작동이 가능하므로 비행체내의 열관리에 많이 응용된다. 관성 항법 유도장치의 전자 부품을 일정한 온도로 유지하기 위하여 가장 많이 사용되고 있다.

(나) 實驗室 및 科學機器 分野

이 분야에 응용되고 있는 기기로는 실험실용 냉정판(cold plate), 냉방실, 빙점 기준실, 공기 오염분석기, 상온유지실 등이다.

(다) 生活用品 分野

이 분야에 응용되고 있는 제품으로서는 이동식 피커닉 냉장고, 이동 차량용 냉장고, 식품온장고, 냉수기, 어항가열기, 맥주 냉장장고 등이다.

(라) 醫療機器 分野

의료기기 분야에는 하이포서미아 냉기담요(hypothermia blanket chillers), 각막냉동기(optomological cornea freezers), 혈액 분석기(blood analyzers) 등이다.

7. 맺음 말

1834년 펠티어효과가 발표된 이래 이 원리를

응용한 열펌프의 개발이 계속되었다. 초창기에는 열전효과가 높은 재료가 개발되지 못해 실용성이 희박하였으나 반도체 재료의 개발이 이루어지면서 1963년에  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  재료와 1978년  $\text{Si}_{0.78}\text{Ge}_{0.22}$  재료의 개발로 열펌프는 실용화 되고 있다.

재래식은 기계식 냉동장치에 비하여 단점보다는 장점이 많기 때문에 실용적인 가치와 응용분야가 더욱 확대되리라 기대된다. 앞으로 계속 열전효과가 높은 반도체 재료가 개발되어야 하고 또한 응용분야도 더욱 연구되어야 한다.

참 고 문 헌

- (1) Mark W. Zemansky & Richard H. Dittman, "Heat and Thermodynamics", McGraw-Hill, Inc. 1981
- (2) Bernard D.Wood, "Applications of Thermodynamics", Addison-Wesley Publishing Co. 1982
- (3) W. Huck, "Thermoelectric Heat Pumping", Proc., ASHRAE Annual Meeting, Vancouver, B.C. June 13-15, 1960
- (4) Guide To Thermoelectric Heat Pumps, Marlow Industries, Inc.
- (5) Solid State Cooling with Thermoelectrics, Materials Electronics Products Corporation.

