반도체디스플레이기술학회지 제19권 제2호(2020년 6월)
Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 19, No. 2. June 2020.

밀폐 형 전장 박스 온도 제어를 위한 히트 펌프 설계

이영태[*†]
[*†]안동대학교 전자공학교육과

Design of Heat Pump for Temperature Control of Sealed Electric Box

Young Tae Lee[*†]
[*†]Department of Electronics Education, Andong National University

ABSTRACT

In this paper, a heat pump using a Peltier device was developed for heat dissipation in a sealed electric box. The heat pump was designed with a cooling fin attached to both sides of the Peltier device, and a fan was mounted on the cooling fin on the hot side to increase the efficiency. The heat dissipation efficiency could be improved by directly connecting the electronic component having high heat to the cooling fin using a heat conducting wire. The fabricated heat pump was designed to operate only in the temperature range set by the temperature control system to improve the problem of high power consumption of the Peltier element.

Key Words : Heat Pump, Peltier Device, Electronic Box, Temperature Control, Heat Conducting Wire

1. 서 론

최근 농업 인구 감소 및 고령화에 따른 노동력 부족 문제의 대책으로 농업용 로봇에 대한 관심이 높아지고 있다. 농업용 로봇이 노출되는 농업 환경은 고온, 고습으로 로봇의 전장 시스템[1]에는 치명적이다. 특히 강우, 스프링클러, 농약 살포 등의 수분으로부터 전장 시스템을 완벽하게 차단할 필요가 있다. 농업 작업이 집중되는 여름에는 전장 박스 내부의 온도가 50℃ 이상 상승하기 때문에 시스템의 오동작이 발생할 수 있다. 특히 수분으로부터 전장 시스템을 보호하기 위하여 외부와 완전 차단할 경우에는 내부 온도는 급속도로 높아질 것으로 판단된다. 겨울의 경우 반대로 전장 박스 내부의 온도가 너무 낮아져서 문제가 발생할 수 있다. 농업용 로봇의 전장 박스 내부의 온도를 항상 특정 온도 범위로 유지하여 여름의 고온 또는 겨울의 저온에서도 전장 시스템이 안정적으로 동작할 수 있는 환경을 유지하는 것이 중요하다.

본 논문에서는 농업용 로봇의 전장 박스 내부의 온도를 항상 특정 범위 내로 유지할 수 있는 전장 박스 용 히트 펌프(heat pump)[2]를 개발하였다. 본 히트 펌프는 펠티어 소자(peltier device)[3] 기반으로 설계 되어, 전장 박스 내부의 온도를 낮추거나, 높일 수 있으며, 전력 소모를 고려하여 상시 “ON” 상태를 유지하는 것이 아니라 특정 범위의 온도 범위 이내에 있을 경우에는 “OFF” 상태가 되도록 설계 하였다. 펠티어 소자는 소비 전력이 비교적 높은 편이기 때문에 전력 소모를 최소화할 수 있는 방안을 고려하지 않는다면 실제 현장에서 적용하기 힘들 것으로 판단된다. 전장 박스 내에 배치되어 있는 열 방출이 많은 소자 및 모듈을 전선을 이용, 직접 히트 펌프의 냉각핀에 연결하는 방법으로 히트 펌프의 효율을 높일 수 있었다. 본 논문에서는 히트 펌프를 설계 제작하고, 전장 박스 모형을 구축하여 성능을 평가했다.

[†]E-mail: ytlee@anu.ac.kr

2. 전장 박스 온도 제어 시스템

2.1 히트 펌프(heat pump)

밀폐된 전장 박스 내부에서 발생하는 열을 외부로 방출하지 않으면 내부 온도가 높아져, 전장 부품 및 시스템의 오동작이 발생할 수 있다. 밀폐된 전장 박스 내부의 열을 방출하기 위하여 펠티어 소자(peltier device)를 이용한 히트 펌프를 설계했다. 펠티어 소자 양단(hot side 및 cold side)에 냉각핀을 부착하여 열의 방출과 흡수 효율을 높였다. 열을 방출하는 hot side에는 팬을 부착하여 열 방출 효율을 높일 수 있도록 했다.

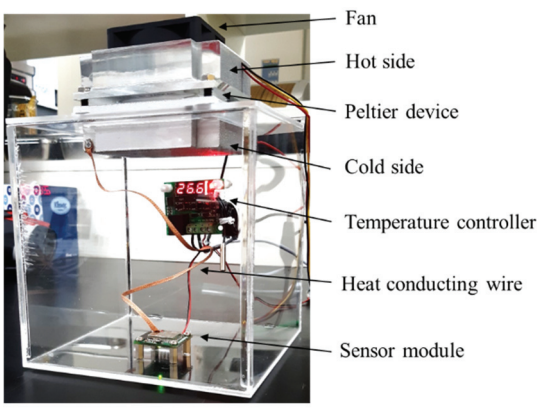

Fig. 1. Structure of heat pump using Peltier device.

Fig. 1에 전장 박스, 전장 시스템 (센서 시스템) 및 히트 펌프 나타냈다. 전장 시스템의 특정 부품과 냉각핀을 직접 연결한 열도선(heat conducting wire)은 특정 부품 또는 시스템으로부터 더욱 적극적으로 열을 방출하기 위한 방법으로 열전도도가 좋은 도선을 사용하였다. 본 히트 펌프는 전장 박스 내부의 공기 중의 열을 cold side 냉각 핀에서 흡수하여 hot side로 방출하는 경로와 전장 시스템과 같은 열원에 열도선을 직접연결하여 cold side와 hot side를 통하여 열을 방출하는 경로로 이원화하여 열 방출 효율을 높이는 방법으로 설계했다. 펠티어 소자는 비교적 소비전력이 높기 때문에 상시적으로 펠티어 소자를 구동하지 않고, 온도 제어기에서 설정한 온도를 범위에서만 구동시켜, 가급적 전력소모가 최소화 되도록 설계했다.

2.2 히트 펌프 설계

밀폐된 전장 박스 내부의 열이 cold side 냉각핀에 전달되는 경로가 공기와 열도선 등으로 이원화 되어있다. 열도선은 열원인 부품 또는 시스템에 열전도도가 높은 구리 도선으로 cold side 냉각핀과 직접 연결되어 있어서 열 방출의 효율을 높일 수 있다. 공기의 열전도도는 0.025 W/m·K이나, 구리는 401W/m·K로 약 16,000배 높다. 따라서 열도선을 직접 연결하는 방법으로 주요 열원으로부터 방출되는 열을 빠르게 외부로 방출하여, 히트 펌프 전체의 열 방출 효율을 높일 수 있다.

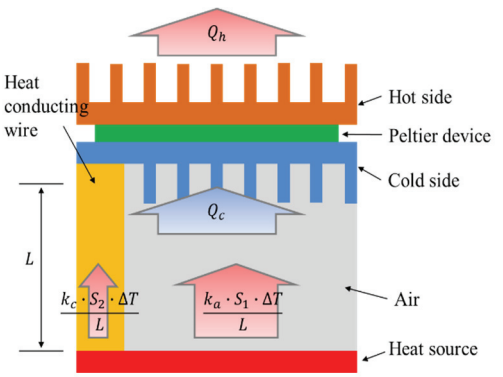

Fig. 2. Principle of heat pump for heat dissipation of sealed electric box.

히트 펌프의 cold side 및 hot side의 열유속(heat flux, W)을 나타내면 다음 식과 같다[4, 5].

$$Q_C = \alpha I T_C - \frac{I^2 R}{2} - \frac{k}{d} S \Delta T \tag{1}$$

식 (1)에서 α는 펠티어 소자의 제벡계수(Seebeck coefficient), I는 전류, T_C는 cold side의 온도, R은 전기저항, k는 열전도도, d는 두께, S는 표면 면적, $\Delta T = T_H - T_C$를 나타낸다. 식 (1)의 열유속(Q_C)은 cold side의 열흡수율(heat removal rate)을 나타낸다. 펠티어 소자의 hot side의 열방출율(heat release rate)은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다[4, 5].

$$Q_H = \alpha I T_H + \frac{I^2 R}{2} - \frac{k}{d} S \Delta T \tag{2}$$

식 (2)에서 T_H는 hot side의 온도를 나타낸다. 펠티어 소자를 이용한 히트 펌프의 성능은 FOM(figure of merit)로 나타낼 수 있다[6].

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{k} \tag{3}$$

식 (3)에서 σ는 전기전도도(electrical conductivity), k는 열전도도(thermal conductivity)를 나타낸다. 우수한 히트 펌프를 개발을 위해서는 제벡 계수와 전기전도도가 높아야 하며, 열전도도는 낮아야 한다.

본 연구에서 우수한 FOM 확보를 위하여 가급적 내부 저항이 낮고, 제벡 계수가 높은 Bi_2Te_3 펠티어 소자를 선택하였다. 본 연구에서 사용한 펠티어 소자의 사이즈는 $50 \times 50 \times 3.4\ (mm^2)$ 이며, 내부 저항은 1.46 (Ω) 이며, 제벡 계수는 $200 \times 10^{-6}\ (V/K)$이다.

Fig. 2에 나타낸 것과 같이 전장 박스 내부의 열을 cold side 냉각핀에서 흡수하고, 펠티어 소자를 거쳐서 hot side 냉각핀을 통해서 방출 된다. 전장 박스 내부의 열을 빠르게 방출하기 위해서는 많은 양의 열이 cold side 냉각핀에 빠르게 전달될 필요가 있다.

$$Q_a = k_a S_1 \frac{\Delta T}{L} \tag{4}$$

Q_a는 cold side 냉각핀에 전달되는 열유량, k_a는 공기의 열전도도, S_1은 열이 통과하는 단면적, $\Delta T/L$은 온도의 기울기(열원과 cold side 냉각핀)를 나타낸다. 온도 기울기는 열원과 cold side 냉각핀의 온도 차에 의해서 형성되기 때문에 히트 펌프의 효율을 높여서 cold side 냉각핀의 온도를 낮추면 온도 기울기가 커진다. 공기의 열전도도는 $0.025\ (W/m \cdot K)$로 비교적 낮아서 효과적으로 열을 전달이 힘든다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 재료가 구리인 열도선으로 열원(발열이 문제되는 특정 부품 또는 시스템 보드)과 cold side 냉각핀을 직접 연결하는 방법으로 열 방출 효율을 높이기 위한 설계를 하였다. 구리 열도선은 열이 통과하는 단면적은 작지만, 열전도도가 $401\ (W/m \cdot K)$로 공기에 비해 16,000배 크다. 본연구에서는 공기 중의 열을 cold side 냉각핀으로 흡수하여 방출하는 방법과 열 방출이 많은 특정 부품 또는 시스템 보드에 직접 연결된 열도선을 통한 열 방출을 병행하도록 하여 효율을 높였다. 열 방출 효율을 높이기 위하여 hot side 냉각핀에 냉각 팬(fan)을 장착하였다.

본 연구의 히트 펌프에는 펠티어 소자를 적용하고 있기 때문에 전류의 방향을 전환하면 hot side와 cold side를 전환할 수 있어서 전장 박스 내부의 온도를 높일 수도 있다. 따라서 외부 환경의 온도가 높고 낮은 어떤 경우에도 전장 박스 내부의 온도를 특정 범위 내에서 제어할 수 있다. 펠티어 소자의 높은 소비 전력 문제를 개선하기 위하여 상시 구동하지 않고, 설정 온도 범위 내에서만 구동하여 소비 전력을 최소화 했다.

Fig. 3에 히트 펌프 시스템을 나타냈다. 온도 제어기에서 전류의 방향을 설정하여 열속도 방향을 정하고, 온도 범위를 설정하여 특정 범위에서만 펠티어 소자가 "ON" 되도록 설계했다. Fig.4에 온도 제어 원리를 나타냈다. 펠티어 소자에 인가되는 전류의 방향에 따라 열 방출을 위한 고온 제어(high temperature control) 또는 열 흡수를 위한 저온 제어(low temperature control) 등 온도 제어 영역이 결정된다. 각 영역(고온 또는 저온 제어 영역)에서 온도 범위(T에서 T + ΔT 또는 T − ΔT)를 설정하면 설정 온도 T에서 펠티어 소자가 "OFF"되고 고온 제어의 겨우 T + ΔT에서, 저온 제어의 경우 T − ΔT에서 "ON" 된다. 설정 온도 범위 ΔT의 크기에 따라 소비 전력이 결정된다. ΔT가 커지면 펠티어 소자의 "ON" 상태로 유지되는 시간이 길어져 소비 전력이 증가하게 된다.

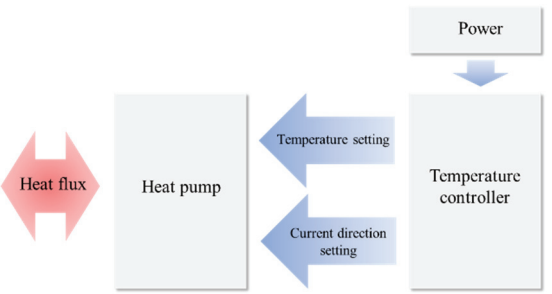

Fig. 3. Heat pump and temperature control system.

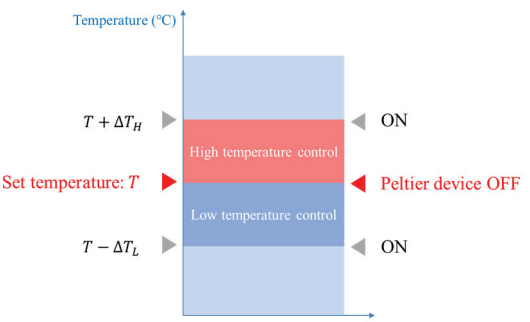

Fig. 4. Heat pump temperature setting.

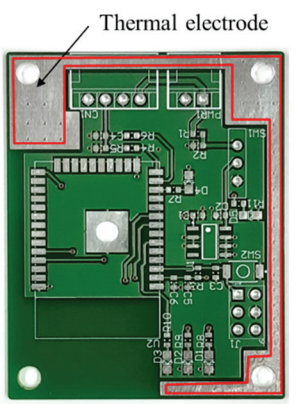

Fig. 5. PCB board with thermal electrode pattern.

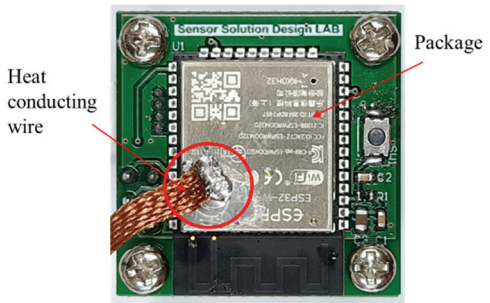

Fig. 6. Electronic components directly connected to the cold side cooling fins with heat conducting wire.

열도선을 부품에 직접 연결하여 열 방출 효율을 높이기 위해서는 시스템의 PCB 설계에 반영되어야 한다. 전원, 열 방출이 많은 부품 중심으로 열 전극을 배치하여 열 방출이 원활하게 이루어지도록 한다.

열 전극에 구리 선을 고정하고, cold side 냉각핀에 직접 연결한다. Fig. 6에 나타낸 것과 같이 부품의 페키지(package)에 직접 연결하는 방법으로 열 방출의 효율을 높일 수 있다.

3. 결과 및 고찰

밀폐된 전장 박스 내부에서 발생하는 열을 외부로 방출하기 위하여 히트 펌프를 설계하였다. 전장 박스 내부의 열원으로부터 방출되는 열은 cold side 냉각핀에 흡수되어 펠티어 소자와 hot side 냉각핀을 통해 외부로 방출된다. 펠티어 소자의 소비 전력이 비교적 높기 때문에 일반적으로 상시 구동되는 히트 펌프를 온도 제어기로 설정된 온도 범위에서만 구동 되도록 설계 하였다.

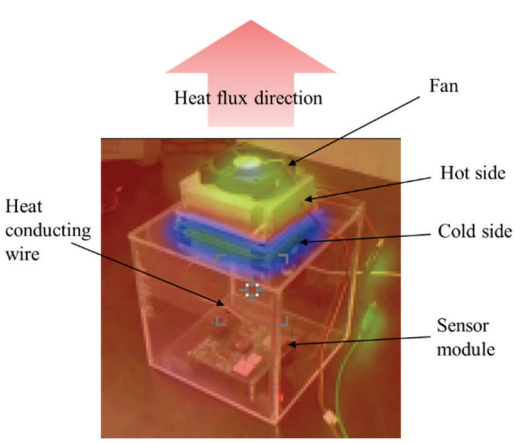

Fig. 7. Infrared photo of heat pump radiating heat outside the electronic box.

펠티어 소자에 공급되는 전류의 방향을 전환하면 전장 박스 내부의 온도를 높이는 것도 가능하도록 설계 했다. Fig. 7에 전장 박스 외부로 열이 방출되도록 전류 방향을 설정한 경우의 적외선 사진을 나타냈다. 전장 박스 외부에 노출된 냉각핀이 hot side로, 전장 박스 내부의 냉각핀이 cold side로 작동하고 있는 것을 확인할 수 있다. 인가 전압이 5.67(V), 전류가 3(A)일 경우 hot side와 cold side의 최대 온도 차가 최대 27℃인 것을 확인하였다. 전압 및 전류의 값을 증가하면 온도 차가 크지는 것을 확인하였다. 식 (1)에 나타낸 cold side 통해 펌핑되는 열 유속(heat flux)은 약 23.91 (W)이다.

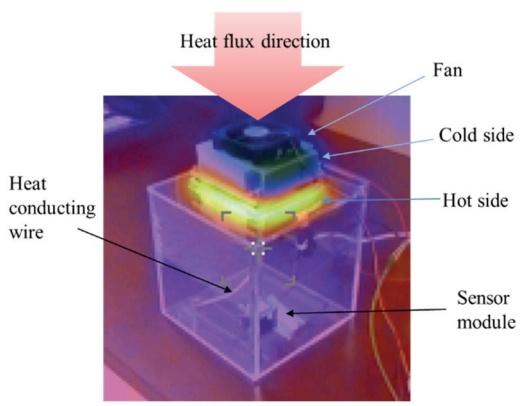

Fig. 8. Infrared photo of heat pump absorbing heat inside electronic box.

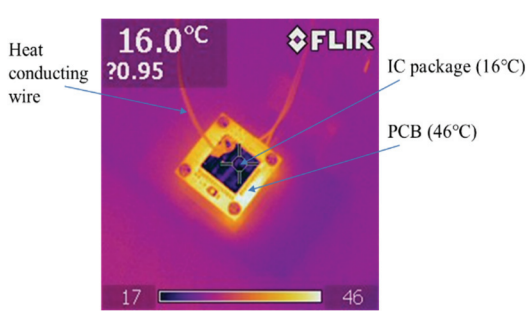

Fig. 9. Infrared photo of electronic components package directly connected to cold side cooling fins.

Fig. 8에 전류의 방향을 전환했을 경우의 히트 펌프의 적외선 사진을 나타냈다. 전장 박스 외부에 노출된 냉각핀이 cold side로, 내부의 냉각핀이 hot side로 작용하는 것을 확인하였다. Fig. 9에 열 도선을 부품의 페키지와 cold side 냉각핀을 직접 연결한 경우의 적외선 사진을 나타냈다.

열 도선을 연결하지 않고 공기를 통한 열을 방출할 경우 부품 페키지 표면의 온도가 27℃ 이상을 나타냈지만, 열 도선을 이용할 경우 16℃로 약 11℃ 정도로 온도가 낮아진 것을 확인했다. 부품 주변의 PCB의 온도는 46℃를 나타냈다. 열 도선을 직접 연결하는 방법이 열 방출 효율을 높이는 것으로 판단된다.

복수의 부품도 연결이 가능하며, 열 도선의 단면적이 더 큰 것을 사용할 경우 열 방출 효율을 더 높일 수 있다.

습도가 높은 농업 환경에서 사용하는 로봇 등의 전장 박스는 전장 시스템을 보호하기 위하여 밀폐시킬 수밖에 없다. 밀폐된 전장 박스 내부에서 발생하는 열을 효과적으로 방출하기 위하여 히트 펌프를 개발하였다. 히트 펌프를 이용하여 공기 중의 열을 방출하면서, 열 방출이 많은 부품에는 열 도선을 이용하여 cold side와 직접 연결하는 방법으로 열 방출의 효율을 더 높일 수 있었다.

4. 결 론

습도가 매우 높은 농업 환경에서 사용하는 로봇 및 농업기계 등에는 전장 시스템을 보호하기 위한 밀폐 형 전장 박스를 사용해야 한다. 밀폐된 전장 박스 내부의 열원에서 발생하는 열을 효과적으로 방출할 필요가 있다. 본 논문에서는 밀폐된 전장 박스에서 열을 효과적으로 방출하기 위하여, 펠티어 소자를 이용한 히트 펌프를 개발했다. 펠티어 소자의 높은 소비 전력을 개선하기 위하여 설정 온도 범위에서만 히트 펌프를 구동하는 온도 제어기를 사용하였다. 열 방출 효율을 높이기위하여 열 방출이 많은 부품에 열 도선을 직접 연결하는 방법을 적용하여 열 방출 효율을 높일 수 있었다.

감사의 글

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 첨단생산기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(317072-04).

참고문헌

1. Y.T.Lee, S.D.Kim, C.W.Kim and I.H.Kwon., "Development of Horizontal Attitude Monitoring System for Agricultural Robot," J. of The Korean Society of Semiconductor & Display Technology, Vol. 18, No.2, pp. 87-91, 2019.
2. Nemati A., Nami H., Yari M., Ranjbar F., and Kolvir H.R., "Development of an exergoeconomic model for analysis and multi-objective optimization of a thermoelectric heat pump," Energy Conversion and Management, Vol. 130, pp. 1-13, 2016.
3. Mannella GA, La Carrubba V., and Brucato V., “Peltier cells as temperature control elements: Experimental characterization and modeling,” Applied Thermal Engineering, Vol.63(1), pp234-245, 2014.
4. Jugsujinda S., Voraud A., and Seetawan T., “Analyzing of thermoelectric refrigerator performance,” Procedia Engineering, Vol.8, pp154-159, 2011.
5. Goldsmid H. J., “Theory of thermoelectric refrigeration and generation,” In Introduction to Thermoelectricity, Springer Berlin, Heidelberg, pp9-24, 2016.
6. Goldsmid H.J., “Conversion efficiency and figure-of-merit,” In CRC Handbook of Thermoelectrics; CRC Press: Boca Raton, FL., USA, pp19-25, 1995.

접수일: 2020년 6월 26일, 심사일: 2020년 6월 26일,
게재확정일: 2020년 6월 26일