

가변 추력용 핀틀 노즐의 동적 특성에 관한 수치적 연구: Part 2

허준영* · 김기완* · 성홍계**† · 양준서***

Numerical Study on Dynamic Characteristics of Pintle Nozzle for Variant Thrust: Part 2

Jun-Young Heo* · Ki-Wan Kim* · Hong-Gye Sung**† · June-Seo Yang***

ABSTRACT

According to the sequence of pintle operation, the performance characteristics of pintle nozzles are analyzed. The pintle movement was simulated using unsteady numerical techniques, the response lag and sensitivity at the chamber and nozzle are estimated for movable pintle. Three operation sequences of the pintle are considered for evaluating whether the rate of the chamber pressure increase and the operation sequence will have any significant impact towards the rocket performance. Three operation sequences are as following; the pintle moves toward the nozzle throat, it turns instantly (case 1), stops at the nozzle throat for some time(0.5sec) (case 2), and stops at the nozzle throat (case 3). As a result, the dynamic characteristics according to the operation sequence and pintle shape were analyzed to take account the rocket performance.

초 록

작동 시퀀스에 따른 핀틀 노즐의 성능 특성을 비교하였다. 비정상상태 이동격자 수치해석 기법을 이용하여 시간에 따른 핀틀의 위치 변화를 고려하였으며, 다양한 핀틀 형상과 작동 시퀀스에 따른 성능 응답지연 및 민감도 분석을 수행하였다. 연소실 내부의 압력 상승률과 압력진동이 성능에 미치는 영향을 관찰하기 위하여, 노즐 목에 핀틀이 머무르는 시간이 다른 세 가지의 작동 시퀀스를 고려하였다. 핀틀이 노즐 목에 머무르지 않는 경우(case 1), 0.5초 머무를 경우(case 2) 그리고 노즐 목 위치에 계속 정지해 있을 경우(case 3)에 대해 비교하였고, 이를 통해 작동 시퀀스 및 핀틀 형상에 따른 동특성 연구를 수행하여 추력 특성 변화를 도출하였다.

Key Words: Pintle Nozzle(핀틀노즐), Operation Sequence(작동순서), Response Lag(응답지연)

* 학생회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

** 종신회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
연락처, E-mail: hgsung@kau.ac.kr

*** 종신회원, 국방과학연구소 1본부 6부

1. 서 론

핀틀을 이용한 가변 추력기 기술은 정밀 궤도
천이, 자세제어의 핵심요소기술로써 미국, 프랑

스, 일본, 독일, 러시아 등의 여러 국가에서 활발히 진행되고 있으나, 방위 전략 기술로 분류되어 자료들이 제한적으로 공개되어 있다. 가변 추력기 기술은 고체추진제에서 발생하는 연소가스로 다축의 추력기를 작동시켜 비행체의 궤도천이 및 자세제어 운용에 이용된다. 가변추력 고체추진기관에는 주로 핀틀을 이용하는데, 연소실 내부의 핀틀을 갑작스럽게 이동시키면 유동장이 급격히 변하여 압력진동유발 및 연소 현상 변화를 가져오며, 노즐의 하류 쪽에서는 강한 충격파 및 유동박리가 발생하여 추력이 감소 혹은 증가한다. 핀틀 이동에 따른 연소실 내부에서 급격한 유동장 변화를 해석하기 위하여 비정상상태 유동해석이 수행되어야 한다. 핀틀의 삽입과 추출 시 서로 다른 압력 및 추력성능을 보이며, 핀틀의 삽입시 최소(목)면적에 큰 변화가 없으면 형상에 관계없이 압력 및 질량유량 등이 유사한 경향을 보이지만, 추출 시 노즐 목의 크기 및 위치가 급격히 변하는 경우 성능에 큰 영향을 미친다. 이데 따라 추력 제어시 핀틀의 삽입/추출에 따른 이력 특성을 고려한 제어 모델 설정이 요구된다. 본 연구에서는 선행연구[1]에서 수행한 연구를 기반으로 서로 다른 핀틀 작동 시퀀스에 대한 해석 결과를 비교 및 분석하였다.

2. 이 론

핀틀의 이동 속도 및 핀틀 형상에 따라서 연소실 내부의 잔여압력은 다른 경향을 보였고, 이는 핀틀이 전진할 경우와 후진할 경우에 동일한 위치에 대해 비대칭적 결과를 나타내었다[1]. 연소실 압력이 핀틀의 작동시퀀스에 비하여 반응이 지연되는 결과가 성능에 주는 영향을 살펴보기 위하여 핀틀이 노즐목 근처의 방향전환점에서 머무르지 않는 경우와 0.5초 머무르는 경우에 대하여 작동특성을 비교 분석하였다. 그리고 핀틀 표면에서의 높은 마찰온도에 대해 보다 정확한 점성계산을 위하여 Sutherland law가 적용되었고, 입구조건과 기타 수치기법은 선행연구와 동일하게 적용되었다.

3. 해석 모델 및 경계 조건

본 연구에서 수행된 핀틀의 형상과 계산영역은 Fig. 1과 같다. 핀틀 형상은 Fig. 2와 같이 3가지 형상이 고려되었으며, 작동조건은 핀틀이 초기위치에 있을 때의 연소실 내부압력에 따른 질량유량을 계산하여 일정질량유량 조건을 적용하였다[2-4].

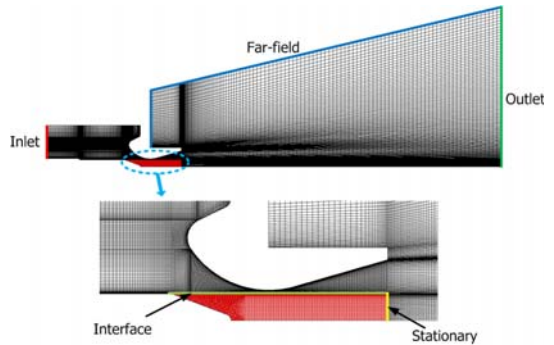


Fig. 1 Computational domain of pintle nozzle

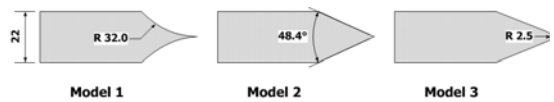


Fig. 2 Pintle shapes concerned in this study

핀틀의 작동시퀀스는 방향전환점에서 머무르지 않는 조건(Case 1)과 0.5초 머무르는 조건(Case 2) 그리고 방향전환점에서 계속 정지해 있는 경우(Case 3)에 대해 해석을 수행하였다.

모든 경우에서 핀틀은 0.5초에서 이동을 시작하고, Case 1, 2의 작동시퀀스는 Fig. 3, 4와 같다.

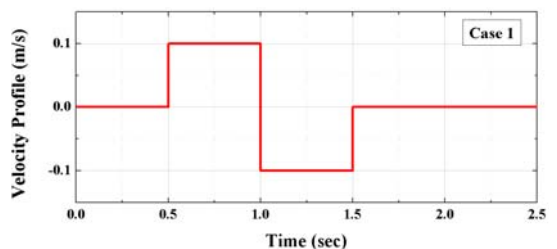


Fig. 3 Velocity profile of a pintle for case 1

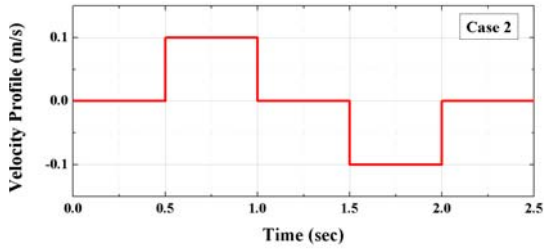


Fig. 4 Velocity profile of a pintle for case 2

4. 결 과

핀틀의 작동에 의한 연소실 내부와 노즐출구에서의 성능특성은 다르게 나타난다. Figure 5는 핀틀 모델 3을 Case 1의 작동시퀀스로 제어하였을 때의 한주기 내에서 압력, 마하수 분포를 나타낸 것이다.

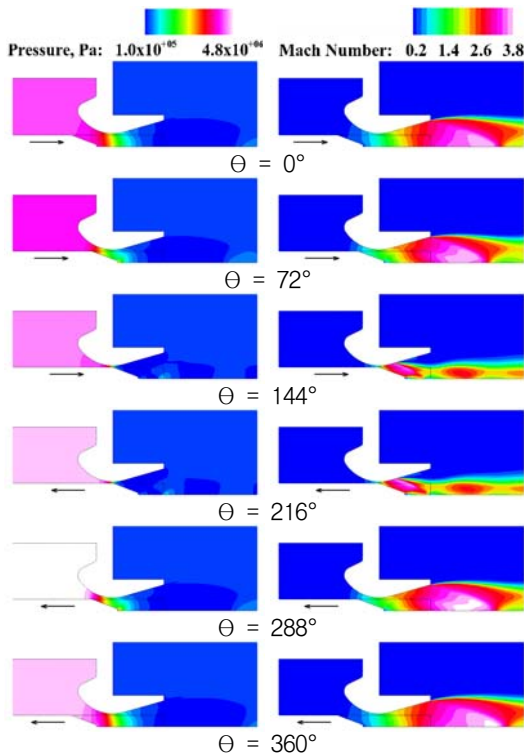


Fig. 5 Temporal evolution of pressure and Mach number field over a cycle of a pintle sequence; model 3 (case 1)

반주기($\theta = 180^\circ$)를 기준으로 핀틀이 전진할 경우와 후퇴할 경우에 동일한 핀틀 위치에서 서로 다른 유동특성을 나타냄을 알 수 있다. 연소실 내부 압력은 핀틀이 방향전환점을 지난 후에도 압력이 상승하는 것을 보이며 노즐 출구 마하수 분포에 비하여 긴 응답지연시간을 보이고 있다. 핀틀 형상과 작동시퀀스가 응답특성에 주는 영향을 분석하기 위하여 연소실 내부 압력과 노즐 출구에서의 추력 및 유량변화를 계산하였다.

4.1 연소실 내부에서의 성능 특성

핀틀의 작동에 의한 노즐 목 면적변화는 연소실 내부유동 특성에 영향을 주게 된다. 연소실 내부에서는 아음속 영역이기 때문에 이러한 핀틀의 위치변화에 대해 상대적으로 긴 응답 지연(response lag)을 가지게 된다.

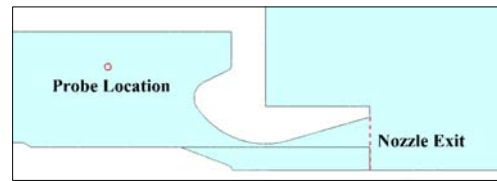


Fig. 6 Probe location for chamber pressure

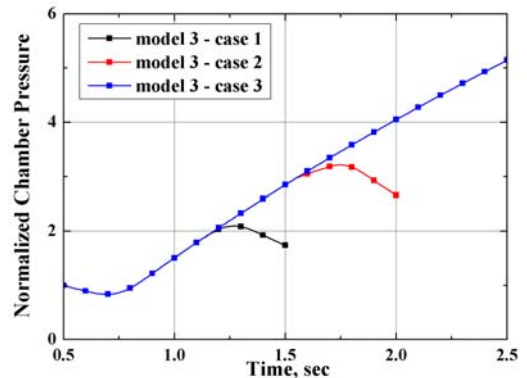


Fig. 7 Variation of the chamber pressure of model 3 for case 1, 2, 3

Figure 6은 연소실 내부에서의 압력측정 위치이고, Fig. 7은 핀틀 작동시퀀스에 따른 Model 3의 연소실 압력을 나타낸 그래프이다. 여기에서 압력은 핀틀이 초기위치에 있을 때의 압력으로 무차원화한 것이다. 모든 작동 시퀀스 조건에서

핀틀은 0.5초에 전진하기 시작하고, 노즐 목에 도달하는 시간은 1초이다. Fig. 7을 보면, 연소실 압력은 작동시퀀스에 대해 응답지연을 가지고 있고, 이러한 응답지연기간 내에서는 방향전환점에 머무르는 시간에 관계없이 유사한 형태의 응답지연을 가짐을 보인다. 이는 핀틀이 노즐 목에 위치하여 최소면적을 가질 때의 연소실 압력을 알고 있으면 그 압력범위 내에서는 핀틀 작동조건에 관계없이 유사한 응답지연을 가짐을 의미한다.

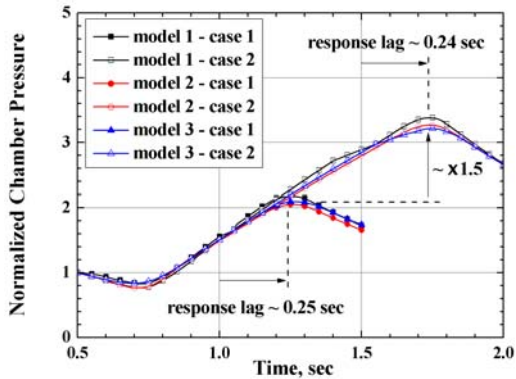


Fig. 8 Comparison of the chamber pressure of model 1, 2, 3 for case 1, 2

핀틀 형상과 작동시퀀스에 따른 연소실 압력은 Fig. 8과 같다. Case 1, 2를 비교해보면 핀틀이 방향전환점에서 후퇴하는 시점으로부터 연소실 압력이 지속적으로 상승하여 최대 점에 도달하는 시점까지 두 작동시퀀스 모두 0.24~0.25초의 유사한 형태와 크기의 응답 지연을 가짐을 보인다. 그리고 압력상승률은 선형적인 증가 경향을 보이며, 0.5초 정지시간에서 약 1.5배의 압력상승률을 나타내었다. 그리고 선행연구와 마찬가지로 모델 1이 모델 2, 3에 비해 급격한 압력변화를 보였다. 이러한 급격한 압력변화는 불안정한 로켓성능특성을 초래하기 때문에 적합한 핀틀 형상 선정이 요구된다.

4.2 노즐 출구에서의 성능 특성

핀틀의 작동시퀀스가 직접적으로 로켓성능에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 추력과 유량을 분석하였다. 노즐 출구는 연소실 내부와는 달리

노즐 목에서의 유동 변화가 빠르게 전파된다. 따라서 핀틀 형상에 따른 다양한 노즐 목 변화 특성이 노즐 출구에서의 추력, 유량 등에 직접적으로 영향을 미친다.

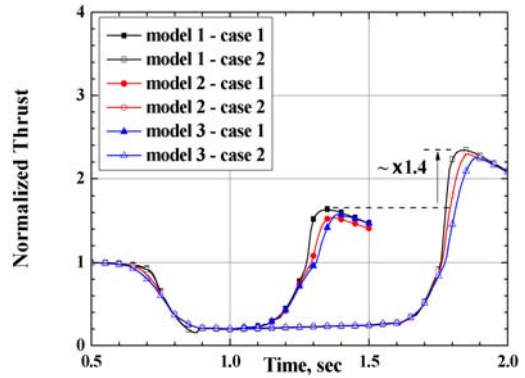


Fig. 9 Comparison of the thrust of model 1, 2, 3 for case 1, 2

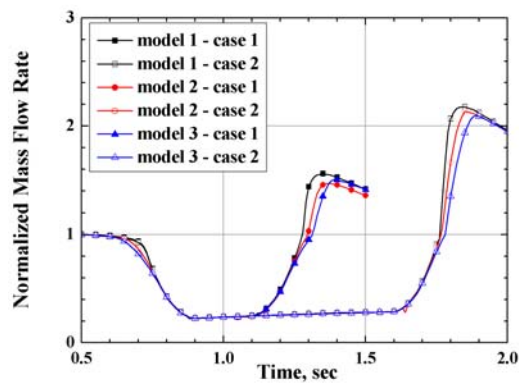


Fig. 10 Comparison of the mass flow rate of model 1, 2, 3 for case 1, 2

Figure 9, 10은 핀틀 형상과 작동시퀀스에 따른 추력 및 유량변화를 나타낸 그래프이다. 작동시퀀스에 따라 0.5초간 핀틀이 정지하고 방향전환할 경우(case 2)에 약 1.4배의 추력상승률을 나타내고 유량변화도 이와 유사한 형태와 크기를 가졌다. 그리고 모델 1은 앞선 결과와 마찬가지로 급격한 추력변화를 나타내고 있다. 특히, 0.7~0.8초 사이에서는 정상상태보다 추력이 낮아지는 결과를 보이는데, 이는 급격한 면적변화로 인해 추력이 빠르게 강하하고 이로 인해 다른

핀틀형상에 비해 상대적으로 추력이 급격히 낮아지기 때문이다. 핀틀이 방향전환점에서 정지하고 있는 동안 연소실 내부 압력은 지속적으로 상승하는데, 추력변화는 연소실 압력상승률에 비하여 큰 변화율을 보이지 않는다.

$$F = C_F P_c A_t$$

추력은 위 식과 같이 연소실 압력에 비례하여 변화한다. 하지만 연소실 압력은 추력에 비하여 긴 응답지연을 나타내고 있고, 이는 질량유량이 평형상태가 아니라는 것을 의미한다. 또한 Fig. 11과 같이 핀틀이 정지한 상태에서도 유동구조가 지속적으로 변화하고 있으므로 추력계수(C_F)도 바뀌게 된다. 이에 따라 추력변화가 압력에 비례하지 않는 결과를 보였다.

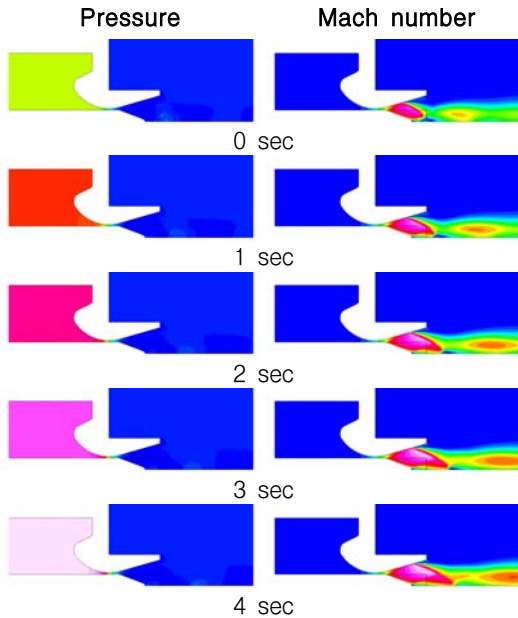


Fig. 11 Unsteady flow fields of pressure and Mach number while the pintle stops at the nozzle throat; model 3 (case 3)

이러한 결과는 최소유로면적에 의하여 노즐 목을 통과하는 유량이 제한되기 때문에, 최소 노즐 목의 크기가 연소실 압력의 상승률과 최대압력 그리고 추력 변화특성에 영향을 크게 미치는 것으로 판단할 수 있다. 따라서 설계요구조건에

따라 최소유로면적은 이를 고려해서 설계되어야 한다.

5. 결 론

고체 로켓의 핀틀 작동 시퀀스에 따른 엔진 성능 특성을 비교하였다. 비정상상태 이동격자 수치해석 기법을 이용하여 시간에 따른 핀틀의 위치 변화를 고려하였으며, 다양한 핀틀 형상과 작동 시퀀스에 따른 응답지연특성을 분석하였다. 연소실 내부의 압력변화 특성이 성능에 미치는 영향을 관찰하기 위하여, 노즐 목에 핀틀이 머무르는 시간이 다른 세 가지의 작동 시퀀스를 고려하였다. 핀틀이 노즐 목에 머무르지 않는 경우와 0.5초 머무를 경우, 그리고 노즐 목 위치에서 계속 정지해 있을 경우에 대해 비교하였고, 이를 통하여 작동 시퀀스 및 핀틀 형상에 따른 엔진 성능 특성 변화를 도출하였다.

연소실 내부압력은 작동시퀀스에 대해 응답지연을 가지고 있고, 이러한 응답지연구간 내에서는 방향전환점에 머무르는 시간에 관계없이 두 작동시퀀스 모두 0.24~0.25초의 유사한 형태와 크기의 응답 지연을 가짐을 보였다. 이러한 결과를 통해 핀틀이 노즐 목에 위치하여 최소면적을 가질 때, 정상상태의 연소실 압력을 알고 있으면 그보다 작은 압력에서는 핀틀 작동조건에 관계없이 응답지연을 예측할 수 있다.

그리고 본 연구에서 수행된 핀틀 형상은 연소실 압력 상승률에 비하여 노즐 출구에서의 추력 변화율은 상대적으로 작기 때문에 추력은 일정하게 제어되지만, 연소실 압력으로 추력을 효율적으로 제어할 수 없다. 위와 같이 노즐 출구에서의 성능은 핀틀 형상과 최소유로면적에 의해 결정되는데, 핀틀의 설계요구조건에 따라 적합한 최소유로면적을 고려하여야 한다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. (계약번호 UD110093CD)

참 고 문 헌

1. 박형주, 김리나, 허준영, 성홍계, 양준서, “가변 추력용 핀틀 노즐의 동적 특성에 관한 수치적 연구”, 한국추진공학회 2011년도 추계학술대회 논문집, 2011
2. 김중근, 박종호, “핀틀 형상이 노즐 성능에 미치는 영향에 관한 연구”, 한국항공우주학회지 제 36권 8호, 2008, pp.790-796
3. 김중근, 박종호, 이종훈, 전민경, “핀틀 형상이 노즐 유동에 미치는 영향에 대한 실험적 연구”, 한국항공우주학회지 제 28권 10호, 2010, pp.985-991
4. 김중근, 이지형, 장홍빈, “핀틀 형상 및 위치에 따른 추력 성능”, 한국추진공학회 2008년도 추계학술대회 논문집, 2008, pp.89-93