

분무 증발을 이용한 칩 냉각 향상에 대한 수치적 연구

노 상 은, 김 동 철, 손 기 현*

서강대학교 기계공학과

NUMERICAL STUDY OF CHIP COOLING ENHANCEMENT WITH EVAPORATING MIST FLOW

S.E. Roh, D. Kim and G. Son*

Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.

The heat transfer enhancement of heat sink with mist flow is studied numerically by solving the conservation equations for mass, momentum and energy in the continuous and dispersed phases. A Lagrangian method is used for tracing dispersed water droplets in the heat sink and an Eulerian species transport model for air and steam mixture. The continuous and dispersed phases are interacted with the drag and evaporation source terms. The computed results show that addition of evaporating mist droplets enhances the cooling performance of heat sink significantly.

Key Words : 농도장 방정식(Species Transport Equation), 분무 증발(Mist Evaporation), 히트 싱크(Heat Sink), DPM(Discrete Phase Model)

기호설명(Nomenclature)

C_D : 항력계수
 C_v : 기체 중 수증기 질량분율
 c_p : 비열
 D : 확산계수
 d : 액적 직경
 H : 히트 싱크 높이
 h : 대류열전달 계수
 h_m : 증발 계수
 h_{fg} : 증발잠열
 k : 열전도계수
 m : 액적 질량
 \mathbf{n} : 법선방향 단위벡터
 Nu : Nusselt 수
 p : 압력

Pr : Prantl 수
 Re : Reynolds 수
 Sc : Schmidt 수
 Sh : Sherwood 수
 T : 온도
 t : 시간
 \mathbf{u} : 속도 벡터(u,v,w)
 W : 히트 싱크 너비
 x, y, z : 좌표계
 Z : 히트 싱크 길이

그리스 문자

ρ : 밀도
 μ : 점도

하첨자

0 : 유입 조건
 atm : 대기
 ch : 채널
 f : 핀
 s : 액적 표면
 P : 분무 액적

Received: October 23, 2012, Revised: April 9, 2013,

Accepted: April 10, 2013.

* Corresponding author, E-mail: gihun@sogang.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2013.18.2.009>

© KSCFE 2013

1. 서론

전자 회로 집적도가 날로 증가함에 따라 전자 칩에서 발생하는 열유속은 매우 심각한 수준이며 이러한 칩의 냉각은 매우 중요한 문제로 대두되고 있다[1]. 칩을 냉각시키는 방식 중 주로 사용되는 공랭법은 설치가 용이한 장점이 있지만 열유속이 높은 경우에 적용하는데 한계가 있다. 히트 싱크를 이용한 공랭식 칩 냉각 방식은 약 $0.1\sim 20 \text{ W/m}^2$ 의 냉각 성능을 갖는 것으로 알려져 있다[2]. 분무냉각은 공랭식에 미세액적을 포함하여 열을 흡수하는 방식으로, 제트 엔진과 같은 고열 장치에도 적용되고 있다[3]. 공랭식에 비해 성능이 우수하고 수냉식에 비해 설치비가 저렴하다는 장점이 있다.

미세 분무를 이용한 냉각효과의 증진에 대한 연구는 제트 터빈의 냉각[4,5], 충돌 제트 분사[6,7] 등 다양한 분야에서 수행되었다. 또한 Guo et al.[8]은 구부러진 튜브 형태의 관에 $3\sim 15 \mu\text{m}$ 크기의 분무 액적을 5%까지 첨가하여 열전달 효율을 평균 100%, 최대 200%까지 증가하였다. Wang et al.[9]은 분무 액적을 충돌 분사한 실험을 통하여, Re 수가 7500, 15000인 조건에서 분무 액적을 공기에 3.5%까지 포함하면 평균 열전달량이 100%까지 증가하는 것을 확인하였다. Kumari et al.[10]은 분무 액적을 이용하여 일정한 열유속이 유입되는 히트 싱크 냉각모델을 수치해석 하였다. 이들은 분무 액적의 농도를 1~10%, 크기를 $10 \mu\text{m}\sim 5 \mu\text{m}$ 로 조절하여 히트 싱크의 냉각 성능을 향상시켰다. 이러한 연구들의 대부분은 분무 냉각 방식의 우수한 냉각 성능을 보여주지만 고열유속조건에서의 칩 냉각에 적용한 사례는 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 고열유속 조건의 칩 냉각을 대상으로 하여, 분무 증발 냉각의 적용 타당성을 수치적으로 해석하였다.

2. 수치해석 기법

본 연구에서 고려한 히트 싱크는 구리로 구성되며 공기와 물 액적이 흐르는 채널로 구성된다. 해석 구간은 Fig. 1과 같은 형상이며 $W=0.25 \text{ mm}$, $W_{ch}=1.325 \text{ mm}$, $H=15 \text{ mm}$, $H_f=13 \text{ mm}$, $Z=32 \text{ mm}$ 의 치수를 갖는다. 공기와 수증기, 분무 입자의 모든 물성치는 25°C 를 기준으로 하였으며 포화 수증기압은 온도에 대한 선형 분간법으로 산정하였다.

공기-수증기의 혼합상태는 농도장 방정식을 통해 구현하였고, 분무 액적의 거동은 DPM(Discrete Phase Model) 모델을 사용하여 수치해석하였다. 해석에 사용된 격자의 개수는 34만 개로 격자 의존성 검사를 통해 선정하였다.

2.1 지배 방정식

채널 내부의 유동은 공기와 분무 액적의 증발에 의한 수증

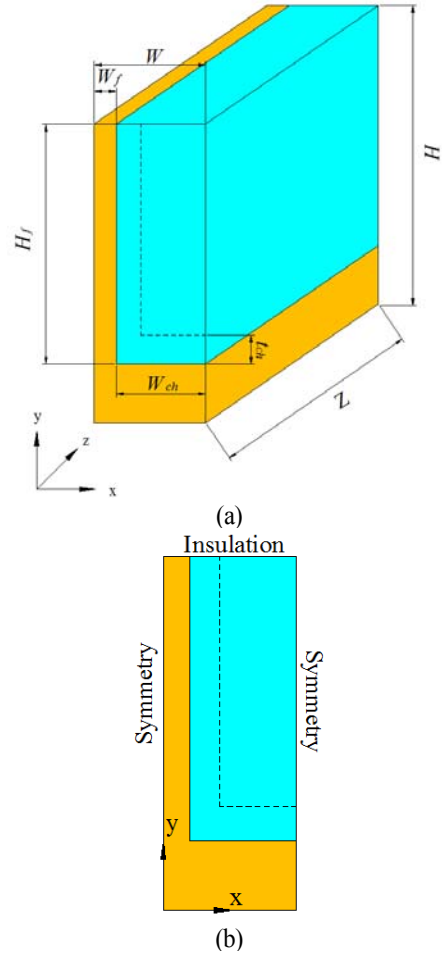


Fig. 1 Configuration of heat sink for the mist flow simulation: (a) isometric view and (b) front view

기의 혼합물에 대한 농도장 방정식으로 해석하였다. 채널 내부 유동의 Re 수는 300 정도이며, 층류 유동에 대한 다음과 같은 질량, 운동량, 에너지, 농도장 보존식을 사용하였다.

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = S_M \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mu [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] + \mathbf{F} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho c_p \mathbf{u} T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_E \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} C_v) = \nabla \cdot (\rho D \nabla C_v) + S_M \quad (4)$$

위의 식에서 S_M , \mathbf{F} , S_E 은 분무 액적과의 상호작용을 포함하는 생성항이다. 채널 내부의 분무 액적은 DPM 모델을 사용하여 수치 계산하였다. 분무 액적은 구 형상으로 가정하였으며, 액적의 온도는 조건에 따라 변화하지만, 액적 내부의 온도 구배는 고려하지 않았다. 분무 액적의 질량, 속도, 온도 변화를 예측하기 위해 다음과 같은 Lagrangian 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial m_P}{\partial t} = \pi d^2 h_m (C_{vs} - C_v) \tag{5}$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}_P}{\partial t} = \frac{18\mu C_D Re_P}{24\rho\mu d^2} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_P) \tag{6}$$

$$m_P c_{p,P} \frac{\partial T_P}{\partial t} = \pi d^2 h (T - T_P) + h_{fg} \frac{\partial m_P}{\partial t} \tag{7}$$

$$Re_D = \frac{\rho d |\mathbf{u} - \mathbf{u}_P|}{\mu} \tag{8}$$

$$Sh = \frac{h_m d}{D} = 2.0 + 0.6 Re_P^2 Sc^{1/3} \tag{9}$$

$$Nu = \frac{hd}{k} = 2.0 + 0.6 Re_P^2 Pr^{1/3} \tag{10}$$

위 식에서 m_P , \mathbf{u}_P , T_P 는 분무 액적에 대한 변수이며, C_v , \mathbf{u} , T 는 연속상인 공기-수증기 혼합물에 대한 변수이다. 식 (1)-(4)의 연속체 방정식의 생성항은 분무 액적의 DPM 방정식으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$S_m = \frac{\Delta m_P}{m_{P0}} \frac{\dot{m}_{P0}}{dV} \tag{11}$$

$$F = \sum \left(\frac{18\mu C_D Re_D}{24\rho\mu d^2} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_P) \right) \dot{m}_P \Delta t \tag{12}$$

$$S_E = \left[\frac{m_P}{m_{P0}} c_{p,P} \Delta T_P + \frac{\Delta m_P}{m_{P0}} \left(-h_{fg} + c_{p,P} \int_{T_{ref}}^{T_P} dT \right) \right] \frac{\dot{m}_{P0}}{dV} \tag{13}$$

위 식에서 m_{P0} 는 분무 액적의 초기 크기, \dot{m}_{P0} 는 분무 액적의 질량 변화율, Δt 는 시간 간격, Δm_P 는 Δt 동안 증발한 분무 액적의 양, dV 는 해석에 사용된 단위 cell의 크기를 의미한다. S_E 는 분무 액적의 증발과 내부 온도 변화에 의한 에너지 변화를 포함한다.

2.2 경계 조건

해석에 사용된 경계 조건은 다음과 같다.

바닥면 ($y=0$)

$$u = v = w = 0, -k \frac{\partial T}{\partial y} = q_w \tag{14}$$

대칭면 ($x=0, x=W$)

$$u = 0, \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \tag{15}$$

히트 싱크의 수평 밑면 ($x>W_f$ and $y=H-H_f$)

$$u = v = w = 0 \tag{16}$$

히트 싱크의 수직 측면 ($x=W_f$ and $y>H-H_f$)

$$u = v = w = 0 \tag{17}$$

히트 싱크의 상부 경계면 ($y=H$)

$$u = v = w = 0, -k \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \tag{18}$$

채널 입구 ($x>W_f$ and $y>H-H_f, z=0$)

$$u = v = 0, w = w_P = w_0, T = T_0 \tag{19}$$

채널 출구 ($x>W_f$ and $y>H-H_f, z=Z$)

$$p = p_{atm} \tag{20}$$

분무 액적과 벽면의 충돌이 발생할 경우 부착 등의 상호작용을 고려하지 않았으며 반사(reflex) 조건을 사용하였다. 공기-수증기 혼합물과 액적 분무의 지배방정식은 상용코드 FLUENT 6.3.2를 이용하여 해석하였다.

3. 결과 및 고찰

채널 내부의 상태가 유입된 건조 공기 및 분무 액적에 의해 정상상태에 도달한 경우에 대해 해석을 수행하였다. 채널 입구에 유입되는 질량유량은 2.11×10^{-5} kg/s이며, 건조공기의 유속은 1 m/s이다. 채널에 유입되는 공기와 분무 액적의 온도 T_0 은 25°C이다.

3.1 분무 액적에 의한 냉각효과 비교 및 수치 모델 검증

분무 액적이 포함되지 않은 건조 공기 유동과 분무 액적을 포함한 유동의 열전달에 대한 수치해석을 수행하였다. 해석 모델의 검증을 위하여 Kumari et al.[10]의 연구에 제시된 조건에 대해 계산을 수행하였다. 분무 액적의 직경은 $d=10 \mu m$ 이며 입구에서의 분무 액적 질량 유량은 전체 질량 유량의 1%이다. Fig 2와 Fig 3은 건조 공기와 분무 액적에 의해 냉각이 진행되어 정상상태에 도달한 채널 내부의 온도변화 및 분무 액적의 증발로 인해 발생한 수증기의 농도장을 나타낸 결과이다.

해석 결과는 입구 부분부터 출구 방향으로 구간을 설정하여 고체-액체면에서의 온도장 변화를 동시에 포함하여 나타내었다. 유동의 온도는 채널 내부를 진행할수록 평균값이 상승하는 것을 확인할 수 있는 반면에 히트 싱크의 온도는 히트 싱크의 열전도율이 크기 때문에 전체적으로 큰 차이가 없는

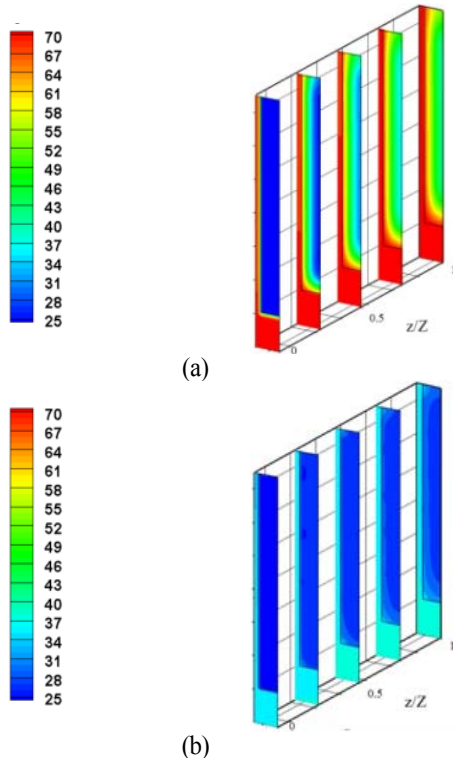


Fig. 2 Variation of temperature field for $q_w=1 \text{ W/cm}^2$: (a) air cooling and (b) mist cooling

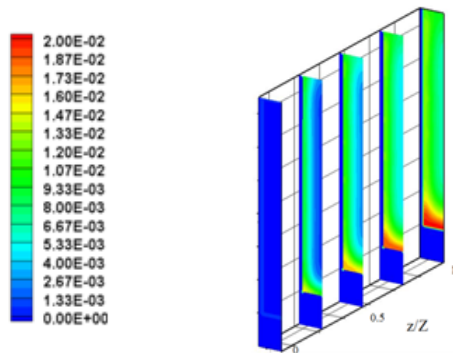


Fig. 3 Variation of mass fraction of steam field of mist cooling for $q_w=1 \text{ W/cm}^2$

것을 확인할 수 있다. 분무 액적은 채널을 통과하면서 증발하는데 이는 수증기의 농도장을 통해 나타내었다. Fig. 2(b)와 Fig. 3에서 수증기의 농도는 주로 히트 싱크와 유동이 맞닿는 부분에서 높아지는 것을 확인할 수 있는데 이는 온도가 높은 채널의 벽면이 액적의 증발이 활발하게 진행되는데 유리하기 때문이다. 히트 싱크의 평균 온도는 입구 유입 온도에 대해 공냉식과 분무냉각식에서 각각 40.8°C , 31.4°C 증가한 것으로 나타났고, 채널을 통과하는 유동의 출구면에서 평균 온도는 각각 23.4°C , 21.3°C 증가하였으며, 이는 Kumari et al.[10]의 연구 결과와 일치한다. 해석 결과로부터 분무 냉각 방식이 공랭식

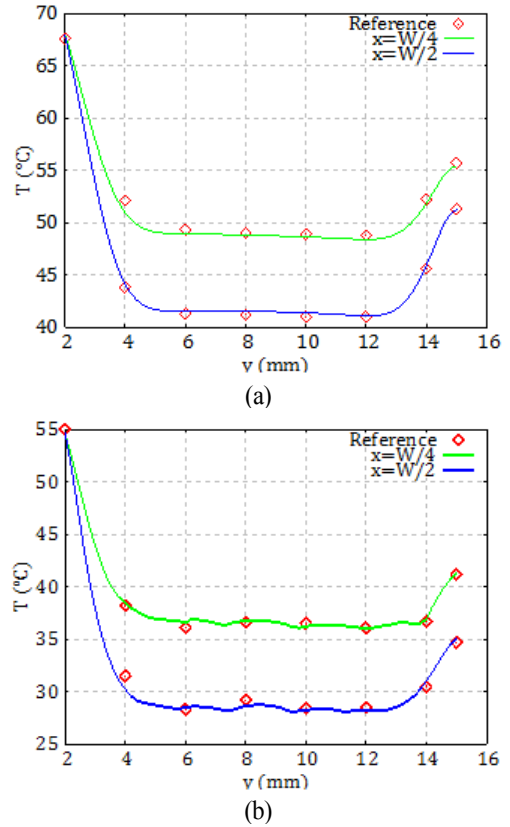


Fig. 4 Variation of temperature profile at $z/Z=1$: (a) air cooling and (b) mist cooling

에 비해 히트 싱크의 평균 온도를 약 23% 더 낮출 수 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4는 출구면의 $x=W_{ch}/4$, $W_{ch}/2$ 지점에서의 온도 분포를 Kumari et al.[10]의 연구 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 결과로부터 채널의 벽면에 가까운 부분에서 상대적으로 높은 온도가 발생하는데 비해 중심부에서는 온도가 거의 일정 한 것을 확인할 수 있다. 출구부분에서의 분무 유량은 증발로 인해 초기 유량에 비해 약 36% 감소하였으며 출구 부분에서 채널 내부의 공기 및 수증기가 흡수하는 에너지와, 증발로 인해 흡수되는 에너지는 각각 0.258J, 0.305J로 증발로 인한 에너지 흡수량이 약 55% 정도의 비중을 차지하였다. 이는 유동에 포함된 분무 액적의 증발이 냉각에 있어 큰 비중을 차지하는 것을 의미한다.

3.2 고열유속 조건에서의 분무 액적의 농도에 대한 냉각 효과 비교

고열 유속 조건의 칩냉각에 분무 냉각방식을 적용하는 것이 효과적인지 검증하기 위하여 바닥면에서 유입되는 열유속을 5배(4.9 W/cm^2)로 증가시켜 계산을 수행하였다. 추가로 일반적으로 같은 질량유량이라 하더라도, 분무 액적의 비율이 높은 것이 냉각성능 증진에 유리하다고 알려져 있기 때문에

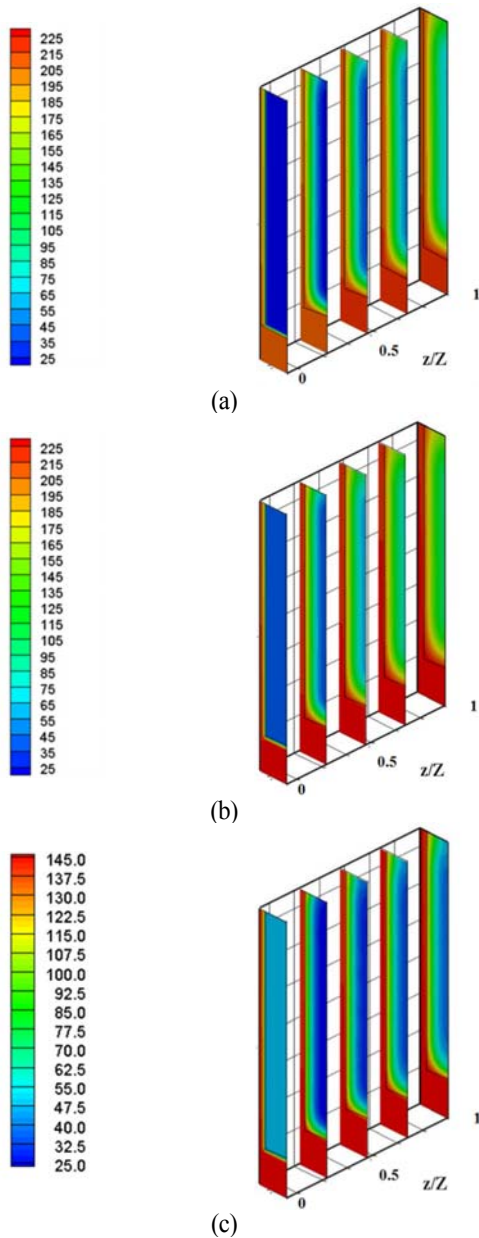


Fig. 5 Variation of temperature field for $q_w=4.9 \text{ W/cm}^2$:
 (a) air cooling ($m_p/m=0$),
 (b) mist cooling ($m_p/m=1\%$) and
 (c) high-density mist cooling ($m_p/m=10\%$)

본 연구에서는 분무 액적을 전체 질량 유량의 1%를 포함시킨 사례와 10%만큼 포함시킨 사례에 대하여 냉각 성능을 비교 하였다. Fig. 5는 공랭식과 분무 액적을 각각 1%, 10% 포함했을 때의 온도장을 보여준다. 각각의 경우 히트 싱크의 평균 온도는 상온에 대해 각각 201.3°C, 187.2°C, 116.9°C 상승하였으며 출구부분의 평균온도는 각각 113.5°C, 111.2°C, 27.72°C 상승하였다. 분무 액적을 1% 포함시킨 경우 공랭식에 비해 약 7% 냉각 성능이 향상되며, 분무 액적이 10% 포함되는 경

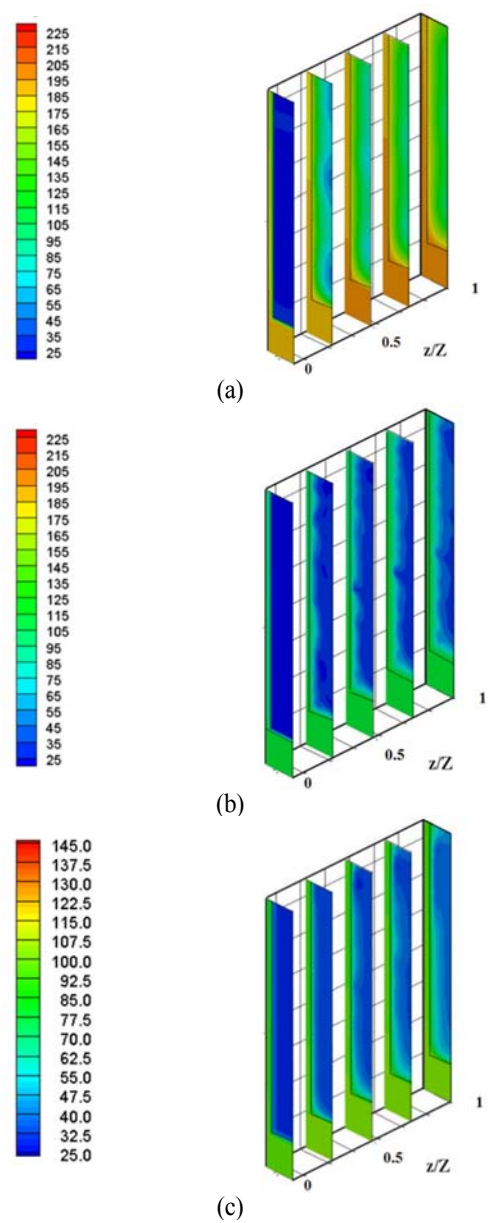


Fig. 6 Variation of temperature field for $q_w=4.9 \text{ W/cm}^2$:
 (a) localized air cooling (type1),
 (b) localized air & mist flow cooling (type2) and
 (c) uniform air & localized mist cooling (type3)

우 약 42% 정도 냉각 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 분무 액적의 비율이 1%, 10%일 경우 각각의 증발율은 각각 92%, 35%이지만, 분무 액적이 10% 포함된 경우의 증발량이 4배 더 많기 때문에 분무 액적의 증발량이 많을수록 냉각 성능이 증진되는 것을 확인할 수 있다.

냉각장치 설계의 최적화를 위하여 냉각장치 구동에 필요한 동력은 냉각성능과 함께 고려해야 할 중요한 요소이다. 유동과 분무 액적이 채널을 통과하기 위해 필요한 동력으로부터 평균 압력 강하를 다음과 같이 산출할 수 있다.

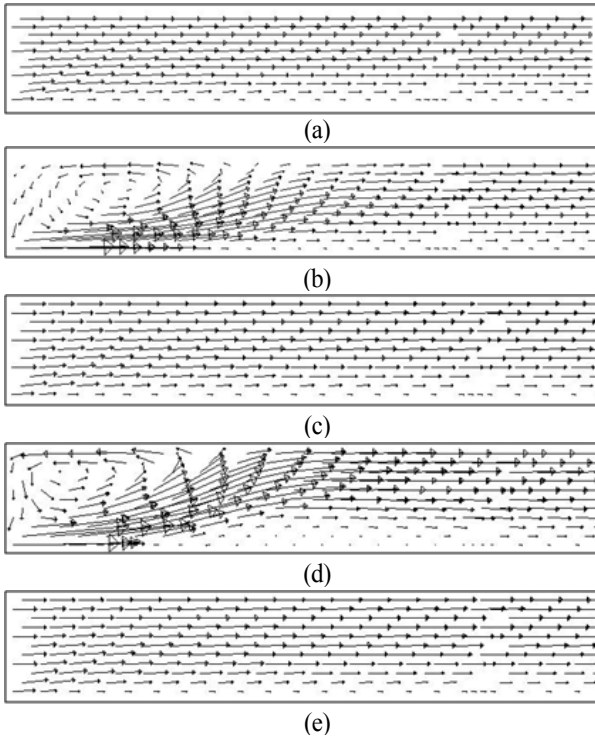


Fig. 7 Velocity field at $y/H_f=0.5$: (a) uniform air flow, (b) localized air flow, (c) uniform air & mist flow, (d) localized air & mist flow and (e) uniform air & localized mist flow

$$\Delta p = \rho_{air} \left[\left(\frac{1}{2} \overline{U^2} + \frac{1}{2} \frac{\dot{m}_P}{\dot{m}} \overline{U_P^2} \right)_{out} - \left(\frac{1}{2} \overline{U^2} + \frac{1}{2} \frac{\dot{m}_P}{\dot{m}} \overline{U_P^2} \right)_{in} \right] \quad (21)$$

해석 결과로부터 압력 강하의 크기는 공랭식이 1.9 Pa, 분무 냉각 방식이 각각 2.2 Pa와 1.6 Pa로 나타났다. 이는 분무 냉각 방식을 사용할 경우 소요 동력을 크게 증가시키지 않고 냉각 성능을 향상할 수 있음을 의미한다.

3.3 유입유량 집중에 의한 냉각효과 비교

질량 유량을 일정하게 유지하면서 냉각 효과를 더욱 향상시키는 방안으로, 본 연구에서는 고온이 예상되는 지점에 유량을 집중하는 방법을 고려했다. 입구로부터 유입되는 질량 유량 조건은 고정된 채, 유동 및 분무 액적이 유입되는 구간을 채널의 벽면으로부터 240 μm 까지로 한정하여 입구에서의 집중도를 높이는 방식으로 해석을 수행하였다. 이때 입구에서 유속 집중도는 5.1배로 증가한다. 해석은 건조공기를 벽면 근처에 집중 분사하는 조건(type1), 분무 액적과 공기를 동시에 벽면에 집중시키는 조건(type2), 공기는 원래 방식대로 균일하게 유입되면서 분무 액적만을 벽면 근처에 집중 분사하는 조

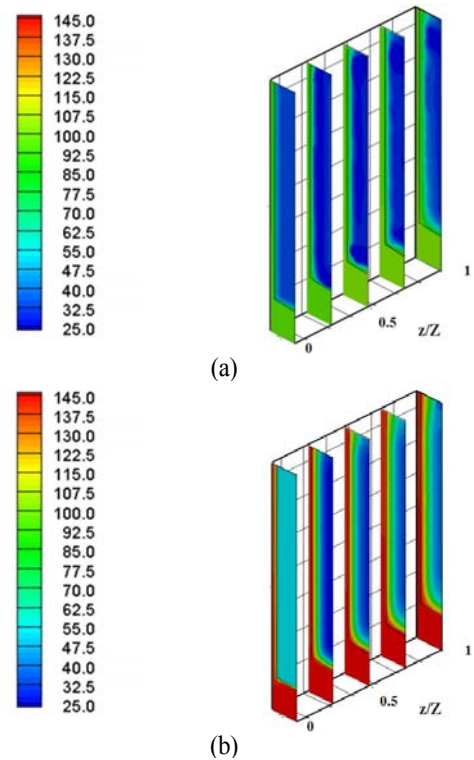


Fig. 8 Variation of temperature field for $d_p=5 \mu\text{m}$, $q_w= 4.9 \text{ W/cm}^2$: (a) uniform air & mist cooling and (b) uniform air & localized mist cooling

건에 대하여 수행하였다(type3). 모든 경우에 대한 질량 유량은 동일하고 분무 액적이 포함된 경우 분무 액적 질량 유량은 전체의 10%이다.

Fig. 6은 각 방식에 대한 채널 내부의 온도 변화를 나타낸 결과이다. 공기를 벽면에 집중시켜 냉각하는 방식(type1)의 히트 싱크 온도 증가는 169.0°C로 집중하지 않은 방식에 비해 15% 이상 냉각 성능이 증가하였다. 그 이유는 채널 내부에 발생한 속도장을 통해 확인할 수 있다. Fig. 7은 채널의 중간 ($y/H_f=0.5$) 높이에서의 공랭식과 분무 냉각식에 대한 속도장을 나타낸다. Fig. 7(b)와 같은 순환 유동의 발생은 온도가 상승한 벽면의 공기를 상대적으로 온도가 낮은 채널 중심부의 공기와 혼합시키는 효과가 있다. 따라서 공랭식의 경우 가능한 채널 벽면에 유동을 집중시키는 것이 냉각에 유리한 것을 확인할 수 있었다. 다만 이 경우 압력강하는 12.8 Pa로 건조 공기를 일정하게 분사할 경우에 비해 7배 정도 증가하여 운영 효율 면에서는 불리하였다. 공기-분무액적 집중 방식(type2)과 공기 비 집중-분무액적 집중 방식(type3)은 히트 싱크의 온도가 유입 온도에 비해 각각 84.7°C, 71.8°C 증가하여 공기를 집중시켜 입사시키지 않고 분무 액적만을 집중시켜 입사시키는 경우가 냉각에 더 유리한 것을 확인하였다. 건조 공기와 분무 액적을 동시에 집중 분사하는 방식은 채널 내부에 Fig. 7(d)와

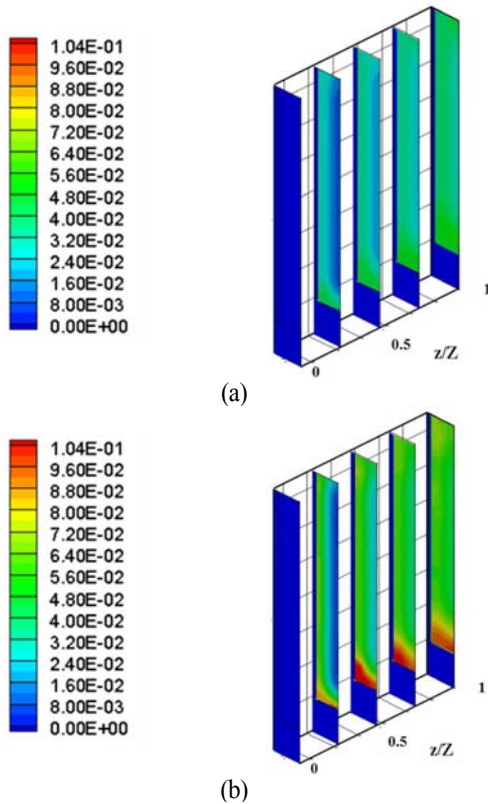


Fig. 9 Variation of mass fraction of steam field for $d_{p0}=5 \mu\text{m}$, $q_w=4.9 \text{ W/cm}^2$: (a) uniform air & mist cooling and (b) uniform air & localized mist cooling

같은 순환 유동을 유도하여 벽면에 밀집되어 있던 분무 액적을 채널 내부로 분산함으로 고온 벽면으로부터의 증발열전달을 감소시킨다. 반면에 분무 액적만을 집중시키는 경우 Fig. 7(e)에서 볼 수 있듯 분무 액적의 집중도가 끝까지 유지되어 진행되는 것을 확인할 수 있다. 분무액적만을 집중시키는 압력 강하는 2.1 Pa이고 공기와 분무액적 모두 집중시키는 경우는 10.7 Pa로 냉각 성능만이 아니라 운영 효율 면에서도 건조 공기는 채널에 균일하게 입사시키면서 분무 액적을 벽면에 집중 분사시키는 것이 유리하다는 것을 확인하였다.

3.4 분무 액적 크기 변화에 의한 냉각 효과 비교

분무 액적 크기 조절에 따른 냉각 효과를 확인하기 위하여 입구에서 유입되는 분무 액적의 크기를 $5 \mu\text{m}$ 로 조절하여 해석을 수행하였다. 건조 공기는 입구 전부분에 균일하게 유입되는 조건하에 분무 액적 역시 균일하게 입사시키는 방식과 벽면에 집중하여 입사시키는 방식에 대한 해석을 수행하였다.

Fig. 8은 분무 냉각방식에 대한 히트 싱크와 채널내부의 온도 분포를 나타낸 결과이고 Fig. 9는 분무 액적 증발에 대한 수증기 농도장을 나타낸 결과이다. 분무 액적을 집중시키지 않은 경우는 유입 온도에 대해 히트 싱크의 평균온도가

110.2°C, 출구에서의 평균온도가 27.7°C 증가하였다. 분무 액적을 집중시킨 경우는 히트 싱크의 평균온도가 67.3°C, 출구에서의 평균온도가 13.8°C 증가하였다. 분무 액적의 크기를 절반으로 감소시켰을 경우의 냉각 성능은 각각 6% 개선되는 것을 확인 할 수 있었다. 다만 분무 액적의 크기가 감소함으로써 채널 내부의 압력 강하는 각각 1.9 Pa, 2.3 Pa로 증가한다. 이는 조건을 변화시킬 경우 냉각 성능은 우수해지지만 작동에 추가 동력이 필요하다는 것을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 고열 유속 조건의 칩냉각을 위해 공기와 분무 냉각 방식의 열전달 성능을 비교하였다. 채널에 유입되는 질량 유량 조건을 고정하여 분무 액적의 질량 분율, 공기 및 분무 액적 분사방식 및 분무 액적의 크기를 조절함으로써 냉각 성능을 비교하였다. 공랭식과 분무 냉각을 비교하여 채널을 통과하는 분무 액적의 질량 유량이 10%일 때 분무 냉각 방식은 냉각 장치 구동을 위한 추가 동력을 필요로 하지 않으면서도 공랭식에 비해 냉각 성능이 약 40% 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 채널의 형상을 유지하면서 상대적으로 높은 온도가 발생할 것으로 예상되는 채널의 벽면근처로 분무 액적이 집중될 수 있도록 조절함으로써 공랭식에 비해 분무 냉각 성능이 65%까지 증진될 수 있음을 확인하였다. 이때 채널 내부에 순환 유동이 발생하여 벽면에 집중되어 있던 분무 액적이 확산될 경우 분무 액적의 증발을 방해함으로써 냉각 성능이 오히려 감소할 수 있음을 확인하였다. 분무 액적의 크기를 감소시키는 방식 역시 냉각 성능을 증가시키는데 효과가 있는 것을 확인하였다. 다만 이 경우에는 냉각 장치 구동에 추가로 동력이 필요하다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받은 ‘다중현상 CFD 연구센터(ERC)’의 과제로 수행된 연구입니다(No. 2009-0083510).

References

[1] 2004, Chu, R.C., Simons, R.E., Ellsworth, M.J., Schmidt, R.R. and Cozzolino, V., "Review of cooling technologies for computer products," *IEEE Trans. Dev. Mater. Reliab*, Vol.4, pp.568-585.
 [2] 2011, Belmiloudi, A., "Theoretical Analysis, Experimental Investigations and Industrial Systems," *Intech, Rijeka*,

- Croatia, pp.52-76.
- [3] 2001, Li, X., Gaddis, J.L. and Wang, T., "Modeling of heat transfer in a mist/steam impinging jet," *J. Heat Transfer*, Vol.123, pp.1086-1092.
- [4] 1973, Goodyer, M.J. and Waterston, R.M., "Mist Cooled Turbines," *Conf. Heat and Fluid in Steam and Gas Turbine*, pp.166-174.
- [5] 2003, Li, X., Gaddis, J.L. and Wang, T., "Mist/steam cooling by a row of impinging jet," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.46, pp.2279-2290.
- [6] 2008, Wang, T. and Li, X., "Mist film cooling simulation at gas turbine operating conditions," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.53, pp.3346-3356.
- [7] 2003, Li, X., Gaddis, J.L. and Wang, T., "Mist/steam Heat transfer in confined slot jet impingement," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.46, pp.2279-2290.
- [8] 2000, Guo, T., Wang, T. and Gaddis, J.L., "Mist/steam cooling in a 180-degree tube," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.22, pp.360-374.
- [9] 2005, Wang, T., Gaddis, J.L. and Li, X., "Mist/steam heat transfer of multiple rows of impinging jets," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.48, pp.5179-5191.
- [10] 2010, Kumari, N., Bahadur, V., Hodes, M., Salamon, T., Kolodner, P., Lyons, A. and Garimella, S.V., "Analysis of evaporating mist flow for enhanced convective heat transfer," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.53, pp.3346-3356.