



직선형 핀틀 노즐의 길이비에 따른 정상상태와 비정상상태 특성 연구

정기연^{a,*} · 강동기^a · 정은희^a · 이대연^a · 김덕현^a

Steady and Unsteady State Characteristics of Length Effects about Linear Pintle Nozzle

Kiyeon Jeong^{a,*} · Dong-Gi Kang^a · Eunhee Jung^a · Daeyeon Lee^a · Dukhyun Kim^a

^aPGM Tech R&D Lab, LIG Nex1 Co., Ltd., Korea

*Corresponding author. E-mail: kiyeon.jeong@lignex1.com

ABSTRACT

In this study, numerical simulations were performed for steady and unsteady state characteristics of length effects on linear pintle nozzles using the overset grid method. Nozzles and pintles are created separately by an auto grid generation program to use the overset grid method. Appropriate turbulent models and numerical methods are selected for the validation of simulations. Pintle shapes are chosen from five types, with differences in the ratio of length and diameter. The longer the pintle length, the greater the thrust and thrust coefficient. The chamber pressure tendency of steady-state and unsteady-state are different for various pintle velocities. The thrust of the nozzle exit responds to changes in the nozzle throat in the unsteady-state, and the speed of pressure propagation wave generated by movement of the pintle is considered to predict the major factor of performance.

초 록

본 연구에서는 추력조절용 핀틀 노즐의 길이비에 따른 정상상태와 비정상상태 특성을 파악하기 위해 수치해석을 수행하였다. 노즐과 핀틀의 영역은 분리하여 격자를 생성하고 중첩격자기법을 사용하였다. 핀틀 형상은 길이비에 따라 5가지로 선택하였고, 정상상태 해석결과 핀틀의 길이가 길수록 추력과 추력계수가 높게 나타났다. 비정상상태 해석의 경우 핀틀의 속도에 따라서 연소실 압력 경향이 달라지며 추력과 유동구조에 영향을 미친다. 노즐 출구에서의 추력은 노즐목 단면적 변화에 빠른 응답특성을 보이며, 추력과 추력계수 등 성능 주요 인자들의 예측시 핀틀의 구동 속도와 핀틀 거동에 의한 연소실 압력과의 전달속도를 고려해야 한다.

Key Words: Linear Pintle Nozzle(직선형 핀틀 노즐), Unsteady State Characteristics(비정상상태 특성), Pintle Velocity(핀틀 속도), Chamber Pressure Propagation(연소실 압력 전달)

Received 14 June 2017 / Revised 14 September 2017 / Accepted 20 September 2017

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

1. 서 론

수축-확산 노즐을 가진 추진기관의 추력을 조절하는 위해서는 연소실의 압력과 노즐목 크기를 변화시키면 된다. 핀틀 노즐은 기존의 노즐에 핀틀을 추가하여 노즐목 단면적의 크기를 변화시켜 추력을 조절하는 시스템이다[1]. 핀틀 노즐 시스템은 핀틀의 구동이 단순하며 설계 방식에 따라 추력 조절 범위를 조절할 수 있기 때문에 여러 항공우주기술 선진 국가에서 활발히 연구가 수행되었다.

Fig. 1은 미국의 Aerojet에서 개발한 고체로켓용 핀틀 노즐의 개략도이다. Aerojet에서는 핀틀 로켓모터의 노즐목 단면적 변화에 대한 연소실 압력과 추력 변화를 이론적으로 예측하고 최초로 실험을 실시하였다[2]. 이후 2010년까지 16번의 통합 비행시험에서 8번 성공하였으며 보잉으로부터 2018년까지 개발, 시험, 조립 생산에 대한 계약을 체결하였다[3].

미국의 Thiokol에서는 콘(Cone)형상의 핀틀을 수치적으로 해석하여 연소실과 추력의 섭동을 최소화하는 연구가 수행되었다[4]. Fig. 2는 프랑스 SNECMA에서 개발한 추추력기용 핀틀 노즐이다. SNECMA에서는 핀틀 노즐의 구동 하중을 줄이기 위하여 핀틀에 구멍을 적용하였다[5]. 프랑스와 이탈리아의 합작 개발인 Aster Block에도 위치 및 자세제어 추진 시스템(DACS, Divert and Attitude Control System)이 개발 및 적용되었다[6~8]. 그리고 중국의 Northwestern Polytechnical University에서는 ALE(Arbitray Lagrangian-Eulerian) 기법을 적용한 핀틀 로켓 모터의 비정상 수치해석을 수행하였다. 이동격자를 사용하여 핀틀의 이동속도 및 노즐 내부의 체적변화를 고려하여 핀틀 로켓 모터의 추력 제어 과정의 동특성 연구를 수행하였다[9].

국내에서는 핀틀 형상과 핀틀이동에 따른 실험적 연구와 핀틀 형상이 노즐 성능에 미치는 영향을 수치해석적으로 평가하였다. 국방과학연구소에서는 핀틀 형상과 추력기 성능에 관한 공압 시험 및 유동 해석을 진행하였으며 최근에는 핀틀과 노즐 소재 및 구동 성능에 대한 연소시험을 수행한 것으로 알려져 있다[10~13].

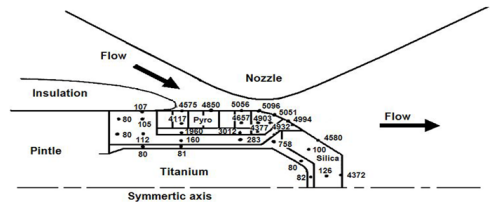


Fig. 1 Aerojet's solid rocket pintle nozzle[2].

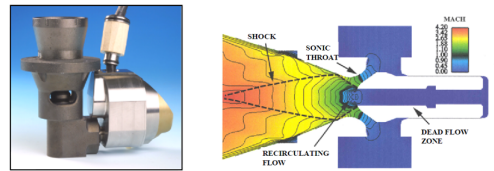


Fig. 2 SNECMA's divert thruster[5].

한국항공대학교에서는 핀틀 노즐의 핀틀 형상 및 위치에 따른 정적, 동적 특성에 대해 수치해석적으로 연구하였다. 연소실 내부의 핀틀을 갑작스럽게 이동시키면 유동장이 급격히 변하여 압력진동유발 및 연소현상 변화를 가져오며, 연소실 내부의 핀틀 위치에 따라 핀틀과 노즐에 복잡한 충격파와 박리유동이 형성된다[14~17]. 이러한 충격파와 박리유동의 간섭으로 경계층의 난류발생을 증가시키고 유동의 불안정성을 일으킬 수 있다. 핀틀 움직임에 의해 발생하는 박리유동에 적합한 2차원 방정식 난류모델의 압축성 계수 보정모델을 연구하였다[18].

지금까지 핀틀노즐의 연구 수행분야는 Fig. 3과 같다. 핀틀의 형상이나 위치, 핀틀과 인접한 노즐의 형상에 대한 효과를 분석하였으며 대부분 정상상태 해석을 수행하였다. 하지만 노즐목 단면적에서의 핀틀의 움직임은 복잡한 초음속 유동의 교란을 발생시키기 때문에 그 특성을 파악하기 위해서는 비정상상태 해석이 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 추력조절용 핀틀 노즐의 비정상상태 특성을 파악하기 위해 선행연구에서 수행된 일정질량유량 조건의 정상상태 핀틀 노즐 결과를 인용하였다. 또한 핀틀의 움직임에 대한 효과를 적용하기 위해 중첩 격자 기법을 이용하여 핀틀과 노즐의 상호작용을 해석하였다. 핀틀 노즐 계산에 적합한 난류모델 및 계

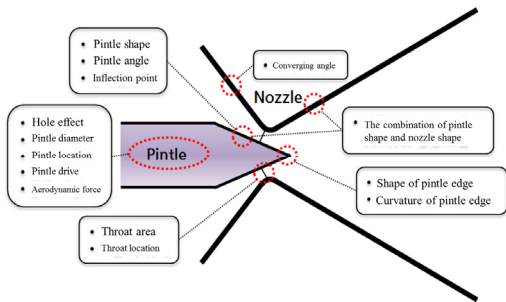


Fig. 3 Research field of pintle nozzle.

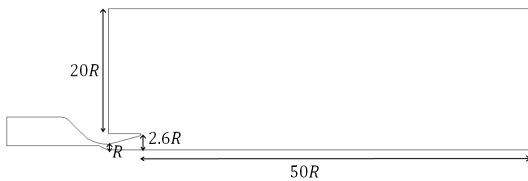


Fig. 4 Sketch of computational domain.

산 기법을 검증하고 비정상상태 해석을 정상상태와 비교함으로써, 핀틀 노즐의 동적특성을 파악할 수 있으며 실제 추력조절 메커니즘을 적용할 수 있다.

2. 해석모델 및 수치기법

2.1 해석모델

해석을 수행한 도메인은 Fig. 4와 같다. 노즐 목 단면적의 반경을 R이라 했을 때 노즐 출구 및 외기의 길이를 비율로 나타내었다. 노즐의 초기 목 단면적 반경은 5 mm, 노즐 출구 반경은 13 mm이고 노즐 출구 확산반각은 15°이다. 핀틀의 반경은 3.5 mm이며 외기의 크기는 반경방향으로 노즐목 단면적 반경의 20배, 축방향으로 50배로 설정하였다.

핀틀 형상은 면적이 선형적으로 변하는 형상을 선택하였다. 핀틀 노즐의 추력변화는 노즐목 단면적 크기변화에 지배적인 영향을 받으므로 노즐목 단면적은 연속적이고 제어 가능한 형태로 변화되어야 한다. 핀틀의 직경과 길이비(L/R) 조건은 5가지로 선택하였으며 핀틀 형상은 Fig.

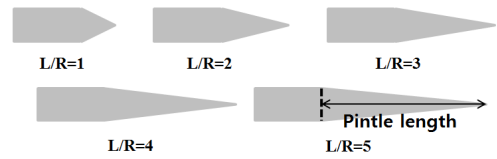


Fig. 5 Pintle shapes.

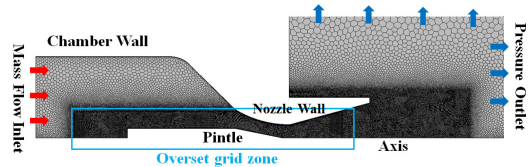


Fig. 6 Grids configuration and boundary conditions.

5와 같다. 핀틀의 길이는 핀틀의 면적이 변화하는 부분을 지칭한다.

2.2 격자구성 및 경계조건

해석 모델의 격자 및 경계조건은 Fig. 6과 같다. 핀틀과 노즐 사이의 간격이 매우 작아지면 벽면에서의 난류 생성과 소멸 및 박리특성이 나타나므로 벽면에서의 첫 번째 격자는 $y^+ = 1$ 로 생성하였다. 벽면에서의 정확한 유동구배를 포착하기 위해 prism layer 격자 생성기법을 적용하였고 총 20개의 layer를 생성하였다. 핀틀 주위에서의 복잡한 유동특성을 정확하게 포착하기 위해 0.2 mm 수준의 격자밀집(Volume control)을 적용하였다. 격자는 프로그램이 제공하는 Polyhedral 비정렬 격자생성기법을 적용하였으며, 격자의존성 검증을 통해 격자개수는 약 67,000개로 설정하였다.

연소실 입구조건은 일정질량유량(0.7 kg/s) 조건을 사용하여 핀틀의 움직임에 따른 연소실의 압력변화를 모사하였다. 작동유체는 공압으로 가정하였고 난류모델은 핀틀 노즐에서의 박리유동 해석에 적합한 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다[10]. 유동해석과 격자생성 프로그램은 STAR-CCM+ v10.06을 사용하였다.

2.3 수치기법

노즐 형상은 제트(Jet) 축을 중심으로 축대칭이므

로 2차원 축대칭 압축성 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations) 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 시간기법은 Steady와 Unsteady를 모두 사용하였다. Steady 해석은 핀틀의 형상에 따른 추력특성을 파악하기 위해 수행하였으며, Unsteady 해석은 핀틀노즐의 움직임에 따른 특성을 파악하기 위해서 수행하였다. 공간정확도는 해석 프로그램이 제공하는 MUSCL 3rd를 사용하였으며, 충격과 발생 시 정확한 계산을 수행하기 위해 Flux에 대해 AUSM+ FVS 기법을 적용하였다.

Fig. 7은 중첩기법을 적용한 격자 도메인을 나타낸 것이다. 노즐 도메인은 핀틀이 없는 빨간색 격자이며, 핀틀 도메인은 노즐이 없는 파란색 도메인이다. 각 도메인에서 격자를 생성 후 중첩격자기법을 적용하면 두 도메인에서 격자가 있는 부분만 합쳐진다.

3. 프로그램 검증

핀틀 노즐은 핀틀의 위치와 핀틀 끝에서의 충격파로 인해 노즐 출구에서 박리유동이 발생한다. 노즐에서 발생하는 박리는 난류 모델별, 격자수에 따라 그 위치가 다르며 출구에서의 유동

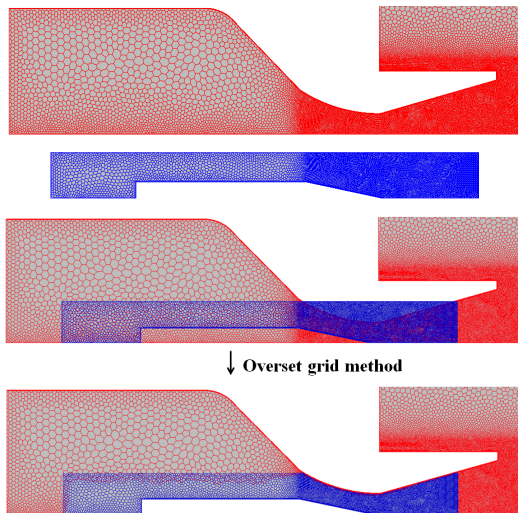


Fig. 7 Overset grid method at pintle nozzle.

구조를 변화시켜 추력, 충격파구조 같은 노즐의 성능특성에 영향을 미친다. 따라서 사용하는 해석 프로그램이 박리유동을 잘 포착하는지 확인해보았다.

3.1 사각노즐에서의 박리유동

노즐에서의 박리위치 뿐만 아니라 노즐 내부에서 발생하는 복잡한 유동구조를 정확히 포착해야 출구에서의 노즐 성능특성을 분석할 수 있다. 사각노즐 검증해석을 통해 사용하는 유동해석 프로그램의 박리위치 및 충격파 간섭에 의한 유동구조 해석을 검증하였다.

출구면이 사각형 형태의 노즐에서 연소실 압력과 외기 압력비(NPR)에 따른 노즐에서의 압력 분포 결과를 검증에 사용하였으며 형상은 Fig. 8과 같다. 목 단면적 부분의 면적이 $2,785 \text{ mm}^2$ 이고, 1.797의 노즐 면적비를 가지며 101.34 mm의 깊이를 가진 노즐이다[19].

격자는 약 15만개를 사용하였으며, 난류모델은 $k-\epsilon$ Realizable 모델을 사용하였다. 연소실의 압력과 외기압력비가 5보다 작은 경우, 노즐 확산부에서 박리유동이 발생하며 노즐 내부에서 마하디스크와 팽창파가 발생하게 된다. 실험 결과와 동일 조건으로 CFD 해석을 수행한 결과 노즐에서의 박리위치를 잘 포착하는 것을 확인하였으며 그 결과는 Fig. 9와 같다. NPR=3조건에서 실험 사진과 CFD 결과 비교는 Fig. 10과 같다.

3.2 핀틀 노즐 실험

핀틀이 노즐목을 통과하는 관통형 핀틀 노즐

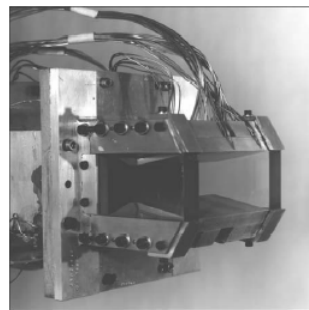


Fig. 8 Rectangular nozzle.

의 핀틀 위치에 따른 노즐에서의 압력분포 결과를 검증해석에 사용하였다[20]. Fig. 11은 공압조건에서의 실험 개략도를 나타낸 것이다. 논문에

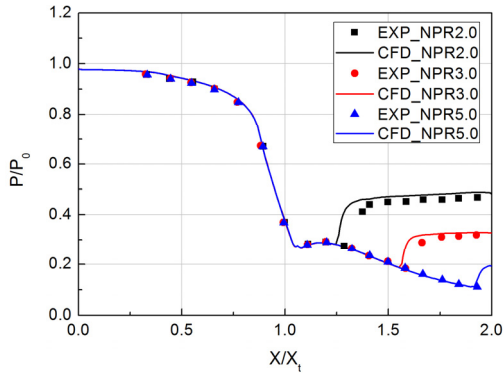


Fig. 9 Pressure distribution of rectangular nozzle.

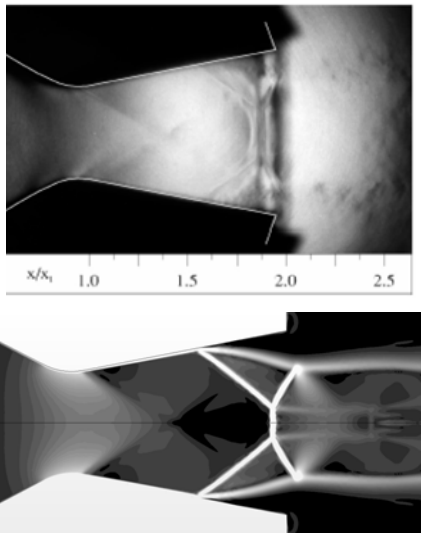


Fig. 10 Schlieren image(top) and CFD image(bottom) at NPR = 3.0.

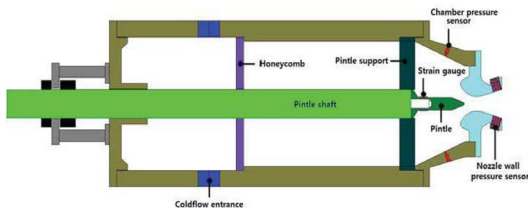


Fig. 11 Pintle assembly for cold flow test.

제시된 핀틀 형상중 설계형상과 동일한 직선형 핀틀의 실험값을 검증에 사용하였다. 핀틀의 위치는 노즐에서 박리가 가장 많이 발생하는 위치를 선택하였다. 이 위치에서의 실험값을 이용하여 해석 프로그램의 박리위치 검증 및 계산에 적합한 공간정확도와 난류모델을 선택하였다.

Fig. 12는 1~3차의 공간정확도에 따른 노즐에서의 압력분포를 나타낸 것이다. 공간정확도의 차수가 높을수록 한 점을 계산하는데 주변 값을 많이 사용하므로 격자를 늘리지 않고도 계산의 품질이 좋아진다. 1차 공간기법의 경우 제트(jet) 방향만 고려되기 때문에 박리유동이 포착되지 않는다. 2차 이상의 공간정확도의 경우 모두 박리를 포착하며, 박리유동 뿐만 아니라 노즐 내부에서의 압축, 팽창파의 정확한 해석을 위해 3차

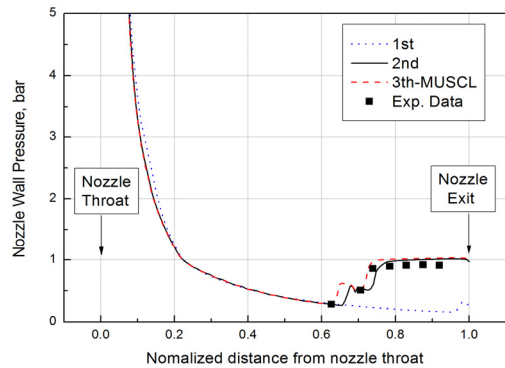


Fig. 12 Nozzle wall pressure vs Discretization method.

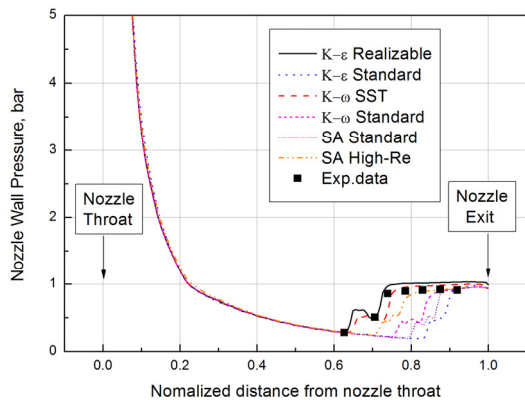


Fig. 13 Nozzle wall pressure vs Turbulent model.

의 MUSCL 기법을 선택하였다.

Fig. 13은 난류 모델에 따른 노즐에서의 압력 분포를 나타낸 것이다. 실험과 결과가 유사한 난류모델은 $k-\epsilon$ Realizable과 $k-\omega$ SST이다. 두 모델의 결과를 자세히 비교해보면, 노즐방향 무차원거리 0.6부근에서 박리가 시작되는 위치는 동일하게 포착한다. 이후 얇은 팽창파를 지난 후 두 번째 박리가 발생하는 위치는 $k-\epsilon$ Realizable 모델이 더 잘 포착한다. 따라서 난류 모델은 $k-\epsilon$ Realizable 모델을 선택하였다. 또한 앞서 수행된 선행연구 결과[10]를 보면 $k-\epsilon$ 모델에 압축성계수를 추가한 난류모델이 핀틀 유동에서의 박리유동에 적합하다고 제시되어 있다.

4. 해석 결과

4.1 핀틀 형상에 따른 노즐목 단면적 변화

Fig. 14는 핀틀 형상 및 위치에 따른 노즐목 단면적 변화를 나타낸 것이다. 노즐목 단면적 크기는 기하학적으로 최소면적인 값을 선정하였다. 핀틀 형상별 노즐목 단면적 변화를 비교하기 위해 노즐목 단면적 크기가 가장 클 때의 값으로 무차원화 하였다. 핀틀 길이(Fig. 5) 왼쪽 끝이 초기 노즐목 위치에 있을 때를 0 mm로 설정하였다. 핀틀이 초기 노즐목 위치에 있으면 노즐목 단면적 크기가 가장 작으며, 이 위치에서는 핀틀 형상에 관계없이 노즐목 단면적 크기가 동일하

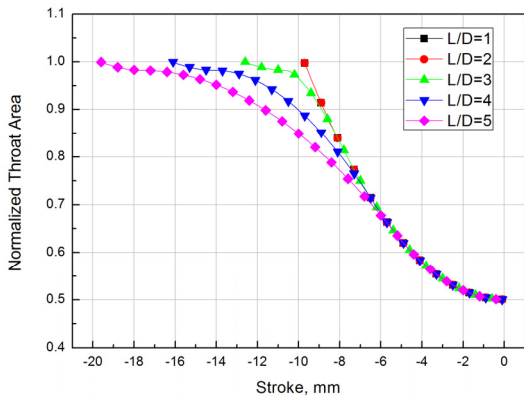


Fig. 14 Nozzle throat area vs Pintle stroke.

다. 핀틀의 길이가 길어질수록 동일 위치에서 핀틀이 차지하는 부분이 많기 때문에 노즐목 단면적의 크기는 천천히 변화한다.

L/R의 비율이 1, 2인 핀틀은 노즐목 단면적 변화경향이 같다. 이는 핀틀 위치에 따라 노즐목이 핀틀의 경사면에 생기지 않고 핀틀 길이부분의 왼쪽에 생기기 때문이다. 따라서 L/R<2 에서는 핀틀 길이에 의한 노즐목 단면적 변화 효과는 없다. 핀틀의 길이비가 L/R>3 에서는 핀틀의 길이가 반경길이 비율만큼 증가하면 최대 노즐목 단면적 크기를 나타내는 stroke 위치가 약 3 mm씩 증가한다.

4.2 핀틀 형상에 따른 정상상태 추력 변화

Fig. 15는 핀틀 형상 및 위치에 따른 추력을 나타낸 것이다. 추력은 노즐 출구에서의 값을 이용하여 Eq. 1과 같이 계산하였다.

$$T = \dot{m} V_e + (P_e - P_a) A_e \tag{1}$$

$$= \rho_e V_e^2 A_e + (P_e - P_a) A_e$$

핀틀의 형상에 따른 효과를 분석하기 위해서 동일 노즐목 단면적 크기에서 추력 값을 비교하였다. 각 형상별 핀틀 위치와 연소실 압력은 Table 1과 같다. 핀틀 위치별 연소실 압력은 실험값을 사용하였다.

핀틀 형상별 추력변화를 보면 노즐목 단면적 0.75를 제외하고는 추력의 차이가 2~4%로 크지

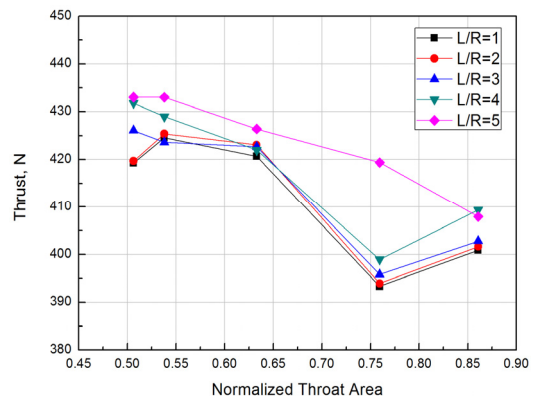


Fig. 15 Thrust variation vs Pintle shape and stroke.

않다. 반면에 단면적 0.75에서는 L/R=5와 그 나머지의 추력차이가 최대 6.5% 발생한다. 이 위치에서의 추력 차이를 파악하기 위해 마하수 분포를 Fig. 16에 나타내었다. Fig. 16에서 위에 제시된 그림은 L/R=2인 추력이 낮은 경우이고, 중간 그림은 L/R=4, 밑의 그림은 L/R=5인 추력이 높은 경우이다.

핀틀의 길이가 짧으면 핀틀 끝 부분에서 발생하는 팽창파가 노즐 벽에 반사되어 노즐 출구의

Table 1. Pintle stroke and chamber pressure vs Throat area at steady conditions.

Area ratio	L/R=1~3	L/R=4	L/R=5	P_c
0.85	-8.2mm	-8.9mm	-10mm	43.4bar
0.75	-7mm	-7.1mm	-7.5mm	47.9bar
0.63	-5mm	-5mm	-5mm	60.3bar
0.53	-2.5mm	-2.5mm	-2.5mm	70.9bar
0.5	0mm	0mm	0mm	75.3bar

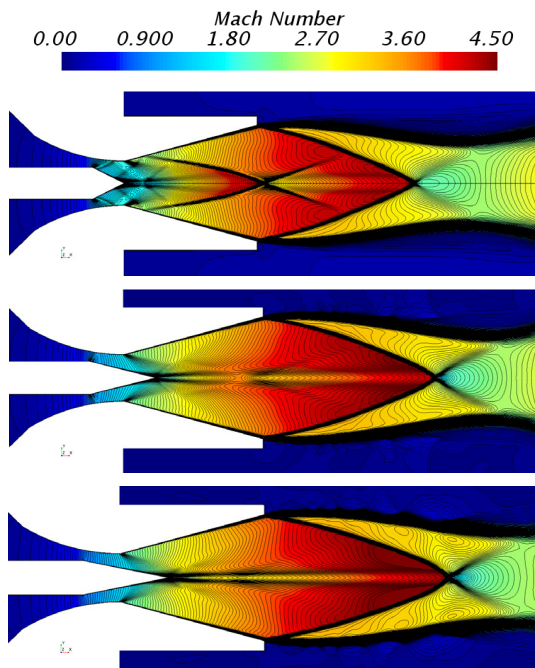


Fig. 16 Mach Number contour and lines at area ratio 0.75- : L/R = 2 (top) L/R = 4 (middle) L/R = 5 (bottom).

유동까지 영향을 미치게 된다. 핀틀의 길이가 짧을수록 노즐목에서의 마하수 변화가 크기 때문에 강한 팽창파가 발생하여 추력이 더 낮게 나타난다.

Fig. 17은 노즐목 단면적 0.75 부근에서 L/R=5의 추력 상승 원인을 파악하고자 단면적 0.75 부근에서의 L/R=2와 5의 추력 분포를 나타낸 것이다. 0.75 단면적에서의 동일한 연소실 압력으로 가정하고 0.725와 0.77 단면적에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 15에서 도출되었던 결과와 동일하게 0.75 부근에서는 같은 연소실 압력이라도 추력의 차이가 발생하였다. 노즐의 추력은 출구에서의 유동상태에 지배적이며, 같은 연소실 압력과 노즐목 단면적 크기를 가지더라도 핀틀의 형상에 의해서 추력을 변화시킬 수 있다.

Fig. 18은 노즐목 단면적 0.75에서의 노즐 출구 밀도 분포를 나타낸 것이다. 노즐에서의 추력은 Eq. 1과 같으며 질량유량이 들어간 항을 추력의 모멘텀항, 압력이 들어간 항을 추력의 압력항이라 한다. 핀틀 노즐의 추력은 모멘텀항이 전체 추력의 90% 수준이므로, 모멘텀 추력 인자인 출구에서의 밀도와 속도분포를 비교하면 추력 크기를 비교할 수 있다.

L/R=2의 경우 노즐목에서 발생한 팽창파의 반복적인 간섭으로 인해서 노즐 출구에서의 밀도가 낮다. 특히 제트 축에 해당하는 부분의 밀도를 비교해보면 팽창이 가장 천천히 발생한

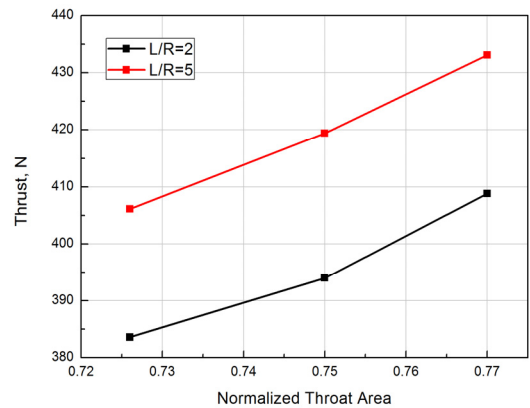


Fig. 17 Thrust distribution near 0.75 of Normalized Throat Area.

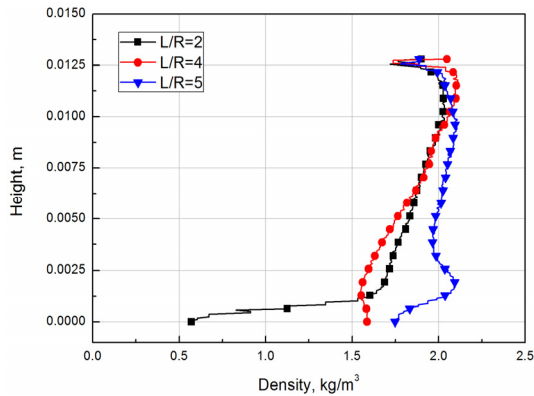


Fig. 18 Density distribution at nozzle exit.

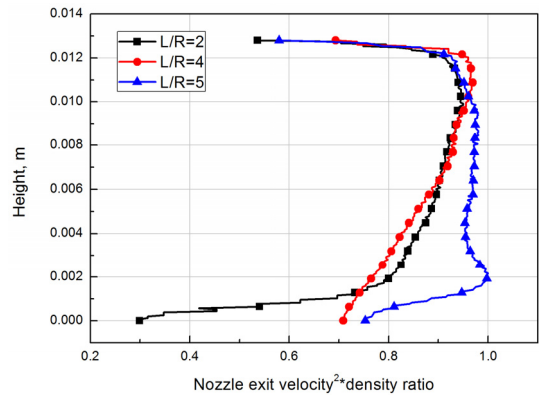


Fig. 20 $Density \times Velocity^2$ distribution at nozzle exit.

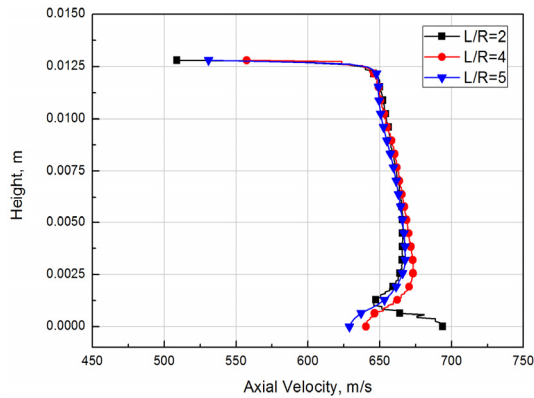


Fig. 19 Velocity distribution at nozzle exit.

L/R=5의 밀도 값이 L/R=2에 비해 50~400% 높은 것을 알 수 있다. L/R=4와 L/R=5를 비교해보아도 Fig. 16에서는 유동에서 큰 차이점을 볼 수 없었지만 실제 밀도분포는 L/R=5가 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 19는 노즐목 단면적 0.75에서의 노즐 출구 속도 분포를 나타낸 것이다. 대부분의 영역에서 속도차이가 크지 않지만 핀틀 L/R 길이비에 따라 노즐목 단면적에서의 마하수 차이로 제트 중심에서 속도의 차이가 발생한다. 노즐목 단면적에서 유동팽창이 가장 큰 L/R=2 조건이 제트 중심에서 속도가 높게 형성된다.

Fig. 20은 노즐목 단면적 0.75에서 노즐 출구 면적을 제외한 추력의 모멘텀항($\rho_e V_e^2$)의 분포를 무차원화하여 나타낸 것이다. L/R=5의 최대값으

Table 2. Pressure and Thrust ratios.

Area ratio	Steady		Unsteady at 40 mm/s	
	Pressure [bar]	Thrust [N]	Pressure [bar]	Thrust [N]
0.5	75.3	433.06	53.5	311.94
0.53	70.9	433.04	49.9	306.31
0.63	60.3	426.42	46.8	329.54
0.75	47.9	419.39	44.2	369.60
0.85	43.4	407.90	42.4	400.51

로 무차원화 하였다. 핀틀 길이별 분포 경향을 보면, 추력의 계산에서 속도의 제곱이 들어감에도 불구하고 출구에서의 밀도가 속도보다 지배적이다. 이는 밀도의 크기가 속도의 크기에 0.285% 수준이기 때문에 민감도가 높기 때문이다. 또한 노즐 출구에서의 유동은 핀틀과 노즐목 단면적에서 발생한 충격파의 영향을 받은 상태이므로 속도보다는 밀도의 변화가 더 크다. 이 현상을 일반적인 추진기관에 확대시켜 생각해보면, 핀틀 노즐의 추력뿐만 아니라 노즐 내부에서 유동이 복잡한 추진기관의 추력을 예측할 시 출구에서의 밀도 분포를 통해 추력의 크기 및 분포를 알 수 있다.

4.3 정상상태와 비정상상태 특성 비교

Table 2는 정상상태와 비정상상태의 연소실 압력과 노즐 추력을 나타낸 것이다. 핀틀 형상은

정상상태에서 추력이 가장 높게 측정된 L/R=5를 선택하였다. 비정상상태 계산은 핀틀의 속도를 40 mm/s로 설정하였으며 stroke는 -10 mm부터 0 mm까지 10 mm 이동하였다. 핀틀이 전진하면 노즐목 단면적이 작아지고 연소실에 공급되는 질량유량은 일정하기 때문에 연소실의 압력이 증가하게 된다. 비정상상태 계산의 경우 노즐목 단면적 감소량만큼 연소실 압력이 증가하지 않아서 정상상태에 비해 압력이 낮게 형성된다. 그로 인해 추력도 정상상태 조건에 비해 낮다. 이를 통해 핀틀 노즐 구동시 노즐목 단면적 변화에 따른 압력증가에는 일정수준의 시간이 필요함을 알 수 있다.

Table 2에서 확인한 비정상상태에서의 압력 저하현상은 노즐목 단면적 변화 시 압력회복에 따른 시간지연 특성을 지니므로, 핀틀 속도에 따라 압력회복 특성이 달라진다. 이 특성을 확인해 보기 위해 핀틀 속도를 2.5, 10, 40, 400 mm/s로 설정하여 비교하였다.

Fig. 21은 핀틀 속도에 따른 동일한 핀틀위치에서의 연소실 압력을 정상상태와 비교한 것이다. 핀틀 속도 10 mm/s와 40 mm/s는 핀틀의 움직임에 따른 압력변화가 유사하다. 핀틀의 속도를 400 mm/s 까지 증가시키면 노즐목 단면적 변화조건이 연소실에 전달되기도 전에 핀틀이 움직여서 압력상승이 소폭 나타났다. 핀틀의 속도를 2.5 mm/s까지 낮추면, 정상상태와 유사한 연소실 압력거동을 보인다. 이 속도조건인 경우

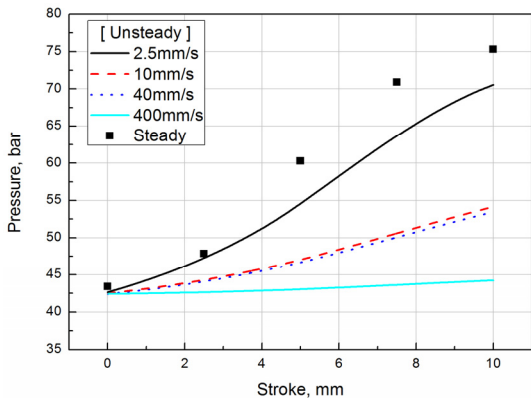


Fig. 21 Chamber pressure vs Pintle velocity at L/R = 5.

핀틀이 구동한 시간이 4초이기 때문에 고체추진기관의 연소시간을 고려하면 적합한 구동시간은 아니다. 2.5mm/s의 조건은 작동유체가 공기이기 때문에 나온 결과이며, 실제 고체추진기관의 연소특성을 고려하면 이보다 빠른 속도에서 정상상태에 준하는 결과가 도출될 것이다.

노즐에서 발생하는 추력도 정상상태와 비정상상태를 Fig. 22에 비교해 보았다. 정상상태의 경우 핀틀이 전진해서 노즐목 단면적의 크기가 감소하여도 연소실의 압력이 충분히 상승했기 때문에 추력이 증가하는 것을 알 수 있다. 반면에 비정상상태의 경우 핀틀이 전진하면서 노즐목 단면적이 감소하여도, 이 정보가 연소실에 전파되는데 발생하는 시간지연으로 연소실 압력이 충분히 상승하지 못해 추력이 감소한다. 핀틀의 속도가 빠를수록 초기 핀틀 위치에서 최소 노즐목 단면적 위치까지 도달하는데 걸리는 시간이 적으므로, 압력회복에 사용된 시간이 적어서 추력이 더 빠르게 감소하게 된다.

속도가 가장 느린 2.5 mm/s의 경우 정상상태 조건과 가장 유사하게 핀틀이 구동함에도 불구하고 추력 경향은 다르게 나타났다. 연소실의 압력이 같은 Stroke 2.5 mm 위치에서도 비정상상태 조건의 추력은 정상상태 조건보다 낮다. 이는 현재 핀틀 위치에 대응되는 압력이 맞춰지는데 필요한 시간보다 핀틀이 빨리 움직였기 때문이다. 이를 통해 핀틀 노즐을 이용한 추력조절 범위에 대한 특성파악을 할 때, 비정상상태 해석이

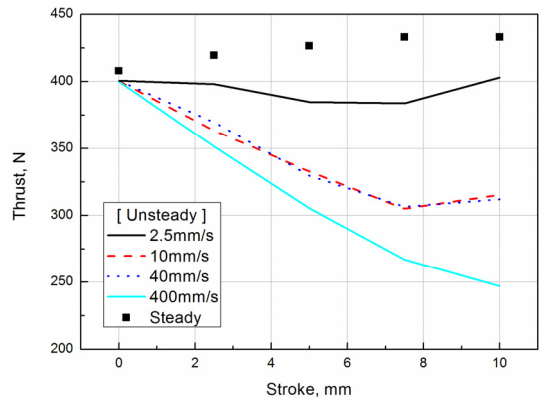


Fig. 22 Nozzle thrust vs Pintle velocity at L/R = 5.

반드시 필요함을 알 수 있다.

Fig. 23은 정상상태와 비정상상태 조건의 핀틀 위치 10 mm에서 밀도 유동장을 나타낸 것이다. 정상상태와 2.5 mm/s의 경우 연소실 압력 차이가 작아서 유동구조가 유사하지만, 400 mm/s의 경우 연소실의 압력이 매우 낮아 화염이 충분히 팽창되지 못하고 중간부분에서 박리된다.

Fig. 24는 정상상태와 비정상상태의 핀틀 위치

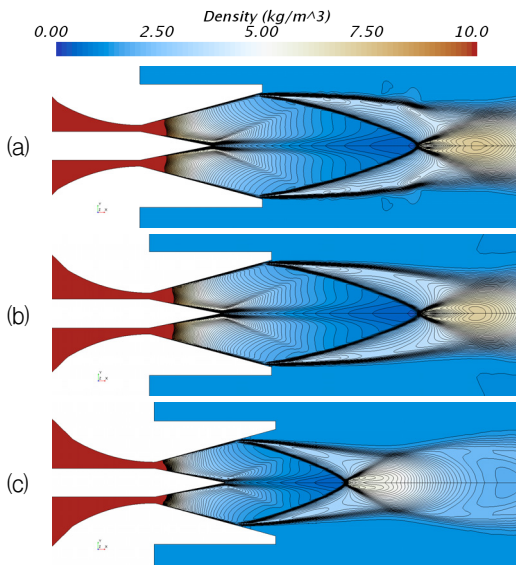


Fig. 23 Density contour & lines of steady and unsteady conditions (Stroke = 10 mm)
 (a)Steady (b)Unsteady at 2.5 mm/s
 (c)Unsteady at 400 mm/s.

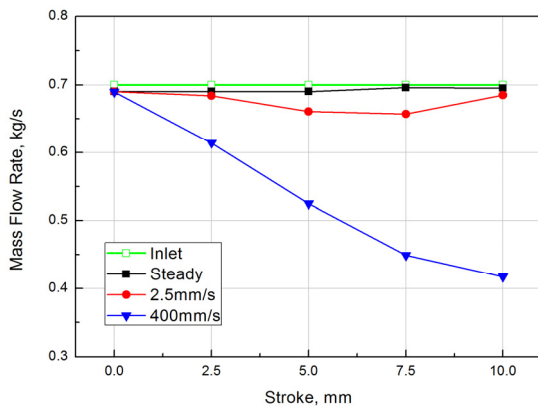


Fig. 24 Mass flow rate at nozzle exit.

별 노즐 입구와 출구에서의 질량유량을 나타낸 것이다. 정상상태의 경우 질량보존방정식을 만족하기 때문에 입구에서 경계조건으로 적용해준 0.7 kg/s에 준하는 값이 나온다. 하지만 비정상상태의 경우 공급유량에 해당하는 압력이 도달하기 전에 핀틀이 움직이므로, 정상상태와 동일 위치에서 연소실 압력이 낮아서 출구에서의 유량이 낮다. 핀틀의 속도가 빨수록 연소실 압력이 더 낮기 때문에 출구에서의 유량도 작다.

Fig. 22와 Fig. 24를 비교해보면 노즐의 추력과 출구에서의 질량유량은 경향이 같음을 알 수 있다. 노즐의 추력은 출구에서의 질량유량과 속도에 비례하는데, Fig. 19에서 보면 속도의 차이는 크게 나타나지 않으며 오히려 노즐 출구에서의 질량유량이 추력을 예측하는데 더 지배적이다.

5. 결 론

본 연구에서는 추력조절용 핀틀 노즐의 핀틀 길이에 따른 특성을 정상상태와 비정상상태 해석을 통해 비교 연구하였다. 핀틀 길이에 대한 해석을 수행하기 위해 중첩격자기법을 적용하였으며, 중첩격자기법은 노즐과 핀틀의 영역을 분리하여 격자를 생성하고 서로 겹쳐진 영역을 보간하여 계산하기 때문에 비정상상태 특성을 해석하는데 유용하다.

핀틀의 형상에 따른 특성을 파악하기 위해 핀틀 직경과 길이비를 5가지로 선택하였으며, 추력과 추력계수의 특성을 비교한 결과 핀틀의 길이가 최대인 L/R=5에서 추력 변화가 노즐목 단면적 변화에 연속적임을 확인하였다. 또한 핀틀의 길이가 길수록 핀틀과 노즐목 부근에서 압력팽창이 천천히 이뤄져서 핀틀 끝에서 발생하는 충격파의 강도가 약해진다. 그로인해 핀틀의 길이가 길수록 추력과 추력계수가 높음을 확인하였다. 핀틀의 형상별 추력 차이는 2~6.5 % 이다.

실제 핀틀 구동에 따른 특성을 파악하기 위해 핀틀 속도를 4가지로 설정하였고 정상상태와 비교하였다. 비정상상태에서 연소실 압력의 변화는 노즐목 단면적 변화에 지연되는 특성을 가지며,

그로 인해 정상상태에 비해 압력이 낮게 형성된다. 핀틀의 속도가 빠를수록 동일한 핀틀 이동거리에 대해 압력회복에 사용되는 시간이 작기 때문에 압력이 더 낮아지게 되고 추력 역시 감소한다.

정상상태에 비해 비정상상태의 경우 노즐 출구에서의 추력이 노즐목 단면적 변화에 빠른 응답특성을 보이므로, 추력과 추력계수 등 성능 주요 인자들의 예측할 때 비정상상태 해석이 매우 중요하다.

추후 연소실 입구 경계조건을 일정질량유량 조건이 아닌 연소실의 압력 변화에 따른 연소속도 변화로 적용하면, 연소실에 유입되는 질량유량이 변화하여 실제 핀틀 추진기관의 핀틀 속도별 특성을 파악할 수 있으리라 기대한다.

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*, Albuquerque, NM, U.S.A., AIAA 93-2641, June. 1993.
3. "Kill Vehicle," retrieved 26 may. 2017 from <http://blogs.defensenews.com/>
4. Dumortier, A. "Hot-gas Valve Development Using a Simple Numeric Code," 30th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Indianapolis, IN, U.S.A., AIAA 94-3158, June. 1994.
5. Lafond, A. "Numerical Simulation of the Flowfield inside a Hot Gas Valve," 37th *Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, NV, U.S.A., AIAA 99-1087, June. 1999.
6. "DACS," retrieved 3 June. 2017 from <http://www.atk.com/>
7. "DACS," retrieved 3 June. 2017 from <http://mbda-systems.com/>
8. pascal CAUBET, "Enabling Technologies for Advanced Solid DACS," *4th AIAA International Conference on Missile Defense*, Washington, DC, U.S.A., June. 2007.
9. 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.
10. Lee, J.H., Kim, J.K., Jang, H.B., and Oh, J.T., "Experimental and Theoretical Investigations of Thrust Variation with Pintle Positions Using Cold Gas," 44th *AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Hartford, CT, U.S.A., AIAA 2008-4787, June. 2008.
11. Lee, J.H., Kim, L.C., Part, 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," 39th *The Korean Society of Propulsion Engineers Fall Conference*, Jeju, Korea, pp. 367-370, Dec. 2012.
12. Lee, J.H., Kim, Y.C., Part, S.H., Oh, S.J., Lim, S.T., Oh, J.Y., Won, J.W., and Ko, H., "A Study on the Performance Characteristics of Blunt Body Pintle Nozzle," 49th *AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, San Jose, CA, U.S.A., AIAA 2013-4080, June. 2013.
13. Ko, H., Lee, J.H., Chang, H.B., and Yoon, W.S., "Cold Tests and the Dynamic Characteristics of the Pintle Type Solid Rocket Motor," *AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, San Jose, CA, U.S.A., AIAA 2013-4079, June. 2013.
14. 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*, Jeju, Korea, pp. 213-217, Nov 2011.
15. 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*, Gumi, Korea, pp. 123-128, May 2012.
16. Heo, J.Y., Jeong, K.Y., and Sung, H.G., "Numerical Study on Dynamic Characteristics of Pintle Nozzle for Variant Thrust: Part 3," 40th *The Korean Society of Propulsion Engineers Spring Conference*, Busan, Korea, pp. 523-528, May 2013.
17. 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, 2017.
18. 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.
19. Elmiligui, A., Abodol-Hamid, K.S., and Hunter C.A., "Numerical Investigation of Flow in an Over-expanded Nozzle with Porous Surfaces," *Journal of aircraft*, Vol. 43, No. 4, pp. 1217-1225, 2006.
20. Kim, J. K., "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, Dept. of Mechanical Design Engineering, Chungnam National Univ., Chungnam, Korea, 2011.