

정상상태의 이차원 슬롯 충돌제트에 관한 수치 해석

박태현* 최형권** 유정열***

Numerical Simulation of Two-Dimensional Impinging Slot Jet

Tae Hyun Park*, Hyoung Gwon Choi** and Jung Yul Yoo***

Key Words: Confined Impinging Slot Jet , $k - \omega$ Model , SIMPLE based FEM

Abstract

The characteristics of laminar and turbulent slot impinging jet flows are examined using segregated FEM with SUPG. Turbulent flows are modeled using Wilcox⁽¹⁾ $k - \omega$ turbulence model . The results are validated by comparing with velocity field of the existing experimental data . The distance of the target plate from the nozzle varies between 2, 4 and 5 times the slot jet width. Present study shows that the $k - \omega$ model gives results which agree well with the existing experimental data. In turbulence flows, the velocity profile of present calculation is more accurate than the existing numerical calculations. In laminar flows, We found tertiary vortex which was not found in the previous numerical study by M. chen⁽⁶⁾ et al due to the numerical difference.

기호설명

- B : 제트입구의 너비
- C_f : 무차원 표면마찰계수
- H : 제트입구에서 타겟면까지의 거리
- L : 전체 영역의 x 방향 길이
- Re : 레이놀즈 넘버 ($Re = V_{in} B \nu^{-1}$)
- u : x 방향 속도 성분
- v : y 방향 속도 성분
- Sh : 셔우드 넘버

슬롯제트는 이용가치가 높아 예전부터 많은 연구가 이루어진 부분이기도 하다.

Confined 충돌제트의 유동장은 매우 복잡하여, 충돌중심에서 이루어지는 Stagnation Flow에서 발달한 유동은 타겟면을 쫓아가면서 급격한 유선의 변화를 보이며 벽제트의 형태로 발달한다. 이 과정에서 강한 역압력 구배와 함께 Confined Wall에 의한 재순환 영역의 형성도 같이 이루어진다.

1. 서론

충돌제트는 입구로부터 냉각 및 가열 유체를 타겟이 되는 표면에 직접 분사시켜 국소적으로 열전달 및 물질 전달 효과를 높일수 있는 효율적인 방법으로 산업적인 이용이 활발하다. 그 중에서도 이차원 슬롯에서 분사되는 형태의 Confined

본 연구에서는 Fig. 1에서 보여지는 바와 같이 정지되어 있는 Target Wall에 분사되는 단일슬롯제트의 경우에 대해 수치해석을 수행하였다.

Polat등⁽²⁾은 다양한 Reynolds 수 범위에서 국소적인 열전달 계수에 대한 측정을 수행한 바 있고, Ashforth-Frost⁽³⁾는 $H/B = 4, 9.2$ 의 경우에 실험을 수행하여 전반적인 속도장과 난류량을 측정하였다.

실험적인 연구와 더불어 많은이들이 수치계산을 통해 이 유동장을 연구하였는데, Hin등⁽⁴⁾은

* 비회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부

** 회원, BK21 서울대학교 사업단

*** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

LDV를 이용한 실험과 수치계산을 병행하여 $100 < Re < 400$ 의 경우에 대한 연구를 수행하였고, M. Dianat등⁽⁵⁾은 $k-\epsilon$, Second Closure Model을 이용 Axisymmetric 과 슬롯제트의 형태에 대해 계산을 수행하여, Stagnation 포인트와 벽제트 영역의 경우 실험과 비교하여 Second Moment Closure Model 이 비교적 잘 맞는다는 것을 확인하였다.

M. Chen등⁽⁶⁾은 Electrochemical 방법을 이용하여 층류 층돌제트에 대해 실험을 수행하고 계산도 시도하였다.

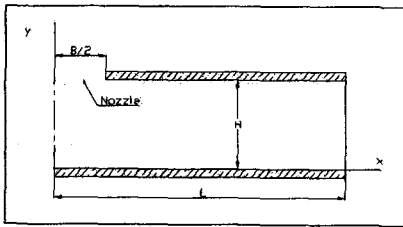


Fig. 1 Schematic diagram of the simulation

최근들어 Wilcox⁽¹⁾에 의해 제안된 $k-w$ Model 이 층돌제트와 같은 강한 역압력 구배를 가진 복잡한 유동에 쓰여왔다.

Heyerichs-Pollard⁽⁷⁾는 여러 다른 $k-\epsilon$ 계열의 모델과 더불어 $k-w$ 모델을 가지고 채널, 층돌제트, 후향계단 등과 같은 다양한 유동장의 형태에서 비교 분석, 실험치와 비교 검증하였는데 여기서 $k-w$ 모델이 층돌제트의 유동장 예측에 매우 효과적임을 지적한 바 있다.

또, 1999년 Qian-Chen⁽⁸⁾에 의해 이루어진 수치 해석에 의해 예측된 유동의 속도장은 Ashforth-Frost⁽³⁾에 의해 실험 연구된 속도장과 비교되었는데 C_f 곡선이나 Nu 곡선의 경우 다른 모델에서는 찾아보기 힘들거나 잘못된 예측을 하는 두 번째 정점이 비교적 잘 나타남을 확인하였다.

본 연구에서는 위에서 확인된 바와 같이 층돌제트의 경우 우수한 예측을 하는 $k-w$ 모델과 함께 최형권등⁽⁹⁾이 개발한 유선상류도식 (SUPG)

과 SIMPLE 알고리즘을 사용한 유한요소 해석코드 이용하여 $Re = 220, 690, 11000, 20000$ 의 경우 $H/B = 2, 4, 5$ 에 대한 계산을 수행하였다.

2. 수치해석방법과 난류모델

2.1 지배방정식

최형권등⁽⁹⁾은 유선상류기법을 이용한 유한요소 SIMPLE 알고리즘이 대류가 지배적인 유동에 대해 정확하고 효과적임을 보였고, 기존의 유한체적법에서 사용되는 Upwinding 기법에 비해 같은 격자계에서 보다 정확한 해를 구할 수 있음을 보였다.

지배 방정식은 다음과 같다.

운동량 방정식의 이산화 과정과 상류도식의 적용은 참고문헌⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾ 상세히 기술되어 있다.

연속 방정식

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식

$$\frac{DU_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} ((v_{eff} D_{ij})) \quad (2)$$

$$D_{ij} = \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$$

$$v_{eff} = \nu + \nu_t$$

(1) 과 (2)를 풀기위해 ν_t 를 얻기위한 난류 모델이 필요한데 본 연구에서는 Wilcox⁽¹⁾가 제안한 $k-w$ 모델을 적용했다.

ν_t 얻기 위한 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} [(\nu + \sigma_k \star \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i}] + G - \beta \star \omega k$$

$$\frac{D\omega}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} [(v + \sigma_w v_i) \frac{\partial \omega}{\partial x_i}] + \alpha \frac{\omega}{k} G - \beta \omega^2 \quad (3)$$

$$\omega = \frac{\varepsilon}{k \beta^*}$$

$$v_i = a^* \frac{k}{\omega}$$

2.2 경계조건

전체적인 계산영역은 Fig. 1 에 나와있다. 대칭인 점을 감안해 보이는 바와 같이 전체 영역의 반만을 계산영역으로 잡았다. 계산영역은 평균적으로 $L/B = 80$ 이상이 되도록 잡았는데 벽제트가 형성되는 부분에서 역압력 구배가 다시 순압력 구배로 회복되는데 상당한 공간이 필요하기 때문이다. 경계 조건의 적용은 다음과 같다.

우선 벽 부분은 u, v 에 관해 점착조건이며 w 에 관해서는 Wilcox⁽¹⁾ 가 제안한 공식을 이용했다.

$$w = \frac{6v}{\beta y^2}, \quad k=0 \quad (4)$$

at $y^+ < 2.5$

이 조건을 쓸때 주의할 점은 Wilcox⁽¹⁾의 논문에도 나와있듯이 벽으로부터 첫 번째 노드의 y^+ 가 2.5를 넘지 않아야 한다는 점이다.

대칭경계조건으로 아래와 같은 식을 적용했다.

$$u=0, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

제트 출구에서의 난류량은 아래식에 의해 주어진다.

$$k = \frac{3}{2} (I v_i)^2 \quad (6)$$

위 식에서 v_i 은 제트의 입구 속도이며 평평한 프로파일로 가정했다. I 는 난류강도로서

$$I = \sqrt{(u'^2 + v'^2 + w'^2)/3} / (v_i) \quad (7)$$

로 정의된다.

채널 출구에 해당하는 부분은 충분히 완전발달한 유동이라 가정하여 대기압을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 층류유동의 해석

계산을 검증하기 위해 우선 중심차분기법 (Central Difference Scheme)을 이용해 계산한 결과와 이번에 본 연구에 쓰인 유선 상류도식을 이용한 결과 그리고 참고문헌⁽⁶⁾에서의 수치계산한 결과를 비교하였다.

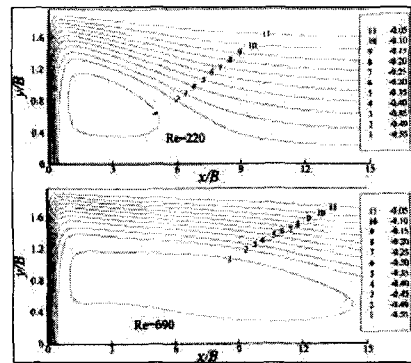


Fig. 2 Streamlines of laminar flow $H/B = 2$ by Chen⁽⁶⁾

Hin등⁽⁴⁾ 은 1984 년 그들의 논문에서 Confined 층돌제트가 가지는 장점중의 하나인 국소적으로 활발한 물질전달 효과에 관해 연구하면서 이차원 슬롯 층돌제트에 관해 수치해석을 시도하여 제트의 영역을 다섯 가지로 분류한 바 있다. 그들은 여기서 국소 셔우드 넘버가 감소하다 다시 증가하는 현상에 대해 박리의 존재를 말함으로써 이를 설명했다.

그러나 그들이 여기서 밝힌 박리에 의한 순환 (Circulation) 은 너무나 과소평가 되어 있어 이를 토대로 구한 셔우드 넘버 곡선에서의 국소적인 정점의 구간도 작게 예측되어 있을 가능성이 있다. 이와 마찬가지로 M. Chen등⁽⁶⁾ 이 FVM 으로

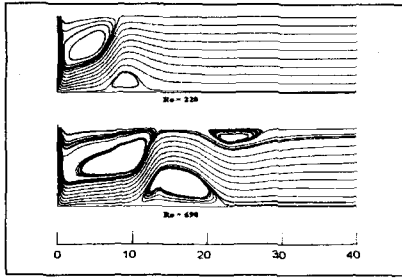


Fig. 3 Streamlines of the present simulation with $H/B = 2$, $Re = 220$, 690 with SUPG. x is normalized by B

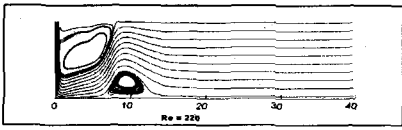


Fig. 4 Streamlines of laminar flow at $Re = 220$ and $H/B = 2$ with central difference scheme. x is normalized by B

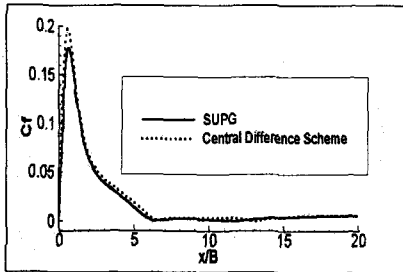


Fig. 5 Comparing C_f curve of laminar flows with SUPG and central difference. at $Re = 220$, $H/B = 2$

계산한 논문에서도 같은 경향을 확인할 수 있다. 전반적으로 볼 때 M. Chen 등⁽⁶⁾에서 계산한 결과는 우선 유동이 너무나 단순화되어 있음을 알 수 있다. 첫 번째 순환(Circulation) 이후에 나오는 두 번째 순환(Circulation)이 작게 예측되어 있으나 이는 본 연구의 결과와 매우 틀린 부분이다.

공간차분기법으로 중심차분기법을 이용한 계산 결과와 본 연구의 결과는 잘 일치하고 있음을 볼 수 있어 인공점성을 과다하게 사용했을 시 수렴성은 좋아지나 계산결과에는 좋지 않은 영향을

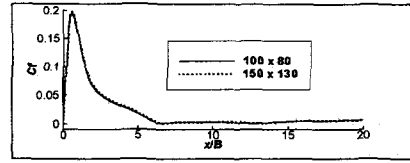


Fig. 6 Test of grid independence with 100×80 , 150×130 . central difference scheme

미침을 확인 할 수 있었다. 인공적인 점성을 첨가하지 않고서는 $Re = 220$ 이상의 계산에는 너무나 많은 그리드가 필요하여 수렴에 무리가 있었음을 밝힌다. 제트 입구에서는 채널 층류 유동이 완전히 발달한 후의 속도 프로파일을 주었으나 평평한 프로파일로 주었을 때와 비교해 큰 차이를 보이지는 않았다.

3.2 난류 유동의 해석

기존의 비교 대상인 연구가 $H/B = 4$, 5 인 경우에 대한 결과이므로 동일한 경우에 대하여 수치 해석을 수행했다.

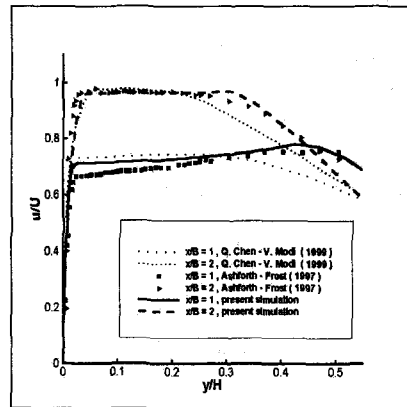


Fig. 7 Comparison of computed x -component of the mean velocity with the experimental data for $Re = 20,000$ and $H/B = 4$

$Re = 20,000$ 에서는 기존의 실험 연구에서 구한 속도 프로파일과 비교하였다. $H/B = 4$ 이며 350×100 의 그리드를 사용했다.

실험 조건에서와 같은 입구 난류량 1%를 주었으며 속도 프로파일은 평평하다. 결과는 Fig. 7에서 볼 수 있다. y 축은 입구 속도 u_i 로 정규

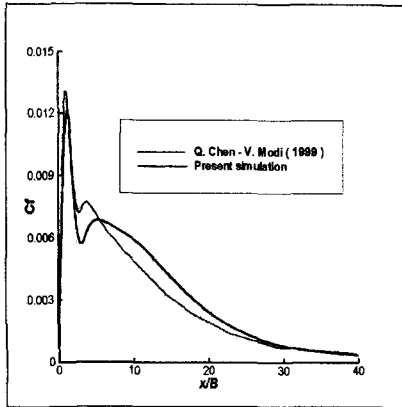


Fig. 8 Skin friction variation with x/B for $Re = 11,000$ and $H/B = 5$

화된 속도이며 x 축은 제트의 폭 B 로 정규화된 거리이다. 그림에서 볼 수 있듯이 계산 결과와 실험 결과가 매우 잘 일치함을 볼 수 있다. 특히 y/B 가 증가함에 따라 보이는 속도 프로파일의 곡선 추이를 잘 따라가는 것을 확인할 수 있다.

$Re = 11,000$ 에서 계산한 결과는 C_f curve를 이용, 선행된 연구 결과와 비교하였다. 참고문헌⁽⁸⁾의 결과와 비교해 볼 때 우선 처음 정점에서 수치가 낮고 두 번째 정점의 영역이 비교적 넓고 완하게 분포되어 있음을 볼 수 있다. 이는 본 연구에서 사용한 SUPG 가 이전의 다른 연구에서 사용한 공간차분 기법에 비해 수치확산이 적어 역압력구배를 좀더 정확하게 예측한데 기인한 것으로 보인다. 덧붙이자면, 역압력구배의 영역이 더 넓어져 기존의 계산에 비해 더 큰 계산영역을 필요로 했다. 제트출구면에서의 난류량은 비교대상과 같은 4%로 주었으며 그리드사이즈는 350×100 이다. 벽에서 첫 번째 노드는 약 $y^+ = 1$ 을 유지하였다.

4. 결론

충돌제트의 가장 큰 특징은 국소적인 열전달 및 물질 전달이 활발하다는 것이다. 따라서 앞선 수치해석 연구들의 검증은 주로 Nu , C_f 수 등의 데이터를 실험치와 비교하므로써 이루어졌다. 본 연구에서는 아직 열전달에 관한 부분의 데이터를 실지 않았으나 에너지 방정식을 추가로 코딩하여

이에 관한 데이터도 축적할 목적으로 수치계산을 수행하고 있다.

1999 년에 Qian등⁽⁸⁾은 C_f curve 를 도시하여 $k-w$ 모델이 두 번째 정점을 잘 예측함을 확인했으나 속도 프로파일을 실험과 비교해 볼 때 과도한 인공점성으로 인해 경계층을 조금 벗어난 부분부터는 그 추이를 잘 따라가지 못했다. 기존의 결과에서 전체 유동장이 과도한 확산으로 인해 실제와 다른 모습을 보인다는 것에 착안한 연구팀은 SUPG를 사용하여 좀더 정확한 데이터를 얻어 낼 수 있었다.

또한, 공간차분기법의 적용에 따라 충돌제트의 유동 예측이 얼마나 큰 오차를 가질 수 있는지도 아울러 확인했는데, 기존의 연구결과와 현 연구에서 얻어낸 데이터에서 알 수 있듯이 인공적인 점성을 과도하게 적용할 경우 유동장을 지나치게 단순화 시켜 실제 유동장과 많은 차이가 나는 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 이에 주목하여 최형권등⁽⁹⁾이 사용한 유선 상류기법을 적용하여 같은 수준의 그리드 정확도를 가지고 더욱 정확한 값을 얻을 수 있음을 확인했다. 이에 따르면 C_f curve 에 있어 두 번째 정점이 생기는 부분이 비교논문의 자료와는 다르게 그 영역이 비교적 크고 기울기도 완만함을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 포항산업과학연구원(RIST)과 BK21 사업단의 지원으로 이루어 졌음을 밝힙니다.

참고문헌

- (1) D.C. Wilcox, "Turbulence Modeling for CFD", DCW Inc., La Canada, CA, 1994
- (2) S. Polat, A.S. Mujumdar, W.J.M. Douglas, "Impingement heat transfer under a confined slot jet. Part I. Effect of surface throughflow", *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol 69 (1), pp.266-273, 1991
- (3) S. Ashforth-Frost, K. Jambunathan, C.F. Whitney, "Velocity and turbulence characteristics of a semiconfined orthogonally impinging slot jet", *Experimental Thermal and Fluid Science.*, Vol. 14, pp.60-67, 1997
- (4) Hin-Sum Law and Jacob H. Masliyah. "Mass Transfer due to a Confined Laminar Impinging Two-Dimensional Jet", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 27, No. 4, pp.529-539, 1984
- (5) M. Dianat, M. Fairweather, W.P. Jones, "Predictions of axisymmetric and two-dimensional impinging turbulent jets", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol 17, pp. 530-538, 1996
- (6) Mingyong Chen, Radek Chalupa, Alan C. West, Vijay Modi, "High Schmidt mass transfer in a laminar impinging slot jet flow", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol 43, pp. 3907-3915, 2000
- (7) K. Heyerichs and A. Pollard, "Heat transfer in separated and impinging turbulent flows", *International Journal of Heat and Mass Transfer.*, Vol 39, pp.2385-2400, 1996
- (8) Qian Chen, Vijay Modi, "Mass transfer in turbulent impinging slot jet", *International Journal of Heat and Mass Transfer.*, Vol 42, pp.873-887, 1999
- (9) H. G. Choi and J. Y. Yoo, "Streamline upwind scheme for the segregated formulation of the Navier-Stokes equation," *Numerical Heat Transfer.*, Part B. Vol. 25, pp.145-161, 1994
- (10) F. R. Menter. "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications", *AIAA Journal*, Vol 32, No. 8, August 1994
- (11) Rice, J. G., and Schnipke, R. J., "An Equal Order Velocity Pressure Formulation That Does Not Exhibit Spurious Pressure Modes", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg*, Vol. 58, pp. 135-149, 1986
- (12) Brooks, A. N. and Hughes, T. J. R., "Streamline-upwind Petrov-Galerkin formulation for convection dominated flows with particular emphasis on the incompressible Navier-Stokes equation", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg*, Vol. 32, pp. 199-259, 1982
- (13) S. T. Chung, H. G. Choi and J. Y. Yoo, "An Analysis of Turbulent Flow Around a NACA4412 Airfoil by Using a Segregated Finite Element Method", *International Journal of KSME*, Vol. 12, No. 6, pp. 1194-1199, 1998
- (14) 최형권, "분리유한요소법을 이용한 Navier-Stokes 방정식의 해법에 대한 연구", 서울대대학원 기계공학과 공학박사학위논문, 1996