

이중원관 구속제트의 유동특성에 관한 연구

(A Study on Flow Characteristics of Confined Circular Jet within Pipe)

서민식*(한국해양대 대학원), 최장운((주)아이아이티), 이영호(한국해양대)
M.S.Seo(Graduate School, Korea Maritime Univ.), J.W.Choi(I.I.T. Co.), Y.H.Lee(KMU)

Key Words : Confined Jet Flow(구속제트유동), SOLA, Finite Difference Method(차분법), Sheared Mixing Phenomena(전단 혼합특성), Nozzle Flow(노즐유동), Vortex(와류)

Abstract : The present study is aimed to investigate flow characteristics of confined jet flow within circular pipe. 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 is adopted on cylindrical coordinate formation. Computation was carried out for two kinds of Reynolds number, 10^5 and 1.5×10^5 defined by diameter of outer pipe and time-mean driving jet velocity. Results show that periodic vortex shedding from the jet mixing layer is profound and related unsteady flow characteristics prevail over the entire region. Spatial distribution of pressure and kinetic energy, fluctuation of static wall pressure, together with radial velocity components are examined in terms of instantaneous and time-mean point of views.

1. 서론

구속제트유동은 기초적인 난류유동특성을 풍부하게 제공할 수 있는 대표적인 유동장이나 이에 대한 자세한 정량적인 해석이 완전하지 못한 실정이다. 예를 들어, 축방향의 압력구배에 대한 제트의 엔트레인먼트, 경계층과의 상호작용, 박리의 발생 및 재부착 등에 관한 체계적인 연구가 요구되고 있다. 그중 이중원관 제트유동은 그 형상이 단순함에도 불구하고 전단혼합유동, 와류방출, 경계층 성장, 압력강하 및 박리현상 등의 다양한 유체역학적 현상을 동반하며, 연소실이나 예체터 펌프와 같은 실용적인 유동장에서 자주 발견되고 있다. 그러나 이와 같이 공학적으로 응용도가 뛰어난 유동장임에도 불구하고 이에 대한 본격적인 연구는 매우 제한적이며 대부분의 결과가 시간평균적인 내용에 머물고 있는 실정이다.

그중 Razinsky와 Brighton¹⁾은 각각 3종류의 직경비와 속도비를 갖는 이중원관 제트 유동장의 공기실험을 행하고 벽면압력과 평균속도를 측정하였으며 난동성분과 레이놀즈응력 특성을 논하였다. Nakami 등²⁾은 난류모델에 의한 수치해석결과를 실험결과와 비교하였으며 제트 펌프의 효율개선을 위한 성능예측을 검토하였다. 그러나 실험은 어느 경우나 시간평균의 결과이며 수치계산에 있어서도 정량적인 검토가 부족한 점이 지적될 수가 있다.

이러한 배경으로부터 이 연구에서는 동심 이중원관에 대하여 안 쪽의 노즐에서 구동제트가 분사되고, 바깥 쪽의 원관과 노즐사이에서 2차흐름이 유입되는 전형적인 구속제트의 유동장을 대상으로 하였다. 그리고, 축대칭 2차원의 원통좌표계를 택하고 차분법을 이용한 DNS의 기법을 적용하여 관련된 유동장의 특성을 알아보고자 하였다. 채택된 레

이놀즈수는 구동제트의 평균속도와 바깥원관의 직경을 대표값으로 하여 $Re=10^5$ 및 $Re=1.5 \times 10^5$ 의 두 가지의 경우를 가정하였다.

수치계산을 위하여 SOLA 알고리즘을 이용하였고 원통좌표계의 보존형 NS방정식을 부동격자상에서 이산화하여 차분화식을 구하였으며 이 때에 종래의 등간격 격자상에서의 보존형차분식을 부동간격 격자에서도 유지되도록 하기 위하여 내분의 원리³⁾를 적용하여 변수배치를 행하였다.

계산결과, 2차원 이중원관의 구속제트의 유동장은 전형적인 전단혼합작용의 특성을 잘 나타내었으며 주기적인 와류의 방출 및 이에 따른 압력 및 유량 등의 주기적인 변동이 활발하게 나타났다.

2. 수치해석

Navier-Stokes 방정식은 연속체 유동장에 대하여 어느 한 점을 중심으로 유체입자의 운동을 표현하기 위한 편미분 형태의 지배방정식이다. 비압축성, 비정상, 점성흐름에 대하여 선회류가 없는 축대칭 흐름을 가정하고 원통좌표계를 택하여 연속방정식과 2차원 Navier-Stokes 방정식을 무차원화하여 나타내면 식(1)과 식(2)와 같다.

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{V_r}{r} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V_x}{\partial t} + \frac{\partial (V_r V_x)}{\partial r} + \frac{\partial (V_x V_x)}{\partial x} + \frac{V_x V_r}{r} \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x} + g_x + \\ & \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_x}{\partial r} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} \right) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial t} + \frac{\partial (V_r V_r)}{\partial r} + \frac{\partial (V_x V_r)}{\partial x} + \frac{V_r^2}{r} \quad (2)$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial r} + g_r +$$

$$\frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial x^2} - \frac{V_r}{r^2} \right)$$

수치해석 기법으로서 연속의 식을 항동적으로 만족시키는 MAC법을 기초로 하는 SOLA의 정식화 방법을 적용하였으며 윗 식에서 중력가속도의 성분은 무시하고 대표길이 L, 대표속도 U로 무차원화 하여 차분근사를 행하였다.

그림1은 이 연구에서 택한 유동장의 개략도를 보여주고 있다. 대표길이(D)는 외부원관의 직경이며 이 원관의 총 길이는 15D이다. 또한 노즐의 직경(d)은 0.34D이며 노즐은 외부원관의 입구로부터 1.5D 까지 삽입되어 있다.

그림 2는 이 연구에서 적용한 변수배치로서 부등간격 격자상에서 차분근사를 행하여 NS방정식을 이산화하였다. 확산항은 2차정도의 중심차분을 이용하였으며 부등간격 격자의 보정을 행하였다. 또한, 이 연구에서는 수치 안정성을 유지하기 위하여 풍상차분을 병용하였으며, 보존형의 스킴중에서 MAC법의 중심차분과 부분도너셀의 풍상차분을 이용하였다. 대류항에 도입된 풍상차분에 대한 가중계수 α 를 조절하면서 계산의 안정성을 유지하였다. $\alpha=0$ 일 때는 대류항의 공간 차분이 중심차분으로만 되고, $\alpha=1$ 일 때는 풍상차분만이 적용되나, 여기에서는 $\alpha=0.4$ 에서 계산의 안정성을 확보하였다.

이 연구에서의 계산조건은 표1과 같다. 격자배치는 부등간격으로서 속도구배가 큰 노즐의 출구근방에서 등간격의 미소격자를 1D만큼 배치하였다. 입구에서 구동노즐 출구까지의 0~1.4D구간과 등간격 배치 이후의 2.4D~6.4D구간은 부등간격으로 하였다. 그리고 6.4D 이후에서 출구까지는 0.097D의 해상도로 등간격의 격자를 배치하였다.

부등간격 격자생성의 일반적인 방법은 여러 가지가 있으며 본 연구에서는 식(3)과 같은 격자생성법을 채택하였다. 여기에서 P와 Q는 각각 격자배치의 방향과 밀집도를 변환시키는 파라미터로서 격자의 연속성을 고려하여 경험적으로 구하였고 그림3은 이 결과 얻어진 계산격자의 배치도이다.

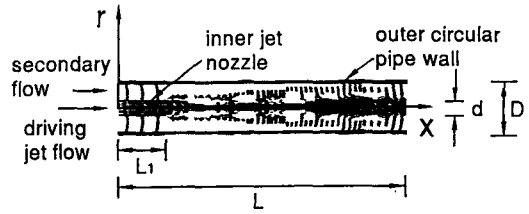
$$s = P\eta + (1-P) \left(1 - \frac{\tanh[Q(1-\eta)]}{\tanh Q} \right) \quad (3)$$

계산격자의 크기는 302×52이고 최소 격자의 크기는 대표길이(D)의 1/100이며 최대크기는 1/10이다.

또한 유동장의 경계조건으로서 외부원관과 노즐 벽면에서는 부착조건을 부여하였고 노즐내부에서의 구동 제트에 대하여는 단면 평균유속이 1이 되도록 식(4)와 같은 조건을 부여하였다.

$$v_x = 1.0, v_r = 0 \quad (4)$$

외부원관과 노즐사이에서 유입되는 흐름은 미지수이어야 하나 계산의 초기에는 원관내 Poiseuille 흐름으로 가정한 식에 0.05를 곱한 미소한 값을 유입속도로 하여 경계조건을 식(5)와 같이 부여하였다.



D : outer diameter
d : inner diameter
L₁ : length of inner jet nozzle
L : length of circular pipe

Fig. 1 Geometry of Confined Jet

Table 1 Computational Conditions

item	Conditions	
Pipe Diameter	D	
Pipe Length	L	15D
Jet Nozzle Length	L ₁	1.5D
Down Stream	L ₂	13.5D
Pipe Length		
Nozzle Thickness	t	0.06D
Inner Diameter	d	0.34D
Reynolds Number	Re	10 ⁵ , 1.5 × 10 ⁵
Grid Number	N _x × N _r	302 × 52
Maximum Grid Size		0.1
Minimum Grid Size		0.01

$$V_{xR} = [V_{x0-1/2} + V_{x00}] / 2 \quad V_{rD} = [AV_{r0-1/2} + BV_{r0-1/2}] / (A+B)$$

$$V_{xL} = [V_{x00} + V_{x01/2}] / 2 \quad V_{rU} = [DV_{r0-1/2} + CV_{r0-1/2}] / (C+D)$$

$$V_{rQ} = [V_{r0-1/2} + V_{r00}] / 2 \quad V_{rF} = [FV_{r0-1/2} + AV_{r0-1/2}] / (A+F)$$

$$V_{rL} = [V_{r00} + V_{r01/2}] / 2 \quad V_{rU} = [DV_{r0-1/2} + CV_{r0-1/2}] / (C+D)$$

$$V_{rD} = [E V_{x00} + DV_{x0-1/2}] / (D+E) \quad V_{rU} = [AV_{r0-1/2} + BV_{r0-1/2}] / (A+B)$$

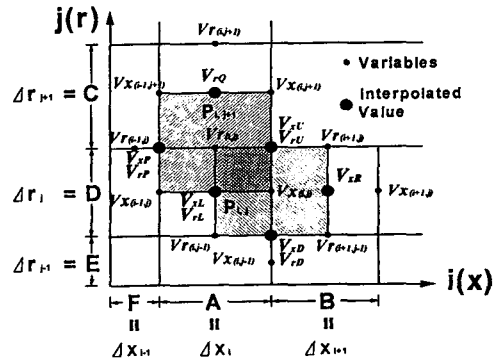


Fig.2 Variables Allocation on Irregular Grid
X x Y = 302 x 52

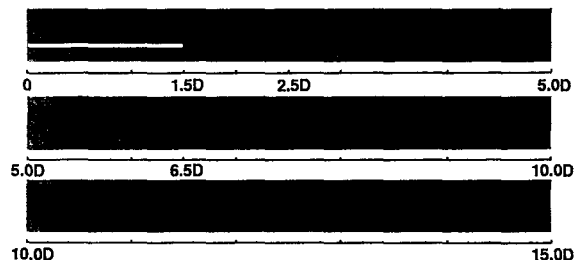


Fig. 3 Grid Formation

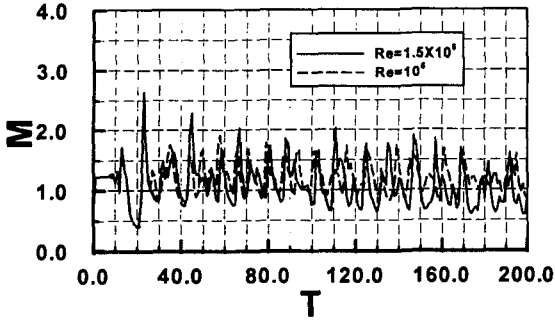


Fig. 4 Temporal Fluctuation of Flowrate Ratio

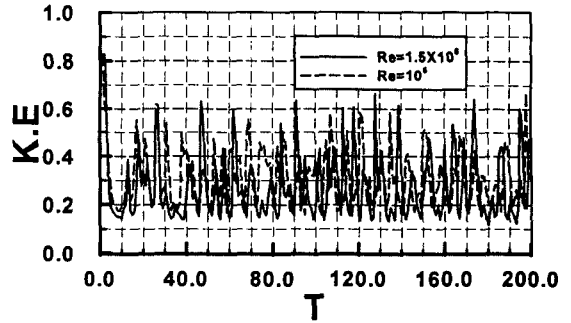


Fig. 5 Fluctuation of Local Kinetic Energy

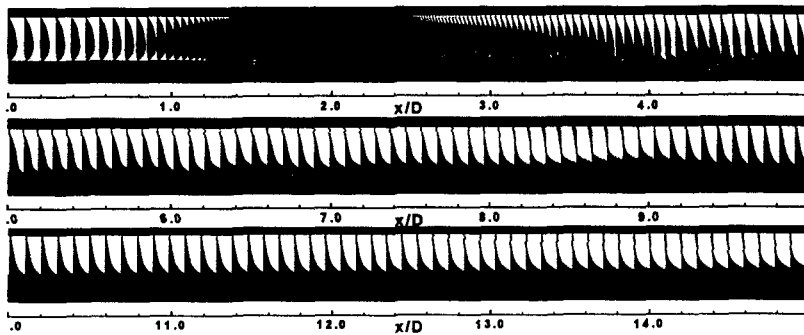
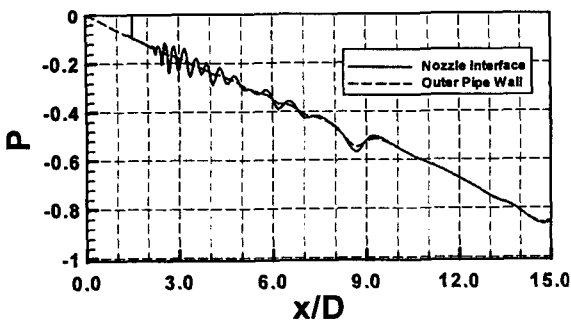
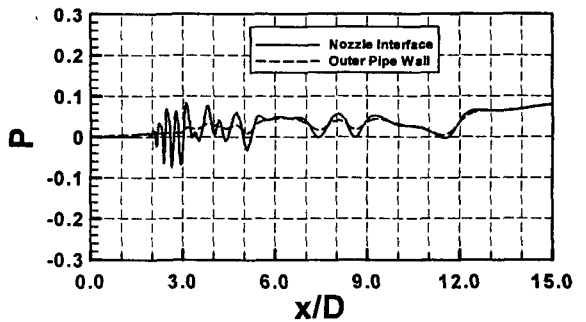


Fig. 6 Instantaneous Velocity Vector Distribution ($Re=10^5$, $T=160$)



(a) $Re=10^5$, $T=160$



(b) $Re=1.5 \times 10^5$, $T=152$

Fig. 7 Pressure Distribution at Wall and Nozzle Interface

그러나, 이 값들은 계산이 진행되면서 연속의 식과 벽면경계조건에 맞도록 수정된다.

$$v_x = 2V_x \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \times 0.05$$

$$v_r = 0 \quad (5)$$

여기서 V_x 는 대표속도를 나타낸다.

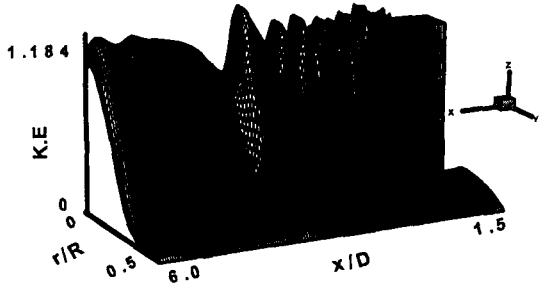
외부 원관 출구에서는 유동변화가 적으므로 식 (6)과 같이 Neumann조건을 부여하였다.

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v_r}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

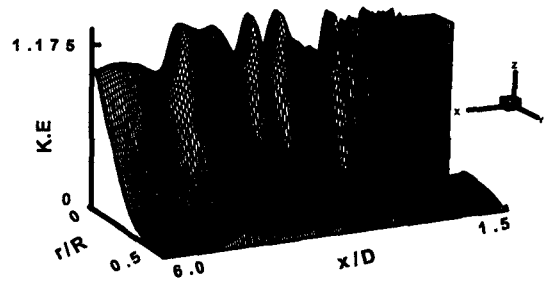
또한 축대칭을 가정하여 중심선에서의 반경방향의 속도는 0으로 하였다.

$$\frac{\partial v_x}{\partial r} = 0, \quad v_r = 0 \quad (7)$$

속도 및 압력의 반복수렴 판정조건으로는 각 격자에서의 발산의 최대값 0.002를 기준으로 하였다. 계산영역은 축대칭을 가정하여 원관의 축을 중

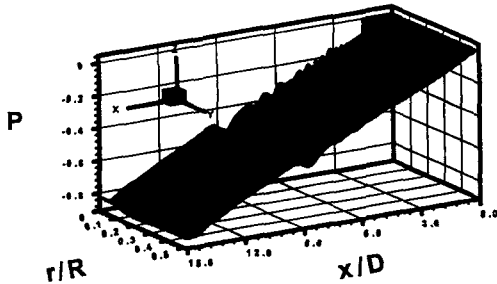


(a) $Re=10^5$, $T=160$

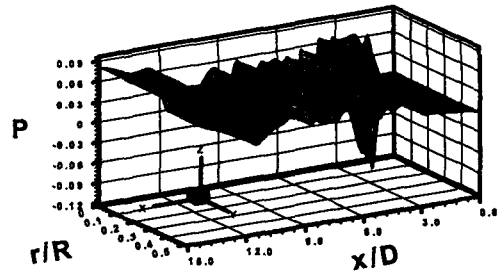


(b) $Re=1.5 \times 10^5$, $T=152$

Fig. 8 Distribution of Instantaneous Kinetic Energy (1.5D-6.0D)



(a) $Re=10^5$, $T=160$



(b) $Re=1.5 \times 10^5$, $T=152$

Fig. 9 Distribution of Instantaneous Pressure

심으로 하여 상부만을 대상으로 하였다. 1회의 전진시간간격에 대하여 압력 및 속도 수정에 요하는 반복횟수는 평균 30전후의 값을 나타내었다. 계산 종료시점은 무차원 시간으로 200이며, 데이터의 저장을 위한 샘플링간격은 무차원시간으로 1이다.

3. 결과 및 고찰

이중원관 유동장의 전단혼합층 형태가 Re 수 5×10^4 이하에서는 비교적 단순한 유동패턴을 나타내고 있고 종래의 실험 및 수치해석 결과가 $Re=10^5$ 전후에서 발표되어 있으므로 이 연구에서는 $Re=10^5$ 와 $Re=1.5 \times 10^5$ 두 가지 경우를 대상으로 하였다.

구동노즐의 출구에서의 분사제트와 2차유동과의 속도구배가 원관하류에서의 전단혼합층의 생성 및 발달과정에 크게 영향을 미친다. 따라서 2차유입유동에서의 입구경계조건이나 노즐벽의 위치에 해당하는 위치에서의 초기 경계조건은 이후의 계산에 크게 영향을 미칠 수가 있다.

또한, 구동제트의 속도는 벽면경계층의 성장에 따라 최대 크기가 둔화되고 2차유동과의 전단혼합

영역이 반경방향으로 확대되어 벽면에서의 역압력 구배를 유발하고 박리를 형성하는 것이 주요 특성으로 알려져 있다.

계산의 종료는 모든 경우에 있어서 무차원시간 200으로 하였다. 무차원시간 50이후에서는 주기적인 속도분포 및 벽면 압력분포를 보이고 있다. 이 시각이후에서의 유동상태의 전체적인 거동을 알아보기 위하여 무차원시간 200까지 구동제트에 대한 2차유입 유동과의 유량비를 구하여 그림 4와 같이 나타내었다.

두 가지의 레이놀즈수에 대하여 모두 무차원시간 50이후에서 유량비의 최대진폭이 일정범위로 작아지며 주기적으로 변하는 것을 알 수가 있다. 따라서 일정한 구동제트의 유량에 대하여 2차유입 유량의 변화가 전단와류의 방출특성에 지배됨을 나타내고 있으며 이 것은 계산영역을 나타내는 외부원관의 길이나 외부원관과 노즐의 직경비 등에 따라 달라질 수 있을 것으로 예상된다. 그리고 이 형상의 제트유동에서는 시간평균의 유량비가 약 1.2로 계산된다.

그림 5는 노즐출구의 연장선에서 축방향으로 1D 만큼 떨어진 지점에서의 운동에너지 값 $(u^2+v^2)/2$

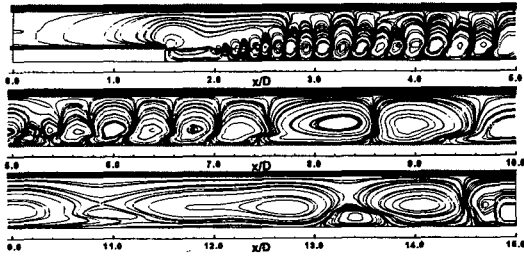


Fig. 10 Instantaneous Equi-Radial Velocity Contours ($Re=10^5$, $T=160$)

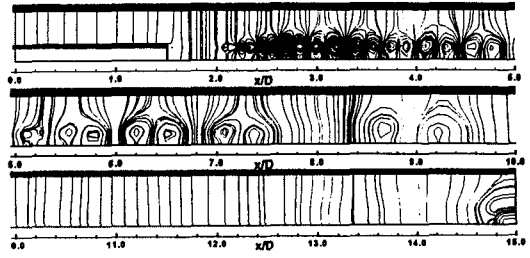
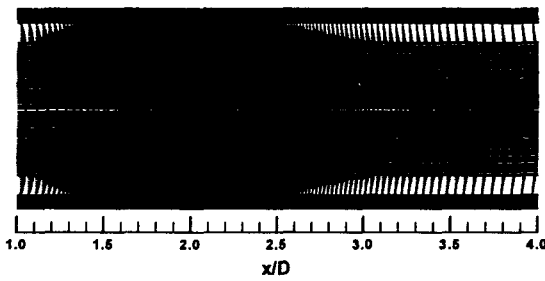
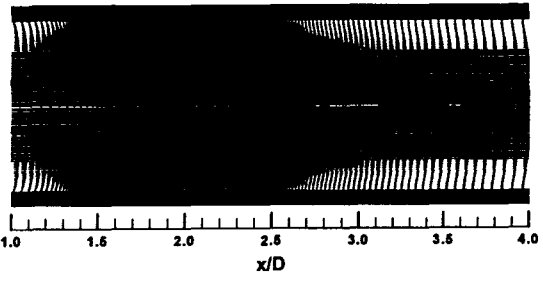


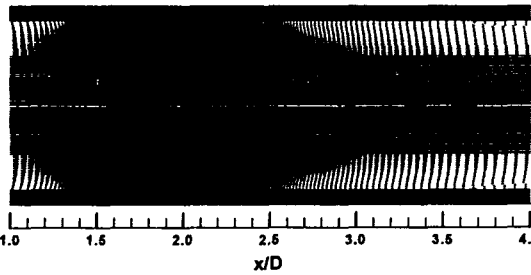
Fig. 11 Instantaneous Equi-baric Distribution ($Re=10^5$, $T=152$)



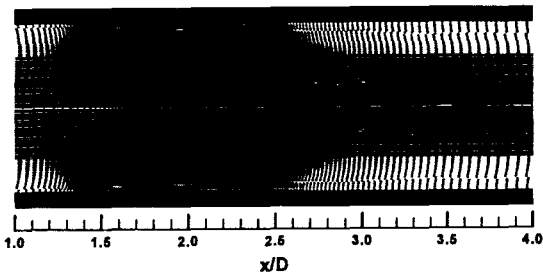
T=170



T=180



T=190



T=200

Fig. 12 Instantaneous Velocity Distribution ($Re=10^5$)

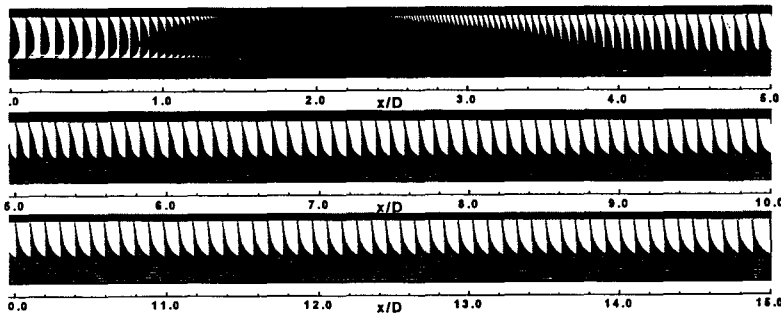
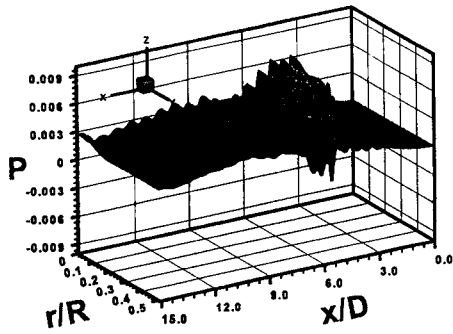
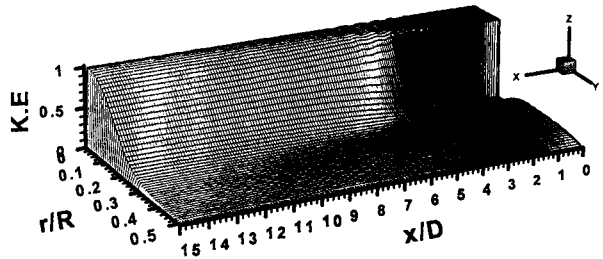


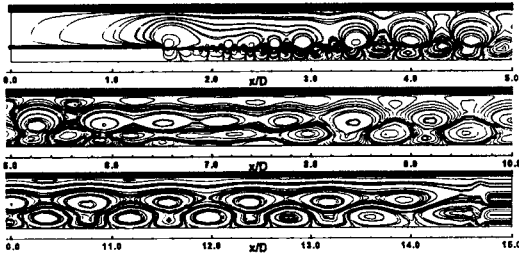
Fig. 13 Time-mean Velocity Distribution ($Re=10^5$, $T=100 \sim 200$)



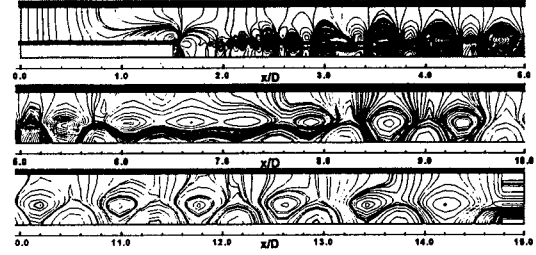
(a) Pressure



(b) Kinetic Energy



(c) Equi-Radial Velocity Contours



(d) Equi-Baric Contours

Fig. 14 Time-mean Distributions ($Re=10^5$, $T=100\sim 200$)

의 변화를 시계열별로 나타낸 것이다. 구동제트에 의한 운동에너지의 변화는 Re 수기 보다 큰 1.5×10^5 에서 변동이 크게 나타남을 알 수 있으며 그림4에서와 같이 일정한 주기성이 존재함을 보여주고 있다.

그림 6은 Re 수가 10^5 인 경우, 유동장이 충분히 발달한 상태에서 유량비가 상대적으로 크게 나타나고 있는 시점인 무차원시간 160에서의 순시속도 분포를 전유동장에 대하여 나타낸 것이다. 그 결과, 유입2차유동의 속도분포가 계산초기에 부여한 초기의 조건과는 다르게 나타나고 있으며 노즐벽면에서 외부원관의 벽면에서보다 더 큰 속도구배를 형성하고 있음을 알 수가 있다. 이것은 층류흐름에서의 해석적인 결과와 유사한 특성이다.

또한, 순시의 유동특성은 제트의 흐름이 반경방향으로 확산되어 제트의 폭이 증가되고 벽면 경계층이 성장하여 결국에는 2차의 포텐셜 유동이 사라지는 특성이 나타난다.

다음으로, 그림7에서와 같이 2차유동에서의 유입 유량 증가 현상은 외부원관의 벽면 및 구동노즐벽면의 연장선에서의 순시 압력구조에서도 확인할 수 있다. 즉, 그림 4에서 Re 수 1.5×10^5 일 때의 무차원시간 152에서는 최소 유량비를 나타내고 있으며 이때의 순시 압력분포는 그림 7(b)과 같다. 즉, 축방향에 대하여 공간압력변동은 0의 값을 중심으로 크게 변하고 있지 않으며 따라서 속도를 흐름

방향으로 증속시키기 위한 부의 압력구배가 존재하지 않고 있다. 그러나 $T=160$ 에서는 최대유량비를 얻고 있으며 이 때의 압력분포는 그림7(a)와 같이 나타나고 있다. 즉 외부원관의 입출구에서 직선적인 부의 압력구배가 크게 나타나고 있음으로서 흐름방향으로 진행되는 유동이 가속되어 유입유량은 크게 됨을 알 수가 있다.

그림 8(a) 및 그림8(b)는 속도구배가 가장 큰 노즐출구인 1.5D의 위치에서부터 제트의 확산에 의해 전단 혼합층이 형성되는 6.0D까지의 국소운동에너지 분포를 유동장의 전영역에 걸쳐 3차원적으로 나타낸 것이다. 데이터의 샘플링시각은 앞에서의 결과와 같이 유량비가 최대($Re=10^5$)일 때인 그림8(a)와 유량비가 최소($Re=1.5 \times 10^5$)인 때인 그림8(b)로 구분될 수가 있다. 어느 경우에도 전단혼합 영역에서의 구동제트의 반경방향 속도의 확산으로 포텐셜 유동 영역에서의 운동에너지의 규모가 점점 작아지며 외부원관의 벽면에서도 운동에너지의 공간변동이 크게 나타남을 알 수가 있다.

그림 9는 두 가지의 레이놀즈수에 대하여 그림8과 같은 시각에서의 순시 유동장에 대한 압력분포를 전 영역에 대하여 나타낸 것이다. Re 수 10^5 에서는 유량비가 최대일 때에 부의 압력구배가 존재하고 노즐 출구부근에서는 압력의 공간변동의 특성이 크게 나타나고 있으며 2차유입유동 및 외부원관 벽면의 영역에서는 미약하게 나타나고 있다.

그러나 최소유량비를 나타내는 Re 수 1.5×10^5 에서는 축 방향으로의 압력이 매우 불규칙한 공간변동특성을 보이고 있으며 오히려 외부원판의 출구에서 압력이 증가하는 특성을 나타내고 있음을 알 수가 있다.

그림 10은 $Re=1.5 \times 10^5$ 에서 유동장의 반경방향 속도성분에 대한 등속도 분포를 나타낸 것으로 순시의 유동패턴을 직관적으로 파악하는데 적합하다. $x/D=2.0$ 에서부터 $x/D=5.0$ 까지의 구간에서는 축방향으로 연속적인 형태로 등속도성분이 규칙적으로 존재하며 그림 11에서의 압력 등고선과 매우 유사한 특성을 보이고 있다. 이것은 전단혼합층에서 발달하고 있는 방출와류의 연속적인 유출과 관련이 있다. 그러나 축방향의 속도성분에 대하여는 이와 같은 특성이 크게 나타나지 않았으나 그 결과는 생략하였다.

그림 11은 $Re=10^4$ 에서의 등압선도이다. 전단혼합 영역에서는 이곳에서 크게 발달하고 있는 방출와류의 영향으로 거의 같은 크기를 갖는 등압선의 집합부분이 질서있게 나타나고 있다. 이와 같은 특성은 모든 제트유동에서 공통적으로 나타나는 현상이며, 이 연구에서와 같이 구속제트의 유동에서도 유사한 결과를 얻고 있다.

그림 12는 $Re=10^5$ 에서의 무차원시간 170, 180, 190 그리고 200에서의 순시 속도벡터 분포를 $x/D=1.0$ 부터 $x/D=4.0$ 의 범위에 대하여 확대하여 나타낸 것이다. 축대칭을 가정한 원판 상부에 대한 계산결과를 이용하여 원판 하부에도 대응하는 속도분포를 도시함으로써 구동제트 및 전단영역에서의 방출와류의 특성을 시계열적으로 잘 나타내고 있다. 이 경우에는 시간진행에 따라서 방출와류가 노즐 출구쪽으로 접근하는 특성을 나타내고 있으며 $T=190$, $T=200$ 의 시각에서는 외부원판의 경계면에서 박리가 발생함을 알 수가 있다. 또한 방출와류는 노즐출구로부터 바로 발생하지 않고 약간의 성장영역을 가진 뒤에 나타남을 보여주고 있다.

그림 13은 $Re=10^5$ 일 때의 무차원시간 $T=100$ 에서 $T=200$ 까지 계산한 결과에 대하여 시간 평균한 속도벡터를 나타낸 것으로 순시 유동장에 나타난 박리현상이 외부원판의 벽면근처에서 나타나고 있다. 이 그림에서 보면 2차유입 유동성분은 구동제트와 전단혼합에 사용되어 구동제트의 속도분포가 포물선형으로 바뀌고 있으며 $x/D=6.0$ 이후에서는 거의 유사한 속도분포를 보이고 있음을 알 수가 있다. $Re=1.5 \times 10^5$ 의 결과도 유사하나 이 그림은 생략하였다.

그림 14는 시간 평균한 데이터로 처리한 압력분포, 운동에너지 분포 그리고 반경방향 속도 및 압력성분의 등고선을 표현한 것이다. 시간평균 압력분포를 나타내는 그림 14(a)에서는 축방향에 따라서 규칙적인 공간변동특성을 보이고 있으며 특히 노즐 영역에서 변동폭이 크게 나타나고 있다. 이 결과를

앞서의 순시등압선 분포도인 그림 11과 비교하여 보면 공간분포에서의 주기적인 특성이 상호관련되어 있음을 알 수가 있다. 다음으로 운동에너지의 시간평균 결과를 나타내는 그림 14(b)에서는 노즐출구근방을 제외하고는 거의 일정한 분포를 유지함을 나타내고 있다. 그림 14(c)는 반경방향 속도성분의 시간평균 등고선분포이며 앞서의 순시결과인 그림 10과 비교하여 후방영역을 제외하고는 거의 유사한 특성을 나타내고 있다. 마지막으로 그림 14(d)는 시간평균 등압선이나 순시결과인 그림 11과 비교하여 노즐출구근방에서의 강한 와류의 방출영역에서는 거의 유사한 분포를 보이고 있으며 원판 출구의 근방에서는 시간평균의 결과와 순시의 결과가 다르게 나타나고 있음을 알 수가 있다.

4. 결론

이 연구에서는 동심 이중원판에 대하여 안 쪽의 노즐에서 구동제트가 분사되고, 외부원판과 노즐 사이에서 2차흐름이 유입되는 전형적인 구속제트의 유동장을 대상으로 하였다. 그리고, 축대칭 2차원의 원통좌표를 택하여 차분법에 의한 DNS의 기법을 적용하여 관련된 유동장의 특성을 알아보고자 하였다. 채택된 레이놀즈수는 구동제트의 평균속도와 외부원판의 직경을 대표값으로 하여 $Re=10^5$ 및 $Re=1.5 \times 10^5$ 의 두 가지의 경우를 가정하였다.

수치계산을 위하여 SOLA 알고리즘을 이용하였고 원통좌표계의 보존형 NS방정식을 부동격자상에서 이산화하여 차분화하였으며 이 때에 종래의 등간격 격자상에서의 보존형차분식을 부동간격 격자에서도 유지되도록 하기 위하여 내분의 원리를 적용하여 변수배치를 행하였다.

계산결과, 2차원 이중원판의 구속제트의 유동장은 전형적인 전단혼합작용의 특성을 잘 나타내었으며 주기적인 와류의 방출 및 이에 따른 압력 및 유량 등의 비정상적인 변동특성이 활발하게 나타났다.

참고문헌

1. E.Razinsky and J.A.Brighton, Confined Jet Mixing for Non-separating Conditions, ASME J. Basic Eng. Sep., 1971, pp.333-349.
2. N. Namiki, O. Kitamura and M. Yamamoto, Numerical Prediction of Performance of Annular-Type Jet Pump, Trans. JSME Vol. 63 No.607, 1997, pp.204-210.
3. Y.H.Lee, J.G.Kim, D.H.Cho, Hig Reynolds Number Flows within 2-Dimensional Lid-Driven Square Cavity, Proc. JSME 100 Centennial Conf. Vol.3, 1997, pp.1689-1694.