

## 선상 가열을 위한 가스 토치와 강판 사이의 열유동 해석

우종훈\*, 신종계\*\*

Analysis of the thermal fluid flow between the gas torch and the steel plate for the application of the line heating

Woo, Jong Hun\* and Shin, Jong Gye\*\*

### 요 약

선상가열은 고온의 열원을 강판에 가하여 잔류변형을 얻음으로써 곡면을 성형하는 과정이다. 잔류 변형 제어를 위해서 열원과 강판 사이의 열전달 현상 및 강판의 온도 분포에 대한 이해가 필요하다. 본 연구는 가스 토치로부터 분출된 연소 불꽃에 의한 가스가 강판을 가열하는 선상 가열 과정을 고온, 고속의 충돌 분출류와 그에 의한 열 대류 전달 현상으로 간략화 하여 강판의 온도 분포에 대한 해석을 시도하였다.

해석을 위하여 토오치에서의 연소 현상을 고온, 고속의 충돌 분출 현상으로 간략화 시키고 난류 열 유동 해석을 수행하였다. 난류 열 유동 해석을 통하여 토오치와 강판 사이의 온도장 분포를 계산하였고 충돌 분출류에 관한 근사 누설트 실험식을 이용하여 분출류와 강판 사이의 열 대류 계수를 계산하였다. 온도 분포와 열 대류 계수를 통해서 강판에 유입되는 열 유속을 계산할 수 있었고 열 유속을 표면력으로 하는 열 전도 전달 해석을 통해 강판 내의 온도장 분포를 구할 수 있었다. 난류 열 유동 해석 및 전도 열 전달 해석을 위하여 유한 요소법을 이용하였으며, 유한 요소 해석 결과를 실험 결과와 비교함으로써 본 연구에서 수행한 해석 과정의 타당성에 대한 검증을 수행하였다.

※Keywords: 선상 가열(Line Heating), 토치(Torch), 강판(Steel plate), 난류 모델(Turbulence model), 열 대류 열전달(Convective heat transfer), 전도 열전달(Conductive heat transfer), 유한요소법(Finite element method)

### Abstract

Line heating is a forming process which makes the curved surface with the residual strain created by applying heat source of high temperature to steel plate. In order to control the residual strain, it is necessary to understand not only conductive heat transfer between heat source and steel plate, but also temperature distribution of steel plate. In this paper we attempted to analyze a temperature distribution of steel plate by simplifying a line

---

접수일자 : 2001년 10월 24일, 승인일자 2001년 12월 6일

\*학생회원, 서울대학교 조선해양공학과 석사과정(E-mail whdgnssl@dreamx.net)

\*\*정회원, 서울대학교 조선해양공학과 부교수(E-mail jgshin@snu.ac.kr)

heating process to collision-effusive flux of high temperature and high velocity, and conductive heat transfer phenomenon. To analyze this, combustion in the torch is simplified to collision effusive phenomenon before analyzing turbulent heat flux. The distribution of temperature field between the torch and steel plate is computed through turbulent heat flux analysis, and the convective heat transfer coefficient between effusive flux and steel plate is calculated using approximate empirical Nusselt formula. The velocity of heat flux into steel plate is computed using the temperature distribution and convective heat transfer coefficient, and temperature field in the steel plate is obtained through conductive heat transfer analysis in which the traction is induced by velocity of heat flux. In this study, Finite Element Method is used to accomplish turbulent heat flux analysis and conductive heat transfer analysis. FEA results are compared with empirical data to verify results.

## 1. 서론

선상 가열법은 고온의 열을 강판에 가함으로써 이중 곡을 가지는 선체 외관을 가공하는데 널리 쓰이고 있는 가공법이다. 가열된 강판은 온도 분포가 강판의 깊이 방향으로 불균일하게 형성되기 때문에 잔류 수축과 잔류 굽힘 과정을 통해 원하는 형상으로 변형하게 된다.

선상 가열에 대해서는 변형 역학과 가열조건-잔류변형 관계 규명에 대해서 연구되어 왔다. 변형 메커니즘은 유한 요소법에 기반한 열탄소성 해석을 통해서 고찰되어 왔다. (Lee 2000). 강판에 가해지는 가열 토오치의 열 에너지는 연소 가스와 강판 사이의 대류 열 전달로써 모델링 되었다. 실제로 시간에 따라 유동적으로 변하는 연소 현상을 고려한 열 전달에 대한 해석은 현실적으로 불가능하기 때문에 기존의 연구에서 대류 열 전달은 일정한 열 유속의 유입으로 가정되어 왔다.

Lee(1999) 등은 대류 열 전달을 가우스 분포를 가지는 열 유속으로 가정했다.

가우스 분포를 가지는 열 유속은 시간의 변화에 따라 일정한 열 전달율을 가진다. 하지만 대류 열 전달에 의한 열 유속은 가열이 진행함에 따라 강판에서 상승하는 온도 분포에 따라 감소하게 된다. 따라서 가우스 분포를 가지는 열 유속은 열 유속의 변화를 고려하지 못한다. 또한 가우스 분포에 의한 열 유속은 유효 열량과 집중계수만으로 모델링 되었기 때문에 노출의 반경, 토오치와 강판 사이의 유극, 가스의 압력과 같은 특성을 고

려하지 못한다.

따라서 토오치의 특성과 시간에 따르는 열속의 변화를 반영하기 위해서 총돌 분출류에 의한 열 유속 모델링이 제안되었다 (Tomita 1998). 저속 저온의 비압축성 유체에 대한 총돌 분출류에 대한 열 전달 해석은 1970년대부터 연구되어 왔다 (Martin 1977). 또한 총돌 분출류의 난류 모델에 대해서도 기존에 많은 연구가 진행되었다 (Behnia 1998) (Lauder 1974). 하지만 대부분의 연구들은 가공재의 냉각을 위해서 총돌 분출류의 냉각 효과를 고려한 열 전달 해석에 집중되어 왔다. 선상 가열이나 용접에서 사용되는 압축성, 고온, 고속의 총돌 분출류의 열 전달 현상에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다.

최근에 Tomita 등(1998)이 선상 가열에서의 열 유속 규명을 위해서 유한 차분법을 이용해서 가열 토오치와 강판 사이의 열 전달 해석을 수행했다. Tomita 등은 연소 가스를 고온 고속의 총돌 분출류로 간략화 하고 난류 열 유동에 대한 계산을 수행하였다. 하지만 대류 열 전달의 열 전달 계수의 산정에 있어서 시행 착오 법에 따른 근사 계수를 사용했고 가열 가스의 온도에 변화에 따른 물성치를 고려하지 않았다. 또한 시간에 따라 변하게 되는 열 유속 효과에 대한 고려도 하지 않았다.

본 연구에서는 가열 토오치로부터 강판으로 유입되는 열 전달 현상 및 열 유속 계산을 위해서 해석 과정을 제안하고자 한다. 선상 가열 과정에서의 열 전달 현상을 비압축성 난류 열 유동 모델로 고려하였다. 연소 가스를 고온 고속의 총돌 분

출류로 간략화 하였고 열 유동 해석에 의한 가스 온도 분포 결과를 이용해서 대류 열 전달 계수를 계산하였다. 그리고 계산된 대류 열 전달 계수를 이용한 열 전도 수치 해석을 이에 상응하는 실험을 통해서 해석 결과의 타당성을 검증하였다.

2. 열 전달 해석의 가정과 프로세스

가스 토오치와 강판 사이의 열 유동을 해석하기 위해서는 토오치에서 발생하는 연소 불꽃과 분사되는 열 유동을 동시에 고려하여야 한다. 이를 동시에 고려해서 해석 하는 것은 연소 반응에서의 복잡한 화학적 거동이 수반된다. 따라서 이를 모두 고려하는 등가모형을 사용하기로 한다. 본 연구에서는 연소 불꽃과 열 유동 현상을 적절한 경계 조건을 가지는 고온 고속의 총돌 분출류로 간략화 하기로 한다. (Tomita 1998)

토오치로 강판을 가열할 때에는 열 유동에서와 강판에서 동시에 열 대류 전달과 열 전도 전달이 발생한다. 그러나 열 대류 전달이 평형에 도달하는 시간이 열 전도 전달이 평형에 도달하는 시간에 비해서 대단히 짧기 때문에 본 연구에서는 열 대류 전달과 열 전도 전달 현상을 분리해서 고려하기로 한다.

본 연구에서의 전체적인 해석 과정은 순차적으로 구성된다. 첫번째 과정은 토오치에서 강판의 상면까지 전달 되는 난류 열 유동에 대한 해석이고 두번째 과정은 강판 상면에서 난류 열 유동에 의해서 형성된 유동장과 강판 사이에 발생하는 열 대류 전달 해석, 그리고 세번째는 열 대류 전달에 의해서 전달된 온도장이 강판을 통해서 전달되는

열 전도 전달에 대한 해석이다.

본 연구에서는 난류 열 유동의 수치 해석을 위해서 ANSYS™/FLOTTRAN 을 사용했고 열 전도 전달의 수치 해석을 위해서 ANSYS™/Mechanical 을 사용했다.

• 난류 열 유동 해석

열 유동의 지배 방정식에는 연속 방정식, 운동량 방정식, 그리고 에너지 방정식이 있다. 본 연구에서 다루는 열 유동은 난류의 특성을 가지기 때문에 속도, 온도, 압력은 시간에 따라 진동하게 된다. 여기에 레이놀즈 평균화를 적용하면 난류 열 유동의 지배 방정식은 아래의 Equation (1)~(3)처럼 정리된다.

또한 레이놀즈 평균화의 과정에서 ‘ Closure problem ’ 이 발생한다. 이를 해결하기 위해 Boussinesq 의 이론을 사용해서 one point closure 난류 모델을 이용했다. 이 이론은 운동량 방정식에서 레이놀즈 응력 (난류 전단 응력)을 난류 점성과 평균 속도장의 그레디언트로 치환하는 방법이다 (Equation (4)). 같은 방법으로 에너지 방정식에서도 레이놀즈 열 유속 벡터를 난류 열 전도율과 평균 온도장의 그레디언트로 치환한다 (Equation (5)).

Continuity equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

Momentum equation

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u_i)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w u_i)}{\partial z} \\ = \rho g_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial u_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_e \frac{\partial u_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_e \frac{\partial u_i}{\partial z} \right) \end{aligned} \tag{2}$$

Energy equation

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u C_p T) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v C_p T) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w C_p T) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_e \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_e \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_e \frac{\partial T}{\partial z} \right) \end{aligned} \tag{3}$$

$$-\rho \overline{u_i u_i'} = \mu_T \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{4}$$

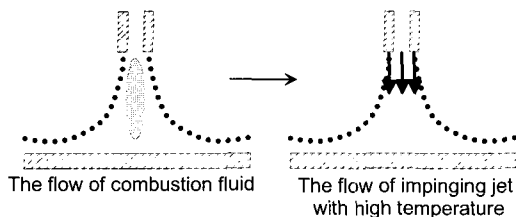


Fig.1 Assumption of the problem domain

$$-\rho C_p \overline{u_j T'} = \frac{K_t}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (5)$$

난류 점성과 난류 열 전도율을 산정하기 위해 서 two-equation 난류 모델을 사용했다. 본 연구 에서는 two-equation 모델 중 일반적으로 널리 쓰이는  $k-\epsilon$  모델을 사용했다.  $k-\epsilon$  방정식과 그 계 수들은 Equation (6),(7)과 Table 1에 보이고 있다.  $k-\epsilon$  모델의 해를 이용해서 난류 점성이 계산되어 지고 이로부터 유효 점성이 Equation (8)과 같이 계산된다. 이렇게 계산된 난류 점성과 가정된 난 류 프란틀 수를 이용해서 Equation (9)처럼 유효 열 전도율을 계산한다. 이렇게 계산된 수치들은 Equation (2)와 Equation (3)에 대입된다.

Table 1  $k-\epsilon$  model constants (Spalding/Louder 1976)

Constant	Value
$C_1, C_{1e}$	1.44
$C_2$	1.92
$C_\mu$	0.09
$\sigma_k$	1.0
$\sigma_\epsilon$	1.3
$\sigma_t$	1.0

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_x \epsilon)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho u_y \epsilon)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho u_z \epsilon)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \quad (6)$$

$$\mu_t \Phi - \rho \epsilon$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_x \epsilon)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho u_y \epsilon)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho u_z \epsilon)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) + \quad (7)$$

$$C_{1e} \mu_t \frac{\epsilon}{k} \Phi - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

$$\mu_e = \mu + \mu_t = \mu + C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (8)$$

$$K_e = K + K_t = K + \frac{\mu_t C_p}{\sigma_t} \quad (9)$$

• 열 대류 해석

대류 열 전달은 난류 열 유동장과 강판 사이에 급격한 온도 차이가 형성되기 때문에 난류 열 유 동과 강판 상면 사이에서 발생한다. 열 대류 전달 과정은  $q'' = h(T_g - T_s)$ 처럼 국부 열 유속 방정 식으로 모델링 된다. 그리고 열 대류 계수  $h$  는 Equation (10)과 같이 정의된다.

$$h = \frac{-k_f [\partial T / \partial y]_{y=0}}{T_f - T_s} \quad (10)$$

Equation (10)에서 온도 기울기를 나타내는  $\partial T / \partial y|_{y=0}$  는 강판 상면에서 온도 기울기가 발생 하는 구간이 너무나 작기 때문에 급격히 변하게 되어 이를 측정하거나 계산하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 열 대류 계수  $h$  의 무차원화 계수인 누셀트 수를 사용하기로 한다. Martin (1977)은 실험을 통해서 총돌 분출류의 여러 가지 경우에 따라서 누셀트 수를 정리했다. 여러 경우 의 누셀트 수 가운데 본 연구에서는 단일 노즐 분 출에 대한 근사 누셀트 수를 사용하기로 한다. 본 연구에서 사용하는 누셀트 수와 그 적용 범위를 Equation (11)과 Equation (12)에 나타내었다. 근 사 누셀트 수를 사용해서 Equation (13)과 같이 열 대류 계수가 계산된다.

$$\frac{Nu}{Pr^{0.42}} = G \left( \frac{r}{D}, \frac{H}{D} \right) \cdot F_1(Re) \quad (11)$$

$$F_1 = 2Re^{1/2} (1 + 0.005Re^{0.55})^{1/2}$$

$$G = \frac{D}{r} \frac{1 - 1.1D/r}{1 + 0.1(H/D - 6)D/r}$$

where;

$$2000 \leq Re \leq 400,000$$

$$2 \leq H/D \leq 12$$

$$2.5 \leq r/D \leq 7.5$$

$$(12)$$

$$h = \frac{Nuk}{D} \quad (13)$$

• 열 전도 해석

열 전도 해석은 난류 열 유동 해석과 열 대류 전달에 대한 해석 결과를 검증하기 위해서 수행되었다. 토오치에서 분사되는 가스가 2000 (K)가 넘는 고온이기 때문에 실제 실험에서는 가열되는 강판의 가열면과 반대인 강판 하면에서 형성되는 온도 분포를 예측한다. 그리고 이 실험과 같은 조건에서의 난류 열 유동과 열 대류 계수 해석을 통해서 계산된 결과를 이용해서 열 전도 전달에 대한 수치 해석을 수행하고 이를 실험 결과와 비교하고자 한다.

3. 유한 요소법을 이용한 열 전달 해석

• 열 유동 해석을 위한 유한 요소 모델

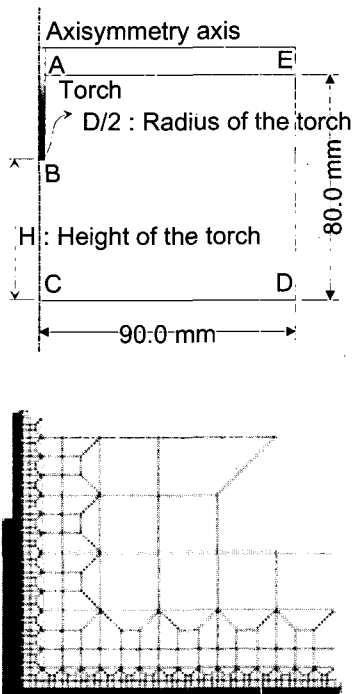


Fig.2 (Top) Problem domain, (Bottom) Element meshing

난류 열 유동 해석을 위한 모델의 영역과 그 유한 요소 모델을 Fig.2에 보이고 있다. 난류 열 유동의 계산 범위가 축대칭 형태이기 때문에 이 모델은 전체 모델의 반폭으로 모델링하고 대칭 효과를 고려한 요소를 사용하였다.

사용된 유한 요소는 이차원 4-절점 요소로서 속도, 온도 그리고 압력의 자유도를 가진다. 계산할 영역의 요소는 토오치 노즐의 지름과 토오치와 강판 사이의 거리를 고려해서 분할했다. 토오치의 노즐 근처와 강판 상면에서는 온도와 속도가 급격하게 변하기 때문에 요소를 작게 나누어 주고 그 외의 영역은 계산시간의 절약을 위해서 전이 요소를 사용해서 크게 나누어 주었다. 계산 영역의 경계 조건은 다음과 같이 표현된다.

$\overline{BC}$  (대칭 축)  $u=0$

$\overline{BA}$  (토오치의 외부 벽)  $u=v=0$

$\overline{CD}$  (강판 상면)  $u=v=0$

$\overline{AE}$  (자유 경계 조건)  $p=0$

(자유 경계 조건)  $p=0$

유체의 초기 온도 조건  $T_i=273(K)$

노즐의 출구에서의 속도에 대한 경계 조건은 Tomita (1998)의 논문에서 사용한 속도 (100 m/s)를 차용했다. 또한 출구에서의 온도 경계 조건은 토오치 가열시 사용하는 연소 가스인 프로판 가스의 연소 에너지를 고려해서 결정했다. 이에 따른 출구에서의 온도 조건은 2000(K)이다 (Siegel/Howell 1992).

실제 토오치에서의 분출되는 연소 가스는 이산화탄소와 수증기의 혼합물이다. 토오치에서 분출되는 가스처럼 2000 (K)라는 고온에 이러한 혼합물에 대한 물성치에 대해서 연구된 바가 없기 때문에 본 연구에서는 이산화탄소와 수증기의 물성치를 고려해서 물성치를 산정했다. 산정된 물성치를 Fig.3에 보이고 있다.

난류 열 유동에 대한 비선형 방정식을 풀기 위한 방법으로 Newton-Raphson 방법을 사용했고

시간 적분에 대해서는 Backward-difference 방법을 사용했다. 유한 요소의 각 자유도에 대한 해석 방법은 Table 2 에 보이고 있고 유한 요소 해석을 위한 시간 간격과 회귀 회수는 Table 3 에 보이고 있다.

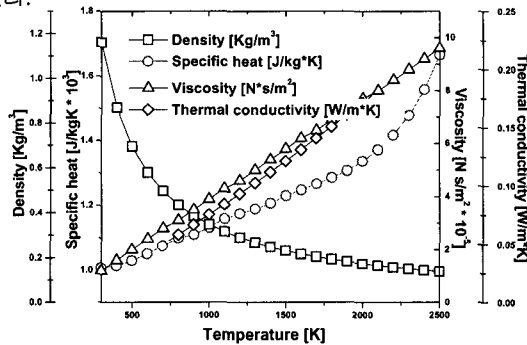


Fig.3 Material properties of combustion fluid

Table 2 Numerical solvers for each DOF

Degree of freedom	Solver
Velocity	TDMA
Temperature	TDMA
Pressure	Conjugate gradient method

Table 3 Transient time step setup

Time	Time step	Global iteration
~0.05	0.001	200
~0.5	0.001	100
~5	0.01	50

• 열 대류 계수의 계산

Fig.4는 난류 열 유동 해석을 통해서 계산된 결과의 온도장 분포와 속도장 분포를 보이고 있다. 열 대류 계수는 이 결과를 이용해서 계산된다. 계산된 열 대류 계수의 분포는 Fig.5(Bottom)에 보이고 있다. 열 대류 계수의 산정을 위해서 Fig.5(Top)에서는 Equation (11)에 보인 근사 누셀트 수를 사용해서 계산 되어진 결과를 보이고 있다. 그런데 Equation (12)에서 언급했듯이 적용 범위가 한정되어 있기 때문에 그 외의 범위에 대해서는 가우스 맞춤을 사용해서 결과를 추정했다.

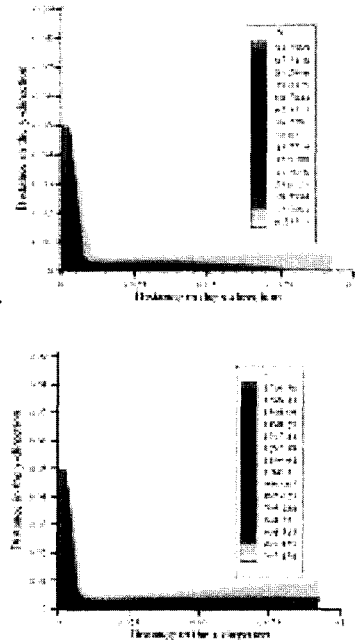


Fig.4 (Top) Velocity field (Bottom) Temperature field at t=1(sec)

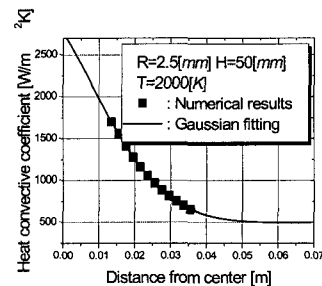
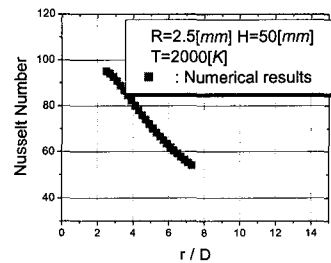


Fig.5 (Top) Nusselt number (Bottom) Heat convective coefficient.

• 열 전도 해석의 유한 요소 모델

토오치로부터 강판에 유입되는 열 유속은 열이 전달되는 대상체(여기서는 강판)의 온도에 종속되기 때문에 열 유속은 강판의 온도 변화에 따라서 변하게 된다. 강판에서의 열 전도 전달을 해석하기 위해서는 이처럼 강판의 온도 변화에 따라 열 유속이 개선 되어야 한다. 열 전도 해석을 위한 해석 과정은 Fig. 6에 보이고 있다.

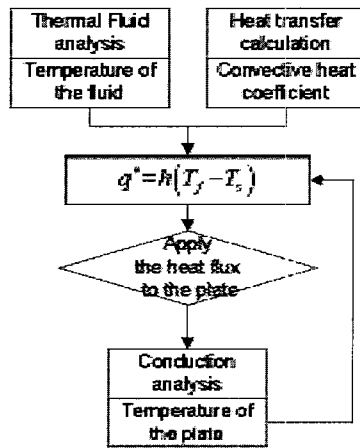


Fig. 6 Procedure of conduction analysis

열 전도 해석을 위한 강판의 모델은 실험과 비교를 위해서 두께를 9(mm)로 하였고 열이 충분히 전달 될 수 있도록 폭은 300 (mm)로 하였다. 또한 난류 열 유동 해석과 마찬가지로 축 대칭 효과를 고려하였다. 유한 요소는 2 차원 사각형 요소를 사용하였고 크기는 가로, 세로 1(mm)로 하였다. 강판은 연강으로 가정하였다.

강판에 가해지는 시간에 변화에 따른 열 유속 열 전도 해석을 위한 강판의 모델은 실험과 비교를 위해서 두께를 9(mm)로 하였고 열이 충분히 전달 될 수 있도록 폭은 300 (mm)로 하였다. 또한 난류 열 유동 해석과 마찬가지로 축 대칭 효과를 고려하였다. 유한 요소는 2 차원 사각형 요소를 사용하였고 크기는 가로, 세로 1(mm)로 하였다. 강판은 연강으로 가정하였다.

강판에 가해지는 시간에 변화에 따른 열 유속

분포와 가우스 열 유속 가정을 사용하였을 경우의 일정한 가우스 열 유속 분포를 Fig. 7에 보이고 있다. 본 연구에서 제안하는 방법에 따른 열 유속은 가열이 진행함에 따라 강판 온도의 상승으로 인해서 점점 감소함을 보이고 있다. 하지만 가우스 분포를 가지는 열 유속 분포는 일정한 값을 유지하는 상수이기 때문에 이러한 현상을 반영하지 못하고 또한 집중 계수를 변화 시키더라도 실제의 열 유속 분포의 형상을 모사할 수 없음을 알 수 있다.

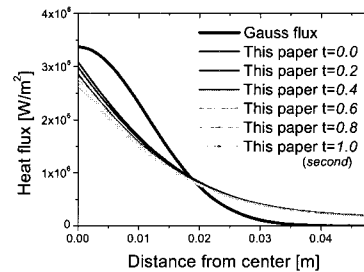


Fig. 7 Comparison between the Gauss heat flux distribution and the history of the heat flux of this paper

Fig.8에서는 열 전도 전달 해석을 통한 강판에서의 온도 분포를 보이고 있다.

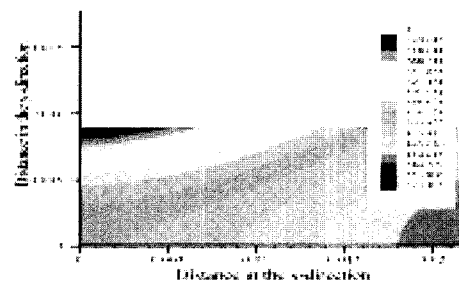


Fig.8 Temperature field of the plate at t=1(sec)

4. 실험을 통한 검증

앞서 보인 수치 해석을 통한 결과를 검증하기 위해서 실험을 수행했다. 실험은 Fig.9 (Top)에 보이는 서울대학교 조선해양공학과에 설치되어 있

는 선상 가열 자동화 장치의 가열부를 이용해서 수행되었다. 그리고 가열된 강판의 온도는 Hewlett-Packard 사의 데이터 수집 장치 (34970A)와 접촉식 온도 센서를 이용해서 계속했다. 접촉식 온도 센서는 강판의 하면에 부착되었다.

열 손실 없이 정확한 온도를 측정하기 위해서 Fig.9 (Mid/Left)에 보이는 것처럼 유리 섬유를 이용해서 단열 효과를 주었다. 접촉식 온도 센서는 Fig.9 (Bottom)에 보이는 것처럼 가열 토오치의 중심부로부터 시작해서 축방향으로 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 30, 36, 42, 48, 58, 68, 78 (mm)

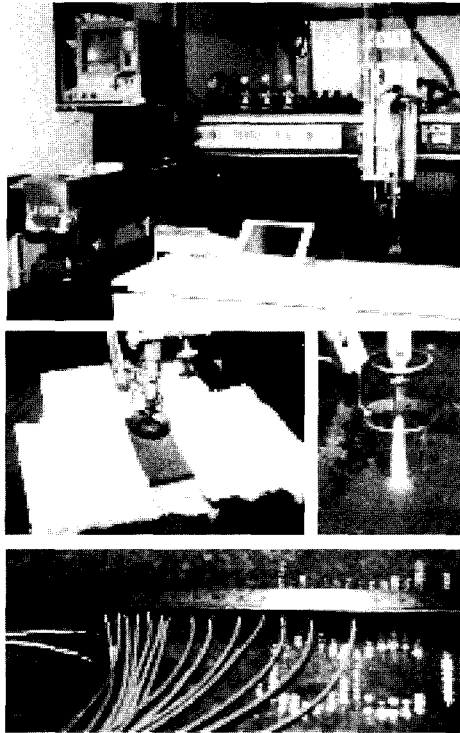


Fig.9 Experimental setup, (Top) Heating and measuring machine, iCALM at Seoul National University (Mid/Left) Insulation setup for preventing heat loss (Mid/Right) Heating from the torch to the steel plate (Bottom) Thermo couple attached to the bottom of the steel plate

의 위치에 부착되었다. 계속 오차를 줄이기 위해서 같은 실험을 3 번 수행한 후 측정값의 평균을 취하여 실험 결과를 정리하였다.

수치 해석 결과의 검증을 위해서 앞서 언급한 사양에 따라 수행한 실험 결과와 비교하였다. 열 유속 분포로 가우스 분포를 사용하였을 때에는 강판 하면에서의 온도 분포가 Fig.10 (Top)에 보이는 것처럼 실험 수치보다 훨씬 크게 나타났다. 이는 가우스 분포의 분포 형상이 실제 난류 열 유동에 의해 형성 되는 열 유속 분포의 형상을 묘사할 수 없는 것과 가열시 시간에 따라 감소하는 열 유속분포의 특성을 반영하지 못하기 때문이다.

Fig.10 (Mid)와 Fig.10 (Bottom)에서는 위치, 시간에 따른 강판 하면에서의 온도 분포를 본 연구에서 제안한 방법에 따른 수치 해석 결과와 실험을 통한 결과를 비교하여 보이고 있다. 수치 해석 결과와 실험 결과가 매우 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 단, 약 5 초가 지난 후의 수치 해석 결과가 실험 결과 보다 커지기 시작하는 것은 실제 실험에 있어 열 손실이 유발되기 때문이다. 하지만 토오치를 이용한 가열 과정에서 같은 위치에 5 초 이상 머무르는 일은 실제 선상 가열 작업에서는 거의 없기 때문에 이러한 오차는 무시할 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 선상 가열에의 적용을 위해서 가스 토오치와 강판 사이의 열전달에 대한 열 전달 현상을 해석 하기 위한 방법을 제시하였다. 가스를 이용한 열원과 강판으로의 열 유입에 대한 특성이 연구되었다. 토오치의 노즐에서의 연소 불꽃 현상은 고온 고속의 충돌 분출류로 간략화 시키고 난류 열 유동 해석을 수행하였다. 난류 열 유동 해석 결과와 근사 누설트 수를 이용해서 온도 의존 물성치를 고려한 열 대류 계수를 산정하였다.

수치 해석 결과의 타당성 검증을 위해서 실험을 수행하였고 매우 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 그리고 이를 통해 본 연구에서 제안한 방법이



기존의 방법보다 타당한 결과를 줄 수 있음을 확인 하였다.

또한 본 연구에서 제안한 방법이 토오치에 의해 강판을 가열하는 선상 가열이나 용접처럼 고온, 고속의 충돌 분출류에 의한 현상으로 대치 할 수 있는 작업의 수치 해석에 있어 널리 적용 될 수 있을 것으로 전망한다.

at fixed time (Bottom) between the results of the experiments and the finite element method results by this paper at fixed location

참 고 문 헌

- Behnia, M., Parneix, S., Durbin, P.A. 1998 Prediction of Heat Transfer in an Axisymmetric Turbulent Jet Impinging on a flat plate," International Journal of Heat & Mass Transfer, V.41 N.12
- Launder, B.E., Spalding, D.B. 1974 " The Numerical Computation of turbulent Flows," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.3, pp269-289
- Martin, H. 1977 " Heat and Mass Transfer between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces," in J.P. Hartnett and T. F. Irvine, Jr., Eds., Advances in heat transfer Vol. 13, Academic Press, N.Y.
- Siegel, R. and Howell, J.R. 1992 " Thermal Radiation Heat Transfer", 3rd edition, Hemisphere Publishing corporation, London
- Tomita, Y., Hasimoto, K., Osawa, N., Fukuda, Y., Kozuki, Y., and Wakita, H. 1995 " Studies on the Expert System of Bending Work Using Line Heating," Journal of Kansai Society of Naval Architects, Japan, No. 224, pp. 121-130
- J.G.,Shin and J.H. Lee, "Non-dimensionalized Relationship Between Heating Conditions and Final Deformation in Line Heating Process," submitted to the Journal of Ship Research, Aug. 2000.

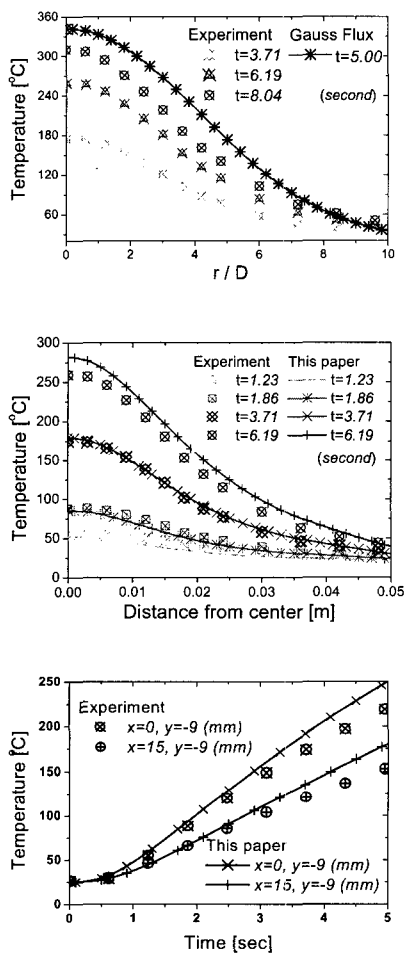


Fig.10 Comparison (Top) between the results of the experiments and the finite element method results by Gaussian heat flux (Mid) between the results of the experiments and the finite element method results by this paper



< 우종훈 >



< 신중계 >