

이차원 다중젯트의 유동 및 열전달 특성의 수치적 해석(II) - 돌출열원이 있는 경우의 유동 및 열전달 특성 -

A Numerical Analysis of Flow and Heat Transfer Characteristics of a Two-Dimensional Multi-Impingement Jet(I)

장대철*	이기명*
정희원	정희원
D. C. Jang	K. M. Lee

ABSTRACT

A numerical study for a two dimensional multi-impingement jet with crossflow of the spent fluid has been carried out. To study the flow characteristics especially in the jet flow region, three different distributions of mass flow rate at 5-jet exits were assumed. For each distribution, various Reynolds numbers ranging from laminar to turbulent flows were considered. Calculations drew the following items as conclusion.

- 1) A periodical fully developed flow was observed from the third protrusion. This was also observed from previous experimentally by Whidden at al. The Nusselt number at the protrusion surface increased mildly as going downstream.
- 2) The low Reynolds number turbulence model of Launder and Sharma was found to be adequate for the prediction of fluid flow and heat transfer characteristics of two dimensional multi-jet configuration.
- 3) The Nusselt number at the protrusion surface was nearly proportional to the square root of the Reynolds number.

KeyWords : Multi-Jet(다중젯트), Crossflow(직교류), Spent air(사용후 공기), Mass flow rate(유량)

1. 서론

충돌젯트는 저자의 선행연구(장 등, 1994, 1995)에서도 소개된 바와 같이 국내외의 여러 연구자에 의해 이미 광범위한 분야에 널리 응용되고 있는 유동의 하나이다. 또한 최근들어 기술집약형 시스템이 요구되는 농업기계 분야에서도

젯트류에 의한 이상유동(二相流動)을 상온연무기에 적용하여 온도, 습도 등의 작물생육에 필요한 최적의 환경제어 및 무인방제기술에 응용될 수 있다(김, 1994).

최근들어 충돌젯트는 큰 열유속을 수반하는 전자장비내의 열원을 냉각하는 기술에 응용되면서 또다시 활발한 연구대상이 되고 있다. 전자장

* 경북대학교 농업기계공학과

비에서 발생하는 열을 냉각시키는 방식으로는 자연대류 방식이 많이 이용되고 있지만, 이 방식은 단위면적당 발열량이 약 0.1W/cm²까지 응용 가능한 것으로 알려져 있다(Oktay et al., 1986). 그런데 전자회로의 고집적화, 전자장비의 소형화에 따라 전자장비내의 열발생은 급격히 증가하여 전자회로의 성능저하 뿐만 아니라 열응력에 의한 부품의 변형까지 초래하고 있다. 예를 들면 최근에 개발된 전자회로들은 열유속(heat flux)이 약 200W/cm²에 이르고 있다(Schafer et al., 1991). 또한 전자회로의 고집적화가 가속화될 전망에 비추어 볼때 전자장비가 발산하는 열은 계속 증가할 것이므로 이를 적절히 소산시켜서 전자회로의 성능저하와 열응력에 의한 부품의 변형을 방지할 수 있는 냉각기술의 개발이 시급한 실정이다. 뿐만 아니라, 전자장비의 냉각에 실제로 응용되는 젯트는 대부분 제한면을 가지는 다중 충돌젯트로 사용후 유체(spent fluid)에 의해 직교류(cross flow)가 형성되는데, 이에 대한 연구로는 최근에 Whidden(1992) 등이 실험적 연구를 통해 충돌젯트의 열전달 특성에 큰 영향을 미칠 것으로 보여지는 젯트 레이놀즈 수, 젯트폭 그리고 젯트와 열원 사이의 간격 등의 영향을 연구한 바 있다. 그들의 연구결과에 따르면 열원의 평균 Nusselt 수는 충돌젯트와 사용후 유체의 유량비에 큰 영향을 받고 있는 것으로 판단하였으나, 논문에서는 다중젯트의 유량분포가 미치는 영향을 체계적으로 연구하지는 못했다. 또 다중젯트에서의 유량분포와 사용후 유체로 생성되는 직교류가 유동 및 열전달 특성에 미치는 영향에 대한 연구도 체계적으로 이루어져 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 선행연구인 다중 충돌젯트의 유동특성에 대한 연구를 바탕으로 Navier-Stokes 방정식, 연속 방정식 그리고 저 레이놀즈 수 k-ε 난류모델 방정식을 수치해석하여 충류영역, 천이영역 및 난류영역에 걸쳐 돌출열원(protrusion heat source)이 없는 채널내에서 직교류를 가지는 다중 충돌젯트의 유동특성에 대한 연구를 선행하고, 5개의 돌출열원에 충돌젯트가 분사되는 채널내의 이차원 다중 충돌젯

트의 유동 및 열전달 특성을 살펴보고자 한다.

2. 연구 방법

그림 1은 돌출된 열원에 분사된 다중젯트의 유동 및 열전달 특성을 계산하기 위한 개략도이며 돌출열원의 높이는 (h/3)이고, 돌출열원의 폭은 2b이며, 배치간격은 젯트출구의 중심과 일치시켜 등간격(3b)으로 구성하였다.

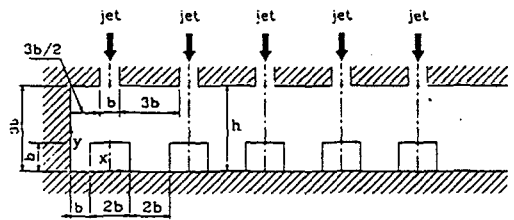


Fig. 1 Multi-jet configuration.

가. 지배방정식

이차원 다중젯트를 수치해석하기 위하여 본 연구에 사용된 지배방정식은 다음의 식 (1)~(5)와 같은 연속방정식, 운동량방정식 및 에너지방정식이다.

연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

운동량방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \\ & - \rho u'_i u'_j \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

k-방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = & \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \\ & + \mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \\ & - \rho \epsilon - 2\mu \left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial x_j} \right)^2 \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ε-방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = & \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] \\ & + C_{f1} \mu \frac{\varepsilon}{k} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \\ & - C_{f2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} + 2 \frac{\mu \mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_k} \right)^2 \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

여기서 하첨자 i=1, 2는 각각 x와 y방향을 가리키고 μ 는 난류 와점성계수로 $\mu = C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ 로 정의된다.

또한 난류모델에 사용된 상수는 $C_\mu = 0.99$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $f_1 = 1.0$ 이며 두 개의 실험 방정식은 다음과 같이 정의된다.

$$f_\mu = e^{-\frac{3.4}{(1+R_i/50)^2}}, f_2 = 1 - 0.3 \exp(-R_i^2)$$

에너지방정식

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = (\alpha + \alpha_t) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \dots \dots (5)$$

또한 들출열원에 다중젯트를 분사할 경우의 열전달특성을 계산하기 위한 무차원값인 난류 Prandtl 수를 본 연구에서는 공기를 기준으로 하여 0.9로 가정하였다.

나. 경계조건

본 연구에서 다룬 다중젯트의 형상은 그림 1에서 도시된 바와 같으며, 계산영역을 결정하는 각 경계면에서의 경계조건은 다음과 같다. 우선 5개의 젯트출구에서 y-방향 속도성분 v는 젯트 속도 v_{jet} 로 일정한 값으로 가정하였다. 난류운동에너지 k는 $0.01v_{jet}^2$ 로 일정한 값으로 가정하였다. 난류운동에너지 k는 $0.01v_{jet}^2$ 로, 난류운동에너지의 소산율 ε 은 $C_\mu k^{3/2} b / 0.01$ 로 가정하였다. 그리고 충돌면과 제한면 등 모든 벽면에서는 속도성분에 대해 점착(no-slip)조건으로 가정하였고, 난류운동에너지 k와 난류운동에너지의 소산율 ε 은 0으로 주었다. 또한 채널의 하류에서는 채널유동이 완전히 발달한다고 가정하여 유동방향의 확산을 무시한 식(6)과 같이 주었다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0 \dots \dots \dots (6)$$

그리고 압력경계조건으로는 $\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0$ 으로 가정하였다.

제한면과 충돌면의 벽면경계조건으로는 속도성분의 점착(no-slip)조건인 $u=v=0$ 인 경계조건을 사용하였고, 여기서 채널하류의 경계조건은 유동이 완전히 발달된 조건이 만족되도록 주 유동(main stream)방향인 x축의 거리를 젯트폭으로 무차원화(x/b)한 수가 50인 위치에 두었다.

그림 2는 본 연구에서 사용된 들출열원이 존재하는 경우에 5개의 젯트출구에서의 경계조건을 레이놀즈 수에 따른 유량분포를 나타낸 그림으로 y축은 전체유량(Q)에 대한 채널하류로 가면서 누적된 유량(Q)의 비를 나타내고 있다.

또한 레이놀즈 수 5000과 레이놀즈 수 1500의 경우 서로 다른 유량분포를 나타내고 있다. 이 유량분포는 하류로 갈수록 급격히 증대시켰으며, 상류 젯트출구에서 하류 젯트출구로 가면서 5개의 누적된 유량으로 표시하였다. 또한 충돌젯트와 직교류에 의한 유동 및 열전달 특성의 검증을 위해 Whidden 등의 실험에서 측정된 값을 사용하였다.

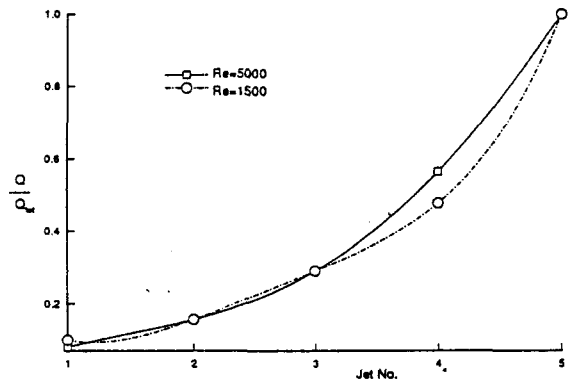


Fig. 2 Mass flow rate distributions.

다. 격자구성 및 수렴조건

본 논문에서 사용한 격자계는 속도성분과 압력장의 zig-zag현상(Patankar, 1980) 등을 방지하기 위하여 엇물림 격자계(staggered grid system)를 적용하였다.

또한 그림 3은 돌출열원에 다중젯트가 분사될 경우 본 연구에 사용된 난류유동에 사용된 격자계를 보여주고 있다. 격자계의 구성방법은 돌출열원이 없는 다중젯트의 경우와 유사하나, 젯트 유동영역인 젯트출구의 경계면(edge)과 돌출열원의 표면인 $y^+ > 1.0$ 에 격자를 밀집시켜 난류운동에너지의 생성과 열전달특성의 예측에 주안점을 두었다. 5개의 돌출열원 자체와 젯트의 중심을 일치시켰고, 열원과 열원 사이를 등간격 격자로 구성하였다. 돌출열원 이후에는 격자를 일정 비율로 확장하여 얻은 비균일 격자계를 사용하였으며, 층류영역($Re=1500$)의 경우 170×81 의 격자계로 격자수를 사용하였고, 천이와 난류영역($Re=3000, 5000$)의 경우는 수치해가 충분한 정확도를 가지도록 조밀한 220×100 의 격자계를 사용하였다. X방향 격자 중에서 50개는 젯트 유동영역인 돌출열원 부근에 분포시켰고, 나머지는 격자간 간격을 일정 비율로 증가시키며 분포시켰다. Y방향 격자는 크게 두 부분으로 나누어 구성된다. 층류면($Y=0$)에서 돌출열원까지는 33개의 격자를 등간격으로 구성하고 나머지 공간은 양쪽벽면(돌출열원표면과 제한면)에 무차원수 Y 의 0.001를 최소간격으로 하여 등비로 증가시키며 격자를 완성하였다.

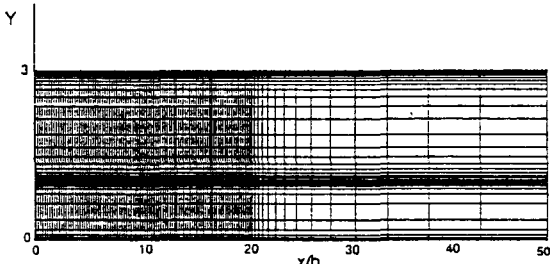


Fig. 3 Configuration of grid system.

라. 수치적 이산화 및 알고리즘

또한 본 연구에서 적용한 이차원 비압축성 정상유동의 지배방정식으로 부터 확산항은 중앙차분법으로 차분화 하였으며, 대류항은 최근에 발표된 Hayase(1992) 등에 의한 QUICKER(Quadratic Upstream Interpolation for Convective

Kinematics Extended and Revised)법으로 근사하여 차분방정식을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 Patankar가 제안한 SIMPLER (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Revised) 알고리즘(Patankar, 1980)을 사용하여 수치해를 얻었다.

3. 결과 및 고찰

가. 유동 특성

그림 4와 그림 5는 두번째에서 다섯번째까지의 돌출열원과 가상적인 여섯번째 돌출열원의 선단에서 속도분포를 본 계산치와 Whidden 등의 실험치를 비교하여 도시한 그림이다. 그림 4

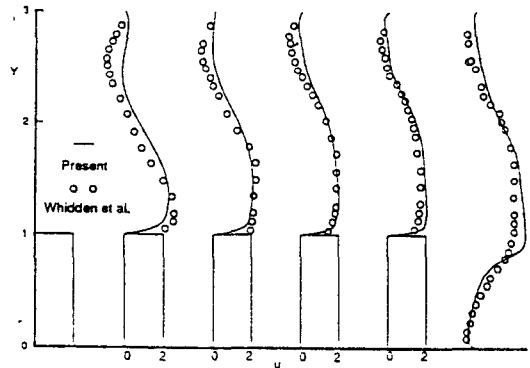


Fig. 4 Comparison of the crossflow velocity for $Re = 1500$.

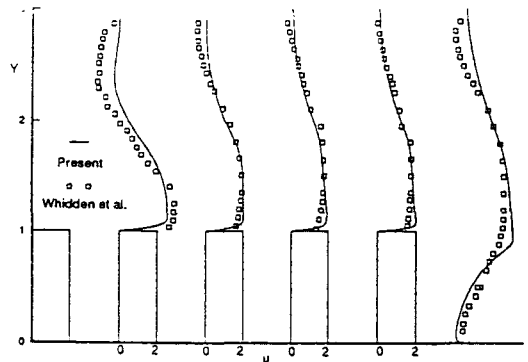


Fig. 5 Comparison of the crossflow velocity for $Re = 5000$.

는 레이놀즈 수 1500이고 그림 5는 레이놀즈 수 5000의 경우인데 두 경우 모두 실험치와 계산치는 정성적으로 좋은 일치를 보이고 있어 본 연구에서 채택한 $k-\epsilon$ 난류모델이 적절함을 반증하고 있다.

그림 6은 앞서 살펴본 속도분포와 동일한 위치에서 난류운동에너지를 본 계산치와 Whidden 등의 실험치를 비교한 그림으로, 전체적으로 좋은 일치를 보여주고 있다. 다만 두번째 돌출열원 부근에서는 그림 4와 5의 속도분포의 비교에서와 같이 상대적으로 큰 차이를 보이지만, 그림 4, 5 및 6의 속도와 난류운동에너지의 분포는 각 위치에서의 직교류의 평균유속으로 무차원된 값이므로 절대적인 양의 차이는 결코 크지 않다. 왜냐하면 직교류의 평균유속은 그림 2에서 보는 바와 같이 하류로 갈수록 2차 포물선의 형태로 증가하기 때문이다.

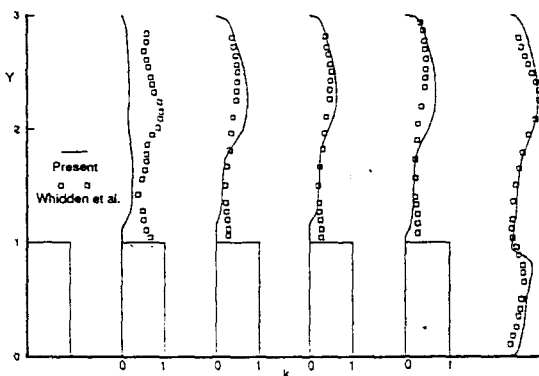


Fig. 6 Comparison of the crossflow Root Mean Square velocity fluctuation for $Re=1500$.

그림 7은 레이놀즈 수 5000, 3000 및 1500의 경우에 얻은 유선형태로 5개의 젯트와 돌출열원 주위에 형성되는 복잡한 유동장을 잘 보여주고 있다.

동일유량을 가지는 그림 7의 (a)와 (b)를 살펴보면 제한면쪽에 형성되는 와류유동의 크기는 레이놀즈 수 5000의 경우에는 하류젯트로 갈수록 크기가 작아지고, 그림 (b)의 레이놀즈 수 3000의 경우는 제한면쪽의 와류의 형성은 볼 수가 없다. 이는 상류에서 형성된 직교류의 형성이 강할수록 하류의 자유젯트의 발달거리를 제한하

기 때문으로 사료된다. 충돌면에서의 유동을 살펴보면 난류와 천이의 유동영역에서 가장적인 여섯번째 돌출열원의 위치에서는 가장 큰 와류유동이 형성되며 다섯번째 이후의 유동은 갑자기 확대되는 관내의 유동특성과 유사함을 알 수 있다. 유동장을 보다 자세히 살펴보면, 5개의 젯트가 분사됨에 따라 젯트와 제한면 사이에 와류유동이 형성되어 그 크기는 점차 줄어들지만 세번째와 네번째 돌출열원에 의해 유기되는 와류유동의 크기는 거의 같음을 알 수 있다. 각각의 돌출열원 사이의 공간은 공동유동(wind driven cavity)(Ghia et al., 1982)이 형성되며 공동내의 와류유동의 강도는 유량의 증가에 따라 하류로 갈수록 증가함을 알 수 있다. 또한 레이놀즈 수가 1500의 그림 (c)는 그림 (a)와 (b)의 분포에 비해 하류젯트인 다섯번째 젯트에서 가장 큰 유량

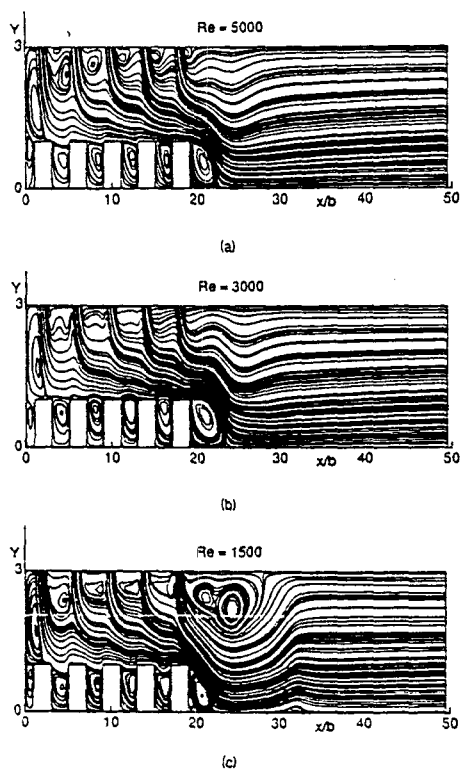


Fig. 7 Visualization of streamline for $Re=5000$, 3000 and 1500.

을 분사하는 경우로서 젯트가 직교류를 투과하여 다섯번째 이후의 충돌면에서는 와류의 형성

을 크게 제한하는 반면 제한면쪽에서는 복잡한 와류유동을 나타내고 있으며, 충돌벽면을 따른 채널유동영역의 $X=30$ 이후에서 다른 유동의 경우에서 볼 수 없었던 유동의 박리(separation) 현상도 관찰되었다.

그림 8은 돌출열원이 있는 경우의 난류운동에너지를 살펴보기 위해 나타낸 그림으로 동일유량인 그림 (a)의 레이놀즈 수 5000과 레이놀즈 수 3000의 (b)에서는 거의 유사한 결과를 보이고 있으나, 레이놀즈 수 1500의 그림 (c)의 경우는 다섯번째 젯트에서의 가장 큰 유량분포로 인한 젯트출구의 경계부근에서 가장 강한 난류운동에너지를 생성을 살펴볼 수가 있다. 이러한 결과로 다섯번째 젯트출구 이후에서의 복잡한 와류의 생성 및 유동의 박리등 앞서 살펴볼 수 없었던 특이한 현상을 나타내었다.

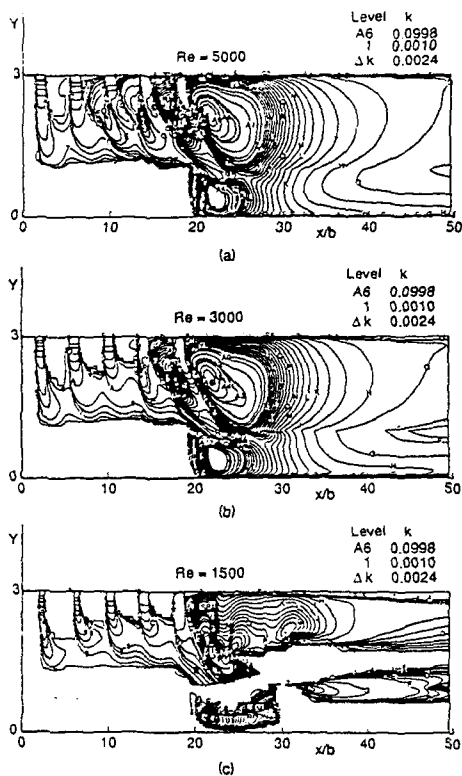


Fig. 8 Comparison of turbulent kinetic energy distributions for $Re=5000, 3000$ and 1500 .

나. 열전달 특성

그림 9는 레이놀즈 수 1500일 경우에 돌출열원의 표면에서 얻은 Nusselt 수에 대한 Whidden 등의 실험 및 층류유동 계산치를 본 결과치와 비교하여 도시한 그림이다.

그림을 살펴보면 본 결과치는 Whidden 등의 층류유동 계산치에 비해 Nusselt 수를 약 2배 정도 크게 예측하고 있어 레이놀즈 수 1500과 같은 저 레이놀즈 수에서도 돌출열원의 Nusselt 수는 크게 향상되고 있음을 알 수 있다. 그리고, 본 결과치와 실험치를 비교해 보면 정량적으로 좋은 일치치를 보이고 있어 본 연구에서 채택한 $k-\epsilon$ 난류모델이 적절함을 반증하고 있다고 하겠다. 또한 돌출열원의 Nusselt 수는 그림 10에서 알

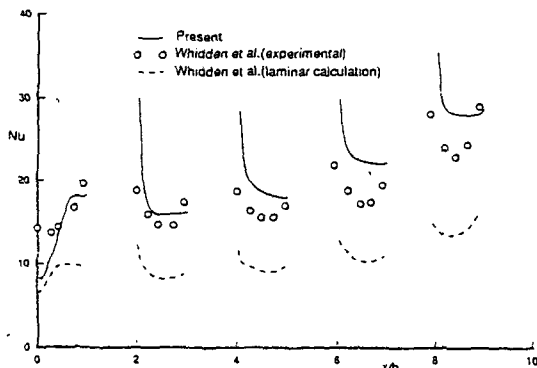


Fig. 9 Comparison of Nusselt number distributions. (Present computation vs. Whidden et al.'s experimental results.)

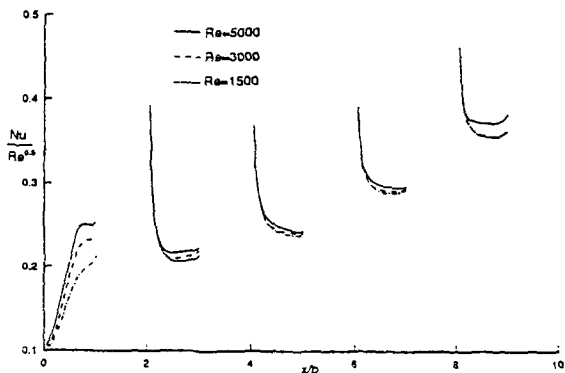


Fig. 10 Correlations between Nusselt number and Reynolds number resulted from present computation.

수 있는 바와 같이 하류로 갈수록 증가하며 이는 그림 2에서 보인 바와 같이 하류로 갈수록 유량이 증가하기 때문이다. 여기서 한가지 지적할 것은 유량의 증가정도에 비해 Nusselt 수의 증가는 훨씬 완만하다는 것이다.

그림 10에서는 5개의 돌출열원에서의 Nusselt 수와 레이놀즈 수와의 상관(correlation)을 레이놀즈 수 1500의 층류유동과 레이놀즈 수 3000의 천이유동 및 레이놀즈 수 5000의 난류유동영역에 걸쳐 도시한 그림으로 열전달 특성인 Nusselt 수는 레이놀즈 수의 0.5승에 비례하는 특이한 현상을 보이고 있다.

4. 결론

본 논문에서는 직교류를 가지는 이차원 다중젯트의 유동 및 열전달 특성에 대한 수치적 해석을 통하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1) 본 수치해석적 연구에서도 Whidden 등의 실험에서와 같이 약 3번째 이후의 돌출열원 부근의 유동이 주기적으로 거의 완전히 발달하는 현상을 살펴볼 수 있었다. 또한 돌출열원의 Nusselt 수는 하류로 갈수록 유량의 증가에 따라 증가하나 그 증가폭은 유량증가에 비해 완만하였다.

2) 레이놀즈 수가 1500이나 5000과 같은 저 레이놀즈 수의 유동에서 돌출열원의 Nusselt 수는 난류의 영향으로 Whidden 등의 층류유동 계산치에 비해 약 2배정도 향상되었다.

3) Launder와 Sharma가 제안한 저 레이놀즈 수 $k-\epsilon$ 모델을 사용한 본 계산치와 Whidden 등의 실험치가 정성적인 일치 뿐만 아니라 정량적으로 좋은 일치를 보여 주었다.

4) 5개의 돌출열원에서의 열전달 특성인 Nusselt 수와 레이놀즈 수와의 상관(correlation)은 Nusselt 수가 레이놀즈 수의 0.5승에 비례하는 특이한 현상을 보이고 있다.

참 고 문 헌

1. 金明圭. 1994. 無人常溫煙霧防除機 開發에 關한 基礎研究. 慶尙大學校 大學院 博士學位論文
2. 장대철, 이기명. 1995. 이차원 다중젯트의 유동 및 열전달 특성의 수치적 해석(I). 한국농업기계학회지. 20(1) :
3. 장대철, 강동진. 1994. 직교류를 가지는 이차원 다중젯트의 유동특성에 관한 수치적 연구. 대한기계학회 '94 추계학술대회논문집(II) : 406~409.
4. D. Schafer, F. P. Incropera and S. Ramadhyani. 1991. Planar liquid jet impingement cooling of multiple discrete heat sources. J. Electronic Packaging 113 : 359~366.
5. G. L. Whidden, J. Stevens and B. W. Webb. 1992. Heat transfer and flow characteristics of two-dimensional jets impinging on heated protrusions with crossflow of the spent air. ASME J. Electronic packaging 114 : 81~87.
6. S. Oktay, R. Hanneman and A. Bar-Cohen. 1986. High heat from a small package. Mechanical Engineering March : 36~42.
7. S. V. Patankar. 1980. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Pub. Co.
8. T. Hayase, J. A. C. Humphrey and R. Grief. 1992. A consistency formulated QUICK scheme for fast and stable convergence using finite-volume iterative calculation procedures. J. of Computational Physics 98 : 108~118
9. U. Ghia, K. N. Ghia and C. T. Shin, 1982, High-Re solutions for incompressible flow using the Navier-Stokes equations and a multigrid method. J. Computational Physics 48 : 387~411.