대한기계학회 2000년도 춘계학술대회논문집 B pp. 789~794 KSME 00S285

# $k-\varepsilon-\overline{v'^2}$모델을 이용한 경사진 충돌제트의 유동장 및 열전달 특성에 대한 3차원 수치해석적 연구

최봉준*· 이정희**· 최영기**

# 3-D Numerical Study on a Oblique Jet Impingement for Fluid flows and Heat Transfer Characteristics Using $k-\varepsilon-\overline{v'^2}$Model

Bongjun Choi, Junghee Lee and Youngki Choi

Key Words: Oblique impingement jet(경사진 충돌제트), $k-\varepsilon-\overline{v'^2}$ Model, Near-peak Nusselt number(최대 Nusselt수).

**Abstract**

The paper studies the flow and heat transfer characteristics to a jet impinging at different oblique angles to a plane surface by numerical methods. The flowfield and heat transfer rate associated with the oblique impingement of an axisymmetric jet are of interest as a result of its presence in numerous technological problems. For the computation of heat transfer rate, the standard $k-\varepsilon$ and $k-\varepsilon-\overline{v'^2}$ turbulent model were adapted. The accuracy of the numerical calculations was compared with various experimental data reported in the literature. $k-\varepsilon-\overline{v'^2}$ model showed better agreement with experimental data than standard $k-\varepsilon$ model in prediction of the turbulent intensity and the heat transfer rate. In the case of computation of flowfield, the study carries on the $\alpha$=45 deg, $h/D$=4.95. The jet Reynolds number based on the nozzle diameter($D$), was 48,000. For the computation of heat transfer rate, the $Re$=20,000, the jet orifice-to-plate spacings($L/D$) are 4, 6, and 10, and the angle between the axis of the jet orifice and the plate surface is set at 30, 45, 60, or 90 deg.

For the smaller spacings, the near-peak Nusselt numbers are not significantly effected by the initial decreases in the jet angle. The overall shape of the local Nusselt number x-axis profile is influenced by both the jet orifice-to-plate spacing and the jet angle.

## 1. 서 론

제트충돌 냉각법은 큰 열전달율을 얻을 수 있고 열전달율의 제어나 위치조절이 용이하기 때문에 가스터빈 블레이드나 고집적의 전자부품의 냉각 및 금속면의 열처리, 박막액정표시 장치(TFT-LCD)의 제조 등의 많은 산업분야에 폭 넓게 응용되고 있다. 1960년대부터 많은 실험적, 수치적 연구가 진행되고 있으며 지금까지 충돌 제트 열전달 특성에 대한 연구는 평판에 수직으로 분사되는 슬롯 제트의 2차원 유동에 대한 연구가 주로 이루어졌다. 하지만 실제 충돌제트 냉각법이 응용되고 있는 산업용 가스터빈이나 고집적의 전자부품등의 냉각을 위한 제작상의 난점이나 구조적 문제로 3차원적 해석이 필수적이며 수직으로 분사되는 3차원 유동에 대한 실험적, 수치해석적 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 대한 연구로 Cooper와 Launder등[1]은 축대칭 충돌제트에 대해서 거리비와 레이놀즈수를 변화시켜 유체

* 중앙대학교 대학원
** 중앙대학교 기계공학과

유동장 및 열전달 특성에 대한 전반적인 실험적 연구를 수행하였고 Demuren등[2]은 주유동에 분사되는 제트유동을 3차원 직교좌표계를 이용하여 수치해석 하였다. 그러나 실제 고집적의 전자부품이나 터어빈 블레이드의 냉각에서는 제트노즐이 경사진 경우가 많으며 수직으로 분사되는 경우와는 큰 차이가 있어 이에 대한 연구가 진행되고 있다. Foss[3]가 경사각이 45° 일 때 평판에 분사되는 제트 유동에 대해 정체점에서 반경방향으로의 거리와 폭 방향각의 변화에 따른 유동장과 정체점 근처에서 벽면압력을 측정하였다. Goldstein과 Franchett[4]는 경사진 1개의 분사 홀로부터 분사되는 3차원 원형 제트 유동에 대해 경사각을 30° 에서 90° , 노즐과 표면까지의 거리를 4에서 10까지 변화시키며 열전달 계수를 측정하였다. 경사각이 감소하고 높이비가 낮을수록 최대 Nu값은 감소하는 경향을 보이지만 어느 정도 낮아지면 최대 Nu값에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 수치해석적 연구로 Rubel[5]은 경사각이 60°.에서 90° 로 변화할 때 제트 유동의 특성을 연구하기 위해 경사각의 변화에 따른 정체 압력의 위치, 폭 방향각의 변화와 평판으로부터의 높이에 따른 반경속도와 수직속도분포를 3차원 수치해석 하였다. 대부분의 충돌 제트 냉각에 대한 연구들은 분사노즐이 충돌면과 수직인 경우에 대해 열적특성을 고려한 실험적인 연구와 수치해석적 연구가 진행되어 왔지 제트 분사 출구가 경사진 경우에 대한 유동특성과 함께 열적특성을 고려한 실험적, 수치해석적 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 충돌면과 수직인 축대칭제트의 경우와 더불어 분사 출구가 경사진 경우에 대해 수치해석적 연구를 통해 분사 출구로부터 유체가 벽면에 충돌할 때 발생하는 유동형태와 온도분포등을 분사되는 공기의 유량, 노즐과 충돌면까지의 거리 및 분사노즐의 각도를 변화시키면서 충돌 제트 냉각에 어떠한 영향을 미치는가를 연구하여 최대의 냉각효과를 얻을 수 있는 조건들을 얻어내고자 한다. 초기에는 수치해석을 위해 표준 $k-\varepsilon$ 모델이 가장 많이 이용되었으나 본 연구에서는 좀더 나은 수렴성을 위해 벽 근접 효과(wall proximity effect) 고려한 $k-\varepsilon-\overline{v'^2}$ 모델을 적용하였다.

## 2. 지배방정식 및 수치해석

### 2.1 지배방정식

#### 2.1.1 기본 방정식

비직교 좌표계상에서 cartesian 속도 성분을 사용하여 시간 평균된 비압축성 난류 유동의 지배방정식을 텐서 형식으로 나타내었다.

연속방정식 :

$$\frac{1}{J}\frac{\partial}{\partial x^j}\left[J\alpha^j_m(\rho U_m)\right]=0 \tag{1}$$

운동량방정식:

$$\frac{1}{J}\frac{\partial}{\partial x^j}\left[J\alpha^j_m(\rho U_m U_i-\tau_{mi}+P\delta_{mi})\right]=0 \tag{2}$$

에너지방정식:

$$\frac{1}{J}\frac{\partial}{\partial x^j}\left[J\alpha^j_m(\rho U_m-\Gamma_{eff}\frac{\partial T}{\partial x_n}\alpha^n_m)\right]=0 \tag{3}$$

#### 2.1.2 $k-\varepsilon-\overline{v'^2}$ 모델

초기에는 충돌제트 유동의 복잡성으로 인해 컴퓨터의 용량, 계산시간 및 수렴성의 문제로 대부분 와점성 개념에 기초를 둔 등방성 가정을 근거로 한 표준 $k-\varepsilon$ 모델이 가장 많이 이용되었으나 컴퓨터의 발달과 보다 나은 수렴성을 위해 충돌제트에서 발생하는 복잡한 비등방성 난류 유동의 벽면 근처에서 발생하는 수송과정에서 벽 근접 효과(wall proximity effect)가 전체 유동장에 미치는 효과가 매우 크기 때문에 이를 고려한 $k-\varepsilon-\overline{v'^2}$ 모델을 적용하였다. Durbin[6]은 레이놀즈 응력 모델에 난류 속도 스케일로 $k$가 아닌 $\overline{v'^2}$을 적용시켰으며 3차원 정상유동에서 $\overline{v'^2}$은 유선에 수직한 강도로써 이에 의해서 유선 곡률의 효과가 자연스럽게 나타나게 된다.

난류 운동 에너지 수송 방정식 :

$$\frac{1}{J}\frac{\partial}{\partial x^j}\left[J\alpha^j_m\left(\rho U_m k-\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x^n}\alpha^n_m\right)\right]$$
$$=P_k-\rho\varepsilon \tag{7}$$

난류 에너지 소멸율 방정식 :

$$\frac{1}{J}\frac{\partial}{\partial x^j}\left[J\alpha^j_m\left(\rho U_m\varepsilon-\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x^n}\alpha^n_m\right)\right]$$
$$=\frac{C^z_{\varepsilon 1}P_k-C_{\varepsilon 2}\varepsilon}{T} \tag{8}$$

$\overline{v'^2}$수송 방정식 :

$$\frac{1}{J}\frac{\partial}{\partial x^j}\left[Ja_m^j\left(\rho U_m\overline{v'^2}-\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\partial\frac{\overline{v'^2}}{\partial x^n}\alpha_m^n\right)\right]$$

$$=kf_{22}-\overline{v'^2}\frac{\epsilon}{k} \qquad (9)$$

타원형 이완 방정식 :

$$L^2\frac{1}{J}\frac{\partial}{\partial x^j}\left[Ja_m^j\left(-\frac{\partial f_{22}}{\partial x^n}\alpha_m^n\right)\right]=$$

$$(C_1-1)\frac{[2/3-\overline{v'^2}/k]}{T}+C_2\frac{P_k}{k}-f_{22} \qquad (10)$$

벽 근처에서 비등방성을 고려하기 위해 자유 흐름 영역과 벽 근처 영역에서의 길이 스케일과 시간 스케일을 보정하여 사용하고 있다.

$$\mu_t=\rho C_\mu\overline{v'^2}T_s \qquad (11)$$

길이 스케일 :

$$l=C_L\times\max\left[\frac{k^{3/2}}{\epsilon},C_\eta\frac{\nu^{3/4}}{\epsilon^{1/4}}\right] \qquad (12)$$

시간 스케일 :

$$T_s=\max\left[\frac{k}{\epsilon},6\left(\frac{\nu}{\epsilon}\right)^{1/2}\right] \qquad (13)$$

## 2.2 수치해석

### 2.2.1 격자계

Fig.1은 평판위로 분사되는 경사진 충돌 제트를 해석하기 위해 $L/D$=10인 격자계를 보여주는데 표준 $k-\epsilon$ 모델에서는 $x_1$, $x_2$, $x_3$방향으로 105× 25× 29의 격자계를, $k-\epsilon-\overline{v'^2}$ 모델은 144× 37 × 45의 격자계를 사용하였다. 격자계를 구성할 때 분사 제트가 충돌하는 정체점 부근과 벽면 부근에서의 유동장 및 열전달 문제를 중점적으로 알아보기 위해 이 부분에 격자수를 집중시켰다.

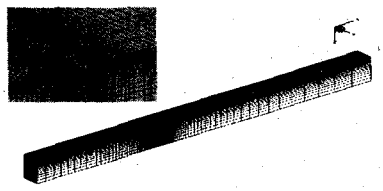

Fig.1 Grid arrangement for an oblique angle α =30° and $L/D$=10

### 2.2.2 지배 방정식의 차분화

앞절에서 나타낸 비직교 좌표계에 대한 지배 방정식들을 검사체적에 대해 체적 적분하여 이산화시키는 유한 체적법을 사용하여 대수 방정식을 얻는다. 확산항의 공간 도함수(spatial derivative)를 구할때는 1차의 중심차분법을 사용하여 차분화 시켰으며 대류항에 대해서는 대류항 보간법을 사용하였다.

### 2.2.3 해석방법

앞절에서 이산화된 방정식은 주 격자점에서의 유동변수들만 저장하여 암시적(implicit)인 처리를 하고 나머지 격자점에서의 변수값들은 현시적(explicit)인 처리를 하여 전 단계의 값들을 사용, 변수처리시 계산용량을 줄여 준다. 최종적으로는 7개의 대각렬을 갖는 행렬식이 만들어지는데 이를 SIP(Strongly Implicit Procedure)방법으로 풀어 변수값들을 구해낸다. 압력장의 처리에 있어서는 연속방정식을 이용하여 압력보정 방정식을 유도하고 해를 구하여 그 결과를 제어체적면의 질량 보존 법칙에 따라 압력과 속도를 연결시키는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다.

### 2.2.4 경계조건

입구 경계에서의 제트의 속도 $U_\infty$는 레이놀즈수에 해당하는 일정한 속도분포를 주었고 입구 온도( $T_\infty$)는 295K로 주었다. 난류 운동에너지와 난류 에너지 소산율의 입구 조건은 다음과 같다.

$$k_{in}=(TI\cdot U)^2 \qquad (14)$$

$$\epsilon_{in}=\frac{C_\mu k_{in}^{1.5}}{0.1L_c} \qquad (15)$$

대칭면에서는 경계면에 수직한 방향으로 모든 종속 변수의 구배가 영(zero)가 되도록 처리하였다.

$$\frac{\partial\phi}{\partial n}=0 \qquad (16)$$

벽면 경계조건은 점착(no-slip)경계조건을 사용하여 운동량 방정식과 에너지 방정식에서 대류항을 소거시켰으며 확산항은 첫 번째 격자점에서

벽마찰응력 $\tau_w$를 사용하여 다음과 같이 처리된다.

$$(a_P+\tau_w\delta A)u_P=\sum a_{nb}u_{nb}+S_u \qquad (17)$$

난류 운동 에너지($k$), 벽면에 수직한 난류 강도 ($\overline{v'^2}$), 난류 에너지 소멸율($\varepsilon$)과 타원형 이완($f_{22}$)에 대한 벽면 경계 조건은 다음과 같다.

$$k_w=0 \qquad \overline{v'^2}=0. \qquad (18)$$

$$\varepsilon_w=\frac{2\nu k_P}{y_n^2} \qquad (19)$$

$$f_{22w}=-\frac{20\nu^2\overline{v_P'^2}}{\varepsilon_w y_n^4} \qquad (20)$$

## 3. 결과와 고찰

본 연구에서는 Fig.2와 같이 원형단면을 갖는 단일 노즐로부터 평면위에 수직 및 경사각으로 분사되는 3차원 충돌제트에 대해서 표준 $k-\varepsilon$ 모델과 $k-\varepsilon-\overline{v'^2}$ 모델을 적용해서 정체점 및 인접영역에서의 유체 유동장과 열전달 특성에 대해 수치해석하였다.

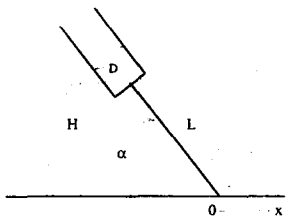


Fig.2 Schematic of an oblique jet impingement.

### 3.1 3차원 충돌제트에 대한 유동장 해석

본 연구에서는 경사진 충돌제트의 유동장 해석을 위해 원형단면을 가지는 단일 노즐로부터 평판위로 경사각 $a$가 45° 로 분사되는 3차원 충돌제트에 대해 높이비($h/D$)가 4.95이고, 레이놀즈수가 48,000에 대해 수치해석 결과를 Foss[4]의 실험 결과와 비교하였다.

Fig.3는 벽면에서의 압력분포를 나타낸 것이다. 실험결과와 수치해석결과는 유사한 경향을 보이며 정체압력 위치가 기하학적 정체점보다 약간 왼쪽에 위치하고 있는데 이것은 제트의 경사각에 의해 충돌면에서 압력구배가 다르게 나타나는데 노즐 출구가 상대적으로 가까운 주유동의 반대편에 압력이 낮게 형성되고 따라서 노즐에서 분사된 제트는 낮은 압력이 형성되는 주유동의 반대쪽으로 휘게되는 코안다 효과(Coanda effect)에 의해 정체압력의 위치가 왼쪽에 나타나게 된다.

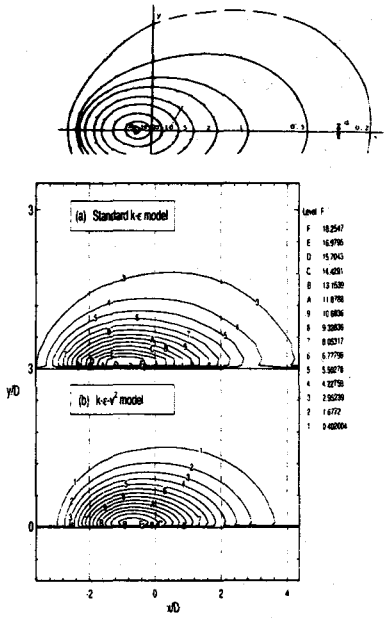


Fig.3 Comparison of wall static pressure with experimental data for $H/D$=4.95, $Re$=48,000

### 3.2 3차원 충돌제트에 대한 온도장 해석

본 연구에서는 경사진 충돌제트의 온도장 해석을 위해 원형단면을 가지는 단일 노즐로부터 경사각 α 가 30° 에서 90° 로 분사되는 3차원 충돌제트에 대해 분사 거리비($L/D$, 분사노즐의 직경에 대한 분사노즐에서 충돌면까지의 거리비)를 4, 6, 10으로 변화시키며 레이놀즈 수 20,000인 유동에 대해 수치해석을 수행하였다.

Fig.4~Fig.6은 분사 거리비와 제트 노즐 분사각에 따른 무차원화된 Nu값을 Goldstein등[5]의 실험결과와 비교한 것이다. 정체점 인접 영역에서 최대 Nu값을 실험결과와 수치해석 결과에 대

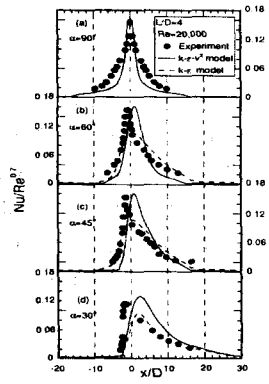


Fig.4 The effect of jet angle for the Nusselt numbers along the x axis for L/D=4

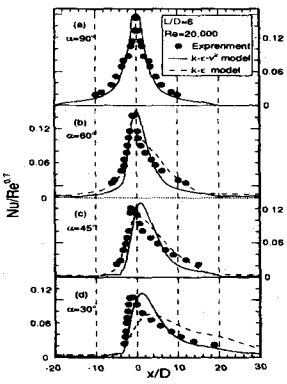


Fig.5 The effect of jet angle for the Nusselt numbers along the x axis for L/D=6

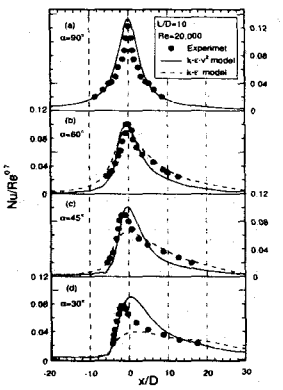


Fig.6 The effect of jet angle for the Nusselt numbers along the x axis for L/D=10

해 정량적으로 비교해보면 $k-\varepsilon-\overline{v'^2}$ 모델은 실험결과와 비교적 잘 일치하지만 표준 $k-\varepsilon$ 모델은 다소 큰 하향예측을 하고 있다. 일정한 분사 거리비에 대해 분사각 변화에 따른 최대 Nu값을 비교해 보면 Fig.4는 충돌면과 노즐사이가 제일 가까운 *L/D*가 4인 경우로 각각 분사각(α =30, 45, 60, 90° )에 대해 x축 방향으로의 무차원화된 Nu값을 실험값과 비교한 것이다. 최대 Nu값을 각 노즐 분사각에 대해 비교해 보면 노즐 분사각이 30° (Fig.16(d))인 경우를 제외하고는 최대 Nu값은 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 이것은 분사각이 30° 인 경우에는 정체점 인접영역에서 충돌시 벽면에 평행한 속도성분으로 인해 제트속도의 자연스러운 감소로 벽면의 난류강도가 분사각이 큰 경우에 비해 상대적으로 작기 때문이다. Fig.5은 *L/D*가 6인 경우로 *L/D*가 4인 경우와 달리 분사각이 30° 인 경우뿐만 아니라 최대 Nu값이 분사각이 45° (Fig.17(c))인 경우에도 최대 Nu값이 작게 나타난다. 분사각이 45° (Fig.17(c)) 에서도 최대 Nu값의 차이를 나타내는 것은 *L/D* 가 4인 경우보다 분사 거리비의 증가로 평균속도와 난류강도가 감소되기 때문이다. Fig.6은 *L/D*가 10인 경우로 *L/D*가 4와 6인 경우와 달리 제트의 분사각이 감소함에 따라 최대 Nu값도 점차로 감소함을 보이고 있다.

Fig.7에서는 각각의 분사 거리비에 대해 분사각에 따른 최대 Nu값을 나타내고 있으며 충돌면과 제트 노즐사이가 가장 가까운 *L/D*가 4인 경우 분사각이 30° 인 경우를 제외하고는 최대 Nu값이 거의 같은 값을 나타내며 *L/D*가 6인 경우에는 분사각이 60° 와 90° 일 때 최대 Nu값은 거의 같은 값을 가진다. 이와 같이 분사 거리비가 작을수록 분사각의 변화가 최대 Nu값에 부분적으로 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

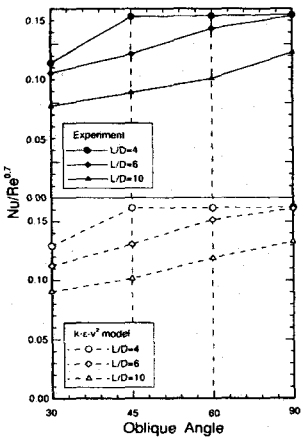


Fig.7 Variation of the near peak Nusselt number along the oblique angle for *L/D*

충돌면과 제트 노즐 사이의 거리(*L/D*)가 가까

운 경우의 분사각의 변화, 그리고 분사각이 큰($\alpha$ =90~60° ) 경우의 충돌면과 제트 노즐 사이의 거리($L/D$)의 변화는 최대 Nu값에 큰 영향을 미치지 않는다.

반면에, Fig.4~6에서는 x축 방향의 전체적인 Nu값의 분포 형상은 분사 거리비와 분사각의 영향을 많이 받고 있다. 일정한 분사 거리비에 대해 기하학적 정체점($x/D$=0)의 상류쪽인, 즉 $x/D>0$인 경우 분사각이 감소할수록 Nu값의 기울기는 감소하고, $x/D<0$인 경우에는 Nu값의 기울기는 증가하는데 이러한 경향은 분사 거리비가 작을수록 더욱 뚜렷이 나타난다.

## 4. 결론

본 연구에서는 경사진 3차원 충돌 제트의 유동 및 열전달 특성을 보다 정확하게 예측하기 위해 $k-\varepsilon-\overline{v'^2}$ 모델을 이용하여 노즐에서 충돌면까지의 거리, 노즐의 경사각등을 변화시켜며 수치해석적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 경사진 충돌제트의 유동장 및 온도장 해석에 있어서 $k-\varepsilon-\overline{v'^2}$ 모델이 표준 $k-\varepsilon$ 모델보다 실험결과와 보다 잘 일치하고 있다.

(2) 경사진 충돌제트인 경우 최대압력의 위치는 기하학적 정체점보다 약간 왼쪽에 위치한다. 이러한 경향은 분사각이 작을수록 뚜렷이 나타나며 지름의 4~8정도 되는 좁은 영역에서 벽면압력이 분포됨을 보이고 있다.

(3) 여러 분사각과 분사거리비에 따른 중심속도의 감소는 분사각이 작을수록, 분사거리비가 클수록 완만한 감소를 보이며, 최대 벽면 마찰 계수는 기하학적 정체점에서 분사각이 작을수록 오른쪽으로 치우치는 경향을 보이는데 이것은 벽면에 평행한 속도성분이 상대적으로 크기 때문이다.

(4) 경사진 충돌제트의 최대 Nu값의 해석에 있어서 $k-\varepsilon-\overline{v'^2}$ 모델이 실험결과[4]와 약간 상향예측을 하지만 다소 큰 하향예측을 하고 있는 표준 $k-\varepsilon$ 모델보다 실험결과[4]와 잘 일치하고 있다.

(5) 분사거리비가 일정할 경우 분사각이 클수록 최대 Nu값은 증가한다. 분사각이 일정할 경우에는 분사거리비가 클수록 더 큰 최대 Nu값을 나타낸다. 분사거리비가 작은 경우의 분사각의 변화와 분사각이 큰 경우의 분사거리비의 변화는 최대 Nu값에 거의 영향을 미치지 못한다.

## 후기

본 연구는 한국과학재단의 '97 특정기초연구비 지원(97-0200-06-01-3)으로 수행하였으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Cooper, D., Jackson, D. C., Launder, B. E. and Liao, G. X., "Impinging Jet Studies for Turbulence Model Assessment - Ⅰ. Flow-Field Experiments", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 10, pp. 2675~2684, 1993.
2. Demuren, A.O., Robi, W.,and Schonung,B. "Systematic Study of Film Cooling with a Three Dimensional Calculation Procedure", ASME, Journal of Turbomachinery, Vol.108, pp.125 -130,1986
3. Foss, J. F., "Measurements in a Large-Angle Oblique Jet Impingement Flow", AIAA Journal, Vol. 17, pp. 801~802, 1979.
4. Goldstein, R. J., Franchett, M. E., "Heat Transfer From a Flat Surface to an Oblique Impinging Jet", Transactions of the ASME, Vol. 110, pp. 84~90, 1988.
5. Rubel, A., "Computations of the Oblique Impingement of Round Jets upon a Plane Wall", AIAA Journal, Vol. 19, pp. 863~871, 1981.
6. Durbin, P. A., "Near-wall Turbulence Closure Modeling Without `Damping Functions'", Theoretical and Computational Fluid Dynamics, Vol.3, No. 1, pp. 1~13, 1991.