温泉熱を利用した温度差発電による温度制御 (熱電発電モジュールの伝熱特性)

Temperature Control of Hot Spring Water by using Thermoelectric Energy Conversion (Heat Transfer Characteristics of Thermoelectric Generating Modules)

正義秀晃 (石川高専) 学 ○稲田利輝 (石川高専・学)
正 百生 登 (富山高専) 川除佳和 (石川高専)

Hideaki YOSHIOKA, Ishikawa National College of Technology, Kitacyujo, Tsubata, Kahoku-gun, Ishikawa 929-0341
Toshiki INADA, Ishikawa National College of Technology, Kitacyujo, Tsubata, Kahoku-gun, Ishikawa 929-0341
Noboru MOMOSE, Toyama National College of Technology, Neriya 1-2, Ebie, Imizu, Toyama 933-0293
Yoshikazu KAWAYOKE, Ishikawa National College of Technology, Kitacyujo, Tsubata, Kahoku-gun, Ishikawa 929-0341

Key Words: Thermoelectric energy conversion, Temperature control, Heat transfer

1. 緒言

温泉や工場排水に代表される温水の適温制御は、源泉湯宿の泉質保証や海洋・河川的环境保全と関連して重要な課題である。しかしながら、従来の適温制御は、上水の混合や単純な熱交換など、温泉の持っているエネルギーを捨てているため、広い意味でのエネルギー投資により行われている。また、湯元の水温変動に対してはメンテナンス操作が必要となる。これらの問題を打破し、質は低いが多量にある低温かつ小温度差熱源の有効利用と環境負荷低減に資するため、本研究では、温泉の持つエネルギーを温度差発電により取り出しながら自動温度制御を行う新規の熱交換システムを構築し、実用化の可能性について明らかにすることを目的とする。

本報は、発電する自動温度調整装置を開発するための基礎として、熱電発電モジュールの伝熱面間の温度差、吸熱・放熱量的変化、見掛けの熱伝導率、熱電変換効率などの伝熱特性を、温度制御の手段となる温度差発電の on/off ならびに負荷抵抗と関連づけて明らかにしたものである。

2. 発電を伴う温度制御の原理

高熱源 T_{hb} と低熱源 T_{cb} の間に置かれた熱電素子における伝熱を、電気回路の(A)Switch-off, (B) On 時の違いとして、Fig.1 に示す。まず、(A)スイッチオフとした場合には、高温側から低温側への熱通過は、純粋な熱伝導 Q_{λ} のみによって達成される。一方、(B) スイッチオンとした場合には、 Q_{λ} に加えて、回路電流に起因するペルチェ効果 Q_p, Q_p' 、ならびに素子の内部抵抗によりジュール発熱 Q_j が生じ、高熱源からの伝熱量は(A)に比べて増加する。また、このとき、外部負荷 R_L に対して発電($P=I^2R_L$)が生じることになる。従って、複数の熱電素子を伝熱壁として用い、熱交換器の出口温度を視ながらスイッチのオン/オフ数をフィードバック制御することにより、エネルギー投資を必要としないスマートな自動温度制御と発電が可能になると考えられる。以上の原理から、本研究が提案する装置イメージを Fig.2 に示す。

Fig.1 Principle of temperature control

3. 熱電発電モジュールの伝熱特性

装置全体は伝熱壁を構成する個々のモジュールの集合によって達成されるため、高効率かつ高精度の制御を行うには、熱電発電モジュールの伝熱特性を理解する必要がある。

3.1 伝熱モデル

Fig.1 (B)に示す伝熱モデルのもとで、モジュールの高温面(温度 T_{hs})と低温面(温度 T_{cs})における熱収支式はそれぞれ、

$$Q_h - SK\Delta T - \alpha T_{hs}I + I^2R/2 = 0, \quad (1)$$

$$-Q_c + SK\Delta T + \alpha T_{cs}I + I^2R/2 = 0 \quad (2)$$

となる。ここで、 Q_h は高熱源から流入する熱量、 Q_c は低熱源へ流出する熱量、 ΔT は温度差($T_{hs}-T_{cs}$)、 S は伝熱面積、 K は熱コンダクタンス(λ/δ)、 I は回路電流、 R は内部抵抗、 α はゼーベック係数である。両式の第2項目は熱伝導 Q_{λ} 、第3項目はペルチェ効果 Q_p, Q_p' 、第4項目は両側に等配分されたジュール発熱 $Q_j/2$ である。

また、ゼーベック電圧は $V = \alpha \Delta T$ 、回路電流は $I = V/(R+R_L)$ となるから、外部負荷で取り出し得る発電量は、

$$P = I^2R_L = \frac{\alpha^2 \Delta T^2 \varphi}{R(1+\varphi)^2}. \quad (3)$$

次に、式(1),(3)より、熱電変換効率 η に関して次式を得る。

$$\eta = \frac{P}{Q_h} = \frac{\Delta T}{T_h} \cdot \frac{\varphi/(1+\varphi)}{1 + (1+\varphi)/ZT_h - \Delta T/\{2T_h(1+\varphi)\}}. \quad (4)$$

ここで、 φ は抵抗比(R_L/R)、 Z は熱電発電モジュールの性能指数(α^2/SKR)である。

3.2 伝熱特性

Table.1 に示す3種の汎用熱電モジュールの特性を調べた。試験装置は、二つの伝熱面に熱電対と熱流計を設置した熱電

Fig.2 Apparatus image

Table.1 Data of thermoelectric modules

Type	Size	Thickness, δ	I_{max}	R
A	40×40mm	3.5mm	8A	1.57Ω
B	40×40mm	4.1mm	6A	2.01Ω
C	40×40mm	4.6mm	4A	3.21Ω

Fig.3 Heat transfer characteristics of thermoelectric modules: (a) Temperature differential between hot side and cold side; (b) Hot side heat flux; (c) Apparent thermal conductivity.

[Condition (1): $(T_{hb}-T_{cb})=(90-5^{\circ}\text{C})$, (2): $(T_{hb}-T_{cb})=(70-5^{\circ}\text{C})$, (3): $(T_{hb}-T_{cb})=(50-5^{\circ}\text{C})$.]

Fig.4 Thermoelectric efficiency

モジュールを、温水(水温 $T_{hb}=90,70,50^{\circ}\text{C}$)を通した加熱ブロックと冷水(水温 $T_{cb}=5^{\circ}\text{C}$)を通した冷却ブロックで挟んだ構造とした。得られた熱電モジュールの伝熱特性: (a)温度差; (b)高温面の熱流束; (c)見掛けの熱伝導率を、スイッチのオンオフ操作、外部負荷との関係として、Fig.3 に示す。Fig.3(a)より、伝熱面間の温度差 ΔT がバルクの流体温度差 $T_{hb}-T_{cb}$ から大きく低下しているのは、加熱・冷却ブロックの熱抵抗と熱損失が原因である。同一のモジュール、温度条件で比べると、温度差 ΔT はスイッチを off から on に切り換えたときに減少することが判る。一方、Fig.3(b)より、熱流束 q_h は、スイッチを off から on に切り換えたときに増加し、それは外部負荷が小さいほど大きくなる。この理由は、外部負荷が小さいほど回路電流が大きくなり、ペルチェ効果による吸熱作用が顕在化するためである。スイッチング操作による熱流束差は、温度制御の原資となるため、外部負荷を小さくすることにより温度制御巾の拡大が期待できると考えられる。ここで、高温側を基準とした見掛けの熱伝導率として、

$$\lambda' = \frac{q_h \delta}{\Delta T} \quad (5)$$

を導入する。Fig.3(c)より、スイッチング操作によって、温度差によらず λ' が大きく変化していることが判る。このことは、熱電素子のスイッチング操作とコンピュータを巧く組み合わせることにより、入力温度の変化と目標温度に応じて自在に熱通過量を変え得る知能性伝熱壁としての応用の可能性を示唆する。

3.3 発電特性

熱電変換効率 η の実験結果を、式(4)で表現される理論値との対比のもとで、Fig.4 に示す。効率 η はバルク流体の温度差が大きいほど大きくなることが判る。また、 η を極大とする最適負荷値が存在することが判る。最大効率ならびに最適負荷値の測定値は理論値に比べて若干大きな値となっているが、測定誤差やモジュールの幅方向への熱損失を考慮して、両者は概ね良く一致していると言える。

4. 結言

熱電素子を利用した発電を伴う新規温度制御法を提案するとともに、汎用熱電モジュールの伝熱特性を調査し、発電効率を向上させるには外部負荷抵抗に対する内部抵抗の最適化が必要であること、温度制御巾を拡大させるには負荷を極力小さくすべきことなど、発電する自動温調システムを開発するために有用な知見が得られた。

最後に、本研究は(独)科学技術振興機構シーズ発掘試験[課題番号 07-017]の一環として実施されたことを付記する。