

2차분사 유량 조절 밸브 개도가 고체 로켓 모터의 추력, 측추력 및 롤 모멘트에 미치는 영향

김상민* · 황용석** · 윤웅섭***†

Effects of Open Area Ratio of Secondary Injection Flow Valve on Thrust, Side Thrust and Roll Moment of Solid Rocket Motor

Sangmin Kim* · Yong-Sok Hwang** · Woongsup Yoon***†

초 록

대기가 희박한 고고도 환경이나 급격한 선회를 위해 2차분사에 의한 추력벡터제어를 사용한다. 8개의 2차분사구를 갖는 고체로켓모터를 대상으로, 2차분사의 유량을 조절하는 밸브의 개도가 추력, 측추력 및 롤 모멘트에 미치는 영향을 해석적으로 연구하였다. 정상 상태의 3차원 Reynolds Averaged Navier-Stokes 식의 해를 구하였으며, 난류를 위해 Spalart-Almaras 모델을 사용하였다. 수치해석의 타당성을 평가하기 위해 실험 결과와 해석결과를 비교하였다. 밸브의 개도가 증가함에 따라 추력은 감소하나 측추력은 증가한다. 반면, 롤 모멘트의 경우, 밸브와 2차분사 파이프의 상호작용에 의해 개도에 비례하지 않는다.

Key Words: Secondary Injection Thrust Vector Control(2차분사 추력벡터제어), Solid Rocket Motor(고체로켓모터), Side Thrust(측추력), Roll Moment(롤모멘트)

1. 서 론

대기가 희박한 고고도 환경에서 비행하는 우주비행체, 혹은 급격하게 방향을 변화시켜야 하는 유도탄의 경우 추력의 방향을 변화시켜 진행 방향을 변화시키는 방법을 추력방향제어(Thrust Vector Control, TVC)라고 한다. TVC에는 제트 베인, gimbal, 이차분사 등의 방법이 있으며, 그

중 2차분사에 의한 추력방향제어(Secondary Injection TVC, SITVC)는 초음속 노즐의 팽창부에 2차 유동을 분출시키고, 이에 의해 발생하는 노즐 내부의 비대칭 3차원 유동을 통해 추력을 제어하는 방법이다. 이 방법은 다른 TVC 방법에 비해 2차 분사를 위한 부가적 장치가 크지 않아 무게의 증가가 크지 않고, 구동을 위한 파워가 크지 않다는 이점을 가지고 있어[1] 이론, 해석 및 실험적 방법을 통해 다양한 연구가 이루어졌다[2~7]. 최근의 연구는 노즐의 분사 조건(분사 각, 개수, 유량 등)에 따른 유동 변화 및 성능 변화에 대한 연구가 진행되고 있다[6, 7].

* 연세대학교 기계공학과

** 국방과학연구소 추진기관부

*** 연세대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail: wsyoon@yonsei.ac.kr

본 연구에서는 8개의 2차분사공을 가지는 고체 로켓모터에서 2차 분사 유량을 조절하는 밸브의 개도에 따른 고체로켓모터의 성능(추력, 측추력 및 톨 모멘트) 변화를 수치적으로 예측하였다.

2. 지배방정식 및 수치기법

2.1 지배방정식 및 수치기법

2차 분사를 포함하는 초음속 노즐의 압축성유동을 계산하기 위해 3차원 Reynolds averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식을 사용하였다. Gradient는 Green-Gauss node based 방법을 사용하였으며, 비점성항은 풍상 차분법(upwind difference method)의 일종인 Roe의 Flux difference splitting(FDS)를 사용하였다.

난류모델은 2차분사에 의한 난류 경계층에서의 충격파를 잘 모사할 수 있는 Spalart-Allmaras 모델을 사용하였으며, 상용 해석 프로그램인 FLUENT 6.3을 사용하여 해를 구하였다.

2.2 수치기법의 적용성 평가

계산을 위해 적용한 지배방정식 및 수치기법, 난류모델이 타당한지 평가하기 위해 Masuya[4]의 실험 결과와 비교하였다. Fig. 1은 Masuya가 실험에 사용한 콘형 노즐의 개략도로, 노즐 목 직경 26 mm, 노즐 팽창각 9.6도이며, 4.71의 팽창비를 갖는다. 2차분사관의 직경은 6 mm이며, 직

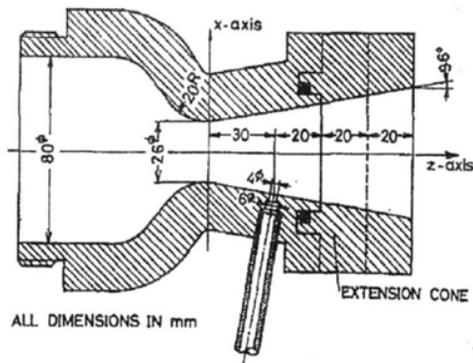
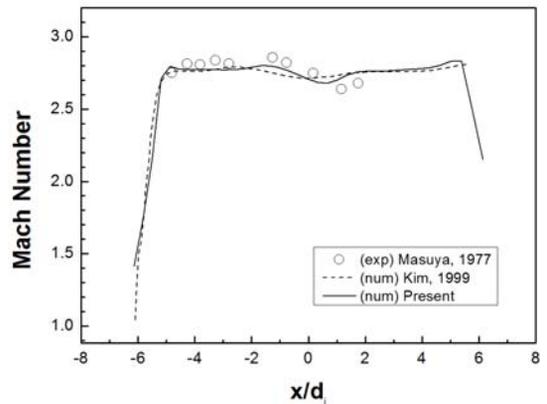
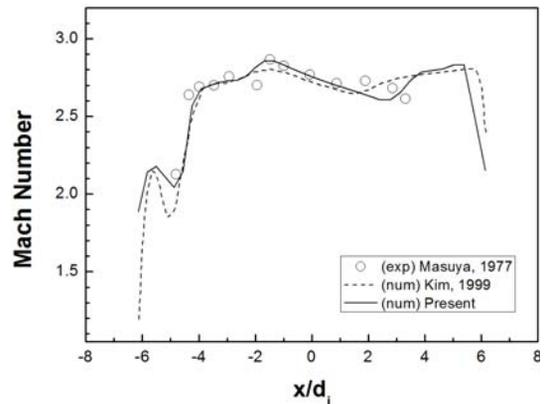


Fig. 1 Schematic of supersonic cone type nozzle with secondary injection orifice[4]

경 4 mm의 오리피스를 통해 초음속 노즐의 팽창부에 분사되며, 분사되는 위치는 노즐 목에서 하류 방향으로 30 mm이며, 벽에 수직인 방향으로 분사된다. 노즐을 통과하는 작동유체는 상온의 공기를 사용하였으며, 전압력 2 MP, 상온의 reservoir를 통해 공급된다. 2차분사에 사용되는 작동유체는 노즐과 같으며, 전온도는 약 15 K 높고, 압력은 0.50, 1.1 MP 이다.



(a) Pressure ratio 0.25



(b) Pressure ratio 0.55

Fig. 2 Mach number along x-axis at z=70mm

Figure 2는 노즐목에서 70 mm 떨어진 위치에서 x 축상의 거리에 따른 마하수를 나타낸 그림이다. 그림에서 원형 기호는 Masuya의 실험결과, 점선은 김형문 등[5]의 계산 결과, 그리고 실선은 본 연구를 통해 얻은 계산 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 계산의 결과는 실험 결과와 유사함을 알 수 있으며, 김형문 등의 결과보

다 실험 결과에 더 잘 일치함을 볼 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 모델 형상 및 경계조건

Figure 3에 본 연구에서 사용된 8개의 2차분사공을 갖는 고체로켓 모터의 3차원 형상을 나타내었다. 그림에서 1은 원형의 고체 추진제 그레인이며, 2는 2차분사를 위한 챔버, 3은 노즐 팽창부, 그리고 4는 2차분사의 유량을 조절하는 밸브로 구성되어 있다.

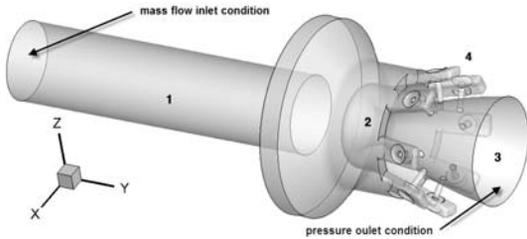


Fig. 3 Schematic of Solid Rocket Motor with Secondary Injection Valves and Pipes

경계조건의 경우, 그림에 나타난 것과 같이 입구 경계조건은 질유량 입구 조건을 사용하였으며, 출구 경계조건은 초음속 압력 경계조건을 사용하였다. 다른 면은 모두 단일 벽 조건을 사용하였다.

3.2 해석 조건

Figure 4는 고체로켓 모터의 배면도로 노즐의 팽창부 및 밸브를 볼 수 있다. 그림에서의 번호는 각 밸브의 번호를 나타낸다. 2차분사 유량에 의한 추력, 측추력 및 롤 모멘트의 변화를 확인하기 위해 Table 1과 같은 조건으로 해석을 수행하였다.

Table 1. Test Cases for Calculation

	열린 밸브 번호	개도
Case 1	-	-
Case 2	1, 2	30, 77, 100
Case 3	1, 3, 5, 7	30, 77, 100

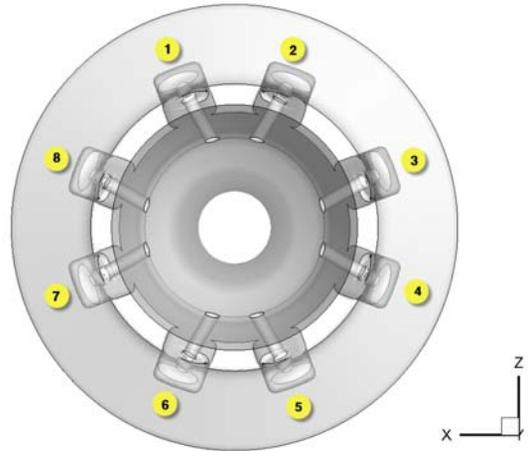


Fig. 4 Rear View of Solid Rocket Motor with Secondary Injection Valves and Pipes. Attached Numbers are Each Valve Number.

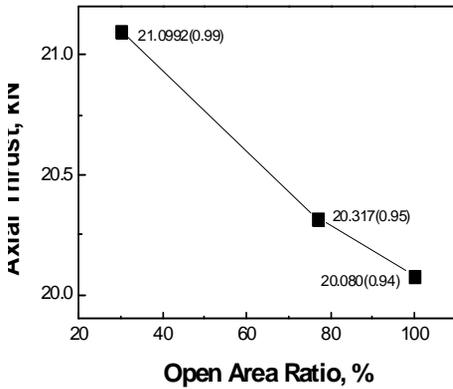
Case 1은 2차분사가 없을 때의 추력을 확인하기 위해 수행하였으며, case 2는 밸브 개도에 따른 추력 및 측추력의 변화를 확인하기 위해, 그리고 case 3은 밸브 개도에 따른 추력 및 롤 모멘트의 변화를 확인하기 위해 설정되었다.

3.3 개도에 따른 추력 및 측추력 변화

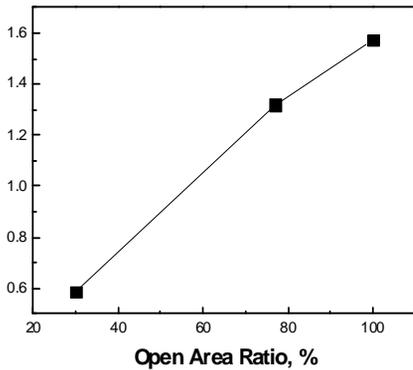
1과 2번 밸브가 열리면서 노즐 팽창부에 2차분사가 진행되면, yz 평면을 기준으로 좌우 대칭이 되므로 x 방향으로의 총 힘은 0이 되며, y 축 모멘트 역시 0이 된다. 따라서 z 방향으로의 측추력만이 발생한다.

Figure 5에서 밸브 개도에 따른 추력의 감소(a)와 측추력의 증가(b)를 나타내었다. (a)에서의 숫자는 추력을 나타내며, 옆의 괄호는 case 1 대비 추력을 의미한다. 추력의 경우 밸브 개도가 증가함에 따라 노즐목을 통과하는 유량이 줄어들고, 밸브 개도가 증가함에 따라 노즐 목면적이 증가하는 효과를 갖기 때문에 상부의 압력이 떨어져 추력이 감소하게 된다. 밸브를 30% 개방했을 때는 case 1의 추력 대비 99%의 추력을 갖지만, 밸브를 모두 개방했을 경우, 6% 정도 추력이 감소하였다. 반면 측추력의 경우 개도 100%일 때 1.6 kN까지 상승하며, 이는 추력의 감소보다 큰 값이다. 그림과 같이 측추력이 선형적으로 증

가하지 않는 이유는 앞서 설명한 것과 같이 밸브의 개도가 증가하면 상부의 압력이 감소하고 이에 따라 유량의 증가가 선형적으로 증가하지 않기 때문이다.



(a) Axial Thrust



(b) Side Thrust

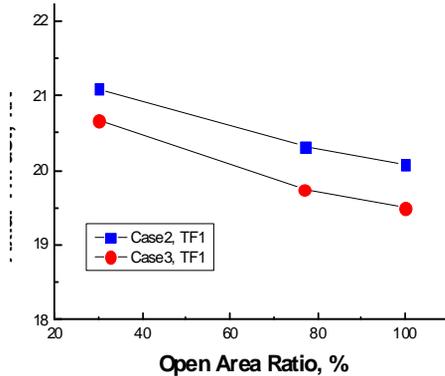
Fig. 5 Axial Thrust and Side Thrust along Valve Open Area Ratio.

3.4 개도에 따른 추력 및 롤추력 변화

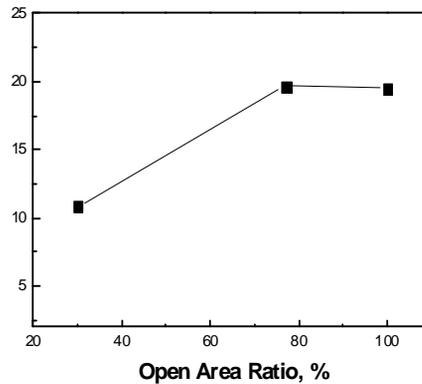
밸브 번호 1, 3, 5 및 7번이 열게 되면, 1, 5번 밸브가 서로 대칭이고, 3, 7번 밸브가 대칭이기 때문에 x 및 z 축으로의 총 힘은 없고, y 축 방향으로의 모멘트(롤 모멘트)가 발생한다.

Figure 6에서 밸브 개도에 따른 추력의 변화 및 롤 모멘트의 변화를 나타내었다. Case 3의 경우 Case 2보다 추력이 감소가 큰데, 이는 2차 분사유량이 더 크고, 노즐 내부의 충격파에 의한 손실이 더 크기 때문일 것으로 판단된다. 반면 롤 모멘트의 경우, 축추력과 달리, 밸브 개도가

증가함에 따라 증가하지 않고, 개도 77%와 100%의 롤 모멘트가 같은 값을 보인다. 이는 밸브 및 밸브와 2차분사공을 연결하는 파이프의 모멘트 방향이 서로 반대이기 때문이며, 개도가 증가함에 따라 각 모멘트는 증가하는 반면, 증가하는 양이 서로 유사하기 때문에 총 모멘트의 양은 유사하게 나타난다.



(a) Axial Thrust



(b) Roll Moment

Fig. 6. Axial Thrust and Roll(Y-axis) Moment along Valve Open Area Ratio.

4. 결론

본 연구에서는 8개의 분사공을 가지는 고체로켓모터의 SITVC 시스템에서 2차분사의 유량을 조절하는 밸브의 개도가 추력, 축추력 및 롤 모멘트에 미치는 영향을 확인하기 위해 수치해석

을 수행하였다. 측추력을 얻기 위해 대칭한 두 밸브를 열었을 경우, 밸브 개도가 증가함에 따라 추력은 최대 6% 감소하였으며, 측추력은 추력이 감소한 것보다 많이 발생하였다. 비대칭되는 4개의 밸브를 열어 롤 모멘트를 발생하였을 경우, 추력은 밸브 개도의 증가에 따라 감소하였다. 롤 모멘트의 경우, 밸브와 2차분사 파이프의 상호작용으로 인해 밸브의 개도에 따라 증가하지 않으며, 밸브를 완전 개방하지 않았을 때 최대 롤 모멘트를 갖는다.

참 고 문 헌

1. Sutton, G. P., Rocket Propulsion Elements, 7th ed., John Wiley & Sons Inc., 2001
2. Schetz, J. A., and Billing, F.S., "Penetration of Gaseous Jets Injected into a Supersonic stream," Journal of Spacecraft and Rocket, Vol. 3, No. 11, 1966, pp. 1658~1685.
3. Shapiro, A. H., The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow, Ronald, New York, 1954
4. Masuya G., 1977, "Secondary Gas Injection into a Supersonic Conical Nozzle," AIAA Journal, Vol. 16, No. 3, 1977, pp. 301~302
5. 김형문, 이상길, 윤용섭, "2차 가스분사에 의한 원추형 로켓 노즐 추력벡터제어 성능해석," 한국항공우주학회 학술발표회 논문집, 1999, pp. 307~311
6. 이해진, 강지훈, 윤용섭, "다공 2차 분사 유동을 사용한 추력제어방법의 수치적 해석," 2010년도 대한기계학회 유체공학부문 춘계학술대회 논문집, 2010, pp. 231~237
7. 송지운, 이종주, 조형희, "초음속 노즐 내 2차 분사 slot 개수에 따른 유동 특성 변화," 2007년도 기계학회 춘계학술대회 논문집, 2007, pp 3529~3533