



# 동축제트의 와류주파수 및 혼합특성에 대한 수치해석 연구

김 원 현,<sup>1</sup> 박 태 선<sup>\*2</sup>

## NUMERICAL STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF VORTEX FREQUENCY AND LAMINAR MIXING OF A PASSIVE SCALAR IN COAXIAL JET FLOWS

Won Hyun Kim<sup>1</sup> and Tae Seon Park<sup>\*2</sup>

*This study focuses on the near-field vortical structure and dynamics of coaxial jets. The characteristics of laminar flow and mixing in coaxial jets are investigated using a unsteady flow simulation. In order to analyze the geometric effects on the vortical structure, several cases of different configurations are selected for various values of the velocity ratio of inner jet to outer jet. From the result, it is confirmed that mixing is promoted by the development of vortical structure and the interaction between inner jet and outer jet. This feature is strongly related to the vortex frequency in the shear-layers. The vortex frequency depends on the velocity ratio and the lip thickness of inner nozzle, but the outer pipe length has no effect on the frequency variation.*

**Key Words :** 동축제트(Coaxial-Jets), 혼합영역(Mixing Region), 평균 속도비(Mean-Velocity Ratio), 와류구조(Vortex Structure), 와류주파수(Vortex frequency)

### 1. 서 론

일반적으로 연료와 산화제는 분사기를 통해 연소기의 연소실로 유입된다. 유입된 연료와 산화제는 연소실내에서 혼합되어 있는 상태에 따라 연소효율을 크게 변화시킨다. 이러한 연료와 산화제의 혼합정도는 분사기의 형태에 따라 그 특성이 다르게 나타나는데, 동축제트를 이용한 분사기는 대표적인 형태이다. 동축제트 유동을 이용한 분사기는 두 유체간의 전단변형률을 이용한 경우와 선화유동을 이용하는 경우로 크게 나누어진다.

단변형률을 이용하는 동축제트의 간단한 모델형상에 대한 비정상해석을 통하여 와류의 동적 특성 및 혼합특성을 파악하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 동축제트를 이용한 실제 연소에 관한 실험적인 데이터의 수집과 내·외부 제트에서 분사된 유체의 혼합과정을 가시적으로 확인하기는 힘들기 때문이다. 또한, 동축제트의 형상적인 특이성으로 인해 유체

의 혼합과정에서 발생하는 다양한 동역학적 현상(Shear layers interaction, vortex shedding 등)의 해석과 적용이 실제 연소실의 설계나 분사기 시스템의 설계에 이르기까지 공학적으로 매우 넓기 때문이다.

동축제트 내부에서 혼합영역은 내·외부제트의 와류 동적 변화에 의한 내부혼합영역과 외부제트와 그 주위를 둘러싼 유체간의 혼합에 의한 외부혼합영역으로 구분할 수 있다. 또한, 동축제트 내부와 그 주변 외부영역을 포함한 전체혼합영역을 초기혼합영역(the initial merging region), 중간혼합영역(the intermediate merging region), 완전혼합영역(the fully merged region)의 세 가지 혼합영역으로 구분하기도 한다[6-8]. 여기서 내·외부제트에서 분사된 유체간 와류의 동적변화에 기인한 혼합특성 변화를 파악하는 것은 동축제트 연구에서 매우 중요한 요소이다. 그렇기 때문에 내·외부제트의 직경과 단면적의 비, 출구속도, 평균 속도비( $U_i/U_o$ ; 내부제트의 평균 속도/외부제트의 평균 속도)를 변수로 한 동축제트의 유동특성 변화에 관한 연구는 많은 관심의 대상이었다.

평균 속도비  $U_i/U_o > 1$ 인 경우에 집중된 이러한 연구들은 유동장내에서의 정압, 전단응력, 평균속도 분포의 시간-공간적인 특성 변화에 관련된 실험 중심이었다[1-5]. 특히,

1 학생회원, 경북대학교 대학원 기계공학과

2 정회원, 경북대학교 기계공학과

\* Corresponding author, E-mail: tsparkjp@knu.ac.kr

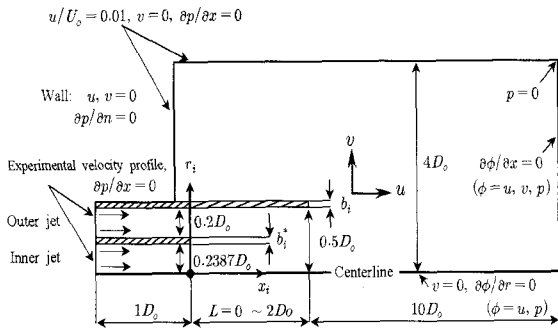
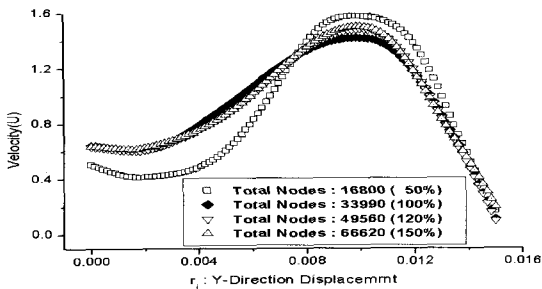
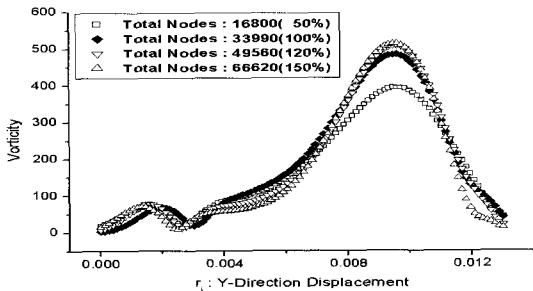


Fig. 1 Computational domain



(a) Scalars



(b) Vorticity

Fig. 2 Grid validity ( $U_o/U_i = 0.6$ )

Ko., N.M.W, Chan[2]에 의한 연구는 평균 속도비  $U_i/U_o > 1$  인 영역에서 와류구조의 동적변화가 외부제트 직경 크기의 일정 비에 해당되는 내부영역에서 나타남을 보여 주었다. 평균 속도비  $U_i/U_o < 1$  인 영역에서는 외부 혼합영역에서 평균 속도분포와 난류강도의 분포가 제트유동과 유사한 반면, 내부 혼합영역에서는 속도분포만 유사성을 나타낸다[6-8]. 그러나 와류구조의 동적 특성변화에 대한 자세한 연구는 이루어 지지 않았다.

혼합영역에서 와류구조 변화에 따라 발생하는 유동의 고유 주파수를 이용해 혼합특성의 변화를 파악하려는 연구도 진행 되었다. Kiwata[9]등에 의해 진행된 이 연구에서 평균속도비와 내부제트의 두께, 외부제트의 선단길이에 따른 와류주파수 변화가 내부혼합영역에서 와류의 동적특성 및 혼합특성 변화와

밀접한 관련이 있음을 보여준다. 레이놀즈 수가 낮은 층류 유동에서 전단층에 의한 와류주파수는 평균 속도비에 비례하고 내부 분사기의 두께에는 반비례하는 특성을 보이지만, 외부 분사기의 선단길이변화와는 관계없이 일정한 값을 나타낸다. 그러나 형상에 따른 와류 주파수의 수치적 변화는 잘 보여주지만, 그에 따른 와류구조와 혼합특성의 변화에 대해서는 고찰하지 못한 부분이 있다. 이를 보완하기 위하여 본 연구는 동축제트의 간단한 모델형상에 대한 비정상해석을 통하여 형상과 매개변수의 변화에 따른 와류의 동적특성 및 혼합특성 변화를 살펴 보고자한다.

## 2. 계산영역 및 수치해석 방법

본 연구에서 선택한 계산영역은 Fig. 1과 같다. 외부제트의  $D_o$  직경 와 외부제트의 속도  $U_o$  와 선단 두께  $b_i$  는 일정하게 하고 외부제트의 선단길이  $L$ , 내부제트의 직경  $D_i$ , 내부제트에서의 속도  $U_i$  와 두께  $b_i^*$  는 실험조건에 따라 변화시킨다. 유동의 혼합과정에서 형상변수의 변화는 내부 제트의 출구속도  $U_i = 0.4 \sim 2.0 \text{ m/s}$ , 외부제트의 선단 길이  $L = 0 \sim 2D_o$ , 내부제트의 두께  $b_i^* = 2.55 \sim 7.50 \text{ mm}$ , 내부제트의 직경  $D_i = 5.38 \sim 19.38 \text{ mm}$  인 경우에 대해서 CFD-ACE+[10]를 이용한 수치해석을 하였다.

본 연구의 주된 관심은  $Re = 3000$ 의 동축제트에서 발생되는 층류와류의 비정상적인 거동이기 때문에, 비압축성 유체에 대한 2차원 축대칭 조건에서 전산해석이 수행되었다. 지배방정식에 대한 차분화는 대류항에 QUICK Scheme, 확산항에 2차 정확도의 중심차분법을 이용하였다. 시간에 대한 적분방법은 2차 정확도의 Crank-Nicolson법이 선택되었다. 경계조건은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 Farfield 경계조건과 대칭축에 수직구배가 없는 조건이 주어졌고, 입구면에 속도경계조건이 출구면에 Neumann 형태가 선택되었다. 또한, 서로 다른 출구에서 나온 두 유체의 혼합을 확인하기 위하여 CFD-ACE+에서 User Scalar 방법을 적용하였다. User Scalar법은 혼합이 되는 두 유체를 0과 1사이의 비율로 나타내기 때문에 혼합이 되는 정도를 보다 쉽게 파악할 수 있기 때문이다. 수치해석 과정에서 격자계의 타당성을 검증하기 위해 CFD-GEOM을 이용하여 생성된 격자계의 격자수를 16800(50%), 33900(100%), 49560(120%), 6620(150%)로 변화시켰다. 계산된 결과는 동일 조건에서  $x_i/D_o = 2.0$  에서  $r$ 방향의  $u$ 속도와 와도를 비교하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 격자수 30000이상에서 해상도가 충분함을 알 수 있고, 본 계산의 격자계는 모든 조건에 대해 31000~39000개의 격자수를 유지하였다. 비정상 해석결과로부터 주파수 추출과정에 대한 타당성을 살펴보기 위해

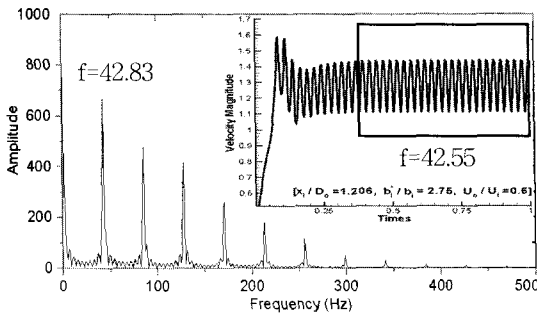
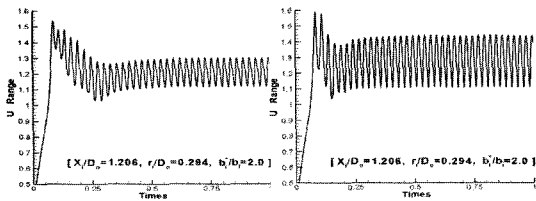
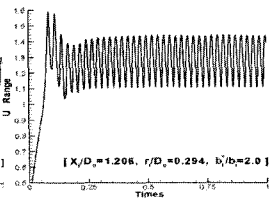


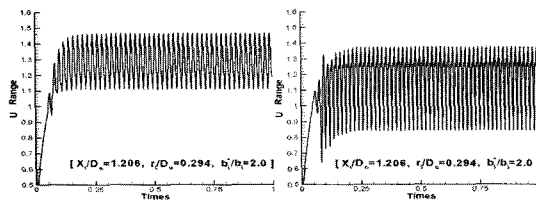
Fig. 3 FFT



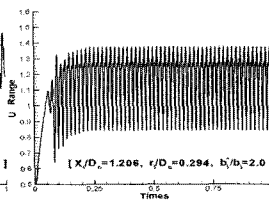
(a)  $U_i/U_o = 0.4$



(b)  $U_i/U_o = 0.6$



(c)  $U_i/U_o = 0.8$



(d)  $U_i/U_o = 1.0$

Fig. 4 Monitoring Plot

$U_i/U_o = 0.6$ ,  $x_i/D_o = 1.206$ ,  $b_i^*/b_i = 2.0$ 인 조건에서 FFT 수행한 결과를 Fig.3에 비교하였다. 주파수를 추출하기 위한 FFT는 초기의 천이구간을 제거하여 주기적인 경향이 일정하게 발생하는 영역에 대해 적용하였다. 실제 신호로부터 얻어지는 주파수(42.55Hz)와 FFT결과(42.83Hz)를 비교할 때 1% 이내의 오차범위 내에서 일치하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 평균 속도비 변화에 따른 혼합 특성의 변화

외부제트의 직경  $D_o = 40.8 \text{ mm}$ , 두께  $b_i = 2.0 \text{ mm}$ , 외부제트의 직경을 이용한 레이놀즈 수  $Re (= U_o D_o / \nu) = 3000$ 인 층류유동에서 외부제트의 속도  $U_o = 1.2 \text{ m/s}$ 로 일정하게 하고,  $U_i/U_o = 0.4 \sim 2.0$ 일 때 유동장의 특성을 확인하였다. Fig. 4에 평균 속도비 변화에 따른 Monitoring Point에서 U에 대한 시간변화를 나타내었다. 결과는 초기의 안정구조에서 시간이 지날수록 천이구간을 거쳐 주기적인 유동구

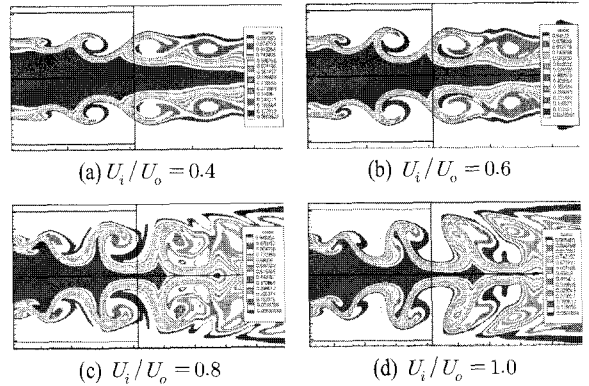


Fig. 5 Scalar Contour by velocity ratio

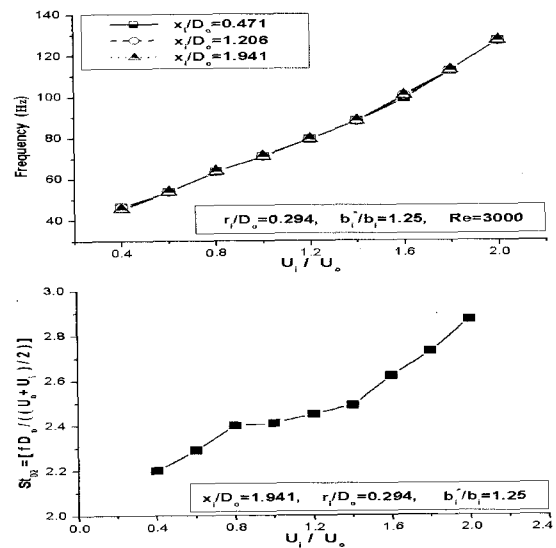


Fig. 6 Frequency & Strouhal number by velocity ratio

조로 변화가는 형태를 보여주고 있다. 그림에서 보면 속도비의 크기가 증가할수록 천이구간은 감소하고 진폭은 증가함을 알 수 있다.

유동장에 대한 이러한 비정상적인 특징은 Fig. 5에서 확인할 수 있다. 제트출구에서 생성된 와류가 축 방향으로 발달하면서 이웃하고 있는 와류들과 혼합해 가는 과정을 볼 수 있다. 이러한 와류구조의 변화는 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 비정상적인 유동구조에 의해서 유동장의 특징을 나타내는 주파수와 밀접한 관계가 있다. 속도비 변화에 따른 주파수 변화를 살펴보기 위해 무차원변수  $St_D = 2fD_o / (U_i + U_o)$ 를 도입하였다. Fig. 6에서 보면  $U_i/U_o$ 의 증가에 따라 주파수가 거의 선형적으로 증가하고 있다. 이러한  $St_D$ 의 변화는 유동에 의한 혼합특성을 나타내는 것으로 매우 의미 있는 결과이다.

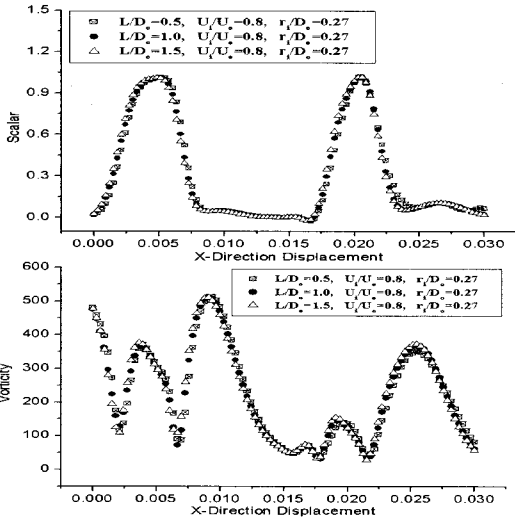
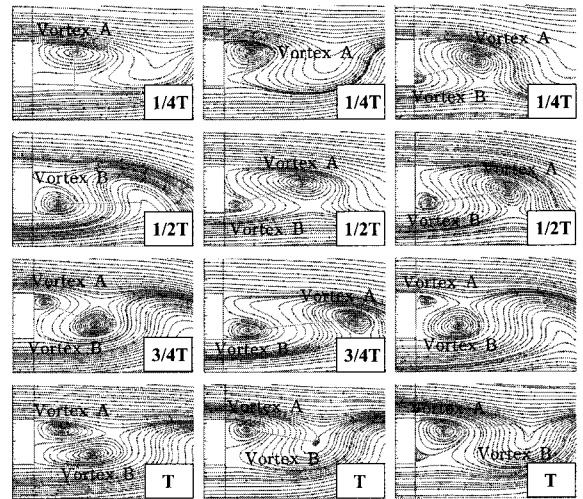


Fig. 9 Vorticity and Scalar by outer pipe length



(a)  $U_i/U_o = 0.6$  (b)  $U_i/U_o = 0.8$  (c)  $U_i/U_o = 1.0$

Fig. 7 Velocity streamline

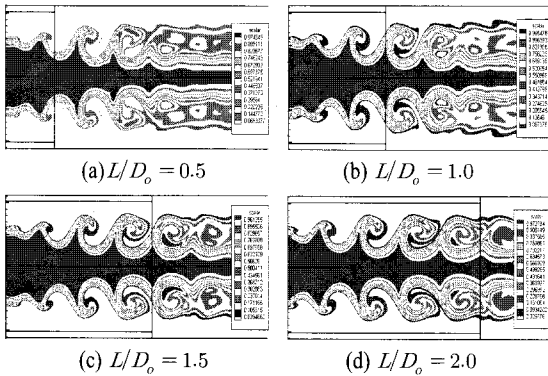


Fig. 10 Scalar Contour by outer pipe length

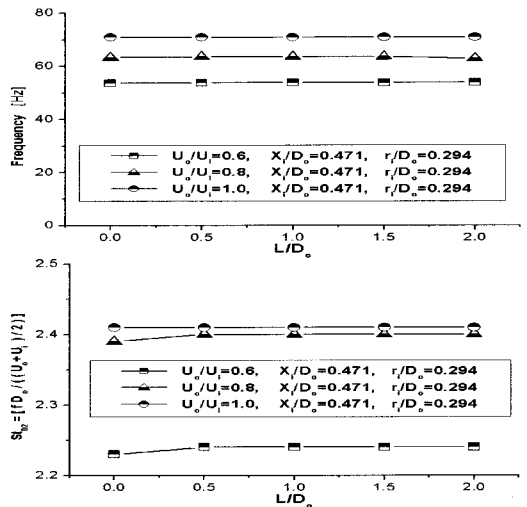


Fig. 8 Frequency & Strouhal number by outer pipe length

Fig. 7은 유동장의 주기 T를 기준으로 1/4T, 1/2T, 3/4T, T인 순간의 유선분포를 나타내고 있다. 시간의 변화에 따라 내부제트의 선단부분에서 발생하는 선단변형율의 차이로 인해 와류구조가 생성되고 그 크기나 위치가 주기적으로 변화함을 알 수 있다. Fig. 7에서  $U_i/U_o = 0.6, 0.8, 1.0$ 인 속도조건에 대해 초기에 선단에서 발생한 와류 A가 축 방향으로 박리됨에 따라 와류 B가 발생하는 형태의 변화를 보이고 있다. 다시 와류 B가 선단으로부터 박리됨에 따라 와류 A가 발생하는 주기적인 형태이다. 여기서 와류 B의 크기와 생성·소멸되는 시점이 속도비가 증가함에 따라 변화함을 알 수 있다. 특히, 와류 A가 축 방향으로 박리되면서 성장·소멸되는 시점까지의 길이가 거의 일정한 특성을 보이고 있다. 따라서 평균속도비가 증가함에 따라 주기는 짧아지게 되고 결국 진동수의 증가로 이어지게 된다.

### 3.2 외부제트의 선단길이 변화에 따른 혼합 특성변화

다른 형상 변수들은 고정시키고 ( $D_o, D_i, b_i, b_i^*$  일정) 평균 속도비  $U_i/U_o = 0.6 \sim 1.0$  인 경우에 대해 외부제트의 선단 길이  $L = 0 \sim 2D_o$  로 변화시키면서 수치해석을 수행하였다. Monitoring Point에서 얻어진 신호를 바탕으로 천이 구간을 제외한 영역을 FFT한 결과 얻어진 와류주파수와  $St_{D_2}$ 를 Fig. 8에 나타내었다. 평균 속도비가 증가함에 따라 와류주파수와  $St_{D_2}$ 가 증가하지만, 외부제트의 선단길이 변화에 관계없이 일정한 값을 나타낸다.

$x_i/D_o = 1.123 \sim 1.961$ 인 영역에서 유동의 혼합특성을

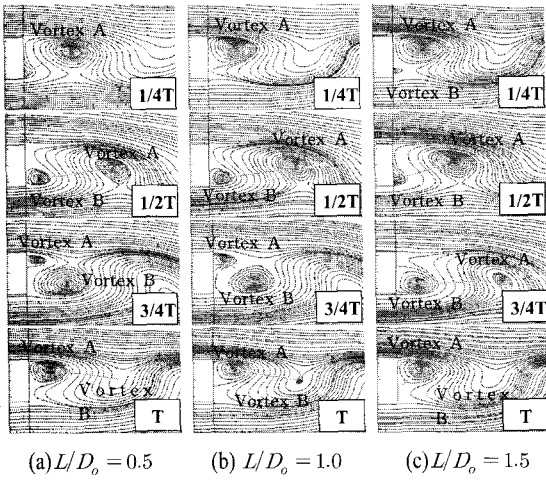


Fig. 11 Velocity streamline,  $U_i/U_o = 0.8$

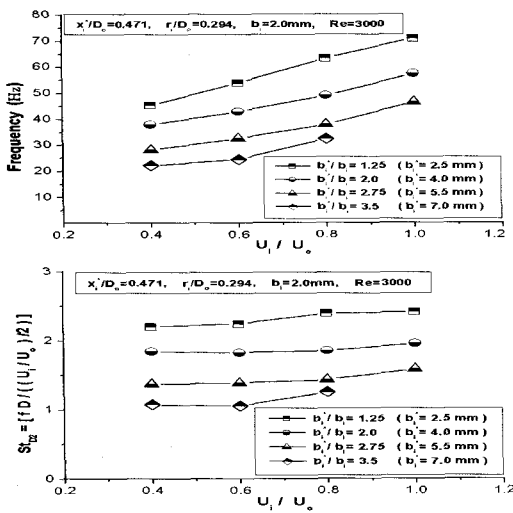


Fig. 12 Frequency & Strouhal number by lip thickness

확인하기 위하여 스칼라(scalar)와 와도(Vorticity)를 Fig.9에 나타내었다. 평균 속도를 일정하게 유지할 때, 외부 제트의 선단길이를  $L/D_o = 0.5, 1.0, 1.5$ 로 변화시키더라도 와도와 Scalar양의 변화를 보면 혼합특성은 변화하지 않음을 알 수 있다. Fig. 10에 나타난 Scalar contour와 Fig. 11의 와류구조는 Fig. 8과 Fig. 9와 일관성 있는 특징을 보여준다. 특히 Fig. 11은  $L/D_o = 0.5, 1.0, 1.5$ 인 경우에 주기 T를 기준으로 순간적인 유선분포를 나타내고 있다. 실제로 외부제트의 선단길이와 관계없이 와류구조가 생성·성장·소멸되는 시점과 크기·형태가 유사함을 알 수 있다. 세 경우 모두 선단에서 발생된 와류 A의 생성위차나 크기, 축 방향으로의 박리가 거의 동일한 형태로 나타나고 있고, 와류 A의 박리로부터 발생되

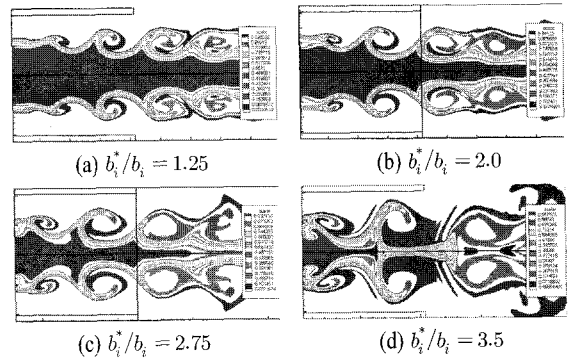


Fig. 13 Scalar Contour by lip thickness,  $U_i/U_o = 0.8$

는 와류 B의 거동도 유사한 형태로 나타나고 있다.

### 3.3 내부 제트의 두께에 따른 혼합특성 변화

다른 형상 변수들은 고정시키고( $D_o, b_i, L$ 는 일정) 평균 속도비  $U_i/U_o = 0.4 \sim 1.0$ 인 경우에 내부제트의 두께를 변화시키면서 수치해석을 수행하였다. Monitoring Point에서 얻어진 신호를 바탕으로 천이구간을 제외한 영역을 FFT한 결과 얻어진 와류 주파수와  $St_{D_2}$ 를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에서 동일한 평균 속도비 인 경우 내부제트의 두께  $b_i^*$ 가 증가함에 따라 주파수는 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 13은 내부제트의 두께비  $b_i^*/b_i = 1.25, 2.0, 2.75, 3.5$ 인 경우에 scalar contour를 나타낸 것이다. 내부제트의 선단두께가 증가함에 따라 내·외부제트에서 분사된 유체의 혼합정도가 증가함을 보여준다.

Fig. 14는 동일한 평균 속도비( $U_i/U_o = 0.8$ )일 때,  $b_i^* = 2.5, 4.0, 5.5, 7.0$ mm인 경우에 대한 주기 T를 기준으로 순간적인 유선분포를 나타낸 것이다. 이는 선단의 두께변화에 따른 전단응력과 전단변형율의 변화로 인해 혼합과정에서 나타나는 와류구조의 특성변화를 보여준다. 즉, 선단부근에서 발생된 와류 A가 축 방향으로 박리·소멸되면서 와류 B가 생성되고, 다시 와류 B가 박리·소멸되면서 와류 A가 생성되는 주기적인 형태를 나타내고 있다. 주기적인 와류구조의 변화과정에서 선단으로부터 와류 A, B가 생성·박리·소멸되어지는 길이가 내부제트 두께의 증가에 비례하는 특징이 나타난다. 그 결과 동일한 평균 속도비 일 때 혼합과정에서의 주기는 증가하고 주파수는 감소함을 알 수 있다. 또한 내부제트의 두께  $b_i^* = 2.5 \sim 4.0$ mm인 경우는 1/4T일 때 와류 A뿐이지만,  $b_i^* = 5.5 \sim 7.0$ mm인 경우는 1/4T일 때 와류 A, B가 발생되고 있다. 와류 B의 크기나 생성·성장·소멸시점도 확연한 차이가 남을 알 수 있다. 특히, 두께  $b_i^* = 7.0$ mm인 경우는

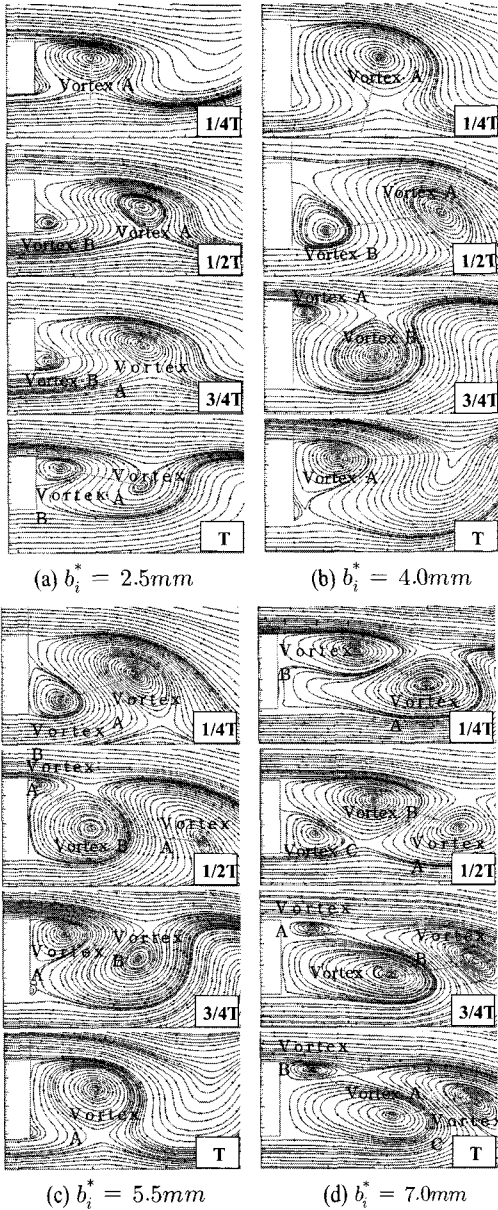


Fig. 14 Velocity streamline,  $U_i/U_o = 0.8$

와류 A, B뿐만 아니라, 그전에 볼 수 없었던 와류 C가 생성되는 특징이 나타난다. 결국 이러한 와류구조와 혼합특성의 차이는 내부제트의 두께에 따라 선단의 전단면에서의 발생하는 전단변형률의 차이에 기인함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

전단변형률을 이용하는 동축제트 내부에서 와류의 동적 특

성 및 혼합특성의 변화를 파악하기 위해 평균 속도비, 내부제트의 두께, 외부제트의 선단 길이 변화에 대하여 비정상해석을 통한 수치해석을 수행하였다. 평균 속도비와 내부제트의 선단 두께 변화에 따라 와류주파수는 변하지만, 외부제트의 선단길이 변화와는 관계가 없음을 알 수 있었다. 특히, 와류주파수는 평균 속도비에 비례하고 내부제트의 선단두께 변화와는 반비례하는 경향을 나타내었다. 유선분포를 통해 본 와류 구조의 동적 특성변화로 그 사실을 확인할 수 있었다. 내부 혼합층에서의 혼합정도도 평균속도비와 내부제트의 두께 변화에 비례하는 특성을 나타내었다. 반면, 동일한 평균속도비와 내부제트의 두께 일 때, 외부제트의 선단길이 변화와는 관계없이 와류주파수는 동일한 값을 나타내고 혼합 특성도 유사함을 확인하였다.

#### 참고문헌

- [1] 1976, Ko, N.M.W, Chan, "The initial region of subsonic coaxial jets," *J. Fluid. Mech.*, Vol.73, pp.305-332.
- [2] 1977, Ko, N.M.W, Chan, "The initial region of subsonic coaxial jets. Part 2," *J. Fluid. Mech.*, Vol.82, p.273-287.
- [3] 1979, Ko, N.M.W, Chan, "The inner region of annular jets," *J. Fluid. Mech.*, Vol.93, pp.549-584.
- [4] 1978, Ko, N.M.W, Chan, "Similarity in the initial region of annular jets: three configuration," *J. Fluid. Mech.*, Vol.84, pp.641-656.
- [5] 1980, Ribeiro, M.M, Whitelaw, JH, "Coaxial jets with and without swirl," *J. Fluid. Mech.*, Vol.96, pp.769-795.
- [6] 1981, N.W.M.K.O, H.A.U, "Initial region of subsonic coaxial jets of mean-velocity ratio," Transactions of the American Society of Mechanical Engineer, *J. Fluid. Engineering.*, Vol.103, pp.335-338.
- [7] 1981, N.W.M.K.O, H.A.U, "Spreading rate and reattachment of coaxial jet of high mean-velocity ratio," Transactions of the American Society of Mechanical Engineer, *J. Fluid. Engineering.*, Vol.104, pp.400-401.
- [8] 1983, H.A.U, N.W.M.K.O, "Pressure measurement of coaxial jet of high mean-velocity ratio," *Transactions of the American Society of Mechanical Engineer.*, Vol.7, pp.51-57.
- [9] 1997, Kiwata, T., Okijima, A., Ueno, H., Kimura, S., "Vortex Frequency of Coaxial Jets," *JSME Int. Conf. on Fluids Eng.(Tokyo).*, Vol.1, pp.111-116.
- [10] CFD-ACE+, ESI-Group.