



## 슬릿젯의 유동 및 냉각 성능에 대한 수치적 연구

손상일,<sup>1</sup> 손기현,<sup>\*2</sup> 이필종,<sup>3</sup> 시성규<sup>3</sup>

## NUMERICAL ANALYSIS OF FLOW AND COOLING CHARACTERISTICS OF SLIT JETS IMPINGEMENT

S. Son,<sup>1</sup> G. Son,<sup>\*2</sup> P. Lee<sup>3</sup> and S. See<sup>3</sup>

*Free surface liquid jet impingement, which is applicable to cooling of hot plates in a steel-making process, is investigated numerically by solving the conservation equations of mass, momentum and energy in the liquid and gas phases. The free-surface or liquid-gas interface is tracked by an improved level-set method incorporating a sharp-interface technique for accurate imposition of stress and heat flux conditions on the liquid-gas interface. The level-set approach is combined with a non-equilibrium  $k-\epsilon$  turbulence model. The computations are made for slit nozzle jets to investigate their flow and cooling characteristics. Also, the effects of jetting angle, velocity and moving velocity of plate on the interfacial motion and the associated flow and temperature fields are quantified.*

**Key Words :** 충돌 수분류(Impinging Jet), 슬릿젯(Slit Jet), 레벨셋 방법(Level Set Method)

## 1. 서 론

충돌제트(Impinging Jet)는 높은 열전달 효과를 필요로 하는 가스 터빈 냉각, 고발열 전자장비 냉각 등의 다양한 산업분야에 이용되고 있다. 특히 철강산업에서 충돌 수분류(Free Surface Liquid Jet)를 사용한 고온강판의 냉각은 철강 물성을 좌우하는 가장 중요한 공정에 해당한다. 충돌 수분류의 유동 및 냉각 특성은 수분류의 온도, 분사 속도, 평판 이동 속도, 노즐 형상 및 크기, 강판 온도 등의 여러 변수에 의해 결정되는데, 액체-기체 상경계면을 포함하는 복잡한 유동 및 열전달 특성으로 인하여 충돌 수분류에 대한 연구는 주로 실험적으로 수행되어 왔다. 최근 이러한 충돌 수분류의 이상 유동을 해석하고 열전달 효과를 수치 해석적으로 예측하려는 다양한 연구가 진행되고 있다. 하지만 충돌 수분류의 난류 유동 해석 및 냉각 성능을 결정하는 여러 요인들에 대한 부분적인 연구에 그치고 있어 보다 포괄적인 연구가 필요한 실정이다.

본 연구는 액체-기체 상경계면에서의 속도, 응력, 온도조건

을 명확하게 구현할 수 있는 Sharp-interface 기법을 적용한 Level Set(LS) 방법을 이용하여, 충돌 수분류의 자유표면 유동 해석 및 고온강판의 냉각성능을 예측하는 포괄적인 수치해석 기법에 대한 연구를 수행하였다. 또한 Shyy 등[1]에 의해 고안된 Non-equilibrium  $k-\epsilon$  난류 모델을 LS 방법에 적용하여 충돌 수분류의 난류 유동을 해석하고, 슬릿 노즐에서의 분사 각도, 속도 및 평판 이동 속도의 변화가 충돌 수분류의 유동 및 냉각성능에 미치는 영향에 대하여 규명하고자 한다.

## 2. 수치해석방법

본 연구는 Son과 Dhir[2]의 sharp-interface 구현을 위한 LS 방법을 기반으로 하였다. 액체-기체의 상경계면은 액상에서 양의 값, 기상에서 음의 값을 가지는 거리함수로 정의된 LS 함수  $\phi$ 에 의해 계산된다. 액상, 기상 영역 모두에 적용될 수 있는 질량, 운동량, 에너지, 난류에너지  $k$ , 난류소산율  $\epsilon$ 의 보존을 지배하는 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

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

1 서강대학교 대학원 기계공학과

2 정회원, 서강대학교 기계공학과

3 POSCO 기술연구원

\* TEL : 02) 701-8641

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

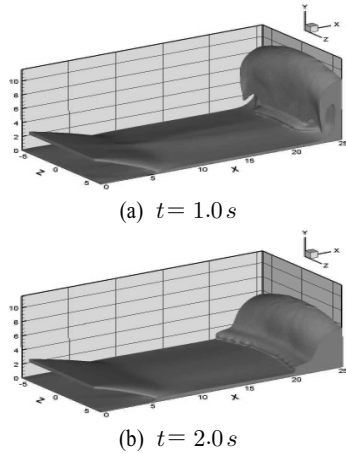


Fig.1 Evolution of the Liquid-Gas Interface for a Slit Single Nozzle of Liquid Jets Impinging on a Stationary Plate under the Condition of  $V_j = 4m/s$ .

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot (\lambda + \rho c_p \frac{\nu_t}{Pr_T}) \nabla T \quad (3)$$

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \nabla \cdot (\mu + \rho \frac{\nu_t}{Pr_k}) \nabla k + \rho G - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \nabla \cdot (\mu + \rho \frac{\nu_t}{Pr_\epsilon}) \nabla \epsilon + c_1 \rho \frac{\epsilon}{k} G - c_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

여기서,

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

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

$$c_1 = 1.15 + 0.25 \frac{G}{\epsilon}; \quad c_2 = 1.45 + 0.45 \frac{G}{\epsilon}$$

$$c_\mu = 0.09; \quad Pr_T = 0.9; \quad Pr_k = 0.89; \quad Pr_\epsilon = 1.15$$

위의 식에서  $\alpha$ 는 액상-기상을 구분하는 불연속적인 계단 함수이며, 상경계면의 곡률( $\kappa$ )은 거리 함수로 정의된 연속적인 LS 함수로부터 계산된다.

상경계면( $\phi = 0$ )을 결정하는 LS 함수의 이류방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla \phi \quad (6)$$

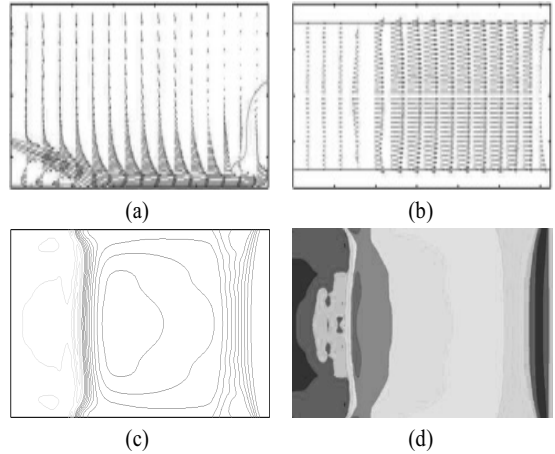


Fig.2 Characteristics of the Slit Jets at  $t = 2.0s$ : (a) Velocity Field at  $z = 0$ , (b) Velocity Field at  $y = 0$ , (c) Shear Stress Field at  $y = 0$  and (d) Wall Heat Flux Field at  $y = 0$ .

위의 식의 해는 상경계면으로부터 거리함수( $|\nabla \phi| = 1$ )로 유지되지 못하기 때문에 아래의 식을 통하여 보정하는 것이 필요하다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \frac{\phi}{\sqrt{\phi^2 + h^2}} (1 - |\nabla \phi|) \quad \text{if } \phi > h/2 \quad (7)$$

여기서  $h$ 는 격자 간격을 나타내고,  $\tau$ 는 식 (6)의 우변이 상경계면 주위에서 0이 될 때까지 계산하는 반복단계를 의미한다.

### 3. 계산결과 및 검토

평판에서 30mm 높이에 위치한 노즐 갭 5mm, 길이 50mm의 단일 노즐에서 평판과 15°의 각도로 30°C의 수분류가 분사되어 90°C의 강판을 냉각시키는 상황을 수치해석기법을 통하여 모사하였다. 이후 수분류의 분사 각도, 속도 및 평판의 이동 속도의 변화에 따른 슬릿젯의 유동 특성과 냉각 성능을 예측하였다.

Fig. 1은 정지된 평판에서 4m/s의 속도로 분사되는 수분류의 시간에 따른 자유표면 형상이다. 슬릿 노즐로부터 분사된 수분류가 강판과 충돌하여 수막을 형성하고 수직벽을 따라 물기둥이 형성된다. 물기둥의 높이는 수분류의 운동량과 중력의 균형에 의해 결정되게 되고, 일정 시간 후에 일정한 자유표면을 유지하게 된다.

수분류 단면의 속도장과 바닥면의 전단응력 및 열유속 분



포를 Fig. 2에 나타내었다. 수분류가 강관에 충돌하는 지점 부근에서 전단응력과 열유속이 가장 크고, 차츰 열전달이 감소되어 정체된 물기둥 부분에서 열전달이 최소가 된다. 수분류의 분사 속도가 커질수록 유량과 모멘텀이 증가하여 열전달이 증대되고, 평판 이동 속도가 증가할수록 모멘텀이 추가되어 열전달을 향상시키는 것으로 나타났다. 또한 평판과의 분사 각도가 커짐에 따라 평판 진행 방향 모멘텀이 감소하여 평균 열전달은 감소하는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 LS 방법을 이용하여 슬릿 수분류의 액체-기체 상경계면과 자유표면을 추적하고, 수분류의 분사 각도, 속도 및 평판 이동 속도 등의 변화에 따른 유동 특성과 열전달에 미치는 영향을 난류 모델을 포함하여 해석하였다. 수분류의 분사 속도와 평판 이동 속도가 커질수록 모멘텀 증가에 의한 열전달은 증대되는 경향을 나타내었다. 특히 수분류가 강관에 충돌하는 지점 부근에서 열유속이 최대로 나타나고 물이 정

체된 지점에서 열유속은 낮게 측정되었다. 수분류의 분사 각도를 변화시킨 경우, 각도가 커질수록 평판 진행 방향 모멘텀이 작아져 열전달을 저해하는 것으로 나타났다. 향후 수분류의 상변화를 고려한 비등현상의 해석을 포함하여 고온 강관의 수냉각 시 충돌 수분류의 유동 및 냉각 성능을 규명할 예정이다.

#### 후 기

본 연구는 POSCO 기술연구원의 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- [1] 1997, Shyy, W. et al., *Computational Techniques for Complex Transport*, Cambridge, New York.
- [2] 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.