

Bi系化合物 半導體에 의한 熱電發電

(Thermoelectric Power Generation by Bi Alloy Semiconductors)

朴 昌 燁*

(Park, Chang Yub)

要 約

이 熱電發電器는 Bi系化合物 半導體 Sb_2Te_3 및 소량의 不純物을 含有한 $ZnSb$ 를 사용하여 實驗한것으로 熱起電力 α , 比抵抗 ρ , 熱傳導率 k 및 高溫部와 低溫部の 溫度差를 測定하였다. 特性은 다른 材料를 使用한 熱電發電器보다 $Sb_2Te_3+Bi_2Se_3$ 와 $Bi_2Te_3+Sb_2Te_3$ 를 素子로 사용한 경우 效率이 우수하였으며 이의 效率은 1.42%였다.

ABSTRACT

This thermoelectric generator devices have been determined for bismuth alloys, Sb_2Te_3 and $ZnSb$ containing small amounts of doping materials. The thermoelectric matermoelectric power; α , resistivity; ρ , heatconduction; k , and temperature difference between cold and hot junction was measured. Generator consisting both $Bi_2Te_3+Bi_2Se_3$ and $Bi_2Te_3+Sb_2Te_3$ is better efficient than others containing another thermoceuple materials. Its efficiency is 1.42%.

I. 序 論

이 直接發電은 熱電發電으로 宇宙用 및 衛星에 主로 使用하고 있으며 地上用으로도 많은 研究가 進行되고있다. 그러나 集熱型發電器는 太陽熱을 利用할수도 있으나 큰 熱源을 利用하여 發電할수 있는 것으로 앞으로 이에 使用할 材料開發이 興味있는 分野라하겠다. 이 熱電發電은 두種의 다른 金屬을 갖는 回路兩端의 溫度를 다르게 할때 熱起電力이 發生하고 여기에 使用하는 材料에 따라 그 效率이 다르며 金屬代身半導體를 使用하는것이 가장 効果的이라는 事實이 알려져있다^{(1) (2) (3) (4)} 故로 이 實驗에서는 Bi化合物 半導體 즉 Bi_2Te_3 , Bi_2Te_2 , Bi_2Sb , $ZnSbBi$, Bi_2Se_3 , Sb_2Te_3 와같은 半導體를 單結晶 成長시켜 이들

의 電氣的인 特性을 調査하고 이를 利用한 發電裝置를 만들어 Ni-Cr線히터에 의한 熱을 發電器의 레시버(Receiver)에 加하여 發電特性 및 效果를 調査하고자 한다.

II. 動作理論

溫度勾配에 依하여 電子는 그림1과 같이 흐르고 電子가 이와같은 狀態로 存在하는 率은 溫度에 依하여 變하지만 펠미 다이랙(Fermi Dirac)의 分布法則에 따르며 電子가 에너지 E 인 狀態를 갖는 率 f 는

$$f = \frac{1}{\text{ext} \left(\frac{\epsilon - \epsilon_f}{KT} \right) + 1} \quad (1)$$

과 같다. 여기서 K 는 볼트만 定數이고 ϵ_f 는 펠미 準位이다. 高溫側에서 傳導帶內의 準位가 갖는 率이 增加할때 더 많은 도나(Donor)가 이온化된다. 따라서 傳導帶內의 電子의 濃度는 高溫

*延世 理工大 電氣工學科

Dept, of Elect, Engr, Yonsei Univ.

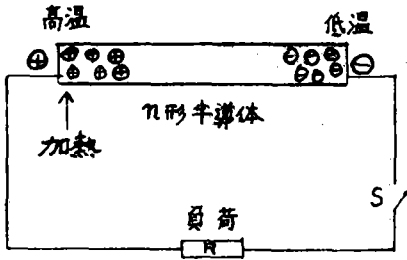


그림1 n形 半導體에 생기는 熱起電力과 回路
Fig 1 Thermoelectric power and its circuit for n type semi.ondacta

側이 크고 低温側이 적으므로 高温側에서 低温側을 向하여 電子의 擴散이 생긴다. 이 結果 高温側은 이온화된 도나에 依하여 正으로 低温側은 擴散된 電子에 依하여 負로 帶電되고 電子를 低温側에서 高温側으로 돌려보내는 電界가 생겨 定常狀態에서는 擴散에 依한 電子와 똑같이 逆方向으로 電子가 흐르는 現象이 생긴다. 즉 兩端에 생기는 電位差와 펠미準位の 溫度에 依한 變化分の 合이 熱起電力이 된다. 그림2와 같은 熱電回路에서 半導體와 導線의 熱傳導率은 微少하나 實際로 이를 無視할수 없고 高温側에 加한 熱이 導線을 通하여 發散한다. 이를 防止하

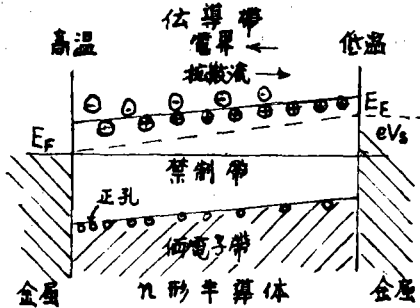


그림2 n形 半導體의 電子에너지狀態의 溫度에 따른 變化圖
Fig 2 Variety on temperature of electron energy cistribution for n tyne

기 위하여 그림3과 같이 N形 및 P形 半導體를 對(Couple)로 金屬板에 π型으로 接合하고 導線을 低温側에 連結한다. P形 半導體의 熱起電力

은 N形의 熱起電力과 方向이 反對이므로 그림3에서의 起電力은 增加하여 두 種의 半導體는 電氣的으로는 直列이고 熱的으로는 並列接續이다. 이때 溫度差 $\Delta T = T_h - T_c$ 가 클때 熱起電力은 $V_s = \int_{T_c}^{T_h} \alpha(T) dT$ 가 된다. 半導體의 側面에서 熱出入이 없다고 보고 (眞空에서) 定常狀態에서의 發電動作만 생각한다

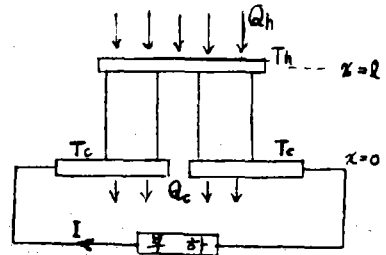


그림3 熱電發電器의 模型
Fig 3 Model of thermoelectric generator

定常狀態에서 高温, 低温의 兩接合部에서의 에너지 出入은 高導部에서 보아

$$Qh = \{ \alpha p(T_h) - \alpha_n(T_h) \} T_h I + k p(T_h) A p \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=l} + k_n(T_c) A_n \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=l} \quad (2)$$

가 된다 여기서 A는 斷面積, k는 熱傳導率이다. 一項은 펠티어 效果에 依한 吸熱이고 二項 三項은 熱傳導에 依하여 接合部에서 兩回路로 흐르는 熱流이다. Qh를 求하기 위하여 高温接合部에서 $X=l$ 때 溫度勾配 $\frac{dT}{dx}$ 를 求한다.

$$A_{p,n} \frac{d}{dx} \left(k_{p,n} \frac{dT}{dx} \right) + I^2 \rho_{p,n} / A_p \pm I \tau_{p,n} \frac{dT}{dx} = 0 \quad (3)$$

인 熱傳導의 方程式에서 境界條件 $x=0$ 때 $T=T_c$, $x=l$ 때 $T=T_h$ 에서 解를 求한다. 여기서 ρ 는 比抵抗, 二項은 發熱 三項은 湯遜(Thomson)熱이다. 電流密度 $\frac{I}{A} = i$ 라 두고 $\frac{dT}{dx}$ 를 求하면

$$\frac{dT}{dx} = e \pm i \left[\frac{\tau}{k} dx \left\{ -i^2 \left[\frac{p}{k} e \pm \frac{\tau}{k} dx \right] \right\} \right] dx + c \quad (4)$$

가 되고 이의 解는 τ, ρ, κ 가 溫度에 따라 一定하다고 가정하면 (4)式의 解는

$$\left(\frac{dT}{dx}\right)_{x=l} = \frac{T_h - T_c \pm \frac{i\rho}{\tau} l}{1 \mp e^{-\frac{i\tau}{k} l}} \frac{i\tau}{k} \pm \frac{i\rho}{\tau} \quad (5)$$

여기서 τ 는 톰슨계수 이다.

$\frac{i\tau}{k} l$ 는 微小이므로 생략하면

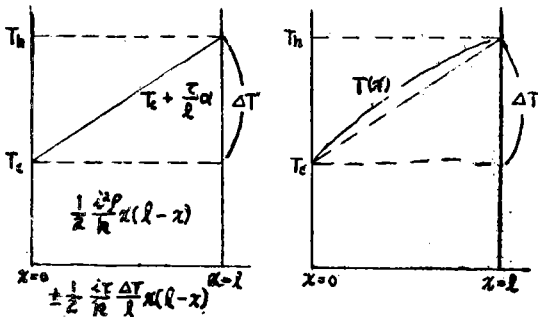
$$\left(\frac{dT}{dx}\right)_{x=l} = \frac{T_h - T_c}{l} \pm \frac{1}{2} \frac{i\tau}{k} (T_h + T_c) - \frac{1}{2} \frac{i^2 \rho}{k} l \quad (6)$$

이는

$$T = T_c + \frac{\Delta T}{l} X \mp \frac{1}{2} \frac{i\tau}{k} \frac{\Delta T}{l} x(l-x) + \frac{1}{2} \frac{i^2 \rho}{k} x(l-x) \quad (7)$$

이 關係를 그림으로 表示하면 그림4와 같이된다. (2)式에 (6)式을 代入하면

$$Qh = \left\{ (\alpha_p(T_h) - \frac{1}{2} \tau_p \Delta T / T) - (\alpha_n(T_h) - \frac{1}{2} \tau_n \Delta T / T) \right\} T_h I + (k_p A_p + A_n k_n) \Delta T / l - \frac{1}{2} (\rho_p / A_p + \rho_n / A_n) l I^2 \quad (8)$$



Heat component additional heat
(a) 各成分의 分解圖 (b) 合成圖

그림4 줄熱과 톰슨熱에 의한 溫度分布의 變化
Fig 4 Temperature distribution by Joule Heat and Thomson Heat

톰슨熱의 영향은 시벡(Seebeck) 効果에 依하여

$$\alpha = \alpha(T_h) - \frac{1}{2} \tau \frac{\Delta T}{T} \quad (9)$$

과 같고 傳導에 依한 熱의 流出은 溫度差 ΔT 를 길이 l 로 나눈값 $\frac{\Delta T}{l}$ 에 依한다.

다음 發電器의 出力電力 W 는 起電力을 E 라 할때

$$E = \int_{T_c}^{T_h} \{ \alpha_p(T) - \alpha_n(T) \} dT \quad (10)$$

이고

電流 I 는

$$I = \frac{E}{R+r} = \frac{E}{R + \{ (\rho_p / A_p) + (\rho_n / A_n) \} l} \quad (11)$$

이다 여기서 R 는 負荷抵抗이고 r 은 試料의 抵抗이다. ρ 가 溫度에 따라 變한다면

$$r = \int_{T_c}^{T_h} (\rho_p(T) / A_p + \rho_n(T) / A_n) \frac{dx}{dT} dT$$

로 求한다.

$$\text{負荷抵抗 } R = mr \quad (12)$$

(9)式의 α 를 使用하여

$$E = (\alpha_p - \alpha_n) \Delta T \quad (13)$$

따라서

$$W = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2 \Delta T^2 m}{r(m+1)^2} \quad (14)$$

가된다.

(8)式과 (14)式을 利用하여 效率 η 를 求하면

$$\eta = \frac{W}{Q_h} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2 \Delta T^2 \frac{m}{r(m+1)^2}}{(\alpha_p - \alpha_n) T_h \Delta T \frac{1}{r(m+1)} + k \Delta T \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2 \Delta T^2}{2r(m+1)^2}} \quad (15)$$

$$k = (k_p A_p + k_n A_n) / l \quad (16)$$

(15)式에서 效率 η 는 兩接合部의 溫度와 抵抗比 m 에 依하여 決定되나 (16)式은

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_h} \cdot \frac{\frac{m}{m+1}}{1 + \frac{kr}{(\alpha_p - \alpha_n)^2} \cdot \frac{m+1}{T_h}} \quad (17)$$

이 式에서 $k=r=0$ $m \rightarrow \infty$ 이면 損失係數는 1이 되고 (17)式은 物質定數 α, τ, r 를

$$Z = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{kr}$$

의 形式으로 만들면 效率 η 는 Z 의 函數이다. 따라서 kr 를 最小로 하면 Z 는 最大로 할수있다.

$$\begin{aligned} \text{즉 } kr &= (k_p A_p + k_n A_n) \left(\frac{\rho_p}{A_p} + \frac{\rho_n}{A_n} \right) \\ &= (\sqrt{k_p \rho_p} + \sqrt{k_n \rho_n})^2 + \left(\sqrt{k_p \rho_n} \frac{A_p}{A_n} - \sqrt{k_n \rho_p} \frac{A_n}{A_p} \right)^2 \end{aligned}$$

$$\frac{\rho_p}{k_p} \cdot \frac{k_n}{p_n} = \left(\frac{A_p}{A_n}\right)^2 \quad (18)$$

일때 $kr = (\sqrt{k_p \rho_p} + \sqrt{k_n \rho_n})^2$ 로써 最小가 된다.

(17)式을 m 에 對하여 微分하여 極大를 求하면

$$(m)_{opt} = M = \sqrt{1 + \frac{1}{2} Z(T_h + T_c)} \quad (19)$$

이때

$$\text{效率 } \eta = \frac{\Delta T}{T_h} \cdot \frac{M-1}{M + \frac{T_c}{T_h}} \quad (20)$$

로써 極大가 된다. (5) 또한 低溫接合部를 水冷却하여 T_c 를 一定하게 하고 T_h 를 크게하면 (19)式에서 M 가 크게되고 效率 η 가 커진다. 다음 體積을 적게하는 問題에 關하여 살펴보면 體積 V 는

$V = (A_p + A_n) l$ 로 表示할수 있고 單位體積當의 出力은

$$\frac{W}{V} = \frac{k_p \rho_p}{l^2} \cdot \frac{mz}{(m+1)^2} \Delta T^2 \left[\frac{\left(1 + \sqrt{\frac{k_n \rho_n}{k_p \rho_p}}\right)^2 \frac{A_n}{A_p}}{\left(1 + \frac{A_n}{A_p}\right) \left(\frac{\rho_n}{\rho_p} + \frac{A_n}{A_p}\right)} \right] \quad (21)$$

이고

$$\frac{A_n}{A_p} = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_p}} \quad (22)$$

인 比를 定하면 $\frac{W}{V}$ 는 極大가 된다. 따라서 最大出力을 얻는 條件 $m=1$ 을 代入하면

$$\left(\frac{W}{V}\right)_{max} = \frac{1}{4} \cdot \frac{k_p \rho_p}{l^2} Z \Delta T^2 \left(\frac{1 + \sqrt{\frac{k_n \rho_n}{k_p \rho_p}}}{1 + \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_p}}} \right)^2 \quad (23)$$

이된다. 따라서

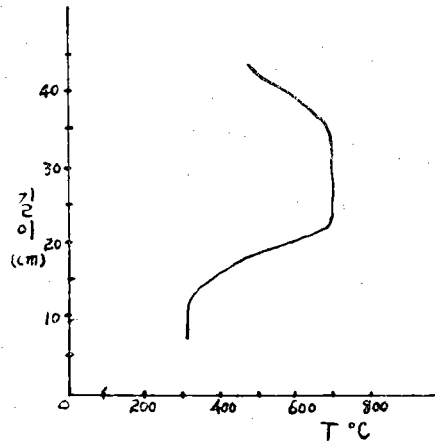
素子の 길이 l 를 적게하는것이 體積當의 出力을 크게하는 것으로 가장 適當한 값은 (22)式과 같다.

II. 實驗 및 結果

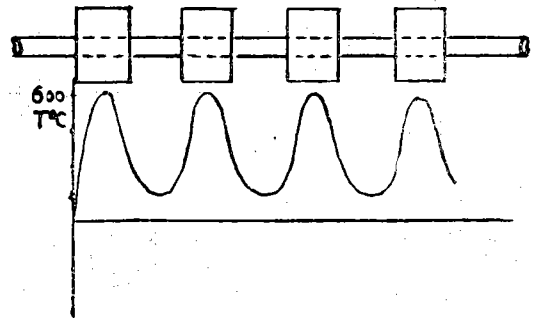
熱電發電素子の 成長

高純度の Bi, Sb, Zn, Ag, Sn, Te (Bi, Sb, Ag, Te, Zn 99.9999% Sn는 99.999%의 純度を 갖는 것임)를 適當한 크기로 불순물이 들어가지 않도록 注意하면서 깨트린후 무게를 正確히 秤量하고 窒酸으로 깨끗하게 씻은 바이카(Vycor) 유리

관에 넣어 10^{-6} mmhg인 眞空度로 密閉시켜 스톡크바거(Stockbargan) 電氣爐와 帶域溶解法으로 試料를 만들었다. 이때 유리관의 規格은 P形半導體는 두께를 1mm, 直徑이 11mm이고 N形은 두께 1mm로 直徑은 8mm인 유리관을 사용하였다. 또한 이 實驗에 使用한 스톡크바거 電氣爐는 溫度를 一定히 하기위하여 主副의 두 熱線을 만들어 主熱線은 언제나 一定電壓을 걸어두고 副熱線은 溫度調整器를 通하게 하여 1°C 의 溫度差를 갖도록 만들었고 帶域溶解爐는 帶域幅이 4.5cm 帶域間의 距離가 4.5cm로 이들 電氣爐의 特性은 그림5 (a) (b)와 같다.



(a)



(b)

그림5 (a) 스톡크바거 電氣爐의 溫度特性 (b) 帶域溶解爐의 溫度特性

Fig5 (a) Characteristic of stockbargan furnace. (b) Characteristic of ZnSb melting furnace.

BiTe系의 p형 n형素子の 成長(7) 成分配合를 다르게하여 바이카 유리관에 眞空密閉하고 이를 그림5(a)와 같은 溫度를 維持하는 爐속에 넣고 6時間 加熱하여 完全 化合되게 한後에 8mm/hr의

速度로 單結晶을 成長시켰다.

ZnSb 素子の 成長

ZnSb는 p形 半導體로 成分은 40Zn+60Sb인 重量率로 正確히 무게를 秤量하여 바이카 유리 판에 眞空 封入한다. 이를 溶較溫度 566°C 보다 낮은 500°C以下의 共晶溫度에서 24時間 그림5(a)와 같은 爐속에 넣어서 加熱시켜 完全化합케한 후 帶域溶融法으로 그림5(b)와 같은 特性을 갖는 爐속에 넣어 1時間에 8mm로 移動시켜 길이 6cm인 試料를 만들었다. 그러나 이렇게 만든 半導體는 대단히 부서러지기 쉬운 試料가되였다故로 熱電材料로서는 적당치 않으므로 이를 막기 위하여 Ag를 0.1% Sn를 1.5% 첨가하여 다시 單結晶을 成長시켰다.

BiSbSn 및 BiSb素子の 成長

BiSbSn는 p形素子로 成分配合은 86.7Bi+8.65Sb+4.75Sn이고 BiSb는 n形 半導體로 成分은 91Bi+9Sb로 무게를 正確히 測定한 후 스토크바저 電氣爐를 使用하여 그림5(a)와 같은 溫度 特性을 갖는 爐의 最大溫度를 300°C로 만들어 이 試料를 6時間 加熱한다. 完全히 化合物이면 8mm/hr의 速度로 試料를 下向시키면서 單結晶을 成長시켜 n形은 길이가 8m, p形은 6cm의 試料를 얻었다.

IV. 電氣의 特性 測定

위에서 만든 BiTe系 ZnSb BiSbSn, BiSb를 길이 1.5cm 直徑이 0.6cm되게 절단하여 兩端을 곱게 研磨한후 ZnSb는 405°C에서 BiSnSb, BiSb는 150°C에서 12時間씩 熱處理하였다.

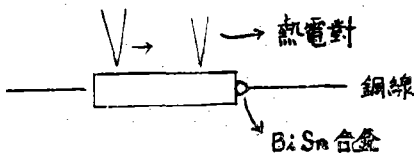


그림6 特性을 측정하기 爲한 도선의 접속
Fig 6 Ohmic contact for meaurment

特性을 測定하기 위하여 試料의 兩端에 그림6과 같이 BiSn을 솔더(Solder)로 하고 H₂SO₄HCl을 혼합한것을 플럭스(Flux)로 銅線을 오직접속하여 電流端子를 만들고 같은 方法으로 아르메루 크롬멜을 熱傳對로 試料에 용접시켰다. 特性

特定 方法으로는 微少直流 및 微少交流를 통하여 吸熱 및 發熱때문에 생기는 溫度差 T_h T_c 및 試料間의 電壓降下, 電流를 조사하여 特性을 구할수있는 가장 간편한 方法인 하만(Harman)의 Z測定方法(6)을 利用하여 眞空度를 10⁻⁶mmHg로 維持하면서 比抵抗, 熱起力 및 熱傳導率을 求한 結果는 다음 表와 같다.

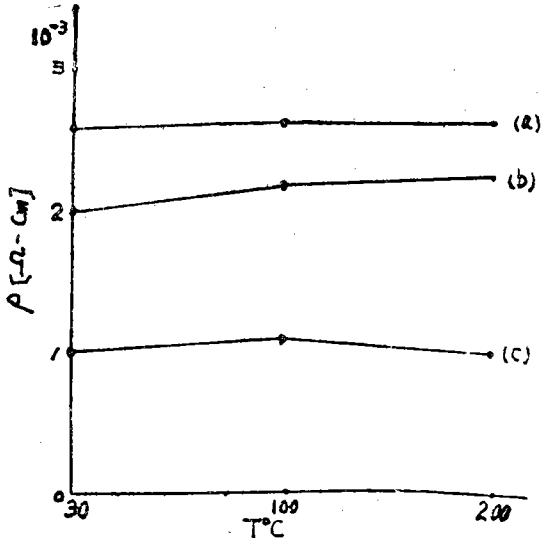
		30°C	100°C	200°C
ZnSb	ρ (열처리않음불순물비첨가)	0.009	0.0095	0.0098
	ρ (열처리안한경우)	0.003	0.0035	0.0034
ZnSb (S _n AgBi)		0.002	0.0022	0.0025
	α	210	225	230
	k	0.002	0.019	0.018
Bi ₁₃ T ₆	ρ	1.18×10 ⁻³	1.1×10 ⁻³	1×10 ⁻³
	α	228		
	k	9×10 ⁻³		
Bi ₁₃ T ₆	ρ	2.6×10 ⁻³	2.65×10 ⁻³	2.7×10 ⁻³
	α	206		
	k	1.1×10 ⁻³		
Bi ₁₃ T ₆ +Bi ₁₃ S ₆	ρ	0.0245		
	α	100		
	k	0.0073		
Bi ₁₃ T ₆ +Sb ₁₃ T ₆	ρ	0.0005		
	α	120		
	k	0.023		

여기서 ρ : 比抵抗[Ω-cm] α : 熱起電力[μV/T°C]
k : 熱傳導率[w/cm²°c]

特性特定에서 ZnSb는 부서러지기 쉽고 比抵抗이 상당히 크므로 Ag, Sn을 微少量混合하여 再結晶시킨 結果 부서러지는 것은 防止하였으나 比抵抗은 여전히 크므로 Bi를 5% 가한 結果 比抵抗은 상당히 減少하는 利點이 있으나 熱起電力이 약간 減少하였다. 이 關係를 그림7.8에서 알수있다. 試料를 만들때 眞空度를 10⁻³mmHg (日本眞空技術株式會社 製 ionization guage tube와 Japan Vacuum Engineering Co. 製인 測定器 G1-T로 測定)로한 結果 10⁻⁶mmHg로 單結晶한 것보다 比抵抗이 增加되었다. 이는 酸化에 기인

한것으로 믿는다.

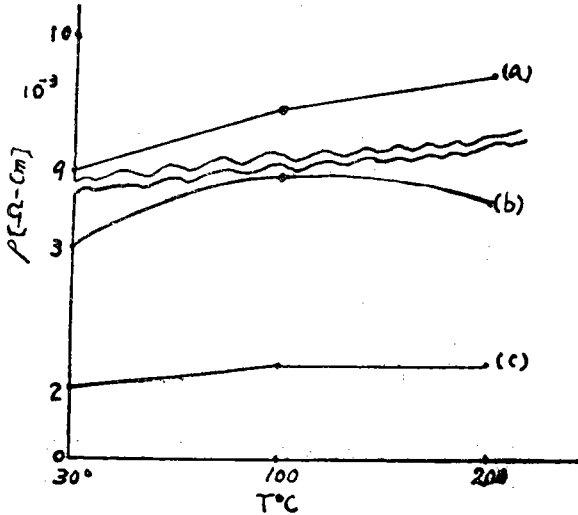
ZnSb의 試料를 熱處理할때와 안할때는 그림 8 과 같이 差가 있었다.



(a) BiTe, (b) Bi₂Te₃, (c) ZnSb

그림 7 溫度에 따른 比抵抗

Fig 7 Resistivity on temperature



- (a) 불순물을 첨가하지 않고 열처리 아니한 경우
- (b) " " 열처리만 한 경우
- (c) " " 첨가하고 열처리 한 경우

그림 8 ZnSb 溫度變化에 依한 比抵抗 特性

Fig 8 Resistivity of ZnSb on temperature

熱電發電器의 製作과 特性試驗

發電器의 래시버 (Receiver)는 크기가 가로 3.5cm 세로 2cm 두께 0.5cm인 銅板을 그림 9 와 같이 發電素子 P形 및 N形을 接觸시키고

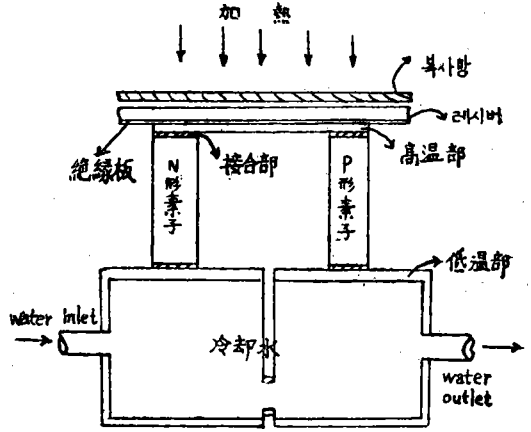


그림 9 熱電發電器

Fig 9 Thermoelectric generator

放熱部는 길이 6.6cm 폭 3cm 높이가 1.6cm인 4角筒으로 하고 물로 冷却할수 있도록 직경이 0.4cm인 銅管(pipe)을 용접시켜서 發電裝置를 만들었다.

Bi₂Te₃ 및 BiTe의 接觸은 BiSn을 솔다로 하고 푸락스를 사용하여 銅板을 加熱한 후 素子를 接觸시켰다. ZnSb素子の 용접은 Sn을 용접部分에 입히고 순수한 Sn을 솔다로 接觸 저항이 없도록 될수록 완전히 接觸시켰다. 솔다를 많이 사용하면 素子和 並列이 되기 쉬우므로 될수록 솔다를 적게 사용하였고 솔다의 용접이 낮으면 接觸 (Junction)이 加熱될때 솔다가 약해져서 接觸이 分離되므로 이를 막기 위하여 半導體를 接觸部分에 Bi로 銅板래시버에 미리 30kc 100w인 초음파 발진기로 코팅 (coating)을 하였다. 이 래시버는 Bi의 용점 271°C 이상으로 加熱하여 半導體를 接觸시켰다. 이렇게 만든 裝置에 열차폐용으로 高温部和 低温部間에 포리솔 합성수지를 사용하였고 래시버 銅板은 쉽게 산화되므로 흑연

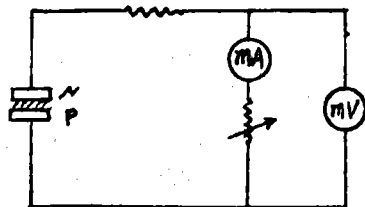
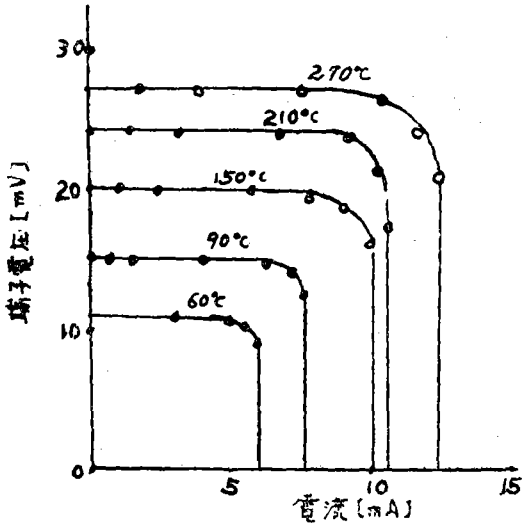


그림 10 特性測定等價回路

Fig 10 Equivalent circuit for characteristics measurement.



a=Bi₂Te₃Bi₂Te₃, b=ZnSbBi₂Te₃, c=Bi₂Se₃Sb₂Te₃,
 그림11 開放回路의 特性
 Fig11 Characteristics of No load

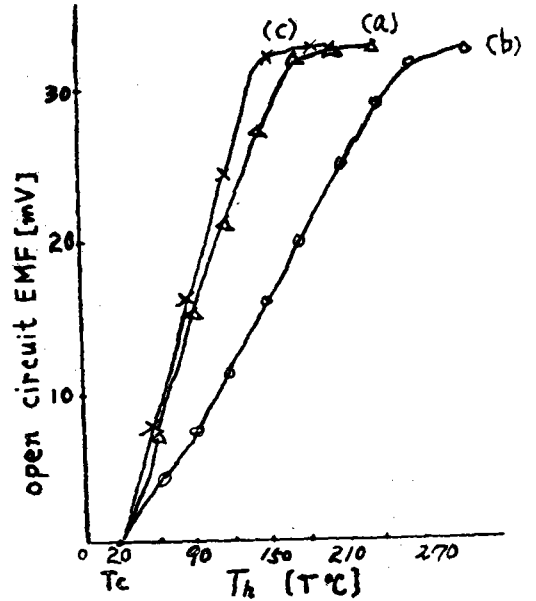


그림13 ZnSb Bi₂Te₃를 利用한 發電裝置의 V-I特性
 Fig13 V-I Curve of the Geerator using ZnSb and Bi₂Te₃

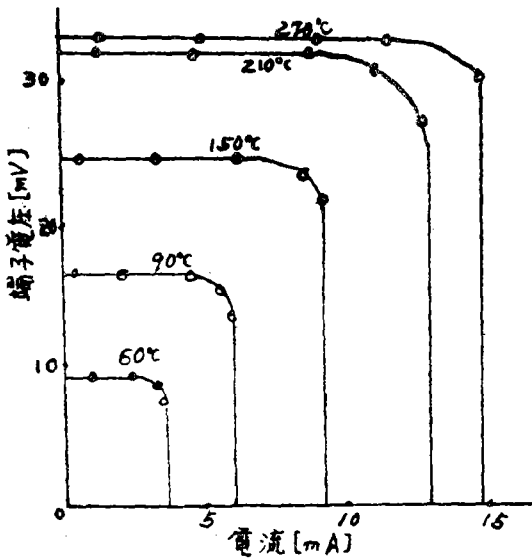


그림12 Bi₂Te₃ 및 Bi₂Te₃를 利用한 發電裝置의 V-I 特性
 Fig12 V-I Curve of the Generator using Bi₂Te₃ and Bi₂Te₃

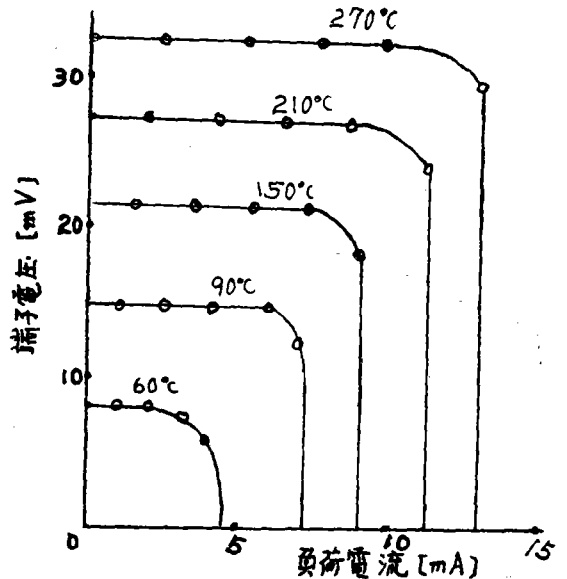


그림14 Bi₂Se₃ Sb₂Te₃를 利用한 發電裝置의 V-I特性
 Fig 14 V-I Curve of the Generator using Bi₂Te₃ and Sb₂Te₃

으로 검게 칠하였다. 이렇게 만든 熱電發電器는 低温接合部를 20°C로 계속 水冷却하여 溫度를 一定히 하고 高温接合部의 溫度를 上昇시키면서 特性을 구한 結果는 그림 10, 11, 12와 같다.

熱電發電器의 出力特性은 그림11과 같이 V-I

曲線으로 表示하였고 短絡時의 電流와 最適負荷 抵抗을 알수있다. 효율은 $\frac{W_o}{W_i}$ 로서 1.42%이다.

V. 結 論

單結晶 成長時에 不純物이 含有된 까닭인지 電氣的 特性이 別로 우수하지는 않으나 發電特性은 $\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Bi}_2\text{Se}_3$ 인 N形과 $\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Sb}_2\text{Te}_3$ 인 p形半導體를 使用한 發電器가 가장 優秀한 特性을 갖었다. 素子의 굵기에 따라서는 電流가 變하지 않았고 高溫에 도달할수록 發電特性은 低下하였다. 270°C 程度에서 接合部가 分離되어 그 以上의 熱을 加할수 없었고 한 素子群에 對하여 32.3mV 를 發生하였으나 素子は 電氣的으로는 直列이고 熱的으로는 並列이므로 이 素子對를 많이 사용한다면 素子對에 比例하여 높은 電壓을 얻을수 있을것이나 이 實驗은 좀더 계속 해보겠다. 또 效率은 理論的으로는 式19 式20에서 1.8

%이나 實驗으로서는 1.42%였다. 效率도 電壓 發生과 同一하게 素子群에 따라 向上되리라 믿는다. 接合에 사용한 솔대는 Bi, BiSn 및 Sn을 사용하였으나 高溫에서 견디는 材料를 開發해야만 완전한 發電器로 사용할수 있을것이다.

참고 문헌

- (1) P.H.Fgli, Thermoelectricity, John Wiley & sons 1950
- (2) F.D.Rossi, Semiconducting Materials for thermoelectric power Generation, RCA Rev 22(1) 1961
- (3) 管義夫, 熱電半導體
- (4) 渡邊寧, 半導體ハンドブックオーム社 1963
- (5) 上村欣 太陽電池 熱電發電 日刊工業新聞社
- (6) T.C.Harman Measurement of Thermal conductivity by Utilization of the Peltier Effect, Jour, Appl, phys, 30. (9) 1959 1351
- (7) 朴昌燦 A Study of Thermoelectric Heat pump