

직교류에서 난류제트로 유입되는 유량에 관한 고찰

김형민* · 김은필**
(1998년 6월 16일 접수)

Characteristics of an Entrainment into the Turbulent Buoyant Jet in a Cross Flow

Hyung Min Kim and Eunpil Kim

Key Words: Center Line Trajectory(중심선 궤적), Cross Flow(대향류), Entrainment(유입유량) Finite Volume Method(유한체적법), Turbulent Jet(난류 제트)

Abstract

A jet injected normally into a cross flow has been found to have the cross section of a horseshoe shape. It occurs by a twin vortex motion in the region downstream of the jet injection. Such a flow is inherently and highly three-dimensional and numerical calculations should play an important role. The three-dimensional momentum equations with buoyancy effect and energy equation are solved to obtain the velocity distributions, center-line trajectories, cross sectional shape and entrainment. The density difference is sufficiently small, so that the Boussinesq approximation is considered to be valid. The SIMPLE algorithm is applied in a staggered grid system of a calculational domain for the numerical method.

기호설명

D : 노즐 지름
I : 난류 강도
Gr : Grashof수
K : 난류 에너지
Re : Reynolds수
Pr : Prandtl수
Pr_t : 난류 Prandtl수
 Q_{jet} : 분출제트의 유량
 q_{ent} : 유입유량 구배
S : 중심궤적 축
T : 유체의 온도

T_{jet} : 분출제트의 온도
 T_{∞} : 외부유체의 온도
U, V, W : 각 방향의 유체 속도
 U_{∞} : 자유 속도
 V_{ratio} : 속도비
 V_{jet} : 분출유체의 속도
 V_{scmt} : S-축 방향의 일정 속도분포
 V_{max} : S-축 방향의 최대속도
 V_s : S-축 방향의 속도

그리스문자

α_{vr} : 제트경계 결정변수
 β : 체적 팽창율
 ϵ : 난류 소산율
 ρ : 밀도
 ν : 동점성 계수
 ν_t : 난류 동점성 계수

* CMU(Carnegie Mellon University, 미국) 연구원
** 회원, 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

1. 서론

지난 십여년동안 원형 또는 사각형 노즐로부터 분출되는 제트에 관한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 노즐로부터 분출된 제트는 외부의 유체와 혼합됨으로써 관성력을 전달하며, 분출된 유체는 외부유체가 흐르는 방향으로 진행방향이 굴절하여 중심 축으로부터 점점 더 넓게 확산하게 된다. 이와 같은 확산으로 제트의 유입유량이 증가하게 되는데, 유입유량이란 제트가 분출되고 진행됨에 따라 외부유체가 제트의 주 흐름 속으로 유입되는 유량을 나타내는 것으로 이것은 제트의 특성을 나타내는 중요한 요소가 된다. Fig. 1은 제트의 분출과 굴절 그리고 분출제트의 내부에 발생하는 와류 쌍(vortex pair)을 나타낸 것으로 역방향으로 회전하고 있다. 외부유체의 흐름이 존재하지 않는 경우를 단순 수직제트라 부르며 이 경우에는 역방향으로 회전하는 와류 쌍을 발견할 수 없다. 이는 외부유체의 영향으로 제트의 아래 영역에 역방향 흐름이 발생하여 제트의 내부에 와류 쌍이 발생되기 때문이다. 이 와류 쌍의 영향으로 제트의 단면 모양의 변화는 원형으로 시작되어 차츰 말굽 모양으로 변화하게 된다.

노즐로부터 분출되는 유체와 외부유체 사이의 속도비와 온도차는 제트의 중심케적의 변화에 큰 영향을 미치게 된다. 즉, 두 유체 사이의 온도차와 속도비는 유입유량을 제어하는 중요한 요소로서 작용한다. 유체 흐름에 의해 굴절되는 난류제트는 굴뚝으로부터 분출되는 공해가스의 확산 해석^{(1),(2)}, 충돌 제트의 혼합공정⁽³⁾과 같은 여러 분야의 산업에 이용되고 있다. 1930년대에 굴뚝에서 분출하는 연기에 관한 연구^{(4),(5)}를 시작으로 Ivanov⁽⁶⁾는 Smoke Stack Plume에서 건물의 온도를 유지시키는 데까지 분출제트를 적용하였다. 1940년대 독일에서 Kuchemann과 Weber⁽⁷⁾가 VTOL(Vertical TakeOff/Landing) 비행기 제작에 성공하였으며, 같은 시대에 미국 NACA 루이스 연구소에서도 Callaghan^{(8),(9)}에 의해 제트엔진 Combustor에서 분출되는 제트에 관한 실험을 하였다. V/STOL 비행기에 관한 연구는 흐르는 유체내부로 분출되는 제트에 관한 연구로 생각할

수 있으며, 특히 분출제트의 단면모양과 제트의 중심케적에 관심을 갖게 되었다. Chang⁽¹⁰⁾은 제트 내부에 존재하는 와류 쌍에 의한 제트의 단면모양을 예측하였으며, 또한 단면모양의 변화에 대해서도 보고하였다. 제트의 중심케적에 관한 연구로는 Fearn과 Weston⁽¹¹⁾이 실험을 통해서 제트의 중심케적을 결정하였으며 Margason⁽¹²⁾은 기존의 실험결과를 수집하여 비교 분석하여 발표하였다. Wooler⁽¹³⁾의 결과를 바탕으로 Smy와 Ransom⁽¹⁴⁾은 중심케적에 관한 방정식을 정립하였다. 제트의 유입유량에 관한 연구는 1960년대에 관심을 갖게 되었으며 Ricou⁽¹⁵⁾은 흐름이 없는 유체 속으로 분출하는 제트의 유입유량을 Hood 기술을 이용하여 측정하였다. 평판 위의 노즐로부터 분출하는 제트에 관한 해석 및 실험은 외부유체의 흐름이 없는 순수한 수직제트 또는 외부유체의 흐름이 존재하되 두 유체 사이의 온도차가 없는 등온제트에 관한 연구를 Ramsey과 Goldstone⁽¹⁶⁾이 보고하였다. 1980년대에는 컴퓨터의 발전으로 CFD를 이용한 Navier-Stokes 방정식의 해석이 가능해짐으로써 이 분야의 연구도 큰 발전이 이루어졌다. Chein과 Schetz⁽¹⁷⁾는 Navier-Stokes 방정식을 유한차분법으로, Oh와 Schetz⁽¹⁸⁾는 유한요소법을 이용하여 제트의 속도분포를 계산하였다. Oh와 Schetz는 속도비의 변화에 따른 속도, 압력분포를 실험결과와 비교하였으나 옴의 압력분포 영역에서는 잘 일치하지 않았다. 권영필⁽¹⁹⁾은 원형제트 출구에서 제트충돌면의 불안정 특성을 연구하였으며 강형석⁽²⁰⁾은 회전원판 위 3차원 경계층의 난류 특성에 관하여 실험하였다. 지금까지의 연구는 모두 등온에서 제트의 분출에 관한 속도분포, 제트의 중심케적 등에 관한 연구 또는 실험적인 열전달에 관한 논문은 보고되었지만, 흐르는 유체 속으로 온도차를 가지고 분출된 제트의 유입유량에 관한 이론적인 연구는 미비한 실정이다. Hwang⁽¹⁾은 성층유체(stratified fluid)에서 $k-\epsilon$ 모델을 사용하여 분출제트의 영향을 연구하였으나 열전달에 대한 정보는 대단히 부족하며 또한 분출제트 내부에 발생하는 와류 쌍도 발견하지 못하였다. 본 논문에서는 외부유체의 흐름과 온도차가 동시에

존재하는 경우에 유입유량의 변화가 각 파라메터들에 따라 어떻게 변하는가를 연구하기 위하여 무차원수의 변화에 따른 유입유량의 변화를 고찰하였다.

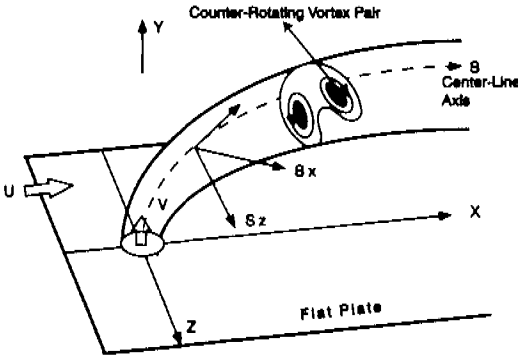


Fig. 1 Sketch of a jet in a cross flow.

2. 지배방정식

비압축성 유체가 평판 위에 있는 지름 D인 노즐을 통해 속도 V_{jet} 를 가지고 평판에 수직방향으로 분출된다. 이때 평판 위에서는 노즐을 통해 분출되는 유체와 같은 유체가 일정 속도 U_{∞} 로 흐르고 있다(Fig. 1 참조) 외부유체의 흐름이 없는 경우는 정지해 있는 유체 속으로 분출하는 수직제트로 생각할 수 있다. 그러나 외부유체가 흐르고 있는 경우는 분출유체의 굴절 현상을 해석하기 위해 3차원 난류유동 해석이 필요하게 된다. 정상, 비압축성 유체의 연속 방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} ((\nu + \nu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g\beta(T - T_{jet}) \hat{k} \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} ((\frac{\nu}{Pr} + \frac{\nu_t}{Pr_t}) \frac{\partial T}{\partial x_j}) \tag{3}$$

식(2)에서 분출제트의 온도 T_{jet} 와 외부 유체의 온도 T_{∞} 의 온도차는 작으므로 Boussinesq 가정이 유효하다고 가정하였다.

난류모델은 표준 K- ϵ 모델^{(21),(22)}로 난류운동에너지 K와 난류에너지 소산율 ϵ 의 방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_i \frac{\partial K}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial K}{\partial x_i}) + P + G - \epsilon \tag{4}$$

$$u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i}) + C_1 \frac{\epsilon}{K} P - C_2 \frac{\epsilon^2}{K} + C_3 \frac{\epsilon}{K} G \tag{5}$$

여기서 난류에너지 생성항 P는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$P = \nu_t (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{6}$$

그리고 난류에너지 소멸항 G는 다음과 같다.

$$G = -\beta g \frac{\nu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial y} \tag{7}$$

난류 점성계수 ν_t 는 난류운동에너지와 난류에너지 소산율을 이용하여 다음과 같다.

$$\nu_t = C_\mu \frac{K^2}{\epsilon} \tag{8}$$

여기서

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_3 = 1.44, C_\mu = 0.09,$$

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

이다.

3. 경계조건 및 수치해석 방법

본 연구에서 경계조건으로는 네 가지로 분리하였다. 첫 번째로 평판 위에서, 속도에 관해서는 점착조건을 적용하고 온도에 대해서는 일정한 온도 즉 상온을 유지한다고 가정하였다. 두 번째는 노즐에서 분출하는 유체의 속도와 온도가 일정하며 난류제트의 출몰이전의 경계층은 완전 발달되었다고 가정하였다. 세 번째는 외부유체의 입구 경계조건으로 일정속도와 상온의 온도를 가

지며, 네 번째는 노즐로부터 멀리 떨어진 경우에 종속 변수의 수직방향의 구배가 "0"이라고 가정한다. 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Y=0 \text{ 에서 } U=V=W=0 \quad (9)$$

노즐부에 대하여, $X=0$ 에서

$$U=0, \quad V=V_{jet}, \quad W=0, \quad T=T_{jet} \quad (10)$$

입구경계에서

$$U=U_{\infty}, \quad V=0, \quad W=0, \quad T=T_{\infty} \quad (11)$$

$$\text{자유경계(Free boundary)에서 } \partial\phi/\partial n=0 \quad (12)$$

난류모델에 관한 경계조건으로는 외부유체의 입구에서 Demuren⁽²³⁾이 제시한 난류강도 $I=0.05$ 로 하였으며, 벽면에 인접한 제어체적에 대해서는 벽법칙을 이용하였다. 난류에너지와 난류에너지 소산율에 대한 입구 경계조건은 다음과 같다.

$$K_{in} = \frac{3(IU_{\infty})^2}{2}, \quad \epsilon_{in} = \frac{C_{\mu}^{\frac{3}{4}} K_{in}^{\frac{3}{2}}}{0.1D} \quad (13)$$

본 연구에서의 계산영역은 노즐의 지름(D)로부터 무차원화한 X, Y, Z축의 길이 즉 평판의 길이와 폭 그리고 계산영역의 높이는 (26D, 20D, 10D)이면 노즐의 위치는 X축으로는 10D 그리고 Z축으로는 5D에 위치한다. 지배방정식은 정상상태 비압축성 유체의 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식과 표준 $K-\epsilon$ 모델의 난류방정식을 Patankar⁽²⁴⁾의 유한체적법을 사용하여 이산화하였다. 표준 $K-\epsilon$ 모델에서 벽법칙을 사용하는 있어 첫 번째 격자점의 위치 선정이 매우 중요한데 본 논문에서는 $Y/D=0.01$ 로 선정하였다. 속도는 스칼라 종속변수인 온도, 압력, 난류에너지와 난류에너지 소산율이 계산되어지는 격자점과 엇갈린 격자점을 이용하는 엇갈림 격자계를 이용하였으며 압력장은 Patankar에 의해서 개발된 SIMPLE(Semi-Implicit Method for the Pressure Linked Equation) 알고리즘을 이용하였다. 이산화된 선형 대수 방정식을 풀기 위해 LU-Decomposition을 이용하였으며 계산의 정확성을 향상시키기 위해 노즐의 주위 영역에 격자계를 집중하여 배치하였다. 각 방향에 대하여 $50 \times 50 \times 50$ 의 비균일 격자계로 전체 격자점은

125000개이다. 본 계산을 위해 컴퓨터는 Alpha VAX(AXP/VAX)를 사용하였다.

4. 중심선체적과 외부유체 유입량

지배방정식을 수치적으로 해석하여 얻어낸 속도분포와 온도분포를 통해 노즐에서 분출되는 제트의 중심체적과 단면의 모양을 알아낼 수 있다. 제트의 중심체적은 분출속도와 외부유체의 속도비에 의해 굴절의 각도나 모양에 큰 영향을 미치고 있으며, 노즐을 통하여 분출되는 유체와 외부유체의 온도차에 의한 부력도 유체의 속도 변화에 영향을 주고 있다. 중심체적은 노즐의 위치가 Z-축의 중앙에 위치하고 $Z=0$ 과 $Z=L_s$ 면에서의 경계조건이 같으므로 $Z=L_s/2$ 면에 위치한다. 중심선체적에 관한 좌표계는 Fig. 2에 나타

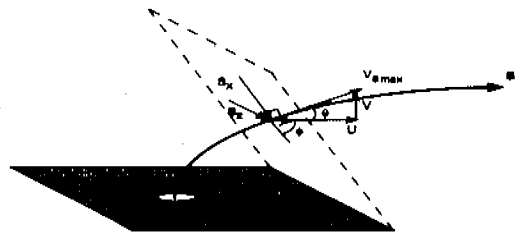


Fig. 2 Center-line trajectory of a jet and the normal plane.

내었다. 이 면에서 Z축 방향의 속도는 "0"이므로 X축과 Y축 방향의 속도만이 존재한다. 이러한 이유로 중심체적은 X축과 Y축 방향의 속도 U와 V에 의해 결정된다. $Z=L_s/2$ 면에 있는 임의의 점 (X_a, Y_a) 과 기울기 ϕ 를 갖는 직선과 그 직선 위에 존재하는 유체의 최대속도가 직각을 이룰 때 그 최대속도의 접선방향을 중심체적의 방향이라 한다. 이 중심체적과 법선은 또 하나의 좌표계 (S, S_x, S_y) 를 구성하고 이 좌표계에서 유체속도 분포 (V_s, V_{sx}, V_{sy}) 를 이용하여 제트의 유량과 외부유체의 유입유량을 계산할 수

있다.

제트의 단면은 S축과 수직인 면에 분포된 속도 V_s 와 V_{smax} 의 비에 의해서 결정되며 제트의 경계를 결정하는 관계식은 다음과 같다.⁽²⁵⁾

$$a_{vr} = \frac{V_s}{V_{smax}} = 0.01 \quad (14)$$

외부유체의 흐름이 없는 경우 즉 수직제트의 경우는 식(14)으로 경계를 결정할 수 있지만 외부유체의 흐름이 존재하는 경우는 제트의 굴절과 함께 굴절된 제트의 아래 영역에서 역방향의 유체흐름이 존재하고 그 반대편의 영역에서는 외부유체의 흐름에 의한 일정량의 유체흐름이 분포됨으로써 식(14)으로 경계를 결정하는데 어려움이 있다. 이와 같은 경우에 제트의 경계를 결정하는 수정 경계결정 관계식은 다음과 같다.⁽²⁵⁾

$$a_{vr} = \frac{V_s - V_{sconst}}{V_{smax} - V_{sconst}} = 0.01 \quad (15)$$

식(15)에서 역방향의 흐름이 존재하는 부분에서 $V_{sconst} = 0$ 이고 일정속도가 존재하는 영역에서는 $V_{sconst} = U_\infty \cos \theta$ 가 된다. 이 단면 안에 존재하는 S축 방향의 속도분포를 면적 적분하여 그 위치에서의 분출제트의 유량을 계산할 수 있고 이는 다음과 같다.

$$Q_{jet} = \iint V_s dS_x dS_z \quad (16)$$

S방향으로 두 점 사이에서 계산된 제트유량의 차이는 제트내부로 유입되는 유량이며 유입유량의 구배는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$a_{ent} = \frac{(Q_{jet})_{i+1} - (Q_{jet})_i}{\Delta S_i} \quad (17)$$

5. 결과 및 고찰

수치해석의 결과에 대한 정확도 및 신뢰성을 위해 유입유량, 중심선의 궤적, 속도 분포에 대하여 실험결과와 비교하였다. Fig. 3은 Ricou동⁽¹⁵⁾의 실험결과와 비교한 것으로 제트유체와 외부유체의 온도차가 없는 경우의 유입유량을 나타내었다. Reynolds수가 72000일 때 계산결과는 실험값과 잘 일치하고 있다. Grashof수가 5.17×10^9 인

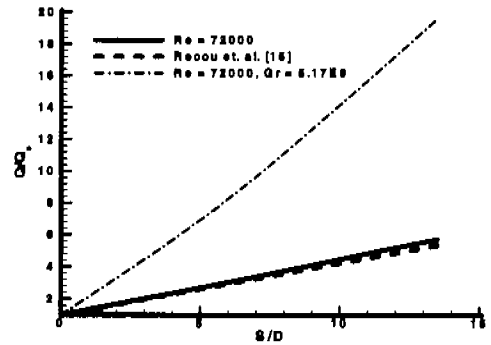


Fig. 3 Comparison of entrainment of jets without a cross flow with Ricou and Spalding's experimental results.

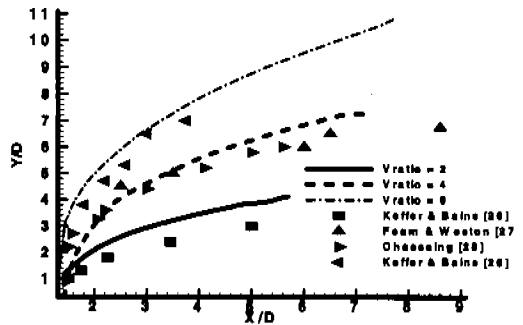


Fig. 4 Comparison of center-line trajectories of jets in a cross flow with experimental results.

경우 즉 온도차에 의한 부력의 영향이 고려된 경우는 유입유량이 등온인 경우에 비하여 크게 차이를 보이고 있는데 이로서 온도차가 유입유량의 변화에 중요한 변수임을 알 수 있다. Fig. 4는 제트유체의 중심선의 궤적을 나타낸 것으로 Reynolds수들 6200, 속도비들 2, 4, 6으로 변화시킬 때 실험 결과^{(26),(27),(28)}와 수치해석의 결과를 비교하여 잘 일치하고 있다. Fig. 5는 Ramsey와 Goldstein⁽¹⁶⁾의 실험결과와 비교한 것으로 Reynolds수는 7500이고 동온제트가 외부유체 내부로 분출되는 경우에 외부유체 방향의 속도분포를 $X/D=1.37, 3.06, 4.98$ 의 위치에서 나타낸 것이

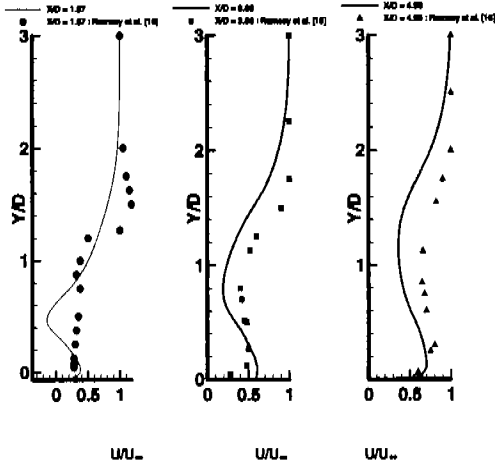


Fig. 5 Comparison of X-direction velocity distributions at $X/D = 1.37, 3.06$ and 4.98 .

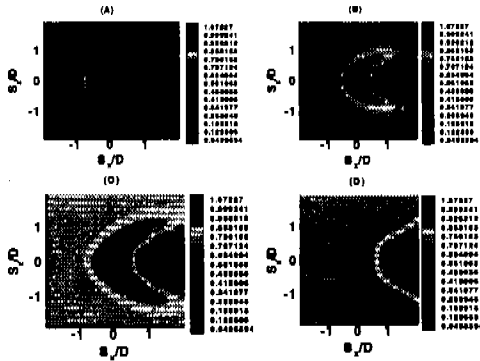


Fig. 6 Contour plot of S-direction velocity of jets in a cross flow ($Re=6200, Gr=3.844E7, Vratio=1.0$).

다. 계산결과와 실험결과는 $X/D=3.06$ 과 $X/D=4.98$ 에서는 비교적 일치하지만 $X/D=1.37$ 에서의 분포는 평판부에서 차이를 보이고 있다. 이는 평판부근에서 급격한 속도구배가 일어나므로 생기는 현상이다.

일정한 속도를 가지고 흐르는 외부유체로 분출하는 제트의 유량 변화를 알아보기 위해 Reynolds수, Grashof수와 속도비의 영향을 고려해 보았다. Fig. 6은 Reynolds수는 6200, Grashof수는 Reynolds수의 제곱인 3.844×10^7 으로 Grashof수와 Reynolds수의 제곱의 비가 1.0일 때

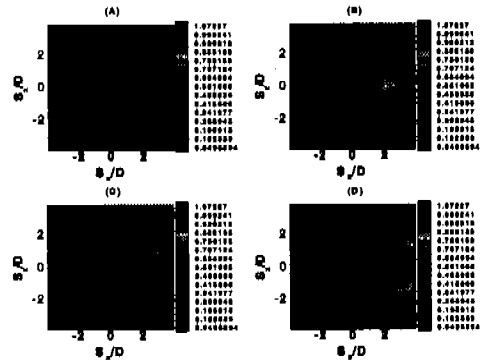


Fig. 7 Contour plot of S-direction velocity of jets in a cross flow ($Re=6200, Gr=3.844E8, Vratio=1.0$).

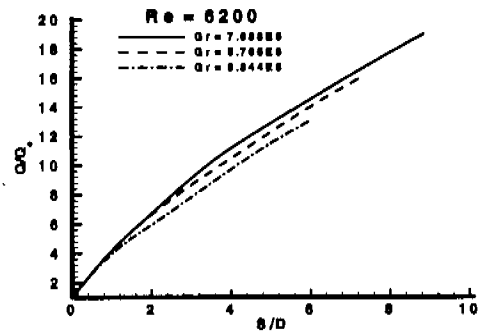


Fig. 8 The variation of entrainment of TBJC with $Gr = 7.688E8, 5.766E8, 3.844E8$.

중심선의 제적방향의 속도 V_s 의 동속도 선도를 $S/D=0.414, 2.863, 4.884, 7.011$ 의 위치에서 나타낸 그림이다. 속도비는 1.0으로 외부유체의 속도와 제트의 분출속도는 같다고 가정하였다. 그림으로부터 제트의 단면 모양을 예측할 수 있으며 단면이 중심선의 제적을 따라 어떻게 변화하는가를 잘 보여주고 있다. $S/D=2.683$ 의 위치에서 Fig. 6A를 보면 단면의 모양이 뚜렷한 말굽모양을 하고 있으며 이것으로 말굽모양의 제트단면의 내부에 쌍 와류(twin vortex)와 그 외부에는 역방향의 흐름이 존재함을 알 수 있다. 이 단면의 크기는 중심선을 따라 증가한다. 제트가 완전히 굴

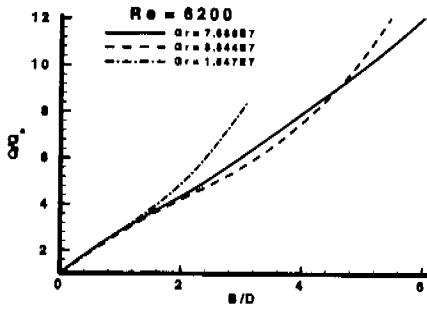


Fig. 9 The variation of entrainment of TBJIC with $Gr = 7.688E7, 3.844E7, 1.547E7$.

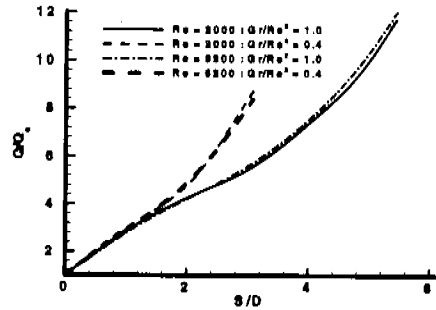


Fig. 10 The variation of entrainment of various Reynolds numbers.

절되는 위치에서는 제트와 외부유체 사이의 경계를 찾을 수 없을 만큼 완전한 혼합이 이루어지는 것을 Fig. 6D에서 확인할 수 있다. Fig. 6에서 변수값을 고정시키고 Grashof수만 10배 증가시킨 경우의 등속도 선도를 Fig. 7에서 보여주고 있다. Grashof수의 증가는 물리적으로 외부유체와 분출유체 사이의 온도차를 크게 함으로서 부력에 의한 분출속도의 증가를 가져오며, 중심선의 궤적은 완만하게 굴절하게 된다. 이로써 단면의 모양의 변화는 크게 다르지 않지만 제트가 외부유체와 완전히 혼합되는 위치는 Fig. 6의 경우와 비교하여 중심선을 따라 노즐로부터 먼 곳에서 이루어진다.

외부유체가 제트의 내부로 유입됨으로서 혼합(mixing)과 전단유동의 유량이 증가하는데 유입유량은 어떠한 인자에 따라 변화하는지 알아보도록 하자. 가장 쉽게 변화시킬 수 있는 것은 속도비와 온도차이며 그 외에 노즐의 직경 또는 노즐홀의 모양이다. 본 연구에서는 노즐 홀의 모양은 원형으로 제한하였으며 노즐의 직경은 Reynolds수에 고려되었으므로 온도차, 속도비 그리고 Reynolds수의 변화에 따라 유입유량이 어떻게 변화하는지를 살펴보기로 한다. Fig. 8은 Reynolds수를 6200으로 고정시켰으며 Grashof수를 $3.844 \times 10^8, 5.766 \times 10^8, 7.688 \times 10^8$ 으로 증가시킬 때 유입유량을 비교하여 나타낸 것이다. 이는 Grashof수와 Reynolds수의 제곱의 비가 10, 15, 20으로서 자연대류가 지배적인 경우로 Grashof수

를 증가시킬수록 유입유량은 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 분출제트의 완전굴절이 시작되기 이전에서의 결과로 외부유체의 흐름이 없는 문제의 결과와 같은 것이다. 계산영역을 확대시켜 제트의 완전굴절이 이루어지는 영역까지 이를 계산하면, Grashof수를 증가시킬수록 제트의 굴절은 낮은 Grashof수와 비교하여 완전굴절 시작점이 중심축을 따라서 먼 곳에서 이루어짐으로 같은 위치에서의 유입유량을 비교한다면 Grashof수가 증가할수록 외부유체의 유입유량은 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 9는 Fig. 8과 같이 Reynolds수를 6200으로 고정하고 Grashof수를 $1.547 \times 10^7, 3.844 \times 10^7, 7.688 \times 10^7$ 로 증가시킨 경우의 유입유량을 나타낸 것이다. Grashof수가 1.547×10^7 인 제트의 완전굴절 시작점은 $S/D=1.7$ 인 지점이며 이 지점 이후로 유입유량이 급격히 증가함을 알 수 있다. 중심축 S/D 가 1.7 보다 작은 영역에서는 Fig 8의 결과와 같은 결과를 얻을 수 있었으며 이 지점 이후에서 Grashof수가 3.844×10^7 인 제트의 유입유량을 비교하면 Grashof수의 감소는 유입유량을 증가시킬 수 있다. 이로써, 유입유량을 변화시키는 것은 각 요소의 변화가 분출제트의 굴절에 어떤 영향을 주는가에 따라서 제트의 내부로 유입되는 유량에 변화를 준다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 Grashof수와 Reynolds수의 제곱의 비를 고정시키고 Reynolds수를 변화시킬 때의 유입유량의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 Gr/Re^2

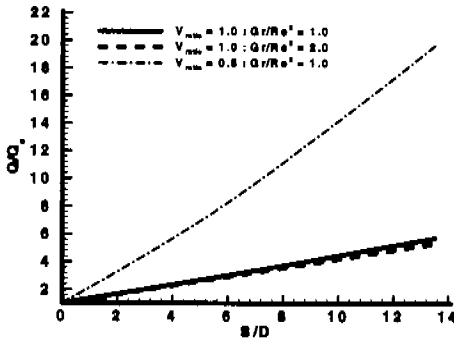


Fig. 11 The variation of entrainment with various velocity ratios.

가 1과 0.4일 때 Reynolds수를 2000과 6200으로 변화시켰다. Fig. 10에서 Reynolds수의 변화는 유입유량의 변화에 큰 영향을 미치지 않고 있다. Fig. 11은 Reynolds수와 Grashof수를 고정시키고 속도비가 0.5와 1일 때의 유입유량의 변화물 나타낸 것이다. 그림에서 분출 속도가 외부유체의 속도에 비해서 커지면 유입유량은 감소한다는 것을 알 수 있는데 이는 Fig. 9와 같은 결과이다. 즉 속도비의 증가는 Grashof수와 증가와 같은 결과를 가져온다. 속도비가 0.5, 1, 2로 증가될 때 분출제트의 속도는 증가하게 되며 분출제트의 굴절이 완만하게 이루어진다. 완전 굴절시작점의 위치는 중심축을 따라서 먼 곳에 위치하게되어 같은 중심축의 위치에서의 유입유량을 비교하면 속도비의 증가는 유입유량의 감소를 발생시킨다. 속도비가 작은 쪽으로 변화할 경우의 유입유량의 변화물 계산하지는 않았지만 앞의 결과를 바탕으로 Grashof수의 변화가 유입유량의 변화에 미치는 영향과 같다고 예측할 수 있다.

6. 결 론

본 연구는 노즐에서 분출되는 제트가 일정한 속도로 흐르는 유체내부로 분출될 때 외부유체와 분출제트 사이에서 유동구조를 해석하였으며 그 결과는 다음과 같이 요약된다.

(1) 외부유체와 분출유체 사이의 모든 파라미터들을 고정시키고 속도비를 0.5, 1, 2로 변화시킨

경우에 분출제트의 굴절이 완만하게 이루어지며 완전굴절의 시작점은 중심축을 따라 먼 곳에 위치한다. S가 0인 점에서 제트의 완전굴절이 시작되는 위치까지의 결과는 외부유체의 흐름이 존재하지 않는 제트의 결과와 마찬가지로 속도비가 증가할수록 외부유체의 유입유량은 증가하며 그 외의 영역에서는 속도비가 증가할수록 외부유체의 유입유량은 감소하게 된다.

(2) 제트의 굴절이 중심축을 따라 노즐로부터 가까운 위치에서 이루어질 때 제트의 단면적의 변화는 급격하게 변화하게 되며 이로 인하여 많은 외부유체가 제트의 내부로 유입되고 유입유량은 증가하게 된다.

(3) 자연대류가 지배적인 경우 ($Gr/Re^2 \gg 1.0$)의 유입유량의 변화는 제트가 외부유체의 흐름방향으로 완전굴절이 시작하는 위치 이전에는 외부유체의 흐름이 존재하지 않는 경우와 마찬가지로 Grashof수가 증가할수록 유입유량도 증가하지만 그 이후의 지점에서는 중심축을 따라 가까운 위치에서 굴절이 발생하는 제트에 더 많은 외부유체의 유입이 발생한다.

(4) Reynolds수의 변화에 따른 유입유량의 변화는 Grashof수와 Reynolds수의 제곱비가 고정되어 있는 경우 Reynolds수의 변화는 유입유량에 큰 영향을 미치지 않는다.

참고 문헌

(1) Hwang, R. R. and Chiang T. P., 1990, "Numerical Simulation of Vertical Forced Plume in a Crossflow of Stably Stratified Fluid", *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 117, pp. 696 - 705.

(2) Chien, C. J. and Schetz, J. A., 1975, "Numerical Solution of the Three-Dimensional Navier Stokes Equation with Application to Channel Flows and a Buoyant Jet in a Cross-Flow", *Trans. ASME: J. Appl. Mech.*, Vol. 42, pp. 575 - 579.

(3) 이충훈, 정영호, 정석호, 1997, "충돌제트의 유량분포 및 혼합특성에 관한 실험적 연구", 대한

- 기계학회 논문집(B) 21권, pp. 99 - 112.
- (4) Sutton, O. G., 1932, "A Theory of Eddy Diffusion in the Atmosphere", *Proc. Roy. Soc. A*, Vol. 135, p. 143.
- (5) Bosanquet, C. and Pearson, J. L., 1936, "The Spread of Smoke and Gases From Chimneys", *Trans. Faraday Soc.*, Vol. 32. p. 1249.
- (6) Ivanov, Yuri V., 1959, "Effective Combustion of Overfire Fuel Gases in Furnaces" The Estonian State Publishing House, Tallin, Estonia (available in English as NASA CN-127612, 1971).
- (7) Kuchemann, D. and Weber, J., 1953, "Aerodynamics of Propulsion", chap. 10 p. 239, McGraw-Hill.
- (8) Callaghan, E. E. and Ruggeri, R. S., 1948, "Investigation of the Penetration of an Air Jet Directed Perpendicularly to an Air Stream", NACA TN 1615.
- (9) Callaghan, E. E. and Ruggeri, R. S., 1951, "A General Correlation of Temperature Profiles of a Heated Air Jet Directed Perpendicularly to an Air Stream", NACA TN 2466.
- (10) Chang, H. C., 1942, "Aufrollung Eines Zylinderischen Strahles Durch Querwind," Doctorial Dissertation, Univ. of Gottingen, (Also available in English as "The Roll-up of a Cylindrical Jet in a Cross Flow" translated and edited by Nagaraja, K. S. and Schrade, Herbert O., 1973, USAF-ARL 73-0131).
- (11) Fearn, R. L. and Weston, R. P., 1978, "Induced Velocity Field of a Jet in a Crossflow", NASA TP-1087.
- (12) Margason, Ri. J., 1968, "The Path of a Jet Directed at Large Angles to a Subsonic Free Stream", NASA TN D-4919.
- (13) Wooler, P. T., 1969, "On the Flow Past a Circular Jet Exhausting at Right Angles from a Flat Plate or Wing", *Journal of Royal Aeronautical Society*, Vol. 71, no. 3, pp. 216 - 218.
- (14) Smy, J. R. and Ransom, E. C. P., 1976, "The Structure of Single Jets at Large Angles to a Cross-Flow", Hawker-Siddely Aviation LTD, HSA-KAD-R-GEN-2288.
- (15) Ricou, F. P. and Spalding, D. B., 1961, "Measurements of Entrainment by Axisymmetrical Turbulent Jets", *Journal of Fluids Mechanics*, Vol. 11, pp. 21 - 32.
- (16) Ramsey J. W. and Goldstein R. J., 1971, "Interaction of a Heated Jet with a Deflecting Stream", *Journal of Heat Transfer*, pp. 365 - 372.
- (17) Chien, C. J. and Schetz, J. A., 1975, "Numerical Solution of the Three-Dimensional Navier-Stokes Equations with Application to Channel Flows and a Buoyant Jet in a Cross-Flow", *Trans. ASME: J. Appl. Mech.*, Vol. 42, pp. 575 - 579.
- (18) Oh. T. S. and Schetz, J. A., 1990, "Finite Element Simulation of Complex Jets in a Crossflow for V/STOL Applications", *Journal of Aircraft*, Vol. 27, No. 5, pp. 389 - 399.
- (19) 권영필, 1998, "고속 충돌제트의 불안정특성 (1)", *대한기계학회 논문집(B)* 22권, pp. 452 - 458.
- (20) 강형석, 유정열, 최해천, 1998, "충돌제트를 갖는 회전원판 위 3차원 경계층의 난류특성 (1)", *대한기계학회 논문집(B)* 22권, pp. 1277 - 1289.
- (21) Rodi, W. and Srivatsa, S. K., 1980, "A Locally Elliptic Calculation Procedure for Three-Dimensional Flows and Its Application to a Jet in a Cross Flow", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 23, pp. 67 - 83.
- (22) Demuren, A. O., 1983, "Numerical Calculations of Steady Three-Dimensional Turbulent Jets in a Cross Flow", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 37, pp. 309 - 328.
- (23) Demuren, A. O. and Rodi, W., 1987,

- "Three-Dimensional Numerical Calculations of Flow and Plume Spreading Past Cooling Towers", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 109, pp. 113 - 119.
- (24) Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing Corporation.
- (25) Kim, H. M., 1997, "Air Entrainment of the Turbulent Buoyant Jet in a Cross Flow", University of Pittsburgh, Ph. D. Thesis.
- (26) Keffer, J. F. and Baines, W. D., 1963, "The Round Turbulent Jet in a Cross Wind", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 15, Part 4, pp. 481 - 496.
- (27) Fearn, R. L. and Weston, R. P., 1974, "Vorticity Associated with a Jet in a Cross Flow", *AIAA Journal*, Vol 12, No. 12, pp. 1666 - 1671.
- (28) Chassaing, P., Geroge, J., Claria, A. and Sananers, F., 1974, "Physical Characteristics of Subsonic Jets in a Cross-Stream", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 62, part 1, pp. 41 - 64.