

# 스파이럴 제트 유동에 미치는 축소노즐 각도의 영향

조위분<sup>†</sup> · 백승철\* · 김희동\*\*

## The Effect of Convergent Nozzle Angle on a Spiral Jet Flow

Wee-Bun Cho, Seung-Cheol Baek and Heuy-Dong Kim

**Key Words :** Compressible Flow(압축성 유동), Spiral Jet(스파이럴 제트), Tangential Velocity(접선 방향 속도), Convergent Nozzle Angle(축소 노즐 각도), Coanda Effect(코안다 효과)

### Abstract

In general the swirl jet is generated by the injected flow that is forced to the tangential direction. A spiral nozzle which is composed of an annular slit and a convergent nozzle, is released the spiral jet that is generated by the radial flow injection through an annular slit. The objective of the present study is to investigate the additional study that is studied a changed the convergent nozzle angle and nozzle length. In the present computation, a finite volume scheme is used to solve three dimensional Navier-Stokes equations with RNG  $k-\epsilon$  turbulent model. The convergent nozzle angle and the nozzle length of the spiral nozzle are varied to obtain different spiral flows inside the conical convergent nozzle. The present computational results are compared with the previous experimental data. The results obtained show that the convergent nozzle angle and the nozzle length of the spiral jet strongly influence the characteristics of the spiral jets, such as a tangential and a jet width.

### 1. 서 론

일반적으로 스윙 제트(swirl jet)는 축소노즐의 접선방향으로 유동을 강제적으로 주입시켜 축소노즐로부터 스윙 유동을 방출하게 되며, 스파이럴 제트(spiral jet)는 축소노즐과 환형 슬릿으로 구성된 스파이럴 노즐에서 환형 슬릿을 통하여 유동이 유입되어 축소노즐로부터 스파이럴 제트 유동이 방출된다. 따라서 스윙 제트는 강제와류(forced vortex)의 영역이 매우 크며, 축방향 속도는 반경 방향에 비해 중심축 부근에서 매우 낮은 분포를 갖는다. 한편, 스파이럴 제트는 자유와류(free vortex)의 영역이 제트 중심축 부근까지 차지하며, 제트 중심에서 축방향 속도성분이 크다는 점에서 선회제트와는 다른 유동특성을 가진다. 또한, 스파

이럴 제트는 선회 제트에 비해 제트코어(jet core) 영역이 길며, 제트의 확산(diffusion)이 크지 않으며, 제트의 난류강도가 작아 고체입자나 분말의 수송<sup>(1,2)</sup>, 연질재료의 절단<sup>(3)</sup>, 광섬유의 전송<sup>(4)</sup>, 각종 플라즈마 에너지 응용<sup>(5)</sup> 등 다양한 분야에서 스파이럴 유동 노즐(spiral flow nozzle)이 광범위하게 활용되고 있다.

종래에 스파이럴 제트 유동에 관한 실험적, 수치 해석적 연구들이 수행되어 왔다<sup>(6, 7, 8, 9)</sup>. Matsuo 등<sup>(6)</sup>은 축소노즐의 입구에 설치한 환형 슬릿(annular slit)으로부터 주입되는 기체유동은 축소노즐의 출구에서 스파이럴 제트로 방출된다는 것을 실험적으로 조사한바 있으며, 환형 슬릿으로부터 주입하는 기체의 전압과 형상 등이 노즐출구로부터 방출되는 스파이럴 제트에 영향을 미친다는 것을 알았다. Cho 등<sup>(7)</sup>은 Matsuo 등에 의한 실험결과를 토대로 스파이럴 제트에 관한 수치해석을 통하여 수치해석적 연구의 타당성을 제시하였다. 이들의 연구결과에 의하면, 축소노즐 입구에 설치한 환형 슬릿으로부터 주입되는 기체유동은 노즐입구에서 발생하는 Coanda 효과에 의하여 노즐 벽을

<sup>†</sup> 안동대학교 기계공학과 대학원  
E-mail : kimhd@andong.ac.kr  
TEL : (054)820-5622 FAX : (054)823-5495

\* LG 전자 DAC 연구소

\*\* 안동대학교 기계공학과

향하여 편향되어 노즐출구로부터 방출된다. 이러한 과정에서 축소노즐 내부에는 유동의 접선속도 (tangential velocity) 성분이 발생하며, 축 방향의 속도분포는 급격한 구배를 가진다는 것을 제시하였다. 또한, Cho<sup>(8, 9)</sup> 등은 종래의 수치해석적 연구 결과<sup>(7)</sup>를 바탕으로 스파이럴 노즐의 형상이 스파이럴 제트 유동에 미치는 영향을 상세히 조사하기 위하여, 환형 슬릿의 폭, Coanda 곡률반경, 축소노즐 출구직경과 압력비를 변화시켜 유용한 수치해석 결과를 얻었다. 이러한 연구에 의하면, 스파이럴 제트는 어떤 특정 환형 슬릿의 폭( $d/D_H=0.025$ )에 대하여 가장 높은 접선방향 속도성분을 가졌으며, 큰 환형 슬릿의 폭( $d/D_H=0.05$ )에 대해서는 Coanda 효과가 감소하여 접선방향 속도성분이 다르게 나타나는 것을 알았다. 또한, 축소노즐의 출구직경이 증가할수록 접선방향 속도 성분은 감소하는 것을 나타내었다.

현재까지 스파이럴 제트에 관해서 많은 실험적 연구가 수행되어 왔지만, 스파이럴 제트유동의 발생 메커니즘은 아직까지 명확히 규명되어 있지 않으며, 산업현장에서는 경험에 의하여 얻어진 스파이럴 유동노즐을 설계 및 제작하여 활용하고 있다. 따라서, 스파이럴 유동노즐을 산업적, 공업적으로 적절하게 응용하기 위해서는 스파이럴 제트유동의 상세한 정보와 체계적인 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 수치해석을 통하여 축소노즐의 각도와 축소노즐 길이가 스파이럴 제트유동 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 3 차원, 정상, 압축성, Navier-Stokes 방정식에 유한 체적법과 RNG  $k-\epsilon$  난류모델을 적용하였다. 본 연구에서 얻어진 수치해석 결과는 유용한 실험결과<sup>(7)</sup>와 비교하여 스파이럴 제트의 변화를 상세하게 나타내었다.

## 2. 수치해석

### 2.1 계산영역 및 경계조건

본 수치해석은 축소노즐의 각도와 축소노즐 길이가 스파이럴 제트 유동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 3 차원, 정상, 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한체적법과 RNG  $k-\epsilon$  난류모델을 적용하였다.

Fig. 1 은 본 수치해석에 적용된 스파이럴 노즐의 개략도를 나타낸다. 그림에서  $D_H$ 는 축소노즐 출구 직경을,  $D_L(=2R_L)$ 은 노즐입구 직경으로 47.28mm 이며,  $L$ 은 축소 노즐의 길이를 나타내며,  $R$ 은 환형 슬릿 바로 하류의 노즐 벽면의 곡률반

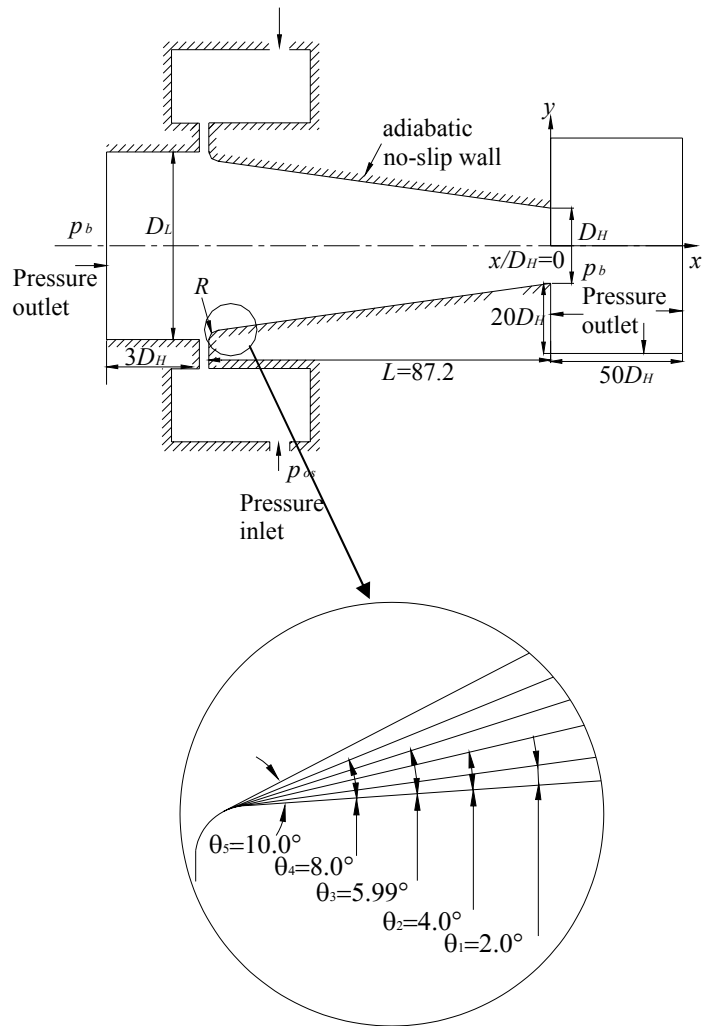


Fig. 1 Schematic diagram of the spiral flow nozzle(unit: mm)

Table 1 Computational conditions

$\theta$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$
$D_H(\text{mm})$	31.54	25.82	20	14.24	8.16

경으로 5.0mm 이다. 계산영역은 축소노즐 출구부분인  $x/D_H=0$  지점으로부터, 하류방향으로  $50D_H$ , 반경방향으로  $20D_H$ , 환형 슬릿 입구로부터 상류방향으로  $3D_H$ 에 대하여 수치계산을 수행하였다.

본 수치계산에 적용된 경계조건은 축소노즐 입구와 출구에서 유출(Pressure outlet)조건을, 환형 슬릿 부분에는 유입(Pressure inlet)조건을 적용하였다. 축소노즐 상·하류의 배압  $p_b$ 는 대기압 (101.325kPa), 온도  $T_0$ 는 300K로 설정하였으며, 환형 슬릿 입구의 전압  $p_{os}$ 는 110.9 kPa로 적용하였다. 모든 고체 벽면에 대해서는 단열, no-slip 조건을 적용하였으며, 작동기체인 공기의 비열비는 1.4이다. 축소노즐 각도( $\theta$ )는  $2.0^\circ$ 에서  $10.0^\circ$ 까지 변화시켰다. Table 1에는 본 수치해석에 사용된 축소노즐의 각의 변화에 따라 축소노즐 출구직경

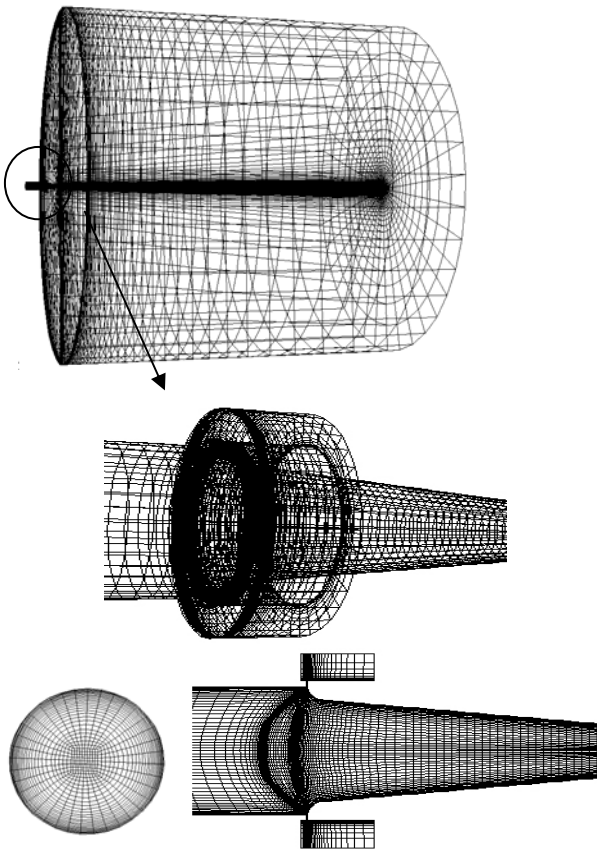


Fig. 2 Computational grid system

( $D_H$ )을 상세히 나타낸다.

Fig. 2 는 본 수치계산에 적용된 계산 격자계를 나타낸다. 격자형태는 정렬격자이며, 격자수는 대략 20 만 개를 형성하였다. 격자는 경계층의 영향이 지배적인 노즐의 벽면과 축소노즐 입구의 벽면에 격자를 집중시켰다. 본 수치해석에서는 수렴해의 판정을 위하여 질량, 운동량, 에너지,  $k$  와  $\epsilon$  의 잔차를 각각  $10^{-3}$  이하로 설정하였으며, 노즐의 입구와 출구에서 질량 유량의 변화를 조사하여 질량유량의 합이 0.5%이하로 되는 조건을 수치해가 수렴한 것으로 판정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 3 은 축소노즐의 출구직경( $D_H$ )이 20mm 인 경우,  $x/D_H$ 가 0.5 인 지점에서 스파이럴 제트의 접선방향 속도성분을 나타낸다. 횡축의  $y/D_H$  는 노즐로부터 반경방향 거리  $y$  를 축소노즐의 출구직경  $D_H$  로 무차원한 값이며, 종축의  $V_\theta$  는 접선방향의 속도 성분을 나타낸다.  $x/D_H=0.5$  인 위치에서 압력비( $p_{os}/p_b$ )가 1.10 에 대한 본 수치계산의 결과는 실험결과와 다소 차이가 있으나 정성적으로 유사한 경향을 예측한다. 그림으로부터 압력비가 증가할수록 접선방향 속도값을 증가하며, 접선방향의 속도가 최대가 되는  $y/D_H$  값은 압력비에 의존하지

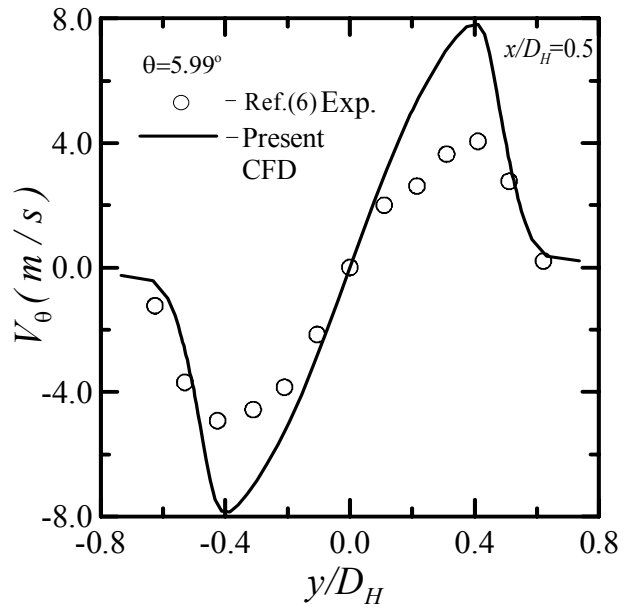


Fig. 3 Tangential velocity distributions

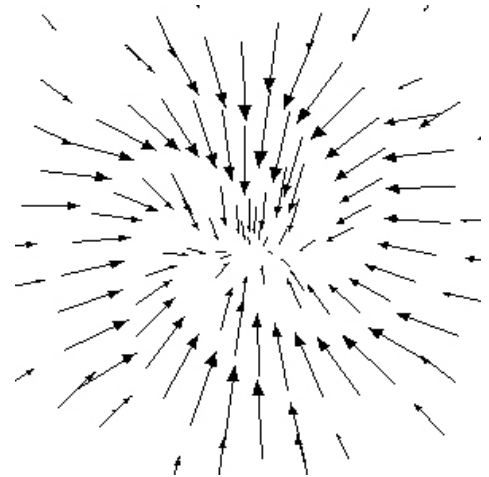


Fig. 4 Velocity vector ( $x/D_H=0$ ,  $\theta=5.99^\circ$ )

않고 거의 일정하게 나타난다.

Fig. 4 는 압력비가 1.10, 축소노즐의 각( $\theta$ )이  $5.99^\circ$ 인 경우,  $x/D_H=0$  인 노즐출구 단면에서의 속도벡터를 나타낸다. 그림의 속도벡터로부터 노즐 출구에서 스파이럴 유동이 생성되는 것을 알 수 있다. 노즐 중심에서 작은 속도벡터가 존재하여 속도가 0 이 되는 것을 알 수 있으며, 벡터성분의 방향을 통해 스파이럴 유동의 회전 방향을 알 수 있다.

Fig. 5 은 압력비가 1.10 인 경우,  $x/D_H=0.5$  인 지점에서 축소노즐의 각도가 접선방향 속도성분에 미치는 영향을 나타낸다. 축소노즐의 각도가 증가할수록 접선방향 속도성분의 최대가 되는 지점과 최소가 되는 지점의 거리는 증가한다. 또한, 축소노즐의 각도의 증가는 출구직경의 감소를 초래하

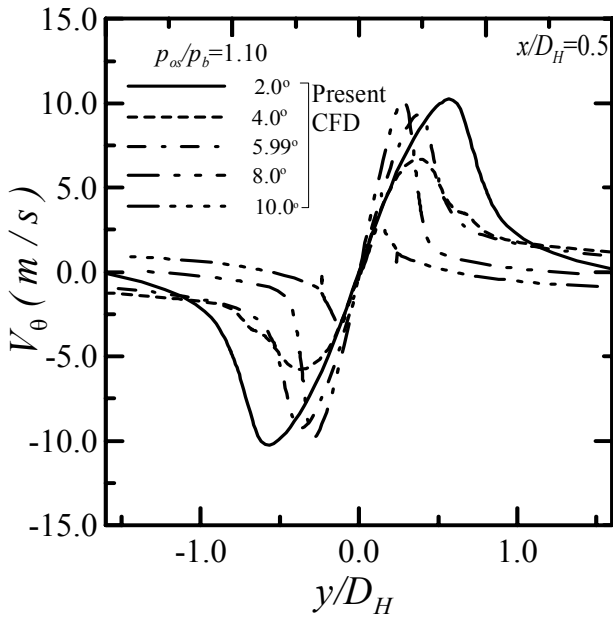


Fig. 5 Tangential velocity distributions ( $p_{0s}/p_b=1.10$ )

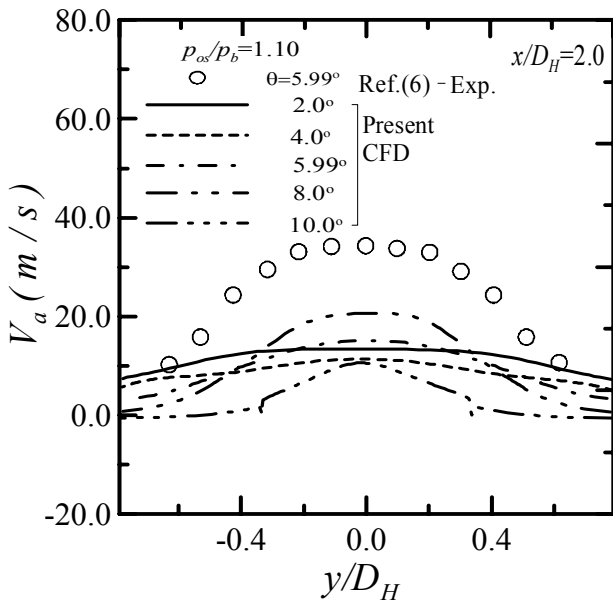
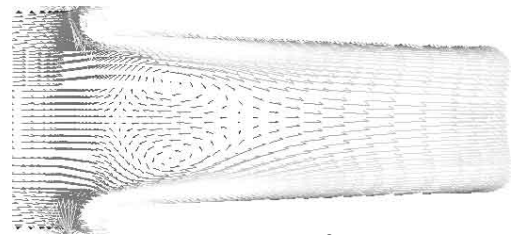


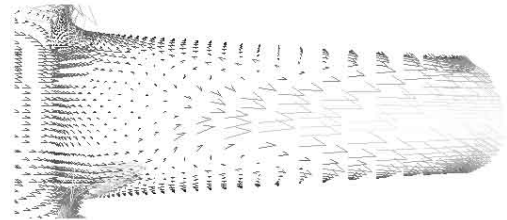
Fig. 6 Axial velocity distributions ( $p_{0s}/p_b=1.10$ )

며, 이로 인해 접선방향 속도성분의 폭, 즉 제트의 폭이 감소하는 것을 알 수 있다.

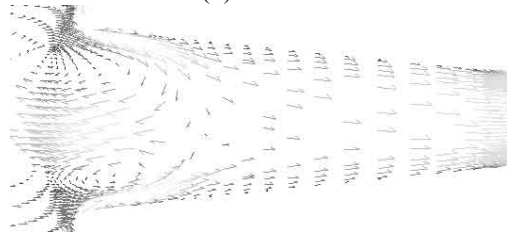
Fig. 6은 압력비가 1.10인 경우,  $x/D_H=2.0$ 인 지점에서 축소노즐의 각도가 축방향 속도성분에 미치는 영향을 나타낸다. 축방향 속도성분은 노즐 중심축을 기준으로 대칭형태로 나타나며, 제트 외부에서 중심으로 갈수록 급격히 증가하다가 제트 중심축 부근에서는 완만한 속도분포를 나타낸다. 또한, 축소노즐 각도가 증가할수록 최대 속도 값은 증가하는 한편, 축소노즐의 각도가 4.0인 경우, 축방향 속도성분은 노즐중심부분과 벽면부근에서



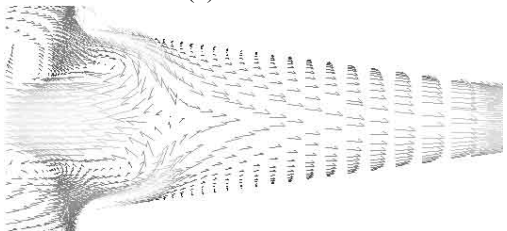
(a)  $\theta=2.0^\circ$



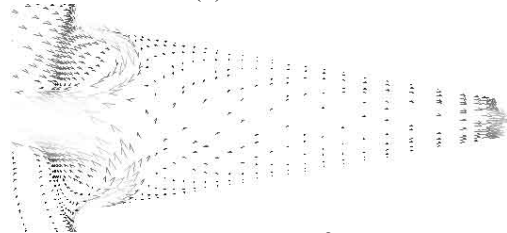
(b)  $\theta=4.0^\circ$



(c)  $\theta=5.99^\circ$



(d)  $\theta=8.0^\circ$



(e)  $\theta=10.0^\circ$

Fig. 7 Velocity vector each convergent angle ( $p_{0s}/p_b=1.10$ )

완만한 형태로 나타난다.

Fig. 7은 축소노즐의 각도가 스파이럴 노즐 내부의 재순환 영역에 미치는 영향을 나타낸다. 환형슬릿으로부터 유입된 유동은 축소노즐 내부의 재순환 영역을 피하여 출구로 향하게 되며, 축소노즐 출구부분에서는 전형적인 난류형 속도분포가 존재한다. 따라서, 축소노즐의 각도가 노즐 내부 재순환 영역과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. 그림의 벡터표시로부터 축소노즐 벽면에서 상류로 향하는 역류가 존재하는 것을 알 수 있으며, 벽면 부근의 역류가 끝나는 지점은 축소노즐의 각도가

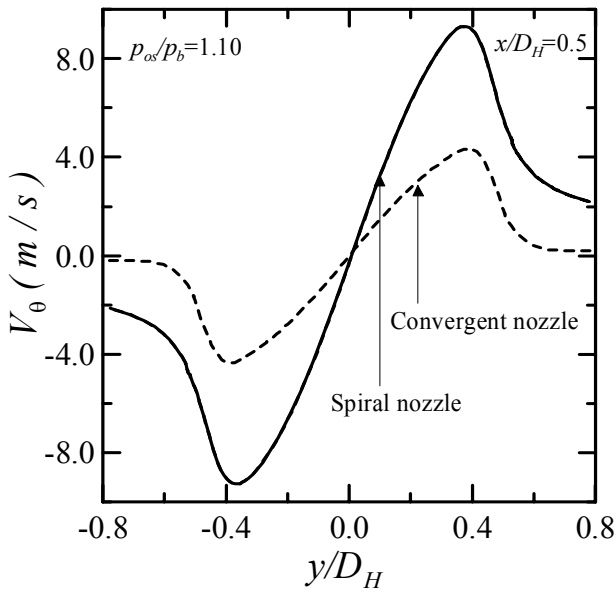


Fig. 8 Comparison of tangential velocity for spiral and convergent nozzle

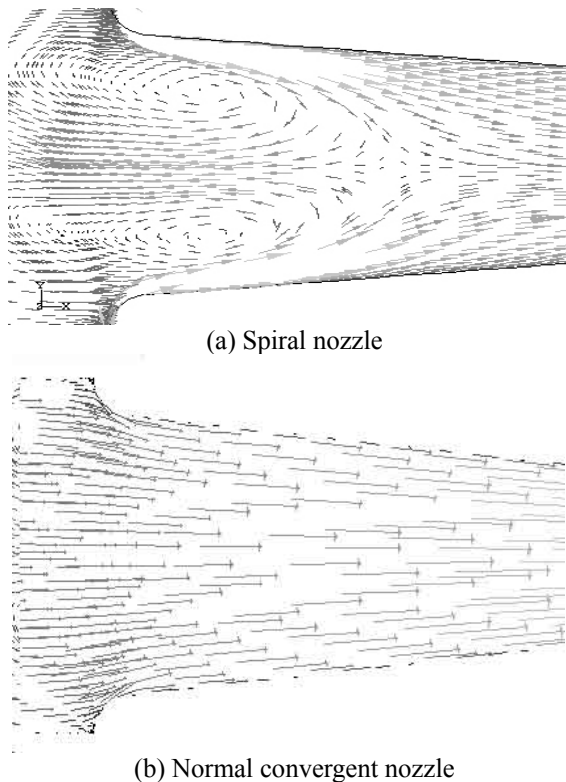


Fig. 9 Velocity vector on x-y plane ( $\theta=5.99^\circ$ )

증가할수록 환형 슬릿 부근에 근접하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8 은 축소노즐과 스파이럴 노즐이 접선방향 속도성분에 미치는 영향을 나타낸다. 그림으로부터 스파이럴 노즐과 축소노즐의 접선방향 속도성분이 최대가 되는 지점은 동일하게 나타난다. 또한, 스파이럴 노즐의 접선방향 속도성분이 축소

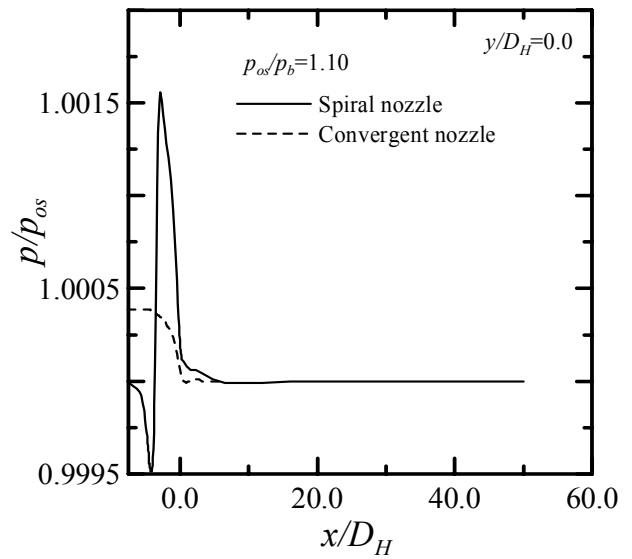


Fig. 10 Static pressure distributions along the x axis ( $\theta=5.99^\circ, p_{os}/p_b=1.10$ )

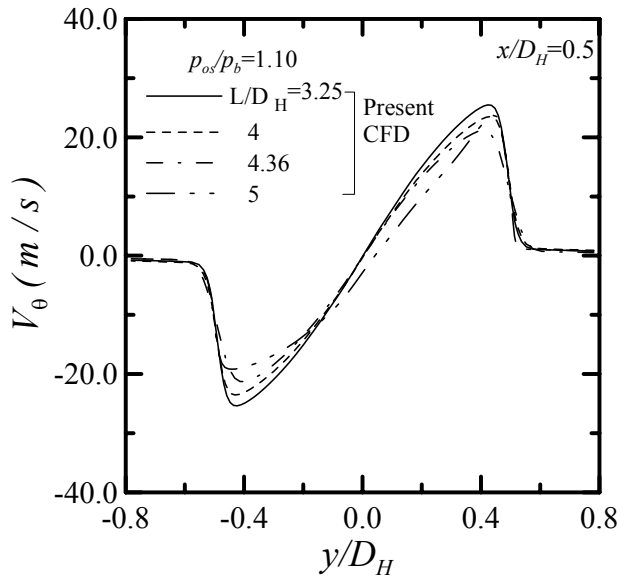


Fig. 11 Tangential velocity distributions ( $p_{os}/p_b=1.10, d/D_H=0.025$ )

노즐의 접선방향 속도성분 보다 크다.

Fig. 9 은 축소노즐의 각도( $\theta$ )가  $5.99^\circ$ 인 경우, 스파이럴 노즐과 축소노즐의 노즐 대칭면 상에서의 속도 벡터 성분을 나타낸다. 그림으로부터 스파이럴 노즐 내부에는 넓은 영역의 와류가 존재하며, 축소노즐의 내부에는 와류영역이 존재하지 않고 유동이 축소노즐 출구부분으로 편향되어 방출되는 것을 알 수 있다. 따라서 스파이럴 노즐의 환형 슬릿으로부터 유입되는 유동으로 인해 노즐 내부에 와류가 존재하며, 이로 인해 스파이럴 노즐 출구부분에서 스파이럴 체트가 존재하는 것으로 판단된다.

Fig. 10 은 스파이럴 노즐과 축소 노즐로부터

방출되는 제트의 정압 분포를 나타낸다. 횡축의  $x/D_H$  는 노즐의 중심축  $x$  에 노즐의 출구직경  $D_H$  를 무차원한 것이며, 종축의  $p/p_{os}$  는 축방향의 국소 정압  $p$  에 유입되는 유동의 전압  $p_{os}$  를 무차원한 것이다. 축소노즐 내부에서 팽창과 압축이 발생한 유동은 노즐 출구하류부분에서 안정적으로 된다.

Fig. 11 는  $p_{os}/p_b$  가 1.10 이고, 환형 슬릿의 폭 ( $d/D_H$ )가 0.025 인 경우, 축소노즐의 길이( $L$ )가 접선방향 속도성분에 미치는 영향을 나타낸다. 축소노즐의 길이가 증가할수록 접선방향 속도성분의 최대값은 감소한다. 또한, 동일한 출구로부터 방출되는 제트의 폭은 노즐의 길이가 증가할수록 감소하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 3 차원, 압축성 Navier-Stokes 방정식을 적용한 수치해석을 통하여, 아음속 스파이럴 제트 유동에 관하여 조사하였다. 축소노즐의 각이 스파이럴 유동 제트에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 축소노즐 각도와 축소노즐 길이의 변화에 따른 스파이럴 제트의 결과를 실험결과와 비교하였다.

본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 본 수치계산법은 이전의 실험결과와 다소 차이를 보이나 정성적으로 일치하며, 속도벡터를 나타내어 접선방향 속도성분의 분포 형상을 이해할 수 있었다.

2) 축소노즐의 각( $\theta$ )을  $2.0^\circ$ 에서  $10.0^\circ$ 까지 변화시켰을 경우,  $\theta$ 가 증가할수록 접선방향 속도성분은 증가하며, 축소노즐 각도의 증가는 축소노즐 출구직경의 감소를 야기시킨다. 이로인해 스파이럴 노즐로부터 방출되는 제트의 폭은 축소노즐 각도가 증가할수록 감소한다.

3) 스파이럴 노즐과 축소노즐의 대칭면상에서 벡터 성분을 나타내어 스파이럴 노즐 내부에서 와류영역과 존재하는 것을 알 수 있었으며, 축소노즐 내부에서는 와류영역이 존재하지 않고 유동이 출구로 편향되어 방출된다. 또한, 스파이럴 노즐 벽면부근에서의 역류가 존재하며, 스파이럴 노즐의 각도 변화는 노즐내부의 역류의 발생 위치에 영향을 미친다.

4) 스파이럴 노즐에서의 접선방향 속도성분이 축소노즐의 접선방향 속도성분보다 크며, 노즐출구로부터 방출되는 제트의 정압은 팽창과 압축을 반복하다가 일정해진다.

5) 축소노즐의 길이( $L/D_H$ )를 3.25 에서 5 까지 변

화시켰을 경우, 축소노즐의 길이가 증가할수록 접선방향 속도성분은 감소한다.

향후 환형 슬릿으로부터 유동이 방상형으로 불균일하게 유입되는 경우와 방사형이 아닌 부분적인 유입에 관한 추가적인 연구를 수행하여, 스파이럴 노즐 설계 자료를 도출한 예정이다.

#### 후 기

이 논문은 2004 년도 두뇌 한국 21 사업에 의해 지원되었음.

#### 참고문헌

- (1) Miyazaki, K., Chen, G., Kudamatsuo, J., Sugimoto, T., Yamamoto, F. and Horii, K., 1999, "High-Efficiency Soil Transportation with Spiral Airflow," *Japan Soc. Aero. Space Sci.*, Vol. 42, No. 137, pp. 105-111.
- (2) Ueda, H., Sakai, M., Horii, K., Funatsu, K. and Tomita, Y., 2001, "Study of Swirling Pneumatic Transport of Granule in a Horizontal Pipe," *Trans. Japan. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 67, No. 664, pp. 3011-3017.
- (3) Takei, M., Horii, K., Hashimoto, B., Kataoka, I., Ito, H. and Matsumae, Y., 1994, "Cutting of Soft Materials Using of Spiral Water Jet," *J. Japan Soc. for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 42, No. 490, pp. 36-47.
- (4) Horii, K., Matsumae, Y., Ohsumi, K., Cheng, X. M., Kage, S. and Hashimoto, B., 1992, "Novel Optical Fiber Installation by Use of Spiral Flow," *ASME J. Fluids Engineering*, Vol. 114, pp. 373-378.
- (5) Horii, K., Matsumae, Y., Cheng, X. M., Takei, M. and Hashimoto, B., 1990, "A Study of Spiral Flow(Part 4) The Effect of Radial Reynolds Number of Spiral Flow on Plasma Deposition of Pipe," *Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci.*, Vol. 32, No. 98, pp. 165-175.
- (6) Matsuo, S., Lee, K. H., Oda, S., Setoguchi, T. and Kim, H. D., 2003, "Effect of Annular Slit Geometry on Characteristics of Spiral Jet," *Proceedings of the 6th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows*, Vol. 2, pp. 298-303.
- (7) Cho, W. B., Kim, H. D., 2003, "A Fundamental Study of the Subsonic Spiral Jet," *Proceedings of KSME Fall Meeting*, pp. 502-507
- (8) Cho, W. B., Baek, S. C. and Kim, H. D. "The Effect of Annular Slit on a Compressible Spiral Jet Flow," *Proceedings of KSME Spring Meeting(2004)*, pp. 2029-2034.
- (9) Cho, W. B., Baek, S. C. and Kim, H. D., 2004, "The Effect of Coanda Wall Curvature on Spiral Jet," *The 3rd National Congress on Fluids Engineering*, pp. 619-622