

평균 접근법을 이용한 전자 장치 냉각용 마이크로 채널 히트 싱크에 대한 연구

김동권[†] · 김성진^{*}

Study on the Averaging Approach for Microchannel Heat Sinks for Electronics Cooling

Dong-Kwon Kim, Sung Jin Kim

Key Words : Microchannel Heat Sink (마이크로채널 히트 싱크), Averaging Approach (평균 접근법)

Abstract

The present paper is devoted to the modeling based on an averaging approach for microchannel heat sinks. Firstly, analytic solutions for velocity and temperature distributions for low-aspect-ratio microchannel heat sinks are presented by using the averaging approach. When the aspect ratio of the microchannel is smaller than 1, analytic solutions accurately evaluate thermal resistances of heat sinks while the previous model cannot predict thermal resistances. Secondly, asymptotic solutions for velocity and temperature distributions at low-aspect-ratio limit and at high-aspect-ratio limit are presented by using the scale analysis. Asymptotic solutions are very simple, but shown to predict thermal resistances accurately.

기호설명

Da	: Darcy Number
h	: Interstitial Heat Transfer Coefficient Based on One-dimensional Bulk Mean Temperature
h_i	: Interstitial Heat Transfer Coefficient
K	: Permeability
q	: 단위시간당 열전달량
q''	: 열유속
$R_{\theta, cap}$: Capacitive Thermal Resistance
$R_{\theta, conv}$: Convective Thermal Resistance
$R_{\theta, tot}$: Total Thermal Resistance
T	: 온도
$\langle T \rangle^b$: One-dimensional Bulk Mean Temperature
α_s	: Aspect Ratio
$\langle \rangle$: 평균값 (평균 방향 : y)
$\langle \rangle^f$: 유체 영역의 평균값 (평균 방향 : z)
$\langle \rangle^s$: 고체 영역의 평균값 (평균 방향 : z)

1. 서론

소형이면서 다기능을 가지는 전자 장치에 대한 소비자들의 요구에 의해, 전자 장치들은 소형화, 고집적화 되게 되었다. 그 결과 전자 장치들은 단위 면적당 발생하는 열이 증가하였을 뿐만 아니라 열을 방출하기 위해 필요한 표면적이 줄어들게 되어 열적인 문제에 직면하게 되었다⁽¹⁾. 이런 열적인 문제의 해결을 위해 효과적인 냉각 기술이 필수적으로 필요하게 되었고^(2,3), 마이크로채널 히트 싱크를 통한 냉각이라는 아이디어가 등장하게 되었다. 마이크로 채널 히트싱크의 개념은 열전달 계수가 수력 반경에 반비례 한다는 점에 착안하여 만들어진 것이며 Tuckerman 과 Peace⁽⁴⁾가 처음으로 제안하였다. 마이크로 채널 히트싱크의 개념이 등장하자, 많은 연구자들이 마이크로 채널 히트 싱크에 대한 실험적, 해석적인 연구를 수행하였다^(5,6). 특히 마이크로 채널의 해석 모델을 개발하고자 하는 많은 연구가 있었다. Knight 등^(7,8)은 흰 모델 (Fin Model)에 기반을 둔 해석 모델을 제안 하였다. 그들은 흰 내의 열전달이 일차원적이고, 열전달

[†] 한국과학기술원 기계공학과 대학원

E-mail : dkkim79@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3083 FAX : (042)869-8207

^{*} 한국과학기술원 기계공학과

계수는 상수이며, 유체 온도는 일정하다는 가정을 사용하였다. Knight 의 모델은 아주 단순하다는 장점 때문에 흔히 쓰이고 있지만⁽⁹⁾ 마이크로 채널 히트 싱크의 Aspect Ratio 가 커지면 열저항을 제대로 예측하지 못한다는 치명적인 단점이 있다^(10,11). 흰 모델의 대안으로 Koh 와 Colony⁽¹²⁾는 평균 접근법에 바탕을 둔 해석 모델을 제안하였다. 그들은 마이크로 채널 히트 싱크를 다공성 매질로 모사하였고 Darcy's Law 를 이용하여 유동을 모델링하였다. 한걸음 더 나아가 Tien 과 Kuo⁽¹³⁾는 Brinkman-extended Darcy Equation 을 사용한 보다 개선된 모델을 제시하였다. 최근에는, Kim 등^(14,15)에 의해 마이크로 채널 히트 싱크의 속도와 온도에 대한 해석해가 평균 접근법을 이용하여 구해졌다. 그들이 제안한 해석해는 마이크로 채널 히트 싱크의 Aspect Ratio 가 1 보다 클 때 열저항을 정확히 예측할 수 있다.

앞서 언급한 대로, 평균 접근법을 통해 열저항을 예측하기 위한 많은 모델이 제시되었다. 하지만 기존의 모델들은 여러 가지 단점을 가지고 있다. 첫째, 히트 싱크의 높이가 심하게 제한되어 있을 경우나 흰의 개수가 적더라도 충분히 냉각이 가능한 경우 Aspect Ratio 가 작은 마이크로 채널 히트 싱크가 쓰일 수 있음에도 불구하고, 기존 모델들은 Aspect Ratio 가 1 보다 작을 경우 사용할 수 없다. 둘째, Aspect Ratio 가 1 보다 큰 경우라 하더라도, 기존 모델은 해의 형태가 너무 복잡하여 마이크로 채널 히트 싱크를 설계할 때 사용하기 힘들다.

본 연구의 목적은 앞서 지적한 두 가지의 큰 문제점을 해소할 수 있는 해석 모델을 만드는데 있다. 이를 위해, 첫째, 평균 접근법을 이용하여 Aspect Ratio 가 작은 히트 싱크의 속도장과 온도장을 정확히 해석할 수 있는 모델을 제시할 것이다. 둘째, High-aspect-ratio Limit 와 Low-aspect-ratio Limit 에서의 접근해를 구함으로써 히트 싱크의 설계에 도움이 될 수 있는 간단한 해석해를 제시할 것이다.

2. 문제 정의

본 연구에서 다루고자 하는 마이크로 채널 히트 싱크가 Fig. 1 에 모식적으로 나타나 있다. 히트 싱크의 윗면은 단열되어 있고 아랫면은 고르게 가열되고 있다. 유체는 x 방향으로 마이크로 채널들을 통과하여 흐른다. 문제의 단순화를 위해, 유동은 층류이고 비압축성이며 완전 발달 되어있다고 가

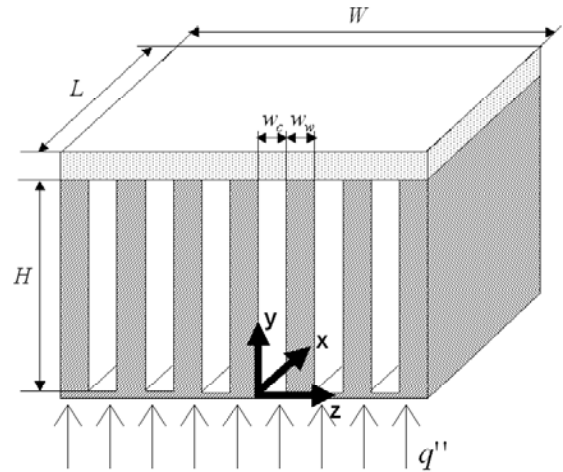


Fig. 1 Schematic diagram of a microchannel heat sink

정한다. 온도장에 대해서도 완전 발달을 가정한다. 또한, 유체를 흘리기 위해 필요한 Pumping Power 가 일정하다고 가정한다.

3. 평균 접근법 (Averaging Approach)

3.1 Low-aspect-ratio 마이크로채널 히트 싱크에 대한 해석해

평균 접근법에서는 평균 속도 및 평균 온도를 이용하는데, 본 연구에서는 Aspect Ratio 가 작을 경우에 대해 식 (1)에 기술된 방법으로 평균을 하였다.

$$\langle \phi \rangle = \frac{1}{H} \int_0^H \phi dy \tag{1}$$

평균 접근법에서는 운동량 방정식과 에너지 방정식을 평균하여 평균 속도와 평균 온도에 대한 지배 방정식을 구하며 그 결과는 식 (2)-(5)이다.

유체측 지배방정식 :

$$\frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x} = \mu_f \frac{\partial^2 \langle u \rangle}{\partial z^2} - \varepsilon \frac{\mu_f}{K_{low}} \langle u \rangle \tag{2}$$

$$\rho_f c_f \langle u \rangle \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x} = k_{fe,low} \frac{\partial^2 \langle T \rangle}{\partial z^2} + h_{l,low} a_{low} (T_w - \langle T \rangle) \tag{3}$$

고체측 지배방정식 :

$$\langle u \rangle = 0 \tag{4}$$

$$\langle T \rangle = T_w \tag{5}$$

$$\text{이 때, } \varepsilon = \frac{w_c}{w_c + w_w}, a_{low} = \frac{1}{H}, k_{fe,low} = k_f \tag{6}$$

여기서 K_{low} 와 $h_{l,low}$ 는 각각 Permeability 와 Interstitial Heat Transfer Coefficient 로 지배 방정식을 평균하는 과정에서 발생하는 미지수이다. 본 연구에서는 Permeability 와 Interstitial Heat Transfer Coefficient 의 값으로 한쪽 평판은 단열이고 다른

쪽 평판은 일정 열유속으로 가열되고 있는 두 무한 평판 사이를 흐르는 유체에 대한 Permeability 와 Interstitial Heat Transfer Coefficient 를 이용하였다.

$$K_{low} = \frac{\varepsilon H^2}{12} \quad (7)$$

$$h_{l,low} = \left(\frac{40}{7}\right) \frac{k_f}{2H} \quad (8)$$

K_{low} 와 $h_{l,low}$ 가 주어지면, 식 (2)-(3)을 풀어 무차원 평균 속도와 무차원 평균 온도에 대한 해석해를 구할 수 있고 그 결과는 식 (9)-(12)과 같다.

유체측 해석해 :

$$U = -P_{low} \left[1 - \frac{\cosh\left(\frac{1}{\alpha_s \sqrt{Da_{low}}}\left(\frac{1}{2} - \frac{Z}{\varepsilon}\right)\right)}{\cosh\left(\frac{1}{2\alpha_s \sqrt{Da_{low}}}\right)} \right] \quad (9)$$

$$\theta = -\frac{C_1}{C_2} + \frac{C_1 \cosh\left(\frac{\sqrt{C_2}}{\alpha_s}\left(\frac{1}{2} - \frac{Z}{\varepsilon}\right)\right)}{C_2\left(\frac{1}{Da_{low}} - C_2\right) \cosh\left(\frac{\sqrt{C_2}}{2\alpha_s}\right)} - \frac{C_1 \cosh\left(\frac{1}{\alpha_s \sqrt{Da_{low}}}\left(\frac{1}{2} - \frac{Z}{\varepsilon}\right)\right)}{\left(\frac{1}{Da_{low}} - C_2\right) \cosh\left(\frac{1}{2\alpha_s \sqrt{Da_{low}}}\right)} \quad (10)$$

고체측 해석해 :

$$U = 0 \quad (11)$$

$$\theta = 0 \quad (12)$$

이 때, $Z = \frac{z}{(w_c + w_w)}$, $U = \frac{\langle u \rangle}{u_m}$, $\theta = \frac{\langle T \rangle - T_w}{\frac{q'' H}{(1-\varepsilon)k_s}}$,

$$P_{low} = \frac{K_{low}}{\varepsilon \mu_f u_m} \frac{d\langle p \rangle^f}{dx}, \alpha_s = \frac{H}{w_c}, Da_{low} = \frac{K_{low}}{\varepsilon H^2},$$

$$C_1 = -\frac{(1-\varepsilon)k_s}{\varepsilon} \frac{P_{low}}{k_f}, C_2 = \frac{h_{l,low} H}{k_f},$$

$$P_{low} = -\left[1 - 2\alpha_s \sqrt{Da_{low}} \tanh\left(\frac{1}{2\alpha_s \sqrt{Da_{low}}}\right) \right]^{-1} \quad (13)$$

열저항을 계산하는 데 필요한 유체의 Bulk Mean Temperature 의 산출을 용이하게 하기 위해 식 (14) 와 같이 One-dimensional Bulk Mean Temperature 를 정의한다.

$$\langle T \rangle^b = \frac{\int_0^H Tudy}{\int_0^H udy} \quad (14)$$

One-dimensional Bulk Mean Temperature 와 관련하여 식 (15)-(16)이 성립한다.

$$h_{low} = -k_f \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} \cdot (T_w - \langle T \rangle^b)^{-1} = (5.385) \frac{k_f}{2H} \quad (15)$$

$$\theta^b = \frac{\langle T \rangle^b - T_w}{\frac{q'' H}{(1-\varepsilon)k_s}} = \frac{h_{l,low}}{k_f} \frac{\langle T \rangle - T_w}{\frac{q'' H}{(1-\varepsilon)k_s}} = 1.061\theta \quad (16)$$

최종적으로 유체의 Bulk Mean Temperature 는 식 (17)과 같이 주어진다.

$$T_{bm} = \frac{\int_0^{w_c} \int_0^H Tudydz}{\int_0^{w_c} \int_0^H udydz} = \frac{\int_0^{w_c} \langle T \rangle^b dz}{w_c} = \frac{q'' H}{\varepsilon(1-\varepsilon)k_s} \int_0^\varepsilon \theta^b dZ + T_w$$

$$= T_w + 1.061 \cdot \frac{q'' H}{(1-\varepsilon)k_s} \left[-\frac{C_1}{C_2} + \frac{C_1}{Da_{low}} \frac{\tanh\left(\frac{\sqrt{C_2}}{2\alpha_s}\right)}{C_2\left(\frac{1}{Da_{low}} - C_2\right) \frac{\sqrt{C_2}}{2\alpha_s}} - \frac{C_1 \tanh\left(\frac{1}{2\alpha_s \sqrt{Da_{low}}}\right)}{\left(\frac{1}{Da_{low}} - C_2\right) \frac{1}{2\alpha_s \sqrt{Da_{low}}}} \right] \quad (17)$$

3.2 High-aspect-ratio 마이크로채널 히트 싱크에 대한 해석해

Kim 등⁽¹⁴⁾은 Aspect Ratio 가 큰 마이크로 채널에 대해 평균 접근법을 이용하여 속도와 온도에 대한 해석해를 제시한 바 있다. 앞으로의 논의를 위해 그들의 연구 결과를 간략히 기술하도록 하겠다.

평균 방법 :

$$\langle \phi \rangle^f = \frac{1}{w_c} \int_0^{w_c} \phi dz \quad \langle \phi \rangle^s = \frac{1}{w_w} \int_{w_w}^{w_w+w_c} \phi dz \quad (18)$$

지배 방정식 :

$$\frac{\partial \langle p \rangle^f}{\partial x} = \mu_f \frac{\partial^2 \langle u \rangle^f}{\partial y^2} - \frac{\mu_f}{K_{high}} \varepsilon \langle u \rangle^f \quad (19)$$

$$\varepsilon \rho_f c_f \langle u \rangle^f \frac{\partial \langle T \rangle^f}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{fe,high} \frac{\partial \langle T \rangle^f}{\partial y} \right) + h_{l,high} a_{high} (\langle T \rangle^s - \langle T \rangle^f) \quad (20)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(k_{se} \frac{\partial \langle T \rangle^s}{\partial y} \right) = h_{l,high} a_{high} (\langle T \rangle^s - \langle T \rangle^f) \quad (21)$$

Permeability 와 Interstitial Heat Transfer Coefficient :

$$K_{high} = \frac{\varepsilon w_c^2}{12} \quad (22)$$

$$h_{l,high} = \frac{q''_{sf}}{\langle T \rangle^s - \langle T \rangle^f} = (10) \frac{k_f}{2w_c} \quad (23)$$

무차원 평균 속도와 평균 온도에 대한 해석해 :

$$U = C_3 \cosh\left(\sqrt{\frac{1}{Da}} Y\right) + C_4 \sinh\left(\sqrt{\frac{1}{Da}} Y\right) - P_{high} \quad (24)$$

$$\theta_f = \frac{P_{high}}{1+C_5} \left[-\frac{1}{2} Y^2 + C_7 Y + C_8 - C_9 \cosh\left(\sqrt{\frac{C_6(1+C_5)}{C_5}} Y\right) \right] \quad (25)$$

$$\left. -C_{10} \sinh\left(\sqrt{\frac{C_6(1+C_5)}{C_5}} Y\right) + C_{11} \left\{ \cosh\left(\sqrt{\frac{1}{Da}} Y\right) + \frac{1 - \cosh\left(\sqrt{\frac{1}{Da}}\right)}{\sinh\left(\sqrt{\frac{1}{Da}}\right)} \sinh\left(\sqrt{\frac{1}{Da}} Y\right) \right\} \right\}$$

$$\theta_s = P_{high} \left[Da \left\{ \cosh\left(\sqrt{\frac{1}{Da}} Y\right) + \frac{1 - \cosh\left(\sqrt{\frac{1}{Da}}\right)}{\sinh\left(\sqrt{\frac{1}{Da}}\right)} \sinh\left(\sqrt{\frac{1}{Da}} Y\right) - 1 \right\} - \frac{1}{2} Y^2 + C_7 Y \right. \\ \left. - C_7 \theta_f \right] \quad (26)$$

One-dimensional Bulk Mean Temperature :

$$\langle T \rangle^{f,b} = \frac{\int_0^{w_c} Tudz}{\int_0^{w_c} udz} \quad (27)$$

$$h_{high} = \frac{q''_{sf}}{\langle T \rangle^s - \langle T \rangle^{f,b}} = (8.325) \frac{k_f}{2w_c} \quad (28)$$

$$\theta_{f,b} = \frac{\langle T \rangle^{f,b} - T_w}{\frac{q''H}{(1-\varepsilon)k_s}} = \frac{h_{l,high}}{h_{high}}(\theta_f - \theta_s) + \theta_s = 1.201(\theta_f - \theta_s) + \theta_s \quad (29)$$

유체의 Bulk Mean Temperature :

$$T_{bm} = \frac{\int_0^H \int_0^{w_c} T u dz dy}{\int_0^H \int_0^{w_c} u dz dy} = \frac{\int_0^H \langle T \rangle^{f,b} dy}{H} = \frac{q''H}{(1-\varepsilon)k_s} \int_0^1 \theta_{f,b} dY + T_w$$

$$= \frac{q''H}{(1-\varepsilon)k_s} \int_0^1 (1.201(\theta_f - \theta_s) + \theta_s) dY + T_w \quad (30)$$

여기서, $a_{high} = \frac{2}{w_w + w_c}$, $k_{se,high} = (1-\varepsilon)k_s$, $k_{fe,high} = \varepsilon k_f$,

$$Y = \frac{y}{H}, U = \frac{u}{u_m} < \frac{d < p >^f}{\varepsilon \mu_f u_m} >, P_{high} = \frac{K_{high}}{\varepsilon \mu_f u_m} \frac{d < p >^f}{dx}$$

$$\theta_s = \frac{\langle T \rangle^s - T_w}{\frac{q''H}{(1-\varepsilon)k_s}}, \theta_f = \frac{\langle T \rangle^f - T_w}{\frac{q''H}{(1-\varepsilon)k_s}}, Da_{high} = \frac{K_{high}}{\varepsilon H^2} \quad (31)$$

4. 점근해 (Asymptotic Solutions)

4.1 Low-aspect-ratio Limit 에 대한 점근해

Aspect Ratio 가 매우 작다고 가정하여 식 (2)-(3)을 Scale Analysis 하면 식 (32)-(33)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x} = -\varepsilon \frac{\mu_f}{K_{low}} \langle u \rangle \quad (32)$$

$$\rho_f c_f \langle u \rangle \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x} = h_{l,low} a_{low} (T_w - \langle T \rangle) \quad (33)$$

식 (32)-(33)을 풀이하면 Low-aspect-ratio Limit 에 대한 점근해를 얻을 수 있다.

$$U = -P_{low} \quad (34)$$

$$\theta = -\frac{C_1}{C_2} \quad (35)$$

$$\theta^b = 1.061\theta = -1.061 \frac{C_1}{C_2} \quad (36)$$

이 때, $P_{low} = -1$ (37)

이 경우, 유체의 Bulk Mean Temperature 는 식 (38) 과 같이 주어진다.

$$T_{bm} = \frac{q''H}{\varepsilon(1-\varepsilon)k_s} \int_0^1 \theta^b dZ + T_w = -1.061 \frac{q''H}{(1-\varepsilon)k_s} \frac{C_1}{C_2} + T_w \quad (38)$$

4.2 High-aspect-ratio limit 에 대한 점근해

Aspect Ratio 가 매우 크고 고체의 열전도도가 유체의 열전도도보다 훨씬 크다고 가정하여 식 (19)-(21)을 Scale Analysis 하면 식 (39)-(41)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \langle p \rangle^f}{\partial x} = -\frac{\mu_f}{K_{high}} \varepsilon \langle u \rangle^f \quad (39)$$

$$\varepsilon \rho_f c_f \langle u \rangle^f \frac{\partial \langle T \rangle^f}{\partial x} = h_{l,high} a_{high} (\langle T \rangle^s - \langle T \rangle^f) \quad (40)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(k_{se} \frac{\partial \langle T \rangle^s}{\partial y} \right) = h_{l,high} a_{high} (\langle T \rangle^s - \langle T \rangle^f) \quad (41)$$

식 (39)-(41)을 풀이하면 High-aspect-ratio Limit 에 대한 점근해를 구할 수 있다.

$$U = -P_{high} \quad (42)$$

$$\theta_s = \frac{1}{2}(Y^2 - 2Y) \quad (43)$$

$$\theta_f = \frac{1}{2}(Y^2 - 2Y) - \frac{(1-\varepsilon)k_s}{2\varepsilon\alpha_s h_{l,high} H} \quad (44)$$

$$\theta_{f,b} = \theta_s + \frac{h_{l,high}}{h_{high}}(\theta_f - \theta_s) = \frac{1}{2}(Y^2 - 2Y) - \frac{(1-\varepsilon)k_s}{2\varepsilon\alpha_s h_{high} H} \quad (45)$$

이 때, $P_{high} = -1$ (46)

이 경우, 유체의 Bulk Mean Temperature 는 식 (47) 과 같이 주어진다.

$$T_{bm} = \frac{q''H}{(1-\varepsilon)k_s} \int_0^1 \theta_{f,b} dY + T_w = -\frac{1}{3} \frac{q''H}{(1-\varepsilon)k_s} - \frac{q''}{2\varepsilon\alpha_s h_{high}} + T_w \quad (47)$$

5. 결과 및 토의

제안된 해석해들과 점근해들을 검증하기 위하여 수치 해석을 통해 구한 무차원 평균 온도와 해석해 및 점근해를 통해 구한 무차원 평균 온도를 비교하였다. Fig. 2-3 은 Aspect Ratio 가 작은 히트 싱크에 대한 해석 결과이다. Low-aspect-ratio 에 대한 해석해 및 점근해가 수치해와 잘 일치한다. Low-aspect-ratio 에 대한 해석해는 $\alpha_s < 0.2$ 인 경우에, Low-aspect-ratio Limit 에 대한 점근해는 $\alpha_s < 0.04$ 인 경우에 온도장을 정확히 예측할 수 있다.

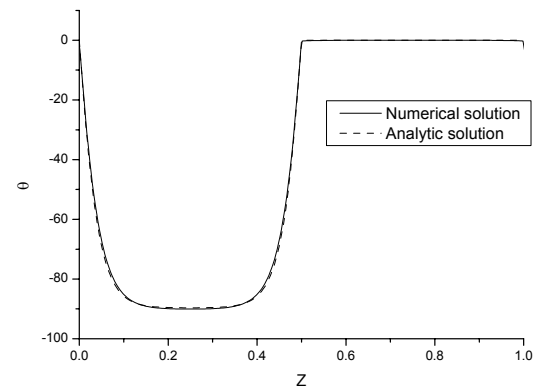


Fig. 2 Dimensionless temperature distributions for $\alpha_s=0.1$ ($\varepsilon=0.5$, $k_f/k_s=0.00414$)

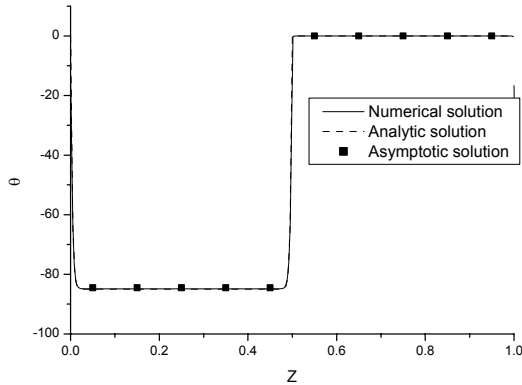


Fig. 3 Dimensionless temperature distributions for $\alpha_s=0.01$ ($\varepsilon=0.5, k_f/k_s=0.00414$)

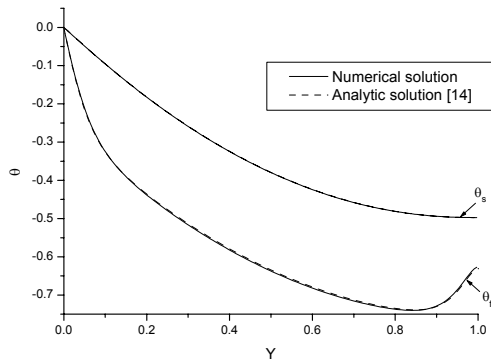


Fig. 4 Dimensionless temperature distributions for $\alpha_s=10$ ($\varepsilon=0.5, k_f/k_s=0.00414$)

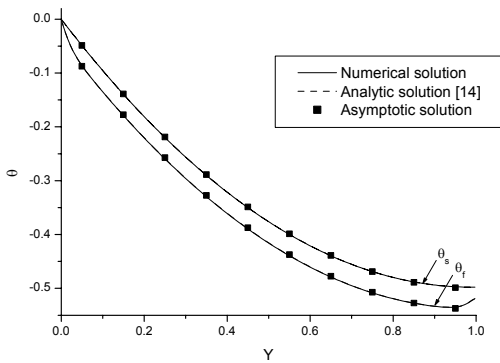


Fig. 5 Dimensionless temperature distributions for $\alpha_s=25$ ($\varepsilon=0.5, k_f/k_s=0.00414$)

Fig. 4-5 는 Aspect Ratio 가 큰 히트 싱크에 대한 해석 결과이다. High-aspect-ratio 에 대한 해석해 및 점근해가 수치해와 잘 일치한다. High-aspect-ratio 에 대한 해석해는 $\alpha_s > 5$ 인 경우에, High-aspect-ratio Limit 에 대한 점근해는 $\alpha_s > 20$ 인 경우에 온도장을 정확히 예측할 수 있다.

마이크로 히트 싱크의 열성능은 열저항의 개념을 이용하여 평가할 수 있다. Total Thermal Resistance 는 식 (X)과 같이 정의된다.

$$R_{\theta,tot} = \frac{T_{w,out} - T_{bm,in}}{q} \quad (48)$$

식 (X)는 다음과 같이 두 항으로 나눌 수 있다.

$$R_{\theta,tot} = \frac{T_{w,out} - T_{bm,out}}{q} + \frac{T_{bm,out} - T_{bm,in}}{q} \quad (49)$$

여기서 좌변의 첫째항은 Convective Thermal Resistance 이며 둘째항은 Capacitive Thermal Resistance 이다. 앞서 구한 해석해들과 점근해들을 이용하면 Convective Thermal Resistance 와 Capacitive Thermal Resistance 를 구할 수 있으므로 결국, Total Thermal Resistance 를 구할 수 있다. 만약 Low-aspect-ratio Limit 에 대한 점근해를 이용한다면 열저항은 식 (51)-(53)와 같이 간단하게 주어진다.

$$R_{\theta,tot} = \frac{2H}{(5.385)k_fWL} \left(\frac{w_c + w_w}{w_c} \right) + \frac{\sqrt{12\mu_f(w_c + w_w)L}}{\rho_f c_f \sqrt{w_c WH^3 C_{pump}}} \quad (50)$$

$$R_{\theta,conv} = \frac{2H}{(5.385)k_fWL} \left(\frac{w_c + w_w}{w_c} \right) \quad (51)$$

$$R_{\theta,cap} = \frac{\sqrt{12\mu_f(w_c + w_w)L}}{\rho_f c_f \sqrt{w_c WH^3 C_{pump}}} \quad (52)$$

이때 C_{pump} 는 Pumping Power 이다.

$$C_{pump} = \dot{Q} \cdot \Delta p \quad (53)$$

또한, High-aspect-ratio Limit 에 대한 점근해를 이용한다면 열저항은 다음과 같이 주어진다.

$$R_{\theta,conv} = \frac{1}{3} \frac{(w_c + w_w)H}{k_s w_w WL} + \frac{w_c(w_c + w_w)}{(8.325)k_f HWL} \quad (54)$$

$$R_{\theta,cap} = \frac{\sqrt{12\mu_f(w_c + w_w)L}}{\rho_f c_f \sqrt{w_c^3 WHC_{pump}}} \quad (55)$$

$$R_{\theta,tot} = \frac{1}{3} \frac{(w_c + w_w)H}{k_s w_w WL} + \frac{w_c(w_c + w_w)}{(8.325)k_f HWL} + \frac{\sqrt{12\mu_f(w_c + w_w)L}}{\rho_f c_f \sqrt{w_c^3 WHC_{pump}}} \quad (56)$$

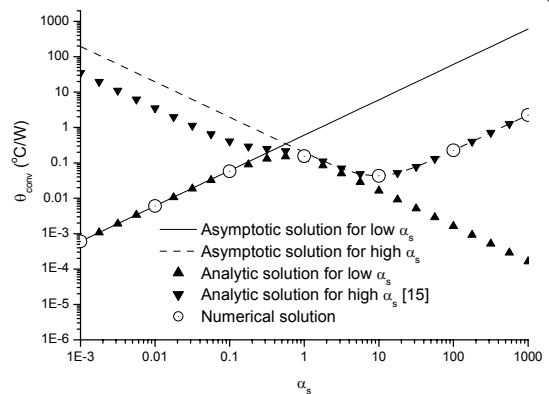


Fig. 6 Convective thermal resistances ($w_c=w_w=50\mu m, L=W=1cm, k_s=148W/mK, k_f=0.613W/mK, C_{pump}=2.56W$)

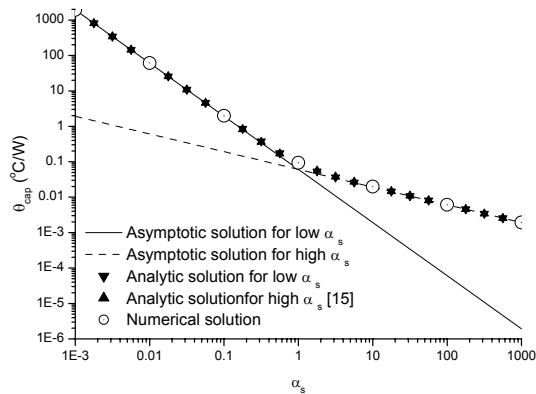


Fig. 7 Capacitive thermal resistances
($w_c=w_m=50\mu m$, $L=W=1cm$, $k_s=148W/mK$, $k_f=0.613W/mK$, $C_{pump}=2.56W$)

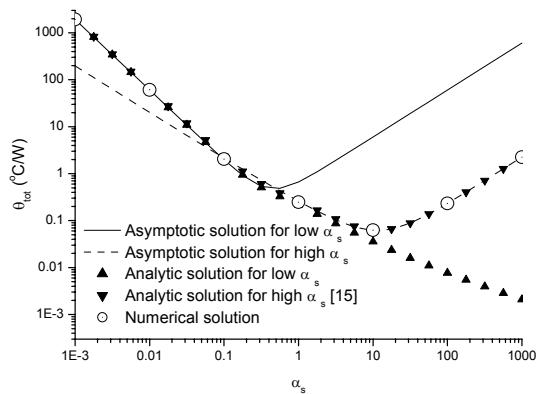


Fig. 8 Total thermal resistances
($w_c=w_m=50\mu m$, $L=W=1cm$, $k_s=148W/mK$, $k_f=0.613W/mK$, $C_{pump}=2.56W$)

Fig. 6-8 은 해석해와 점근해를 통해 구한 열저항 값을 수치 해석 결과와 비교한 것이다. Low-aspect-ratio 에 대한 해석해 및 Low-aspect-ratio Limit 에 대한 점근해는 $\alpha_s < 1$ 일 때 수치 해석 결과와 잘 맞으며, High-aspect-ratio 에 대한 해석해 및 High-aspect-ratio Limit 에 대한 점근해는 $\alpha_s > 1$ 일 때 수치 해석 결과와 잘 일치한다.

6. 결론

본 연구에서는 평균 점근법을 이용하여 Aspect Ratio 가 작은 히트 싱크의 속도와 온도에 대한 해석해를 제시하였다. 제시된 해석해는 $\alpha_s < 0.2$ 일 때 속도와 온도를 정확히 예측한다. 또한, 본 연구에서는 High-aspect-ratio Limit 와 Low-aspect-ratio Limit 에서의 점근해를 구하였다. 점근해를 이용하면 열저항을 간단하게 구할 수 있어 히트 싱크 설계에 유용하게 이용할 수 있다.

참고문헌

- (1) Oktay, S., Hannemann, R. J., and Bar-Cohen, A., 1986, "High Heat from a Small Package," *Mech. Eng.*, 108(3), pp. 36-42.
- (2) Incropera, F. P., 1988, "Convection Heat Transfer in Electronic Equipment Cooling," *J. Heat Transfer*, 110, pp. 1097-1111.
- (3) Nakayama, W., 1986, "Thermal Management of Electronic Equipment: A Review of Technology and Research Topics," *Appl. Mech. Rev.*, 39(12), pp. 1847-1868
- (4) Tuckerman, D. B., and Pease, R. F. W., 1981, "High-Performance Heat Sinking for VLSI," *IEEE Electron Device Letter*, 2, pp.126-129.
- (5) Phillips, R. J., 1990, "Microchannel Heat Sinks," in *Advances in Thermal Modeling of Electronic Components and Systems*, 2, ed. Bar-Cohen, A., and Kraus, A. D., ASME Press, New York, pp. 109-184
- (6) Goodling, J. S., and Knight, R. W., 1994, *Optimal Design of Microchannel Heat Sink: A Review*, *Optimal Design of Thermal Systems and Components*, 279, pp. 65-77.
- (7) Knight, R. W., Goodling, J. S., and Hall, D. J., 1991, "Optimal Thermal Design of Forced Convection Heat Sinks - Analytical," *J. Electronic Packaging*, 113, pp. 313-321.
- (8) Knight, R. W., Hall, D. J., Goodling, J. S., and Jaeger, R. C., 1992, "Heat Sink Optimization with Application to Microchannels," *IEEE Transaction on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 15, pp.832-842
- (9) Ellison, G. N., 1989, *Thermal Computations for Electronic Equipment*, Robert E. Krieger Publishing Company, Malabar, pp.118-120.
- (10) Zhao, C. Y., and Lu, T. J., 2002, "Analysis of Microchannel Heat Sinks for Electronics Cooling," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 45, pp.4857-4869.
- (11) Kim, S. J., 2004, "Methods for Thermal Optimization of Microchannel Heat Sinks," *Heat Transfer Engineering*, 25(1), pp. 37-49.
- (12) Koh, J. C. Y., and Colony, R., 1986, "Heat Transfer of microstructures for integrated circuits," *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 13, pp. 89-98.
- (13) Tien, C. L., and Kuo., S. M., 1987, "Analysis of Forced Convection in Microstructures for Electronic System Cooling," *Proc. Int. Symp. Cooling Technology for Electronic Equipment*, pp. 217-226.
- (14) Kim, S. J., and Kim, D., 1999, "Forced Convection in Microstructures for Electronic Equipment Cooling," *J. Heat Transfer*, 121, pp. 639-645.
- (15) Kim, S. J., Kim, D., and Lee, D. Y., 2000, "On the Local Thermal Equilibrium in Microchannel Heat Sinks," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 43, pp. 1735-1748.