

열전냉동의 원리와 열전냉동 시스템의 설계

Principles of Thermoelectric Refrigeration and System Design

노 승 탁*, 서 정 세**
Sung Tack Ro, Jeong Se Seo

1. 머리말

1821년 Seebeck은 두개의 서로 다른 전도체의 접합부에 열을 가하였을 때 양단에 전위차가 생긴다는 실험 결과를 발표하였다. 12년 후에 Jean Peltier는 서로 다른 물질에 전류를 통과시켰을 때 접합부 근처에서 온도차가 생긴다는 것을 발견하였다.

이러한 발표들이 있는 후 Lenz에 의한 Peltier 효과의 본질 규명과 Thomson에 의한 Seebeck과 Peltier 계수들의 관계가 밝혀졌으며, 그 후 꾸준히 연구되어 오다가 1911년에 이르러 Altenkirchon이 열펌프 및 발전의 이론을 확립하였다.

열전현상은 어떤 물질 양단에 열과 전류를 동시에 흘렸을 때 상호작용에 의해 서로 영향을 주는 것을 말하며, 예컨대, 전압에 의한 전류의 흐름이 열의 흐름을 유발시켰을 때, 이것은 곧 열펌프(heat pump)의 원리가 되며 반대의 경우에 열전 모듈에 의한 발전의 원리가 되는 것이다.

이러한 원리를 이용하여 제작된 냉각장치 등은 종래의 냉각방식과는 달리 냉매 순환을 위한 기계적인 구동부분이 필요 없으며, 누설될 만한 유해 gas나 쇠를 침식시킬 만한 액체가 없고, 압력이 낮은 진공 상태나, 위치에 영향을 받는 곳 및 좁은 공간 등에 사용될 수 있으며, 소음이 없고, 자유자제로 열의 흐름을 바꿀 수가 있어 가열할 때는 단순히 전지의 방향만을 바꿈으로써 되며, 또한 가벼워 운반이 용이하며 낮은 전압에서도 사용이 가능하고 정확한 온도제어가 가능하다는 점에서 외국에서는 이미 오래전부터 컴퓨터, 핵잠수함 우주선 등의 첨단장비나 각종 보건, 산업기류의 냉각에 활용되고 있다. 그러나 그림 1에서 보듯이 기존의 압축식 또는 흡수식 냉각기에 비해 성능이 다소 낮으며, 사용되는 재질이 비싸다는 단점이 있다.

이 글에서는 열전모듈(Thermoelectric Module)내의 열전현상의 이론적 배경과 이를 냉각장치에 적용하였을 때 각종 특성을 파악하고, 주어진 냉동 부하에 적합한 모듈의 선택 및 설계 방법 등을 제시하고자 한다.

* 정회원, 서울대학교 기계공학과

** 서울대학교 대학원 기계공학과

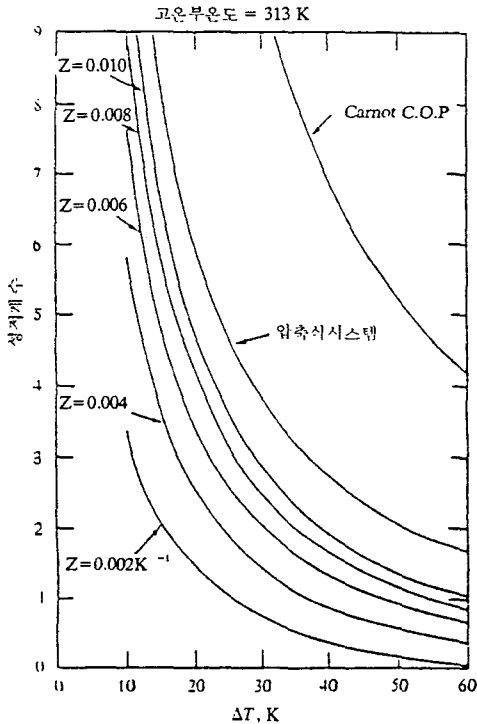


그림 1. 여러 형태의 냉동장치에 대해 온도차에 따른 성능계수의 비교

2. 열전모듈의 이론적 배경

2.1 열전 현상

어떤 물질의 양단에 온도차와 전압차가 동시에 존재한다면 각각에 의하여 생기는 열류(heat flux)와 전류가 상호작용 효과에 의해서 서로 영향을 받게 되며 Onsager 이론에 의하여 서로 미치는 정도가 같다. 이러한 원리를 이용하여 서로 다른 물성치를 가지고 있는 도체나 반도체의 접합부에 일정한 온도를 유지시키면서 전류를 흘렸을 때 아래와 같은 몇가지 열전 현상이 나타난다.

(1) Seebeck 효과

서로 물성치가 다른 도체 또는 반도체 A, B를 접합시키고 접합부에 일정한 온도를 유지시켰을 때 두 물질 A, B의 양단에 일정한 기전력이 발생하는데 이를 Seebeck 효과라 하며 이때 발생하는 기전력 V 는 접점온도의 함수로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{AB} = \int_{T_R}^T (\alpha_A - \alpha_B) dT \Big|_{I=0} \dots\dots\dots (1)$$

여기에서 I 는 접점간의 전류량을 의미하며 T_R 는 기준온도를 의미하고, α 는 Seebeck 계수를 의미한다.

(2) Peltier 효과

서로 다른 두 물질의 접합부에 전류를 흘렸을 때 접합부에서 열의 흡수 및 방출이 일어나게 되는데 이러한 현상을 Peltier 효과라고 하며 접합부에서의 열의 흡수 및 방출량 Q_P 를 수식으로 표현하면 아래의 식과 같다.

$$Q_P = I(\pi_A - \pi_B) \dots\dots\dots (2)$$

여기에서 π 는 Peltier 계수이다.

(3) Thomson 효과

온도구배가 존재하는 도체 또는 반도체에 전류를 흘렸을 때 여기에는 열과 전류가 동시에 흐르게 되며, 이때 열과 전류는 서로 영향을 주게 되는데, 이러한 현상을 Thomson 효과라고 한다. 온도구배와 전류의 양에 따른 열의 출, 입량 Q_T 를 수식으로 표현하면 다음의 식과 같다.

$$Q_T = I \left(T \frac{d\alpha}{dT} \Delta T \right) \dots\dots\dots (3)$$

여기에서 $T(d\alpha/dT)$ 는 Thomson 계수(σ)라고 하며, Thomson 계수, Seebeck 계수, Peltier 계수간에는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\sigma_A - \sigma_B = -T \frac{d^2 V_{AB}}{dT^2} = -T \frac{d}{dT} \left(\frac{\pi_{AB}}{T} \right) \dots (4)$$

$$\pi_{AB} = T \frac{dV_{AB}}{dT} = T\alpha_{AB} \dots\dots\dots (5)$$

(4) p형과 n형 반도체 접합부에서 여러 계수의 관계

p형과 n형의 두 반도체를 접합하였을 때 Peltier 계수와 Seebeck 계수는 다음의 식과 같은 관계를 갖는다.

$$\pi_{pn} = \pi_p + \pi_n \dots\dots\dots (6)$$

$$\alpha_{pn} = |\alpha_p| + |\alpha_n| \dots\dots\dots (7)$$

2.2 열전모듈의 성능특성 해석

위의 2.1절에서 언급된 효과들이 열전모듈

에서 나타나며, 냉각과정시 이러한 효과에 의한 열전모듈의 성능특성을 알아보기로 하자.

그림 2에서 보듯이 n형과 p형의 반도체로 구성된 열전모듈의 한 요소(element)에 대하여 반도체의 접합부에 전류를 n형에서 p형으로 통과시킴으로써 낮은 온도의 항온조로부터 높은 온도의 항온조로 열을 운반한다. 이 때에 요소의 내, 외에서 일어나는 열전현상에 의한 성능해석을 비교적 간단하게 하기 위하여 실제 현상과 큰 차이가 없게 반도체 측면방향으로의 열전달이 축방향에 비해 미소하므로 무시하고, 접촉점에서의 전기저항은 반도체의 저항에 비하여 비교적 적으므로 무시하며, 열전도성(k), 전기저항력(ρ)과 Seebeck 수(α)가 온도에 큰 영향을 받지 않는다는 가정을 고려하여 열전모듈의 성능을 평가하는데 관심있는 3가지 양, 즉 성적계수, 열펌프율, 최대온도차 등을 해석해 보기로 하자.

2.2.1 성적계수(C. O. P)

성적계수 η_c를 열전모듈에 들어가는 입력 P에 대한 저온부에서의 열흡수율을 Q_c로 정의하면 아래 식과 같이 표현될 수 있다.

$$\eta_c = \frac{\text{cooling power}}{\text{input power}} = \frac{Q_c}{P} \dots\dots\dots (8)$$

저온 접합부에서 제거되는 열의 양 Q_c는 Peltier 효과에 의한 것에 Joule 열에 의하여 발생하는 열의 반이 저온부로 흘러들어오는 것과 고온부와 저온부의 온도차에 의한 열전도성 열전달량을 감하고 Thomson 효과를 무시한다면 아래 식과 같이 표현된다.

$$Q_c = \alpha T_c I - \frac{I^2 R}{2} - K \Delta T \dots\dots\dots (9)$$

여기에서 R는 열전모듈의 내부저항이며, K는 열전도도를 의미한다.

열전모듈의 한 요소에 적용되는 전압 V는 요소의 저항에 의한 것과 Seebeck 효과로 인한 것의 합으로 나타나며 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$V = \alpha \Delta T + IR \dots\dots\dots (10)$$

그러므로, 들어가는 입력은 아래 식과 같이 표현되며,

$$P = VI = \alpha I \Delta T + I^2 R \dots\dots\dots (11)$$

그림 3에서 보듯이 전류가 증가함에 따라 성적계수가 증가하다가 감소함을 알 수 있다. 이것은 전류의 양이 증가함에 따라 Joule 열의 효과가 증가하기 때문이다. 따라서, 최대의 성적계수가 존재하며 이를 구하면 다음의 식과 같다.

$$\eta_{c, \max} = \frac{T_c}{\Delta T} \left(\frac{\sqrt{(1+ZT_{av})} - \frac{T_h}{T_c}}{\sqrt{(1+ZT_{av})} + 1} \right) = \frac{T_{av}}{\Delta T} \left(\frac{\sqrt{(1+ZT_{av})} - 1}{\sqrt{(1+ZT_{av})} + 1} \right) - \frac{1}{2} \dots (12)$$

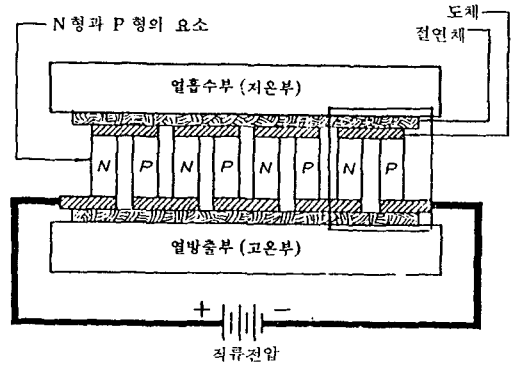


그림 2. 열전모듈내부의 전류와 열흐름에 대한 개략도

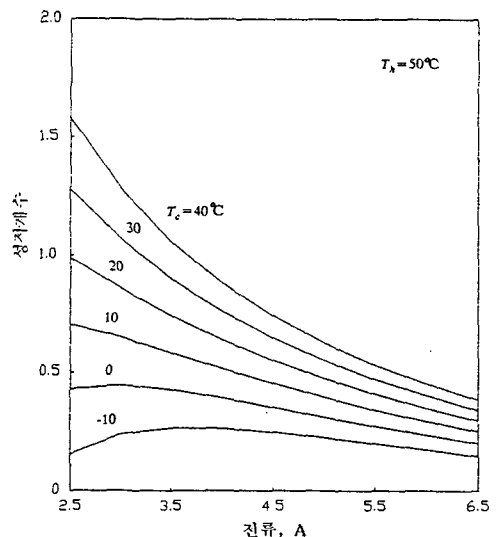


그림 3. 여러 저온부온도에 대해 전류 증가에 따른 성적계수의 변화

여기에서 Z 는 장치계수(Figure of Merit)로서 $Z = \alpha^2 / RK$ 를 의미하며, $T_{av} = (T_h + T_c) / 2$ 를 의미한다.

그림 4에서 몇 가지 고온부 온도에 대하여 저온부 온도와 최대성적계수와와의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 저온부 온도와 고온부온도의 차이가 감소할수록 그때의 최대성적계수가 급격히 증가함을 알 수 있다.

2.2.2 최대 열펌프율

저온부로부터의 열흡수량은 그림 5에서 보듯이 전류가 증가할 때 Peltier 효과에 의해 증가하다가 Joule 효과에 의해 감소하게 된다. 따라서, 최대 열펌프율 Q_{max} 가 존재하게 되며 이를 구하면 아래의 식으로 표현될 수 있다.

$$Q_{max} = \frac{(\alpha T_c)^2}{2R} \dots\dots\dots (13)$$

위의 최대 열펌프율은 그림 6에서 보듯이 고온부 온도가 증가함에 따라 거의 일정하게 증가함을 알 수 있다.

2.2.3 최대 온도차

저온부로부터 열을 제거하는율이 거의 없을 때, 즉 $Q_{max} = 0$ 때 온도차가 최대로 도달할 수 있으며 이 때의 온도차 ΔT_{max} 는 아래 식과 같이 표현될 수 있다.

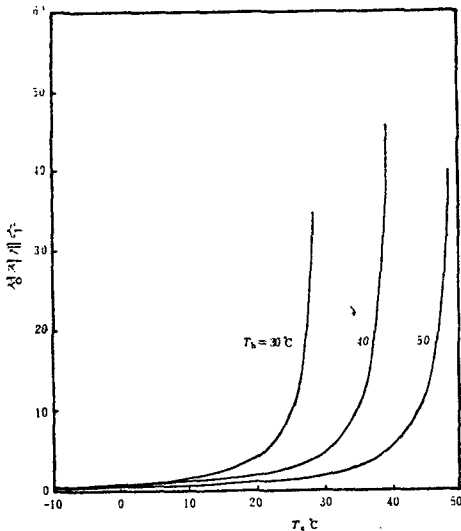


그림 4. 여러 고온부온도에 대해 저온부온도 증가에 따른 성적계수의 변화

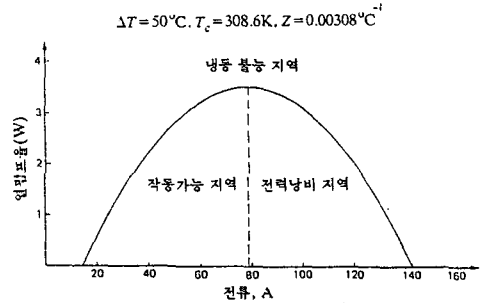


그림 5. 온도 증가에 따른 열펌프율의 변화

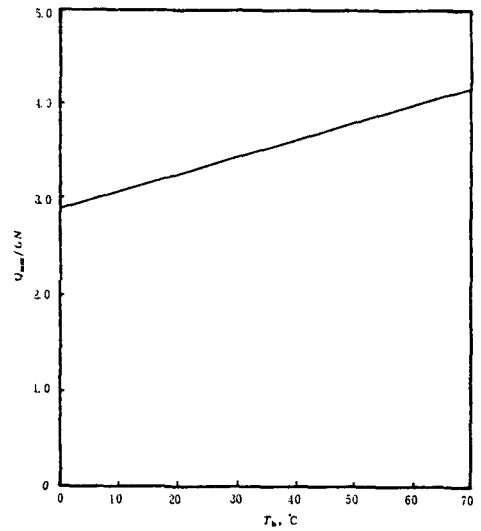


그림 6. 고온부온도의 증가에 따른 최대열펌프율의 변화

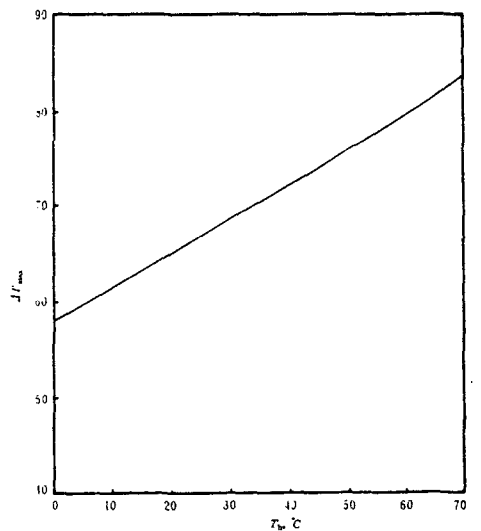


그림 7. 고온부온도의 증가에 따른 최대온도차의 변화

$$\Delta T_{\max} = \frac{\alpha^2 T_c^2}{2RK} = \frac{Z T_c^2}{2} \dots\dots\dots (14)$$

ΔT_{\max} 를 고온부온도에 따라 나타내면 그림 7과 같으며 고온부온도가 증가함에 따라 거의 일정하게 증가하고 있다.

고온부에서의 온도 T_h 가 주어진다면 이 때의 저온부온도 T_c 는 아래와 같이 표현된다.

$$T_c = \frac{\sqrt{[(1+2ZT_h)]-1}}{Z} \dots\dots\dots (15)$$

2.3 장치계수(Figure of Merit)의 최적화조건

그림 8에서 보듯이 장치계수 Z 가 클수록 같은 조건하에서 성능이 크게 향상됨을 알 수 있다. 따라서 주어진 재질에서 Z 가 최대가 되는 모듈형상의 조건을 알아보고 재질에 따른 Z 값의 변화를 알아보기로 하자. 모듈의 요소 길이(ℓ) 또는 단면적(A)을 변화시켜 Z 의 값을 최대로 할 수 있다. 길이 또는 단면적에 의하여 영향을 받는 요소의 전기저항 R 와 열전도도 K 등을 n 형과 p 형의 반도체에 대하여 단면적에 대한 길이비 즉, $\lambda = \ell/A$ 로 나타내면 아래의 식들로 표현되며,

$$R = \rho_n \lambda_n + \rho_p \lambda_p \dots\dots\dots (16)$$

$$K = k_n \frac{1}{\lambda_n} + k_p \frac{1}{\lambda_p} \dots\dots\dots (17)$$

$$RK = k_n \rho_n + k_p \rho_p + k_n \rho_p \frac{\lambda_p}{\lambda_n} + k_p \rho_n \frac{\lambda_n}{\lambda_p} \dots\dots\dots (18)$$

여기에서 k 는 열전도계수를 의미하며, ρ 는 전기저항을 의미한다.

위의 식 (18)를 λ_p/λ_n 에 대하여 미분하면 RK 의 최소값을 구할 수 있고, 결국 기하학적 형상에 따른 최대 장치계수 Z_{\max} 는 아래와 같으며,

$$Z_{\max} = \frac{\alpha^2}{(RK)_{\min}} = \frac{\alpha^2}{[\sqrt{(\rho_n \sigma_n)} + \sqrt{(\rho_p \sigma_p)}]^2} \dots\dots\dots (19)$$

이 때의 열전모듈 단면적 A 의 비는 아래 식과 같다.

$$\frac{A_n}{A_p} = \frac{\lambda_p}{\lambda_n} = \left(\frac{\rho_n k_p}{\rho_p k_n} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (20)$$

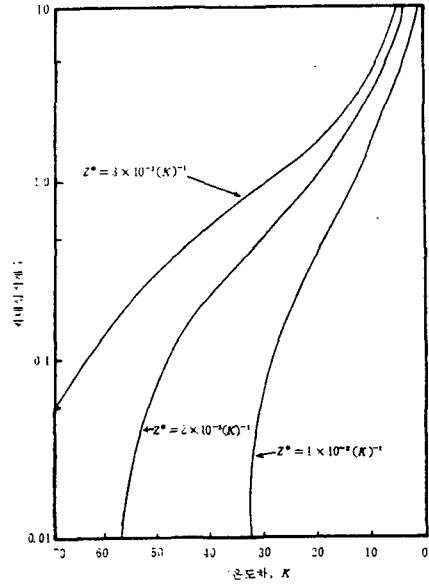


그림 8. 장치계수의 변화에 대해 온도차에 따른 최대성능계수의 변화

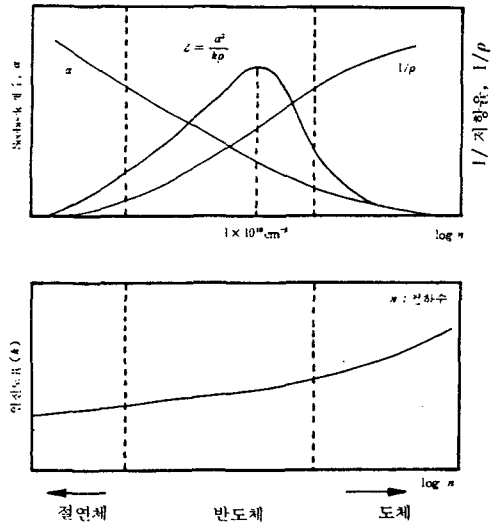


그림 9. 재료변화에 따른 Z의 변화

또한, 그림 9에서 볼 수 있듯이 열전모듈에 사용되는 물질의 재질에 따라 Z 의 값이 크게 변하는데 단열재의 경우 Seebeck 계수가 비교적 높고 열전도율도 낮으나 전기저항이 너무 커서 Z 의 값이 낮게 되고, 금속과 같은 도체의 경우 전기저항은 낮으나 Seebeck 계수

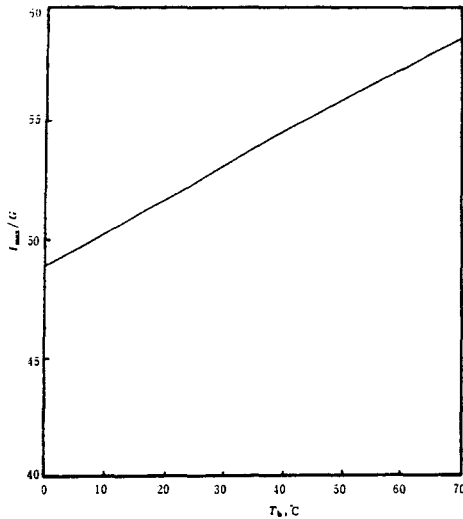


그림 10. 고온부온도의 증가에 따른 최대전류의 변화

가 매우 낮고 열전도율이 높아 Z 의 값이 낮다. 따라서 이러한 현상의 중간적 성질을 갖는 반도체의 경우 Z 의 값이 높게 되며, 따라서 열전모듈에 사용되는 대부분의 재질은 반도체 특성을 갖는다.

3. 열전모듈의 설계 및 선택

3.1 표준화 관계식

지금까지 열전모듈의 특성을 나타내는 식들은 모듈에 사용된 재질의 물성치(α, k, ρ, Z)와 작동변수(T_c, T_h, Q_c, I)가 포함되어 있어서 열전모듈을 설계하거나 필요한 부하에 적합한 모듈을 선택하는 데 있어 여러가지 불편한 점이 많다. 따라서 모듈의 성능을 나타내는 몇 가지 변수값으로 적합한 모듈을 선택할 수 있는 표준화된 관계식이 필요하며 이에 대하여 자세히 알아보자. 먼저 선택을 하기 위해 고려되어야 할 변수들에 대하여 알아보면 아래와 같다.

1) 전류 : I/G

단층 열전모듈의 성능을 해석하는데 있어서 온도에 따라 변하는 변수들의 조합에 의한 조직적인 변화를 파악하는 것이 중요하다.

최대 효율에서나 최대 열펌프율에서 I/G 는 요소의 형상에 무관하며 요소 양단의 온도와 온도에 따라 변하는 반도체의 물성치에 따라 변화한다. 여기서 G 는 요소의 길이에 대한 단면적의 비를 나타낸다.

2) 전압 : V/N

전압 V 가 직렬로 연결되어 있는 요소의 수 N 로 나누어 졌을 때 유용한 선택의 변수가 될 수 있다. V/N 는 G 와 요소의 양단의 온도에 영향을 받으며 결과적으로 최대 효율과 최대 펌프율은 양단의 온도에만 영향을 받게 된다.

3) 열펌프율 : Q/GN

여기서 Q 는 저온부에서 흡수되는 열의 흐름이며 Q/GN 는 G 와 온도만의 함수로 나타낸다.

고온부온도 T_h 와 저온부온도 T_c 가 정하여 진다면 $I/G, V/N$ 와 Q/GN 는 최대열펌프율과 최대효율 각각에서 결정될 수 있다.

$(Q/GN)/(IV/GN)$ 는 Q/IV 로 되며 이것은 곧 모듈의 입력에 대한 열펌프율로서 곧 성적계수가 된다. 성적계수는 모듈의 설계에 있어 우선적으로 고려되어야 할 사항이며 적당한 열 방출부의 설계 및 선택에 좋은 정보를 제공해 준다.

한편, 여기에서 구하여지는 $Q/GN, V/N, V/N, I/G$ 의 값들로부터 Q, G, N, I, V 를 결정하는 데는 최소한 두 개의 요소가 더 결정되어야 하며, 예컨대 Q 와 전압 V 가 결정된다면 이때의 최적 요소의 단면적에 대한 길이의 비 G , 요소의 갯수 N , 흐르는 전류 I 가 연속적으로 선택 및 계산될 수 있다.

한편, 열전모듈의 설계 및 선택에 있어서 중요한 특성은 최대치의 값들인 $\Delta T_{max}, Q_{max}/GN, I_{max}/G, V_{max}/N$ 등이며, 열전모듈의 재질에 따라 다르고 이들은 모두 온도의 함수이다.

위에서 언급된 것을 수식으로 표현하면 아래 식과 같다.

$$\frac{I_{max}}{G} = \frac{\alpha T_c}{\rho} \dots\dots\dots (21)$$

$$\frac{V_{max}}{N} = \alpha T_h \dots\dots\dots (22)$$

$$\frac{Q_{\max}}{GN} = \frac{1}{2} ZkT_c^2 \dots\dots\dots (23)$$

$$\Delta T_{\max} = \frac{1}{2} ZT_c^2 \dots\dots\dots (24)$$

위의 값들과 고온부 온도와의 관계를 그림으로 나타내면 각각 그림 6, 그림 7, 그림 10, 그림 11과 같다. 그림들에서 보듯이 고온부 온도에 따라 거의 일정하게 증가함을 알 수 있다.

또한, Q_{\max} , ΔT_{\max} , I_{\max} 를 각각 분모로 하여 규준화한 Q_c/Q_{\max} , $\Delta T/\Delta T_{\max}$, I/I_{\max} 변수들은 서로 연관 관계가 있으며 다음의 식과 같다.

$$\frac{Q_c}{Q_{\max}} = 2 \frac{I}{I_{\max}} - \left(\frac{I}{I_{\max}}\right)^2 - \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}} \dots\dots (25)$$

$$\frac{V}{V_{\max}} = \frac{T_c}{T_h} \left(\frac{I}{I_{\max}} - 1\right) + 1 \dots\dots\dots (26)$$

위의 식 (25)에서 전류 및 온도차 각각의 변화에 따른 열흡수량을 그림으로 나타내면 그림 12로 나타난다. 특히, 그림 13에 나타난 포물선은 성적계수가 최대일 때의 온도변화에 따른 열흡수량을 나타내는 것이며, 그림 12에 나타나듯이 전류의 양이 증가함에 따라 열흡수의 증가량이 둔화되고 있다.

한편, 몇가지 저온부 온도와 고온부 온도에 대한 전류와 전압의 관계를 그림 14에서 나타

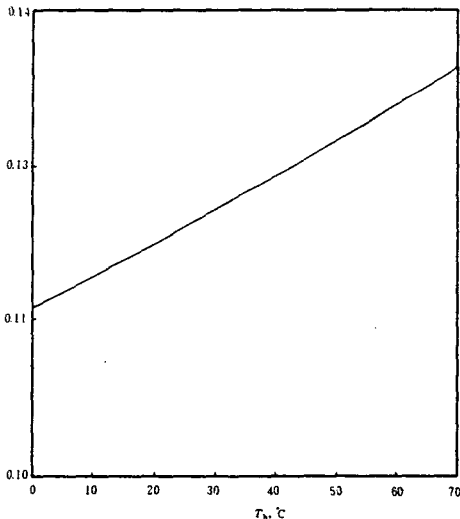


그림 11. 고온부온도의 증가에 따른 최대전압의 변화

내고 있다. 일정한 저온부 온도에서 고온부 온도 변화에 대하여 전류 및 전압의 관계변화가 적다는 것을 알 수 있다.

최대효율에 대해서는 식 (25)에 I/I_{\max} 대신 최적전류 I_{opt} 를 나타내는 아래 식을 넣으면 저온부에서의 최적 열흡수량 Q_{opt}/Q_{\max} 를 얻을 수 있다.

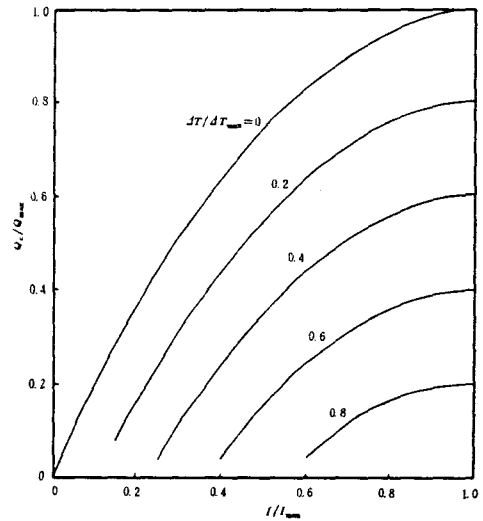


그림 12. 여러 온도차에 대해 전류증가에 따른 열펌프효율의 변화

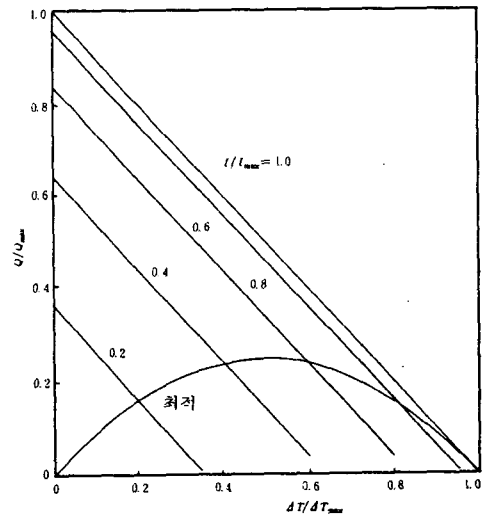


그림 13. 전류변화 및 최적작동에 대해 온도차의 증가에 따른 열펌프효율의 변화

$$\frac{I_{opt}}{I_{max}} = \frac{1}{2} T_c Z \frac{\Delta T / \Delta T_{max}}{\sqrt{(1 + Z T_{av})} - 1} \dots\dots\dots (27)$$

이를 그림으로 나타내면 그림 13의 포물선과 같다.

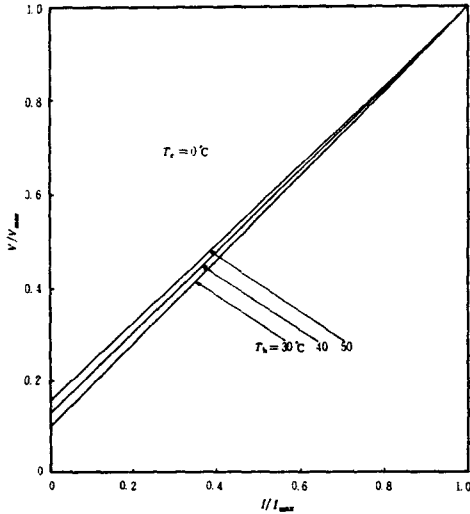


그림 14. 고온부 온도 변화에 따른 전류와 전압의 관계

3.2 열전모듈의 설계 및 분석과정

3.2.1 열전모듈의 설계 과정

위에서 언급된 식들과 그림들을 이용하여 최적의 열전모듈을 설계 또는 선택할 수 있다. 여기에서는 고온부 온도 T_h 와 저온부 온도 T_c 가 각각 주어졌을 때 최대 효율과 최대 열펌프율에서 효과적으로 작동할 수 있는 열전모듈의 설계 및 선택에 대하여 알아보도록 하자.

- 1) 고온부 온도 (T_h)의 값의 설정.
- 2) 그림 6과 그림 7로부터 Q_{max}/GN 과 ΔT_{max} 를 찾는다.
- 3) 저온부의 온도 T_c 의 값의 설정.
- 4) 과정 1, 2, 3으로부터 $\Delta T / \Delta T_{max}$ 의 계산
- 5) 그림 13으로부터 최적 또는 최대의 Q/Q_{max} 를 찾는다.
- 6) 과정 2와 5로부터 최적 또는 최대의 Q/GN 의 값의 계산.
- 7) 저온부에서 흡수되어야 할 열흡수량 Q 의 설정.
- 8) 과정 6과 7로부터 최적 또는 최대의 GN 값의 계산.
- 9) 계산된 GN 값과 가장 가까운 열전모듈의 설계 또는 선택.

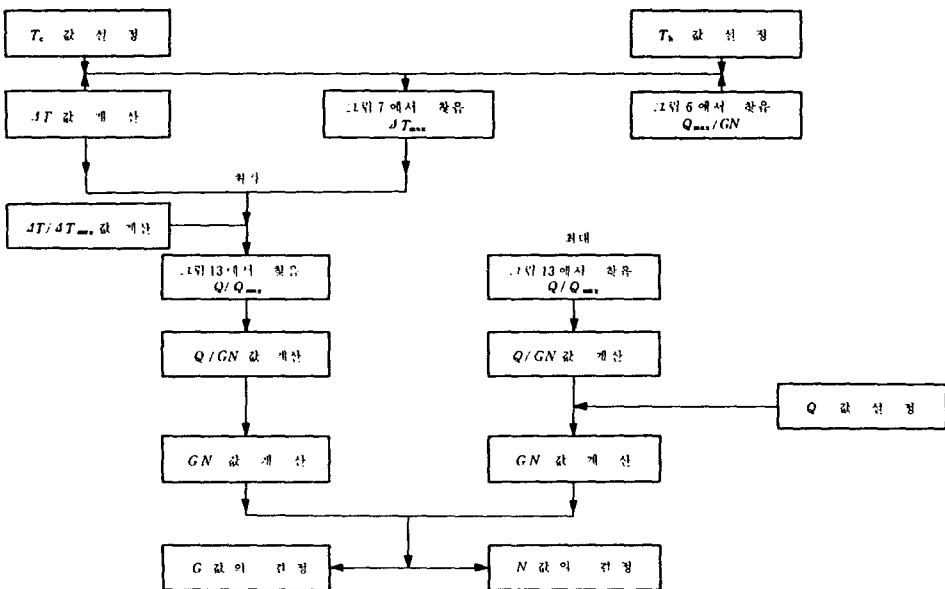


그림 15. 열전모듈의 설계 및 선택 과정에 대한 흐름도

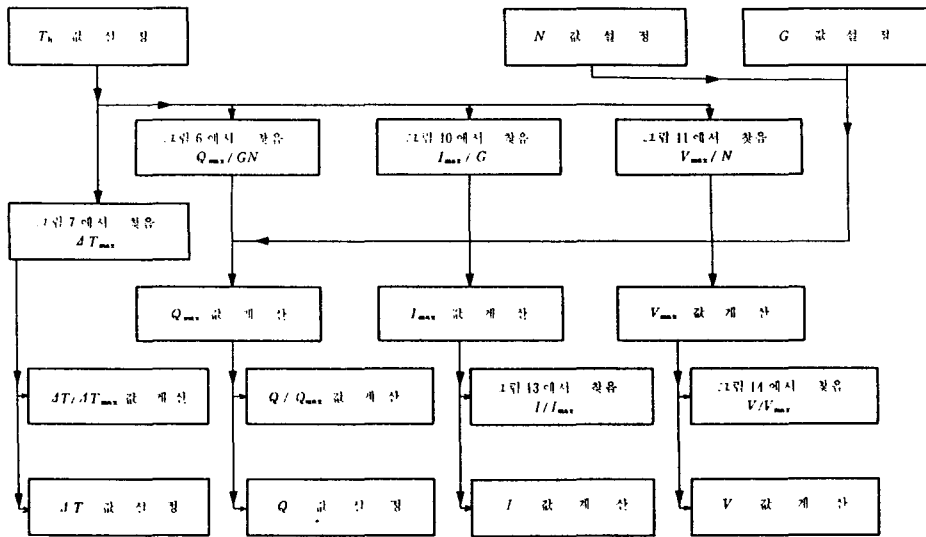


그림 16. 열전모듈의 성능분석과정에 대한 흐름도

위의 선택과정을 그림 15에서 흐름도로 나타내고 있다. 위의 흐름에 따라 열전모듈을 선택하면 최적, 최대의 열전모듈을 설계 및 선택할 수 있을 것이다.

3.2.2 열전모듈의 성능분석 과정

주어진 열전모듈에 대하여 어떤 부하에 대하여 적합성 여부를 판정하기 위하여서는 모듈의 성능을 분석하는 것이 필요하다. 여기에서는 모듈이 작동하는 고온부 온도 T_h 와 모듈의 기하학적 형상계수 G 와 모듈내의 요소(element)의 갯수 N 이 주어졌을 때 효과적인 작동시 열펌프를 및 온도차, 전류, 전압을 각각 계산하여 보자.

- 1) 고온부의 온도 T_h 값의 설정.
- 2) 그림 6, 그림 7, 그림 10, 그림 11로부터 각각 Q_{max}/GN , ΔT_{max} , I_{max}/G , V_{max}/N 의 값들을 찾는다.
- 3) N 값의 설정.
- 4) G 값의 설정.
- 5) 과정 2, 3, 4로부터 Q_{max} , I_{max} , V_{max} 값들의 계산.
- 6) ΔT 값의 설정.
- 7) 과정 2와 6으로부터 $\Delta T/\Delta T_{max}$ 값의 계산.
- 8) Q 값의 설정.
- 9) 과정 5와 8으로부터 Q/Q_{max} 값의 계산.
- 10) 그림 13으로부터 I/I_{max} 의 값을 찾는다.

- 11) 과정 5와 10으로부터 I 값의 계산.
- 12) 그림 14로부터 V/V_{max} 의 값을 찾는다.
- 13) 과정 5와 12로부터 V 값의 계산.

위의 성능분석과정을 그림 16에서 흐름도로 나타내고 있다. 흐름도의 과정대로 분석한다면 열전모듈에 소요되는 전류, 전압 등을 알 수 있을 것이다.

4. 다단 열전모듈의 성능해석

국소 또는 일정지역에 대해 단층 열전모듈로 이를 수 없는 온도강하가 필요할 때 다단의 열전모듈이 필요하게 된다.

냉각시 그림 17에서 보듯이 열전모듈의 저온부에서 흡수된 열이 소요전력과 더불어 고온부에서 방출되며, 방출되는 열은 다시 다음 단계의 모듈 저온부에서 다시 흡수되며, 결국 첫단계 모듈의 저온부 온도를 더 낮게 한다는 것이 다단 열전모듈의 원리이다.

그러면, 여기에서 해석의 편의를 위하여 모듈 주변으로의 열전달이 미소하므로 이를 무시하고 다단 열전모듈의 효율 및 최대 온도차에 대하여 알아보도록 하자.

4.1 성적계수

열전모듈 사이의 열접촉저항을 무시한다면

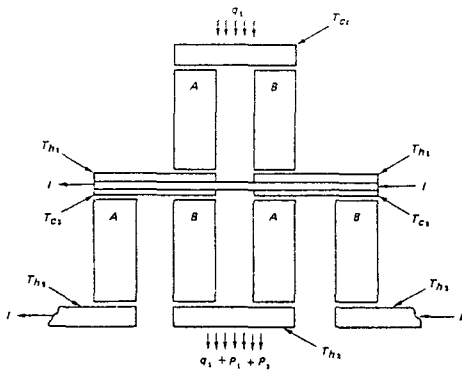


그림 17. 다단 열전모듈의 개략도

단층 열전모듈에서와 같은 방법으로 각층에 대하여 저온부 열흡수량과 소요 전력을 구할 수 있으며, 각층 열전모듈의 효율 η_i 로 다단 열전모듈의 효율(η)를 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{Q_{1,c}}{\sum_i P_i} = \frac{1}{\prod_{i=1}^{i=n} (1 + 1/\eta_i)} - 1 \dots\dots\dots (28)$$

여기에서 $Q_{1,c}$ 는 첫단 저온부에서의 열흡수율을 나타내며, n 는 모듈의 갯수를 나타낸다.

위의 식에서 양단의 같은 온도에 대하여 2단 열전모듈이 단층 열전모듈에 비해 성적계수에서 유리함을 알 수 있다.

4.2 최대 온도차

단층 열전모듈의 경우와 같은 방법으로 각층 고온부와 저온부 최대온도차의 합이 결국 다단 모듈의 최대온도차이며 아래 식과 같다.

$$\Delta T_{max} = \sum_{i=1}^n (T_{ih} - T_{ic}) = \frac{1}{2} \sum Z_i T_{ic}^2 \dots (29)$$

2단의 경우에 대해서는 같은 종류의 열전모듈에 대하여 아래와 같은 최대 온도차를 얻을 수 있다.

$$\Delta T_{max} = \frac{1}{2} Z T_{1c} (T_{2h} + T_{1c}) \dots\dots\dots (30)$$

5. 열전모듈을 이용한 냉장고의 설계

5.1 냉장고 크기변화에 따른 열전모듈의 설계

냉장고의 크기가 늘어나면 냉장고 내부의 열 유입량이 증가하게 될 것이다. 즉 증가된 열 부하에 대하여 여기에 적합한 열전모듈의 설계는 필수 불가결한 것이다.

냉장고 내부의 온도가 일정하게 유지되기 위해서는, 냉장고의 크기가 증가함에 따라 표면적이 증가하는데 표면적의 증가로 인한 열 유입량의 증가량을 열전모듈이 최소한 방출시켜야 할 것이다. 이러한 점들을 고려하여 열전모듈을 설계하여야 하며, 열전모듈을 설계하는데 있어 중요한 형상계수 G 와 열전모듈의 요소수 N 을 산출해 냄으로써 냉장고의 크기 변화에 따라 변화되는 열부하에 적합한 열전모듈을 설계할 수 있을 것이다.

외기온도가 일정하다고 보면, 내부온도를 일정하게 유지하는데 있어 단위면적당 유입되는 열량은 일정하다고 할 수 있다. 한편, 열전모듈에서 열방출량은 주위의 온도가 일정하다면 정상상태에서 단위 요소당 거의 일정하며, 냉장고 내부의 온도를 일정하게 유지하기 위해서는 아래의 식과 같이 증가되는 냉장고 크기변화만큼 모듈의 형상계수와 요소의 수를 늘려야 할 것이다.

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{(GN)_2}{(GN)_1} \dots\dots\dots (31)$$

여기에서 A 는 냉장고의 표면적을 나타내며, 하첨자 1은 처음의 경우를 의미하며, 하첨자 2는 크기를 변화시켰을 때의 경우를 의미한다.

냉장고의 크기를 변화시키기 전에 사용되던 모듈의 $(GN)_1$ 의 값을 안다면 크기를 변화시켰을 때 설계되어야 할 열전모듈의 $(GN)_2$ 값을 구할 수 있으며 열전모듈의 설계는 안정도를 고려하여 최소한 $(GN)_2$ 값보다 큰 (GN) 값을 갖도록 설계되어야 한다.

5.2 외기온도 변화에 따른 열전모듈의 설계

외기온도의 변화에 따라 냉장고의 성능이 크게 좌우된다. 먼저, 외기의 온도가 상승함에 따라 벽면을 통하여 유입되는 열의 양이 증가하게 되며, 외기의 온도가 올라가게 되면 열전모듈이 방출시키는 열펌프율이 감소하게 된다. 결국 유입되는 열의 양은 늘어나고 열방

출력은 저하되므로 해서 냉장고의 성능이 크게 저하된다. 따라서 외기 온도의 변화에 따른 냉장고의 영향을 설계시에 충분히 고려하여야 할 것이다. 외기온도 상승에 따라 모듈의 요소(element)당의 성능이 저하되어 열펌프의 양이 감소하며 감소된 양 만큼을 모듈의 형상계수와 요소의 수를 증가시켜 보충하여야 할 것이다. 따라서 열전모듈의 양단에 걸리는 전압이 주어지고 설계할 외기온도와 냉장고의 내부온도가 주어진다면 GN은 열전모듈의 요소수 N에 대하여 아래 식이 성립되도록 설계되어야 한다.

$$GN \geq \frac{UA(T_a - T)}{\frac{\alpha}{\rho} T_c (V/N - \alpha \Delta T) - \frac{1}{2\rho} (V/N - \alpha \Delta T)^2 - k \Delta T} \dots\dots\dots (32)$$

여기에서 U는 냉장고 벽을 통하는 총괄열관료율을 의미한다.

6. 맺 음 말

지금까지 열전모듈의 원리와 설계 방법 및 응용방법 등에 대하여 알아보았다. 열전모듈의 독특한 특성인 경량화와 정확한 온도제어 등 여러 장점으로 인하여 선진외국에서는 널리 상용화되어 있는 것에 비해 국내에서는 이용실태가 미미할 뿐만 아니라 작동원리 또한 거의 알려져 있지 못하다.

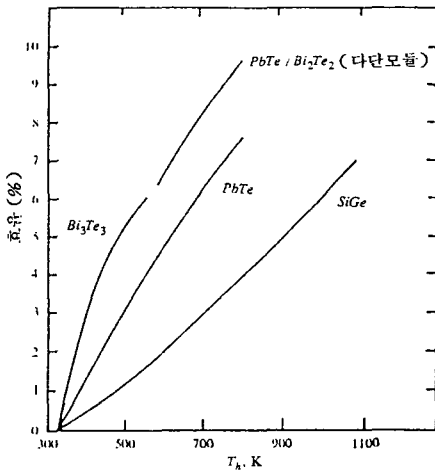


그림 18. 여러 재질에 따른 성능변화의 비교

여기에서는 열전모듈의 작동원리 및 응용방법을 소개하는 데 노력하였으며, 외국의 몇몇 회사에서 이미 생산되고 있는 제품을 토대로 모듈의 선택방법 및 성능분석방법을 소개하였다.

앞에서도 언급되었듯이 열전모듈의 성능을 크게 좌우하는 장치계수 Z의 값을 향상시키기 위한 재료의 개발이 외국에서는 꾸준히 연구되고 있으며, 그림 18에서 보듯이 현재 상온의 작동온도에 비교적 Z의 값이 좋은 Bismuth Telluride가 재질로 많이 사용되고 있다. 또한 기존의 재질을 이용하면서 모듈의 형상을 바꿔 효율을 향상시키는 연구도 진행되고 있는데, 예를 들면 n형과 p형 반도체 사이에 얇은 은박을 적절히 사용하므로써 반도체 내의 열발생을 줄이고 열흡수율을 향상시키는 방법 등을 들 수 있다.

참 고 문 헌

1. Angrist, S. W., "Direct Energy Conversion", Allyn and Bacon, Inco., 2nd ed., Boston, 1970.
2. Kraus, A. D. and Cohen, A. B., "Thermal Analysis and Control of Electronic Equipment", McGRAW-HILL, New York 1983.
3. Rowe, D. M. and Bhandari, C. M., "Modern Thermoelectrics", Holt, Rinehart and Winston Ltd, Malta, 1983.
4. Marlow Industries, Inc., "Guide to Thermoelectric Heat Pumps", Catalog No. 90-002.
5. Landecker, K., "Some Further Remark on Improvement of Peltier Junction for Thermoelectric Cooling", Energy Conversion, Vol.14, pp.21-33, 1974.
6. 노승탁 외, "열전모듈을 이용한 소형 냉장고의 열설계 및 성능해석에 관한 연구", 생산기술연구소, 1989.