

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2016.20.4.059>

## 작동 고도에 따른 관통형 핀틀 노즐의 추력 특성 연구

정기연<sup>a</sup> · 홍지석<sup>b</sup> · 허준영<sup>c</sup> · 성홍계<sup>d,\*</sup> · 양준서<sup>c</sup> · 하동성<sup>c</sup>

### Thrust Characteristics of Through-type Pintle Nozzle at Operating Altitudes Conditions

Kiyeon Jeong<sup>a</sup> · Ji-Seok Hong<sup>b</sup> · Junyoung Heo<sup>c</sup> · Hong-Gye Sung<sup>d,\*</sup> ·  
Juneseo Yang<sup>c</sup> · Dongsung Ha<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Currently Core Tech R&D Lab, LIG Nex1 Co., Ltd., Korea

<sup>b</sup>Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Korea Aerospace University, Korea

<sup>c</sup>The 4<sup>th</sup> R&D Institute - 1<sup>st</sup> Directorate, Agency for Defense Development, Korea

<sup>d</sup>School of Mechanical and Aerospace Engineering, Korea Aerospace University, Korea

\*Corresponding author. E-mail: [hgsung@kau.ac.kr](mailto:hgsung@kau.ac.kr)

#### ABSTRACT

Numerical simulations have been performed to investigate thrust characteristics of a through-type pintle nozzle with or without flow separation at various operating altitudes. The low Reynolds number  $k-\epsilon$  with compressibility correction proposed by Sarkar are applied. The detail flow structures are observed and static pressures along nozzle wall are compared with experimental results. The flow separation in the pintle nozzle disappears and jet plume strongly expands as its operating altitude increases. To evaluate the thrust characteristics, the momentum term and pressure term of thrust are analyzed. Thrust and thrust coefficient at altitude 20 km are about 10% more than them at the ground 0km.

#### 초 록

작동 고도에 따라 노즐 내부에서 박리유동이 발생 또는 미발생 하는 관통형 핀틀노즐의 추력의 특성을 파악하기 위해 수치적 연구를 수행하였다. 난류모델은 저 레이놀즈 수  $k-\epsilon$  모델과 압축성 보정 모델인 Sarkar 모델을 적용하여, 핀틀 노즐의 내부 유동장을 관찰하고 노즐 벽면에서의 압력을 실험데이터와 비교하였다. 작동고도가 높아질수록 외기의 압력은 낮아지므로 낮은 고도에서의 유동 박리는 사라지고 제트의 팽창은 커진다. 추력특성을 분석하기 위해 추력을 추력의 모멘텀항과 압력항으로 나누어 분석하였다. 고도가 높아질수록 저고도에서의 박리로 인해 감소된 압력회복이 증가하고, 추력의 압력항이 증가하여 추력과 추력계수는 증가한다. 고도 20 km 조건에서는 지상에 비해 추력과 추력계수가 약 9% 증가한다.

Key Words: Through-type Pintle Nozzle(관통형 핀틀노즐), Separation Flow(박리유동), Thrust Coefficient(추력계수), Operating Altitude(작동고도)

Received 27 April 2016 / Revised 7 July 2016 / Accepted 12 July 2016

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

Nomenclature

$A_t$	: Nozzle Throat Area
$C^*$	: Characteristic Velocity
$C_{\varepsilon_1}, C_{\varepsilon_2}$	: Turbulent Energy Dissipation Parameter
$C_k$	: Turbulent Time Scale Parameter
$C_\mu$	: Turbulent Viscosity Parameter
$E$	: Energy
$F_1$	: Blending Function
$g$	: Gravity
$h$	: Specific Enthalpy
$H$	: Heaviside Step Function
$k$	: Turbulent Kinetic Energy
$M$	: Mach Number
$M_t$	: Turbulent Mach Number
$p$	: Static Pressure
$p_c$	: Chamber Pressure
$\overline{p''d''}$	: Pressure Dilatation
$P_k$	: Production of Kinetic Energy
$R$	: Specific Gas Constant
$T$	: Static Temperature
$t$	: Time
$T_{turb}$	: Turbulent Time Scale
$u$	: Velocity
$V$	: Volume
$x$	: Spatial Coordinate
$y^+$	: Dimensionless Wall Distance
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	: Model Constants for Compressible Correction of k- $\varepsilon$ Model
$\beta, \beta^*$	: Model Constants for Compressible Correction of k- $\omega$ Model
$\gamma$	: Specific Heat Ratio
$\delta_{ij}$	: Kronecker Delta
$\varepsilon_c$	: Compressible Dissipation
$\varepsilon_s$	: Dissipation Rate
$\mu$	: Molecular Viscosity
$\mu_t$	: Turbulent Viscosity
$\rho$	: Density
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	: Model Constants
$\tau_{ij}$	: Viscous Stress Tensor
$\omega$	: Dissipation Rate

### Superscripts

$-$	: Time Average
$\sim$	: Favre Average
$''$	: Fluctuation Associated with Mass-weighted Mean

## 1. 서 론

고체추진기관 추력 크기를 조절하는 방법 중에서 연속적인 추력조절을 위하여 핀틀노즐을 사용할 수 있다. 핀틀노즐은 노즐 목 부근에 핀틀을 설치하여 핀틀의 형상이나 위치에 따라 노즐 목 면적을 조절하는 시스템이다. 변화된 노즐 목 면적은 추력의 크기를 변화시켜 추력제어에 용이하다. 핀틀의 위치에 따라 노즐 목 면적이 변하면 연소실 압력이 변화하고 이는 추진제의 연소속도에 큰 영향을 미치므로 이를 종합적으로 고려하여 핀틀노즐의 성능 특성을 파악하고 이를 설계에 반영하는 것이 중요하다[1].

핀틀을 이용한 추력 조절 기술은 정밀 케도천이, 자세제어의 핵심요소기술로서 미국, 일본, 프랑스, 독일, 러시아 등의 여러 항공우주 기술 선진 국가에서 활발히 연구가 수행되었다. 미국의 Aerojet에서는 핀틀 로켓모터의 노즐 목 면적 변화에 대한 연소실 압력과 추력 변화를 이론적으로 예측하고 실험을 실시하였으나, 핀틀 구성품의 손상으로 인하여 목표한 결과를 얻지 못했다 [2]. 미국의 Thiokol에서는 콘(Cone)형상의 핀틀을 수치적으로 해석하여 연소실과 추력의 섭동을 최소화하는 연구가 수행되었다[3]. 프랑스의 SNECMA는 유도탄의 측추력기의 용도로 핀틀노즐을 개발하였으며, 구동 하중을 줄이기 위하여 핀틀에 홀을 적용하였다[4]. 그리고 중국의 Northwestern Polytechnical University에서는 ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 기법을 적용한 핀틀 로켓모터의 비정상 수치해석을 수행하였다. 이동격자를 사용하여 핀틀의 이동속도 및 노즐 내부의 체적변화를 고려하여 핀틀 로켓모터의 추력 제어 과정의 동특성 연구를 수행하였다[5]. 국내에서는 핀틀 형상과 핀틀이동에 따

른 실험적 연구와 핀틀 형상이 노즐 성능에 미치는 영향을 수치해석적으로 평가하였다[6]. 연소실 내부의 핀틀을 갑작스럽게 이동시키면 유동장이 급격히 변하여 압력진동유발 및 연소현상 변화를 가져오며, 연소실 내부의 핀틀 위치에 따라 핀틀과 노즐에 복잡한 충격파와 박리유동이 형성된다[7-10]. 이러한 충격파와 박리유동의 간섭으로 인해 경계층 내에서 난류유동이 발생하고, 유동이 불안정해진다. 핀틀 움직임에 의해 발생하는 박리유동에 적합한 2-방정식 난류모델을 선택하기 위해 압축성계수 보정모델에 따른 박리특성을 연구하였다[11].

핀틀 노즐은 일반 노즐 보다 노즐 내부에서 박리유동이 더 쉽게 발생할 수 있다. 본 연구에서는 작동고도별 추력의 특성을 분석하였다. 추력은 모멘텀항과 압력항으로 구분하여 외기의 압력변화에 따른 지배적인 인자를 확인하고 박리를 포함한 추력계수의 변화경향을 도출하였다.

## 2. 수치 해법

### 2.1 지배방정식

Favre-averaged 된 질량, 운동량, 에너지 보존방정식은 다음과 같다.

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

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j + \bar{p} \delta_{ij})}{\partial x_j} = \frac{\partial (\bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} u_j'' u_i'')}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{E}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{E} + \bar{p}) \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} h'' u_i'')}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{q}_j}{\partial x_j} \quad (3)$$

### 2.2 난류 모델 및 압축성 계수 보정 모델

핀틀에 의해 발생하는 복잡한 충격파구조로 인한 난류특성의 정확한 수치모사를 위해서 박리유동에 대한 적용성이 우수한 Yang and Shih에 의해 제안된 저 레이놀즈수  $k-\epsilon$  난류 모델을 사용하였고[12,13] 난류 모델에 대하여 Sarkar에

의해 제안된 압축성효과 보정을 적용하였다 [14,15].

난류 수송방정식으로부터 난류운동에너지와 소산율은 다음의 식으로 계산된다.

### Low-Reynolds $k-\epsilon$ Turbulent Model

$$\frac{\partial \bar{\rho} k}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \bar{\rho} (\epsilon_s + \epsilon_c) + \overline{p'' d''} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \epsilon_s}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_j \epsilon_s)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon_s}{\partial x_j} \right) + \frac{(C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \bar{\rho} \epsilon_s)}{T_{turb}} + \Lambda \quad (5)$$

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

$$\overline{p'' d''} = -\alpha_2 P_k M_t^2 + \alpha_3 \bar{\rho} \epsilon_s M_t^2 \quad (7)$$

$\epsilon_c$ 과  $\overline{p'' d''}$ 는 압축성소산과 압력팽창으로써, 압축성 유동흐름을 고려하였다. 위와 같은 난류 모델식에 압축성계수 보정 모델을 나타내면 다음과 같다.

### Sarkar's Model

$$\alpha_1 = 1.0, \alpha_2 = 0.4, \alpha_3 = 0.2, M_t^2 = 2k/c^2 \quad (8)$$

### 2.3 수치기법

위의 지배방정식을 3차원 격자로 생성하되 접선방향은 3개의 격자로 생성하고 좌우의 경계면은 대칭 경계 조건을 적용하였다. 시간적분을 위하여 LU-SGS (Lower-Upper Symmetric-Gauss-Seidel) 기법을 적용하였다. 셀 경계에서 플럭스 계산을 위해 AUSMPW+기법을 이용하였고, 유동변수에 대한 MUSCL 외삽 기법을 이용하여 고차의 공간 정확도를 갖게 하였다. 그리고 광범위한 마하수와 세장비가 다양한 격자크기에 안정적 수치해를 얻기 위하여 예조건(precondi-

tioning) 기법을 사용하였다[16]. 예조건 기법은 비정상 Navier-Stokes 방정식에서 유동변수 벡터의 시간 미분항에 인공적인 예조건 행렬을 곱하여 시간전진기법을 이용하여 해를 구하는 방법이다. 이중시간전진기법은 낮은 마하수 영역에서 내부 반복계산으로 수렴성을 높인 방법이다. 수치계산을 위한 지배방정식은 Eq. 9와 같다.

$$\Gamma \frac{\partial Z}{\partial \tau} + \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(E-E_v)}{\partial x} + \frac{\partial(F-F_v)}{\partial y} + \frac{\partial(G-G_v)}{\partial z} = H \quad (9)$$

낮은 마하수에서 나타나는 압력항의 특이성을 피하기 위해 압력항을 기준압력과 섭동압력으로 분리하였고, 핀틀 노즐 내부에서 발생하는 박리와 충격파구조는 수렴성에 악영향으로 장시간의 계산이 요구되므로 고속 고효율의 계산기법이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 분할된 영역마다 전체의 프로세서에 할당하여 전체 계산 속도를 빠르게 하는 다중블록/다중영역 분할 기법을 적용하였다.

### 3. 해석 모델 및 경계 조건

계산에 사용된 격자구성은 Fig. 1과 같다. 노즐 목의 크기가 가장 작을 때 핀틀이 위치하며 격자구성 측면에서는 난류의 생성과 소멸, 그리고 박리영역의 유동특성을 정확하게 모사하기 위하여 벽면에서 격자는  $y^+=1$ 로 생성하였다. 계산영역은 총 6개의 블록이며 격자수는 약 33,000개로 구성하였다. 핀틀 형상은 선행연구를 통해 연구를 수행한 관통형 핀틀 노즐 중에서 핀틀 위치에 대해 연속적인 추력변화 경향을 나타내는 형상을 선택하였다[10].

연소실 입구조건은 실험에서 오리피스를 통해 공급되는 전압력을 적용하였다. 중심축에서는 질유량이 중심축으로 통과하지 않도록 하였으며, 출수에서는 외기압력을 사용하였다. 작동 고도에 따른 압력과 온도는 Table 1과 같다.

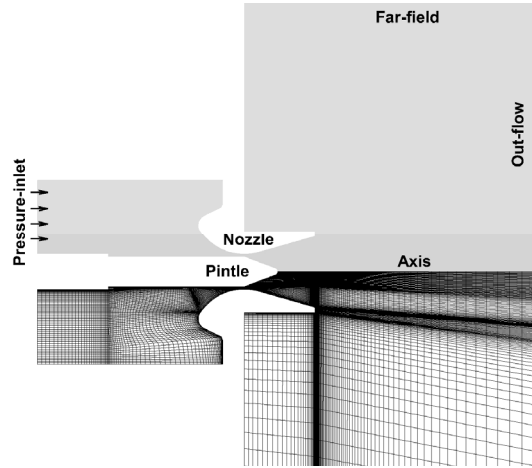


Fig. 1 Computational domain and boundary conditions of a pintle nozzle.

Table 1. Boundary conditions at operating altitudes.

Altitude [km]	Pressure [Pa]	Temperature [K]
0	101325	288.15
20	5474.89	216.65
40	277.52	251.05
80	0.88	196.65

### 4. 결 과

#### 4.1 작동고도에 따른 유동구조

Fig. 2는 해수면(0 km) 조건과 고도 20 km 에서의 핀틀 팁(tip) 부분을 확대하여 노즐 유동구조를 마하수 분포로 나타낸 것이다. 작동 고도가 높아질수록 외기의 압력이 감소하면서 노즐에서 발생하는 제트의 크기가 커진다. 이 현상은 노즐에서의 유동분포를 통해 확인할 수 있다. 작동 고도가 높을 수록 외기의 압력이 낮아지므로 해수면 상태에서는 발생되었던 노즐에서의 유동 박리는 고도 20 km 조건에서는 박리현상이 사라진다.

#### 4.2 노즐 벽면 압력분포

Fig. 3은 해수면과 고도 20 km 에서 노즐 벽

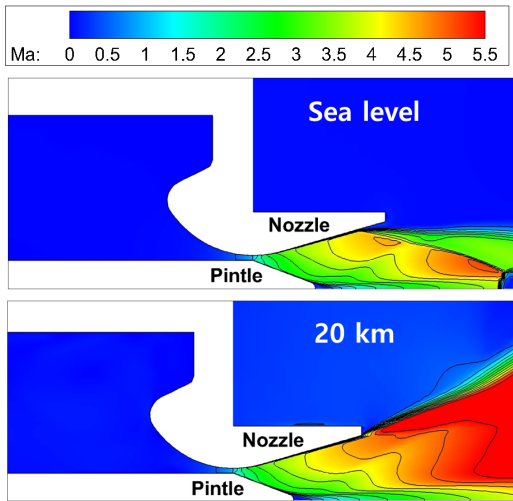


Fig. 2 Flow structure at operating altitude.

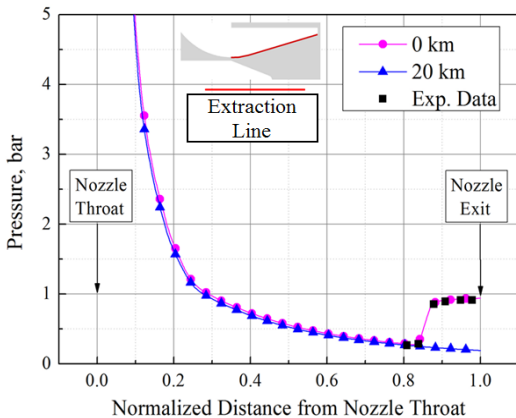


Fig. 3 Pressure distribution at operating altitude.

면에서의 압력 분포를 나타낸 것이다. 해수면 조건에서의 실험값을 참고하였다[6].

x축은 노즐 목에서 출구까지의 거리를 무차원화 한 것이고 y축은 노즐 벽면에서의 압력을 나타낸 것이다. 해수면 조건에서는 공압실험을 수행한 결과와 수치해석 결과를 비교하였다. Fig. 2와 비교해보면 박리가 발생한 해수면 조건의 경우 노즐 출구에서 압력이 상승되는 것을 알 수 있다. 반면에 고도 20 km 조건에서는 박리가 발생하지 않으므로 노즐 벽면에서 면적 비에 따라서 압력이 하강한다. 고도 40 km, 80 km의 경우 20 km 보다 외기의 압력이 낮으므로 노즐에

서 박리가 발생하지 않음을 직관적으로 알 수 있다.

#### 4.3 추력의 모멘텀항 및 압력항 비교

추력은 Eq. 10과 같이 모멘텀항과 압력에 대한 항(이후로는 압력항으로 칭함)으로 나눌 수 있다. 작동 고도별 수치해석 결과를 토대로 노즐에서의 추력과 추력의 모멘텀항, 압력항을 해수면의 추력으로 무차원화하여 Table 2에 나타내었다.

$$F = \dot{m} V_e + (P_e - P_a) A_e \quad (10)$$

작동 고도가 높아질수록 추력의 크기는 증가하다가 일정해지는 것을 알 수 있다. 추력의 증가 원인을 분석하기 위해 작동 고도별 추력의 모멘텀항과 압력항을 나누어 표시하였다.

$$\dot{m} V_e = \rho V_e^2 A_e \quad (11)$$

Eq. 11은 추력의 모멘텀항을 밀도와 속도, 출구 면적으로 재구성한 것이다. 해수면 조건의 경우 노즐에서 박리가 발생하여 외부 유동이 유입된다. 반면에 고도 20 km 조건은 노즐에서 박리가 발생하지 않으므로 외부 유동이 유입되지 않는다. 외부 유동의 유입은 박리 영역에서의 밀도와 압력, 속도에 영향을 미치며 이는 추력의 모멘텀항을 변화시킨다. Table 3은 해수면과 고도 20 km의 밀도를 나타낸 것이다. 밀도 값을 비교해 보았을 때 약 14배의 차이가 남을 알 수 있다. 그에 반해 노즐 출구 속도의 경우 박리지점에서는 약 3배정도 차이난다. 즉, 해수면 조건에서는 외부 유동의 유입으로 인해 속도 감소보다 큰 밀도의 증가로 인해 추력의 모멘텀항이 증가한다. 이후 고도 40, 80 km 조건의 경우 노즐 출구에서 박리가 발생하지 않으며 노즐 출구의 물성치는 연소실의 압력과 노즐 면적 변화량에 의존하므로 고도 20 km 조건과 동일하게 형성된다.

반면에 추력의 압력항은 해수면 조건에서는 박리가 발생하며 음수를 나타내며, 작동 고도가

Table 2. Momentum and pressure terms of thrust at operating altitude.

Altitude [km]	Thrust/ $T_{0km}$	MTT*/ $T_{0km}$	PTT**/ $T_{0km}$
0	1.0	1.07	- 0.07
20	1.088	1.05	0.038
40	1.097	1.05	0.046
80	1.097	1.05	0.046

\*Momentum Term of Thrust, \*\*Pressure Term of Thrust

Table 3. Density at operating altitude.

Altitude [km]	Density [ $kg/m^3$ ]
0	1.225
20	0.088

증가하면 외기의 압력이 낮아져 추력의 압력항이 증가한다. 박리가 발생하지 않는 작동 고도 20 km 이상의 조건에서는 추력의 압력항은 전체 추력의 약 4~5%이며, 추력의 모멘텀항은 일정하다. 노즐에서의 박리유무에 따른 추력변화를 비교하기 위해 해수면 조건과 고도 20 km 조건의 추력의 모멘텀항과 압력항을 비교해 보면, 모멘텀항은 초기 추력 대비 2% 감소하는 반면에 압력항은 초기 추력 대비 4.5% 증가한다.

#### 4.4 노즐 출구에서의 제트방향속도 및 압력 분포

Fig. 4는 노즐 출구에서의 반경방향 압력을 작동 고도의 대기 압력으로 무차원화하여 표현한 것이다. 추력의 압력항은 노즐 출구에서의 압력과 대기 압력의 차이에 비례하므로 x축의 값이 1보다 크면 추력의 압력항이 양수가 됨을 의미한다. 박리가 발생하는 해수면 조건에서는 박리가 발생하는 0.8 ~ 1.0 부분(전체 영역의 약 20%)을 제외하고는 해수면 조건의 압력보다 출구 압력이 낮게 형성된다. 그로 인해 해수면 조건에서 추력의 압력항은 음수를 나타낸다. 반면에 고도 20 km 조건에서는 작동 고도의 압력보다 출구 압력이 모두 높게 형성된다. 압력 분포를 보았을 때, 벽면에서의 압력보다 제트 중심에

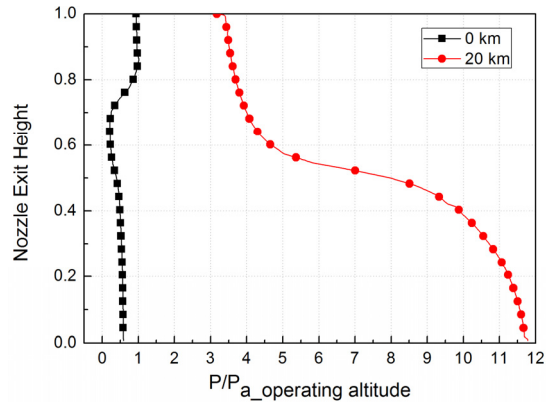


Fig. 4 Pressure distribution at nozzle exit.

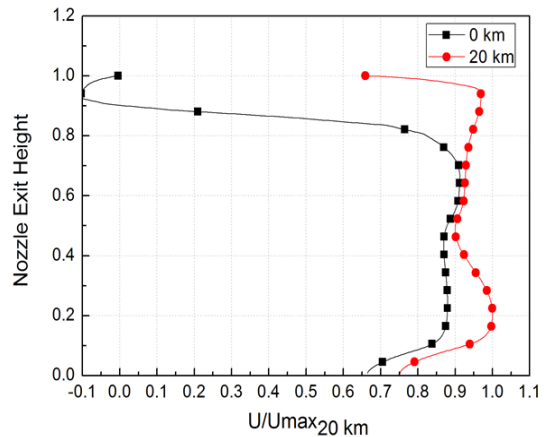


Fig. 5 Velocity profile at nozzle exit.

서의 압력이 약 3배 높으며 노즐 출구의 중심부 근에서 압력의 급격한 변화가 발생한다.

Fig. 5는 노즐 출구에서의 속도 분포를 나타낸 것이다. 속도의 크기차이를 비교하기 위해 고도 20 km 조건에서의 최대 출구속도로 나누어 표시하였다. 고도 20 km에서 해수면보다 전 노즐 출구 영역에서 속도가 크다. 특히 박리가 발생하는 영역인 0.8 ~ 1.0 부분은 고도 20 km에서 해수면 보다 속도가 두드러지게 큰 것을 알 수 있다. 또한 박리 유동으로 인해서 외기유동의 유입으로 해수면 조건에서는 속도가 음수가 나타난다. 0.5 ~ 0.7 부분은 핀틀의 팁에서 발생하는 립 섯(lip shock)의 영향을 받는 영역이다. 두 고도 조건에서 연소실 압력이 같으므로 핀틀 팁에서

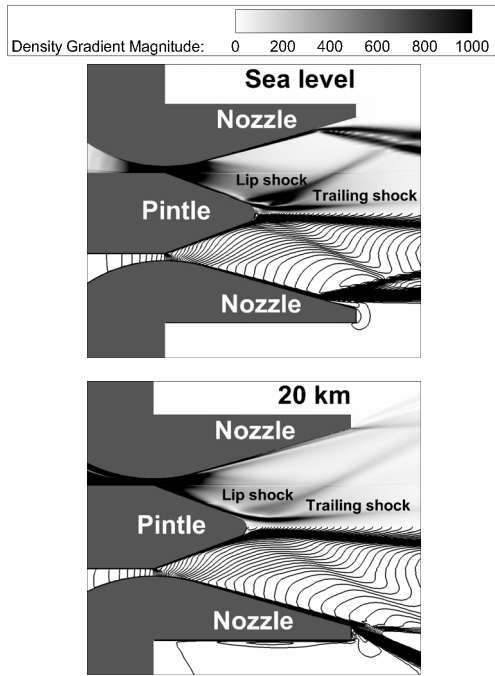


Fig. 6 Density gradient contour at operating altitude.

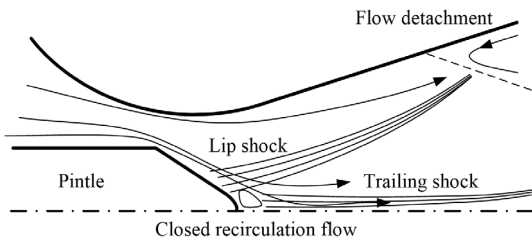


Fig. 7 Flow structures in the pintle nozzle.

발생하는 충격파의 강도가 동일하지만 노즐내에서 발생하는 압축파의 유무로 속도의 차이가 발생한다(Fig. 6, 7).

4.5 핀틀 위치와 고도에 따른 추력 변화

고도가 상승하게 되면 외기 압력이 감소하면서 노즐 출구 벽면에서 발생하는 박리 현상이 사라져 추력은 증가한다. 또한 일정 고도 이상(최대 팽창 외기 압력보다 낮아지게 될 경우)에서 추력은 일정하게 고정되며 40 km 이상에서 추력이 일정하게 유지되는 것을 확인 할 수 있다(Fig. 8).

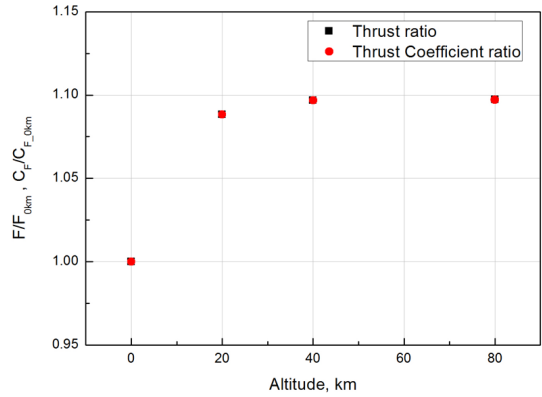


Fig. 8 Thrust ratio and Thrust coefficient ratio at various operating altitudes.

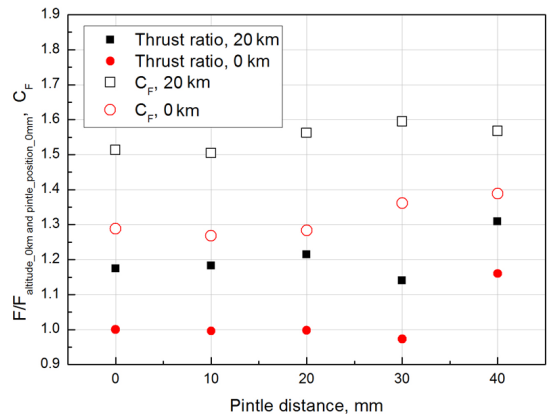


Fig. 9 Thrust ratio and Thrust coefficient ratio to pintle position at various operating altitudes.

Fig. 9는 해수면조건에서 핀틀의 초기 위치(0 mm)에서의 추력을 기준으로 각 고도, 핀틀 위치에서의 상대적인 추력 크기와 각각의 추력 계수를 나타낸 결과이다. 해수면보다 고도 20 km 위치의 추력이 전체적으로 15% 정도 높게 나타났으며, 두 조건 모두 30 mm 위치에서 추력이 감소하는 모습을 보인다. 이는 핀틀 위치 30 mm에서 노즐 내부에서는 박리유동이 발생하며, 추력의 유효면적(effective area)이 감소하면서 추력이 감소하기 때문이다. 핀틀 30 mm 위치에서 추력은 감소하지만 추력계수는 증가하는 모습을 보이는데, 이는 절대적 추력 크기의 감소(2% 감소), 챔버 압력의 상승(39% 상승)보다 노즐 목이

감소 폭(44% 축소)이 크기 때문이다. 이후 40 mm에서는 챔버 압력 상승으로 모멘텀이 증가하고, 이로 인해 박리영역이 감소하여 전체적인 추력이 상승한다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 관통형 핀틀 노즐의 작동고도에 따른 추력 특성을 분석하였다. 작동고도는 0, 20, 40, 80 km의 4가지를 고려하였으며 해수면 조건의 노즐 압력분포는 실험과 비교, 검증하였다. 해수면에서는 노즐에서 박리 유동이 발생하며 그로 인해 외기유동이 노즐에 유입된다. 작동고도가 증가하면 외기의 압력이 감소하여 노즐에서의 박리특성이 사라진다. 추력은 모멘텀항과 압력항으로 구분하여 작동 고도에 따른 특성을 분석하였다. 박리가 발생하는 해수면의 경우 외기의 유입으로 인해 추력의 압력항이 음수를 나타내며 작동고도가 증가하면 박리가 사라지면서 추력의 압력항이 양수를 나타낸다. 박리의 유무에 따라 노즐 출구에서의 압력, 밀도, 속도가 변하게 되며 고도가 증가하면 추력의 모멘텀항과 압력항의 증가로 해수면보다 작동고도가 20 km 증가하면 추력은 8.8% 증가한다. 40 km 이상에서는 해면보다 추력이 9.7% 증가하지만 노즐내 유동은 변화 없으므로 추력의 모멘텀항 변화는 없으며, 대기는 희박영역으로 압력의 변화가 거의 없으므로 추력의 압력항 변화도 무시할 수 있는 수준이다.

## 후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원(UD140023GD)으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

1. Kim, J.K. and Lee, Y.W., "The Study on Determination Method of Initial Optimal Nozzle Expansion Ratio in Pintle Solid Rocket Motor," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Science*, Vol. 39, No. 8, pp. 744-749, 2011.
2. Coon, J. and Yasuhara, W., "Solid Propulsion Approaches For Terminal Steering," *AIAA SDIO Interceptor Technology Conference*, AIAA 93-2641, 1993.
3. Dumortier, A., "Hot-gas Valve Development Using a Simple Numeric Code," *30th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, AIAA 94-3158, 1994.
4. Lafond, A., "Numerical Simulation of the Flowfield inside a Hot Gas Valve," *37th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, AIAA 99-1087, 1999.
5. Juan, L., Zhanli, W. and Kai, Z., "Numerical analysis on dynamic response characteristics of pintle-controlled solid rocket motor," *Journal of Solid Rocket Technology*, Vol. 32, No. 1, pp. 48-52, 2009.
6. Kim, J.G., "Study on the Effects of Pintle Shapes and Position in Nozzle Flowfield, and Thrust in a Solid Rocket Motor with Pintle Nozzle," Ph.D. Dissertation, Dep. of Mechanical Design Engineering, Chungnam National Univ., Daejeon, Korea, 2011.
7. Park, H.J., Kim, L.N., Heo, J.Y., Sung, H.G. and Yang, J.S., "Numerical Study on Dynamic Characteristics of Pintle Nozzle for Variant Thrust: Part 1," *37th The Korean Society of Propulsion Engineers Fall Conference*, Busan, Korea, Nov. 2011.
8. Heo, J.Y., Kim, K.W., Sung, H.G. and Yang, J.S., "Numerical Study on Dynamic Characteristics of Pintle Nozzle for Variant Thrust: Part 2," *38th The Korean Society of Propulsion Engineers Spring Conference*, Kumoh Univ., Korea, May. 2012.
9. Heo, J.Y., Jeong, K.Y. and Sung, H.G.,

1. Kim, J.K. and Lee, Y.W., "The Study on



- "Numerical Study on Dynamic Characteristics of Pintle Nozzle for Variant Thrust: Part 3," 40<sup>th</sup> *The Korean Society of Propulsion Engineers Spring Conference*, Busan, Korea, May. 2013.
10. Heo, J. Y., Jeong, K. Y. and Sung, H. G., "Numerical Study fo the Dynamic Characteristics of Pintle Nozzles for Variable Thrust," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 31, No. 1, pp. 230-237, 2015.
  11. Heo, J.Y., Jung, J.Y., Sung, H.G., Yang, J.S. and Lee, J.H., "Compressibility Correction Effects of Two-equation Turbulence Models for a Supersonic Through-type Pintle Nozzle with Large Scale Separation Flow," *Journal of The Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 17, No. 1, pp. 66-69, 2013.
  12. Menter, F.R., "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Application," *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 8, pp 1598-1605, 1994.
  13. Yang, Z. and Shih, T.H., "New Time Scale Based k- $\epsilon$  Model for Near-Wall Turbulence," *AIAA Journal*, Vol. 31, No. 7, pp. 1191-1197, 1993.
  14. Sarkar, S., Erlebacher, B., Hussaini, M. and Kreiss, H., "The Analysis and Modeling of Dilatational Terms in Compressible Turbulence," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 227, pp. 473-493, 1991.
  15. Wilcox, D.C. and Traci, R.M., "A Complete Model of Turbulence," *AIAA Paper 76-351*, San Diego, C.A., U.S.A., pp. 30, 1976.
  16. Venkateswaran, S., Li, D. and Merkle, C.L., "Influence of Stagnation Ragions on Preconditioned Solutions at Low Speeds," *Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, AIAA 2003-435, 2003.