

밀폐공간에 놓인 전자 칩의 열발산에 복사 열전달이 미치는 영향

An effect of Radiation Heat Transfer on the Thermal Dissipation from the Electronic Chip in an Enclosure

최인수*
In-Su Choi*

<Abstract>

Electronic components in an enclosure have been investigated to prevent undesired thermal problems. The electronic devices, such as ECUs of automotive engines, are operated under the contaminated environments, so that they rely on the passive cooling without any fluid-driving methods. Therefore the radiation heat dissipation plays more important role than the conduction and convection heat transfer. Hence their combined heat dissipation phenomena have been simulated by a numerical model to reveal the effects of supplied heat flux, emissivity of material, geometry of enclosure, charging gas and pressure. The result showed that the radiation had a significant effect on the heat dissipation of module in an enclosure, and some space above the module should be reserved to prevent its thermal problem. In addition, the higher thermal conductivity and pressure of gas in an enclosure could be necessary to improve the thermal dissipation from the electronic devices.

Keywords : *Electronic Chip, Radiation Heat Transfer, CFD Model, Enclosure*

1. 서론

반도체 기술의 비약적인 발전으로 전자모듈의 성능은 크게 향상되고 크기도 소형화됨에 따라 전자장비의 냉각문제는 지난 수십 년간 수많은 국내외 연구자들에 있어 지속적인 연구 개발의 대상이었다. 고집적화에 따라 전자 부품의 소비 전력이 높아지고 부품간의 열적 간섭으로 인하여 내부 열 발생이 급격히 증가하고 있으며, 이러한 경향은 앞으로 더욱 가속될 전망이다.^{1,2)} 그러므로 내부 발열을 제거하여 전자기기의 신뢰성을 확보할 수 있는 효율적인 방열 설계 및 해석 기술의 개발이 필수적이다.

대부분의 전자기기 발열부품들의 집합부 최대 한계온도는 150 °C 이하이지만, 모듈의 안정성을 고려하여 집합부의 온도는 120 °C 이하로 유지시켜야 한다. Yeh³⁾는 전자기기의 고장 또는 오작동의 50 % 이상은 과도한 온도상승과 관련된 것이며, 전자 칩에 있어서 작동온도가 2 °C 상승할 때마다 신뢰도는 약 10 %씩 저하되는 것으로 지적하였다.

특히 자동차 엔진의 ECU와 같이 주변 환경이 열악한 경우는 외부 공기의 유입이 차단되어 국소부의 열 생성이 더욱 심각해질 수 있다. 전자냉각과 관련된 많은 연구들은 모듈 및 기판의 전도 그리고 외부공기의 유입을 통한 강

* 교신저자, 정회원, 경북대학교 이공대학 기계자동차공학부 교수, 工博
E-mail : isc@knu.ac.kr

* Corresponding Author, Professor, School of Mechanical and Automotive Eng., Ph. D.

제대류 열전달 문제들을 다루었다.^{4,5)} 이러한 혼합대류 공기에 의해 냉각될 때, 복사열 전달량은 총 공급열량의 3 %이내이고⁶⁾, 강제 대류시에는 0.05 % 이내이므로⁷⁾ 많은 연구에서 복사 열전달량은 고려하지 않았다.

하지만 밀폐 공간 내에 장착된 모듈의 냉각 특성은 외부와 개방된 상황과 많은 차이가 있다. 외부 공기에 의한 강제 대류냉각에 비하여 대류 열 발산량이 매우 적고, 상대적으로 복사에 의한 열 발산량은 상당한 비중을 차지하게 된다.

아울러 자연대류 열전달은 밀폐공간에 채워진 작동유체의 내부 순환운동에 의하여 이루어지는데, 이는 온도변화에 따른 작동유체의 밀도 변화와 중력에 의한 체적력에 의하여 부력이 생기고 유체의 질량전달로 이어지기 때문이다. 따라서 자연대류 열전달은 경계조건이나 기하학적 형상에 따라 매우 다르게 나타난다. 그리고 전도체가 존재하는 경우 고온 면에서 가열된 유체는 벽면 경계를 따라 흐르는 벽면 경계층 유동과 전도체의 영향으로 야기되는 2차 유동인 코어영역유동인 두 흐름으로 분리되어 유동하게 된다.⁸⁾ 특히 내부 벽체간의 복사 열전달량이 큰 경우는 단순 대류열전달의 경우보다 경계층 영향이 매우 커지므로 물리적인 조건으로부터 미리 예측하기가 매우 어렵다.

따라서 본 연구에서는 사각 밀폐공간의 한 벽이 회로기판으로 이루어지고, 그 기판 위에 전자모듈이 부착되어 열을 발산하는 상황과 유사한 조건에서 모듈의 발열 양상을 모사하기 위하여 수치계산모델을 개발하였다. 그리고 이 모델을 사용하여 발열량, 재료의 방사도, 밀폐공간의 기하학적 형상비 및 내부 층진가스의 변화에 따른 내부 공기유동 및 냉각 특성 등을 고찰하였다.

2. 해석 모델

밀폐공간에 장착된 전자 모듈의 방열 양상을 해석하기 위하여 Fig. 1과 같이 간략화된 모델을 선정하였다. 전자 모듈과 회로기판 그리고 덮개 내벽의 영향만을 고찰하기 위하여 기판의 하부는 단열조건으로 처리하였다.

내부 작동유체의 순환운동은 2차원 층류 유동으로 가정하였고, 모든 조건이 좌우 대칭이므

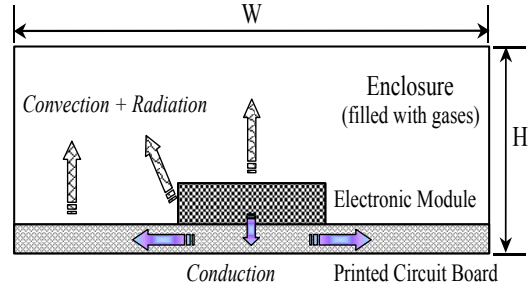


Fig. 1. Schematic diagram of electronic module in a closed space filled with gases.

로 유한체적법⁹⁾을 이용하여 Fig. 1의 절반만을 계산하였다. 정상상태에 있어서 기본방정식은 식 (1)과 같이 대류항, 확산항 그리고 원천항으로 나타낼 수 있다.

$$\text{div}(\rho u \phi) = \text{div}(\Gamma_\phi \text{grad} \phi) + S_\phi \quad (1)$$

식 (1)을 유동의 2가지 속도성분 운동량 및 에너지 방정식에 대하여 각각 SIMPLE⁹⁾방법으로 연산하고, 이들의 확산계수(Γ_ϕ) 및 원천항(S_ϕ)은 Table 1에 요약하였다.

Table 1. Physical quantities, diffusion coefficients and source terms for the general equation (1)

ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
u_x	μ_g	$-\frac{\partial P}{\partial x}$
u_y	μ_g	$-\frac{\partial P}{\partial y} - (\rho - \rho_o)g$
T	$\frac{\mu_g}{Pr_g}$	$\frac{\Phi}{C_p} + \frac{Q}{C_p}$ $\Phi = \mu_g \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right]$

전자모듈과 회로기판에서의 전도열전달도 식 (1)에서 확산계수를 재료의 전도열전달계수를 사용하여 계산하였다. 그러나 두 재료의 접촉면에서 전도 열전달량은 두 재료의 열전도계수를 사용하여 식 (2)와 같이 구하였다.

$$Q_{conduction} = \frac{\Delta T A}{\frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2}} \quad (2)$$

재료 표면과 내부 작동유체간의 대류 열전달

량은 식 (3)과 같이 구하여 식 (1)의 원천항으로 처리하였다.

$$Q_{convection} = k_g \frac{dT}{dx} A = \frac{\mu C_p}{Pr} \frac{dT}{dx} A \quad (3)$$

한편 모듈, 회로기판 및 덮개 내벽간의 복사열 교환량은 식 (4)와 같이 각 재료의 방사도 및 형상계수에 의하여 결정되고, 식 (1)의 기본방정식의 원천항으로 처리하였다. 그리고 식 (4)에서 마주하는 재료 표면간의 형상계수(F_{12})는 Hottel and Sarofim⁽¹⁰⁾의 끈(String)법칙에 의하여 결정하였다.

$$Q_{radiation} = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2 A_2} \right)} \quad (4)$$

3. 결과 및 고찰

Fig. 1에 도시된 바와 같이 기판에 부착된 모듈은 크기가 30 mm이고 높이가 3 mm이고, 기판의 두께는 2 mm로 선정하였다. 모듈의 열전도계수는 구리와 같이 390 W/mK 그리고 회로기판의 열전도계수는 플라스틱과 같은 0.36 W/mK로 가정하였고, 방사도는 흑체인 모듈은 0.9, 기판은 0.8로 가정하여 계산하였다.

아울러 모듈, 기판 및 덮개간의 열전달 영향만을 고찰하기 위하여 회로기판의 하부는 단열 조건이며, 내부 공기의 초기압력은 표준대기압인 101.3 kPa, 초기온도 및 덮개 벽면의 온도는 40 °C로 일정하게 설정하여, 발열량, 내벽의 방사도와 같은 작동 조건 및 밀폐공간의 형상 변수들이 전자모듈의 방열에 미치는 영향을 비교 고찰하였다.

3.1 덮개 내벽의 방사도

Fig. 2는 폭과 높이가 80×15 mm인 밀폐공간에 장착된 전자 모듈의 가열 열유속이 1,000~2,000 W/m²일 때, 덮개 내벽의 방사도(ϵ_w)가 0.05에서 0.9까지 변환에 따라 모듈의 평균온도가 변화하는 양상을 나타낸 그림이다.

공급 열유속이 2,000 W/m²인 경우 모듈의 안전 작동온도인 120 °C를 넘어서고, 외부 온도가 40 °C일 때 모듈의 최고온도가 120 °C를 넘지

않는 한계 열유속은 1,750 W/m²정도이다.

덮개 내벽의 방사도가 높아짐에 따라 모듈의 온도는 4~7 °C 정도 낮아지지만, 방사도가 0.3 이상에서는 큰 차이를 보이지 않는다. 그 이유는 방사도가 커짐에 따라 복사에 의한 발산 열유속이 증가하여 모듈의 온도 상승도 둔화되기 때문으로 판단된다.

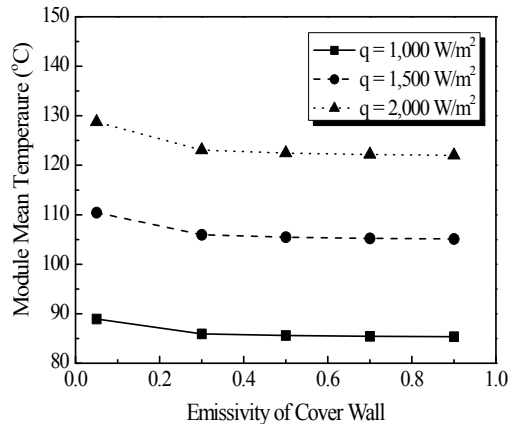


Fig. 2. Variation of module mean temperature at various wall emissivities and supplied heat fluxes (W=80mm, H=15mm).

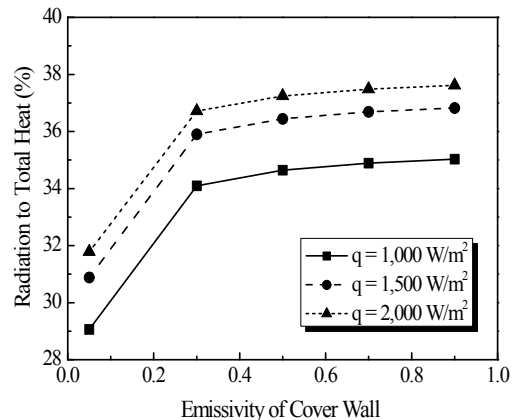


Fig. 3. Percents of radiation to total heat flux at various wall emissivities and supplied heat fluxes (W=80mm, H=15mm).

Fig. 3은 Fig. 2와 동일한 조건에서 모듈의 가열량에 대한 복사 발산량의 비율을 비교한 그림으로, 가열유속 2,000 W/m²에서 복사에 의한 발산 열량 비율은 최대 38 %로 상당히 높은 편이다. 전반적으로 내벽의 방사도가 클수록 그리고 가열량이 증가함에 따라 복사에 의한 열

발산 비율이 커지지만, 그 증가율은 벽체 방사도 0.3이상에서 점차 둔화됨을 보여주고 있다.

이는 발열체 표면과 덮개 내벽간의 온도차에 따라 전도, 대류 및 복사에 의한 열발산 비율이 달라지기 때문으로 판단된다. Fig. 1에서 도시한 바와 같이 모듈에서 외벽까지는 회로기판을 따라 전도 열전달이 이루어지고, 회로기판은 모듈로부터의 전도, 대류 및 복사에 의해 열을 전달받아 다시 전도, 대류 및 복사에 의해 열발산을 돕는 복잡한 역할을 하고 있다.

Fig. 2와 Fig. 3과 같은 경우에서 보면 모듈의 평균온도는 가열 유속에 비례하여 상승하고, 따라서 복사 열발산 비율도 높아지지만 전도나 대류에 의한 비율은 낮아지게 된다. 그러나 모듈의 가열 열유속이 1,000 W/m²에서 1,500 W/m²으로 커질 경우 전도에 의한 열발산 비율은 아주 미소하게 낮아지고, 1,500 W/m²에서 2 kW/m²로 커질 경우 대류에 의한 열발산 비율은 오히려 높아졌다. 이러한 복잡한 현상은 내부에서 순환되는 작동유체의 경계층 및 회로기판의 열전도계수의 영향에 대한 다양한 검토가 필요하지만, 여러 변수가 상호작용을 하는 가운데 일반화된 경향을 찾기는 곤란하다. 따라서 회로기판의 설계시 수치해석모델을 이용한 사전 검토가 필요할 것이다.

3.2 밀폐공간의 형상비

밀폐공간의 폭과 높이에 대한 영향을 살펴보기 위하여 폭을 40~120 mm, 높이를 10~20 mm까지 변화시켰을 때, Fig. 4에 모듈의 평균 온도 변화를 나타내었다. 이 때 덮개 내벽의 방사도는 0.7, 온도는 40 °C이다.

폭이 커질수록 모듈의 온도는 높아지지만, 높이가 커지면 온도가 낮게 나타난다. 이러한 경향은 모듈의 가열 유속에 대한 복사에 의한 발산 열유속 비율도 유사하다. 즉 복사열전달 공식 (4)와 같이 마주하는 면의 거리와는 밀접한 관계가 없고 온도차에 의존하기 때문이다.

하지만 Fig. 5에 나타난 대류 열발산 비율을 보면, 밀폐공간의 높이가 커지면 대류에 의한 열발산 비율도 높아진다. 따라서 공간의 높이가 커지면 내부 작동유체의 순환운동이 보다 자유롭게 이루어지는 것으로 보인다. 그러나 밀폐공간의 높이 10 mm일 때 폭이 40 mm에서 60 mm로 커질 경우에만 현저한 변화가 있고, 폭

의 변화에는 비슷한 수준의 비율을 보이고 있다.

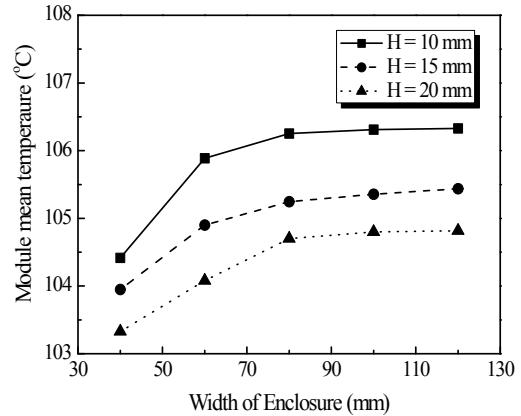


Fig. 4. Variation of module mean temperature at various widths and heights of enclosure ($q=1,500\text{W/m}^2$, $\epsilon_w=0.7$).

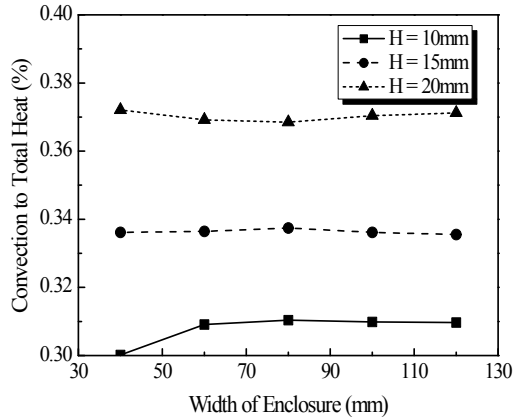


Fig. 5. Percents of convection to total heat flux at varying widths and heights of enclosure ($q=1,500\text{W/m}^2$, $\epsilon_w=0.7$).

Fig. 6의 온도분포를 보면 밀폐공간의 폭이 넓어져도 온도구배는 그와 비례하여 낮아지지 않는다. 따라서 대류 열전달 효과는 폭과 무관하고, 오히려 폭이 넓어지면 전도 열전달 효과는 저하되고, 모듈의 크기보다 2배 이상 넓어지면 전도 효과의 변화는 없다. Fig. 6에서 공간의 높이가 10 mm (바닥의 기판 두께 2 mm)일 때 폭이 넓어지면 모듈의 최고온도는 1.5 °C 상승하지만, 회로기판을 따라 온도 구배는 선명하게 형성되지 않는다. 물론 이는 기판의 열전도계수와 상관성이 있지만, 대체로 기판의 열전도계수는 매우 낮기 때문에 거리가 일정치 이상 멀

여기면 열전달 효과의 차이는 없을 것이다.

그러므로 좁은 밀폐공간에 장착되는 전자모듈의 설계문제에서 복사 효과와 더불어 대류 효과도 대단히 중요한 요소이며, 모듈 상부의 공간 확보가 측면 공간보다 중요시 되어야 할 것이다.

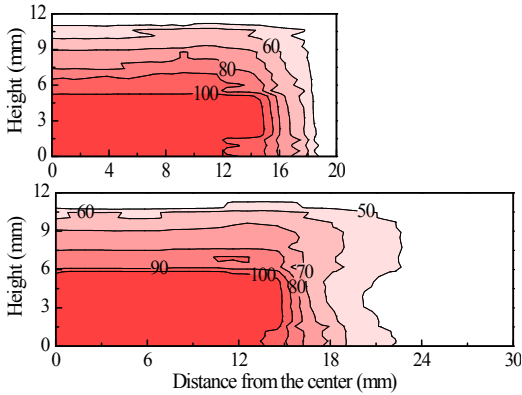


Fig. 6. Contour plots of temperature at different widths of enclosure ($q=1,500\text{W/m}^2$, $\epsilon_w=0.7$, $T_w=40^\circ\text{C}$).

3.3 충전가스

밀폐공간에 갇힌 발열체는 복사에 의한 열발산으로는 냉각이 충분하지 못하므로, 가능한 대류 및 전도에 의한 열발산도 동시에 고려되어야 할 것이다. Fig. 7에는 공급 열 유속이 $2,000\text{W/m}^2$, 밀폐공간의 폭은 80 mm, 높이는 15 mm이고, 공기와 더불어 화재 위험성이 없는 이산화탄소 및 헬륨가스를 충전하였을 때 모듈의 평균온도를 비교하였다.

덮개 내벽의 방사도의 변화에 따른 모듈의 온도 변화는 공기를 충전했을 때와 유사한 경향을 보인다. 이는 전술한 바와 같이 방사도가 커짐에 따라 복사 열전달량이 커져서 모듈의 온도 상승도 둔화되기 때문이다. 하지만 충전가스에 따른 온도 차이는 대단히 크다. 공기나 이산화탄소는 모듈의 안전 작동온도인 120°C 를 넘어서지만, 헬륨의 경우에는 공기보다 20°C 이상 낮은 101°C 정도의 온도를 보이고 있다. 물론 벽체의 방사도가 0.05에서는 최고온도가 105°C 이지만, 방사도 0.3 이상에서는 최고온도도 101°C 를 넘어서지 않는다.

그 이유는 Fig. 8에 나타난 3가지 가스의 열전달계수^{11,12)}를 보면 알 수 있다. 헬륨 가스의

열전달계수는 공기보다 5배 정도 높다. 하지만 이산화탄소의 경우는 공기보다 열전달계수도 다소 낮는데, 오히려 모듈의 온도는 공기보다 다소 낮게 나타났다. 기체와 고체면간의 대류 열전달은 식 (3)과 같이 작동유체의 열전달계수와 온도차에 비례하는데, 이산화탄소를 충전했을 때 모듈의 온도가 공기보다 낮은 이유는 부력의 영향 (Table 1의 수직방향 가스 속도 원천항 참조) 때문으로 판단된다.

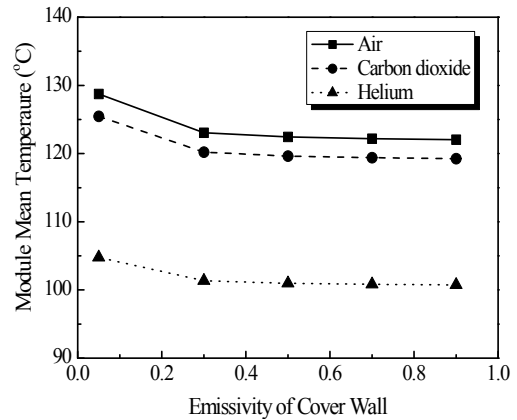


Fig. 7. Variation of module mean temperature when different gases are filled ($q=2,000\text{W/m}^2$, $W=80\text{mm}$, $H=15\text{mm}$).

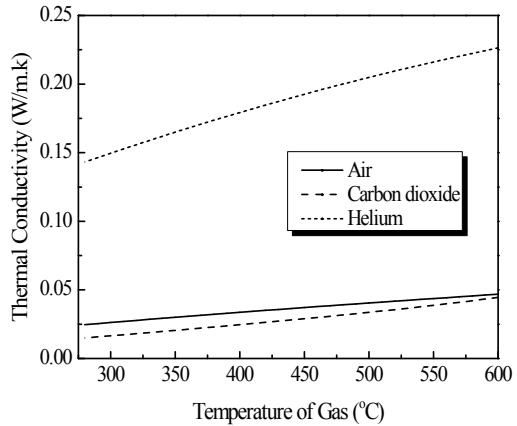


Fig. 8. Variation of thermal conductivities of gases at varying temperatures.

동일한 압력 및 온도 조건에서 이산화탄소의 밀도는 공기의 밀도보다 1.5배 정도 높기 때문에 발열체에 의하여 가열된 기체의 상승속도도 크게 된다. Fig. 9는 Fig. 7에서 덮개 외벽의 방사도가 0.3일 때 서로 다른 기체가 충전된 상태

의 속도 벡터들을 나타낸 그림이다.

Fig. 9에서 벡터 길이 1 mm (좌표축 척도 기준)는 유속 2.5 cm/s를 의미한다. 이 때 최대 속도의 벡터는 이산화탄소가 가장 길고, 헬륨가스의 경우가 가장 짧다. 이는 부력이 기체의 밀도에 비례하므로 분자량이 큰 이산화탄소가 가장 크고, 헬륨이 가장 작다. 그렇지만 헬륨의 열전도계수는 다른 기체에 비하여 월등히 크므로 전반적인 대류 열전달량은 크게 된 것이다.

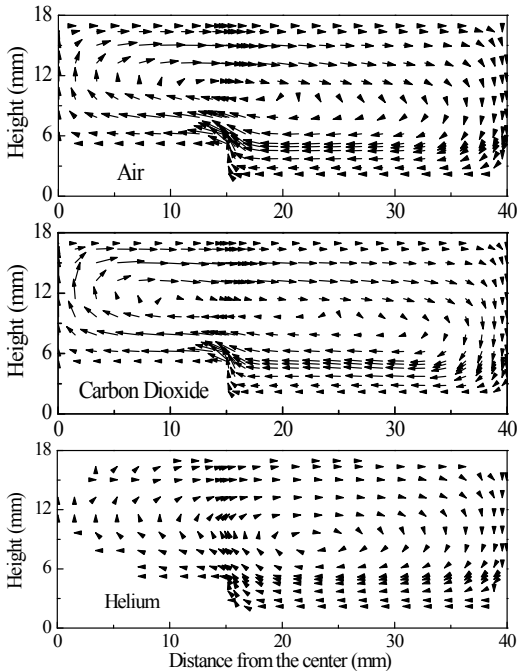


Fig. 9. Vector plots when different gases are filled in an enclosure ($q=2,000W/m^2$, $W=80mm$, $H=15mm$, $\epsilon_w=0.7$).

그러므로 밀폐공간의 높이가 낮을수록 열전도계수가 큰 가스를 사용하여 대류에 의한 열발산 효과를 높이는 것이 필요할 것이다. 물론 헬륨보다 수소를 사용하면 보다 큰 대류 열발산 효과를 얻을 수 있겠으나, 수소가스는 누출되었을 때 폭발 가능성이 있으므로 본 연구에서는 제외하였다.

3.4 가스 충전 압력

부력 효과를 증대시킬 수 있는 방안으로 밀폐공간의 충전가스 압력을 높여 가스 밀도를 높이는 방법을 고려할 수 있다. 그러므로 Fig.

10에 충전가스의 압력을 상승시켰을 때 모듈의 온도 변화를 살펴보았다.

충전가스의 압력을 높이면 밀도의 증가로 대류에 의한 열발산량은 증가하지만, 상대적으로 복사 열 발산량의 비중은 줄어들게 된다. 하지만 분자량이 작은 헬륨의 경우는 압력을 대기압보다 4배 높였을 때 모듈의 온도는 10 °C 정도 낮아졌다. 반면에 공기나 이산화탄소는 대기압보다 2배일 때 모듈의 온도는 10 °C 이상 낮출 수 있음을 알 수 있다.

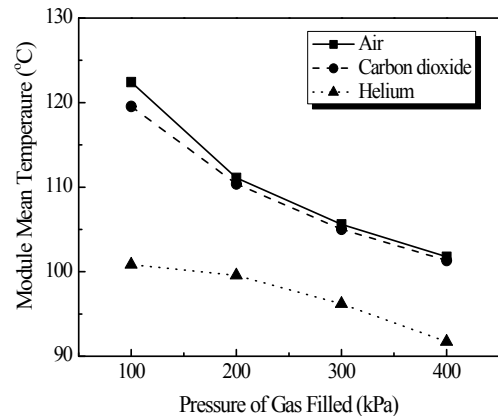


Fig. 10. Variation of module mean temperature at various gas filled with different pressures in an enclosure ($W=80mm$, $H=15mm$, $q=2,000W/m^2$, $\epsilon_w=0.7$).

Fig. 11에 이산화탄소의 압력이 100~400 kPa일 때의 온도 분포를 비교하였다. 충전압력이 높을수록 밀도차가 크게 되어 상승기류가 활발해지면서 모듈의 온도는 낮아지게 된다. 하지만 상승기류는 그림에서와 같이 버섯모양을 형성하여 중간에 떠있는 형태로 하부의 회로기판에는 영향을 주지 않는다. 오히려 우측 측벽을 따라 하강하면서 차가워진 기류는 회로기판에서 열을 흡수하게 되고, 회로기판의 온도는 낮아져서 모듈에서 좀 더 많은 열을 전달 받을 수 있다. 그러므로 압력이 상승할수록 전도 열발산량도 약간 증가하는 경향을 보였다.

따라서 재료의 허용범위 내에서 밀폐공간의 충전가스 압력을 높게 유지하는 것이 발열체의 냉각에 유리할 것으로 판단된다. 물론 충전압력을 높일수록 모듈의 온도는 다소 낮출 수 있지만 그 저하율은 둔화되고, 전자부품의 케이스 강도는 높여야 하고 높은 압력에서 충전가스

누설을 방지하기 위한 대책도 마련해야 하는 단점도 있다.

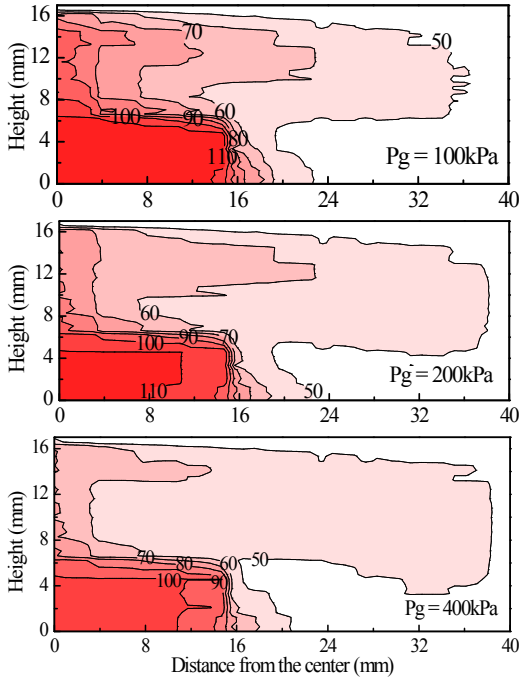


Fig. 11. Contour plots of temperature at different pressures of carbon dioxide ($q=2,000W/m^2$, $\epsilon_w=0.7$, $T_w=40^\circ C$).

4. 결론

외부 공기의 유입이 없는 밀폐공간에 장착된 전자모듈의 작동온도를 한계치 이하로 유지시키기 위해서는 전도, 대류 및 복사 열전달에 의한 복합적인 열발산이 고려되어야 한다. 밀폐공간에서도 냉각팬을 사용하여 대류에 의한 열발산을 촉진시킬 수 있으나, 시스템의 내구성 및 신뢰도를 높게 유지하기 위해서는 수동적 냉각방법이 바람직하고, 특히 복사에 의한 열발산은 주요한 비중을 차지한다. 그러므로 복사 열전달과 관계되는 재료의 방사도, 밀폐공간의 기하학적 치수, 공간에 채워진 가스 및 가스 압력 등이 전자 칩의 열발산에 미치는 영향을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

전자 칩 및 회로기판의 방사도와 더불어 덮개 내벽의 방사도도 0.3 이상으로 유지하여야만 복사 열전달 효과를 극대화할 수 있다. 하지만 0.3 이상에서는 그 효과의 증대가 크지 않다.

밀폐공간의 폭은 칩 크기의 2배 정도면 충분하지만 자연대류 효과를 높이기 위해서는 모듈 상부의 공간 높이가 중요한 요소이다.

전도 열전달계수가 큰 헬륨과 같은 기체를 밀폐공간에 충전시키면 보다 높은 열발산 효과를 얻을 수 있으며, 충전 압력은 재료의 허용범위 내에서 높을수록 유리하다. 하지만 헬륨과 같이 분자량이 작은 기체는 압력 상승비와 비례하여 열발산 효과가 증대되지 않는다.

기호설명

A	면적	(m^2)
C_p	정압 비열	(J/kgK)
H	밀폐공간의 높이	(m)
P	가스 충전 압력	(kPa)
Pr	Prandtl 수	$(-)$
Q	열전달량	(W)
q	열유속	(W/m^2)
T	온도	$(K, ^\circ C)$
u	기체의 속도	(m/s)
W	밀폐공간의 폭	(m)
ϵ	재료 방사도	$(-)$
μ_g	기체 점성계수	$(Pa \cdot s)$
σ	Stefan-Boltzmann 상수	$(W/m^2 K^4)$

후 기

이 논문은 2009년도 경북대학교 학술연구비에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

- 1) Bar-Cohen, A., Watwe, A. and Prasher R. S. "Heat transfer in electronic equipment," Heat Transfer Handbook, John Wiley & Sons, pp. 947~1027, (2003)
- 2) Tseng, Y. S., Fu, H. H., Hung, T. C. and Pei, B. S., *Applied Thermal Engineering*, **27**, 1823, (2007)
- 3) Yeh, L. T., *ASME J. of Electronic Packaging*, **117**, 333, (1995)
- 4) Hung, T. C. and Fu, C. S., *Numerical Heat Transfer, Part A*, **35**, 519, (1999)

- 5) 윤병택, 최도형, *대한기계학회 논문집 (B)*, **23, 1**, 1, (1999)
- 6) Yoo, S. Y., Park, J. H. and Kwak, Y. M., *J. of KSME*, **10**, 213, (1996)
- 7) Park, S. H. and Nakayama, V., *Tans. of the JSME (B)*, **61. 583**, 1070, (1995)
- 8) Du, Z. G. and Bilgen, E., *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **35, 8**, 1969, (1992)
- 9) Patankar, S. V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing Co., (1980)
- 10) Hottel, H. C. and Sarofim, A. F., "Radiative Heat Transfer", McGraw-Hill, New-York, (1967)
- 11) <http://www.propath.mech.kyushu-u.ac.jp/> Akasaka, R. et. al., "A Program Package for Thermo-Physical Properties of Fluids, Version 12.1, PROPATH Group, Japan, (2001)
- 12) Welty, J. R., Wilson, R. E. and Wicks, C. E., "Fundamentals of Momentum Heat and Mass Transfer", 3rd ed., pp. 756, (1984)

(2009년 5월 27일 접수, 2009년 11월 20일 채택)