



# 난류 효과를 포함한 다중 충돌 제트의 냉각 특성에 대한 수치적 연구

전진호,<sup>1</sup> 손기현<sup>\*2</sup>

## NUMERICAL STUDY ON COOLING CHARACTERISTICS OF MULTIPLE IMPINGING JETS INCLUDING THE EFFECT OF TURBULENCE

J.H. Jeon<sup>1</sup> and G.H. Son<sup>\*2</sup>

*Free surface impinging jet on a moving plate, which is applicable to cooling of hot metals in a steel-making process, is investigated numerically by solving the Navier-Stokes equations in the liquid and gas phases. The free surface of liquid-gas interface is tracked by a level-set method which is improved by incorporating the ghost fluid approach based on a sharp-interface representation. The method is further improved by employing a nonequilibrium  $k-\epsilon$  turbulence model including the effect of low Reynolds number. The computations are made to investigate the effects of the nozzle pitch, moving velocity of plate and jet velocity on the interfacial motion and the associated flow and temperature fields.*

**Key Words :** 자유 표면 충돌제트(Free Surface Impinging Jet), 다중 제트(Multiple jet), Level set 방법(Level Set Method), 비평형  $k-\epsilon$  모델링(Nonequilibrium  $k-\epsilon$  modeling)

### 기호설명

$c_p$	: 정압 비열
$c_\mu$	: 난류 비열
$d$	: 노즐 직경
$g$	: 중력
$h$	: 노즐과 평판간의 거리
$q$	: 열전달량
$r$	: 정체점부터 유동방향 거리
$t$	: 시간
$T$	: 온도
$u$	: 속도 벡터, $(u, v)$
$V_j$	: 수분류의 분사속도
$V_P$	: 평판의 속도

### 그리스문자

$\Theta$	: 액적과 벽면의 접촉각
$\kappa$	: 상경계면의 곡률
$\Phi$	: Level Set 함수
$\mu_{eff}$	: 난류 점성계수
$\rho$	: 밀도
$\sigma$	: 표면장력계수

### 하첨자

$g, l$	: 기체, 액체
--------	----------

## 1. 서론

고온의 평판이나 물체에 액체를 직접 분사하여 발생하는 높은 열전달 효과를 이용하는 충돌제트(impinging jet)가 철강 공정이나 고발열 전자장비의 냉각 등과 같이 여러 산업분야에서 다양하게 이용되고 있다 이러한 충돌제트는 제트유동은 분사되는 수분류의 높은 운동에너지를 포함하여 높은 열전달 효과를 볼 수 있어 많은 연구가 진행되고 있다.

1 서강대학교 대학원 기계공학과

2 정회원, 서강대학교 기계공학과

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

충돌제트를 통한 냉각의 기존 연구들에서는 수분류의 분사 속도, 노즐 형상 및 크기, 노즐과 평판과의 거리, 수분류의 온도, 평판의 온도 및 표면상태 등과 같은 고온 평판 냉각 효과에 영향을 미치는 요인을 규명하기 위해 다양한 연구가 진행되어 왔다.

실험적 연구로 Webb과 Stevens[1,2]는 7.6 ~ 23.0mm의 노즐과 11,000 ~ 53,100의 레이놀즈수인 난류 영역에서의 자유 표면을 포함한 충돌제트에 관해서 연구하였다. 난류가 평판 근처에서 가장 크게 발생함을 발견하고 r/d가 1인 지점에서 최소값을 보이고 2.5인 지점에서 최대값을 보임을 밝혔다

수분류와 평판간의 대류 열전달량과 유동 특성을 보다 명확하게 밝히기 위해서 다양한 방법의 수치해석적 연구가 활발하게 수행되고 있다. 그러나, 해석상의 어려움 때문에 대부분의 연구는 평판위의 자유 표면의 효과를 포함하지 않는 submerged jet에 국한되어 왔다.

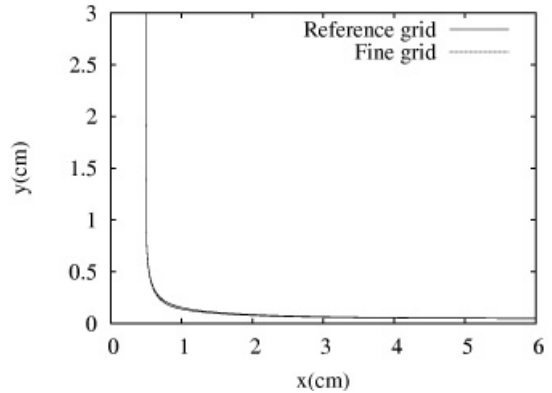
자유 표면을 동반하는 충돌제트와 발열판 사이에 발생하는 열전달특성을 다룬 연구로는 Fujimoto 등[3]이 정지된 평판에 분사되는 원형 자유표면 충돌제트로 인해 발생하는 강제대류 냉각에 관련된 수치적 연구를 수행하였다. 유한요소법을 이용하여 Navier - Stokes식과 에너지 방정식으로 해석하였다. 일정하게 가열되는 평판과 수분류간의 열전달량을 가지고 local Nusselt number와 유체흐름을 예측하였다. 또한, 수치해석적 데이터를 바탕으로 유동장과 온도장에 미치는 Reynolds number의 효과에 대해서 밝혔다

Chattopadhyay와 Saha[4]는 large eddy simulation 기술을 이용하여 충돌 편면의 이동을 고려한 난류 영역(Re=5800)에서 단일 노즐 충돌제트의 유동 속도를 해석하였다. 하지만 열전달에 관련된 해석은 포함되지 못하였다. Gradeck[5]등은  $k-\epsilon$  모델을 포함한 VOF 방법을 이용하여 이동하는 평판에 단일 노즐 충돌제트를 해석하고, 같은 조건의 실험을 동시에 수행하여 비교하였다. 조건으로 분사속도는 0.41~2.17m/s로 평판의 이동속도는 0.51~2.65m/s로 조절하여 연구를 수행하였으나, 역시 열전달에 관련된 부분은 포함되지 않았다

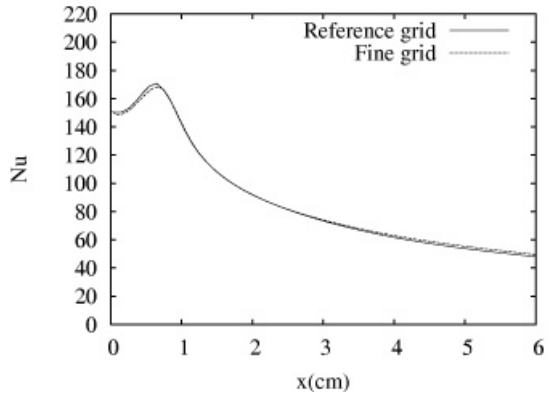
본 연구는 액체-기체 상경계면 뿐만 아니라 고체유체 상경계면에서의 no-slip 조건을 좀더 명확하게 구현할 수 있는 Sharp-Interface 기법을 적용한 Level Set 방법을 이용하여 자유 표면을 가지는 난류 영향을 포함한 다중 충돌 제트에서 평판의 이동 속도, 노즐의 분사 속도, 노즐간의 간격이 유동 및 열전달에 미치는 영향에 대해서 규명하고자 한다

## 2. 수치해석방법

본 연구에서 사용된 수치해석 방법은 Son과 Dhir[6]의 sharp-interface 구현을 위한 Level Set 방법을 기반으로 하였다.



(a) Interface



(b) Nusselts number

Fig. 1 Grid resolution test

기체-액체의 상경계면은 기상에서 음의 값 액상에서 양의 값을 가지는 거리함수로 정의된 Level Set 함수에 의해 계산된다. 기상, 액상 영역 모두에 적용될 수 있는 운동량 보존 질량 보존, 에너지 및 Level Set 함수  $\phi$ 를 지배하는 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \rho \mathbf{g} - \sigma \kappa \nabla H + \nabla \cdot (\mu + \rho \nu_t) [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] \tag{2}$$

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot (k + \rho c_p \frac{\nu_t}{Pr_t}) \nabla T \tag{3}$$

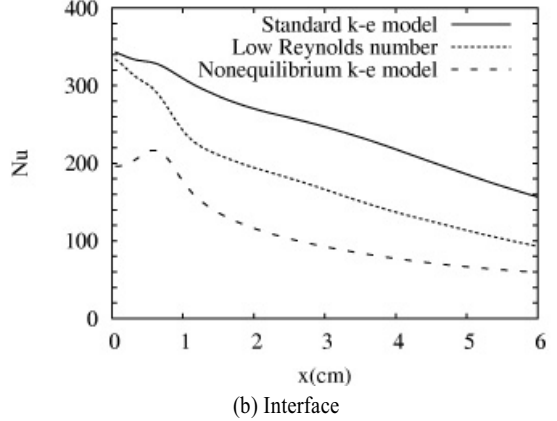
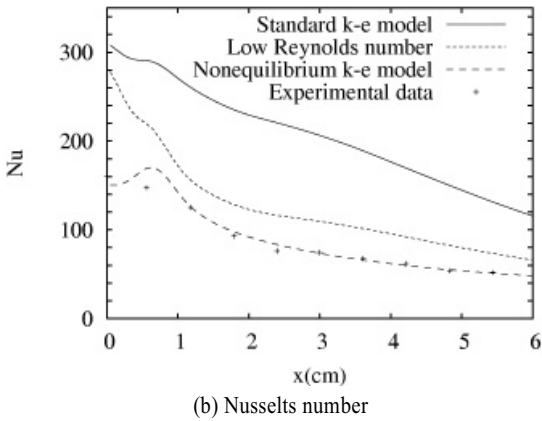
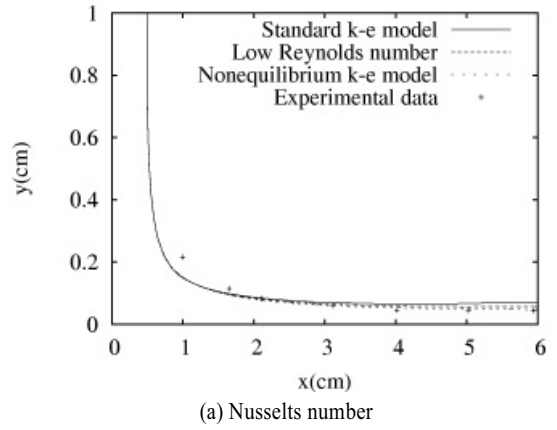
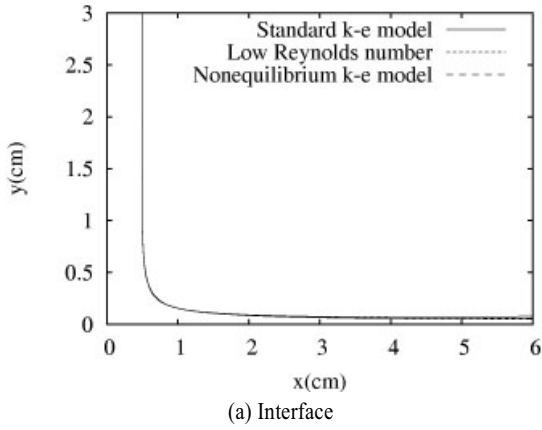


Fig. 2 Comparison of the numerical results with Stevens & Webb's[1] experimental data

Fig. 3 Comparison of the numerical results with Stevens's[8] experimental data

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla \phi \quad (4)$$

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \nabla \cdot \left( \mu + \rho \frac{\nu_t}{Pr_k} \right) \nabla k + \rho G - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \nabla \cdot \left( \mu + \rho \frac{\nu_t}{c_\epsilon} \right) \nabla \epsilon + c_{1\rho} \frac{\epsilon}{k} G - c_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

여기서,

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \exp\left[\frac{-3.4}{(1+k^2/\epsilon\nu)^2}\right]$$

$$H_\phi = \begin{cases} 1 & \text{if } \phi > 0 \\ 0 & \text{if } \phi \leq 0 \end{cases}$$

$$\kappa = \nabla \cdot \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|}$$

$$\rho = \rho_g(1 - F_\phi) + \rho_l F_\phi$$

$$\mu^{-1} = \mu_g^{-1}(1 - F_\phi) + \mu_l^{-1} F_\phi$$

위의 식에서  $\alpha_\phi$ 는 액상-기상을 구분하는 불연속적인 계단 함수이며, 상경계면의 곡률( $\kappa$ )은 거리 함수로 정의된 연속적인 LS함수로부터 계산된다. 또한 밀도 및 점도의 계산에 사용된  $F_\phi$ 는 효과적인 물성치 계산을 위하여 다음과 같이 도입하였다.

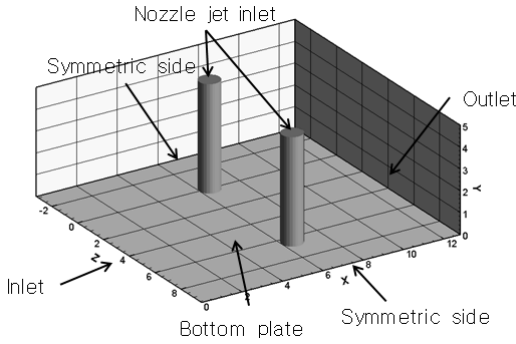


Fig. 4 Computation domain

$$\begin{aligned}
 F &= 1 && \text{if } H_\phi(\phi_A) = H_\phi(\phi_B) = 1 \\
 &= 0 && \text{if } H_\phi(\phi_A) = H_\phi(\phi_B) = 0 \\
 &= \frac{\max(\phi_A, \phi_B)}{\max(\phi_A, \phi_B) - \min(\phi_A, \phi_B)} && \text{otherwise}
 \end{aligned}$$

$$G = \nu_t [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] \cdot (\nabla \mathbf{u})$$

여기서 하점자 A, B는 F의 계산 지점에 근접한 두 격자점  
을 나타낸다.

상경계면( $\phi=0$ )은 식 (4)에 의해 결정되지만  $\alpha_\phi$ 와  $\kappa$ 를  
정확하게 계산하기 위해서는 LS 함수를 거리함수( $|\nabla\phi|=1$ )  
가 되도록 식 (7)를 사용하여 보정하는 것이 바람직하다[7].

$$\frac{\partial\phi}{\partial\tau} = S(1 - |\nabla\phi|) \tag{7}$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{\phi_0}{\sqrt{\phi_0 + h^2}} && \text{if } |\phi_0| > h/2 \\
 &= 0 && \text{otherwise}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

$\phi_0$ 은 식 (4)의 해이며  $\tau$ 는 식 (7)의 우변이 상경계면 주위  
에서 0이 될 때까지 계산하는 반복단계를 의미한다

Fig. 1은 위와 같은 방법으로 격자의 2-D resolution test 결  
과이다. 본 연구는 z축 방향으로 비균일 격자를 x, y축은 균  
일한 격자를 사용하였고, 수치해석에 사용된 Reference grid는  
2배 더 조밀한 Fine grid와 거의 유사한 결과를 나타낸다

Fig. 2-3은 Standard  $k-\epsilon$  모델, 낮은 Reynolds 수영역에서  
의 영향을 고려한 난류 모델 그리고 nonequilibrium  $k-\epsilon$  모  
델의 계산 결과를 Stevens와 Webb[1]의 실험과 Stevens [9]의

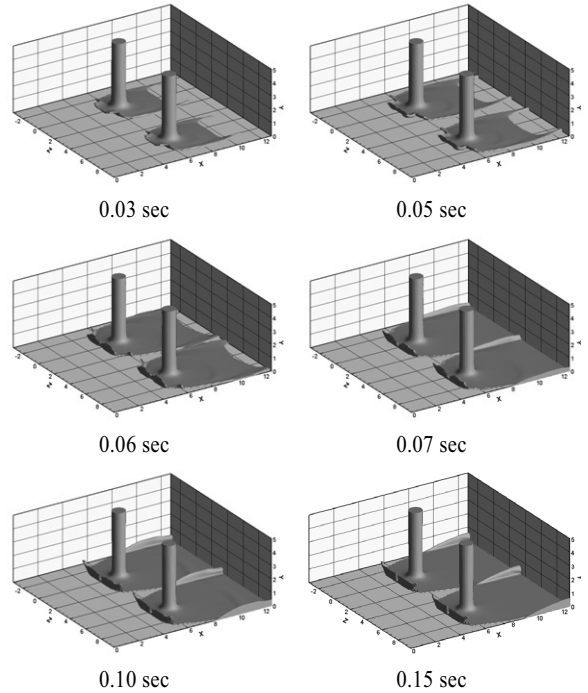


Fig. 5 Evolution of flow interface for  $V_{\bar{r}}=4m/s$ ,  $V_j=1m/s$

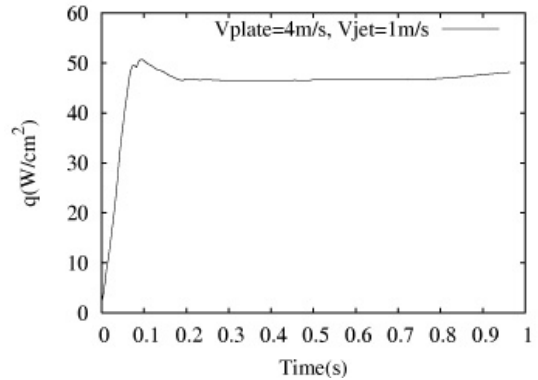


Fig. 6 Wall heat flux averaged over the heating surface with  
 $T=90^\circ\text{C}$

실험결과와 비교한 것이다. Fig. 2(a)는  $d=4.06mm$ ,  $Re=10,600$   
( $V_j=2.61m/s$ ),  $h=2.1mm$ 의 조건으로 기체-유체의 상경계면  
을 나타낸 것이고, (b)는 평판의 Nusslets number를 비교한 것  
이다. Fig. 3(a)는  $d=2.1mm$ ,  $Re=15,800$  ( $V_j=7.52m/s$ ),  $h=2.1$   
 $mm$ 일때 기체-유체의 상경계면을 비교한 것이고 Fig. 2(b)는  
평판의 Nusslets number를 나타낸 것이다. 3가지 난류 모델 중  
에서 nonequilibrium  $k-\epsilon$  모델의 상경계면과 Nusselt number의

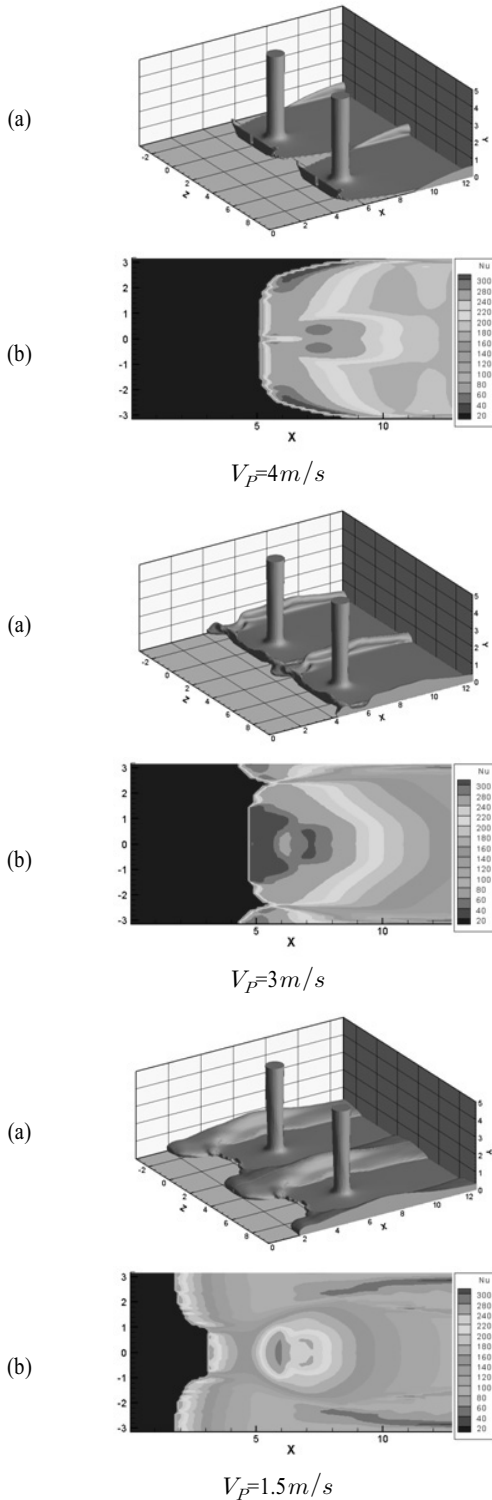


Fig. 7 Effect of plate velocity on the flow interface

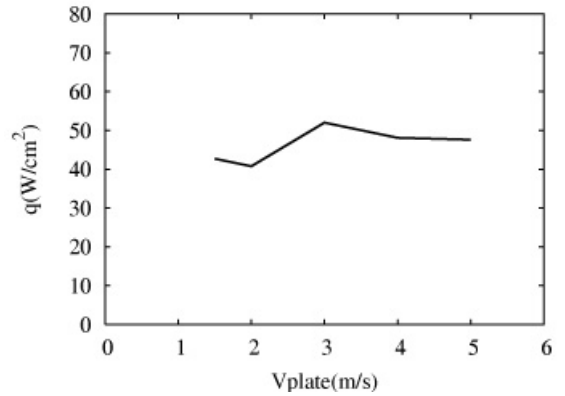


Fig. 8 Effect of plate velocity on wall heat flux with  $T = 90^{\circ}\text{C}$

결과가 실험결과와 비슷함을 볼 수 있고, Nonequilibrium  $k-\epsilon$  모델에서  $k$ 와  $\epsilon$ 의 값은 식 (5)와 (6)의 해이다

### 3. 계산결과 및 검토

본 연구에서 충돌제트 현상을 해석하기 위해 사용된 유체는 물과 공기로 각각의 물성치는 다음과 같다

$$\rho_l = 1000\text{kg/m}^3, \mu_l = 1.00 \times 10^{-2}\text{Pa} \cdot \text{s}$$

$$\rho_g = 1.2\text{kg/m}^3, \mu_g = 1.78 \times 10^{-5}\text{Pa} \cdot \text{s}$$

여기서 하첨자 l은 액체를 g는 기체를 나타낸다

본 연구의 모든 경우는 평판에서 노즐의 높이  $50\text{mm}$ , 노즐의 직경은  $10\text{mm}$ 로 고정하고  $90^{\circ}\text{C}$ 인 바닥 평판의 이동 속도와 충돌제트 노즐의 수분류 분사속도를 변화시키면서 충돌제트의 수분류의 유동과 냉각 특성을 해석하였다

Fig. 4은 수치연구에 사용된 충돌제트의 기본적인 계산 영역으로 입구에서 출구까지  $128\text{mm}$ , 노즐간의 간격이  $64\text{mm}$ 이다.

Fig. 5는  $V_p=4\text{m/s}$ ,  $V_f=1\text{m/s}$  일 경우에 자유표면의 시간에 따른 변화이다. 수치해석 결과로 0.15초 정도에 평형 상태에 도달하게 되고, Fig. 6은 위의 경우에 대한 시간에 따른 전체 가열 면적의  $1\text{cm}^2$ 당 평균 열전달량의 변화이다 0.1-0.2 초 사이에 평형 상태에 도달함을 볼 수 있다

본 연구는 자유 표면을 포함한 충돌제트의 열전달량에 영향을 주는 다양한 인자 중에 바닥 평판의 이동 속도 노즐의 수분류 분사 속도와 노즐간의 간격을 고려하여 열전달 특성을 규명하고 결과를 예측했다

Fig. 7은  $90^{\circ}\text{C}$ 로 가열된 바닥 평판의 이동 속도 따라  $1\text{cm}$

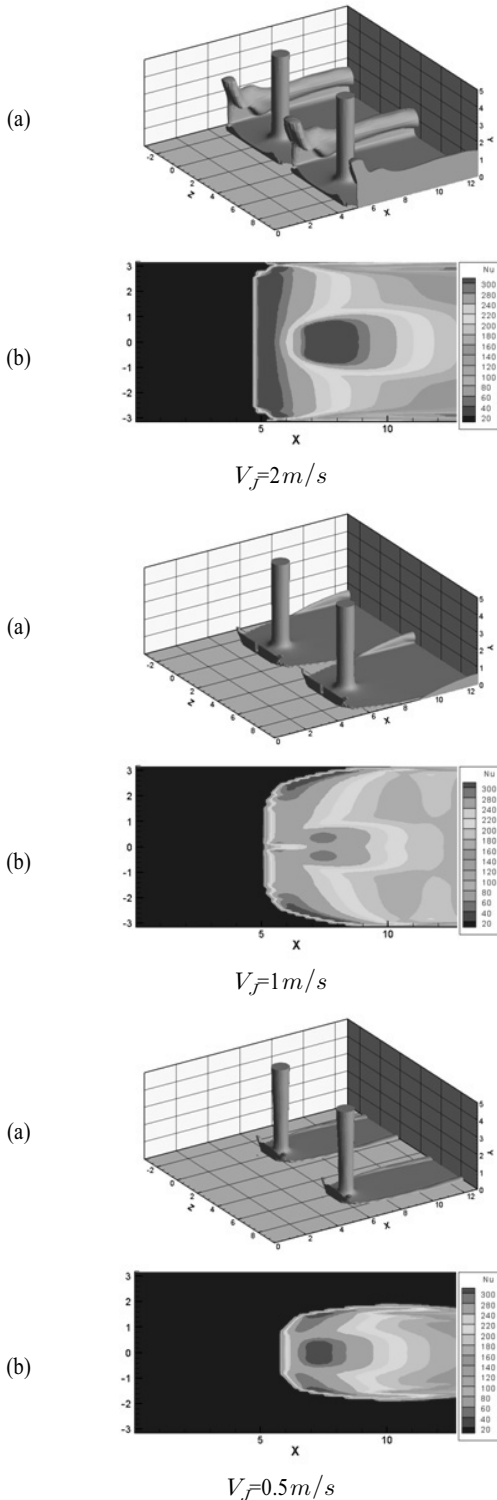


Fig. 9 Effect of jet velocity on the flow interface

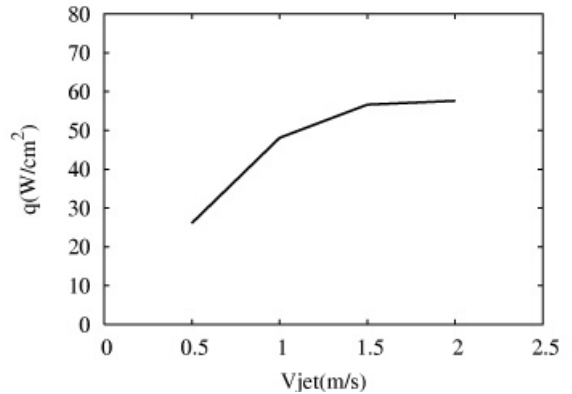


Fig. 10 Effect of jet velocity on wall heat flux with  $T = 90^\circ\text{C}$

직경의 노즐에서 1m/s로 일정하게 수분류를 분사 했을 경우, 유동 특성과 평형 상태에 도달했을 때에 바닥면에서의 Nusselt number를 나열한 것이다. 위부터 차례대로 4m/s, 3 m/s, 2m/s의 속도를 나타낸 것으로 노즐에서 분사된 물이 정체되어 쌓이는 부분에서 열전달이 원활하게 이루어 지지 않는 것을 볼 수 있고, 분사 기둥을 기준으로 입구 방향과 출구방향으로 열전달이 활발하게 이루어지게 되는데 이는 분사 속도를 포함한 운동 에너지가 유체를 빠르고 얇게 밀어주기 때문이다. Fig. 8은 평균 속도에 따른 평균 열전달량이다 속도가 3m/s일 때  $52q/cm^2$ 로 가장 큰 열전달량을 보이지만 모든 경우와 비교 했을 때 열전달량의 가감은 크지 않다

Fig. 9는 평판의 이동 속도를 4m/s로 일정하게 가정하고 노즐의 수분류 분사 속도를 변화 시킨 경우이다 위에서부터 차례로 2m/s, 1m/s, 0.5m/s의 조건으로 분사하였다. 모든 경우 Re는 5,000 ~ 20,000로 난류 영역에 포함되며, 위에서 언급한 nonequilibrium  $k-\epsilon$  모델링을 해석 모델에 추가 시켜서 해석 하였다. 비교 대상 중에 유량이 가장 많은 2m/s의 분사속도를 가지는 경우는 다른 경우와 비교하여 평판의 가장 넓은 부분을 덮고 있고, 분사 기둥을 기준으로 입구 방향과 출구 방향에 넓은 부분에서 열전달이 활발하게 일어남을 볼 수 있다. 유량이 많기 때문에 노즐 사이에 수력 도약의 상호 간섭의 증가에 의해 수분류의 정체와 쌓임이 과도하게 발생하게 되지만, 그밖에 부분에서 많은 유량에서 나오는 빠른 유속에 의해 수분류의 이동이 많아져서 열전달의 향상이 크게 되게 된다. 하지만 유량이 더 늘어날 경우 열전달 향상에 미치는 영향이 줄어들고 오히려 열전달이 감소하는 경향을 보이는 경우도 생기게 된다. 분사 속도가 0.5m/s로 느려질 경우 가열 평면을 덮을 만큼 충분한 양의 유량이 공급되지 않기 때문에 냉각에 효과적이지 않다 Fig. 10은 노즐에서 분사되는 물의 속도가 열전달에 미치는 영향을 나타낸 것이다

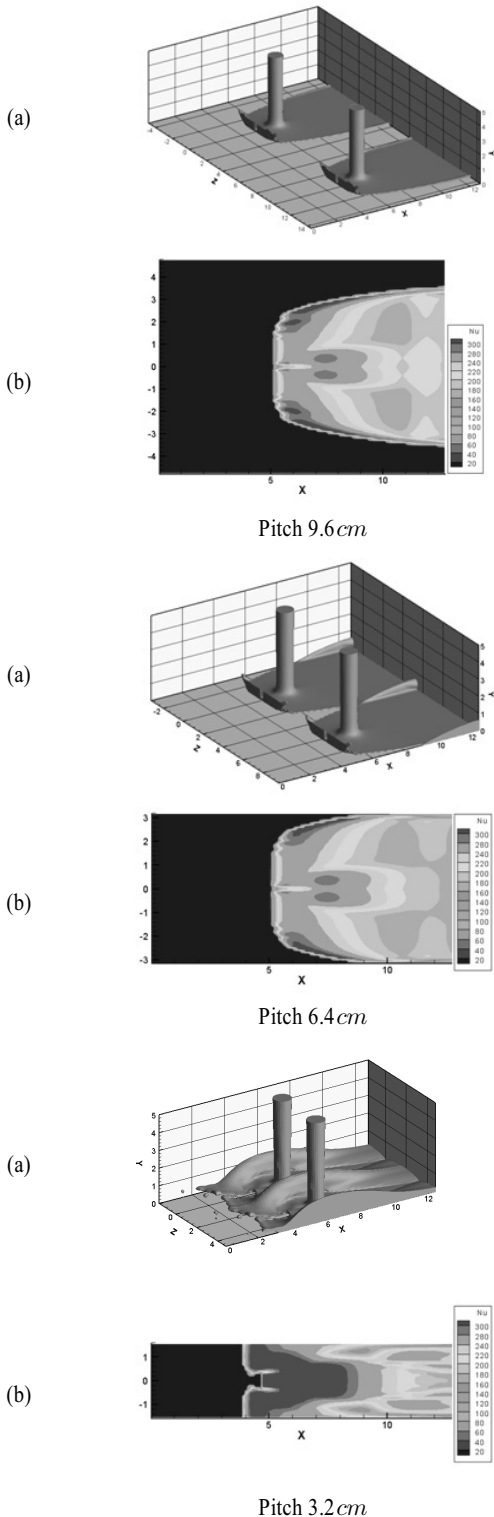


Fig. 11 Effect of jet pitch on the flow interface

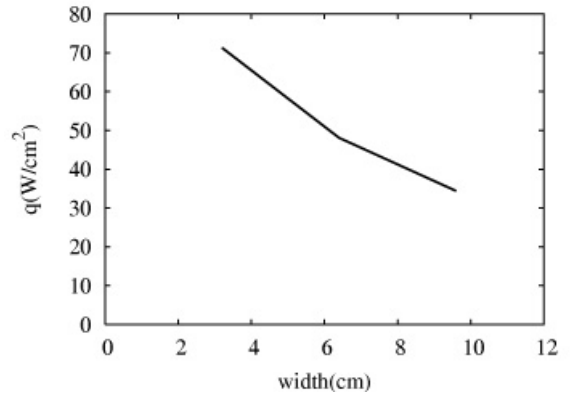


Fig. 12 Effect of jet pitch on wall heat flux with  $T=90^{\circ}\text{C}$

0.5m/s 일 경우  $26q/cm^2$ , 1.0m/s 일 경우  $48q/cm^2$ , 1.5 m/s 일 경우  $57q/cm^2$ , 2.0m/s 일 경우  $58q/cm^2$ 로 분사 유속의 증가가 열전달량의 향상을 크게 만들어서 냉각 효과에 직접적인 영향을 주는 것을 알 수 있다 하지만 일정 속도 이상으로 갈 경우 그 증가치가 크지 않음을 볼 수 있다

Fig. 11은 평판의 이동 속도와 수분류 분사 속도를 동일한 조건으로 주고, 노즐 간격은 위부터 차례로 9.6cm, 6.4cm, 3.2cm의 경우로 해석을 하였다 9.6cm의 경우는 노즐간의 간격을 분사된 수분류가 충분히 덮지를 못하여 적절한 냉각 효과를 볼 수 없다. 반대로 위의 경우 중에 노즐간의 간격이 3.2cm로 가장 좁은 경우는 계산 영역에 상당 부분을 충분히 덮고, 분사 기둥에서 입구 부분 상당 범위에서 열전달이 활발하게 일어나는 것을 볼 수 있어 냉각 효과가 비교적 좋다 Fig. 12는 노즐 간격이 열전달에 미치는 영향을 나타낸 것으로, 3.2cm일 경우  $71q/cm^2$ , 6.4cm일 경우  $48q/cm^2$ , 9.6cm일 경우  $34q/cm^2$ 로 노즐이 촘촘히 배치되어 간격이 줄어들수록 냉각 효과가 탁월해 진다는 것을 알 수 있다

#### 4. 결 론

본 연구는 Level Set(LS) 방법을 이용하여 액체기체 상경 계면과 자유표면을 해석하고 평판의 이동 속도 노즐의 수분류 분사 속도, 노즐간의 간격이 유동 특성 및 열전달에 미치는 영향을 다중 노즐에 관련하여 난류 영향을 포함하여 해석 하였다. 계산 결과로부터 평판 이동 속도의 변화에 따른 열전달량 증가효과는 작은 것을 알 수 있었고, 노즐의 수분류 분사 속도와 노즐간의 간격의 변화는 고온 평판에 대한 열전달 향상 시켜 냉각에 효과를 거둘 수 있음을 알 수 있었다 본 연구는 다중 노즐을 사용하여, 노즐간의 상호 작용을 고려하였으나 평판의 온도를  $90^{\circ}\text{C}$ 로 고정하여 수분류의 비등 효과



는 고려하지 못하였다. 향후 수분류의 상변화를 포함한 비등 효과까지 고려하는 연구까지 포함시키고 다중 노즐의 간격 평편의 이동 속도, 노즐의 수분류 분사속도 및 수분류의 비등 효과가 자유 표면을 포함한 충돌제트의 유동 및 열전달에 미치는 영향에 대해서 규명할 예정이다

### 참고문헌

- [1] 1992, Stevens, J. and Webb, B.W., "Measurements of the Free Surface Flow Structure under an Impinging, Free Liquid Jet," *J. Heat Transfer*, Vol.114, pp.79-4.
- [2] 1993, Stevens, J. and Webb, B.W., "Measurements of Flow Structure in the Radial Layer of Impinging Free-Surface Liquid Jet," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.36, No.15, pp.3751-758.
- [3] 1999, Fujimoto, H., Hatta, N. and Viskanta, R., "Numerical Simulation of Convective Heat Transfer to a Radial Free Surface Jet Impinging on a Hot Solid," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.35, pp.266-72.
- [4] 2003, Chattopadhyay, H. and Saha, S.K., "Turbulent flow and heat transfer from a slot jet impinging on a moving plate," *Int. j. Heat and Fluid Flow*, No.24, 685-697.
- [5] 2006, Gradeck, M., Kouachi, A., Dani, A., Arnoult, D. and Borean, J., "Experimental and Numerical Study of the Hydraulic Jump of an Impinging Jet on a Moving Surface," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.30, pp.193-201.
- [6] 2007, Son, G. and Dhir, V.K., "A Level Set Method for Analysis of Film Boiling on an Immersed Solid Surface," *Numer. Heat Transfer B*, Vol.52, pp.153-177.
- [7] 1994, Sussman, M., Smereka, P. and Osher, S., "A Level Set Approach for Computing Solution to Incompressible Two-Phase Flow," *J. Comput. Phys.*, Vol.114, pp.146-159.
- [8] 1988, Stevens, J., "Measurements of Local Heat Transfer Coefficients: Results for an Axisymmetric, Single-Phase Water Jet Impinging Normally on a Flat Plate with Uniform Heat Flux," *Master's Thesis*, Brigham Young University, Provo, UT.