

환형제트 난류유동에 대한 수치해석 연구

김 정 우*

서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

NUMERICAL INVESTIGATION OF TURBULENT FLOW FROM AN ANNULAR JET

Jungwoo Kim*

Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology

In the present study, the turbulent flow from an annular jet is investigated by using large eddy simulation. Particularly, the effect of the ratio of the inner and outer diameters is one of the main interests of this study. The instantaneous fields presented in this paper showed that behind the jet exit the backflow region, as well known in literatures, exists, and its detailed behavior depends on the ratio of the inner and outer diameters (D_1/D_2). The dependence on D_1/D_2 is attributed to the different shear layer development according to D_1/D_2 . At small D_1/D_2 , the development of the outer shear layer is similar to that from the circular jet. However, with increasing D_1/D_2 , the interaction between the outer and inner shear layers becomes strong, resulting in fast transition to turbulence.

Key Words : 큰에디모사(Large Eddy Simulation, LES), 환형제트(Annular Jet)

1. 서 론

환형 제트(Annular jet)는 내부 제트의 속도가 0이 되는 동심원 제트(Coaxial jet)의 특별한 한 종류로 오랜 전부터 연구의 대상이 되어 왔다[1-4]. 기본적으로 동심원 제트는 연소기 내 챔버, 혼합 탱크 등의 물리현상에 응용될 수 있다.

동심원 제트는 바깥 지름(D_2) 주위에서 나오는 환형류로 인해 안쪽 지름(D_1)에서 형성되는 주제트 유동이 안정화되는 특징을 가지고 있다. 따라서, 바깥 지름 주위에서 환형 형태로 나오는 유동의 발달 특성이 동심원 제트 유동을 이해하는데 중요하다고 할 수 있다.

지금까지의 연구를 통하여 환형제트에서의 난류 현상은 제트 출구 모양, 안쪽과 바깥쪽 제트 속도비 또는 안쪽과 바깥쪽 지름비(D_1/D_2) 등 여러 가지 인자들에 따라 영향을 받는다는 사실이 알려져 있다. 특히 Ko와 공동연구자들은 환형 제트에서의 난류 현상이 D_1/D_2 인자에 따라 어떻게 영향을 받는지를 실험적으로 연구하였다[5-7]. 그 결과 예를 들어 안쪽

지름이 작은 경우에는 안쪽 제트에서 형성되는 유동이 제트 유동과 상당히 다르나, 안쪽 지름이 큰 경우에는 안쪽 유동이 일반 제트 유동과 유사하게 된다는 사실을 관찰하였다. 이와 같이 환형제트에서의 난류 현상을 이해하기 위해서는 D_1/D_2 의 영향을 정확히 파악하는 게 매우 중요하나, 현재까지 D_1/D_2 에 대한 연구는 체계적으로 진행되지 못한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 D_1/D_2 에 따른 환형 제트 유동 변화를 보다 자세히 이해하기 위하여, 큰에디모사 연구를 수행하고자 한다.

2. 본 론

2.1 수치해석방법

본 연구에서 고려하는 큰에디모사 계산을 위한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \nu_T \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \tag{1}$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2}$$

Received: October 24, 2013, Revised: December 26, 2013,

Accepted: December 26, 2013.

* Corresponding author, E-mail: kimjw@seoultech.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2013.18.4.047>

© KSCFE 2013

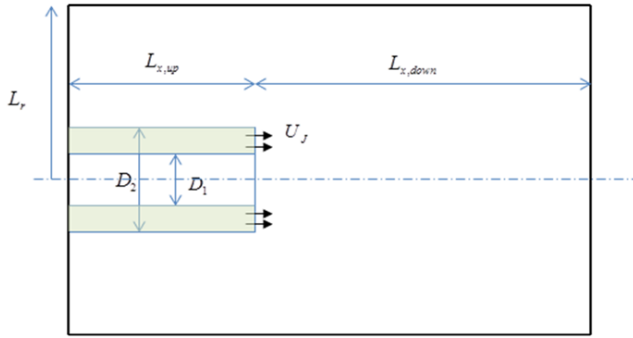


Fig. 1 Computational domain

여기서 u_i 는 x, r, θ 각 방향의 속도성분이며, p 는 압력이다. $\tilde{\cdot}$ 는 큰에디모사에서 정의되는 공간필터링을 의미한다. 또한, ν_T 는 큰에디모사에서 요구되는 아격자 점성계수(Subgrid-scale eddy viscosity)이다. 본 연구에서는 Germano et al.[8]이 제안한 동점성계수 모델을 이용하여 난류점성계수를 구하였다. 그리고 본 연구에서 Reynolds수는 $Re = U_j D_2 / \nu = 6000$ 로 정의된다(U_j 는 제트 출구 속도이다). 또한 D_1/D_2 에 따른 환형 제트 유동 변화를 보다 자세히 이해하기 위하여 $D_1/D_2=0.2, 0.5, 0.8$ 경우에 대해 계산을 수행하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 고려한 계산영역을 보여준다. 여기서, $L_{x,up} = 3D_2$, $L_{x,down} = 29D_2$, $L_r = 7D_2$ 이다. 또한 사용된 격자수는 $449(x) \times 132(r) \times 129(\theta)$ 이다. 경계조건으로는 제트 출구에서는 top-hat 속도를 주었으며, $x = -L_{x,up}$ 와 $x = L_{x,down}$ 에서는 Neumann 조건을, $r = L_r$ 에서는 vorticity free 조건을 부가하였다. 본 연구에서 사용된 보다 자세한 수치해석 방법은 참고문헌 [9]에 서술되어 있다.

2.2 수치해석결과

Fig. 2는 D_1/D_2 에 따른 순간 유동장 변화를 보여준다. 비교를 위하여 $D_1=0$, 즉 일반 원형 제트 경우도 Fig. 2에 포함시켰다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이, $D_1/D_2=0.2$ 와 같이 D_1/D_2 가 작은 경우에는 outer shear layer의 발달 모습이 일반 원형 제트와 상당히 유사한 것을 알 수 있다. 이런 사실은 Warda et al.[10] 실험에서도 관찰된 바 있다. D_1/D_2 가 증가하게 되면 inner shear layer 운동이 활발해지는 것이 관찰된다. 예를 들어 $D_1/D_2=0.5$ 와 같은 경우에는 inner shear layer가 $D_1/D_2=0.2$ 와 비교하여 불안정한 것을 볼 수 있다. 이런 영향으로 $D_1/D_2=0.5$ 에서는 outer shear layer의 발달 모습이 일반 원형 제트와 달라지는 것을 알 수 있다. 또한, 문헌상에 알려진 바

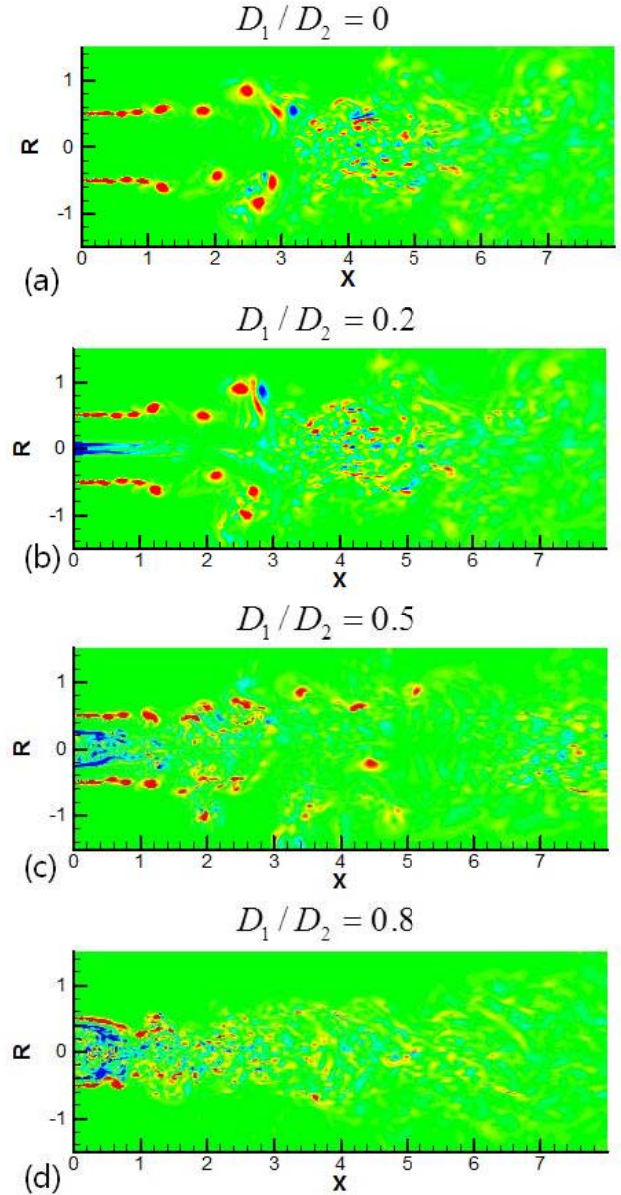


Fig. 2 Instantaneous azimuthal vorticity contours; (a) $D_1=0$; (b) $D_1/D_2=0.2$; (c) $D_1/D_2=0.5$; (d) $D_1/D_2=0.8$

와 같이 환형 제트 안쪽 지름내 벽면 근처에서 주유동 방향 속도가 음이 되는 영역이 존재하는 것이 Fig. 2에서 관찰된다.

D_1/D_2 가 더 증가해서 $D_1/D_2=0.8$ 과 같이 D_1/D_2 값이 큰 경우에는 outer shear layer와 inner shear layer가 보다 활발히 상호작용함에 따라, 두 shear layer들이 빨리 섞이는 결과 난류 유동 구조(coherent structure)로의 천이가 상대적으로 더 빨리 일어나게 된다.

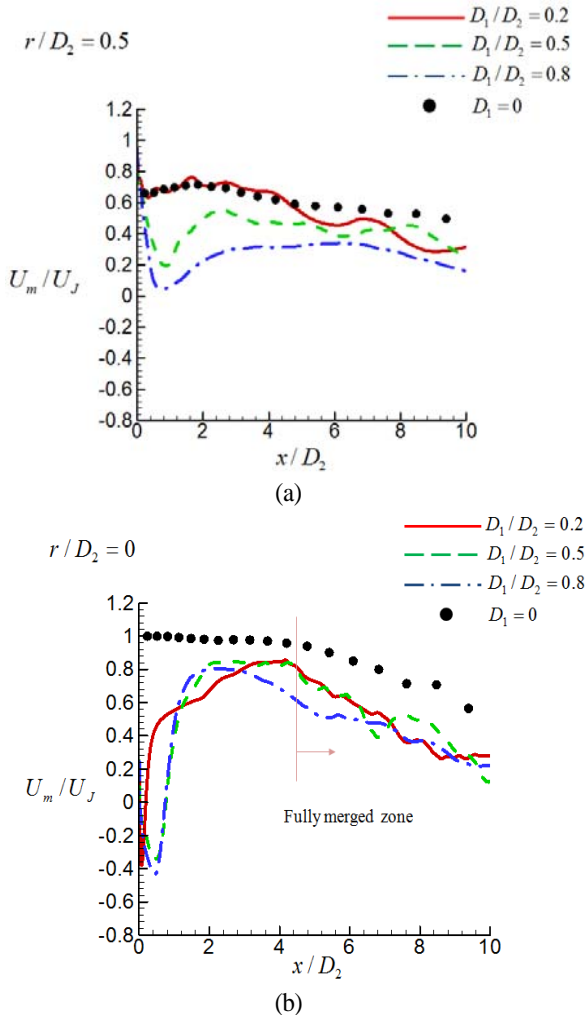


Fig. 3 Variation of time-averaged axial velocity with respect to D_1/D_2 : (a) $r/D_2=0.5$; (b) $r/D_2=0$

Fig. 3과 Fig. 4는 $r/D_2=0.5$ 와 0 위치에서 축방향을 따른 축방향 평균 속도와 축방향 속도 난류섭동량 분포를 보여준다.1) Fig. 3에서 볼 수 있듯이, $r/D_2=0.5$ 위치에서 $D_1/D_2=0.2$ 결과는 원형 제트 결과와 아주 유사하다. D_1/D_2 가 증가함에 따라 축방향 속도는 원형제트 결과와 점차 멀어지게 되며, 전체적으로 감소하였다가 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 그러나, 하류에서는 inner shear layer와 outer shear layer가 혼합되어 하나의 제트 유동을 형성하는 관계로 D_1/D_2 에 큰 관계없이 속

1) 본 연구에서 난류 통계량은 $30D_2/U_J$ 정도의 무차원 시간에 대해 시간과 원주방향에 대해 정의하였다. Fig. 3과 4에 나오는 제트 중심선에 대한 통계량의 경우, 단순히 시간 평균만이 가능한 관계로 전체적인 유동현상을 잘 보여주고 있으나, Fig. 5와 6에서 보이는 반경방향에 따른 난류통계량과 비교하여 상대적으로 불확실한 경향이 관찰된다.

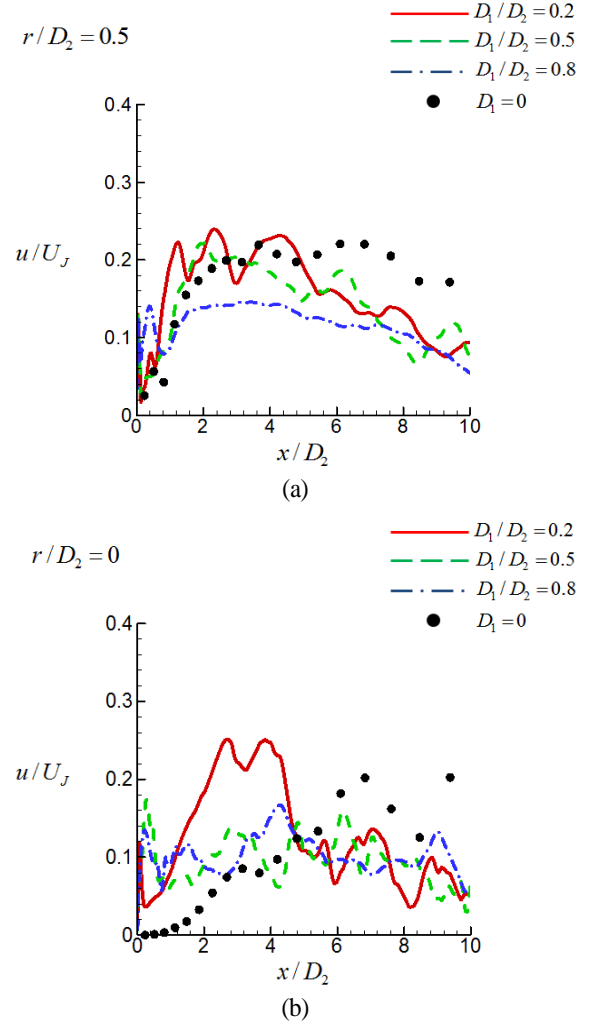
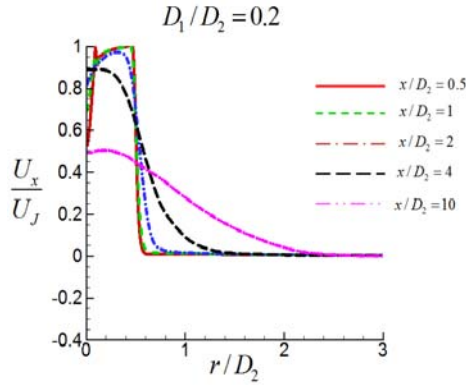


Fig. 4 Variation of axial velocity fluctuations with respect to D_1/D_2 : (a) $r/D_2=0.5$; (b) $r/D_2=0$

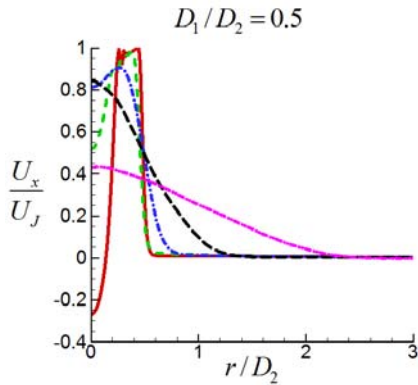
도 분포가 상당히 유사함을 확인할 수 있다. 이런 사실은 중심선을 따라서도 확인된다(Fig. 3(b)). 그러나, 난류섭동량을 살펴보면, 하류 위치에서 환형제트에서의 난류섭동량이 원형 제트에서의 난류섭동량보다 약간 작게 된다.

Fig. 2에서 관찰되는 재순환 기포(recirculation bubble) 영역에서의 유동 존재는 Fig. 3(b)에서 보다 명확히 관찰할 수 있다. 재순환 기포 크기는 $D_1/D_2=0.5$ 와 $D_1/D_2=0.8$ 에서는 거의 유사하며, $D_1/D_2=0.2$ 에서는 inner shear layer 발달이 미미한 관계로 작게 나타남을 알 수 있다. 이런 재순환 기포 존재로 인해 입구 근처에서는 난류 섭동량이 일반 원형 제트보다 크게 나타나게 된다(Fig. 4(b)).

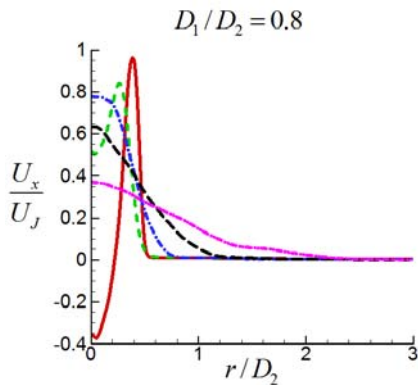
이와 같이 환형제트에서의 난류 유동 특성은 inner shear layer와 outer shear layer 각각의 발달과 둘 사이의 상호 작용에 의해서 결정되게 된다. 그러므로, inner shear layer와 outer shear layer 발달을 잘 이해할 필요가 있으며, 이를 위하여



(a)



(b)

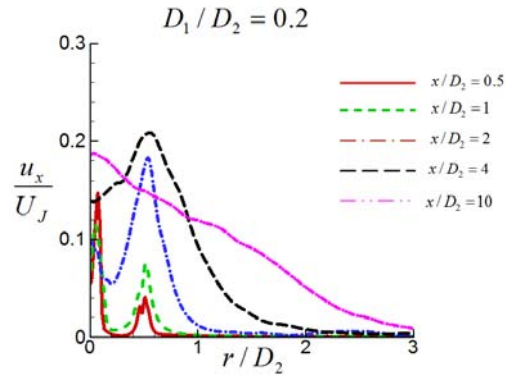


(c)

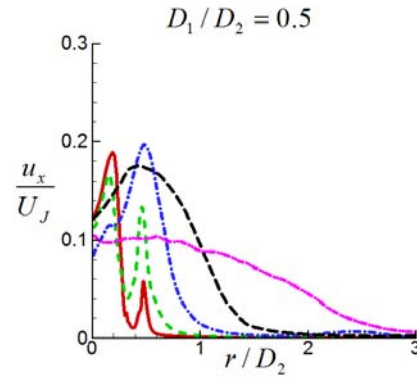
Fig. 5 Radial distribution of time-averaged axial velocity: (a) $D_1/D_2=0.2$; (b) $D_1/D_2=0.5$; (c) $D_1/D_2=0.8$

Fig. 5와 6에서 반경방향에 따른 축방향 평균 속도와 축방향 난류섭동량을 살펴보고자 한다.

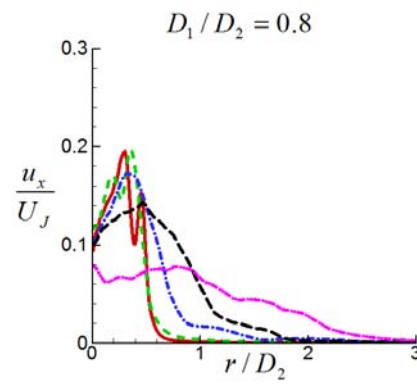
우선 Fig. 6에서 볼 수 있듯이, 제트출구 근처에서는 각 D_1/D_2 에 따라 inner shear layer와 outer shear layer에 해당하는 반경방향 위치에서 난류섭동량이 최대값을 가지게 된다. 또한, 모든 경우 제트 출구 근처에서는 inner shear layer에 해당하는 값이 outer shear layer에 대한 값보다 크다. 그러나, 하류로 진행함에 따라 이런 차이는 역전되게 된다. 제트 출구 근



(a)



(b)

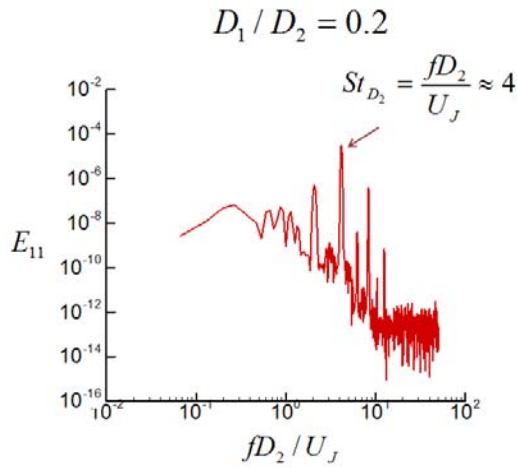


(c)

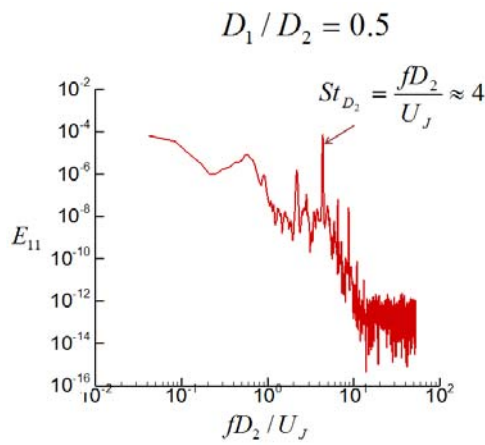
Fig. 6 Radial distribution of axial velocity fluctuations: (a) $D_1/D_2=0.2$; (b) $D_1/D_2=0.5$; (c) $D_1/D_2=0.8$

처에서를 보면 inner shear layer에서의 난류섭동량은 D_1/D_2 가 작을 때 증가율이 큰 반면, outer shear layer에서의 난류섭동량은 D_1/D_2 이 클 때 증가율이 크게 관찰되었다.

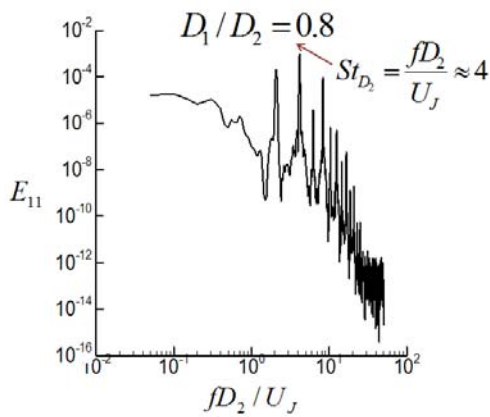
일반적으로 제트 유동에서는 shear layer는 특정 주파수를 가지고 발달한다고 알려져 있다. 일반 원형 제트의 경우, 두 개의 특정주파수가 존재한다는 것이 잘 알려져 있다[9]. 이들을 shear layer mode와 jet-preferred mode라고 한다. 환형제트 유동에서 $D_1/D_2=0.2, 0.5, 0.8$ 에 대하여 outer shear layer에서



(a)



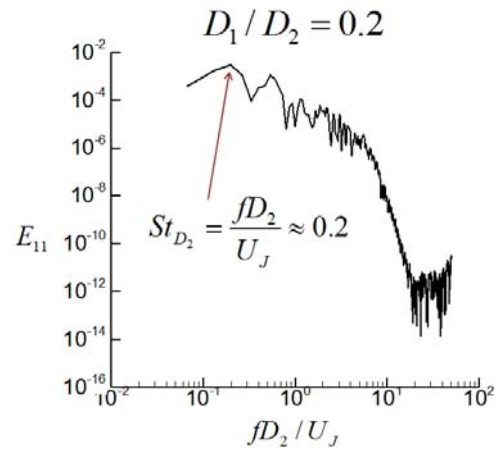
(b)



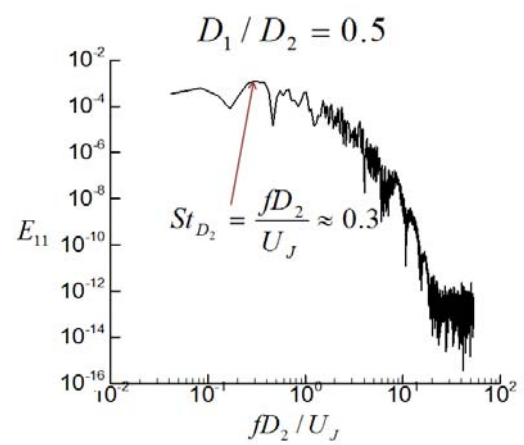
(c)

Fig. 7 Power spectrum of axial velocity at $r/D_2=0.5$:
(a) $D_1/D_2=0.2$; (b) $D_1/D_2=0.5$; (c) $D_1/D_2=0.8$

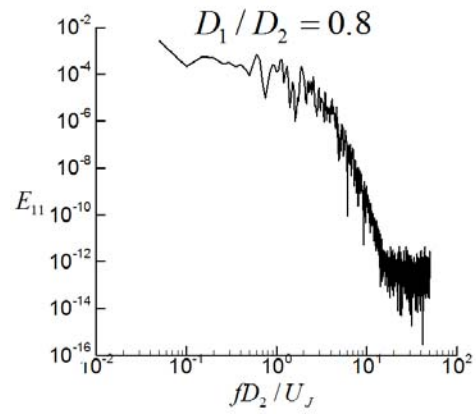
shear layer mode는 모두 $St_{D_2} = \frac{fD_2}{U_J} \approx 4$ 라는 값을 가지는 것을 알 수 있다(Fig. 7). 이를 통해, outer shear layer에서의



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Power spectrum of axial velocity at $r/D_2=0$:
(a) $D_1/D_2=0.2$; (b) $D_1/D_2=0.5$; (c) $D_1/D_2=0.8$

특성은 D_1/D_2 와는 큰 관련없이 결정된다는 사실을 다시 한번 확인할 수 있다. 반면, Fig. 8에서 보는 바와 같이 jet-preferred mode는 $D_1/D_2=0.2$ 와 0.5 에 대하여 각각 0.2 와 0.3 이라는 값을

보인다. 또한, $D_1/D_2=0.8$ 에 대하여는 난류로 인해 영향이 커서 뚜렷한 주파수가 관찰되지 않았다.

3. 결 론

본 논문에서는 큰에디모사 기법을 이용하여 환형제트 난류 유동에 대한 연구를 수행하였다. 특히 D_1/D_2 에 대한 영향을 주로 살펴보고자 하였다. 순간 유동장을 통해 볼 때, D_1/D_2 가 작을 경우에는 outer shear layer 발달이 일반 원형 제트와 유사하나, D_1/D_2 가 클 경우에는 outer shear layer와 inner shear layer의 상호 작용이 활발한 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 난류 유동 구조(coherent structure)로의 전이가 상대적으로 더 빨리 일어나게 된다.

환형제트 난류유동 특성을 보다 자세히 이해하기 위하여 inner shear layer와 outer shear layer에서의 난류 발달을 살펴보면, 제트 출구 근처에서는 inner shear layer에서 outer shear layer보다 유동이 불안정해서 난류 강도가 더 크게 나오는 경향이 발견되었다. 그러나, 하류로 감에 따라 outer shear layer에서의 난류 강도가 inner shear layer에서의 난류 강도를 역전하게 된다.

또한, 환형제트에서는 D_1/D_2 에 거의 상관없이 outer shear layer에서 shear layer mode는 유사함을 알 수 있다. 반면, jet-preferred mode는 D_1/D_2 에 따라 약간 증가하는 경향을 보이지만, $D_1/D_2=0.8$ 일 때는 난류의 영향으로 인해 뚜렷한 주파수가 관찰되지 않았다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] 1978, Chan, W.T. and Ko, N.W.M., "Coherent structures in the outer mixing region of annular jets," *J. Fluid Mech.*, Vol.89, pp.515-533.
- [2] 1979, Ko, N.W.M. and Chan, W.T., "The inner regions of annular jets," *J. Fluid Mech.*, Vol.93, pp.549-584.
- [3] 1986, Lam, K.M., Ko, N.W.M. and Lau, K.K., "Wake and wake-induced shear-layer excitation in an annular jet," *Phys. Fluids*, Vol.29, pp.3121-3134.
- [4] 2004, Chattopadhyay, H., "Numerical investigation of heat transfer from impinging annular jet," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.17, pp.3197-3201.
- [5] 1983, Ko, N.W.M. and Chu, F.C., "Annular jets of different diameter ratios," *Aero. Q.*, Vol.34, pp.163-196.
- [6] 1980, Ko, N.W.M., "Annular jets of small inner diameter," *J. Sound Vib.*, Vol.68, pp.468-472.
- [7] 1980, Ko, N.W.M., "Annular jets of large inner diameter," *J. Sound Vib.*, Vol.69, pp.616-621.
- [8] 1991, Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W.H., "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model," *Phys. Fluids A*, Vol.3, pp.1760-1765.
- [9] 2009, Kim, J. and Choi, H., "Large eddy simulation of a circular jet: effect of inflow conditions on the near field," *J. Fluid Mech.*, Vol.620, pp.383-411.
- [10] 1999, Warda, H.A., Kassab, S.Z., Elshorbagy, K.A. and Elsaadawy, E.A., "An experimental investigation of the near-field region of the free turbulent round central and annular jets," *Flow Measur. Instru.*, Vol.10, pp.1-14.