

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(12), 1071-1078(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.12.1071

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

노즐 목 외부형 핀틀추력기의 추력특성에 대한 수치해석 연구

최준섭\*, 김동연\*, 허환일\*\*

Numerical Study on Thrust Characteristics of an External Pintle Thruster

Junsub Choi\*, Dongyeon Kim\* and Hwanil Huh\*\*

Department of Aerospace Engineering, Graduate School at Chungnam National University\*

Department of Aerospace Engineering, Chungnam National University\*\*

ABSTRACT

Numerical computations were performed to investigate the effects of pintle stroke, altitude, and bore on the performance of an external pintle thruster. Results show that under-expansion flow occurs always, independent of pintle stroke. An external pintle thruster shows good performance in that it is capable of good amount of thrust control, while aerodynamic loads are increased due to shock waves on the pintle support. When altitude is increased to 20 km, the nozzle exit velocity, Mach number, thrust as well as aerodynamic loads are increased. Bore increases aerodynamic load 5.9%, and therefore pintle shape without bore is preferred for lower aerodynamic load of a pintle in order to actuate the pintle.

초 록

외부형 핀틀추력기의 핀틀 행정거리, 고도, 보어유무가 핀틀추력기 성능에 미치는 영향에 대해서 전산수치해석을 수행하였다. 유동은 핀틀 행정거리에 관계없이 항상 과소팽창하는 결과를 보였다. 핀틀추력기의 주요 성능 지표 중 추력조절측면에서는 우수한 성능을 보였지만, 핀틀 지지대 윗면에서 발생한 충격파로 인해 공력하중이 증가하였다. 지상에서 고도 20 km로 상승하면 노즐 출구 속도, 마하수, 추력 등이 증가하였으며, 공력하중 또한 증가하였다. 보어의 존재는 공력하중을 5.9% 증가시켜 핀틀의 구동력을 위해서는 보어가 없는 형상이 유리하다고 판단된다.

**Key Words** : External Pintle Thruster(외부형 핀틀추력기), Pintle Stroke(핀틀 행정거리), Thrust(추력), Aerodynamic Load(공력하중)

1. 서 론

최근 국방 및 우주개발 분야의 기술 향상으로 정밀한 추력 조절 기능을 가진 고추력 추진기관

이 요구되고 있다. 국방 분야에서는 비행 궤적과 자세를 제어하기 위하여 그 필요성이 있으며, 우주개발 분야에서는 행성탐사를 위한 탐사선 및 착륙선의 정밀한 자세제어 및 추력조절이 가능한

† Received : October 30, 2015    Revised : November 18, 2015    Accepted : November 18, 2015

\*\* Corresponding author, E-mail : hwanil@cnu.ac.kr

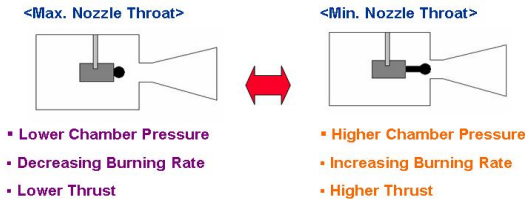


Fig. 1. Operating concept of pintle thruster[2]

추력 발생 장치를 요구하고 있다. DACS(Divert and Attitude Control System)는 대탄도탄 유도 미사일의 요격 비행체(Kill Vehicle, KV)에 탑재되는 핵심 서브시스템으로 KV의 궤도천이 및 비행 자세를 제어하는 기능을 담당한다. 특히 최근 개발이 이루어지고 있는 대탄도탄 유도미사일(Anti Ballistic Missile)의 경우 공기가 희박한 대기권, 또는 외기권에서 작동하여 공력을 이용한 궤도 수정이 어렵고, 요격을 위한 종말 단계에서는 큰 운동에너지가 필요하기 때문에 별도의 추력 발생 장치가 요구된다. DACS는 일반적으로 무게 중심이 위치한 평면상에 4개의 궤도천이용 추력기(Divert Control System, DCS)가 장착되어 있고, 후단에는 6개의 자세제어용 추력기(Attitude Control System, ACS)가 장착되어 있는 것이 일반적이다[1].

DCS는 고체 추진체의 연소가스가 유입되어 노즐을 통해 흐르고, 추력기와 노즐 내부에 핀틀이라는 구조물이 구동기에 의해 구동하면서 배기되는 연소가스의 유량 및 연소기 내부압력을 조절하여 추력을 조절한다. 그리고 비행체를 운용하면서 고도에 따라 성능이 변하게 되어 빠른 제어가 필요하기 때문에 짧은 핀틀의 행정거리에도 추력 조절 성능이 좋아야 하며, 제어에 대한 반응속도가 빨라야 한다. 이러한 핀틀추력기의 작동 개념은 Fig. 1과 같다[2].

고체 추진시스템에서의 연소실내의 압력은 식 (1)과 같으며, 추력은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다[3].

$$P_c = \left( \frac{a\rho_p A_b c^*}{A_t} \right)^{\frac{1}{(1-n)}} \quad (1)$$

$$F = C_F P_c A_t \quad (2)$$

챔버 압력의 경우 노즐 목 면적비분에 1/(1-n)의 자승에 비례하여 노즐 목 면적의 감소율에 비하여 연소실 압력 증가가 더 크게 되므로 추력의 상승을 가져오게 된다. 따라서 Fig. 1과 같이 핀

틀이 노즐 목에서 멀어지면 챔버 압력이 감소하여 연소속도 및 추력이 감소하게 되고, 노즐 목에 가까워지면 반대의 현상이 발생한다.

기존의 DACS 기술 연구에서는 핀틀이 노즐의 수축부에서 노즐 목 면적을 조절하는 내부형 핀틀추력기에 대한 연구가 국방과학연구소[4], 충남대학교[5], 한국항공대학교[6] 등을 중심으로 진행이 되었다. 하지만 본 논문에서와 같이 핀틀이 노즐 팽창부에서 노즐 목 면적을 조절하는 외부형 핀틀추력기에 대한 연구를 국내에서는 충남대학교[7]에서 시작단계에 있으며, 타 기관에서는 아직 진행된 바가 없다. 외국에서는 외부형 핀틀추력기와 유사한 형태의 E-D Nozzle(Expansion-Deflection Nozzle)[8]에 대한 연구는 진행되었지만, E-D 노즐은 노즐 목 면적을 조절할 수 없다는 점에서 차이점이 있다.

본 논문에서는 외부형 핀틀추력기에 대해 핀틀의 행정거리에 따른 추력성능 변화와 고도 및 보어(Bore) 유무에 따른 특성을 전산수치해석을 이용하여 수행하였다.

## II. 수치해석 모델 및 조건

### 2.1 외부형 핀틀추력기 모델선정

본 논문에서는 외부형 핀틀 형상이 추력 변화 특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Fig. 2의 Aerojet사의 외부형 핀틀의 특허 모델[9]을 기준으로 모델링하여 해석을 수행하였다.

특허의 핀틀추력기 특징은 핀틀의 위치를 조절함으로써 추력기의 노즐 목 면적이 변화되고, 모터의 질량유량이 변화되어 추력을 조절하는 것이다. 하나의 핀틀추력기를 가진 로켓 모터는 노

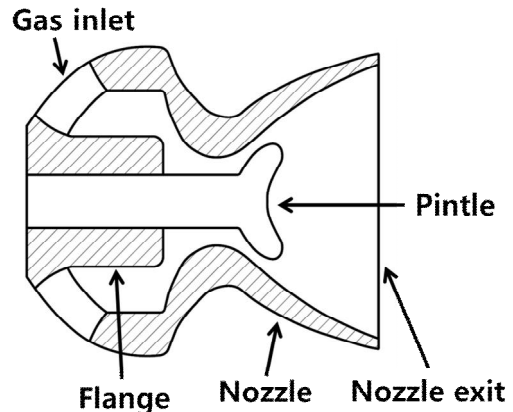


Fig. 2. Schematic of Aerojet pintle model[9]

즐 목 면적이 줄어들면 추력이 증가한다. 하지만 여러 개의 핀틀추력기를 가진 모터의 경우 노즐 목 면적이 줄어든 추력기의 추력은 감소하지만, 목 면적이 늘어난 추력기의 추력은 증가하는 특성을 지닌다. 본 논문에서는 하나의 추력기만을 가정하여 질량유량이 일정하게 공급될 때 챔버의 압력과 추력특성의 변화를 살펴보았다.

### 2.2 수치해석 조건

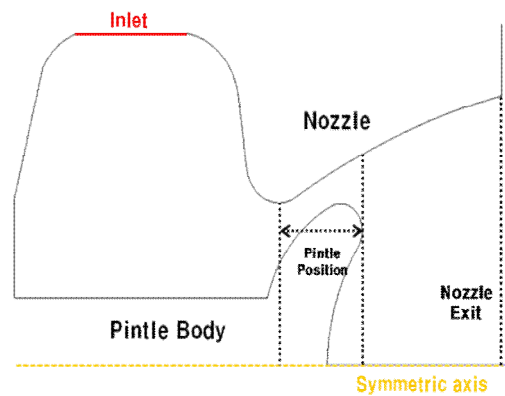
외부형 핀틀추력기의 수치해석을 위한 조건은 Table 1과 같다.

전산수치해석은 유한체적법을 기반으로 하는 Ansys사의 Fluent 15.0 버전의 상용코드를 사용하였다. 경계조건으로는 Mass flow inlet, Pressure far field 조건으로 설정하였고, Pressure far field의 크기는 노즐 출구 직경을 기준으로 가로 150배, 세로 30배로 구성하였다. 챔버 입구에서 2,700 K의 연소가스가 질량유량 5.5 kg/s로 유입된다. 외부 압력은 해수면 고도에서 1 atm으로 설정하였고, 고도 20 km에서 5,688 Pa로 설정하였다. 이때의 온도는 각각 300 K, 220 K이다. 수치해석을 위한 난류모델은 국내 선행연구[7,10]를 바탕으로 RANS(Raynolds Averaged Navier Stokes) 방정식의 Spalart-Allmaras 모델을 사용하였다.

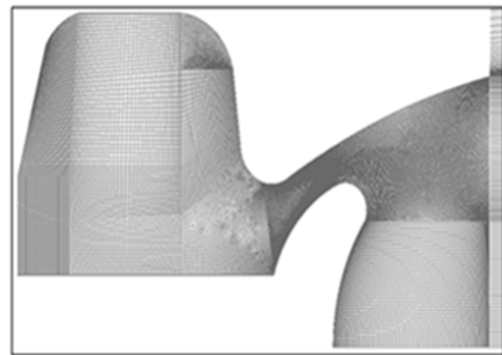
Figure 3(a)는 핀틀추력기의 개략도로서 5.5 kg/s의 질량유량이 유입되는 inlet과 pintle body, nozzle로 구성되어 있다. 수치해석을 위해 축대칭조건을 적용하였다. 격자생성은 Gambit 2.4.6 버전을 이용하여 Fig. 3(b)와 같이 생성하였다. 격자는 대부분 사각 정렬격자를 사용하였으나, 핀틀의 곡면형상과 노즐 팽창부의 형상으로 인해 인접한 부분에서는 삼각격자를 사용하였다. 격자의 수는 핀틀의 행정거리에 따라 약 90,000 ~ 120,000개로 차이가 있지만, 모든 행정거리에서  $Y^+$  값은 1이하이다.

Table 1. CFD analysis conditions

Pre-Processing	CATIA V5/Gambit 2.4.6
Solver	Fluent 15.0
Working Fluid	Hot gas
Inlet condition	Mass flow rate= 5.5 kg/s
Wall condition	$Y^+ < 1$
Turbulent model	Spalart-Allmaras
Far-Field distance	x/de=150, y/de=30
Number of grids	Approx. 90,000~120,000



(a) Schematic of external pintle thruster



(b) Computational mesh for external pintle thruster

Fig. 3. Modeling of external pintle thruster

### 2.3 핀틀 행정거리(Pintle stroke) 정의

핀틀의 위치는 Fig. 3(a)에서 나타난 것처럼 노즐 목에서 핀틀 끝단까지의 거리를 말한다. 노즐 목에서부터 핀틀 끝단까지의 거리가 12.5 mm인 지점에서 이론적으로 이상팽창이며, 이때의 팽창비는 3.30이다. 이론적으로 이상팽창일 때를 행정거리 2로 정의하였는데, 이는 선행연구[11]의 노즐 목 내부형 핀틀추력기의 행정거리와 동일하게 정의하기 위함이다. 본 논문에서는 Table 2와 같이 5가지의 행정거리에 대해 수치해석을 수행하였다.

Table 2. Definition of pintle stroke and pintle tip position

Pintle stroke [mm]	1	2	3	4	5
Pintle tip position [mm]	13.5	12.5	11.5	10.5	9.5
Expansion ratio	2.98	3.30	3.73	4.28	5.02

### III. 수치해석 결과

#### 3.1 행정거리에 따른 특성

외부형 핀틀추력기의 핀틀 행정거리에 따른 밀도구배와 유선(stream line)을 Fig. 4로 나타내었다.

외부형 핀틀추력기는 핀틀 끝단이 노즐 팽창부에 위치하고 있어서 노즐 목을 지난 유동이 흘러 나가는 노즐 팽창부의 길이가 짧아 행정거리 전체 구간에서 과소 팽창함을 알 수 있다. 핀틀 끝단이 후향 계단 유동과 같은 작용을 하여 재순환영역이 생성되는데, 내부형 핀틀추력기[7]에 비해 그 크기가 크고 노즐 출구 이후까지 발달하고 있다. 크게 발달된 재순환영역은 주유동의 흐름에 벽면처럼 작용하기 때문에 실제 노즐 출구 면적을 감소시켜 팽창비가 감소하는 결과를 가져온다. 하지만 모든 핀틀 행정거리에서 재순환영역의 크기가 일정하여 행정거리 증가에 따라 팽창비가 증가하는 결과를 가져온다. 따라서 행정거리가 증가함에 따라 추력이 증가하는 경향에는

영향을 미치지 않는다.

Figure 4(a)에서 밀도구배를 보면 핀틀 지지대 윗면(A 지점)에서 충격파가 발생하였는데, 행정거리가 증가할수록 충격파의 크기가 감소하였다. 이 충격파가 노즐 벽면까지 영향을 미치면서 박리 거품(separation bubble)이 발생하였고, 반사 충격파(reflected shock)이 발생하였다. 이것은 핀틀에 작용하는 공력하중의 증가를 야기하였다.

외부형 핀틀의 형상은 노즐에서 유동의 흐름을 방해하기 때문에 압력 상승으로 인해 공력하중이 증가하며, 핀틀 행정거리가 증가할수록 크게 작용한다. 전술한 바와 같이 Fig. 5를 보면 핀틀 윗면에서 충격파가 발생하여 압력이 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이는 외부형 핀틀이 노즐 목 이후까지 이어지면서 노즐 수축부의 길이를 늘리는 효과와 더불어 급격하게 유동의 방향이 바뀌기 때문으로 판단된다. 핀틀에서 생성된 충격파로 인해 Fig. 6에서처럼 노즐 벽면 압력이 상승하였고, 이후 핀틀을 지난 유동은 팽창하는 것을 알 수 있다.

Figure 7은 핀틀 행정거리에 따라 노즐 목 면

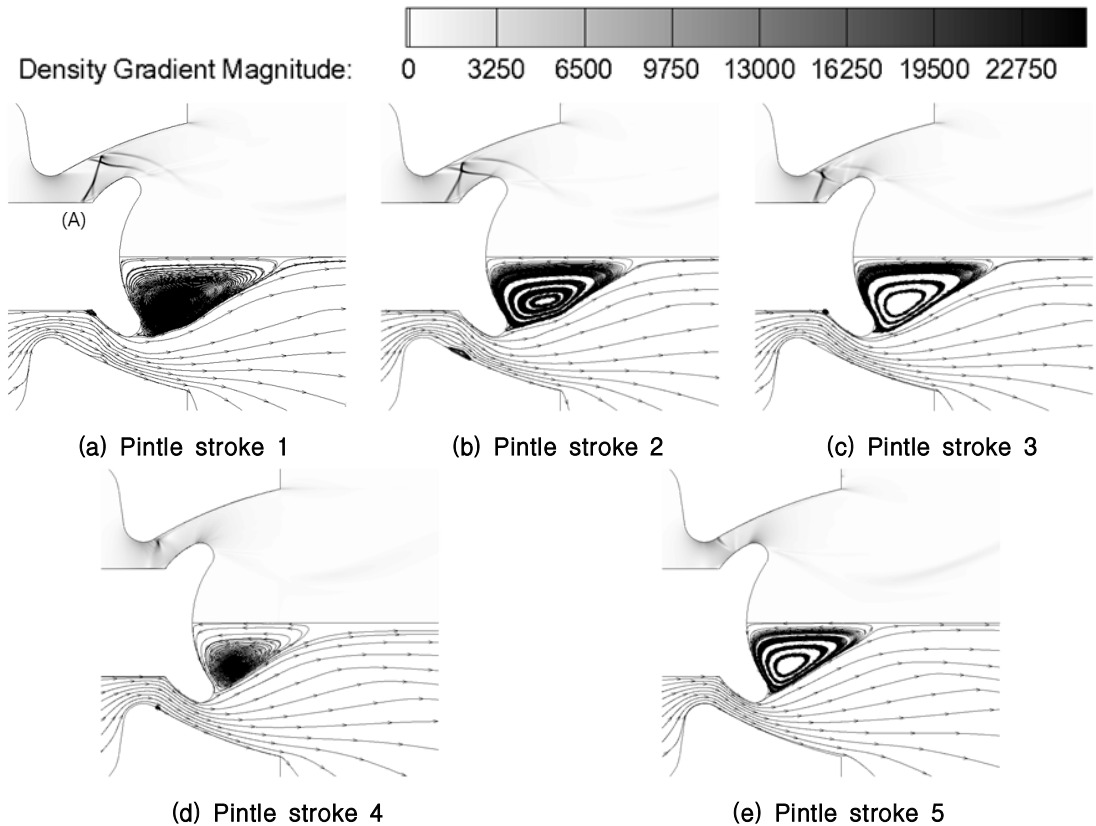


Fig. 4. Density gradient contours(top) and stream lines(bottom) according to pintle stroke

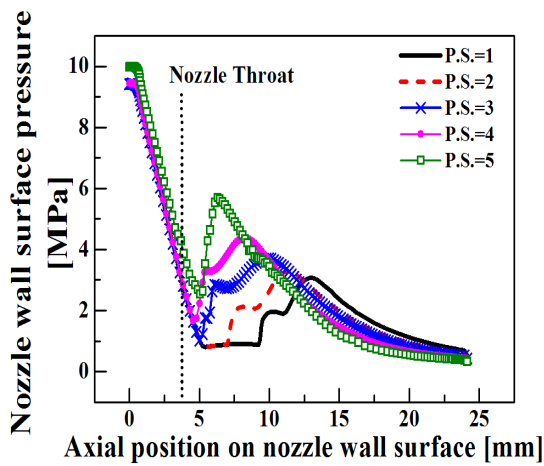


Fig. 5. Pressure distribution on nozzle wall according to pintle stroke[11]

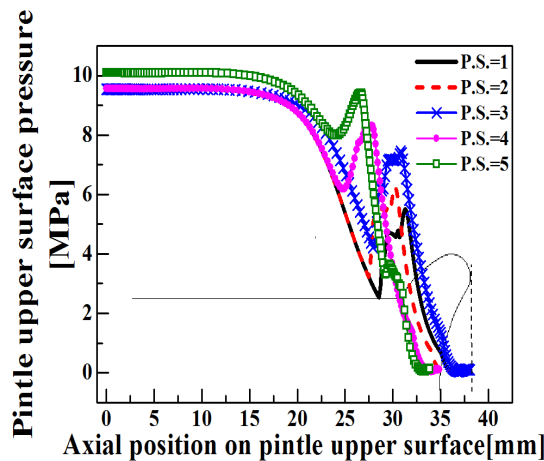


Fig. 6. Pressure distribution on external pintle upper surface[11]

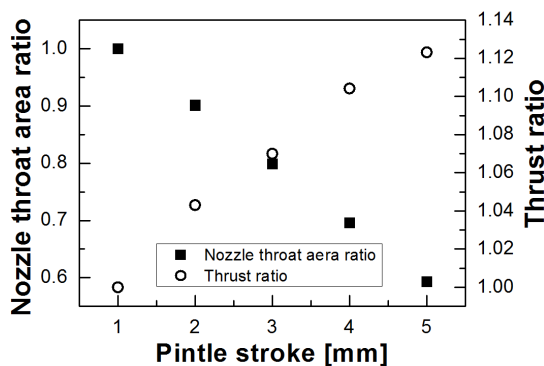


Fig. 7. Comparison of nozzle throat area ratio with thrust ratio

적비와 추력비를 비교한 것이다. 노즐 목 면적비와 추력비 모두 핀틀 행정거리가 1 mm일 때를 기준으로 나타내었다. 추력은 운동량 보존법칙을 적용한 식 (3)에 수치해석을 통해 얻은 노즐출구 속도, 노즐출구압력 등을 대입하여 계산하였다.

$$F = \dot{m}u_e + (P_e - P_a)A_e \quad (3)$$

노즐 목 면적비는 핀틀 행정거리가 증가함에 따라 선형적으로 감소하는 결과를 보이고 있다. 핀틀 행정거리가 증가하여 노즐 목 면적이 감소함에 따라 추력은 증가하였다. 추력비는 핀틀 행정거리 1, 2 mm 사이의 변화폭과 4, 5 mm 사이의 변화폭에 차이가 발생하였다. 이는 앞서 기술한 바와 같이 핀틀 지지대 윗면에서 발생한 충격파와 이 충격파가 노즐 벽면에 미치는 영향으로 인해 발생한 것으로 판단되지만, 그 차이는 크지 않다.

### 3.2 고도에 따른 특성

고도에 따른 특성을 확인하기 위해 설계상 이상팽창조건인 핀틀 행정거리 2 mm에서 고도 0 km와 20 km에서 해석결과를 비교하였고, 그 결과는 Fig. 8과 같다.

Figure 4의 핀틀 행정거리의 결과에서처럼 핀틀 뒷면에서 재순환영역으로 인해 노즐 출구 면적이 감소하였고, 고도에 관계없이 과소팽창하는 결과를 얻었다. 또한 핀틀 돌출부의 형상으로 인해 충격파가 발생하였지만, 고도에 따라 박리 거품의 크기 등에 차이가 발생하였다.

고도에 따른 성능을 Table 3에 비교하여 나타내었다. 고도 20 km에서 노즐 출구속도, 마하수, 추력이 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 이는 고도 보정 노즐로 연구되고 있는 E-D 노즐의 특성과 마찬가지로 저고도에서 성능의 저하가 발생하지 않는 것으로 판단된다. 하지만 핀틀에 작용하는 공력하중의 증가는 핀틀을 구동함에 있어 구동력과 구조적인 문제를 발생시킬 수 있어 추가 연구가 필요하다.

Figure 9는 고도에 따른 노즐 목의 특성을 나타낸 것이다. 형상설계 시 기하학적 팽창비는 3.30의 동일한 조건이며, 이때의 노즐 목은 점선으로 표시한 위치이다. 수치해석결과를 통해 마하수가 1이 되어 유동질식이 발생하는 해석상 노즐 목을 보면 설계상 노즐 목 보다 상류쪽의 핀틀 지지대에서 발생하였으며, 고도에 따라 해석상 노즐 목은 유사한 결과를 보였다. 이는 노즐 목을 지난 유동이 핀틀의 돌출부 형상을 지나면서 충격파가 발생하는 원인이 된다.

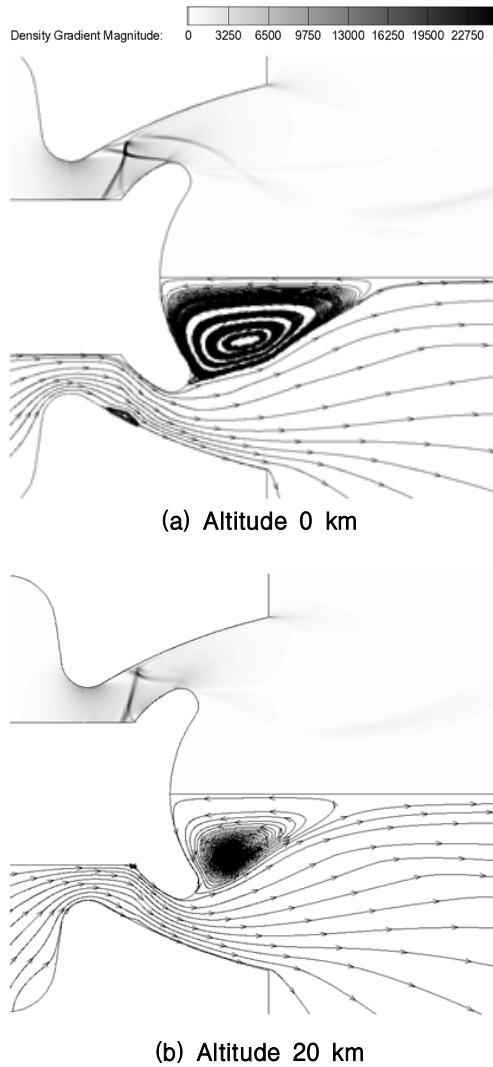


Fig. 8. Density gradient contours for altitude (a) 0 km and (b) 20 km

Table 3. Thruster performance according to altitude[12]

Altitude [km]	0	20
Pe [MPa]	1.40	1.40
Ve [m/s]	1,668	1,770
Me	2.11	2.20
Aerodynamic load [N]	2,910	3,013
Thrust [N]	10,798	11,487

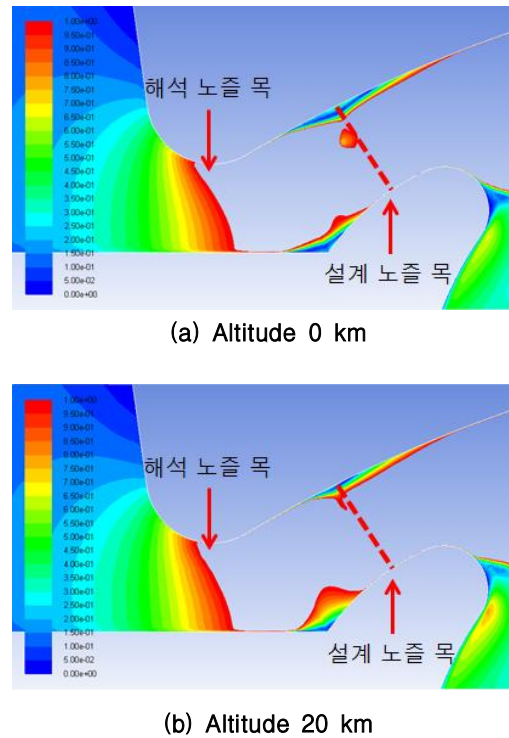


Fig. 9. Mach number contours according to altitude

Figure 10은 고도에 따른 노즐 벽면에서의 압력분포를 나타낸 것이고, Fig. 11은 고도에 따라 핀틀 뒷면에 작용하는 압력분포를 나타낸 것이다.

Figure 10, 11에서 노즐 목 상류의 압력은 고도에 따라 유사한 결과를 보이고 있다. Fig. 10의 노즐 벽면에서의 압력분포를 보면 노즐 목 이후 팽창부에서 압력이 감소하지 않고, 핀틀 뒷면에서 발생한 충격파의 영향으로 압력이 상승하는 것을 알 수 있다. 특히 고도 0 km에서 충격파로 인해 압력이 상승하는 구간이 넓어 충격파가 미치는 영향이 낮은 고도일 때 더 크다는 것을 알 수 있다. 박리거품을 지난 유동은 팽창부를 따라 흐르며 고도에 관계없이 유사한 경향을 보이고 있다. 이것은 E-D 노즐과 마찬가지로 핀틀 뒷면의 재순환영역이 외부압력에 따라 크기가 달라지면서 실제 유동이 흐르게 되는 노즐 출구 면적의 차이로 인한 결과로 판단된다.

Figure 11의 핀틀 뒷면의 압력분포를 보면 핀틀이 돌출되는 형상으로 인해 유동이 정체되고, 충격파가 발생하여 압력이 상승하는 결과를 확인할 수 있다. 핀틀 뒷면에 작용하는 압력은 고도에 따라 유사한 경향을 보이고 있지만, 핀틀에 작용하는 공력하중 감소 및 핀틀 돌출부에서 유



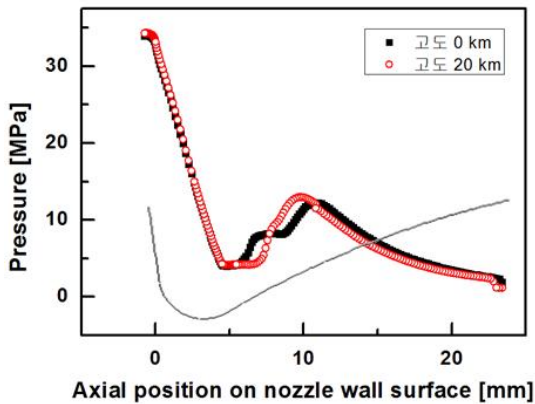


Fig. 10. Pressure distribution on nozzle wall according to altitude

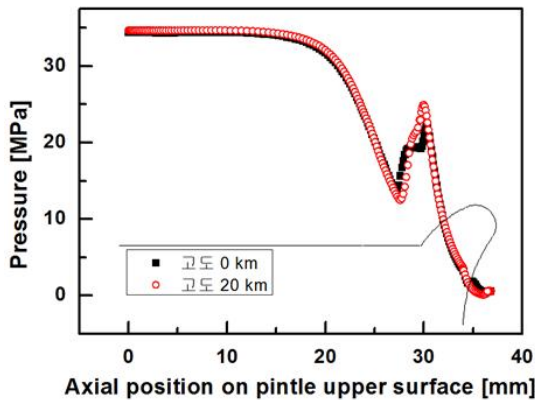


Fig. 11. Pressure distribution on pintle upper surface according to altitude

동질식이 발생하도록 하는 형상에 대한 연구가 필요하다.

### 3.3 보어 유무에 따른 특성

보어(Bore)는 Fig. 12의 (a)와 같이 핀틀 중심축을 관통하는 구멍을 말한다. 행정거리 2의 핀틀 위치에서 보어를 추가하였고, 수치해석 조건은 동일하게 진행하였다.

Figure 12의 (a)와 (b)를 보면 보어 유무에 관계없이 핀틀 뒷면을 흐르는 유동은 유사함을 알 수 있다. 이것은 보어의 존재가 주유동에는 직접적인 영향을 미치지 않기 때문이다. 보어가 주유동에는 영향을 미치지 않기 때문에 핀틀의 돌출부에 작용하는 압력은 유사하다. 하지만 핀틀 뒷면의 재순환영역이 영향을 미치는 면적은 보어가 있을 때 감소하게 된다. 외부형 핀틀추력기는 주유동의 영향으로 공력하중의 힘의 방향이 노즐

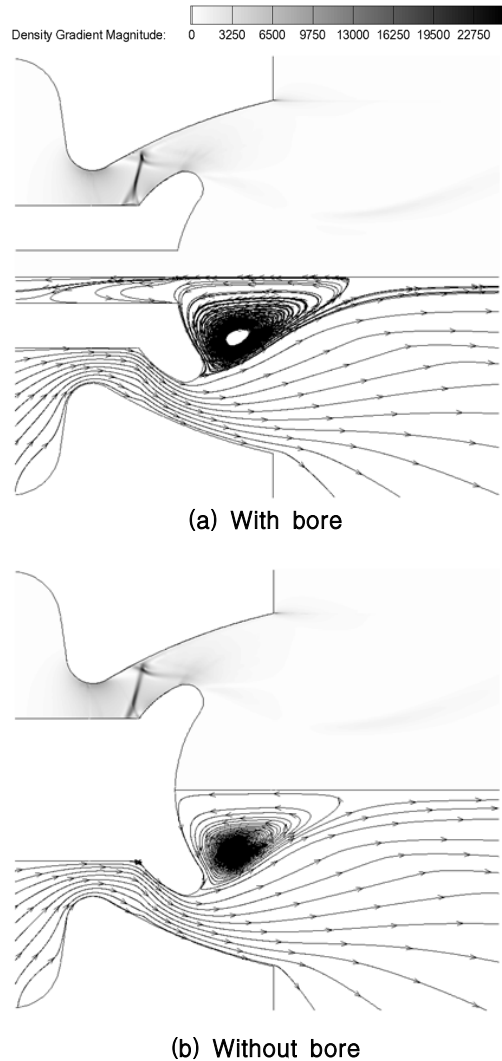


Fig. 12. Density gradient contours for pintle stroke 2 mm bore effects

출구쪽으로 향하게 된다. 이때 핀틀 뒷면에서 생성된 재순환영역이 노즐 목 방향으로 영향을 미쳐 핀틀 전체의 공력하중을 감소시키는 결과를 가져온다. 보어가 있는 경우 핀틀 뒷면에서 재순환영역이 영향을 미치는 면적의 감소로 인해 핀틀 돌출부에 작용하는 힘을 상쇄시키는 힘이 감소하게 된다. 그 결과 핀틀에 보어가 존재하는 경우에는 보어가 없는 경우보다 공력하중이 5.9% 증가하였다[13]. 핀틀에 작용하는 공력하중이 낮을수록 핀틀을 구동하기 위한 구동력이 작아져 유리한데, 외부형 핀틀추력기는 공력하중 측면에서 보어가 없는 경우가 유리하다.

추력의 관점에서 보면 보어는 앞에서 기술한

바와 같이 주유동에는 영향을 미치지 않는다. 또한 보어는 연소가스를 배출하는 구조가 아니기 때문에 노즐을 통해 배출되는 질량유량에도 영향을 미치지 않는다. 추력 결과 값은 보어가 있을 때 11,797 N이고, 보어가 없을 때 11,928 N이다. 보어가 있는 경우에 추력이 낮은 결과를 보였지만, 그 차이는 약 1% 정도로 작기 때문에 보어가 추력에는 영향을 미치지 않는다고 판단된다.

#### IV. 결 론

Aerojet사 특허 모델의 외부형 핀틀추력기를 모델링하여 핀틀 행정거리와 고도 및 보어 유무에 따른 성능을 살펴보기 위해 전산수치해석을 수행하였다. 본 논문에서는 외부 자유류를 고려하지 않은 조건으로 수치해석을 수행하였는데, 핀틀의 행정거리에 따른 추력 및 핀틀에 작용하는 공력하중에는 외부 자유류가 미치는 영향이 없을 것으로 판단된다.

핀틀이 노즐 팽창부에 위치하는 외부형 핀틀추력기는 노즐 팽창부의 길이가 짧아 유동이 과소 팽창하는 특성을 보였으며, 핀틀의 돌출된 형상이 유동의 흐름을 방해하여 공력하중이 증가하는 원인이 되었다. 핀틀 끝단이 노즐 목 외부에 위치하여 노즐 수축부의 길이가 증가하였고, 이로 인해 설계상 노즐 목 보다 상류쪽인 핀틀 지지대에서 노즐 목이 형성되었고, 충격파가 발생하였다. 충격파의 발생은 압력의 증가를 야기하고 행정거리가 증가할수록 공력하중이 증가하는 결과를 가져왔다.

고도에 따른 결과를 보면 고도 보정용 노즐인 E-D 노즐과 같이 추력성능의 저하가 없었으며, 저고도에서 충격파가 노즐 벽면에 작용하여 압력이 상승하는 구간이 증가하는 결과를 보였다. 보어 유무에 따른 결과에서는 보어가 있는 경우에 공력하중이 5.9% 증가하여 핀틀의 구동력을 위해서는 보어가 없는 형상이 유리하다고 판단된다.

#### 후 기

이 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음.

본 연구는 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 우주핵심기술개발사업 지원을 받아 수행된 것임(NRF-2014M1A3A3A02034776).

#### References

1) Kim, S. S. and Huh, H., "Recent Progress

in R&D and Prospect of Divert and Attitude Control System(DACS)", *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 16, No. 6, 2012, pp. 71-81.

2) Lee, J. H., Kim, J. K. and Jang, H. B., "A study on internal flow field of supersonic nozzle by needle type pintle position", *KSPE Fall Conference*, 2008, pp.269-272.

3) Humble, R. W., Henry, G. N. and Larson, W. J., *Space propulsion analysis and design*, McGraw-Hill, New York, U.S.A., 1995.

4) Lee, J. H., Kim, Y. C., Park, S. H., Lim, S. T., Oh, S. J., Won, J. W. and Yun, E. Y., "A Study on the performance of variable thrust rocket motor by the pintle nozzle", *KSPE Fall Conference*, 2012, pp. 367~370.

5) Lee, S. K. and Huh, H., "Effect of pintle shape on nozzle flow-pattern", *KSPE Fall Conference*, 2012, pp. 313~316.

6) Jeong, K. Y., Heo, J. Y., Sung, H. G., Yang, J. S. and Ha, D. S., "Thrust Characteristics of Through-type Pintle Nozzles with Large Scale Separation Flow", *KSPE Spring Conference*, 2014, pp. 32~38.

7) Choi, J. S. and Huh H., "Effect of Pintle Stroke on Internal/External Pintle Thrusters", *KSPE Fall Conference*, 2013, pp. 363~366.

8) US 6591603 B2, "Pintle Injector Rocket with Expansion-Deflection Nozzle", US Patent, 2003.7.

9) US 5456425 A, "Multiple Pintle Nozzle Propulsion Control System", US Patent, 1995.10.

10) Wang, S. W. and Huh, H., "Effect of Pintle Inflection Points on Performance of the SNECMA Modulatable Thrust Devices", *KSPE Fall Conference*, 2011, pp. 237~240.

11) Kim, D. Y., "CFD Simulation of a Nozzle Throat for Inside- and Outside-Type Pintle Thrusters", Master Dissertation, Chungnam National University, 2012.

12) Choi, J. S. and Huh, H., "Performance Estimation of the Altitude Compensating External Pintle Thruster", *KSAS Spring Conference*, 2015, pp.549~552.

13) Choi, J. S. and Huh, H., "Bore Effects on Aerodynamic Loads for External Type Pintle Thrusters", *KSPE Fall Conference*, 2014, pp.660~661.