



Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2018.22.6.047>

축대칭 핀틀노즐의 3차원 효과 분석

이강민^a · 성홍계^{b,*}

Three-dimensional Effects of an Axi-symmetric Pintle Nozzle

Gang-Min Lee^a · Hong-Gye Sung^{b,*}

^aDepartment of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Korea

^bSchool of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Korea

*Corresponding author. E-mail: hgsung@kau.ac.kr

ABSTRACT

In order to determine whether three-dimensional effects exist in a pintle nozzle of axisymmetric shape, a three-dimensional numerical analysis was performed. The compressibility correction was implemented with the $k-\omega$ SST turbulence model to predict the complex flow separation transition in acceptable accuracy. Recirculation zones were observed at both the front end and rear faces of the pintle, and the flow through the pintle nozzle conveyed complex shock wave structures. Three-dimensional effects that resulted from the reasonable flow separation location were noted, and a trace of the transient pressure increase was observed, mismatched by a two-dimensional axi-symmetric analysis.

초 록

축 대칭 형상의 핀틀 노즐에서 3차원 효과 여부를 파악하기 위하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 초음속 노즐을 통해 배출되는 압축성 유동을 정확히 예측하기 위해 $k-\omega$ SST 난류 모델에 압축성 보정 모델을 결합하였다. 핀틀의 전단과 후단에서 재순환 영역이 관찰되었으며, 노즐을 통해 분출되는 유동은 복잡한 충격파 구조를 형성하였다. 각 핀틀 위치에서 2차원 축대칭과 3차원의 수치해석 결과를 실험데이터와 비교해 볼 때 3차원 결과가 접선 방향 유동의 3차원 효과로 인해 유동 박리 위치와 박리로 인한 압력 상승 변화과정을 정확히 예측하였다.

Key Words: Pintle Nozzle(핀틀 노즐), Flow Separation(유동 박리), Recirculation Zone(재순환 영역), Three-dimensional Effect(3차원 효과)

Received 20 March 2018 / Revised 3 July 2018 / Accepted 10 July 2018

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

Nomenclature

u_i	: velocity vector (u, v, w)
x_i	: spatial coordinate (x, y, z)
ρ	: density
T	: temperature
E	: specific total energy
h	: specific enthalpy
κ	: thermal conductivity
q_i	: heat flux vector
τ_{ij}	: shear stress tensor
δ_{ij}	: Kronecker delta
μ	: viscosity
ϵ_d	: dilatation dissipation
$\overline{p \overline{d}}$: pressure dilatation
t	: physical time
R_{Ref}^*	: nozzle throat radius at zero pintle stroke
X_{Ref}^*	: axial distance from the nozzle throat to nozzle exit
X	: axial distance
P_A	: ambient pressure
P_e	: nozzle exit pressure
P_w	: wall pressure along supersonic nozzle

1. 서 론

핀틀 노즐 추진기관은 고체로켓의 추력 제어를 위해 가장 효율적인 기술에 해당되며, 비행체의 정밀한 궤도천이 및 자세제어를 도모한다. 이 기술은 연소실 내부에 축방향으로 이동이 가능한 핀틀을 삽입하여 핀틀 이동에 따른 노즐 목면적 및 연소실 압력 그리고 추진제 연소속도 변화를 통해 추력을 제어하는 기술이다[1]. 핀틀이 이동하게 되면 노즐에 다양한 충격파와 박리 유동이 형성되며, 이들의 간섭현상으로 경계층에

서 난류발생의 증가와 유동의 불안정성을 일으켜 추진기관 성능에 큰 영향을 미칠 수 있다.

위와 같은 복잡한 현상을 분석하기 위해 핀틀 노즐 추진기관에 대한 수치적인 연구들이 국내외에서 시도되고 있다. Chwalowski[2]는 핀틀 위치에 따른 비추력 특성을 비교하였으며, Ostrander[3]는 핀틀의 형상변화에 따른 비추력 특성과 핀틀에 걸리는 하중을 고찰하였다. Prozan[4]은 핀틀노즐에서 경계층의 유동박리를 예측할 수 있는 수치 기법을 제안하였다. 국내에서는 핀틀 형상이 추력 및 핀틀 하중에 미치는 영향[5,6,7]과 핀틀 위치[8,9]에 따른 유동장해석이 수행되었다.

본 논문에서는 3차원 압축성 방정식을 적용하여 축대칭 형상의 핀틀노즐의 3차원 효과를 조사하였다. 수치결과는 실험 결과 및 선행 논문의 2차원 해석 결과와 비교를 통해 검증하였다.

2. 수치해법

2.1 지배방정식

본 연구에서는 초음속 유동의 압축성을 고려하기 위해 Favre-averaged 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식을 사용하였으며, 이는 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j + \bar{p} \delta_{ij})}{\partial x_j} = \frac{\partial (\bar{\tau}_{ij} - \overline{\rho u_j u_i})}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{E}}{\partial t} + \frac{\partial ((\bar{\rho} \tilde{E} + \bar{p}) \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial (\tilde{u}_i \bar{\tau}_{ij} - \overline{\rho h u_i})}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{q}_j}{\partial x_j} \quad (3)$$

여기서, 첨자 “-” 는 시간 평균량, 첨자 “~” 는 질량에 가중된 평균량을 나타내며, 첨자 i, j 는 공간텐서(space tensor) 첨자를 나타낸다. τ_{ij} , q_j 는 응력텐서(stress tensor), 열 유속 벡터(heat flux vector)로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \quad (4)$$

$$\bar{q}_j = \kappa \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \quad (5)$$

2.2 난류모델

핀틀에 의한 연소실 내외부의 복잡한 초음속 유동에 따른 충격과 구조를 정확하게 모사하기 위해 Menter[10]에 의해 제안된 $k-\omega$ SST 난류모델과 Sarkar[11]에 의해 제안된 압축성 보정 모델이 결합된 방정식을 적용하였다.

Sarkar's Model

$$\epsilon_d = \alpha_1 \epsilon_s M_t^2 \quad (6)$$

$$\overline{p'' d''} = -\alpha_3 P_k M_t^2 + \alpha_4 \rho \epsilon_s M_t^2 \quad (7)$$

여기서, $\epsilon_s(\beta^* \omega k)$ 는 솔레노이드 소산율(solenoidal dissipation rate)이며, $M_t(\sqrt{2k/\gamma RT})$ 는 난류 마하수이다. DNS결과를 기반으로 모델상수는 $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_3 = 0.4$ 그리고 $\alpha_4 = 0.2$ 가 추천된다.

2.3 수치기법

계산속도 향상과 수렴을 가속화시키기 위하여 시간 적분에 대해 LU-SGS기법[12]을 적용하였다. 셀 경계에서 플럭스 계산을 위해 ASUMPW+기법[13]을 이용하였고, 3차 공간 정확도의 MUSCL 외삽 기법에 limiter를 적용하여 수치해의 불안정성을 해소하였다. 그리고 광범위한 마하수와 세장비가 다양한 격자크기에 안정적 수치해를 얻기 위하여 예조건(precondition)기법[14,15]을 사용하였다. 또한, 빠른 수치 연산 속도를 위해 다중블록/다중영역 분할 기법을 적용하였다.

3. 해석 모델 및 경계 조건

핀틀이 움직이지 않은 상태에서 물리적인 영역을 Fig. 1에 나타내었다. 핀틀 및 노즐 형상에 대한 치수는 노즐 목 반지름 길이를 대표해서

표현되었다. 핀틀은 핀틀 전방(Pintle tip)에서 반경 2.5 mm의 곡률을 가지는 관통형 핀틀이며, 노즐은 원추형 노즐이다[16].

3차원 형상의 계산 영역과 경계조건은 Fig. 2에 나타내었다. 핀틀 노즐의 정확한 유동특성을 파악하기 위하여 벽면거리 파라미터(y^+)를 고려하여 $y^+ = 2$ 에 맞게 격자를 생성하였다. 계산영역은 95 블록으로 이루어진 정렬격자로 구성하였으며 약 5.3 백만개의 격자로 Geom 프로그램으로 구성하였다. 수치해석에 적용된 입구 경계조건은 Table 1에 나타내었으며, 출구 경계조건은 해수면 조건이다. 작동유체는 dry air이며 벽면에서 단열조건이 적용되었다. 3차원 격자 형상을 핀틀 위치에 따라 x-y 단면에서 나타내면 Fig. 3과 같다.

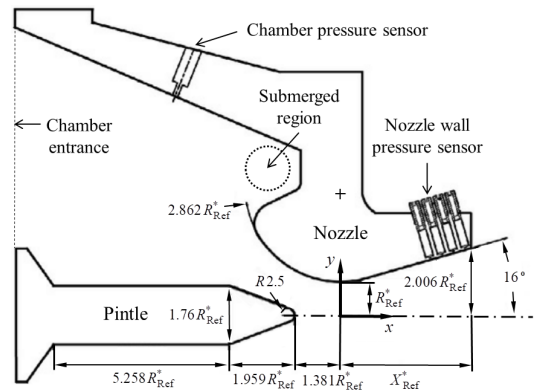


Fig. 1 Physical domain at pintle zero stroke ($R_{Ref}^* = 12.5mm$)[16].

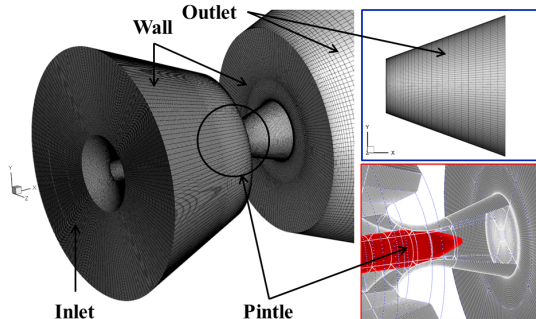


Fig. 2 Computational domain and boundary conditions at pintle stroke, 40mm.

Table 1. Calculation condition.

Parameters	CASE 1	CASE 2
Stroke	40mm	58mm
Inlet TP*(Pa) and TT**(K)	6,000,000 / 300	6,500,000 / 300

*Total Pressure, **Total Temperature

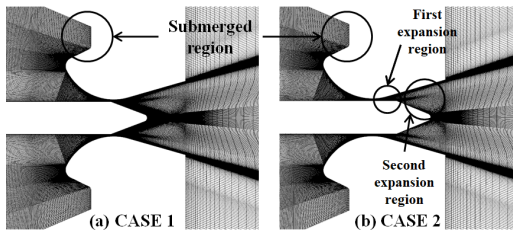


Fig. 3 Computational domain according to the pintle location at x-y cross section for two different pintle strokes.

4. 결 과

본 연구는 비정상상태 수치해석을 적용하였으므로 결과 값은 도출된 데이터의 주기성을 고려하여 시간 평균화하여 나타내었다.

선행 연구의 공압시험 데이터 및 2차원 축대칭 수치해석 결과와 본 연구의 3차원 수치해석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. x축은 노즐목 위치부터 노즐 출구 위치까지의 거리를 나타내며, y 축은 노즐에서의 벽면 압력을 나타낸 것이다. 본 연구의 3차원 결과가 2차원 축대칭 결과보다 공압시험 결과를 더 정확하게 예측함을 알 수 있다. 본 연구의 3차원 결과는 박리점 이전의 압력 기울기 감소율과 박리점 이후의 점진적인 압력 회복(Pressure recovery)이 2차원 축대칭 결과와 차이를 보인다. 이는 핀틀 노즐의 좁은 유로를 통과하여 이동하는 점선 방향 유동의 3차원 효과로 판단된다. 박리점 이전에서 CASE 1의 3차원 결과는 2차원 축대칭 결과와 비교하여 낮은 값을 가지게 되는데, 이는 핀틀 노즐의 좁은 유로를 통과하는 유동의 팽창율이 크게되어 빠른 유동 속도와 함께 나타나는 것으로 판단된다. 이

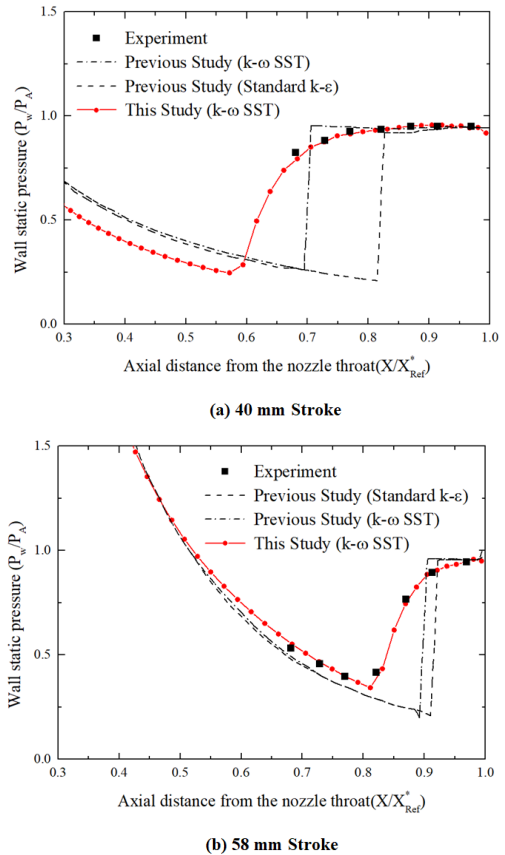


Fig. 4 Wall static pressure distribution with previous data[16].

와는 반대로 CASE 2는 Fig. 3, (b)의 1차 확장부에서 통과하는 유동의 작은 팽창율과 함께 나타나는 것으로 판단된다. 또한, 본 연구의 3차원 결과는 난류모델에 압축성 효과를 적용하였기 때문에 정확한 유동 박리 위치를 포획하여 시험값과 유사한 결과를 도출한 것으로 판단된다.

3차원 효과에 의한 초음속 유동구조를 살펴보기 위해 핀틀 위치 40 mm에서 본 연구와 선행 연구(2차원 축대칭 계산)의 마하수 선도를 Fig. 5에 나타내었다. 여기서, 선행연구의 유동 구조는 k-omega sst에 대한 유동 구조가 도출되어 있지 않기 때문에 two-equation의 난류모델인 k-e의 결과를 사용하였다. 선행연구 결과와 비교하여 본 연구의 결과에서는 충격파와 난류 경계층의 상호작용과 함께 유동 박리가 빠르게 발생하는 것을

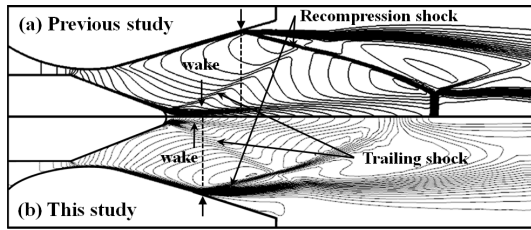
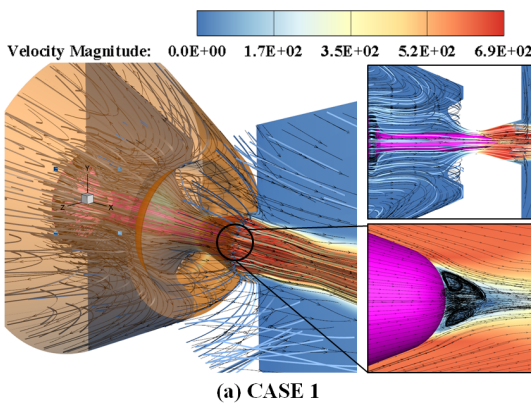
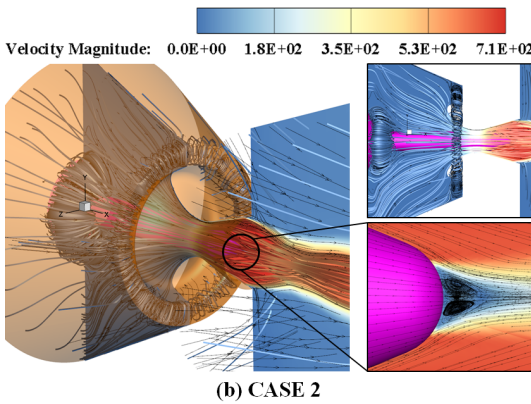


Fig. 5 Mach number contours : previous study(2D) and this study(3D).



(a) CASE 1



(b) CASE 2

Fig. 6 Velocity Magnitude contours for two different pintle strokes.

볼 수 있다. 또한, 선행연구 결과에서 나타나는 노즐 출구 후방의 중심축에서의 수직 충격파(Normal shock)는 3차원 결과에서는 뚜렷하게 나타나지는 않는다. 이는 핀틀 팁에서 발생하는 와류(wake) 및 trailing 충격파와 노즐 벽면에서 발생하는 재압축 충격파(Recompression shock) 사

이의 충격파 상호작용에 대한 결과로 판단할 수 있다.

일반적인 추진기관의 C-D 노즐에서 내부 충격파(Internal shock)와 유동박리의 간섭에 의한 유동구조는 캡 충격파(Cap-shock)와 마하디스크(Mach-disk)의 2가지 패턴이 나타난다. 하지만, 본 연구의 3차원 유동구조는 핀틀의 존재로 인한 복잡한 충격파 생성 및 경계층 유동의 상호작용으로 인하여 이 2가지 패턴이 뚜렷하게 나타나지 않는다[17].

3차원 효과에 대한 전체적인 유동구조를 살펴보기 위해 유선을 포함하는 속도 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 전체적인 유동의 구조는 3차원 효과로 인해 축 및 반경방향 뿐만 아니라 접선방향으로도 유동의 흐름이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 오른쪽 상단의 형상을 통해 두 핀틀 위치 모두 핀틀 후단에서 후향 계단 형상(Backward facing step)으로 인해 재순환 영역이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한, 오른쪽 하단의 그림을 통해 핀틀 전방의 기저 영역(Base region)에서도 유동박리 및 충격파 생성과 함께 재순환 영역을 확인할 수 있다. CASE 1과 CASE 2에서 나타나는 재순환 영역의 큰 차이점은 Submerged 영역에서 나타난다. CASE 1의 경우 핀틀과 노즐 사이의 최소 노즐 목 위치에서 유동의 팽창이 급격하게 일어나지만 CASE 2의 경우 최소 노즐 목 위치에서 수평의 핀틀면과 노즐을 따라 유동 팽창이 점차적으로 일어난다. 이로 인하여 CASE 1에서는 챔버로 유입된 유동이 Submerged 영역과 노즐 목 영역으로 나뉘어져 이동하며, Submerged 벽을 강타한 유동은 큰 재순환 구조를 보이며 후방으로 반사된다. 그리고, CASE 2에서는 챔버로 유입된 유동이 노즐 목을 통해 곧바로 빠져나가지 못하면서 Submerged 영역에서 갇히게 되며 뚜렷한 재순환 구조가 나타나게 된다. 이러한 3차원적 유동구조는 축 및 반경 방향 뿐만 아니라 접선방향으로의 유동간섭의 완화(spill-over 효과)가 나타나면서 fig. 5에 나타난 것과 같이 2차원 축대칭 결과와 상이한 유동구조를 보이게 된다.

3차원 유동구조 및 충격파 현상을 살펴보기 위

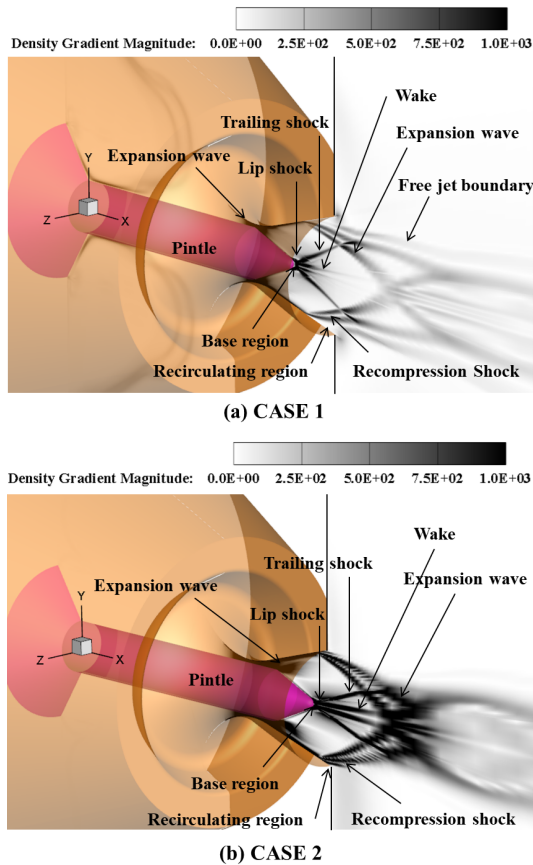


Fig. 7 Density gradient magnitude contours for two different pintle strokes.

하여 밀도 구배 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 연소실로부터 들어온 유동은 노즐과 핀틀 사이의 좁은 유로인 노즐 목을 지나면서 팽창되며, 압력 감소 및 속도 증가가 이루어진다. 핀틀 전방에서 생성되는 wake는 CASE 1과 비교하여 CASE 2에서 강하게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 CASE 2의 핀틀 전방이 노즐 출구와 매우 가깝게 위치하여 노즐을 통해 배출되는 유동의 급격한 팽창으로 나타나는 결과이다. 핀틀노즐의 유동은 일반적인 노즐과 비교하여 핀틀로 인해 복잡한 충격파를 형성한다. 형성된 trailing 충격파와 재압축파(recompression shock)는 노즐 출구의 후방에서 충돌하여 반사된다. 이후 팽창파는 제트 경계층 내부의 중심축에서 반사되며, 대기 제트와의 혼합에 의해 충격파 패턴이 소멸되는

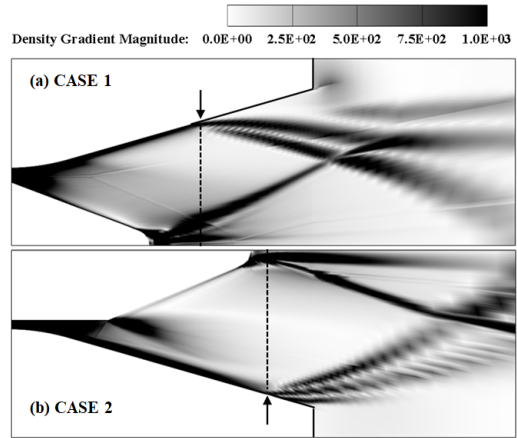


Fig. 8 Density gradient magnitude contours for two different pintle strokes.

것을 확인할 수 있다.

핀틀 위치에 따른 유동 박리 위치를 뚜렷하게 비교하기 위해 같은 범례의 XY평면에서 밀도 구배 컨투어를 Fig. 8에 나타내었다. 핀틀 위치가 증가할수록 연소실 압력 증가와 핀틀 위치의 차이로 인해 박리 위치가 후방에 위치하고 유동의 팽창이 강하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

노즐을 통해 배출되는 유동의 접선 방향에 대한 유동 구조의 정량적 분석을 위해 노즐 출구에서 유선(stream line), 밀도 구배, 와류 분포를 Fig. 9에 나타내었다. 밀도 구배 선도를 통해서 핀틀 노즐의 복잡한 충격파 생성으로 인해 여러 개의 질은 원형의 띠가 관찰되었다. 접선 방향의 유선은 CASE 1에서 재압축파 영역에서 발생하고, CASE 2는 재압축파와 trailing 충격파 영역에서 관찰되었다. 이는 와류 크기 선도에 좀더 뚜렷하게 관찰된다. 접선방향 유선을 경계로 반경방향의 유선은 급격한 구배가 존재하는 충격파와 유동박리로 인하여 대기 유동이 3차원적인 압력 구배로 인한 원인으로 파악된다. 또한 노즐 벽면 근처에서 반경 방향의 유선은 CASE 2보다 CASE 1에서 구불어진 형태를 나타내는데 이는 CASE 1의 유동박리가 노즐 벽면을 따라서 먼저 발생하면서 Y와 Z방향으로 외부 대기의 영향을 많이 받기 때문이다.

와류 크기는 유동박리 이후 재압축파와 노즐

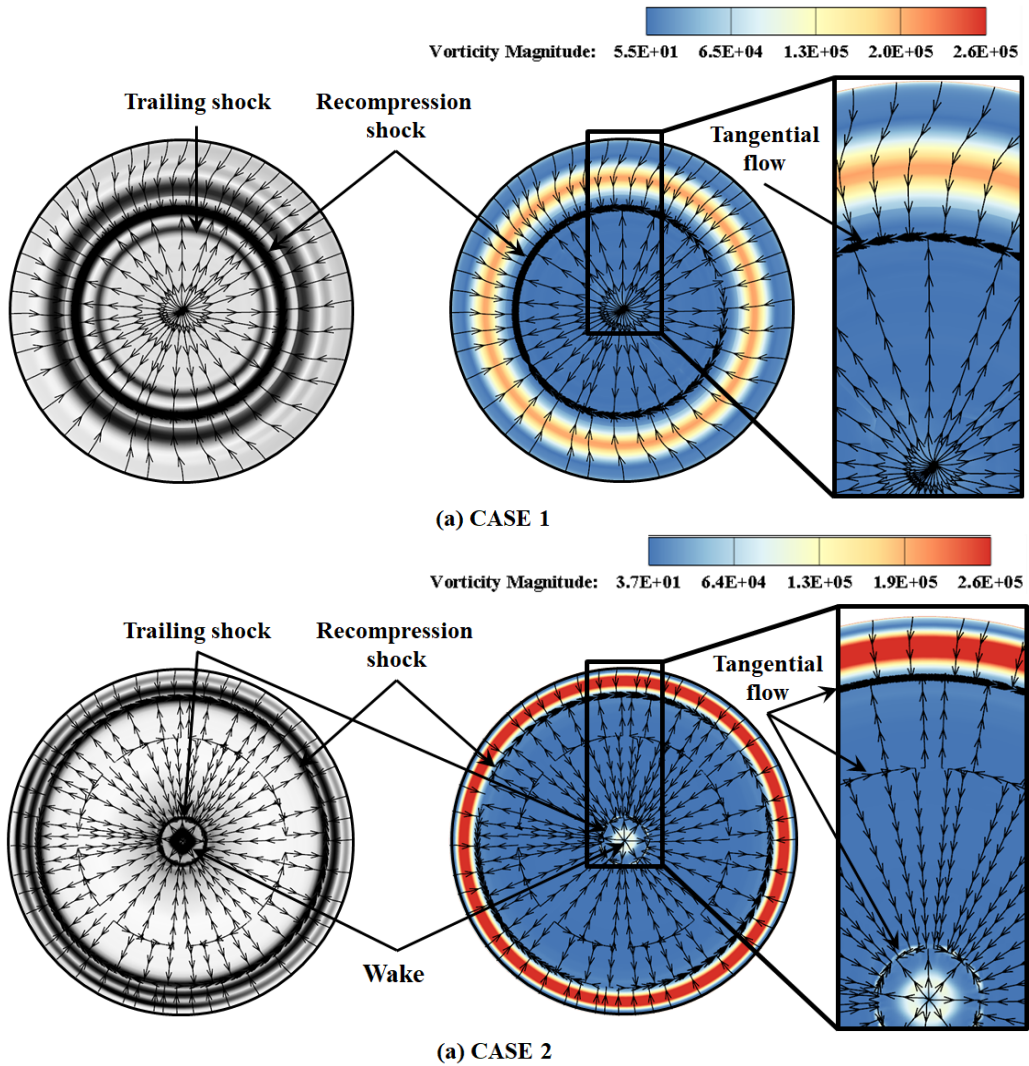


Fig. 9 Density and vorticity magnitude contours at nozzle exit for two different pintle strokes.

벽면의 중심 위치에서 강하게 발생된다. 이는 유동 박리 이후 회전하는 유동의 재순환 영역이 발생되어 나타나는 결과이다.

5. 결 론

축대칭 핀틀노즐 형상에 대해 3차원 수치해석을 진행하여 선행연구자의 공압시험 결과 및 2차원 축대칭 수치해석 결과와 비교하였으며, 핀틀 위치에 따른 핀틀노즐 유동의 3차원 효과와

3차원 유동 구조를 관찰하였다. 본 연구는 $k-\omega$ SST 난류모델에 압축성 보정을 적용한 것으로 시험 값과 잘 일치하였다. 선행 연구자의 2차원 축대칭 해석 결과에서는 유동 박리 영역에서 급격한 압력 상승이 나타났지만 실험 결과는 완만한 압력상승이 관찰되었는데, 이는 본 연구의 3차원 해석을 통하여 핀틀노즐 유동에서의 3차원 효과에 의한 현상임을 알 수 있었다. 3차원 해석에서는 2차원 축대칭 해석에 비하여 유동박리 점이 빠르게 나타났으며, 충격파와 유동박리의 간섭이 완화되므로 박리에 의한 압력 상승이 점

진적으로 증가함을 알 수 있었다.

핀틀의 위치(stroke)가 증가함에 따라 연소실 압력 증가 및 노즐 내부 형상의 차이로 인해 매우 복잡한 충격파 구조가 관찰되고 박리위치가 후방에서 나타났다. 또한, 노즐 출구에서 도출된 접선방향의 유선 구조의 분석으로 핀틀 노즐이 축대칭 형상이지만 유동은 축대칭이 아닌 3차원 구조임을 명확히 제시하였다. 이러한 관찰을 바탕으로 차후에는 비대칭 핀틀에 대한 유동 구조 및 성능 변화를 파악하기 위하여 3차원 수치해석 연구를 진행할 예정이다.

References

1. Heo, J. Y., Jeong, K. Y. and Sung, H. G., "Numerical Study of the Dynamic Characteristics of Pintle Nozzles for Variable Thrust", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 31, No. 1, pp.230-237, 2015.
2. Chwalowski, Pawel., Smith-Kent, Randall. and Loh, Hai-Tien., "Analytical Contouring of Pintle Nozzle Exit Cone using Computational Fluid Dynamics", *31st Joint Propulsion Conference*, San Diego, CA, USA, AIAA 95-2877, July 1995.
3. Olander, M. J., Bergmans, J. L. and Thomas, M. E., "Pintle Motor Challenges for Tactical Missiles", *36th Joint Propulsion Conference*, Huntsville, Alabama, USA, AIAA 2000-3310, July 2000.
4. Prozan, R. J., "CFD Prediction of Nozzle Flow Separation without Boundary Layer Resolution", *35th Joint Propulsion Conference*, Los Angeles, California, USA, AIAA 99-2645, June 1999.
5. Kim, J. K. and Park, J. H., "Investigation of Pintle Shape Effect on the Nozzle Performance", *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 36, No. 8, pp.790-796, 2008.
6. Kim, J. K. and Park, J. H., "Numerical Study of the Effect of Pintle Shape on the Thrust Level," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 37, No. 5, pp.476-482, 2009.
7. Lee, J. H., Park, B. H. and Chang, H. B., "Analysis of the Pintle Nozzle Characteristics - I : Steady State Performance" *The Korean Society of Propulsion Engineers Fall Conference*, Yeosu, Korea, pp.355-361, November 2012.
8. Kim, J. K., Lee, J. H. and Chang, H. B., "Computational Investigation of Pintle Nozzle Flow", *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 13, No. 2, pp.35-41, 2009.
9. Sung, H. G., Jeong, K. Y. and Heo, J. Y., "Performance characteristics of a pintle nozzle using the conformal sliding mesh technique", *Aerospace Science and Technology*, Vol. 61, pp.85-94, 2017.
10. Menter, F. R., Kuntz, M. and Langtry, R., "Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model", *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4*, pp.625-632, 2003.
11. Sarkar, S., Erlebacher, G., Hussaini, M. Y. and Kreiss, H. O., "Analysis and Modelling of Dilatational Terms in Compressible Turbulence", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 227, pp.473-493, 1991.
12. Kim, K. H., Lee, K. T., Rho, O. H. and Kim, C. A., "Development and analysis of AUSMPW+", *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 29, No. 8, pp.45-56, 2001.
13. Yoon, S. K. and Jameson, A., "Lower-upper Symmetric-Gauss-Seidel method for the Euler and Navier-Stokes equations", *AIAA*, Vol. 26, No. 9, pp.1025-1026, 1988.
14. S., Venkateswaran, Li, D. and Merkle, C. L., "Influence of stagnation regions on

- preconditioned solution at low speeds”, *41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, USA, AIAA 2003-435, January 2003.
15. Choi, Y. H. and Merkle, C. L., “The Application of Preconditioning in Viscous Flows”, *Journal of Computational Physics*, Vol. 105, No. 2, pp.207-223, 1993.
16. Lee, J. H., Park, B. H. and Yoon, W. S., “Parametric Investigation of the Pintle-perturbed Conical Nozzle Flows”, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 26, No. 1, pp.268-279, 2013.
17. Ostlund, J. and Muhammad-Klingmann, B., “Supersonic flow separation with application to rocket engine nozzles”, *Applied Mechanics Review*, Vol. 58, No. 3 pp.143-175, 2005.