

스파이럴 제트 유동에 미치는 환형 슬릿의 영향에 관한 연구

조위분[†] · 백승철* · 김희동**

The Effect of Annular Slit on a Compressible 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), Annular Slit Width(환형 슬릿 폭), Coanda Effect(코안다 효과)

Abstract

Spiral jet is characterized by a wide region of the free vortex flow with a steep axial velocity gradient, while swirl jet is largely governed by the forced vortex flow and has a very low axial velocity at the jet axis. However, detailed generation mechanism of spiral flow components is not well understood, although the spiral jet is extensively applied in a variety of industrial field. In general, it is known that spiral jet is generated by the radial flow injection through an annular slit which is installed at the inlet of a conical convergent nozzle. The present study describes a computational work to investigate the effects of annular slit on the spiral jet. In the present computation, a finite volume scheme is used to solve three dimensional Navier-Stokes equations with RNG $\kappa - \epsilon$ turbulent model. The annular slit width and the pressure ratio of the spiral jet 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 obviously show that the annular slit width and the pressure ratio of the spiral jet strongly influence the characteristics of the spiral jets, such as tangential and axial velocities.

1. 서 론

일반적으로 고레이놀즈수(high Reynolds number)의 3 차원 유동에서 발생하는 와도(vorticity)는 코히어런트 와류(coherent vortex)를 형성하기 위하여 집중하려는 경향을 가진다. 이러한 와도의 집중은 와류 주위에서 유체요소의 회전을 유발한다. 일반적으로 유체요소의 회전속도는 와류의 내·외부에서 다르며, 이로 인해서 유체요소의 신장이 발생하여 와 유동현상은 특징적인 스파이럴 구조(spiral structure)로 발전된다⁽¹⁾.

최근에 스파이럴 제트는 공업의 여러 분야에서 폭넓게 응용되고 있다. 광섬유 분야에서는 벽

면의 광섬유 파손을 피하고, 코안다 효과(coanda effect)에 의한 역류의 억제를 통해서 보다 안정적으로 광섬유를 전송하기 위하여 스파이럴 제트를 이용하고 있다⁽²⁾. 분말야금 산업에서는 환형슬릿을 통하여 유입된 압축공기의 코안다 효과를 이용하여, 분말과 압축공기의 혼합물을 축소노즐로부터 방출시킨다⁽³⁾. 또, 스파이럴 제트는 연질재료의 절단⁽⁴⁾, 각종 플라즈마 에너지 응용⁽⁵⁾ 등에서 광범위하게 활용되고 있다.

일반적으로 선회 제트(swirl jet)는 강제와류(forced vortex)의 영역이 매우 크며, 축방향 속도는 반경방향에 비해 중심축 부근에서 매우 낮은 분포를 갖는다. 이에 반해서, 스파이럴 제트는 자유와류(free vortex)의 영역이 제트 중심축 부근까지 차지하며, 제트 중심에서 축방향 속도성분이 크다는 점에서 선회제트와는 다른 유동특성을 가진다. 또한, 스파이럴 제트는 선회 제트에 비해 제트코어(jet core)영역이 길며, 제트의 확산(diffusion)이 크지 않으며, 제트의 난류강도가 작기 때문에 공업

[†] 안동대학교 기계공학과 대학원

E-mail : kimhd@andong.ac.kr

TEL : (054)820-5622 FAX : (054)823-5495

* 한국 원자력 연구소

** 안동대학교 기계공학과

적, 산업적인 용도로 폭넓게 활용할 수 있다.

종래에 스파이럴 제트유동에 관해서는 실험적, 수치해석적 연구들이 수행되어 왔다^(8,9). Matsuo 등⁽⁸⁾은 축소노즐의 입구에 설치한 환형 슬릿으로부터 주입되는 기체유동은 축소노즐의 출구에서 스파이럴 제트로 방출된다는 것을 실험적으로 연구하였다. Cho 등⁽⁹⁾은 아음속 스파이럴 제트에 관한 수치해석을 통하여 환형 슬릿으로부터 주입되는 기체유동의 전압과 노즐의 곡률반경이 스파이럴 제트에 미치는 영향을 연구하였다. 이들의 연구결과에 의하면, 축소노즐 입구에 설치한 환형 슬릿으로부터 주입되는 기체유동은 노즐입구에서 발생하는 코안다 효과에 의하여 노즐 벽을 향하여 편향되어 노즐출구로부터 방출된다. 이러한 과정에서 축소노즐 내부에는 유동의 접선속도(tangential velocity)성분이 발생하며, 축 방향의 속도분포는 급격한 구배를 가진다는 것이 알려져 있다.

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 환형 슬릿이 스파이럴 제트유동 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 수치해석은 3 차원 N-S 방정식에 유한 체적법과 RNG $k-\epsilon$ 난류모델을 적용하였으며, 환형 슬릿의 폭과 노즐 압력비를 변화시켰다. 얻어진 수치해석 결과는 유용한 실험결과⁽⁸⁾와 비교하였으며, 가시화를 통하여 스파이럴 제트 유동장의 변화를 상세하게 나타내었다.

2. 수치해석

2.1 계산영역 및 경계조건

본 수치해석은 환형 슬릿의 폭과 유입되는 유동의 압력비가 스파이럴 제트유동에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 3 차원, 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한 체적법과 RNG $k-\epsilon$ 난류모델을 적용하였다.

Fig. 1 은 본 수치해석에 적용된 스파이럴 노즐의 개략도를 나타낸다. 그림에서 D_H 는 노즐출구 직경으로 20.0mm, $D_L(=2R_L)$ 는 노즐입구 직경으로 47.28mm 이며, L 은 축소 노즐의 길이를 나타내며, R 은 환형 슬릿 바로 하류의 노즐 벽면의 곡률반

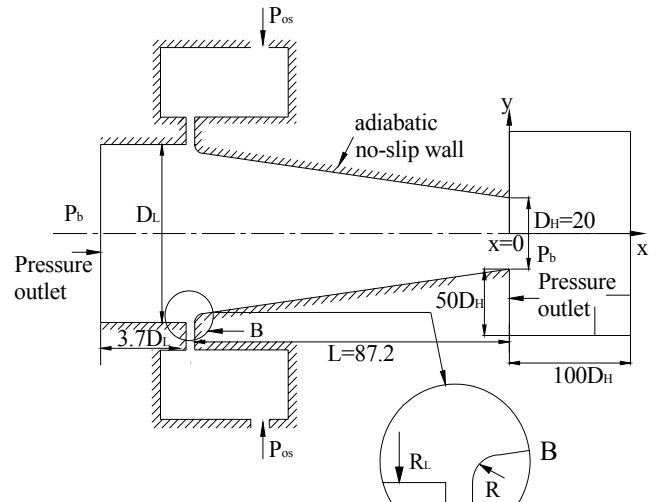


Fig. 1 Schematic diagram of the spiral flow nozzle(unit: mm)

Table. 1 Computational conditions

$d(\text{mm})$	0.2	0.25	0.5	0.8		
p_{os}/p_b	1.10	1.29	1.59	1.86	1.98	2.97

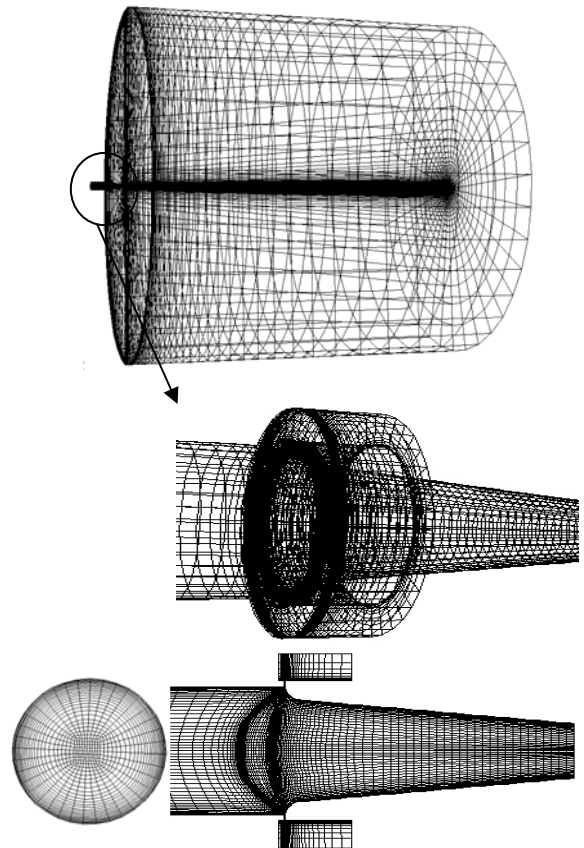


Fig. 2 Computational grid system

경으로 5.0mm 이다. 계산영역은 노즐 출구부분인 $x=0$ 지점으로부터, 하류방향으로 $100D_H$, 반경방향으로 $50D_H$, 환형 슬릿으로부터 $-x$ 축 방향으로

3.7 D_L 영역에서 수치계산을 수행하였다.

본 수치계산에 적용된 경계조건은 축소노즐 입구와 출구에서 Pressure outlet 조건, 환형 슬릿 부분에는 Pressure inlet 조건을 적용하였다. 축소노즐 상·하류의 배압 p_b 는 101.325kPa, 온도 T_0 는 300K 로 일정하게 설정하였으며, 환형 슬릿 입구의 전압 p_{os} 는 110.9 kPa 에서 300.9kPa 의 범위에서 변화시켰다. 모든 고체 벽면에 대해서는 단열, no-slip 조건을 적용하였으며, 작동기체인 공기의 비열비는 1.4 이다. Table 1 에는 본 수치계산에 적용된 환형 슬릿 폭과 압력비(p_{os}/p_b)를 나타낸다. 환형 슬릿의 폭은 0.2~0.8mm 까지 변화시켰으며, 각 압력비에 대하여 수치계산을 수행하였다.

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

3. 결과 및 고찰

Fig. 3 은 환형 슬릿의 폭(d)이 0.2mm 인 경우, 압력비(p_{os}/p_b)가 스파이럴 제트의 접선방향 속도성분에 미치는 영향을 나타낸다. 횡축의 y/D_H 는 노즐로부터 반경방향 거리 y 를 축소노즐의 출구직경 D_H 로 무차원한 값이며, 종축의 V_θ 는 접선방향의 속도 성분을 나타낸다. $x/D_H = 0.5$ 인 위치에서 $p_{os}/p_b = 1.86$ 에 대한 본 수치계산의 결과는 실험결과와 다소 차이가 있으나 정성적으로 유사한 경향을 예측한다. 그림으로부터 압력비가 증가할수록 접선방향 속도성분은 증가하며, 접선방향의 속도값이 최대가 되는 y/D_H 값은 압력비에 의존하지 않고 거의 일정하게 나타난다.

Fig. 4 는 압력비(p_{os}/p_b)가 1.10 일 경우, $x/D_H = 0.5$ 에서 환형 슬릿의 폭이 접선방향 속도성분에 미치는 영향을 나타낸다. 그림에서 $d/D_H = 0.01$ 인 경우 본 수치계산 결과는 실험결과를 비교적 잘 예측한다. 또, 본 연구로부터 d/D_H 가 어떤 특정값을 가질 때 v_θ 가 최대가 된다는 것을 알 수 있다. 한편, d/D_H 가 0.4 인 경우, v_θ 의 분포는 다른 d/D_H 값과 다소 다르다. 이것은 환형 슬릿으로부터 유입되는 유동의 coanda 효과가 감소하여, 유동이 노즐 중심축으로 향하기 때문이다.

Fig. 5 는 $d/D_H = 0.01$ 경우, $x/D_H = 2.0$ 인 지점에서

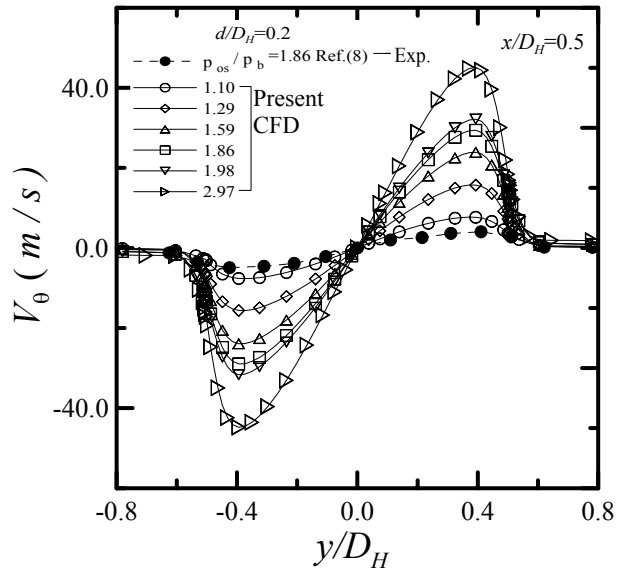


Fig. 3 Tangential velocity distributions ($d/D_H=0.01$)

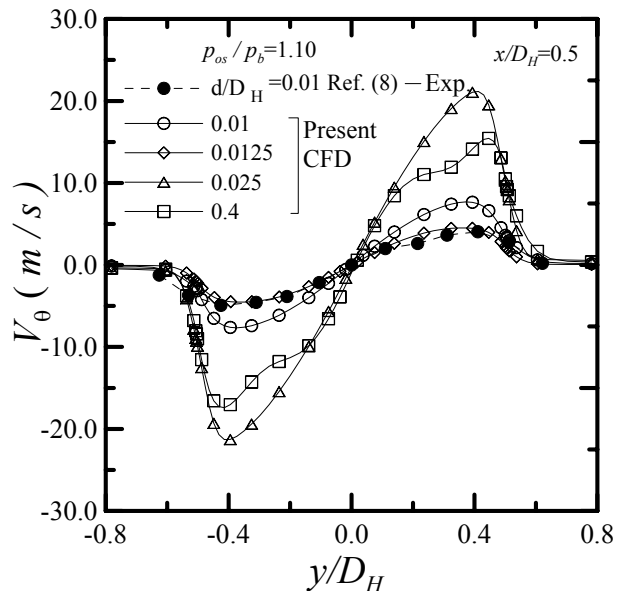


Fig. 4 Tangential velocity distributions ($p_{os}/p_b=1.10$)

압력비가 축 방향 속도성분에 미치는 영향을 나타낸다. 종축의 v_a 는 축 방향 속도성분을 나타낸다. 압력비가 증가할수록 v_a 는 증가하며, 중심축을 기준으로 대칭형태로 나타난다. 한편, 압력비가 2.97 일 경우에는 $y/D_H = 0.0$ 에서 v_a 는 감소한다.

Fig. 6 은 압력비(p_{os}/p_b)가 1.86 일 경우, $x/D_H = 2.0$ 인 지점에서 환형 슬릿의 폭이 v_a 에 미치는 영향을 나타낸다. 그림으로부터 주어진 압력비에 대하여 $d/D_H = 0.025$ 에서 v_a 가 최대값으로 존재한다.

Fig. 7 은 $d/D_H = 0.025$, 압력비(p_{os}/p_b)가 1.86 인 경우, x/D_H 의 값에서 접선방향 속도성분 변화를 나타낸다. 그림에서 $x/D_H < 0$ 지점은 노즐 내부를

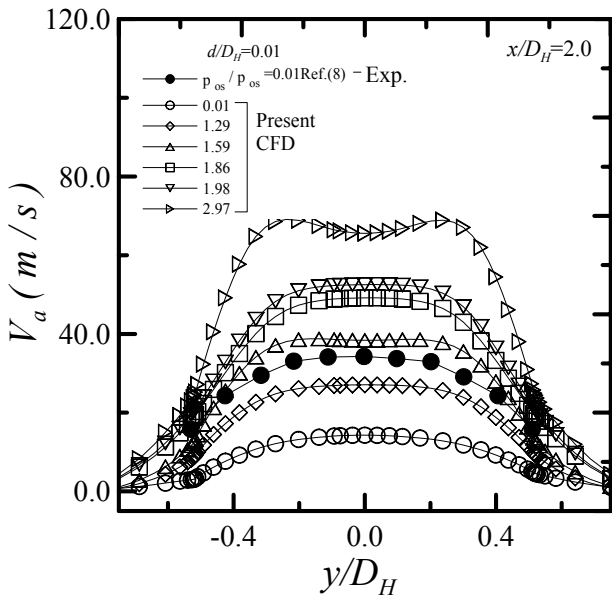


Fig. 5 Axial velocity profiles ($d/D_H=0.01$)

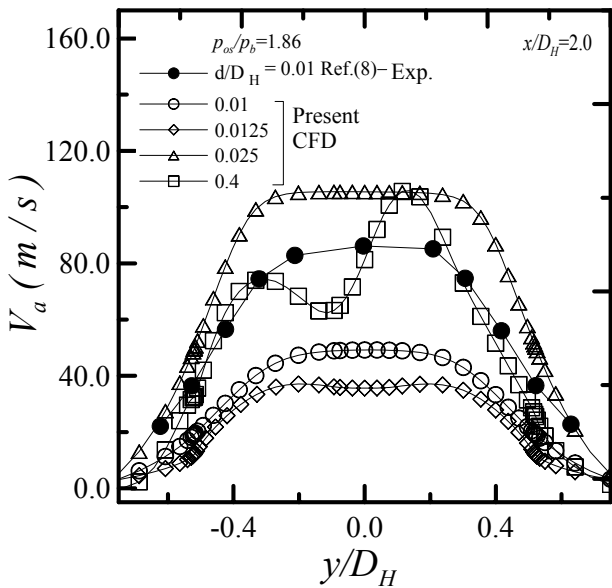


Fig. 6 Axial velocity profiles ($p_{os}/p_b=1.86$)

의미하며, v_θ 는 $x/D_H=1.5$ 인 위치에서 주로 벽 부근에서 발생하여 노즐 출구쪽으로 갈수록 증가하다가, $x/D_H>0$ 인 노즐 출구로부터 하류로 갈수록 급격히 감소한다.

Fig. 8 은 압력비(p_{os}/p_b)가 1.86 일 경우, $x/D_H=1.0$ 인 지점에서 d/D_H 가 v_θ 에 미치는 영향을 나타낸다. 그림으로부터 노즐 내부에서 v_θ 도 나타난다. $d/D_H=0.4$ 인 경우, $d/D_H<0.4$ 경우의 접선방향 속도 성분과 유동의 방향이 반대로 나타나며, 이는 노즐 내부에서 역류가 형성되는 것으로 판단된다.

Fig. 9 는 $d/D_H=0.025$ 일 경우, 각 다면 y-z 에서의 속도벡터의 분포를 나타낸다. 그림에서 $x/D_H=0$ 은 축소노즐의 출구면, $x/D_H<0$ 은 노즐 출구로부터

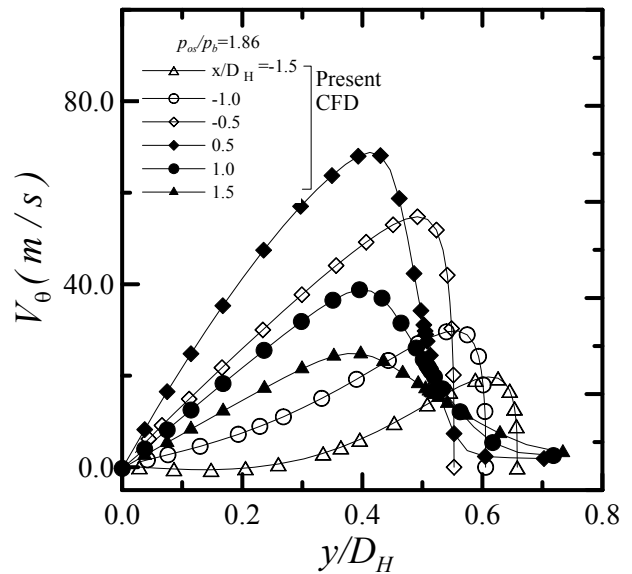


Fig. 7 Tangential velocity profiles ($d/D_H=0.025$)

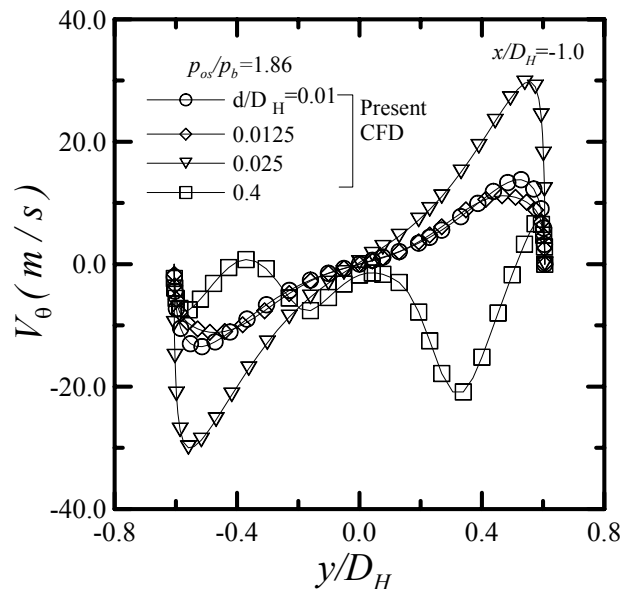


Fig. 8 Tangential velocity distributions at $x/D_H=-1.0$ ($p_{os}/p_b=1.86$)

상류방향을 의미한다. 그림(b)는 환형 슬릿의 하류 부분으로 반경방향(v_r)으로 균일한 속도벡터를 나타내며, x/D_H 가 증가할수록 v_r 은 v_θ 로 변화한다. 또, $x/D_H>0$ 지점에서는 v_θ 가 지배적이다.

Fig. 10 은 $d/D_H=0.025$ 일 경우, 각 다면 y-z 에서의 속도벡터의 분포를 나타낸다. 그림(b)~(c)에서는 2 차 유동이 지배적으로 나타나며, 노즐 출구 부분의 하류지점부터 v_θ 가 나타난다. 그러나 $x/D_H>0$ 지점에서 Fig. 9 의 (f)~(h)와 비교할 경우, v_θ 와 v_r 이 같이 나타나며, 미세한 2 차 유동이 존재한다.

Fig. 11 은 압력비(p_{os}/p_b)가 축소 노즐 내·외부

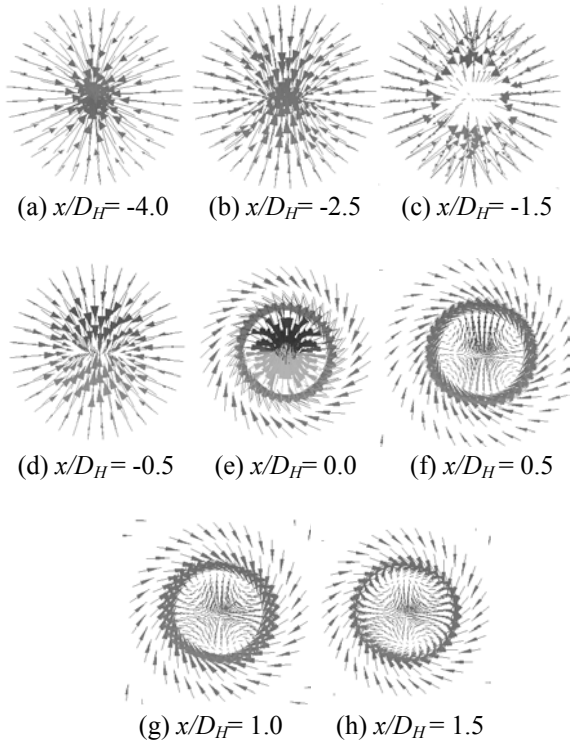


Fig. 9 Velocity vectors on y-z plane ($d/D_H=0.025$)

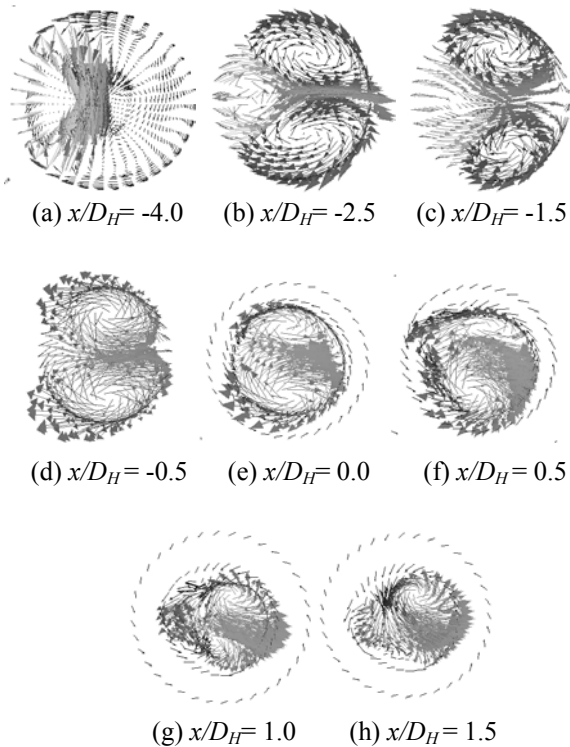


Fig. 10 Velocity vectors on y-z plane ($d/D_H=0.4$)

에서 최대 접선방향 속도성분에 미치는 영향을 나타낸다. 압력비가 증가할수록 $v_{\theta max}$ 는 증가한다. 또, $x/D_H > 0$ 지점에서 하류방향으로 갈수록 $v_{\theta max}$ 는

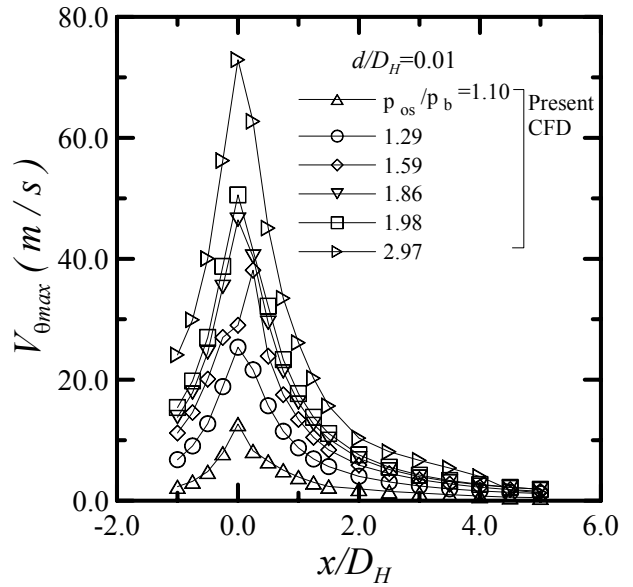


Fig. 11 Tangential velocity distributions at each pressure ratio

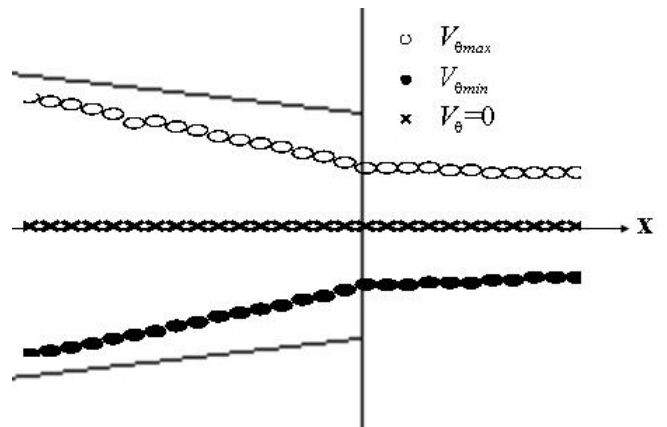


Fig. 12 Radial distance profiles of the velocity ($d/D_H=0.025, p_{os}/p_b=1.86$)

감소한다.

Fig. 12 는 $d/D_H=0.025, p_{os}/p_b=1.86$ 일 경우, x 축 각 단면에서 반경거리(r)에 따른 $v_{\theta max}$, $v_{\theta min}$ 그리고 v_{θ} 변화를 나타낸다. 그림에서 \circ 는 $v_{\theta max}$, \bullet 는 $v_{\theta min}$ 를 \times 는 $v_{\theta min}$ 가 0 이 되는 지점을 각각 나타낸다. 그림에서 $v_{\theta max}$ 와 $v_{\theta min}$ 는 노즐 중심 축을 기준으로 대칭형태로 나타나며, 노즐 출구면을 기준으로 노즐내부에는 x 가 증가할수록 $v_{\theta max}$ 와 $v_{\theta min}$ 의 위치는 노즐중심으로 향하고 있다. 한편, 노즐출구면 이후에서는 $v_{\theta max}$ 와 $v_{\theta min}$ 의 위치는 동일하다. 또한, v_{θ} 의 위치는 노즐 내·외부에서 변화가 없다.

4. 결 론

본 연구에서는 3 차원, 압축성 Navier-Stokes 방정식을 적용한 수치해석을 통하여, 아음속 스파이럴 제트 유동에 관하여 조사하였다. 환형 슬릿의 폭이 스파이럴 유동 제트에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 슬릿의 폭 변화에 따른 스파이럴 제트의 결과를 이전의 수치해석, 실험 결과와 비교하였다. 또한, 환형 슬릿의 압력비가 스파이럴 유동 제트에 미치는 영향을 조사하여 비교하였다.

본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 본 수치계산법은 이전의 실험결과와 다소 차이를 보이나 정성적으로 일치하며, 동일한 환형 슬릿의 폭에 대하여 환형 슬릿의 압력비가 증가할수록 접선방향 속도성분과 축 방향 속도성분은 증가한다.

2) 동일한 압력비에 대하여 특정값 d/D_H 에서 최대 접선방향, 축 방향 속도성분을 가진다.

3) 노즐 내부에서 접선방향 속도성분은 노즐 출구로 향할수록 증가하며, 출구 이후 지점에서는 감소한다.

4) $d/D_H=0.025$ 에 대해 노즐 출구지점 이후에서 접선방향 속도성분이 지배적이다. 한편, $d/D_H=0.4$ 에서는 노즐 내부의 2 차 유동으로 인해 반경방향 속도성분이 지배적이다.

5) 최대, 최소 접선방향 속도성분의 발생위치는 노즐 내부에서는 출구로 향할수록 중심축에 근접하며, 출구부분 이후에서는 동일하다.

향후 축소노즐의 각도, 반경방향 유동의 압력비, coanda 표면의 곡률, 환형 슬릿의 폭 그리고 축소노즐의 길이 등에 관한 추가적인 연구를 수행하여, 스파이럴 노즐 설계 자료를 도출한 예정이다.

후 기

이 논문은 2004 년도 두뇌 한국 21 사업에 의해 지원되었음.

참고문헌

- (1) Andrew, P. B., 1998, "The Spiral Wind-up of Vorticity in an Inviscid Planar Vortex," J. Fluid Mech, Vol. 371, pp. 109-140.
- (2) 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.

- (3) Ohba, H., Honda, I., Nakayama, H., Miyamoto, H., Nagaoka, O. and Ishikawa, T., 1994, "Internal Flow of Coanda nozzle and Effect on Dispersion of Cohesive Powders," JSME(B), No. 94-0189, pp. 3237-3241.
- (4) 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.
- (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) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) Cho, W. B., Kim, H. D., 2003, "A Fundamental Study of the Subsonic Spiral Jet," Proceedings of KSME Fall Meeting , pp. 502-507