

아음속 스파이럴 제트 유동에 관한 기초적 연구

조위분[†] · 김희동^{*}

A Fundamental Study of the Subsonic Spiral Jet

Wee-Bun CHO and Heuy-Dong KIM

Key Words : Compressible Flow(압축성 유동), Spiral Jet(스파이럴 제트), Tangential Velocity(접선 방향 속도), Annular Slit(환형 슬릿), Vorticity(와도), 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 convergent nozzle. The objective of the present study is to understand the flow characteristics of the spiral jet, using a computational method. A finite volume scheme is used to solve 3-dimensional Navier-Stokes equations with RNG $\kappa - \varepsilon$ turbulent model. The computational results are validated by the previous experimental data. It is found that the spiral jet is generated by coanda effect at the inlet of the convergent nozzle and its fundamental features are dependent the pressure ratio of the radial flow through the annular slit and the coanda wall curvature.

1. 서론

일반적으로 고레이놀즈수의 3 차원 유동에서 발생하는 와도(vorticity)는 어떤 coherent vortex 를 형성하기 위하여, 집중하려는 경향을 가지게 되며, 이러한 와도의 집중은 와(vortex)주위에서 유체요소 의 회전을 유발하게 된다. 이와 같은 유체요소 의 회전은 와류 내·외부에서 다르게 되므로 유체 요소의 신장이 발생하며, 와 유동현상은 결국 특 징적인 스파이럴(spiral) 구조로 발전된다는 것으로 알려져 있다⁽¹⁾.

최근 고체입자나 분말의 수송^(2,3), 연질재료의 절단⁽⁴⁾, 광섬유의 전송⁽⁵⁾, 각종 플라즈마 에너지 응용⁽⁶⁾ 등 다양한 분야에서 스파이럴 유동 노즐

(spiral flow nozzle)이 광범위하게 활용되고 있으나, 스파이럴 제트유동의 발생기구는 아직까지 충분히 알려져 있지 않다. 일반적으로 선회제트(swirl jet)는 강제와류(forced vortex)의 영역이 매우 크며, 축 방향 속도(axial velocity)는 중심축 부근에서 매우 낮은 분포를 갖게 된다. 그러나 스파이럴 제트는 자유와류(free vortex)의 영역이 제트 중심축 부근까지 차지하게 되며, 제트 중심에서 큰 축 방향 속도 성분을 가진다는 점에서 선회제트와는 유동 특성상 매우 다르다. 또 스파이럴 제트는 선회 제트에 비해 제트코어(jet core)영역이 길며, 제트의 확산(diffusion)이 크지 않을 뿐만 아니라, 제트의 난류강도가 작아 다양한 공업적, 산업적 용도로 많이 활용되고 있다. Table 1 에는 선회제트와 스파이럴 제트의 주요 특성을 나타내었다.

최근 Horii⁽⁷⁾는 스파이럴 성분의 발생원인 즉, 접선속도 성분의 발생원인을 환형 슬릿으로부터 주입하는 반경방향 유동의 미소한 비 대칭성이나 순간 변동에 기인하는 것으로 보고하고 있으나,

[†] 안동대학교 기계공학과 대학원

E-mail : kimhd@andong.ac.kr

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

^{*} 안동대학교 기계공학부

현재까지 명확한 발생기구는 알려져 있지 않다.

축소 노즐 입구에 설치한 환형 슬릿으로부터 반경방향으로 기체를 주입하는 경우, 유동은 노즐 입구에서 발생하는 coanda 효과에 의하여 노즐 벽 쪽으로 향하여 유동하게 되며, 노즐 출구로부터 방출된다. 이러한 과정에서 축소노즐 내부에는 접선속도(tangential velocity)성분이 발생하게 되며, 축 방향의 속도분포는 급격한 구배를 가지게 된다.

종래의 연구⁽⁸⁾에 의하면, 스파이럴 제트(spiral jet)는 축소노즐의 입구에 설치된 환형 슬릿(annular slit)으로부터 기체를 주입하는 경우, 환형 기체유동은 축소노즐을 통과하여, 축소노즐의 출구에서 스파이럴 제트로 방출된다는 것을 실험적으로 조사한 바 있으며, 환형 슬릿으로부터 주입하는 기체의 전압과 형상 등이 노즐 출구로부터 방출되는 스파이럴 제트에 영향을 미친다는 것을 알았다. 그러나, 스파이럴 제트를 조사하기 위하여 많은 실험적 연구가 수행되었지만, 지금까지 스파이럴 유동의 발생 메커니즘은 명확히 규명되지 않았으며, 주로 경험에 의하여 얻어진 스파이럴 유동노즐을 설계 및 제작하여 활용하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 스파이럴 제트의 발생기구 및 원인을 상세하게 규명하기 위하여, 수치해석적 방법으로 연구를 수행하여 실험결과와 비교하였다. 또 축소노즐의 환형 슬릿의 폭과 노즐 입구의 곡률 변화에 따른 접선방향의 속도성분과 축 방향의 속도성분을 조사하였다.

Table 1 Comparison of swirl jet and spiral jet

<i>Swirl Jet</i>	<i>Spiral Jet</i>
Forced vortex	Free vortex
Axial velocity gradient <	Axial velocity gradient
Jet core length <	Jet core length
Turbulence >	Turbulence
Jet spreading >	Jet spreading
Stability <	Stability

2. 수치해석 방법 및 계산 영역

본 연구에서는 축소노즐과 환형 슬릿으로 구성된 스파이럴 노즐에서 발생하는 스파이럴 유동을 모사하기 위하여, 3 차원, 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한 체적법을 적용한 수치계산을 수행하였다.

Fig. 1 은 본 수치해석에 적용된 스파이럴 노즐의 개략도이다. 그림에서 $D_L (=2R_L)$ 는 노즐 입구

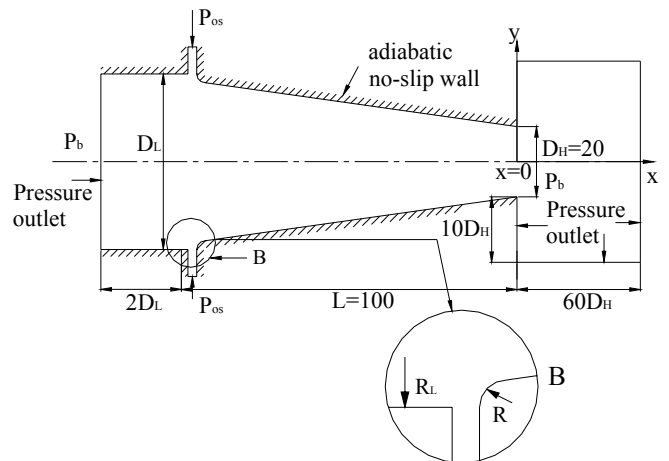


Fig. 1 Schematic diagram of the spiral flow nozzle(unit: mm)

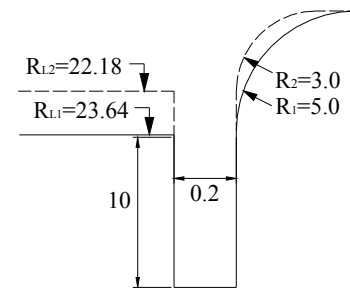


Fig. 2 Details of slit geometries(unit: mm)

직경으로 44.36 mm 에서 47.28 mm 까지 변화시켰으며, 환형 슬릿 바로 하류의 축소노즐 입구에 반경 R의 곡면을 설치하여, 본 연구에서는 R의 범위를 3.0 mm 에서 5.0 mm 까지 변화시켰다.

축소 노즐의 출구 직경 $D_H (=2R_H)$ 는 20mm 이며, L은 축소 노즐의 길이를 의미한다. 계산영역으로 노즐 출구로부터 x 축 방향으로 $60D_H$, 노즐 반경 방향으로 $10D_H$, 노즐 입구에서 -x 축 방향으로 $2D_L$ 에 대해서 수치해석을 수행하였다.

본 수치계산에 적용된 경계조건으로는 축소 노즐 입구와 노즐 출구에서 Pressure-outlet 조건, 환형 슬릿 부분에는 Pressure-inlet 조건을 각각 적용하였다. 축소 노즐 상·하류의 배압 p_b 는 101.325kPa, 온도 T_0 는 300K 로 일정하게 유지하였으며, 환형 슬릿 입구의 전압 p_{os} 는 187.9 kPa 및 110.9 kPa 로 각각 적용하였다. 모든 고체 벽면에 대해서는 단열, no-slip 벽조건을 적용하였으며, 수치계산에서 적용된 작동 기체는 공기(비열비 1.4)이다.

Fig. 2 는 본 수치계산에 적용된 축소노즐과 환형 슬릿의 상세 형상을 나타낸다. 축소노즐 입구 직경이 22.18 과 23.64 mm 인 경우, 환형 슬릿 출구 coanda 벽면의 곡률반경은 3.0, 5.0 으로 설정시켰다.

Fig. 3 은 본 수치계산에 적용된 정렬 격자계를 나타낸다. 격자는 대략 20 만 개 정도가 사용되었으며, 경계층의 영향이 지배적인 노즐의 벽면과

축소 노즐 입구의 곡률 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 질량 유량의 합이 0.5% 이하로 되는 조건을 수치 해가 수렴한 것으로 판정하였다.

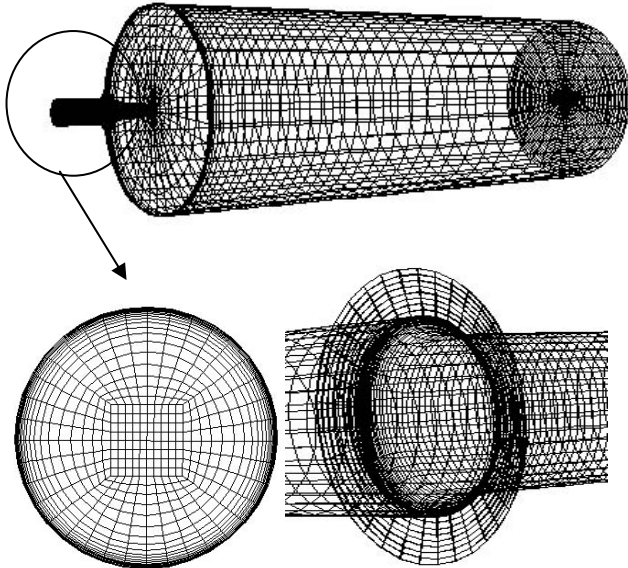


Fig. 3 Computational grid system

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 환형 슬릿의 전압(p_{os})이 110.9 kPa 인 경우, 난류 모델이 접선속도 성분에 미치는 영향을 나타낸다. 횡축의 y/D_H 는 노즐의 반경 방향 거리 y 를 노즐출구 직경 D_H 로 무차원한 값이다. $x/D_H=0.5$ 인 지점에서 본 수치계산의 결과로부터 얻어진 접선방향 속도성분은 이전의 실험결과와 비교해 볼 때, 다소 차이를 보이고 있으나, 접선방향 속도 성분이 예측 됨에 따라 수치계산에서도 스파이럴 제트 유동이 생성되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 현재까지 추측되어온 반경방향의 유동 불균일과 불안정에 의하여 스파이럴 속도성분이 형성되는 것이 아니란 것을 알 수 있다. 또, RNG $\kappa-\epsilon$ 난류모델을 사용한 수치계산 결과가 Realizable $\kappa-\epsilon$ 난류모델과 Reynolds stress 난류모델을 사용한 결과에 비하여, 접선방향 속도성분을 비교적 잘 예측하고 있는 것으로 나타난다.

Fig. 5에는 환형 슬릿의 전압(p_{os})이 110.9 kPa 인 경우, $x/D_H=2.0$ 인 위치에서 축방향 속도성분을 나타내었다. 본 수치계산의 결과는 축방향 속도성분은 상당히 과대평가하는 것으로 보이지만, 정성적으로 유사한 경향을 예측한다.

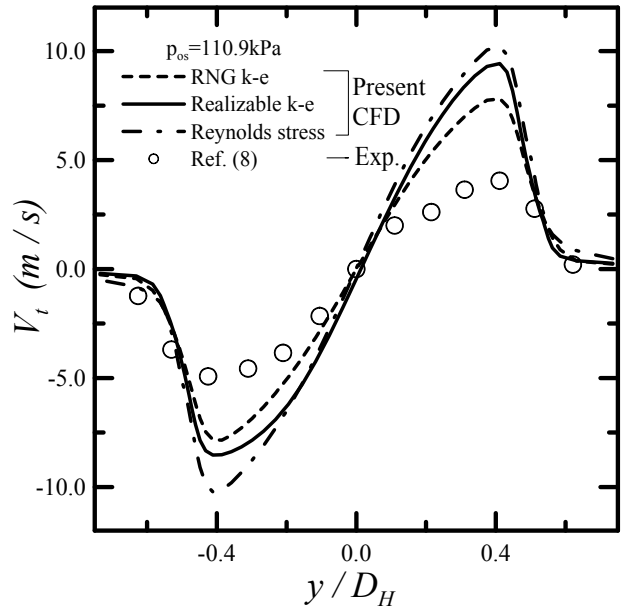


Fig. 4 Tangential velocity distributions at $x/D_H=0.5$ ($R_{LI}=23.64\text{mm}$, $R_I=5.0\text{mm}$)

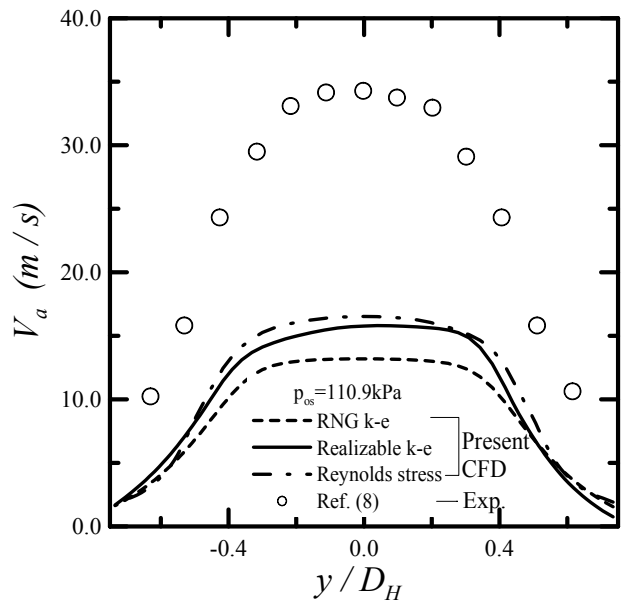


Fig. 5 Axial velocity distributions at $x/D_H=2.0$ ($R_{LI}=23.64\text{mm}$, $R_I=5.0\text{mm}$)

Fig. 6은 환형 슬릿의 전압(p_{os})이 187.9 kPa 인 경우, $x/D_H=0.5$ 인 지에서의 접선방향 속도 분포를 나타낸다. 수치계산에서 얻어진 접선방향 속도 성분은 유로의 중심축($y/D_H=0.0$)을 기준으로 대칭 형태로 나타나며, y/D_H 가 0.4인 위치에서 최대값을 갖는다. 문헌(8)의 실험결과와 비교할 때, 수치계산 결과는 접선방향속도의 크기를 상당히 높게 예측하지만, 접선방향 속도 성분이 최대가 되는 위치는 거의 동일하게 나타난다. 또, Fig. 4와 비교할 경우, p_{os} 가 커짐에 따라 접선방향의 속도성분이 커짐을 알 수 있다.

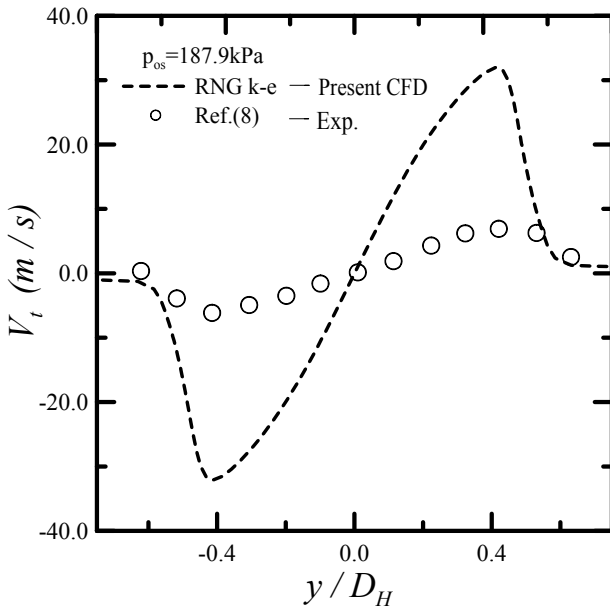


Fig. 6 Tangential velocity distributions at $x/D_H=0.5$ ($R_{LI}=23.64\text{mm}$, $R_I=5.0\text{mm}$)

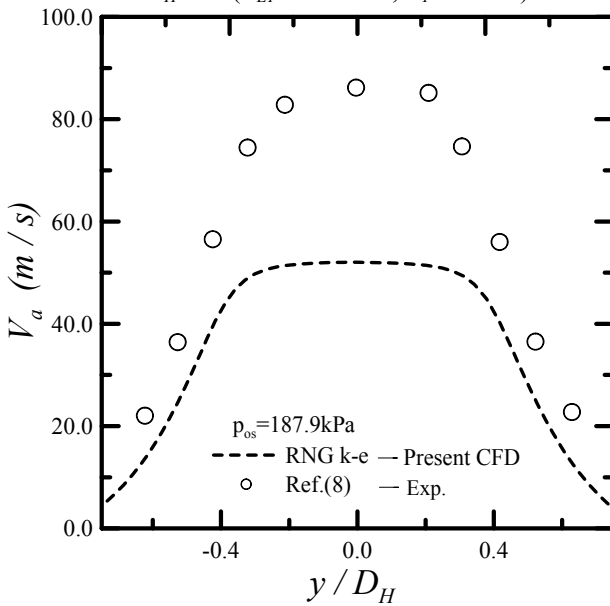


Fig. 7 Axial velocity distributions at $x/D_H=2.0$ ($R_{LI}=23.64\text{mm}$, $R_I=5.0\text{mm}$)

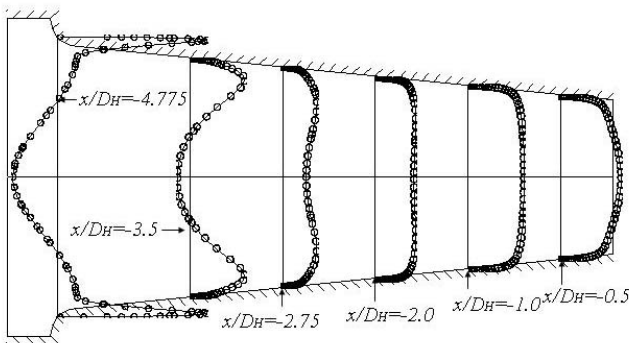


Fig. 8 Axial velocity profiles at each cross section inside nozzle ($p_{os}=110.9\text{kPa}$, $RLI=23.64\text{mm}$, $R_I=5.0\text{mm}$)

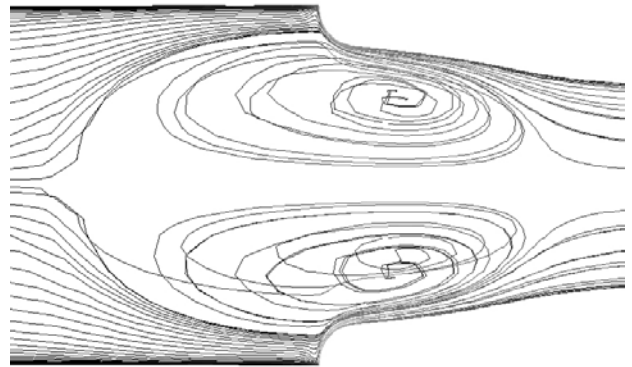


Fig. 9 Streamlines on the symmetric surface

Fig. 7 에는 환형 슬릿의 전압(p_{os})이 187.9 kPa 일 경우, $x/D_H=2.0$ 인 위치에서 축 방향 속도 분포를 나타내었다. $p_{os}=110.9\text{KPa}$ 인 Fig. 5 와 비교 할 때, 중심축 부근에서의 축 방향 속도분포와 제트 폭은 거의 동일하게 나타난다.

Fig. 8 은 축소 노즐 내부의 각 단면에서의 축 방향 속도 성분을 나타낸다. $x/D_H=4.775$ 인 위치는 환형 슬릿 바로 하류로, 본 수치계산 결과는 유로 중심축 부근에서 상류방향으로 향하는 역류가 형성되며, 벽면 부근에서 매우 큰 축 방향 성분을 예측한다. 이것은 환형 슬릿으로부터 주입한 유동이 곡면을 따라 유동하려는 coanda 효과에 의한 것이라 판단된다. $x/D_H=3.5$ 의 위치에서 노즐 중심축 부근에서 발생하는 역류의 영역 및 크기는 감소하며, 벽면 부근에서 축방향의 속도 성분의 크기도 작아진다. 이러한 속도분포는 x/D_H 가 증가함에 따라 전형적인 난류형의 속도분포로 된다. 한편 그림의 축 방향 속도분포로부터 노즐 입구 부근에서 매우 큰 속도 구배를 가지며, 이러한 속도 구배는 확산 효과에 의하여 점차 감소한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9 에는 전압 p_{os} 가 110.9kPa, $R=5.0\text{mm}$, $R_{LI}=23.64\text{mm}$ 일 경우, 노즐의 대칭면에서 유선을 나타내었다. 그림은 환형 슬릿 근처 유체입자의 유선을 나타내며, 노즐 내부에서 넓은 영역의 와류가 발생하고 있다. 또한, 노즐 입구로부터 유입되는 유체입자의 유선을 나타내어 노즐입구에서 유입되는 유체입자는 환형 슬릿 부근의 재순환 영역을 피하여, coanda 벽면을 통해 가속되어져 출구 쪽으로 향한다.

Fig. 10 에는 각 단면 $y-z$ 에서 속도벡터의 분포를 나타내었다. 그림에서 $x/D_H=0$ 은 축소노즐의 출구면, 그리고 $x/D_H > 0$ 는 노즐 출구로부터 하류방향을 의미한다. 그림 (a)는 환형 슬릿의 바로 하류 위치로, 반경방향으로 거의 균일한 속도벡터를 나타내며, x/D_H 가 증가함에 따라 반경 방향의 속도 벡터는 점차 접선방향 속도벡터로 변화 한다. 또,

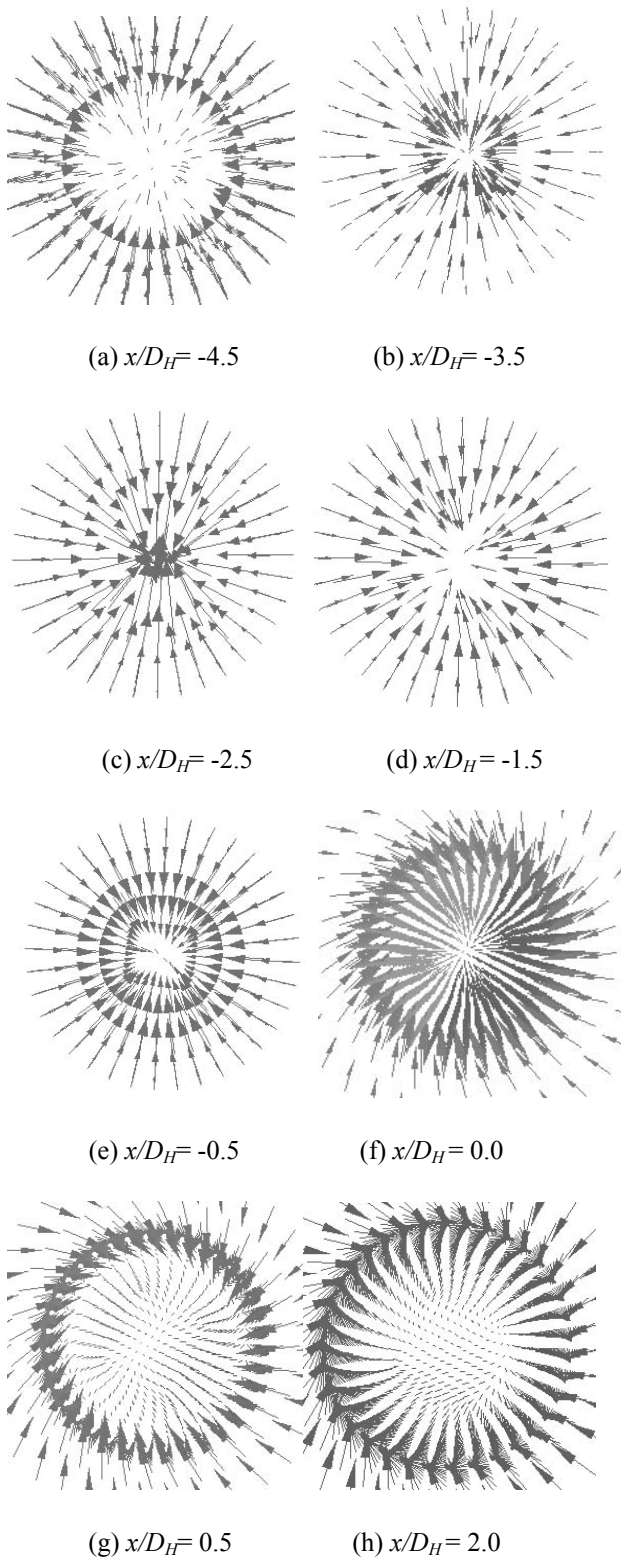


Fig. 10 Velocity vectors on y-z plane ($p_{os}=110.9\text{kPa}$, $RLI=23.64\text{mm}$, $R_I=5.0\text{mm}$)

$x/D_H=0$ 에서는 접선방향 속도벡터가 지배적으로 된다. 따라서 Fig. 8 의 축방향의 속도분포로부터, 축방향 속도분포의 큰 속도 구배가 완만해지면서

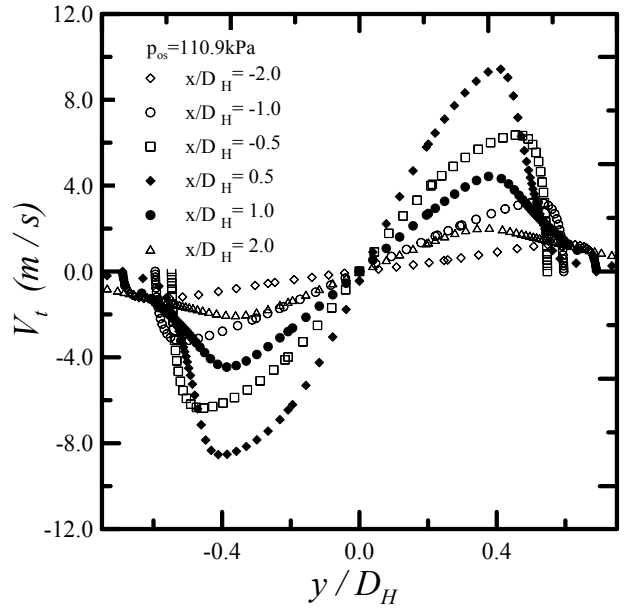


Fig. 11 Tangential velocity profiles at each cross section ($p_{os}=110.9\text{kPa}$, $RLI=23.64\text{mm}$, $R_I=5.0\text{mm}$)

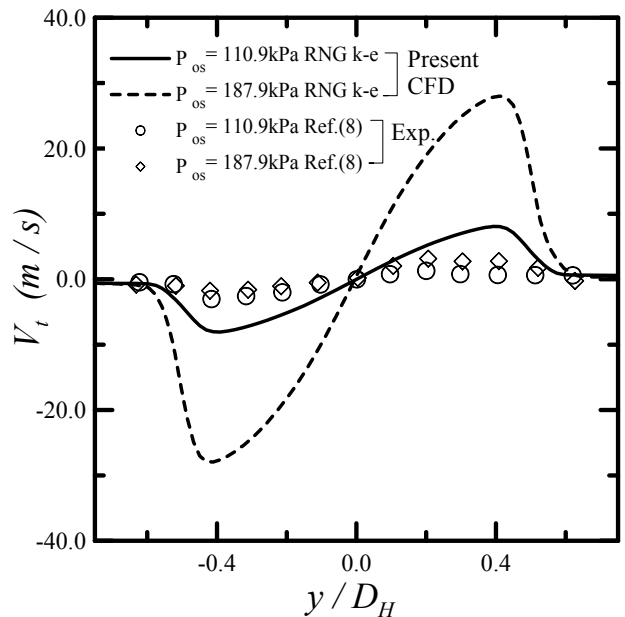


Fig. 12 Tangential velocity distributions at $x/D_H=0.5$ ($RL_2=22.18\text{mm}$, $R_2=3.0\text{mm}$)

접선속도 성분이 발생한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11 에는 노즐 대칭면상에서 발생하는 접선 방향의 속도성분을 각 x/D_H 에 대하여 나타내었다. $x/D_H=-2.0$ 의 위치에서 약간의 접선 속도 성분 즉, 스카이럴 유동성분이 발생하기 시작하며, x/D_H 가 증가함에 따라 접선속도 성분의 크기가 점차 증가한다. $x/D_H < 0$ 인 노즐내부에서 접선방향의 속도성분의 피크위치는 x/D_H 가 증가함에 따라 점차 노즐 중심축 쪽으로 이동하며, $x/D_H > 0$ 인 위치에서 접선속도 성분의 크기는 점차 작아진다. $x/D_H=-1.0$ 인 경우, $-0.38 < y/D_H < 0.38$ 의 영역에서는 강제와

류형태, 그리고 $y/D_H \geq 0.38$ 의 영역에서는 자유와 류형태의 스파이럴 유동이 발생한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 12 는 축소 노즐 입구의 곡률반경 R 을 변화시킨 경우, $x/D_H=0.5$ 인 위치에서 접선속도 분포를 나타내었다. 그림에서 p_{os} 가 110.9kPa 과 187.9kPa 인 경우, 앞의 Fig. 4 와 Fig. 6 의 결과와 비교하면, 축소 노즐 입구의 곡률이 접선속도 성분의 크기에 다소 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 이것은 coanda 효과의 크기가 스파이럴 유동의 형성과정에 영향을 미친다는 것을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 3 차원, 압축성 Navier-Stokes 방정식을 적용한 수치해석을 통하여, 아음속 스파이럴 제트 유동에 관하여 조사하였다. 난류모델이 스파이럴 제트 유동에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 3 가지 난류모델을 적용한 수치계산 결과를 실험값과 비교하였다. 또, 환형 슬릿 형상이 접선속도 성분과 축방향 속도 성분에 미치는 영향을 조사하였으며, 접선방향 속도 성분의 발생원인을 고찰하였다.

본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 본 수치계산법은 접선방향의 속도성분을 예측하여 스파이럴 제트유동이 생성됨을 확인하였다. 그러나 접선방향의 속도성분의 크기와 축방향 속도 성분의 크기를 정확히 예측하지 못하였으며, 향후 난류모델의 개선이나 수치계산 격자의 영향 등에 관한 추가적인 연구가 필요하다.

2) RNG $\kappa - \epsilon$ 난류모델을 사용한 수치계산 결과가 접선방향의 속도 성분을 가장 잘 예측하였다.

3) 스파이럴 유동의 발생원인은 반경방향의 유동 불균일과 불안정에 기인하는 것이 아니며, 노즐 중심축 부근에서 상류로 향하는 역류 유동과 벽면 근처 coanda 효과에 의해 노즐 벽면을 따라 출구로 향하는 유동에 의해 노즐 내 와류가 형성된다.

4) 축 방향 속도분포의 큰 속도 구배가 완만해지면서 접선속도 성분이 발생하며, 노즐 출구부터는 접선속도 벡터가 지배적임을 알았다.

5) 동일한 곡률반경에 대하여 환형 슬릿의 전압이 높을수록 접선방향 속도 분포와 축방향 속도 분포가 크게 나타났다.

6) 향후 축소노즐의 각도, 반경방향의 유동의 압력비, 코안다 표면의 곡률, 환형 슬릿의 폭 그리고 축소노즐의 길이 등에 관한 추가적인 연구를 수행하여, 스파이럴 노즐 설계 자료를 도출한 예

정이다.

후 기

이 논문은 2003 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) 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.
- (3) 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.
- (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., 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.
- (6) 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.
- (7) Horii, K., Matsumae, Y., Cheng, S. M., Takei, M. and Ikeda, Y., 1989, "Spiral Flow and Its Industrial Applications-Optical Cord Passing Method," Industrial and Agricultural Applications of Fluid Mechanics-ASME, FED-(86), pp. 65-68.
- (8) Shigeru, M., Lee, K. H., Shinsuke, O., Toshiaki, S. 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.