CFD에 의한 對向제트流의 流動特性에 관한 研究

안 경 훈* · 이 영 호**

A Study on Flow Characteristics of Counter-Jet Flow by CFD

Kyoung-Hun AHN · Young-Ho LEE

Abstract

The present numerical study is aimed to investigate flow characteristics of two Counter Jet flow by CFD. Numerical method based upon revised SOLA scheme which secures conservation form of convective terms on irregular grids by interpolating the variables appearing in staggered meshes. Computation was carried out for four kinds of Reynolds number, 1.0×104, 2.1×104, 3.5×104, and 4.5×104 defined by two nozzle-pipe diameter and time-mean driving velocity. Initial flow characteristics show the developing stages of sheared mixing layer and adverse pressure gradients at the wall. Results show that periodic vortex shedding from the counter-jet flow is profound and related unsteady flow characteristics prevail over the counter jet region. Spatial distribution of pressure and kinetic energy, fluctuation of static wall pressure, together with x-direction velocity components are examined in terms of instantaneous and time mean point of views.

As the CFD result, the counter jet flows are divided into three temporal stages : a time of initial flow, transition flow, fully developed flow. At initial flow was showed symmetrical stage. Transition flow field appears unsymmetrical characteristics. Complicate vortex was showed in upper and lower of nozzles at fully developed flow field.

* 한국해양대학교 기계공학과 석사과정 열유체전공

** 한국해양대학교 기계공학과 교수

1. 서 론

대향제트류(counter-jet flow)는 쉽게 관찰될 수 있는 유동현상은 아니다. 이러한 유동현상이 발생하는 것을 관찰할 수 있는 것은, 홍수와 같은 자연재해 시에 대량의 유수가 한꺼번에 관로로 유입되는 지하수로와 같은 곳과, 최신형 가정용 냉장고등에 채용된 것이 있다. 또한 열 교환기 등의 thermal diffuser의 대칭형상등에서도 보여진다. 대향제트류(counter-jet flow)는 노즐의 대칭형상도 다양하게 관찰된다. 예를 들면, 자동차 엔진의 내부에서 inject valve 등은 초기의 모델들에서는 각도가 없이 배열되다가, 근래에 와서는 valve 간 유입되는 노즐 간격이 45°이상 되는 구조를 가진 것도 있다. 또, 지하수로에서 한꺼번에 많은 양의 유수가 동일한 수로를 따라서 흐르게 될 때에 벽면과 그 주위의 시설물에 많은 영향을 미칠 것으로 예상된다. 그 결과로 하수관의 표면 등에 균열이나 파손 등을 초래할 수도 있을 것이다. 그리고, 열의 흐름이 서로 대칭적인 형상으로 맞부딪힐 때 그 효과 또한 열 교환기의 성능에 많은 영향을 미칠 것으로 예상된다. Kato등[1]은 two-counter flow 사이의 thermal diffusion을 수치 해석하였다. 이들은 레이놀즈수를 각각 $Re=2.1x10^4$, $Re=3.5x10^4$, $Re=4.5x10^4$ 으로 하여 압력값의 평균을 비교 하였다.

2. 지배방정식과 격자 생성방법

2.1 지배방정식

유동의 지배방정식에는 질량, 운동량, 에너지 보존관계를 표시하는 연속방정식, 운동방정식, 에너지방정식의 3가지가 있다. 이 3가지 방정식들은 압축성 유체, 비 압축성 유체 모두에서 적용되어지는데, 동일한 유체로 이루어지는 계(system)에 질량불변의 법칙, 뉴턴의 운동 제2법칙, 열역학 제1법칙 등을 적용함으로써 유도된다.

본 연구에서는 유체의 물리적 현상을 기술하는 지배방정식으로 Navier-Stokes 방정식을 적용하였다. Navier-Stokes 방정식은 연속체 유동 중에서 어느 한 점을 중심으로 유체입자의 운동을 표현하는 방정식으로 구성되어 있다. 이 경우에는 복잡한 형상의 물체에 대해서는 해석적인 해가 얻어지기 어려우므로 격자를 부등간격으로 나누는 다른 방법이 필요하다. 2차원의 경우 x, y성분에 대한 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{2.1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + g_x + \nu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \tag{2.2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial y} + g_y + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \qquad (2.3)$$

여기서 변수를 무차원화 하는 방식이 도입된다. 무차원화 라는 것은 식에서 사용된 각종 변수를 대표 값으로 표현하는 방법을 말한다.

여기에서 압력 p는 밀도 ρ로 나눈 값으로 만일 변수를 무차원화하는 경우에는 대표속도 U=1이라 가정하고 사용하면 $2p$의 값이 그대로 압력계수의 계산에 이용된다. (g_x , g_y)는 각각 (x,y) 방향의 중력가속도이며 ν는 동점성계수를 표시한다.

그림x 와 같은 변수분포를 갖는 부등간격 격자 상에서 차분근사를 행하였다. 본 연구에서는 보존형의 스킴중에서 MAC법의 중심차분과 수치안정성에 기여하는 부분도너셀(partial donor cell)의 풍상차분을 병용하였다. 다음과 같이 부등간격에 대한 보정식을 구하였다. 식(2.1), (2.2), (2.3)을 부등간격 격자 상에서 차분화 하면

$$u^{n+1}_{i,j} = u^n_{i,j} + \Delta t \left[\frac{p^n_{i,j} - p^n_{i+1,j}}{(A+B)/2} + g_x - FUX^n - FUY^n + VISX^n \right] \qquad (2.4)$$

$$v^{n+1}_{i,j} = v^n_{i,j} + \Delta t \left[\frac{p^n_{i,j} - p^n_{i,j+1}}{(C+D)/2} + g_y - FVX^n - FVY^n + VISY^n \right] \qquad (2.5)$$

와 같이 되고, 대류항 TUX, TUY, TVX, TVY 및 점성항 VISX, VISY는 다음과 같이 된다. 대류항이란 동일유체입자가 겪는 대류를 수반하는 단위 시간당의 변화를 나타낸다.

$$TUX = \frac{\partial (u \cdot u)}{\partial x} = (1-\alpha) \frac{u_R \cdot u_R - u_L \cdot u_L}{(A+B)/2} + \alpha \cdot PDT \qquad (2.6)$$

$$PDT = \frac{u_R \cdot u_{i,j} - u_L \cdot u_{i-1,j}}{(A+B)/2}, \qquad \text{if } (u_R \geq 0) \text{ and } (u_L \geq 0)$$

$$PDT = \frac{u_R \cdot u_{i,j} - u_L \cdot u_{i,j}}{(A+B)/2}, \qquad \text{if } (u_R \geq 0) \text{ and } (u_L < 0)$$

$$PDT = \frac{u_R \cdot u_{i+1,j} - u_L \cdot u_{i-1,j}}{(A+B)/2}, \qquad \text{if } (u_R < 0) \text{ and } (u_L \geq 0)$$

$$PDT = \frac{u_R \cdot u_{i+1,j} - u_L \cdot u_{i,j}}{(A+B)/2}, \qquad \text{if } (u_R < 0) \text{ and } (u_L < 0)$$

$$TUY = \frac{\partial(v \cdot u)}{\partial y} = (1-\alpha)\frac{v_U \cdot u_U - v_D \cdot u_D}{D} + \alpha \cdot PDT \qquad (2.7)$$

$$PDT = \frac{v_U \cdot u_{i,j} - v_D \cdot u_{i,j-1}}{D}, \qquad \text{if } (v_U \geq 0) \text{ and } (v_D \geq 0)$$

$$PDT = \frac{v_U \cdot u_{i,j} - v_D \cdot u_{i,j}}{D}, \qquad \text{if } (v_U \geq 0) \text{ and } (v_D < 0)$$

$$PDT = \frac{v_U \cdot u_{i,j} - v_D \cdot u_{i,j-1}}{D}, \qquad \text{if } (v_U < 0) \text{ and } (v_D \geq 0)$$

$$PDT = \frac{v_U \cdot u_{i,j} - v_D \cdot u_{i,j}}{D}, \qquad \text{if } (v_U < 0) \text{ and } (v_D < 0)$$

$$TVX = \frac{\partial(u \cdot v)}{\partial x} = (1-\alpha)\frac{u_U \cdot v_U - u_P \cdot v_P}{A} + \alpha \cdot PDT \qquad (2.8)$$

$$PDT = \frac{u_U \cdot v_{i,j} - u_P \cdot v_{i-1,j}}{A}, \qquad \text{if } (u_U \geq 0) \text{ and } (u_P \geq 0)$$

$$PDT = \frac{u_U \cdot v_{i,j} - u_P \cdot v_{i,j}}{A}, \qquad \text{if } (u_U \geq 0) \text{ and } (u_P < 0)$$

$$PDT = \frac{u_U \cdot v_{i+1,j} - u_P \cdot v_{i-1,j}}{A}, \qquad \text{if } (u_U < 0) \text{ and } (u_P \geq 0)$$

$$PDT = \frac{u_U \cdot v_{i+1,j} - u_P \cdot v_{i,j}}{A}, \qquad \text{if } (u_U < 0) \text{ and } (u_P < 0)$$

$$TVY = \frac{\partial(v \cdot v)}{\partial y} = (1-\alpha)\frac{v_Q \cdot v_Q - v_L \cdot v_L}{(C+D)/2} + \alpha \cdot PDT \qquad (2.9)$$

$$PDT = \frac{v_Q \cdot v_{i,j} - v_L \cdot v_{i,j-1}}{(C+D)/2}, \qquad \text{if } (v_Q \geq 0) \text{ and } (v_L \geq 0)$$

$$PDT = \frac{v_Q \cdot v_{i,j} - v_L \cdot v_{i,j}}{(C+D)/2}, \qquad \text{if } (v_Q \geq 0) \text{ and } (v_L < 0)$$

$$PDT = \frac{v_Q \cdot v_{i,j+1} - v_L \cdot v_{i,j-1}}{(C+D)/2}, \qquad \text{if } (v_Q < 0) \text{ and } (v_L \geq 0)$$

$$PDT = \frac{v_Q \cdot v_{i,j+1} - v_L \cdot v_{i,j}}{(C+D)/2}, \qquad \text{if } (v_Q < 0) \text{ and } (v_L < 0)$$

위의 식에서 PDT는 부분도너항(Partial Donor Term)을 의미하고, α는 풍상차분에 대한 가중계수이다. 확산항은 2차정도의 중심차분을 이용하며, 다음과 같이 압력항과 함께 부등간격 격자의 보정을 행하였다.

$$VISX = \nu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \tag{2.10}$$

$$= \nu\left[\frac{u_{i+1,j} - (1+r)u_{i,j} + r\,u_{i-1,j}}{r\cdot(1+r)\Delta x_i^2/2} + \frac{u_{i,j+1} - (ss+1)u_{i,j} + ss\,u_{i,j-1}}{CC\cdot D}\right]$$

$$VISY = \nu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \tag{2.11}$$

$$= \nu\left[\frac{v_{i+1,j} - (1+rr)v_{i,j} + rr\,v_{i-1,j}}{BB\cdot A} + \frac{v_{i,j+1} - (s+1)v_{i,j} + s\,v_{i,j-1}}{s(s+1)\Delta y_j^2/2}\right]$$

여기서,

$r = B/A$, $s = C/D$, $rr = BB/AA$, $ss = CC/DD$
$AA = (F+A)/2$, $BB = (A+B)/2$, $CC = (C+D)/2$, $DD = (D+F)/2$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{p_{i+1,j} - p_{i,j}}{(A+B)/2}, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{p_{i,j+1} - p_{i,j}}{(C+D)/2} \tag{2.12}$$

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_{i,j} \fallingdotseq \frac{2}{s(s+1)} \cdot \frac{u_{i+1,j} - (1+s)u_{i,j} + su_{i-1,j}}{A^2}, \quad s = B/A \tag{2.13}$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_{i,j} \fallingdotseq \frac{2}{(A+B)}(p_{i-1,j} - p_{i,j}) \quad \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)_{i,j} \fallingdotseq \frac{2}{(C+D)}(p_{i,j+1} - p_{i,j}) \tag{2.14}$$

여기서 대류항에 도입된 가중계수 α에 대하여 주목해 보면, α=.4 일 때 대류항의 공간차분은 중심차분으로 되고, α=1 일 때 풍상차분 만으로 된다. 양자의 차분은 각각의 특징을 가지고 있기 때문에 그 특징을 가중계수 α를 통하여 조절함으로써 계산의 안정성을 유지할 수 있게 된다.

4. 결 론

대향제트류(counter jet flow)의 유동특성을 전산유체역학의 기법으로 수치 해석해

보았다. 본 연구에서는 노즐의 주위와 노즐의 중심부를 레이놀즈수를 변경하면서 시간이 흐름에 따라 관찰하는 연구를 하였다.

그 결과 노즐의 주위로 방출된 흐름들에서 대향제트류의 유동패턴을 알 수 있었다. 먼저 대향제트류의 레이놀즈수 $Re=1.0x10^4$일 때는 무차원 시간 T=145.0일 때부터 흐름들이 서로 간섭을 일으켜서 T=315.0정도의 시간부터는 노즐의 상부와 하부 그리고, 중심부에서 흐름이 급격히 변하는 유동특성을 보여주었다. 특히, 초기에는 좌측 노즐의 상부와 우측 노즐의 하부가 대칭을 이루었고, 무차원시간 T=315.0이후에서는, 좌측 노즐의 상부쪽으로 먼저 동일한 흐름을 보이다가 다시 우측노즐의 하부로 흐름이 변동되었다. 그러한, 유동이 발생한 이후에는 좌측 노즐의 하부와 우측 노즐의 상부가 서로 대칭인 형상으로 T=315.0이전에 비해서 반대방향으로 흐름을 유지하였다. T=494.0이후에는 이러한 현상이 주기적으로 반복되면서 흐름이 안정화 되어 갔다.

$Re=2.1x10^4$에서도 이러한 현상은 동일하게 관측되었으나 그 흐름의 주기가 상대적으로 빨라졌다.

$Re=3.5x10^4$, $Re=4.5x10^4$,의 경우에 있어서 위의 두 가지 조건과 다른 점은 흐름의 진행 시간이 다소 앞당겨 졌으며, 각 부분에 있어서 흐름의 진행속도가 빨라졌다는 것이다.

위의 계산결과에서 특이할만한 점은, 두 개의 노즐에서 나온 흐름들이 한 방향으로 이동하는 현상이 발견되었다는 것이다. 무차원시간 T=485.0까지는 흐름이 한 방향으로 흘렀다가 다시 상하 반대방향으로 교차되는 현상이 발생하다가 T=485.0이후에는 노즐의 출구로부터 한 방향으로만 흘러가는 유동특성이 관찰되었다. T=500.0이후에는 그러한 유동특성들이 안정되었다.

각각의 레이놀즈수에 따라서 그러한 특성들은 조금씩 차이를 보였지만, 대략 형성단계는 무차원시간 T=130.0일 때이고, 천이단계는 T=340.0전 후 일 때 이며, 활발하게 운동하며 안정되어 가는 상태는 T=485.0이후로 관찰되었다.

$Re=3.5x10^4$와 $Re=4.5x10^4$일 때도 유사한 특성을 보여주었다.

이상의 연구에서 레이놀즈 수에 따른 대향제트류의 유동특성을 관찰할 수 있었고, 유동의 패턴이 대칭인 형상으로만 계속되지는 않는다는 사실을 알 수 있었다. 즉, 일정시간 이후에는 흐름이 단방향 또는 반대방향으로 흐르는 특성이 있다는 사실을 알 수 있었다. 또한 압력값과 운동에너지 값으로 행한 동영상에서도 그 사실은 잘 나타난다.

차후에는 노즐의 위치정보를 다르게 주거나, 노즐사이에 구조물 형태의 각주 또는 원주등의 정보를 주어서 계산을 수행해보는 연구도 필요할 것이다.

참 고 문 헌

1. S. Kato, S. Tabejamaat, N. Maruyama, *Numerical Simulation Of Thermal Diffusion Between Two Counter-flows*, 제32회 일본전열학회 심포지움 강연논문집 Vol.1, 1997, pp.75-76.
2. Chung. S. L, and J. L. Katz, *Combustion and Flame*, Vol.61, 1985, pp. 271-284.
3. Zachariah, M. R, and H. G. Semerjian, *AIChE Journal*, Vol.35, No, 12, 1898, pp. 203-212.
4. 신병록,장근식,조강래, *전산유체역학-기초와응용-*, 大英社. 1994, pp.22-74.
5. Frank M .White,*Fluid, Mechanics(Third Edition)*, 1995, pp.41-42.
6. C. A. J. Fletcher, *Computational Techniques for Fluid Dynamics 2*, 1998 pp.101-117.
7. William H.Press/Cambridge Univ. Press, *Numerical Recipes in FORTRAN Second Edition*, 1986, pp.99-155,
8. 이영호,최장운,구영삼, *2차원 정방형 캐비티의 비정상유동특성*, 대한기계학회, 전산유체역학분과회 학술대회논문집, 1994, pp.149-167.
9. Kouremenos, D. A. Rogdakis, E. D;Houzouris, G. E Irreversible *processes in a binary two-phase counter flow*, Energy(Oxford, England), H. W. Wilson AST, 1996, pp.263-272.
10. Kachhwaha. S. S, Dhar, P. L.; Kale, S. R, *Experimental studies and numerical simulation of evaporative cooling of air with a water spray- II.* Horizontal counter flow, International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, pp.465-474.
11. Dl-Dessouky. H. T. Al-Haddad, A. Al-Juwayhel. F, *A modified analysis of counter flow wet cooling towers; Journal of Heat Transfer*, 1997, pp.614-626.
12. 손호석, 김춘식, 이영호, *2차원 장방형 각주유동의 주파수 분석*, 대한기계학회 부산지부 '95년도 추계학술대회논문집, 1995, pp.55-61.
13. Okajima, *Strouhal numbers of rectangular cylinders*, JFM 123, 1982, pp.379-398.
14. 사종엽(영남대학교),Homepage,http://ynucc.yeungnam.ac.kr/~jysah/numerical/Chap30/intro.html, Ch3.수치보간법