

2차 노즐목을 갖는 초음속 이젝터의 최적화

박형주* · 윤시경* · 염효원* · 성홍계**

Optimization of supersonic ejector

Hyungju Park* · Shikyung Yoon* · Hyowon Yeom* · Hon-Gye Sung**

ABSTRACT

The effects of design parameters of supersonic ejector system under the assumption of constant pressure mixing were performed. Design parameters were mass flow rate ratio, area ratio between primary and secondary flow, and primary Mach number. 1-D theoretical performance of ejector in terms of pressure ratio and contraction ratio with and without loss mechanism such as diffuser efficiency and friction were considered.

초 록

1차 유동과 2차 유동이 일정 압력으로 혼합하는 초음속 이젝터의 설계 인자들에 대한 연구를 수행하였다. 선정된 이젝터의 설계 인자는 1)질량유량비 2)면적비 3)1차유동의 마하수 이다. 이를 위해 이젝터 유동을 1차원으로 가정하였으며 손실이 있는 경우와 이상적인 경우에 대해 이젝터의 성능을 압력비의 향으로 모사하였고 요구되는 이젝터의 수축률을 계산하였다. 또, 이젝터의 최적 설계를 위해 손실을 고려한 경우와 이상적인 경우를 비교하여 작동조건에 필요한 설계점을 도출하였다.

Key Words: Supersonic ejector(초음속 이젝터), Constant pressure mixing(일정압력혼합), High altitude simulation(고고도 모사), Ejector performance(이젝터성능),

1. 서 론

이젝터는 고압의 유동을 노즐로 분출시켜 고속 저압 유동을 형성함으로써 고속 유동 주위의 저속 고압 흡입기체와 운동량 교환을 통해 흡입 기체를 보다 높은 압력까지 압축하여 배출시키

는 장치이다.

이젝터는 노즐의 형상 및 설치방법에 따라 원형 이젝터(central ejector)와 환형 이젝터(annular ejector)로 나눌 수 있다. 환형 이젝터는 환형 기법을 이용하여 관로벽면에 설치된 노즐로부터 고속유동을 분사시키는 기법으로 동일 유량으로 작동하는 원형 이젝터에 비해 디퓨저 길이를 50% 감소시킬 수 있다. 또한, 이젝터의 혼합관로에서 발생하는 추가적인 유동 압축으로 인해 저속의 고압유동과 고속의 저압유동 간에 고효

* 항공대학교 항공우주 및 기계공학과

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

울의 상호작용이 이루어진다.

항공우주분야에서 이젝터는 고고도환경을 모사해주기 위해서 사용한다. 고 고도에서 운용되는 비행체의 경우 비행 시 노즐에서 형성되는 추력은 지상의 높은 대기압에 의해 지상에서와는 크게 다르게 나타난다. 그러므로 지상에서 고 고도에서의 유동 모사를 위해서는 추가적인 고 고도시험설비가 요구되며, 이를 위해 주로 디퓨저와 이젝터가 사용된다.

이젝터에 대한 연구는 20세기 초반부터 시작되었다. 초반에는 작동 원리에 대한 연구가 주로 진행되었다. Keenan and Neumann[1]은 1950년에 처음 포괄적인 이론 및 실험적 연구를 수행하였다. 이들은 처음으로 일정압력 모델 및 일정면적 모델을 개발하였으며 이후, 이들의 모델을 기반으로 많은 연구가 수행되었다.[2,3] Keenan and Neumann[1]은 1차 유동과 2차 유동을 동일한 작동기체를 사용하였으며 노즐과 디퓨저의 효율 및 마찰에 의한 손실을 무시하였다. 그럼에도 불구하고 그들의 연구결과는 실험값(entrainment ratio, 압력비)과 비교했을 때 약 85%의 정확도를 보였다. 이후, Emanuel[2]은 정상상태 이젝터의 최적 성능을 해석적으로 구하였다.

국내에서도 이젝터에 관한 다양한 연구가 진행되었지만 항공우주분야와 관련하여 항공우주연구원에서 초음속 지상 추진실험과 관련된 연구가 진행되었다.[4,5]

최근에는 컴퓨터와 수치해석 기술의 발달로 인해 이젝터의 1차원 성능해석 뿐만 아니라 2차원 및 3차원 형상에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. Hedges and Hill[6]은 유한차분법을 활용한 이젝터의 CFD 해석을 수행하였다. 상용코드인 Fluent를 이용한 해석도 다양하게 수행되었다. Riffat 등은 [7] Fluent의 k-e 모델을 이용하여 1차 노즐 위치 변화에 따른 이젝터의 성능을 수치 해석적으로 살펴보았으며, Bartosiewicz 등은[8,9] Fluent를 사용하여 이젝터를 해석해본결과 k-w sst(shear stress transport) 모델이 실험결과와 가장 잘 일치함을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 이젝터 형상 결정

2.1.1 1차원적 해석 방법

지난 수세기 동안 이젝터에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며 최근에는 고 고도 환경 모사를 위한 이젝터의 최적 성능에 관심이 집중되고 있다. [3] 본 논문에서는 일정압력혼합 이론을 이용하여 이젝터를 1차원으로 해석하였으며 이를 바탕으로 이젝터를 설계하고 수치해석을 수행하였다. 1차원으로 해석하는데 사용한 가정 사항들은 기존 논문을 참고하였다. [3](Fig. 1 참조)

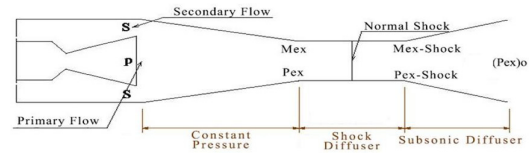


Fig. 1 Schematic of constant pressure ejector

2.1.2 이젝터 형상의 최적화

일정 압력으로 두 유동이 혼합($P_{ex} = P_s = P_p$)되기 때문에 압력에 의한 힘은 존재 하지 않는다. 벽면 마찰력을 F_f 라고 할 때, 운동량 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{m}_p V_p + \dot{m}_s V_s - (\dot{m}_p + \dot{m}_s) V_{ex} = F_f \quad (1)$$

유동의 속도는 이젝터 목(혼합이 완료되는 지점, A_{ex})에서 최대이기 때문에 벽면 마찰로 인한 손실은 이 지점에서 가장 크다. 따라서 손실을 계산하기 위한 압력은 이 지점의 압력을 사용한다. 벽면 마찰을 유도하기 위해 원추형 노즐의 이젝터를 단면적이 A_{ex} 인 원통형으로 가정하고 이젝터 입구에서부터의 거리로 나누어주면(l/d) 실제 원추형 이젝터의 압력 손실을 고려할 수 있다. 따라서 F_f 는 다음과 같다.

$$F_f = \left(C_f \frac{l}{2d} \right) P_{ex} \gamma_{ex} M_{ex}^2 A_{Er} \quad (2)$$

위 식을 $A_p + A_s$ 로 나누면 운동량 방정식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\gamma_p M_p^2}{1 + \frac{A_s}{A_p}} + \frac{\gamma_s M_s^2}{1 + \frac{A_p}{A_s}} - \frac{\gamma_{ex} M_{ex}^2 A_{ex}}{A_p + A_s} = \frac{F_f}{(A_p + A_s) P_{ex}} \quad (3)$$

위의 지배방정식들을 이용하여 이젝터의 수축률(이젝터 목 면적/(1차 유동 면적 + 2차 유동 면적))을 해석적으로 구해보면 다음과 같다.

$$t = \frac{A_{ex}}{A_p + A_s} = \frac{M_s}{M_{ex} \left(1 + \frac{\gamma_{ex} - 1}{2} M_{ex}^2\right)^{\frac{1}{2}}} \frac{\left(\frac{\dot{m}_p}{m_s} + 1\right)}{\left(\frac{A_p}{A_s} + 1\right)} \times \sqrt{\frac{\left(1 + \frac{\dot{m}_p}{m_s} \frac{R_p}{R_s}\right) \left(\frac{c_{pp} \dot{m}_p (T_p)_o}{c_{ps} m_s (T_s)_o} + 1\right)}{\beta \left(1 + \frac{\dot{m}_p}{m_s} \frac{\gamma_p}{\gamma_s}\right) \left(\frac{c_{pp} \dot{m}_p}{c_{ps} m_s} + 1\right)}} \frac{(T_s)_o}{T_s} \quad (4)$$

3. 결 과

Table. 1, 2는 손실을 고려한 경우와 그렇지 않은 이상적인 이젝터의 성능을 비교하기 위한 초기 값이다.

Table 1 Initial settings for ejector performance

M_s	γ_p	γ_s	R_s/R_p	C_{ps}/C_{pp}	$(T_p)_o/(T_s)_o$
0.15	1.4	1.4	0.38	0.35	1.0

Table 2 Friction factor and diffuser efficiency

이상적인 경우		손실을 고려한 경우	
디퓨저 효율 (η)	마찰계수 ($C_f l/2d$)	디퓨저 효율 (η)	마찰계수 ($C_f l/2d$)
1.0	0.0	0.6	0.05

위의 조건들로 다양한 변수들(질량유량비, 면적비, 1차 유동의 마하수)의 영향을 이젝터의 압력비로 살펴보았으며 (Eq. 5 참조) 그 때 이젝터의 수축률(t)을 구하고 특정 조건에 대한 최적 설계점을 구하였다. (Eq. 4 참조)

$$\frac{(P_{ex})_0}{P_s} = \frac{(P_{ex})_{shock}}{P_s} \left[1 + \frac{\gamma_{ex} - 1}{2} (M_{ex})_{shock}^2\right] = \frac{2\gamma_{ex} M_{ex}^2 - (\gamma_{ex} - 1)}{\gamma_{ex} + 1} \left[1 + \frac{\gamma_{ex} - 1}{2} \frac{(\gamma_{ex} - 1) M_{ex}^2 + 2}{2\gamma_{ex} M_{ex}^2 - (\gamma_{ex} - 1)}\right]^{\frac{\eta \gamma_{ex}}{\gamma_{ex} - 1}} \quad \dots(5)$$

Figure 2은 특정 질량유량비에 대한 이젝터의 압력비와 그때의 수축률을 나타낸 그래프이다.

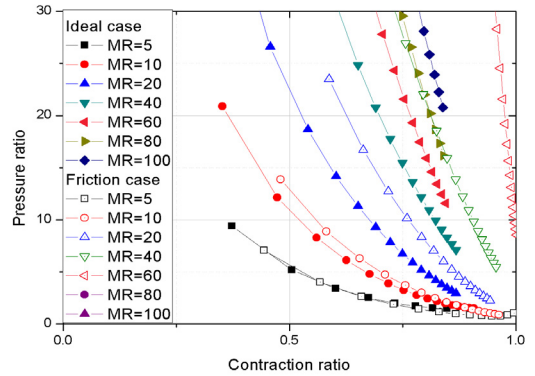


Fig. 2 Effect of mass flow rate ratio(\dot{m}_p/\dot{m}_s) on ejector's pressure ratio

마찰효과와 노즐 디퓨저의 효율을 고려하였을 경우와 고려하지 않았을 경우 질량유량비(\dot{m}_p/\dot{m}_s)에 의한 변화 경향은 유사하며 마찰을 고려할 경우 동일 질량유량으로 모사할 수 있는 압력이 커진다. (Eq. 5 참조) 이는 고고도 모사장치로서의 성능이 감소를 의미한다. 또, 실제 현상과 같이 마찰과 효율을 모델링하여 고려할 경우 높은 질량유량비에서는 이젝터를 작동시킬 수 없음을 확인할 수 있다. 예를 들어 질량유량비가 100일 때, 이상적인 경우 이젝터의 수축률(contraction ratio)이 1보다 작지만 마찰을 고려할 경우 1보다 커서 일정압력 이젝터에 적합하지 않다. Fig. 2을 살펴보면 마찰을 고려할 경우 질량유량비가 50 이상에서 수축률이 1보다 커지기 때문에 적절하지 않음을 확인할 수 있고, 이러한 점들은 실제 이젝터 설계 시 유의해야한다.

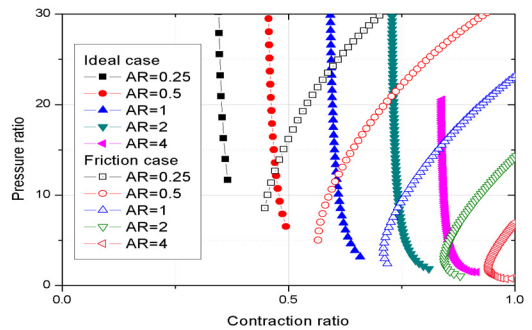


Fig. 3 Effect of area ratio(A_p/A_s) on ejector's pressure ratio

질량유량비에 의한 영향과는 다르게 면적비는 마찰과 디퓨저 효율을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 경향성이 서로 다르게 나타났다. 이상적인 경우 동일 면적비에서 이젝터의 수축률이 감소할 경우 압력비가 매우 급격하게 증가하였지만, 손실을 고려한 경우 동일 면적비에서 수축률이 감소할 경우 주로 압력비가 감소하나 좁은 영역에서 증가함을 확인할 수 있다. 그 이유는 Eq. 5에서 디퓨저 효율이 지수항에 표현되어 있기 때문에 디퓨저 효율을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 경향성에서 차이가 발생한다. 또, Eq. 5를 구하는데 필요한 이젝터 혼합영역에서의 마하수(M_{ex})를 계산하는 과정에서 마찰계수가 포함되기 때문에 서로 다른 경향을 보인다.

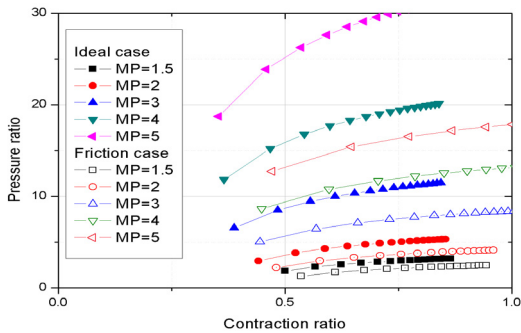


Fig. 4 Effect of primary Mach number on ejector's pressure ratio

Figure 4는 1차 유동 즉, 모사하려고 하는 추진기관의 마하수 영향을 나타낸 그래프이다. 이상적인 경우 마하수 변화에 따른 압력비 변화가 큰 반면, 손실을 고려한 경우 마하수 변화에 따른 압력비 변화가 크지 않다. 뿐만 아니라, 손실을 고려한 경우 동일 마하수에서 이상적인 경우와 비교했을 때 더욱 큰 수축률 즉, 이젝터의 2차 목 면적이 훨씬 작아져야함을 알 수 있다. 이는 아래의 식을 통해 확인할 수 있다.

$$M_p^2 = \frac{A_s}{A_p \gamma_p} \left[\gamma_{ex} M_{ex}^2 t \left(1 + \frac{A_p}{A_s} \right) \left(1 + C_f \frac{L}{2d} \right) - \gamma_s M_s^2 \right] \quad (6)$$

Figure 5은 초기 조건이 주어졌을 때 결정되는 압력비와 이젝터의 수축률을 나타낸 그래프이다. 마찰에 의해 속도 성분이 작아지고 압력성분으로 증가함에 따라 큰 수축률이 없어도 충분히

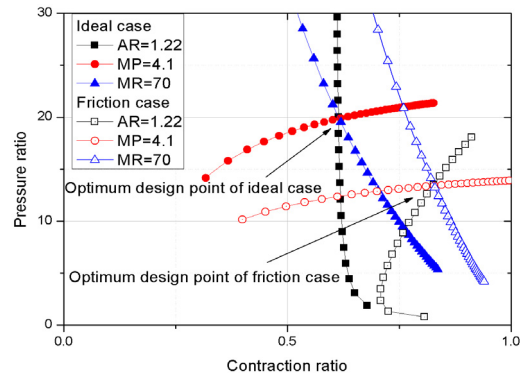


Fig. 5 Comparison of optimum design point with initial operating condition

일정 압력을 모사할 수 있다. 하지만 모사할 수 있는 압력이 증가한다. 즉 모사할 수 있는 고도가 낮아지게 된다.

Table 3 Initial settings for ejector performance

M_s	γ_p	γ_s	R_s/R_p	C_{ps}/C_{fp}	$(T_p)_0/(T_s)_0$
0.15	1.4	1.4	1.0	1.0	1.0

위 조건에 대해 성능 계산을 해본 결과 이젝터의 수축률은 약 0.6이며 압력비는 약 20이었다. 이젝터의 목 크기는 1차 유동과 2차 유동의 면적의 0.6배이며 모사하고자 하는 압력은 대기압의 1/20배이다.

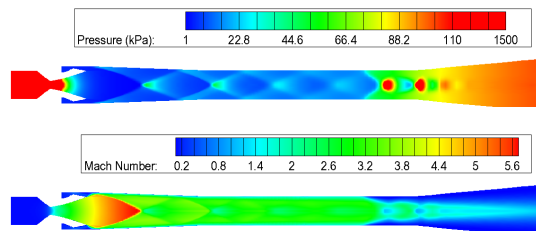
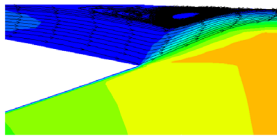


Fig. 6 Mach and pressure contour of ejector

Figure 6은 설계한 이젝터의 수치해석 결과이다. 추진기관의 챔버 압력은 15기압으로 설정했으며 추진기관의 노즐 출구 마하수는 약 4.1이 되도록 설계하였다. 수치해석과 성능해석결과를 비교해본 결과 추진기관의 고고도 모사를 위한 압력이 성능해석결과: 약5066 Pa, 수치해석결과: 4330 Pa로 오차가 존재하였다. 이 현상은 Fig. 7에 나타난 바와 같이 2차 유동 출구에서 강한



재순환영역의 발생으로 인해 유로 면적이 감소하여 압력이 충분히 팽창하지 못해 발생하였다.

Fig. 7 Flow pattern behind the secondary outlet

또 위의 동일한 작동조건으로 손실을 고려하여 새롭게 이젝터를 설계하여 수치해석을 수행하였고 벽면에서의 압력 분포를 Fig. 9에 나타내었다. 압력분포는 두 형상 모두 유사함을 확인할 수 있으며 손실을 고려한 형상의 경우 중심축에서 압력의 분포가 완만해 졌음을 확인할 수 있다.

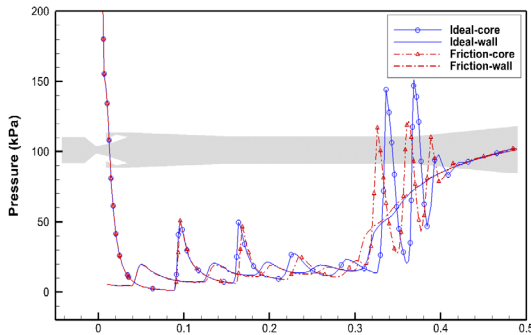


Fig. 9 Pressure distribution along the ejector

4. 결 론

2차 노즐목을 갖는 이젝터의 설계 최적화에 관한 연구를 수행하였다. 최적 설계점을 찾기 위해 이젝터 유동을 1차원으로 가정하였으며 1차 유동과 2차 유동이 일정압력으로 혼합될 수 있도록 혼합부분의 면적을 축소하였다. 특정 운용 조건에서 이젝터의 수축률과 그때의 압력비를 이상적인 조건, 즉 손실이 없는 조건과 손실이 있는 조건에 대해 성능 해석 및 수치 해석적으로 살펴보았다.

- 1) 손실이 존재하는 경우와 그렇지 않은 경우 이젝터의 압력비에 대한 면적비, 질량유량비, 1차 유동의 마하수의 영향이 상이하였다.
- 2) 수치해석결과 2차 유동의 출구에서 강한 재순환영역으로 인해 충분히 팽창되지 못해 더 낮은 압력 및 높은 속도의 조건이 모사되었다.

참 고 문 헌

1. Keenan, J.H. and Neumann, E.P., 1950, "An Investigation of Ejector Design by Analysis and Experiment," J. Applied Mechanics, Trans ASME, 72, pp. 299-309.
2. Emanuel, G., 1976, "Optimum Performance for a Single-Stage Gaseous Ejector," AIAA J., 14(9), pp. 1292-1296.
3. 윤시경, 염효원, 성홍계, 신완순, "고고도 엔진 성능모사를 위한 2차 노즐 목을 갖는 초음속 이젝터의 설계 인자 연구", 한국추진공학회, 2008,
4. 이양지, 차봉준, 양수석, 김형진, "초음속 추진 시험설비의 기본설계기법 연구", 한국추진공학회지, vol. 7, no. 4, pp.53-62, 2003
5. 이양지, 차봉준, 양수석, "초음속 지상추진시험설비의 이젝터 설계 기법 및 유동 특성 연구", 한국추진공학회지 vol. 10, no. 1, pp. 54~63, 2006
6. Hedges, K. R. and Hill, P. G., 1974, "Compressible Flow Ejectors Part I - Development of a Finite-Difference Flow Model," Journal of Fluids Engineering, Trans ASME, 96, pp. 272-281.
7. Riffat, S. B., Gan, G. and Smith, S., 1996, "Computational Fluid Dynamics Applied to Ejector Heat Pumps," Applied Thermal Engineering, 16(4), pp. 291-297.
8. Bartosiewicz, Y., Aidoun, Z., Desevaux, P. and Mercadier, Y., 2005, "Numerical and Experimental Investigations on Supersonic Ejectors," International Journal of Heat and Fluid Flow, 26, pp. 56-70.
9. Bartosiewicz, Y., Aidoun, Z. and Mercadier, Y., 2006, "Numerical Assessment of Ejector Operation for Refrigeration Applications Based on CFD," Applied Thermal Engineering, 26, pp. 604-612.