# 노즐내 물체의 후류가 아음속 이차원 제트구조에 미치는 영향에 관한 연구

김태호[*] • 이상찬[*] • 윤복현[*] 오대근[**] • 김희동[***]

# Effect of a Turbulent Wake on Two-Dimensional Subsonic Jet

Tae-Ho KIM[*], Sang-Chan LEE[*], Bok-Hyun YOON[*], Dae-Geun OH[**] and Heuy-Dong KIM[***]

**Key Words :** Subsonic Jet(아음속 제트), Jet Spread(제트 확산), Turbulent Wake(후류), Turbulent Mixing(난류 혼합), Internal Flow(내부유동)

**Abstract**

A turbulent wake generated by a cylinder in nozzle contraction affects to the jet flow characteristics. In this study, a computational work to investigate the effect of the turbulent wake on two-dimensional subsonic jet was carried out with three different kinds of nozzle. Computations are applied to the two-dimensional unsteady, Navier-Stokes equations. Several kinds of turbulent models and wall functions are employed to validate the computational predictions. It was known that the wake flow enhanced the spread of the jet flow, compared with no wake flow condition. It was also found that the jet core is shortened by the wake flow developed from a control cylinder.

## 1. 서 론

노즐로부터 방출되는 제트유동은 여러 분야에서 매우 널리 이용되어져 왔다. 예를 들면, 연소시 화학물질의 혼합을 증진시켜, 환경오염 물질의 생성을 억제한다든지, 비행체의 제트엔진으로부터 방출되는 공력소음을 감소시키는데도 사용된다. 그래서 그 유동제어는 공학적으로 매우 중요한 과제의 일부임에 틀림없다.

아음속 제트유동은 인위적으로 가한 미소한 교란에 대하여 제트 전단층내에서 와류의 성장 및 합체, paring 현상이 일어나므로, 그 거동에는 매우 큰 비정상성이 존재하게 된다[1,2]. 현재에도 아음속 제트 유동제어의 효율을 높이기 위하여 많은 연구가 활발히 진행중에 있다.

[*] 목포대학교 기계공학과; kimth973@hanmail.net
[**] 목포대학교 대학원
[***] 안동대학교 기계공학과

종래 연구결과에 따르면, 제트유동의 혼합, 확산 작용은 외부로부터 전달되어지는 음파나 속도변동을 가함으로써 유동제어가 가능한 것으로 알려 있다[3,4]. 그러나 이러한 능동제어는 외부에 액튜에터(actuator)를 설치할 필요가 있으므로, 산업전반에 널이 사용되고 것을 고려하면, 경제적인 면에서 제약을 받게 된다.

노즐내에 실린더를 설치함으로 인하여 발생하는 후류의 주기적 속도변동은 제트 전단층내 와류의 제어가 가능하다[5]. 이 제어법은 외부에 복잡한 장치가 필요없는 피동제어의 일환으로, 위의 능동제어가 곤란한 고온, 고압의 작업환경에 적용 가능하다.

본 연구에서는 노즐내 실린더 형상을 변화시켜, 실린더 하류에서 발생하는 후류(turbulent wake)가 이차원 아음속제트 구조에 어떠한 영향을 미치는지를 조사하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 2 차원 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 유한체적법으로 제트유동을 계산하였다.

본 연구의 수치계산에서는 여러 형태의 난류모

델과 벽함수 등을 변화시켜, 최근에 수행된 문헌 (5)의 실험적 연구결과와 비교하여, 아음속 제트유동을 잘 예측할 수 있는 난류모델과 벽함수를 조사하였으며, 실린더 형상 변화에 따른 제트의 확산(spreading), 속도분포 및 난류강도(turbulent intensity)도 조사하였다.

## 2. 수치해석

### 2.1 지배방정식

수치계산에서는 다음의 식들로 주어지는 2 차원 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한체적법을 적용한 상용 코드(FLUENT)를 사용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{2}{3}\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho\overline{u_i' u_j'}) \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i H) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(x + \frac{\mu_t}{\Pr_t}\right)\frac{\partial T}{\partial x_i} + u_j(\tau_{ij})_{eff}\right] \tag{3}$$

위의 식들에서 공간항의 차분에는 upwind scheme, 시간항의 차분에는 4 단계 Runge-Kutta 법을 적용하였다. 본 연구에서 적용된 디퓨저의 유동을 수치적으로 잘 예측하기 위해 적절한 난류 모델과 벽함수의 선택이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 standard $\kappa$-$\varepsilon$, RNG $\kappa$-$\varepsilon$, Realizable $\kappa$-$\varepsilon$ 그리고 Reynolds Stress model 의 4 가지 난류모델과 표준벽함수(standard wall function)와 비평형 벽함수(non-equilibrium wall function)를 적용하였다.

### 2.2 계산영역 및 경계조건

Fig.1 에는 본 연구에 적용된 2 차원 아음속 제트유동의 노즐에 대한 개략도 및 좌표계 나타내었다. 그림에서 유동은 왼쪽에서 오른쪽으로 흐르며, 노즐출구를 원점($x$=0)으로 가정하였다. 그림에서 노즐출구 높이 $h$=15 *mm*, 노즐출구 속도 $U_0$=10.1 *m/s* 로 고정하였으며, 아음속 제트의 확산정도를 나타내기 위하여 $b$ 를 사용하였다. 여기에서 $b$ 는 아음속 제트유동내 어느 위치($x/h$)에서 최대속도($U_m$)에 대하여 1/10 되는 속도의 위치를 측정한 값이다.

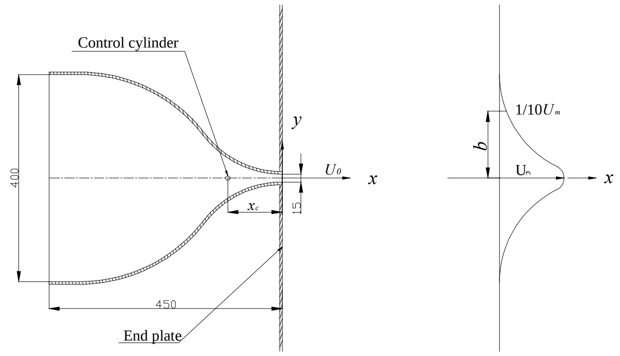



**Fig. 1** Schematic view of nozzle and coordinate system

| | |
|---|---|
| 실린더 형상 | 원형/반원형 실린더 |
| 실린더 직경($d$) | 3, 10.5, 18 *mm* |
| 노즐출구 높이($h$) | 15 *mm* |
| 실린더 위치($x_c/h$) | 6, 7 |
| 노즐출구 단면평균속도($U_0$) | 10.1 *m/s* |

**Table 1** Flow conditions for computations

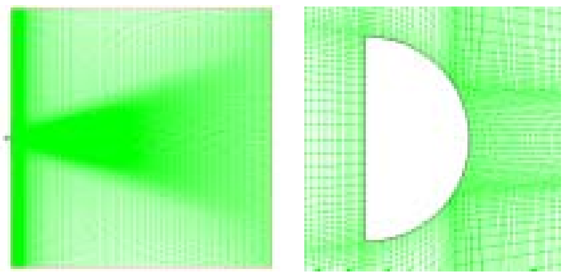


**Fig. 2** Computational domain and grid system around a cylinder

노즐내 후류를 발생시키기 위하여, 노즐출구의 상류 x=-105 mm 의 위치에 직경 $d$ 를 가지는 실린더를 설치하였다. 본 연구에서는 실린더의 직경 및 형상을 변화시켜 이들이 아음속 제트유동에 미치는 영향을 조사하였다. Table 1 에는 본 연구에서 적용한 실린더 직경 $d$ 와 형상 그리고 노즐출구에서의 주유동의 단면 평균유속 $U_0$ 의 값을 나타내었다.

Fig.2 에는 본 수치계산에 적용된 전체 계산영역 및 실린더 주위의 정렬 격자계를 나타내었다. 계산에 사용된 격자점은 대략 10 만개 정도로, 유동장내에 속도변화가 비교적 큰 부분 즉 실린더 후류와 경계층 영역에 격자점을 집중 하였다. 한편 본 연구에서와 같은 유동장 해석을 위해서는 경계조건의 타당성을 조사하는 것이 매우 중요하다.

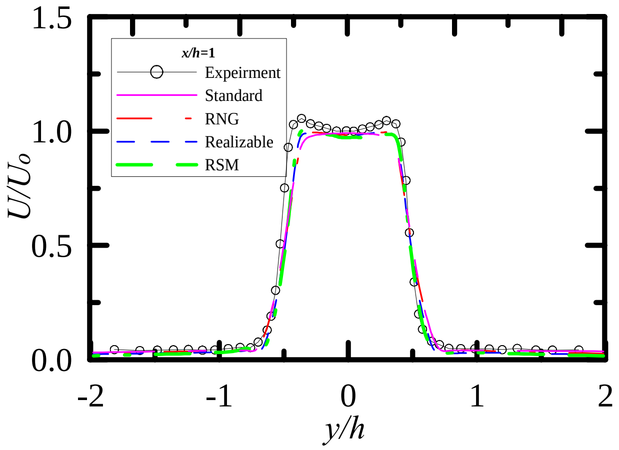
본 연구에서는 여러 차례 예비 수치실험을 수행하여, 노즐 상류 경계에 velocity inlet 조건을, 대기조건으로 pressure outlet 조건이 실험값을 가장 잘

예측하였을 뿐만 아니라 빠른 수렴해를 제공하는 것으로 보였다. 또 모든 벽면에는 단열 no-slip 벽 조건을 적용 하였다. 수치해의 수렴은 질량, 운동량 및 에너지의 residuals 가 모두 0.1% 이하이며, 계산의 경계를 드나드는 질량의 imbalance 가 1% 이하인 경우에 수렴해가 얻어진 것으로 판단하였다.

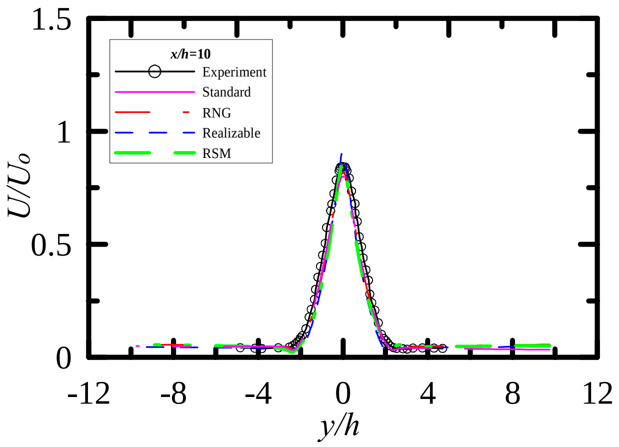
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 난류모델과 벽함수

일반적으로 본 연구에서와 같이 노즐내 이차원 물체를 설치하는 함으로 인하여 발생하는 후류의 주기적 속도변동은 아음속 제트 전단층내 복잡한 와유동을 발생시킨다. 이러한 와유동을 수치해석적으로 정확하게 해석하는 것은 대단이 어려우며, 난류모델이나 벽함수가 수렴해에 큰 영향을 미치게 된다.

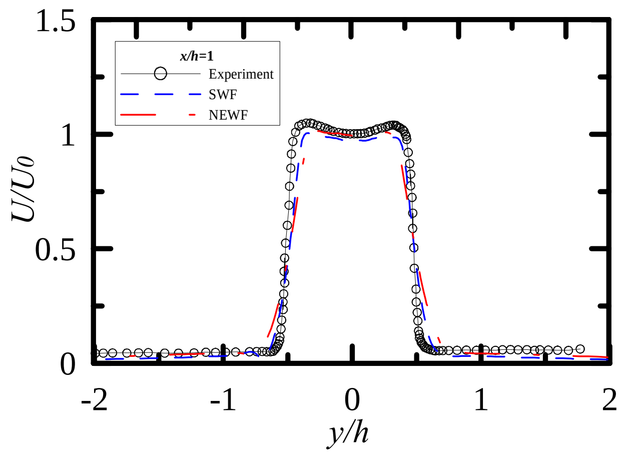



(a) $x/h$=1

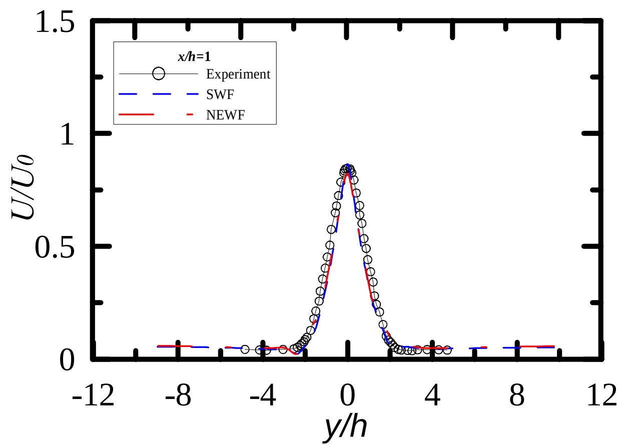



(b) $x/h$=10

**Fig. 3** Turbulent model effects on velocity profiles




(a) $x/h$=1




(b) $x/h$=10

**Fig. 4** Wall function effects on velocity profiles

Fig.3 에는 실린더 직경(d)이 3.0$mm$ 이고, 원형 실린더(circular cylinder)의 위치 $x_c/h$=7 인 경우, 난류모델이 아음속 제트내 속도분포에 미치는 영향을 나타내었다. 여기에서는 제트내 위치 $x/h$=1, 10 인 경우이다. 그림에서 네 종류의 난류모델 중에서 RSM(Reynolds stress Method)이 실험값을 가장 잘 예측하는 것으로 보인다.

Fig.4 에는 RSM 난류모델을 사용한 경우, 속도분포에 미치는 벽함수의 영향을 나타내었다. 그림으로부터 비평형 벽함수(non-equilibrium wall function)가 실험값을 가장 잘 예측하는 것으로 판단된다. 따라서 이하의 결과에서는 RSM 난류모델과 비평형 벽함수을 적용한 수치계산 결과를 토론한다.

### 3.2 속도분포

Fig.5 에는 실린더 직경($d$=10.0$mm$)인 경우, 형상에 따른 아음속 제트내 특정 위치($x/h$=10)에서의 속도분포를 나타내었다.

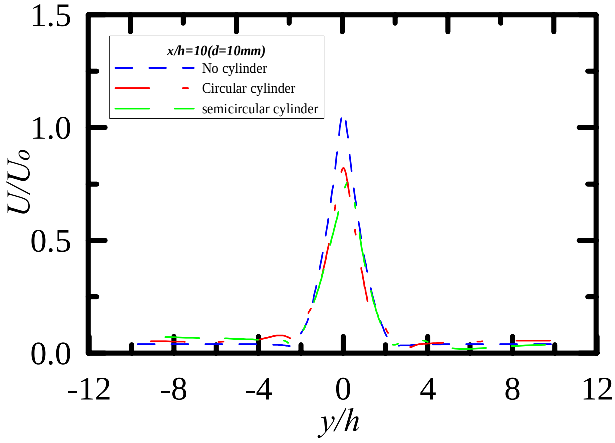



**Fig. 5** Velocity profiles in subsonic jet at *x/h*=10, *d*=10*mm*

그림의 종축값은 노즐출구에서의 속도 $U_0$ 로 제트내 *x/h* 의 위치에서 단면 유속 *U* 를 무차원한 값이다. 그림의 횡축은 노즐출구의 중심을 원점으로 하는 축에 대하여 수직방향의 거리(*y*)를 노즐출구 높이(*h*)로 무차원한 값이다. 또 실린더의 직경에 근거한 유동의 레이놀즈수는 2020 ~ 12120 이었다. 그림에서와 같이 실린더의 형상변화가 단면 속도 분포에 크게 영향을 미치는 것을 알 수가 있다. 아음속 주제트 유동의 최대속도는 실린더를 설치하지 않은 경우부터, 원형 실린더 그리고 반원형 실린더(semicircular cylinder) 순으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 노즐내 이차원 물체를 설치함으로써, 노즐출구로부터 방출되는 아음속 제트유동이 급격히 확산되는 것으로 예측된다. 그 확산정도는 원형 실린더에 비하여 반원형 실린더의 경우가 크게 나타났다. 또한 그림에서 반원형 실린더의 경우 주제트 유동의 최대속도값이 노즐축으로부터 벗어나는 것은 노즐내 실린더로부터 발생한 후류에 의하여 주제트유동이 변동하는 것으로 생각할 수 있다.

### 3.3 제트확산

Fig.6, 7 에는 실린더 형상 및 직경 변화에 따른 아음속 제트확산 정도를 알라 보기 위하여, 축방향으로의 무차원 거리 *x/h* 에 대한 제트확산 정도를 나타내는 *b* 의 값을 노즐출구 높이(*h*)로 무차원한 값에 대하여 나타내었다. Fig.6 에서는 전체적으로 실린더를 설치한 경우가 설치하지 않은 경우에 비하여 제트확산이 잘 일어나고 있음을 볼 수 있다. 또한 원형 실린더에 비하여 반원형 실린더의 경우가 *x/h* 가 증가할수록 급격하게 제트가 확산되는 것을 알 수가 있었다. Fig.7 에서는 노즐내 설치된 반원형 실린더의 직경이 증가 할수록 아음속

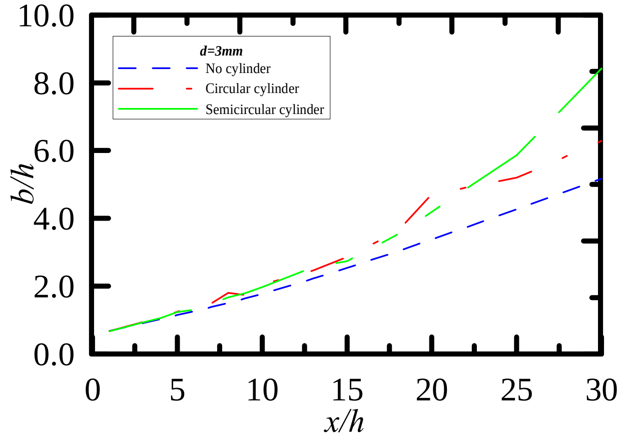



**Fig. 6** Effects of cylinder shape on jet spreading

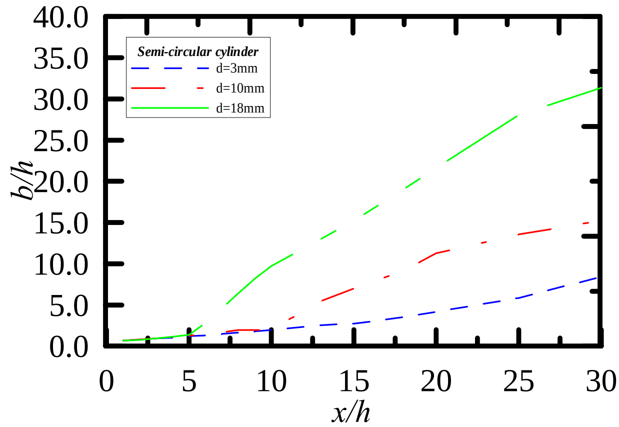
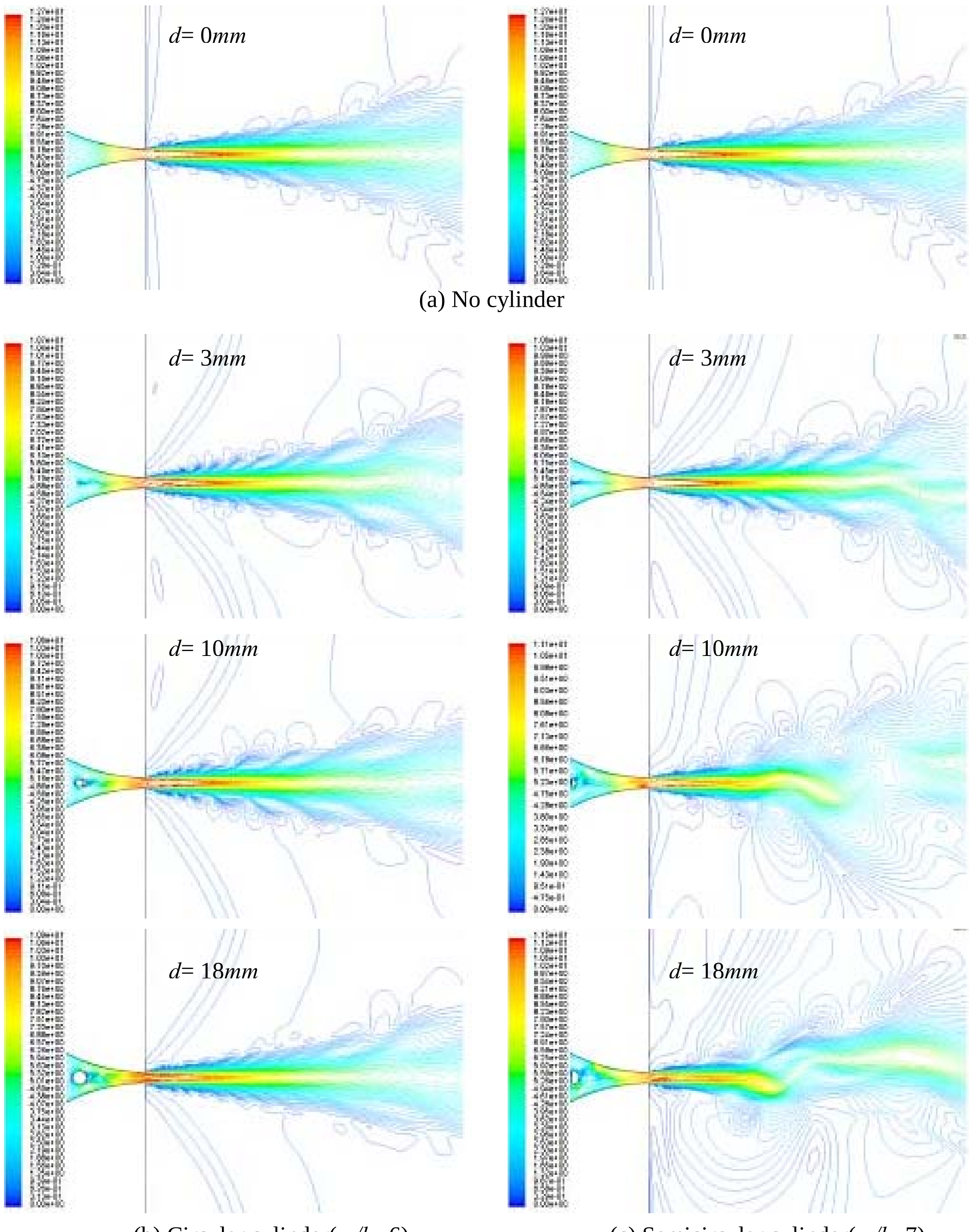



**Fig. 7** Effects of cylinder diameter on jet spreading

제트유동이 크게 확산되는 것을 예측할 수 있다. 또한 실린더 직경 *d*=10*mm* 및 18*mm* 인 경우, 각각 *x/h*=약 10, 5 보다 커짐에 따라 확산정도가 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 아음속 제트구조에 어떠한 변화가 있음을 예측할 수 있다.

이상의 결과로부터 노즐내 설치된 실린더의 형상 및 직경을 변화시키므로 인하여 아음속 제트유동의 확산에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.




(b) Circular cylinder($x_c/h$=6) (c) Semicircular cylinder($x_c/h$=7)

**Fig. 8** Flow visualization of subsonic jet with velocity contours

### 3.4 유동가시화

Fig.8 에는 실린더 형상 및 직경 변화에 따른 유동 수치적 기법을 이용하여 등속도분포를 나타내었다. 그림으로부터 실린더가 설치되지 않은 경우에 비하여 실린더를 설치함으로써 확산정도가 다소 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 원형 실린더의 경우 실린더 직경변화에 관계없이 주제트 유동은 거의 일정하게 유지되는 반면, 반원형 실린더인 경우 실린더 직경변화에 따라 주제트 유동이 크게 변동하는 것을 알 수 있다. 그 주제트 유동의 변동이 시작하는 위치는 직경이 증가함에 따라 노즐 출구쪽으로 접근하는 것을 알 수 있다. 이는 유동 가시화 그림에서와 같이 반원형 실린더의 경우, 노즐출구로부터 방출된 와유동이 아음속 제트 유동과 간섭하면서 매우 크게 성장하기 때문이다.

## 4. 결론

본 연구에서는 노즐내 실린더 형상 및 직경을 변화시켜, 실린더 하류에서 발생하는 후류가 이차원 아음속제트 구조에 어떠한 영향을 미치는지를 조사하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 난류모델로서는 RSM 모델에 비평형 벽함수를 사용하는 경우 아음속 제트내 속도분포를 잘 모사 하였다.

(2) 아음속 제트 확산효과는 실린더를 설치하지 않은 경우에 비하여 실린더를 설치하는 경우가 크며, 원형 실린더에 비하여 반원형 실린더인 경우 그 효과는 더 크게 나타났다.

(3) 반원형 실린더인 경우 실린더 직경변화에 따라 주제트 유동이 크게 변동하였으며, 그 변동이 시작하는 위치는 직경이 증가함에 따라 노즐쪽으로 이동하였다.

## 후기

본 논문은 2003 년 두뇌한국 21 사업에 의해 지원 되었음.

## 참고문헌

(1) Crow, S.C. and Champage, F.H., 1971, “Orderly Structure in Jet Turbulence,” *J. Fluid Mech.*, Vol.48, pp.547-598.
(2) Hilgers, A. and Boersma, B.J., 2001, “Optimization of Turbulent Jet Mixing,” *Fluid Dynamics Research*, Vol.29, pp.345-368.
(3) Pimshtein, V.G., 1994, “Disturbance generation in supersonic jets under acoustic exciation,” *AIAA J.*, Vol.32, No.7, pp.1345-1349.
(4) Zaman, K.B.M.Q., Reeder, M.F. and Samimy, M., 1994, “Control of an Axisymmetric Jet Using Vortex Generators,” *Phys. Fluid*, Vol.6, pp.778-784.
(5) Miyakoshi, K. and Haniu, H., 2003, “Coherent Structure in a Two-Dimensional Jet Passively Controlled by Wake of a Cylinder Installed in Nozzle Contraction,” *JSME series B*, Vol.69, No.678, pp.90-97.