

이차원 다중젯트의 유동 및 열전달 특성의 수치적 해석(I)

- 돌출열원이 없는 경우의 유동특성 -

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

장대철*

정희원

D. C. Jang

이기명*

정희원

K. M. Lee

ABSTRACT

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

- 1) The development of the free jets issued from downstream jets was hindered by the crossflow formed due to jets. Consequently, the free jet was developed into the channel flow without any evident symptom of impingement jet flow characteristics
- 2) The crossflow induced the pressure gradient along the cross section of jet exits and the value of the pressure gradient increased as going downstream. The crossflow generated also the turbulent kinetic energy as it collided with the downstream jets.
- 3) The skin friction coefficient along the impingement plate was affected more by the distribution of mass flow rate at jet exits rather than by the Reynolds number. The skin friction coefficient was inversely proportional to the square root of the Reynolds number, regardless of flow regime when a fully developed flow was formed in the jet flow region.
- 4) The distribution of the skin friction coefficient along the impingement plate was found to be controlled by adjusting the distribution of mass flow rate at jet exits.

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

Nomenclature

b : 젯트폭	τ_w : 벽면전단응력	h : 채널높이
C_f : 벽면마찰계수	v_{jet} : 젯트출구유속	Re : 레이놀즈 수 bv_{av}/ν
v_{av} : 5개 젯트의 평균유속	α : 열확산계수	k : 난류운동에너지
ϵ : 난류운동에너지 소산율	Nu : Nusselt 수 ($Nu = \bar{h}b/x$)	

* 경북대학교 농업기계공학과

1. 서론

충돌젯트의 탁월한 열 및 물질전달의 특성 (transport characteristics)은 이미 오래전 부터 인정되어 여러 산업분야에 널리 응용되고 있다. 예를들어 살펴보면, 충돌젯트를 이용한 고온의 터빈 블레이드의 냉각문제에서 비철금속의 열처리 및 섬유와 종이 등의 건조에 이르기까지 광범위한 응용분야를 가지고 있으며 특히 최근에는 고집적화된 전자부품의 냉각에 응용되고 있다.

특히 전자부품은 고집적화, 소형화되어 가는 반면 단위면적당 방열되는 열량은 계속하여 증가하고 있는 추세여서 채널내의 흐름을 이용한 통상적인 냉각방법은 충돌젯트를 이용한 냉각방법으로 급격히 대체되고 있다. 본 논문에서 다루는 이차원 다중 충돌젯트도 한 예라 할 수 있다.

충돌젯트를 이용한 열전달 문제를 다룬 문헌은 이미 방대한 양에 이르고 있으며, Downs(1987) 등의 논문에 최근의 연구동향이 잘 파악되어 있다. 사용후 공기의 직교류를 가진 충돌젯트에 대한 연구는 몇몇 연구자에 의해 다루어진 바 있으나 대부분의 연구는 젯트의 다양한 기하학적 형상이나 열적 경계조건에 대한 것으로 채널 내의 유동구조에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되는 다중충돌젯트에서의 유량분포에 관한 연구는 대단히 미흡한 실정이다. 뿐만 아니라 대부분의 선행연구는 단지 열전달 특성에만 관심이 집중되어 다중 충돌젯트의 유동구조는 잘 알려져 있지 않다.

이차원 다중 충돌젯트에 대한 열 및 유동에 대한 연구로는 최근에 Whidden(1992) 등에 의해 행해진 실험적 연구를 예로 들 수 있다. 그들은 레이놀즈 수, 젯트폭 및 젯트와 돌출열원과의 거리등의 영향에 대해 연구하였다. 비록 세가지의 서로 다른 유량분포에 대한 실험결과로 언급되어 있으나, 의도적으로 선택된 것이 아니고 실험 결과로 얻은 분포이다. 따라서 유량분포가 유동특성에 미치는 영향에 대한 연구로 보기는 어렵다.

본 논문에서는 이차원 충돌젯트의 유동구조와 유량분포에 따른 영향을 층류유동, 천이유동 및 난류유동의 유동영역에서 자세히 살펴 보았다. 본 연구에서는 연속방정식과 레이놀즈 시간평균 Navier-Stokes방정식을 풀었고, 난류모델로는 Launder와 Sharma(1974)가 제안한 저 레이놀즈 수 k-ε 난류모델을 사용하였다. 특기할 사항은 Launder와 Sharma의 저 레이놀즈 수 난류모델 방정식은 천이유동도 어느정도 예측이 가능 (Schmidt et al., 1988)한 것으로 알려져 있어 천이유동 해석을 위해 특별한 천이모델을 사용하지 않았다는 것이다.

2. 연구 방법

가. 지배방정식

본 연구에서 사용한 정상상태 비압축성 난류유동에 대한 연속방정식과 시간평균 운동량 방정식은 다음과 같다.

연속방정식

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

운동량방정식

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

여기서 u_i 는 평균속도, u'_i 은 요동 속도성분 (fluctuation velocity component)을 가리킨다. 레이놀즈 응력은 Boussinesq 근사를 따라 평균 유동의 변형률과 와점성계수(eddy viscosity) μ 와 난류운동에너지 k와 소산율 ϵ 에 대한 수송방정식은 다음과 같다.

$$-\rho u'_i u'_j = \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

$$[\mu = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\epsilon}, \delta_{ij} : \text{Kronecker delta}]$$

k-방정식

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

ε-방정식

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

여기서 하첨자 i=1, 2는 각각 x와 y방향을 가리키고 난류모델에 사용된 7개의 실험적 상수는 $C_\mu=0.09$, $C_1=1.44$, $C_2=1.92$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\epsilon=1.3$, $f_1=1.0$ 이며 두개의 실험 방정식은 다음과 같이 정의된다. 또한 본 논문에 사용된 저 레이놀즈수 k-ε 난류모델에 대한 더욱 상세한 내용은 Launder(1974) 등의 논문에 잘 설명되어있다.

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

나. 수치적 해법

연속방정식과 레이놀즈 평균 운동량 방정식은 Patankar(1980)에 의해 개발된 SIMPLER 알고리즘을 사용하여 수치해석 하였다.

또한 Leschziner(1981) 등에 따르면 k와 ε방정식에서 대류항의 고차 이산화는 수치해의 정확도 향상에 별다른 기여없이 수렴속도를 심각하게 악화시키는 것으로 알려져 있다. 따라서 k와 ε의 수송방정식의 대류항은 Hybrid법으로 이산화하고, 운동량 방정식의 대류항만 QUICKER법으로 처리하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 다룬 다중젯트의 형상은 그림 1과 같으며, 5개의 젯트는 등간격으로 배치 하였고

충돌면과 젯트출구사이의 거리 $h=3b$ 이다.

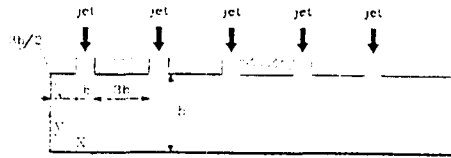


Fig. 1 Multi-jet configuration.

격자구성은 속도성분과 압력장의 zig-zag현상(Patankar, 1980) 등을방지하기 위하여 엇물림 격자계(staggered grid system)를 적용하였으며, 그림 2는 다중젯트가 분사시 유동 특성을 계산하기 위한 격자구성을 보여주는 그림이다. 또한 좌표계는 직교좌표계(rectangular coordinate system)로 X축은 주 유동방향의 거리를 젯트폭으로 무차원화(x/b)된 수이며, Y축은 충돌면과 제한면 사이의 거리를 나타내는 무차원화수(y/b)로 구성되어있다.

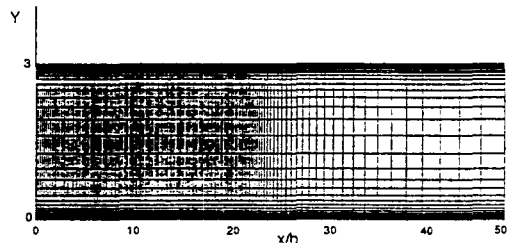


Fig. 2 Configuration of grid system.

총류유동(Re=500, 1000, 1500)에는 170x100의 격자계를 사용하였고, 천이영역과 난류영역(Re=5000, 10000, 15000, 20000, 30000)에서는 레이놀즈 수의 증가에 따른 유동특성의 급격한 변화를 잘 예측하기 위해 300x120의 좀더 조밀한 격자계를 사용하였다. 격자의 구성은 수치해가 충분한 정확도를 가지도록 300개의 X방향 격자 중에서 240개는 젯트유동영역에 분포시켜 유동의 상대적인 급격한 변화를 잘 예측할 수 있도록 하였고, 나머지는 격자간 간격을 일정 비율로 증가시키며 채널유동영역에 분포시켰다. Y방향 격자는 채널의 중심을 대칭선으로 벽면에서

채널중심으로 일정비율로 증가시켜 구성하였으며, $y^+ (=y\sqrt{\tau_w/\rho\nu}) < 1$ 의 범위에 최소한 1~2개의 격자를 놓이도록 하여 난류량의 계산이 충분한 정확도를 가지도록 하였다.

그림 3에서 보는 바와같이 3개의 서로 다른 유량분포는 각각 Case 1, Case 2, Case 3로 명명하였다. Case 1은 5개의 젯트출구에서의 유량분포가 일정한 경우이고 Case 2는 점진적으로 유량이 증가하는 경우이며 Case 3는 유량의 분포가 채널의 하류로 갈수록 감소하는 경우로 가정하였다. 또한 수치해석에 사용된 격자계는 5개의 젯트출구 사이는 등간격 격자로 구성하고 젯트 유동영역 이후에는 격자를 일정비율로 확장하여 완성하였다. 젯트출구에서의 난류운동에너지는 $0.01V_{jet}^2$ 로, 소산율은 $C_\mu k^{3/2}/0.01$ 로 각각 가정하였다.

본 논문에서 제시하는 수치해의 신뢰도를 평가하기 위해 레이놀즈 수가 30000이고 젯트출구에서의 유량분포가 Case 3인 경우에 300x120과 330x140의 두 격자계에 대하여 계산을 수행하여 얻은 결과중에서 충돌면의 압력분포를 그림 4에 도시하였다. 그림을 살펴보면 두가지 격자계의 결과가 약 3% 이내에서 일치하는 좋은 거동을 보여주고 있음을 알 수 있다. 또한 본 예제계산은 난류유동이고 고 레이놀즈 수의 계산이라는 점에서 본 연구에서 수행한 계산들 중에서 상대적으로 오차가 클 것으로 예상되어, 본 연구에서 제시하는 모든 수치해는 약 3% 범위의 오차내에서 신뢰할 수 있다고 판단된다.

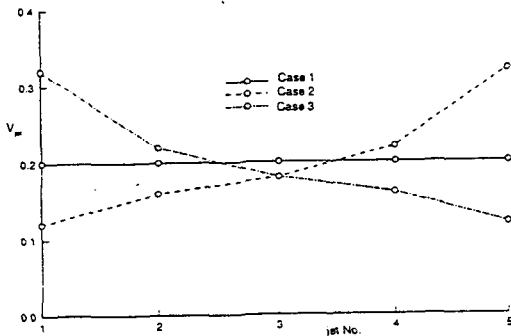


Fig. 3 Mass flow rate distributions.

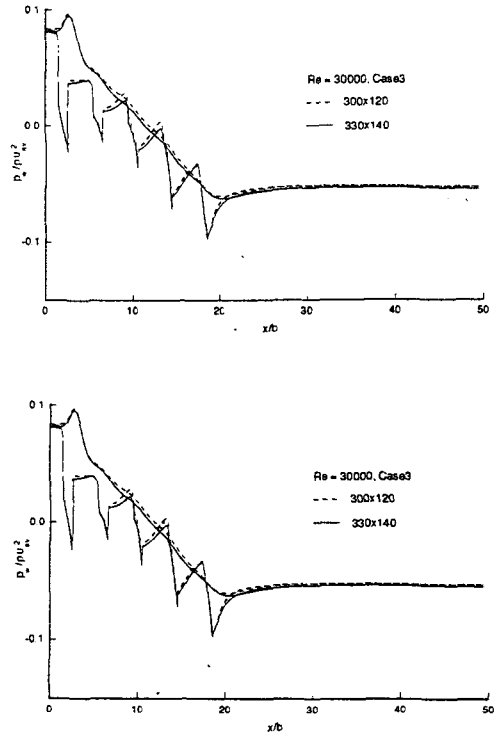


Fig. 4 Comparison of wall pressure along the impingement plate for two grid system.

그림 5는 레이놀즈 수가 1500인 경우의 유선으로 전체적인 유동형태는 유량분포에 관계없이 대단히 유사하나, 젯트출구 주위에 형성된 와류의 크기등 세밀하게는 서로 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 특히 다섯번째 젯트출구 부근에 형성되는 와류유동의 크기가 증가하는 유량분포를 가진 Case 2의 경우에 가장크고 Case 1에서 Case 3로 갈수록 작아지고 있어 와류의 크기는 유량분포에 민감함을 알 수 있다. 이는 상류쪽에서의 직교류의 형성이 강할수록 하류의 자유젯트의 발달거리를 제한하기 때문으로 생각된다. 또한 레이놀즈 수의 증가에 따라 천이와 난류유동에서는 직교류의 영향이 증대되어 Case 1과 Case 3의 경우는 다섯번째 젯트출구의 하류측 경계(edge)에서 와류가 생성되지 않았다.

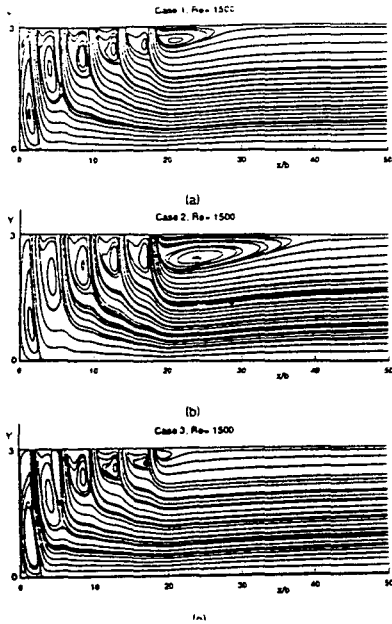


Fig. 5 Visualization of flowfield using the streamline for $Re=1500$.

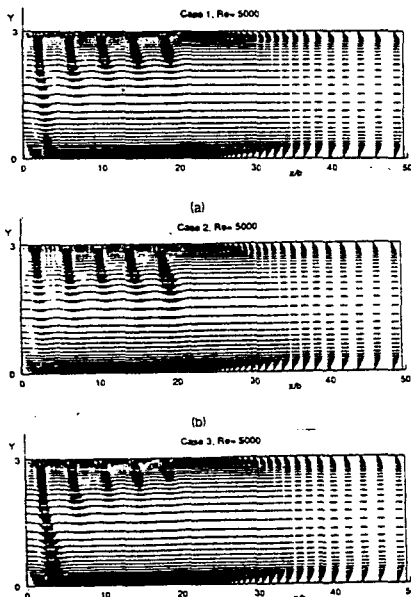


Fig. 6 Visualization of flowfield using the velocity vector for $Re=5000$.

그림 6은 레이놀즈 수 5000의 천이유동 영역에서의 세가지의 서로 다른 유량분포에 따라 젯트유동이 채널유동으로 변화하는 모습을 속도벡터를 이용하여 전체 유동장을 도시한 그림으로 층류유동의 경우와 젯트유동영역에서는 거의 동일한 유동이 형성되고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 채널의 하류 약 $X=30$ 에서는 난류유동이 형성됨을 볼 수 있다. 또 유량분포 변화에 따른 각 젯트출구에서 분사되는 자유젯트의 발달형태의 변화도 그림에서 볼 수 있다.

그림 7은 레이놀즈 수가 30000일 경우의 충돌면(impingement plate : 그림 1의 x좌표 면)과 제한면(confinement plate : 그림 1의 y좌표 면 및 각 젯트출구 사이의 면)을 따른 압력분포를 나타낸 그림으로, 층류와 천이유동분포와 비교해보면 전체적으로는 유사한 거동을 보여주지만 세밀하게는 차이가 보인다. 우선, 충돌면을 따른 벽면압력분포에서 난류유동의 분포가 층류유동에 비해 완만함을 알 수 있다. 그러나 각 젯트출구 단면에서의 압력구배는 난류유동의 경우가 더욱 심해져서 직교류의 영향이 더욱 강하게 작용하고 있음을 알 수 있다. 특히 난류유동의 경우 다섯번째 젯트에서 급격한 압력회복(역압력구배)이 보여지는데 이는 전형적인 난류유동의 압력분포 특성으로 벽면젯트유동이 채널유동으로의 빠르게 발전해 감을 의미한다. 또한 강한 역압력구배에도 불구하고 난류유동의 큰 모멘텀으로 인한 박리는 발생하지 않았다.

한편 그림 7에서 제한면을 따른 압력분포를 살펴보면, 젯트와 젯트 사이에서 벽면을 따른 압력변화는 거의 없고 젯트출구 단면에서의 압력변화는 심하게 일어나는 흥미로운 사실을 발견할 수 있다. 이와같은 젯트출구 단면에서의 압력변화는 젯트출구에서의 유량이 증가할수록 심해지고, 이 압력차이는 자유젯트를 하류쪽으로 휘게 만든다.

본 연구에서는 천이유동 영역인 레이놀즈 수 5000 부터 난류유동에너지 수송방정식을 적용하였으며, 그림 8에서 레이놀즈 수 30000의 Case 1,

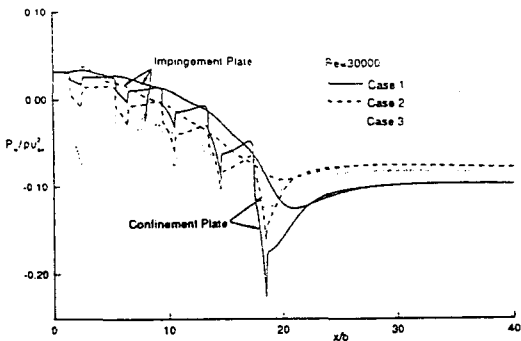


Fig. 7 Comparison of wall pressure for 3-different distributions of mass flow rate for $Re=30000$.

Case 2 및 Case 3의 모든 경우에서 젯트출구의 경계 부근에서 가장 강한 난류에너지의 생성을 살펴볼 수가 있다. 또한 완전히 발달된 하류의 채널유동에서도 난류운동에너지의 완전한 소멸을 보이지 않고 있다. 이는 상류에서 형성된 강한 직교류가 난류운동에너지를 수송하는 동승효과

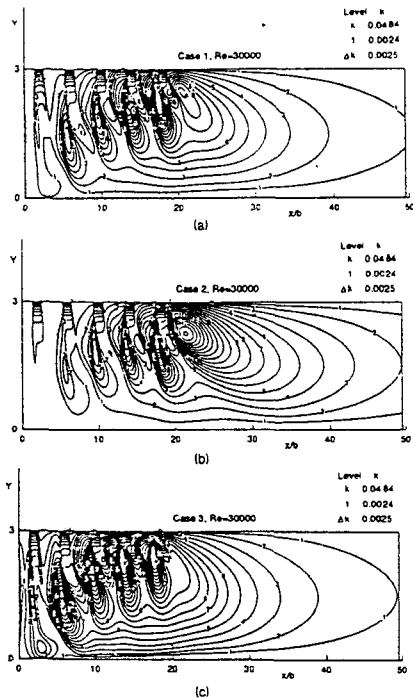


Fig. 8 Comparison of turbulent kinetic energy distributions of for $Re=30000$.

(entrainment effect)의 결과로 믿어진다. 다시 말하면 상류젯트에 의해 형성되는 직교류와 젯트가 충돌하는 유동영역에서 난류운동에너지가 강하게 생성됨을 보여주고 있다. 이는 Case 3의 경우(첫번째 젯트출구유량이 가장 큼) 첫번째 젯트의 경계 부근에서는 상대적으로 약한 난류운동에너지가 생성된다는 사실과도 일치하는 판단이다.

그림 9는 층류유동, 천이유동 및 난류유동에 걸쳐 각 충돌면에서의 벽면마찰계수 $C_f (= \tau_w / \rho U_{jet})$ 를 유량분포에 따라 비교도시한 그림으로 벽

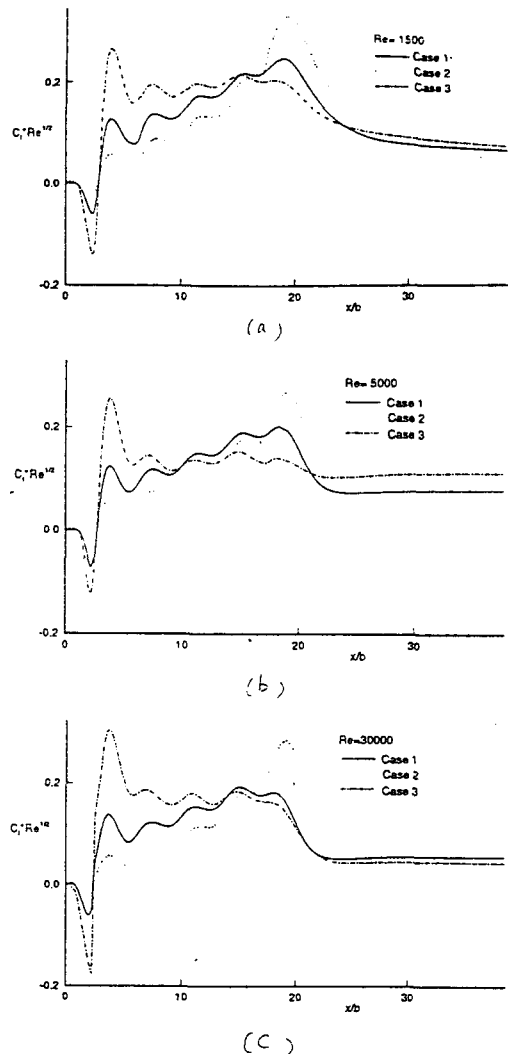


Fig. 9 Comparison of skin friction coefficient for 3-different distributions of mass flow rate.

면마찰계수는 레이놀즈 수에 대하여 3가지 유량 분포 모두 동일한 의존성 즉 0.5승에 반비례함을 알 수 있고, 유량분포의 조절로 충돌면의 벽면마찰계수 분포를 제어할 수 있음을 보여주고 있다. 특히 Case 3의 경우는 5개의 젯트유동영역($x/b < 20$)에서 거의 균일한 벽면마찰계수를 보이고 있으므로, 전자장비의 이산열원을 다중젯트를 이용하여 균일하게 냉각 하고자 할 경우 적합한 유량분포의 한 예라고 할 수 있겠다.

그림 9의 천이와 난류영역인 (b)와 (c)에서도 층류의 경우인 (a)의 결과와 비교할 때 유동특성이 젯트유동영역에서 정성적으로 매우 유사한 분포를 보이고 있다. 이는 직교류가 충돌면 부근의 유동을 크게 가속하여 층류유동의 특성이 천이유동에서도 그대로 유지되고 있음을 나타내고 있다.

4. 결론

직교류를 가진 5개의 이차원 다중젯트의 유동 특성을 층류, 천이 및 난류유동에 걸쳐 수치해석적으로 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

1) 완전히 발달된 층류유동은 $Re=1000$ 이상에서 유량분포와는 무관하게 존재하였으며, 천이가 채널의 하류에서 시작되어도 젯트 유동영역에서는 층류의 완전히 발달된 유동형태가 그대로 지속되었다. 또한 레이놀즈 수가 증가함에 따라 완전히 발달된 난류유동이 존재함을 알 수 있었다.

2) 표면마찰계수는 완전히 발달된 난류유동에서도 레이놀즈 수의 0.5승에 반비례 한다는 것이다. 이러한 의존성은 직교류가 존재함으로써 나타난 결과로 믿어진다. 직교류는 충돌젯트가 유기하는 충돌벽면에서의 강한 난류운동에너지의 생성을 크게 감소시켜서 충돌벽면 부근의 유동을 레이놀드 수의 크기로는 난류 유동영역임

에도 불구하고 층류와 매우 유사한 형태로 만든다.

3) 층류, 천이 및 난류영역에 걸쳐 3가지의 서로 다른 젯트출구에서의 유량분포의 조절로 충돌면의 벽면마찰계수 분포를 제어할 수 있음을 알 수 있었고, 특히 Case 3의 경우는 5개의 젯트 유동영역에서 거의 균일한 벽면마찰계수를 보이고 있으므로, 전자장비의 이산열원을 다중젯트를 이용하여 균일하게 냉각 하고자 할 경우 적합한 유량분포임을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. B. E. Launder and B. I. Sharma. 1974. Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disk. *Letters in Heat and Mass Transfer* 1 : 131~138.
2. G. L. Whidden. 1992. Heat transfer and flow characteristics of two-dimensional jets impinging on heated protrusions with crossflow of the spent air. *J. Electronic Packaging* 114 : 81~ 87.
3. M. A. Leschziner and W. Rodi. 1981. Calculation of annular and twin parallel jets using various discretization schemes and turbulence model variations. *J. Fluids Eng.* 103(2) : 352~360.
4. R. C. Schmidt and S. V. Patankar. 1988. Two-equation low Reynolds number turbulence modeling of transitional boundary layer flows characteristic of gas turbine blades. NASA CP 4145.
5. S. J. Downs and E. H. James. 1987. Jet impingement heat transfer - A literature survey. ASME Paper No. 87-HT-35 ASME New York.
6. S. V. Patankar. 1980. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Pub. Co.

7. T. Hayase, J. A. C. Humphery and R. Greif.
1992. A consistently formulated QUICK
scheme for fast and stable convergence using
finite volume iterative calculation procedu-
res. J. Computation Physics 98 : 108~118.