

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(4), 311-317(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.4.311

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

## 1-D 시뮬레이션을 활용한 핀틀추력기의 성능해석 - II : 비정상상태 특성

노성현\*, 김지홍\*, 허환일\*\*

Performance Analysis of the Pintle Thruster Using 1-D  
Simulation - II : Unsteady State Characteristics

Seonghyeon Noh\*, Jihong Kim\* and Hwanil Huh\*\*

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

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

## ABSTRACT

This paper describes how to apply one-dimensional simulation to predict unsteady state characteristics of the cold-gas pintle thruster. Mass flow rate, chamber pressure, and nozzle exit pressure are key parameters for thrust control. Chamber pressure rose and fell monotonously with the pintle stroke variation, while thrust variation was different from chamber pressure variation. During the forward pintle stroke operation, the thrust value tended to decrease initially and returned to increase when pintle speed and chamber free volume exceed some specified value. Even though one-dimensional simulation has the limitations to predict unsteady state characteristics, it is still useful for initial performance assessment of various thrusters which adopt an altitude compensation nozzle such as a dual-bell nozzle, prior to experiment or numerical analysis.

## 초 록

본 연구는 공압시험용 핀틀추력기의 비정상상태 특성을 예측하기 위한 1-D 시뮬레이션 적용법을 기술한다. 추력을 제어하기 위해 질량유량, 챔버압력, 노즐출구 압력은 핵심 매개변수이다. 챔버압력은 핀틀 스트로크 변화에 따라 단조롭게 증감하였지만, 추력은 챔버 압력의 변화와 다른 양상을 보였다. 핀틀이 전진할 때 핀틀 속도와 챔버 자유체적이 특정 값을 초과하면 추력 값은 초기에 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였다. 1-D 시뮬레이션은 비정상 상태 특성을 예측하는데 한계가 있지만 실험이나 수치해석 이전에 듀얼벨 노즐과 같은 다양한 고도보정노즐 추력기의 초기 성능 평가에 여전히 유용하다.

**Key Words** : Pintle Thruster(핀틀추력기), One-dimensional Simulation(1-D 시뮬레이션), Unsteady State Characteristics(비정상상태 특성), Pintle Speed(핀틀 속도), Free Volume(자유체적)

† Received : March 6, 2015 Revised : March 19, 2015 Accepted : March 19, 2015

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

## I. 서 론

고체 추진기관은 짧은 시간에 큰 추력을 발생하기 때문에 미사일 등의 고속 비행체에 적합하다. 하지만 고체추진기관은 추진제 그레이의 형상에 따라 추력이 결정되기 때문에 추력조절이 불가능하다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 최근 고체추진기관에 핀틀 구조물을 삽입하여 구조물의 움직임을 통해 연소관 내부의 압력을 조절하여 추력조절을 용이하게 하는 핀틀 노즐 기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1,2,3].

국외에서는 핀틀추력기에 대한 연구가 일찍부터 시작되어 이미 높은 수준의 기술을 보유하고 있다. 미국의 Aerojet에서는 미사일 방어를 목적으로 핀틀추력기 개발을 수행하였으며[4], CFD Research Corporation에서는 고체 추진제를 이용한 핀틀 추력기의 설계와 제작을 통한 실험 연구를 진행하였다[5]. 프랑스의 Snecma Propulsion Solid에서는 탑재체의 ACS(Attitude Control System)의 용도로 핀틀추력기 연구를 수행하였고 [6] 실험을 통해 추력기 개발이 완료된 상황이다.

국내에서는 국방과학연구소에서 공압시험과 CFD를 이용한 핀틀 노즐의 정적/동적 특성 연구를 진행하였으며[7,8], 연소시험을 통한 성능분석 연구도 진행되었다[9]. 항공대학교에서는 이동격자기법을 고려한 가변 추력기용 핀틀 노즐의 CFD 연구를 통해 관통형 핀틀 노즐의 비정상상태 유동특성 및 추력특성에 대해서 연구한 바 있다[10]. 충남대학교에서는 핀틀의 보어 유무와 노즐 수축각에 따른 CFD 연구를 수행하였으며 [11,12], 공압시험을 통한 핀틀추력기의 정상상태와 비정상상태 연구가 진행된 바 있다[13,14].

본 연구에서는 일차원 이론을 적용한 1-D 시뮬레이션을 이용하여 공압시험용 핀틀추력기의 비정상상태 성능을 분석하였다. 본 연구의 1-D 시뮬레이션은 듀얼벨 노즐(dual-bell nozzle)등 다양한 노즐에 사용이 가능할 것으로 판단된다.

## II. 본 론

### 2.1 핀틀 형상 및 노즐목면적 계산

본 연구의 1-D 시뮬레이션에 적용된 핀틀추력기의 핀틀 형상은 충남대학교[13]에서 수행한 공압시험 모델로, Fig. 1과 같이 핀틀 끝단이 노즐목 위치에 있을 때를 스트로크 0 mm로 규정하

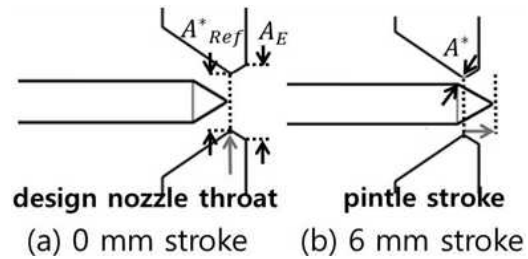


Fig. 1. Definition of pintle stroke

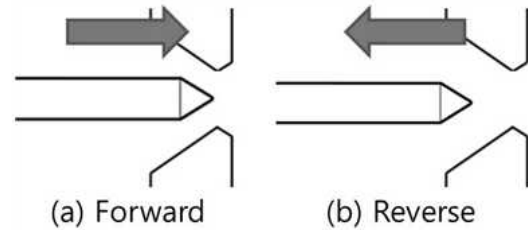


Fig. 2. Pintle nozzle operation

였다. Fig. 1의 (a)는 스트로크가 0 mm 위치에 있을 때의 핀틀 노즐 형상이며, Fig. 1의 (b)는 스트로크가 6 mm 위치에 있을 때 핀틀 노즐 형상이다.

또한 Fig. 2에서와 같이 핀틀이 우측으로 움직였을 때를 전진(forward stroke), 좌측으로 움직였을 때를 후진(reverse stroke)으로 규정하였다.

핀틀추력기는 핀틀이 움직일 때마다 기하학적 노즐목면적의 값이 달라진다. 핀틀추력기의 스트로크 변화에 따른 기하학적 노즐목면적은 핀틀 외각의 한 점과 노즐 외각의 한 점을 정하여 축대칭을 통해 회전하였을 경우 생기는 두개의 원사이 3차원 도넛형상의 면적 중에서 최소 면적인 값을 노즐목면적으로 규정하였다. 이렇게 계산된 핀틀 스트로크에 따른 기하학적 노즐목면적과 핀틀이 존재하지 않는 경우의 기하학적 노즐목면적

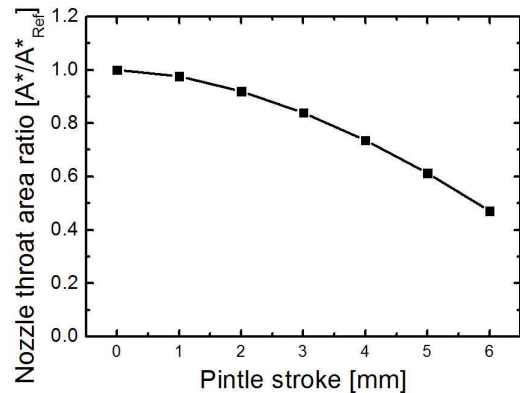


Fig. 3. Nozzle throat area ratio by pintle stroke

의 비( $A^*/A^*_{Ref}$ )가 어떻게 변하는지를 Fig. 3과 같이 나타내었다.

### 2.2 공압 시험

본 연구의 1-D 시뮬레이션은 충남대학교에서 수행한 핀틀추력기 실험모델을 기반으로 구성하였다. 충남대학교에서는 Fig. 4의 실험장치 구성으로 핀틀추력기 공압시험을 수행하였으며, 핀틀의 형상과 핀틀 이동거리에 따른 챔버압력과 추력을 실험을 통해 측정하였다[13].

Figure 5는 과거 공압시험을 통해 얻은 챔버압력 및 추력을 1-D 시뮬레이션을 통해 얻은 이론값과 비교한 것이다. 핀틀추력기는 노즐 내부의 유동흐름이 벨 노즐이나 콘 노즐과 같은 일반노즐에 비해 복잡해 추력값이 이론값과 차이가 나는 것으로 알려져 있는데[7], 본 연구에서도 Fig. 5와 같이 챔버압력에 비해 추력이 실험값과 이론값의 차이가 큰 것을 확인할 수 있다. 하지만 큰 오차 없이 스트로크에 따른 실험값과 이론값의 경향이 유사함을 확인할 수 있다.

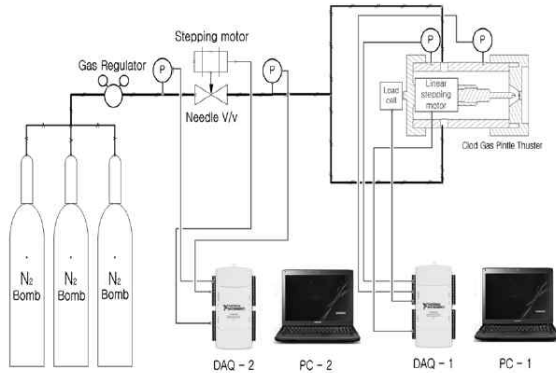


Fig. 4. Schematic of pintle thruster system[13]

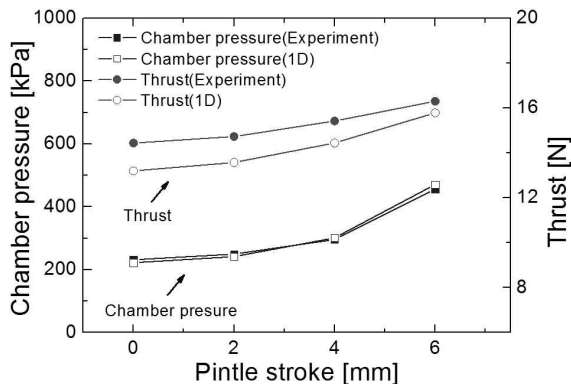


Fig. 5. Thrust and chamber pressure by pintle stroke

### 2.3 지배방정식

공압시험용 핀틀추력기 비정상상태 특성에 관한 1-D 시뮬레이션을 수행하기 위해서 식(1)~(5)와 같이 로켓 성능에 관련된 이론식과 관련 방정식을 사용하였다.

#### 2.3.1 노즐 팽창비

노즐출구 마하수는 노즐목과 노즐출구 면적의 영향을 받으며, 이 관계는 노즐 팽창비 관계식을 통해 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{A_E}{A^*} = \frac{1}{M_E} \left[ \frac{2}{\gamma+1} \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_E^2 \right) \right]^{\frac{1}{2} \left( \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \right)} \quad (1)$$

여기서  $A_E$ ,  $A^*$ ,  $M_E$ ,  $\gamma$ 는 각각 노즐출구 면적, 노즐목면적, 노즐출구 마하수, 비열비를 의미한다.

#### 2.3.2 등엔트로피 관계식

노즐에서의 압력은 식(2)와 같이 등엔트로피 관계식을 통해서 계산할 수 있다.

$$\frac{P_0}{P_E} = \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_E^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2)$$

여기서  $P_0$ ,  $P_E$ 는 각각 전압력, 노즐출구 압력을 의미한다.

#### 2.3.3 연속 방정식

고체추진기관에서는 추진제의 연소를 통한 그레인 형상변화로 챔버의 자유체적이 변하지만, 공압시험 모델에서는 연소가 발생하지 않아 챔버의 자유체적이 일정하다고 가정할 수 있다. 챔버로 유입되는 질량유량과 노즐로 배출되는 질량유량의 연속방정식은 식(3)과 같이 표현된다[15].

$$\frac{dP_c}{dt} = \frac{c^2}{V_{fv}} \left[ \dot{m}_{in} - C_D A^* P_c \sqrt{\frac{\gamma}{RT} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \right] \quad (3)$$

여기서  $\dot{m}_{in}$ ,  $P_c$ ,  $c$ ,  $V_{fv}$ ,  $C_D$ 는 각각 챔버로 유입되는 질량유량, 챔버압력, 음속, 자유체적, 노즐유량계수를 의미한다.

#### 2.3.4 질량유량

노즐 목에서 질식이 되는 조건을 만족하면 식(4)를 통해서 질량유량을 계산할 수 있다.

$$\dot{m}_{actual} = C_D A^* P_0 \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}} \quad (4)$$

여기서  $C_D$ ,  $T_0$ ,  $R$ 은 각각 노즐 유량계수, 전 온도, 특정기체상수를 의미한다.

### 2.3.5 추력

로켓 추진기관에서 이론 추력은 압력추력과 모멘텀추력의 합으로 식(5)와 같이 표현된다.

$$F = P_0 A^* \sqrt{\frac{2\gamma^2}{\gamma-1} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \left[1 - \left(\frac{P_E}{P_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]} + (P_E - P_A) A_E \quad (5)$$

여기서  $P_E$ ,  $P_A$ 는 각각 노즐출구 압력, 외기압을 의미한다.

### 2.4 1-D 시뮬레이션 절차

핀틀의 비정상상태 특성에 관한 성능을 계산하기 위해서 식(3)을 Runge-Kutta 4th order method를 통해 계산을 수행하였다. 관련 지배방정식을 바탕으로 Fig. 6의 순서로 MATLAB 프로그램을 이용하여 핀틀추력기의 1-D 시뮬레이션을 수행하였다.

### 2.5 해석결과(비정상상태 특성)

공압시험용 핀틀추력기의 비정상상태 특성을 파악하기 위해 특정 자유체적(0.0004 m<sup>3</sup>)에서 구동기 속도에 따른 특성과 특정 구동기속도(6 mm/s)에서 자유체적에 따른 특성을 핀틀이 6 mm 후진하는 경우에 대해서 1-D 시뮬레이션을 수행하여 추력기 성능을 예측하였다.

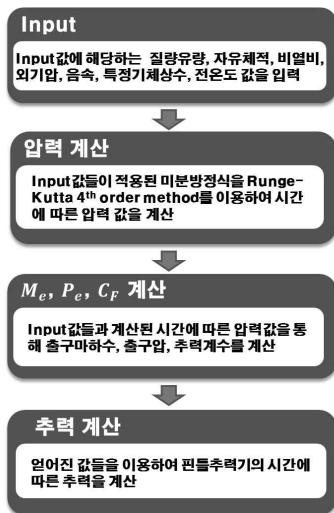


Fig. 6. 1-D simulation algorithm

### 2.5.1 질량유량

1-D 시뮬레이션을 통해 핀틀 노즐을 통과하는 순간적인 질량유량의 변화를 구하였다. Fig. 7은 핀틀 속도에 따른 질량유량을 나타내었고, 자유 체적에 따른 질량유량은 Fig. 8로 표현하였다. 핀틀이 전진하는 경우 순간적으로 질량유량이 감소하였다가 다시 증가하며, 후진하는 경우에는 순간적으로 질량유량이 증가하였다가 감소하는 경향을 Fig. 7~8을 통해 확인할 수 있다. 이러한 경향은 국방과학연구소의 연구결과[8]와 동일하였다. 노즐을 통과하는 질량유량이 순간적으로 감소하는 이유는 핀틀이 전진함에 따라서 순간적으로 기하학적 노즐목면적의 값이 작아지게 되는데 이에 따른 챔버압력의 증가는 기하학적 노즐 목면적의 변화에 맞게 즉각적으로 변하지 않고 늦어지기 때문에 노즐을 통해 흐르는 순간적인 질량유량의 값이 감소하게 된다. 이와는 반대로 노즐을 통과하는 질량유량이 순간적으로 증가하는 이유는 핀틀이 후진함에 따라서 순간적으로

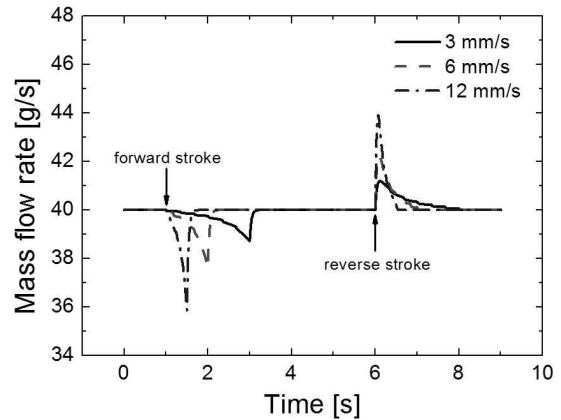


Fig. 7. Mass flow rate (1-D simulation) : effect of pintle speed

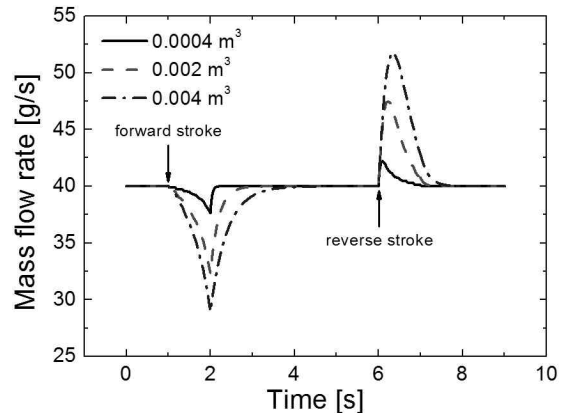


Fig. 8. Mass flow rate (1-D simulation) : effect of free volume

기하학적 노즐목면적의 값이 커지게 되며 이에 따른 챔버압력의 감소가 기하학적 노즐목면적의 변화에 맞게 즉각적으로 변하지 않기 때문에 질량유량이 증가하게 된다. 이러한 핀틀추력기의 순간적인 질량유량 변화는 노즐출구 압력, 챔버압력, 추력 등에도 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Figure 7~8에서와 같이 핀틀 속도가 빠를수록 핀틀이 특정 스트로크에 빨리 도달하기 때문에 질량유량이 정상상태의 질량유량 값으로 회복하는 시간이 빨라진다. 또한 챔버압력의 응답 지연으로 인해 핀틀 속도가 빠를수록 노즐목 면적이 빠르게 변해 over shoot/under shoot의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 자유체적의 크기가 커질수록 식(3)을 통해 챔버압력의 변화율이 작아지는 것을 알 수 있는데 이로 인해 질량유량이 정상상태 값으로 회복하는 시간이 늦어지며 over shoot/under shoot의 크기가 커지는 것을 알 수 있다.

**2.5.2 노즐출구 압력**

1-D 시뮬레이션을 통해 Fig. 9~10과 같이 핀틀 추력기 노즐 출구의 순간적인 압력변화를 확인하였다. Fig. 9를 살펴보면 핀틀이 전진하는 경우와 후진하는 경우에 대해서 핀틀 속도가 빠를수록 over shoot/under shoot의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 10을 통해 자유체적의 크기가 커질수록 압력의 변화율이 작아져 노즐출구 압력이 정상상태의 압력 값으로 회복하는 시간이 늦어지며 over shoot/under shoot의 크기가 커지는 것을 알 수 있다. 1-D 시뮬레이션을 통해 얻은 노즐출구압력이 1 atm 보다는 작은 값을 나타내기 때문에 실제로는 노즐 내에 과대 팽창으로 인한 유동박리와 충격파가 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

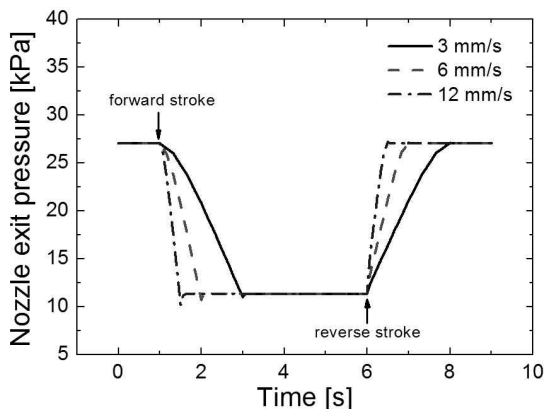


Fig. 9. Nozzle exit pressure (1-D simulation) : effect of pintle speed

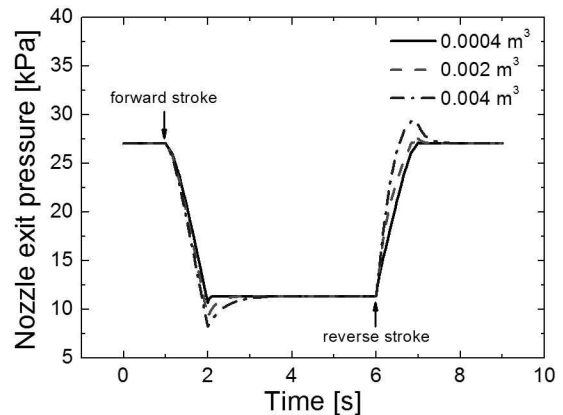


Fig. 10. Nozzle exit pressure (1-D simulation) : effect of free volume

**2.5.3 챔버압력, 추력**

1-D 시뮬레이션의 결과로 Fig. 11~12와 같이 핀틀추력기의 순간적인 챔버압력과 추력의 변화를 확인하였다. 핀틀 속도가 빠를수록 자유체적이 작을수록 챔버압력과 추력의 변화가 빨라지며 회복속도 또한 빨라졌다. 또한 Fig. 11~12에서와 같이 핀틀 속도와 자유체적의 증가 및 감소에 따라서 압력은 단조롭게 증가하거나 감소하는 경향을 보이지만, 추력은 핀틀이 전진할 경우 특정 핀틀 속도와 특정 자유체적 이후부터는 감소했다가 증가하는 경향이 나타나는 것을 확인하였다. 추력이 Fig. 11~12와 같은 경향을 보이는 것은 노즐을 통과하는 질량유량, 노즐출구 압력 등의 여러 매개변수들의 변화에 의해서 나타나는 현상으로 판단된다.

1-D 시뮬레이션을 통해 얻은 추력값은 Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 실험값보다는 작은 값을 나타내기 때문에 Fig. 11~12에서의 추력 결과 또한 실험상에서는 그 값의 크기가 커지고 변하는

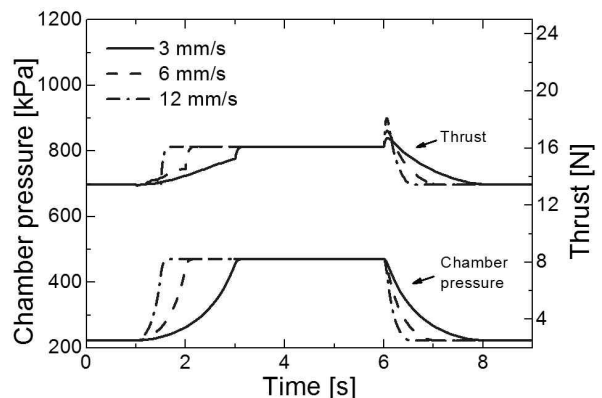


Fig. 11. Thrust and chamber pressure (1-D simulation) : effect of pintle speed

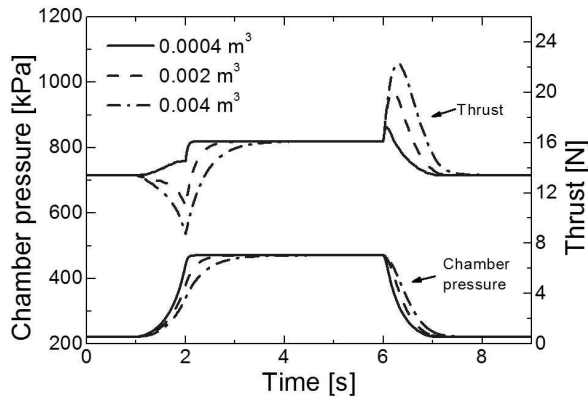


Fig. 12. Thrust and chamber pressure (1-D simulation) : effect of free volume

경향도 다소 차이가 있을 것으로 판단된다.

### III. 결 론

핀틀추력기 비정상상태 특성에 대한 성능해석을 수행하기 위해서 핀틀 속도와 자유체적에 따른 1-D 시뮬레이션 코딩과 알고리즘을 구현하여 해석을 수행하였다. 핀틀이 전진 후 일정시간 동안 정지하였다가 다시 후진하는 경우에 대해서 1-D 시뮬레이션을 수행하였다. 핀틀이 전진하는 경우와 후진하는 경우 챔버압력은 단조롭게 감소하거나 증가하지만 노즐을 통과하는 질량유량과 노즐출구 압력 그리고 추력은 감소하였다가 증가하거나, 증가하였다가 감소하는 다소 복잡한 경향을 보였다. 또한 추력의 경우 특정 핀틀 속도와 특정 자유체적 이후부터는 감소하였다가 증가하는 경향을 보였다.

본 연구에서 사용된 1-D 시뮬레이션은 일차원이론 공식을 적용하였기 때문에 노즐내부에서 발생하는 유동박리나 충격파와 같은 현상들을 반영하지 못하며 이로 인한 한계점이 분명 존재하지만, 실험이나 수치해석을 수행하기 전에 핀틀추력기의 대략적인 성능을 보다 쉽고 빠르게 예측할 수 있기 때문에 듀얼벨 노즐과 같은 고도보정노즐 설계 시 초기 성능 평가에 유용할 것으로 판단된다.

### 후 기

본 연구는 정부(교육부, 미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 일반연구자지원사업(계약번호 NRF-2013R1A1A2012553)과 우주핵심기술개발사업(계약번호 NRF-2014M1A3A3A02034776) 지원을 받아 수행된 것임

### References

- 1) Hwang, H., and Huh, H., "Preliminary Experimental Results on Pintle Thruster with Improved Choked Flow Section", *2013 KSAS Fall Conference*, 2013, pp. 335~338
- 2) Lee, J., and Ko, H., "A Study on the Performance Characteristics of Blunt Body Pintle Nozzle", *49<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2013
- 3) Kim, J., and Park, J., "Investigation of Pintle Shape Effect on the Nozzle Performance", *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 36, No. 8, 2008, pp. 790~796
- 4) Napior, J., and Garmy, V., "Controllable Solid Propulsion for Launch Vehicle and Spacecraft Application", *57<sup>th</sup> International Astronautical Congress*, 2006
- 5) John, L., and Robert, I., "Throttle valves for air Turbo-Rocket engine control", *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 1997
- 6) Caubet, P., "Divert and Attitude Control System for Interceptors", *1<sup>st</sup> AAFAF International Conference on Missile Defense*, 2003
- 7) Lee, J., Park, B., and Chang, H., "Analysis of the Pintle Nozzle Characteristics- I: Steady State Performance", *2012 KSPE Fall conference*, 2012, pp. 355~361
- 8) Ko, H., Lee, J., and Chang, H., "Analysis of the Pintle Nozzle Characteristics- I: Unsteady Performance", *2012 KSPE Fall Conference*, 2012, pp. 362~366
- 9) Jin, J., Ha, D., and Oh, S., "Experimental Study and Performance Analysis of the Solid Rocket Motor with Pintle Nozzle", *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 18, No. 5, 2014, pp. 19~28
- 10) Heo, J., Jung, J., Sung, H., Yang, J., and Lee, J., "A Sliding Mesh Technique and Compressibility Effects of Two-equation Turbulence Models for a Pintle-perturbed Flow Analysis", *2012 KSPE Fall Conference*, 2012, pp. 376~381
- 11) Wang S., and Huh, H., "Effect of Bore on Aerodynamic Loads in Modulatable Thrust Devices", *2011 KSPE Spring Conference*, 2011,

pp. 189~192

12) Wang, S., and Huh, H., "Effect of Nozzle Contraction Angle on Performance of the SNECMA Modulatable Thrust Devices", *2011 KSPE Fall Conference*, 2011, pp. 14~17

13) Choi, J., and Huh, H., "Steady State Experimental Study of Pintle Shape for Modulatable Thruster Applications", *2011 KSPE Spring Conference*, 2011, pp. 153~156

14) Hwang, H., and Huh, H., "Unsteady-State Experiment on Pintle Thruster Using Stroke Control Method", *2013 KSPE Fall Conference*, 2013, pp. 394~397

15) Lee, J., "A Study on the Static and Dynamic Characteristics of Pintle-Perturbed Conical Nozzle Flows", Ph. D. Dissertation, Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei University, South Korea, 2012.