

2차 가스분사에 의한 원추형 로켓노즐 추력벡터제어 성능해석 (I)

김형문* · 이상길* · 윤웅섭**

Performance Analysis of Secondary Gas Injection for a Conical Rocket Nozzle TVC(I)

Hyung-Mun Kim* · Sang-Kil Lee* · Woong-Sup Yoon**

ABSTRACT

In the present paper an attempt has been made to simulate the secondary injection-primary flow interaction in the conical rocket nozzle and to derive the performance of secondary injection thrust vector control(SITVC) system. Complex three-dimensional flowfield induced by the secondary injection is numerically analyzed by solving unsteady three-dimensional Euler equation with Beam and Warming's implicit approximate factorization method. Emphasized in the present study is the effect of secondary injection such as secondary mass flow rates and the momentum of secondary/primary nozzle flow mass rates upon the gross system performance parameters such as thrust ratio, specific impulse ratio and deflection angle. The results obtained in terms of system performance parameters show that lower secondary mass flow rate is advantageous for to reduce secondary specific impulse loss. It is further found that the nozzle with secondary jet injected downstream and interacting with fast primary flow is preferable for efficient and stable SITVC over the wide range of use with the penalty of side specific impulse loss.

초 록

풍전압력비와 2차 제트 분사구 위치에 따른 2차분사 추력방향 제어(SITVC: secondary injection thrust vector control) 성능특성 변화를 수치해석하였다. 2차 제트 분사에 의해 간섭된 수축-팽창노즐 내부의 초음속유동장을 대상으로 3차원 비정상 오일러 방정식을 내재적으로 근사인자분해된 Beam과 Warming의 방법을 사용하여 차분하였으며, 2차 분사 제트에 의한 추력비, 비추력비 및 전향각에 대한

* 육군사관학교 군사과학대학원(Advanced Institute of Military Science and Technology)

**연세대학교 기계공학과(Yonsei University, Dept. of Mechanical Engineering)

성능변화를 고찰하였다. 연구결과 측추력과 비추력비는 2차 분사 질량유량에 비례하여 증가하는 반면, 비추력 성능은 감소되어 2차 분사 질량유량이 적을 수록 추력 성능손실이 적어지는 것으로 나타났다. 또한 동일한 전압력비에 대하여 2차 제트 분사위치가 노즐의 하류에 위치할수록 고속의 주유동과의 간섭에 의한 강한 충격파로 인하여 측추력과 측비추력의 증가와 함께 추력방향 제어성능이 향상됨을 알 수 있었다.

1. 서 론

회박대기 상태 혹은 우주공간을 비행하는 발사체의 비행자세제어, 궤도수정이나 유도탄과 같이 발사 직후 저속에서 급속한 선회가 요구되는 경우에는 추력방향 제어(TVC: thrust vector control)에 의한 방법이 주로 사용된다. 추력방향 제어에는 gimbal, 제트 베인, SITVC 혹은 별도의 추력기 등, 다양한 방법들이 사용되며, 여타의 방법들이 작동유체 방향 조절에 따른 측추력 손실과 부가적인 작동장치에 따른 무게의 증가에 의하여 specific thrust의 감소를 수반하는데 반하여, SITVC는 2차 분사만을 위한 단순한 장치만으로 추력의 손실없이 추력방향을 제어할 수 있으며 증가된 측추력이 발생하는 장점을 가진다^[1].

Fig. 1은 SITVC에서 2차 분사 제트에 의하여 간섭된 팽창노즐 내부유동장을 도시하고 있다. 주노즐유동에 2차 분사가 주사되어 발생하는 박리로부터 강한 궁형충격파가 발전되며 경사충격파의 형태로 하류로 진행한다. 상류에 형성된 궁형충격파 직후에 2차 유동이 주유동과 간섭하게되고 궁형충격파보다 큰 곡률로 하류로 휘어 진행되며, 결과적으로 2차 분사구 하류 노즐벽 영역에서는 강한 재순환류가 발생한다. 2차 분사구 상류에서도 분사 제트에 의한

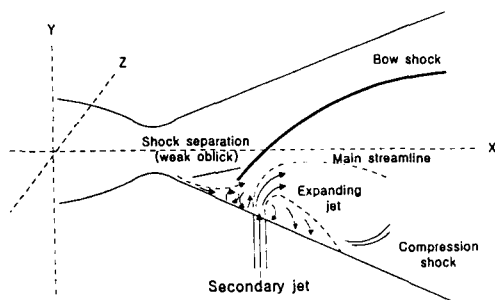


Fig. 1. Schematic of secondary injection interrupted flowfield

충격파-경계층 상호간섭에 의해 경계층이 박리되는 동시에 섭동된 유동변수들과 역압력구배에 의한 재순환류가 발생된다. 충격파에 의한 국부적인 압력의 증가는 노즐벽 압력분포의 불균형을 야기하며, 이로 인하여 측력과 2차분사제트에 의한 운동량의 차이가 궁극적으로 TVC를 위한 측추력으로 작용한다.

2차분사제트에 의해 간섭된 초음속 유동장 모델은 Walker와 Shandor^[2]의 의해 최초로 시도되었다. 이들은 작은 질량유량을 가정한 선형모델을 제안하였고, Shapiro^[3]에 의해 제안된 영향계수에 기초하여 측추력을 계산하였다. Broadwell^[4]은 2차 분사에 대한 측추력을 예측하기 위하여 Blast Wave Analogy(BWA)를 제안하였다. 여기서는 초음속 유동에서 2차 분사를 연속폭발로 모사하였고, 폭발에 의해 발생한 에너지가 2차 분사 제트의 운동량과 동일한 것으로 근사하였다. 이 방법에서는 2차 분사구의 크기, 형상, 분사 압력 등과 같은 분사 파라미터의 효과는 고려될 수 없는 단점이 있다. Guhse^[5]는 Broadwell의 연구에 포함되지 않았던 이들 파라미터들과 분사 질량유량에 대한 측추력의 변화량을 실험하고, 측추력이 질량유량에 대하여 선형적으로 변화되며 질량유량이 작을수록 효과적인 것으로 보고하였다. Inouye^[7]는 원추형 노즐에 고온 가스를 이용하여 2차 분사구의 크기와 질량유량 변화에 따른 주 추력의 변화, 비추력비, 전향각을 실험하였고, Masuya^[8]는 주유동 전압력에 대한 2차분사 전압의 비인 전압력비 변화에 따른 유동장의 구조와 노즐벽에서의 압력분포를 측정하였으며, 액체 2차 분사에 의한 측추력의 변화를 보고하였다. Wing^[9]은 주 유량의 7.5퍼센트의 2차 분사로 20도의 추력 방향을 제어한 것으로 보고하였다.

최근 수치해석적인 방법에 의한 SITVC 성능 연구가 활발히 보고되고 있다. Grasso^[10]는 평판에서의 초음속 유동에 2차 분사 제트에 의한 유동현상을 여러 가지 난류모델을 적용하여 수치해석 하였고,

Balu^[11]은 비정상 3차원 오일러 방정식을 이용하여 초음속 팽창노즐 유동에 대한 SITVC의 영향을 계산하여 실험결과와 비교하였다.

본 연구에서는 수축-팽창 초음속 노즐을 대상으로 2차 분사 제트조건에 따른 SITVC 추력제어 성능특성을 전산모사적인 방법으로 고찰하고자 하였다. 수치방법으로 3차원 비정상 오일러 방정식을 대상으로 Beam과 Warming의 내재적 근사 인자 분해 기법을 사용하여 차분하였으며, 2차 분사 제트의 전압력과 분사위치 변화에 따른 주 추력의 증가, 비추력비, 전향각을 계산, SITVC 시스템에 대한 성능에 대하여 고찰하였다.

2. 지배 방정식 및 수치기법

2차 분사제트에 의한 상류 경계층의 박리는 전체 축추력 발생에는 상대적으로 크게 영향을 주지 않는 것으로 알려져 있다^[13]. 즉, 축추력 발생에 중요한 역할을 하는 것은 궁형 충격파에 의한 압력의 증가이며, 로켓노즐 내부 초음속 유동장에서의 얇은 난류 경계층과 박리에 의한 영향은 크지 않은 것으로 보고되었다^[11]. 따라서 본 연구에서는 분자간의 확산 효과들을 무시한 3차원 오일러 방정식을 바탕으로 2차 분사제트에 간섭된 수축-팽창노즐 내부 압축성 유동장을 대상으로 하였다. 사용된 직교좌표계에서 무차원화된 보존형 오일러방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial G_j}{\partial x_j} = 0 \quad j=1,2,3 \quad (1)$$

식(1)에서 아래첨자 $j=1,2,3$ 은 각각 x, y, z 직교좌표를 나타내며, Q 는 보존형 유동변수, G_j 는 비점성 유속벡터이며 다음과 같이 정의된다.

$$Q = [\rho, \rho u, \rho v, \rho w, e]^T \quad (2)$$

$$G_1 = [\rho u, \rho u^2 + p, \rho uv, \rho uw, (e+p)u]^T \quad (3)$$

$$G_2 = [\rho v, \rho vu, \rho v^2 + p, \rho vw, (e+p)v]^T \quad (4)$$

$$G_3 = [\rho w, \rho wu, \rho wv, \rho w^2 + p, (e+p)w]^T \quad (5)$$

식(2)~(5)에서 u, v, w 는 각각 x, y, z 축 방향의 속도성분, ρ 는 밀도, p 는 압력, e 는 단위체적당의 전에너지이다.

지배방정식 (1)은 비정상 시간전진기법과 내재적으로 근사 인자 분해된 Beam과 Warming의 방법에 의해 차분화되었다. 시간에 대해서는 1차 정확도를 갖는 오일러 후진차분법을 사용하여 적분하였고, 비점성 유속 벡터는 시간에 대한 2차 정확도의 오차를 갖도록 선형화하였으며, 각 좌표 방향으로 근사 인자분해하였다. 또한 수치적 안정성과 수렴성의 향상을 위해서 2차와 4차 정확도의 인공점성^[14]을 내재적인 방법으로 포함하여 계산하였다.

3. TVC 성능 파라미터

단분사공 SITVC에 의한 추력은 노즐 축 방향으로의 축추력(axial thrust), 2차 분사 제트의 간섭으로 발생하는 측추력(side thrust)으로 구분된다. 추력은 분사면과 연소실벽을 포함하는 노즐벽 압력분포를 적분함으로써 획득되며, 각 방향으로의 추력계수는 식(6)~(8)과 같이 표현된다.

$$C_f = \int_{r_i}^{r_e} \int_0^{2\pi} (p_w - p_a) r_w dr_w d\theta + p_i A_i \quad (6)$$

$$C_{fs} = \int_{z_i}^{z_e} \int_0^{2\pi} (P_w - P_a) r_w \cos \theta dz d\theta \quad (7)$$

$$C_{\theta} = \int_{z_i}^{z_e} \int_0^{2\pi} (p_w - p_a) r_w \sin \theta dz d\theta \quad (8)$$

여기서, C_f, C_{fs}, C_{θ} 는 2차 분사제트가 수직 방향으로 분사된다고 생각할 때, 각각 축 및 수직, 수평추력계수를 나타내며, z, r, θ 는 각각 축, 반경, 원주방향 좌표이다. 또한 아래첨자 w, a 는 각각 노즐벽, 대기조건을 나타내며, 아래첨자 i, e 는 각각 노즐의 입구와 출구를 나타낸다.

2차 분사제트에 의한 추력벡터제어 성능을 나타내는 비추력비(specific impulse ratio)는 2차 분사제트에 의한 측비추력 대 축비추력의 비로서 성능비로도 불리우며 식(9)와 같이, 축추력과 비행방향을

나타내는 전향각(deflection angle)은 식(10)과 같이 표현된다^[11].

$$K = \frac{F_s / \dot{m}_s}{F_p / \dot{m}_p} = \frac{C_{fs}}{C_f} \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_s} \quad (9)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{F_s}{F_p} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{C_{fs}}{C_f} \right] \quad (10)$$

위 식에서 F_p, F_s 는 각각 축추력 및 측추력을, \dot{m}_p, \dot{m}_s 는 각각 주류와 2차분사제트의 질량유량을 나타낸다. 여기서 F_s 는 수직추력계수(C_{fs})로부터 계산된 값이다.

4 SITVC 성능변화 해석

전압력비 및 2차 분사구 위치에 따른 SITVC 성능변화를 고찰하기 위하여 추력비(F_s/F_p), 비추력비(K) 및 질량유량비(\dot{m}_s/\dot{m}_p)를 주요 파라미터로 추력비, 비추력비 및 전향각 제어성능에 대해 수치계산하였다.

적용된 수치해석 방법과 결과의 타당성을 검증하기 위하여 Masuya^[8]에 의한 공기를 작동유체로 하는 단공 SITVC 실험결과와 비교하였다. 대상 수축-팽창노즐은 Fig. 2에서와 같이 팽창반각 9.6°, 목 직경 26 mm, 노즐 목에 대한 노즐 출구 면적비 3.54의 원추형이다. 사용된 격자는 주 노즐과 2차 분사 제트 그리고 노즐 외부의 풀럼을 포함하며 3개의 블록(110×21×75, 15×11×15, 55×41×75)으로 구성되었다. 작동유체로는 주유동, 2차유동 모두 공기를 사용하였고 주 노즐의 전압력이 2.0 MPa일 때, 2차 분사 제트의 전압력이 0.5 MPa, 1.1 MPa인 경우에 대하여 비교하였다.

Fig. 3에서는 전압력비 0.25 0.55일 경우, 노즐출구에서의 마하수를 비교하고 있다. 여기서 Y/d는 2차 분사공의 직경으로 무차원화된 반경방향 좌표이며 노즐축을 기준으로 2차 분사공 방향으로 음의 값을 나타낸다. Fig. 3에서 전압력비가 0.25일 때는 출구에서의 마하수가 1차원 등엔트로피 팽창에 의한

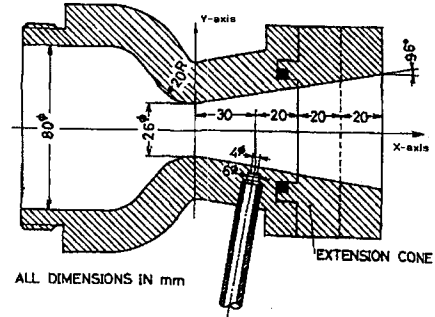


Fig. 2 9.6° conical nozzle^[8]

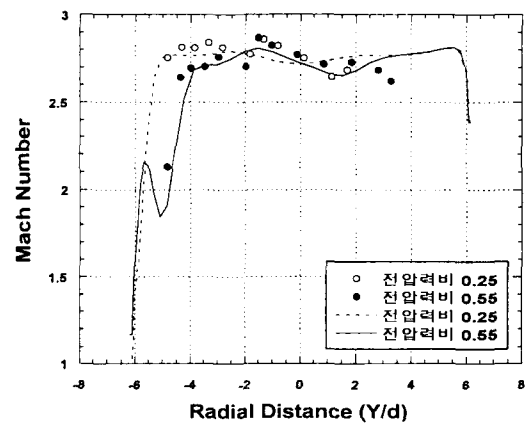


Fig. 3. Comparison of predicted (lines) and experimented (circles) nozzle exit Mach numbers along Y-axis

경향과 유사하게 나타나는데 비해, 2차 분사 제트의 전압력비가 0.55로 증가하면 주 노즐 축 방향의 유동에 간섭되는 2차 분사 제트에 의한 질량유량이 증가하여 낮은 전압력비에 비해 상대적으로 강한 압축파가 발생하며 노즐중심부로 저마하수 영역이 확대되고 있는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 4에는 2차 분사구를 지나는 단면 노즐벽에서의 압력 변화를 비교하였다. 여기서 압력비는 2차 분사가 배제되었을 경우의 벽압력으로 무차원화된 값이며, 2차 분사제트에 의한 영향이 없을 경우에는 1의 값을 가지게 된다. 그리고 Axial Distance는 2차 분사 제트의 위치를 원점으로 한 축방향의 길이를 2차 분사 제트의 직경으로 나눈 값을 나타낸다. Fig. 4에서 2차 분사 영역에서 벽 압력이 상당히 저하되어 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 Newton 등^[13]이 언급한 바와 같이

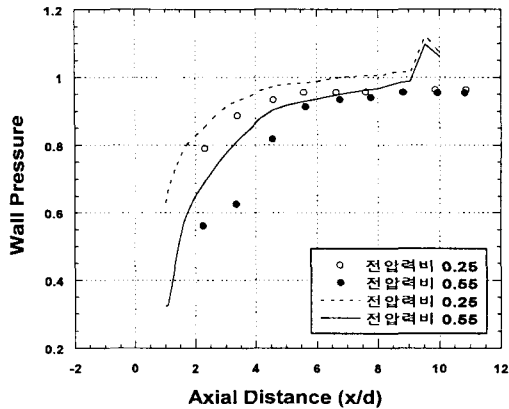


Fig. 4. Comparison of predicted(lines) and experimented(circles) axial pressure distribution on the nozzle wall

2차 분사 제트에 의한 재순환 유동에 의한 것이다. 또한 노즐출구에서의 급격한 압력상승은 노즐출구 압력과 대기압의 차이로 인한 파팽창으로 인한 것으로 실험에서는 관찰되지 않고 있는데 이는 점성에 의한 효과가 배제되었기 때문으로 여겨진다. 실험[8]에서 언급된 것과 같이 난이도에 따른 측정오차가 10% 정도인 것을 고려하면, 실험과 수치계산이 근접한 결과를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

2차 분사 제트에 의한 추력 방향 제어의 특성을 살펴보기 위해 Fig. 2에 도시된 노즐을 대상으로 2차 분사 제트 대 주노즐 유동의 전압력비를 0.25로부터 2까지 증가시키면서 이에 따른 성능의 변화를 알아보려고 하였다. 전압력비의 증가와 함께 2차 분사 제트에 의한 간섭효과와 측추력의 변화를 밝히기 위해 2차 분사공의 위치를 노즐중심에서의 마하수가 각각 1.8(경우 A), 2.1(경우 B), 2.4(경우 C)이 되는 세 위치에 대하여 2차 분사제트의 전압력비 변화에 의한 유동장 및 추력방향제어 성능의 변화를 계산하였다. Fig. 5는 전압력비가 1.25인 경우 A에서 2차 제트 분사구를 원주방향각 0° 로 기준하였을 때, 원주방향 위치에 따른 노즐벽면에서의 축 방향의 무차원화된 압력 분포를 보이고 있다. 여기서 Newton 등^[13]의 실험에 의하여 입증된 2차 분사공에 근접한 하류영역에서 2차 분사제트의 파팽창에 의한 압력저하가 명확히 발생하고 있음을 관찰할

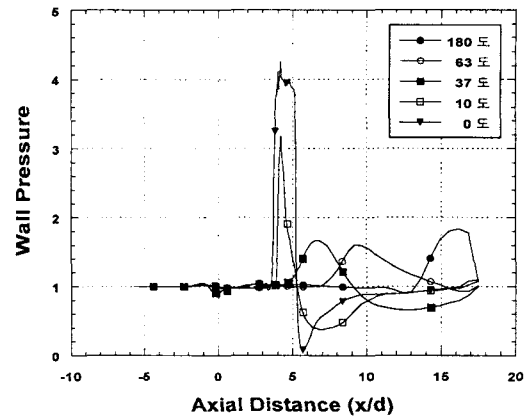


Fig. 5. Circumferential variation of axial pressure distributions along the nozzle wall(case A, $p_s/p_b = 1.25$)

수 있다. 분사기 바로 상류에서 벽 압력은 충격파에 의해 급격히 증가되며 2차 분사 제트에 의한 이러한 압력상승은 2차 분사의 전압력의 크기에 비례하여 증가한다. Fig. 5에서와 같이 노즐벽 원주 방향으로 분사구로부터 멀어짐에 따라 충격파의 발생위치는 하류로 이동하며 그 압력변화의 크기도 감소되고 있음을 관찰할 수 있다. 재순환류와 그에 따른 역압력 구배는 강한 충격파가 생성되는 분사구로부터 급속히 약화되어 원주각 35° 범위까지만 유지되며, 그 이상의 영역에서는 충격파 주사에 의한 압력상승만이 발생된다. 또한 박리에 의한 압력저하보다는 충격파에 의한 압력상승이 크고 넓게 나타나며, Newton과 Spaid^[13]의 결과와 유사한 경향을 보이고 있다. Fig. 5에서 원주각 180° 에서의 압력증가는 노즐출구 부분에 주사된 궁형충격파에 의한 것이다. 2차 제트 분사구가 하류에 존재하는 경우 B에서 전압력비가 0.25, 0.75, 1.25일 때의 $\theta = 0^\circ$, 즉 2차 분사구를 지나는 축 방향으로의 노즐벽 압력변화를 Fig. 6에 보이고 있다. 전압력비의 증가에 따라 충격파와 재순환 유동이 활발해지고 있는 것을 볼 수 있다. 여기서 압력비 1.25에서의 압력변화를 경우 A에서의 결과(Fig. 5)와 비교해 볼 때, 최대 압력비는 6이상으로 거의 유사하나 2차제트 분사에 따른 재순환영역이 경우 A에 비하여 광범위하며 압력의 회복도 느리게 이루어지고 있는 것으로 나타나고 있

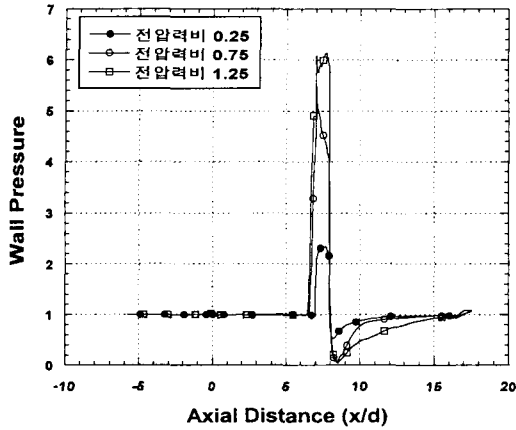


Fig. 6. Axial pressure distributions along the nozzle wall (case B)

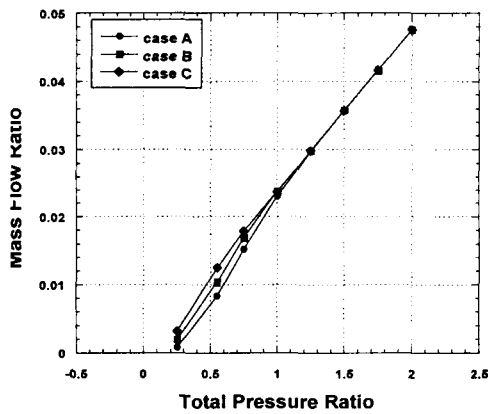


Fig. 7. Secondary mass flow rates due to secondary total pressure

다. 즉, 동일한 전압력비에 대하여 주유동의 속도가 증가함에 따라 압력회복이 느려짐을 알 수 있다. 또한 원주각 0° 부근에서 2차분사의 운동량이 유지되어 발생하는 2차제트 코어영역이 전압력비가 클수록 뚜렷이 발생한다. 따라서 전압력의 증가에 따라 강한 주사, 반사충격파에 의한 압력상승과 함께, 압력회복이 지연됨을 알 수 있다

2차 제트의 질량유량비는 Fig. 7과 같이 전압력비에 따라 선형으로 변화하며, 전압력비가 1보다 큰 경우에는 2차 분사 전압력 상승에 따른 2차 분사 질량의 증가가 주유동에 전혀 영향을 받지 않는 것

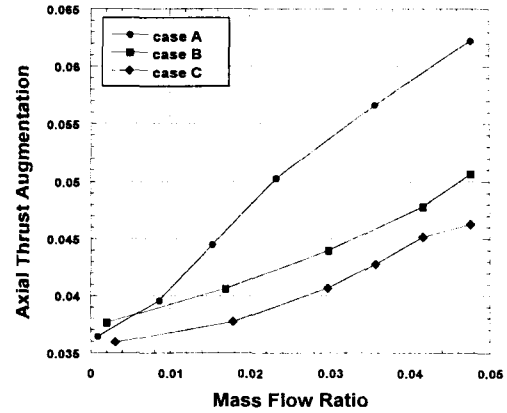


Fig. 8. Effect of secondary injection location upon axial thrust augmentation

을 볼 수 있다. 이는 전압력비가 증가함에 따라 주유동 압력이 상대적으로 저하되어 2차 질량유량이 2차 분사 전압력에 의해서만 결정되기 때문이다. 전압력비가 1보다 작은 경우에 약간의 변화가 발생하는데, 여기서 2차 분사구가 하류에 위치할수록, 즉 2차 분사의 배압이 낮을수록 질량유량이 커지게 됨을 볼 수 있다. 이와 같은 전압력비와 질량유량비와의 선형관계를 바탕으로이후 추력, 비추력비, 전향각 등의 SITVC성능을 질량유량비에 대한 함수로 나타내도록 한다.

Fig. 8에서 축추력은 2차 분사량의 증가에 따라 증가하고 있으며 이는 Guhse^[5]의 연구에서와 같이, 추력방향제어와 더불어 추력의 증가를 발생하는 SITVC의 전형적인 장점을 보여주고 있다

Fig. 8에서 2차 분사가 상류에서 이루어 질 경우, 즉 경우 A에서의 추력이 하류에서 2차 분사가 간섭한 경우 B, C에서의 추력보다 월등히 큰 것을 관찰할 수 있는데, 이는 2차 분사가 이루어 지는 상류에서는 주 노즐에 의한 유동속도가 크지 않아서 이에 간섭하는 2차 분사에 의한 충격파에 의한 압력과 주유동의 흐름방향이 크게 변화되지 않아 2차분사를 포함한 전체의 유동이 축추력의향상에 기여하기 때문이다. 이에 대하여 하류에서 간섭한 경우 B, C의 2차 분사에 의한 추력의 증가는 완만하고 유사한 증가율을 보이는 것을 알 수 있다. 이와 같은 2차 분사 위치에 의한 성능의 변화는 Fig. 9에서 질량유량비

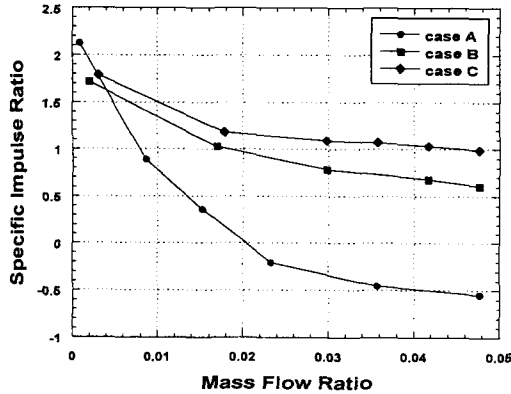


Fig. 9. Effect of secondary injection location upon specific impulse ratio

에 대한 비추력비의 변화에서도 확인된다. Green 등^[14]에 의하면 2차 분사 제트의 경우, 비추력비는 질량유량비에 대하여 선형으로 비례하는 것으로, Inouye^[7] 등은 가스 분사인 경우에는 비선형적으로 변화하는 것으로 보고하였으며 본 연구에서도 비선형적인 비추력의 감소를 나타내고 있다. 2차 분사 질량의 증가는 축, 측추력 모두를 크게 하나 강한 충격파와 그에 따른 엔트로피의 증가에 따라 비추력 성능은 저하되게 된다. 따라서 Guhse^[5]의 결과와 같이 작은 2차 분사 질량유량에서 측비추력의 손실이 적게 됨을 알 수 있다. 또한 2차 분사 위치가 하류에 존재할수록 측추력은 커지고 축추력은 감소되어 비추력비성능이 향상됨을 확인할 수 있다. 여기서 비추력비는 SITVC의 성능을 의미하며 이는 비가역성 의한 손실과 직접 연관된다. 따라서 동일한 전압력비에 대해 2차 제트 분사위치가 하류에 존재할수록 충격파에 의한 SITVC 제어특성은 향상되고 비행에 위한 비추력성능은 저하되며, 질량유량이 적을수록 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 10은 측추력 대 주추력의 비를 질량유량의 함수로 표현한 것이다. 그림에서와 같이 2차 분사제트의 질량유량이 증가할수록 측추력이 증가하고 있음을 관찰할 수 있다. 여기서 경우 B와 경우C에서의 추력비의 상승률을 비교해보면 동일한 질량비에 대하여 2차 분사구가 하류에 위치할수록, 즉 주유동의 속도가 증가하여 간섭되는 충격파의 강도가 증가할

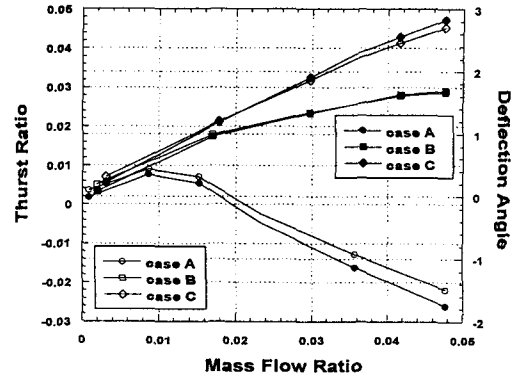


Fig. 10. Effect of secondary injection location upon the thrust ratio (blank marks) and deflection angle (solid marks)

수록 커짐을 알 수 있다. 경우 A와 같이 궁형 충격파가 조기에 노즐벽과 만나는 경우 질량유량비가 증가하면서 측력은 감소하다가 반대방향으로 작용함을 볼 수 있다. 이는 전압력비가 증가함에 따라 궁형 충격파가 경사충격파의 형태로 발전하여 노즐벽으로부터 반사되어 반사 충격파 하류에서 압력이 상승되기 때문이다. 따라서 2차 분사 제트로 야기된 충격파가 주노즐 출구부분에 주사되어 주유동 전체에 간섭되고 반사되지 않은 상태로 방출될 때, 최대의 측추력을 발생하게 됨을 알 수 있다. Fig. 10에서 우측 수직축은 SITVC에 의한 추력의 벡터각, 즉, 전향각을 나타낸다. 전향각은 식 (10)에서와 같이 추력비의 함수가 되므로 도시된 추력비와 동일한 변화를 나타내게 된다. 전체적으로 전향각은 작은 전압력비로 인해 3° 이내로 크지 않은 것으로 나타나고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 전압력비에 따른 질량유량비 및 2차 제트 분사 위치 변화에 따른 SITVC의 성능특성을 수치해석하였다. 그 결과, 질량유량비는 2차 분사 제트의 전압력비에 따라 선형적으로 증가되며, 주 추력은 질량유량에 따라 지속적으로 증가하나 분사구가 상류에 위치할수록 2차 분사 제트에 의한 충

격파의 강도가 감소되며 이에 따라 전압력손실 및 추력성능의 손실이 적은 것으로 나타났다. 또한 SITVC를 위한 측추력은 2차 분사 제트의 질량유량에 비례하여 증가하고, 특히 궁형 충격파가 노즐 끝단에 주사될 때 최대가 되며, 추력비는 2차 분사구가 하류에 위치할수록, 즉 2차 분사에 의한 충격파의 강도가 증가될수록 커지는 것으로 나타났다. 그러나 측추력에 대한 비추력비는 질량유량비와 비선형적으로 반비례하며 2차 분사 제트가 노즐 상류에 위치할수록 비추력 손실이 크다. 따라서 동일한 전압력비에 대해 2차 제트 분사위치가 하류에 위치할수록 측추력 증가에 의한 SITVC 제어특성은 향상되고 질량유량이 적을수록, 즉 낮은 전압력비에서 비추력 손실이 적게됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Huzel, D.K. and Huang, D.H, Modern Engineering for Design of Liquid Propellant Rocket Engines, AIAA Publication, Vol. 147, 1992.
2. Walker R.E. and Shandor M., "Influence of Injectant Properties for Fluid Injection Thrust Vector Control", Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 1, No. 4, pp. 409~413, 1964.
3. Broadwell J.E. "Analysis of Fluid Mechanics of Secondary Injection for Thrust Vector Control", AIAA Journal, Vol. 1, No. 10, pp. 580~585, 1963.
4. Guhse R.D., "On Secondary Gas Injection in Supersonic Flow", Journal of Spacecraft and Rockets", Vol. 3, No. 1, pp.143~149, 1966.
5. "Solid Rocket Thrust Vector Control", NASA SP-8114, Dec., pp.70~116, 1974.
6. Inouye T., "Experiments on Rocket Thrust Vector Control by Hot Gas Injection", Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 3, No. 4, pp.737~739, 1966.
7. Masuya G., "Secondary Gas Injection Into a Supersonic Conical Nozzle", AIAA Journal, Vol.15, No.3, pp301~302, 1977.
8. Wing D.J. and Giuliano V. J., "Fluidic Thrust Vectoring of an Axisymmetric Exhaust Nozzle at Static Conditions", ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, Vancouver, B.C, Canada, FEDSM97-3228, June 22~26, pp6, 1997.
9. Grasso F. and Magi V., "Simulation of Transverse Gas Injection in High Expansion Rocket Nozzles", AIAA Journal, Vol.33, No.1, pp56~62, 1995.
10. Balu R., "Analysis of Performance of a Hot Gas Injection Thrust Vector Control System", J. Propulsion, Vol. 7, No. 4, pp.580~585, 1991.
11. Newton J.F. and Spaid F.M., "Interaction of Secondary Injectants and Rocket Exhausts for Thrust Vector Control", Journal of the American Rocket Society. pp.1203~1211, 1962.
12. Green, C.J. and McCullough, F. M., "Liquid Injection Thrust Control," AIAA J., Vol. 1, No. 3, pp. 573~578, 1963.