

고고도 엔진 성능모사를 위한 2차 노즐 목을 갖는 초음속 이젝터의 설계 인자 연구(II)

윤시경* · 염효원* · 성홍계** · 신완순***

Study on Design Parameters of Supersonic Ejectors to Simulate High Altitude Engine Test

Si-Kyung Yoon* · Hyo-Won Yeom** · Hong-Gye Sung*** · Wan-Soon Shin****

ABSTRACT

The effects of design parameters of supersonic ejector system under the assumption of constant pressure mixing; such as mass flow rate ratio, area ratio, Primary mach number on ejector system performance were investigated by theoretical formulations. And for a given design condition and working fluid, Computational Fluid Dynamics was conducted.

초 록

일정 압력으로 혼합하는 이젝터에서 수축률(Contraction Ratio)로 대변되는 초음속 이젝터 설계 인자에 대한 연구가 수행되었다. 이젝터 설계 인자는 1차 유동과 2차 유동의 질량 유량 비율, 1차 유동 면적과 2차 유동 면적의 비율, 1차 유동의 마하수에 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 그리고 특정 작동 조건에 대해 이젝터 유동 가시화 작업을 수행하였다.

Key Words: Constant pressure mixing(일정압력혼합), Supersonic Ejector(초음속 이젝터) Ejector Performance(이젝터 성능)

1. 서 론

고고도 환경에서 작동하는 추진기관은 작동 고도의 대기압이 지상에서의 대기압에 비하여 매우 낮고 노즐 팽창비가 크기 때문에 지상 연

소시험 시 노즐 내에서 비균일 유동박리가 발생하여 정확한 추력을 측정하는 것은 거의 불가능하다. 지상에서 추진체계의 성능을 최종적으로 입증하기 위해서는 실 비행 환경을 지상에서 모사하여 신뢰 있는 점화와 정확한 추력 특성을 확인하여야 하는데, 이를 위하여 고고도 환경 모사 지상연소 실험장치인 이젝터가 필요하다.

이젝터의 성능은 펌프와 같이 압력비로 결정되며 일반적으로 배기가스의 전압과 2차 유동

* 학생회원, 한국항공대학교 항공우주공학과

** 종신회원, 한국항공대학교 항공우주공학과

*** 정회원, 국방과학연구소

연락처, E-mail: hgsung@kau.ac.kr

동압의 비로 나타난다. 최적조건은 이 주어진 조건에서 압축비가 큰 경우를 의미 한다. 이러한 설계조건이 정해지면 이젝터의 형상 및 구조가 결정된다.

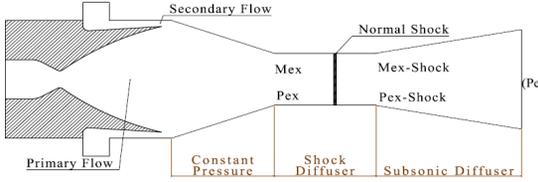


Fig. 1 Schematic of Constant Pressure Ejector

2. 본 론

2.1 가정

유동은 1차원 정상상태로 가정하며 에너지는 보존된다. 유동의 혼합은 이상적으로 이루어지며 일정 압력의 조건하에서 이루어진다. 따라서 혼합 후 유동은 아음속 또는 초음속이 될 수 있다. 이 혼합 유동의 마하수가 아음속인 이젝터를 아음속 이젝터라고 하고 초음속인 경우 초음속 이젝터라고 한다. 본 연구에서 사용한 초음속의 경우 Shock Diffuser가 혼합영역과 디퓨저 사이에 존재한다. 두 유동의 혼합 시 일정한 압력을 유지하기 위해 단면적은 감소해야 하며 이때 면적 변화는 혼합 유동의 상태량의 함수이다.

2.2 해석 모델

일정 압력으로 1차 유동(추진기관 배기가스)과 2차 유동이 혼합($P_{ex} = P_s = P_p$)되기 때문에 압력에 의한 힘은 존재 하지 않는다. 벽면 마찰력을 F_f 라고 할 때, 모멘텀 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)에서 최대이기 때문에 벽면 마찰로 인한 손실은 이 지점에서 무시할 수 없다. 마찰 손실을 계산하기 위한 압력은 이 지점의 압력을 사용한다.

벽면 마찰을 유도하기 위해 원추형 노즐의 이젝터 출구 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.

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

$V \dot{m} / A = P \gamma M^2$ 임을 이용하고 위 식을 $(A_p + A_s)$ 로 나누면 모멘텀 방정식은 다음과 같이 된다.

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

Eq. 3에 F_f 개념을 적용하여 B_p 를 새롭게 정의한다.

$$\begin{aligned} B_p &= \gamma_{ex} M_{ex}^2 \frac{A_{ex}}{A_p + A_s} \\ &= \left(\frac{\gamma_p M_p^2}{1 + \frac{A_s}{A_p}} + \frac{\gamma_s M_s^2}{1 + \frac{A_p}{A_s}} \right) \frac{1}{1 + C_f \cdot l / (2d)} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{M_{ex}}{M_s} = \frac{\dot{m}_{ex}}{\dot{m}_s} \frac{A_s}{A_{ex}} \frac{P_s}{P_{ex}} \sqrt{\frac{\gamma_s R_{ex} T_{ex}}{\gamma_{ex} R_s T_s}} \quad (5)$$

위의 식을 이용하여 면적비(A_s/A_{ex})를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{A_s}{A_{ex}} = \frac{\gamma_{ex} M_{ex}^2}{B_p \left(1 + \frac{A_p}{A_s} \right)} \quad (6)$$

Eq. 5에서 변수분리를 통해 M_{ex} 와 관련된 항을 모두 좌변으로 보내 변수 E_p 를 정의한다.

$$E_p \equiv \frac{\left(1 + \frac{\gamma_{ex} - 1}{2} M_{ex}^2\right)^{\frac{1}{2}}}{\gamma_{ex} M_{ex}} \quad (7)$$

$$= \frac{M_s \left(1 + \frac{\dot{m}_p}{m_s}\right)}{B_p \left(1 + \frac{A_p}{A_s}\right)} \sqrt{\frac{\left(1 + \frac{\dot{m}_p R_p}{m_s R_s}\right) (T_s)_o}{\left(1 + \frac{\dot{m}_p \gamma_p}{m_s \gamma_s}\right) T_s}}$$

$$\times \sqrt{\frac{\left(\frac{c_{pp} \dot{m}_p (T_p)_o}{c_{ps} \dot{m}_s (T_s)_o} + 1\right)}{\left(\frac{c_{pp} \dot{m}_p}{c_{ps} \dot{m}_s} + 1\right)}}$$

앞에서 정의한 B_p 를 이용하여 면적비를 구한다.

$$\frac{A_{ex}}{A_p + A_s} = t = \frac{B_p}{\gamma_{ex} M_{ex}^2} \quad (8)$$

t 를 수축률(Contraction Ratio)라고 하고 이는 이젝터 입구의 면적과 목의 면적비이며, 이젝터 형상 설계에 중요한 변수이다.

$$M_p^2 = \frac{A_s}{A_p \gamma_p} \left[\gamma_{ex} M_{ex}^2 t \left(1 + \frac{A_p}{A_s}\right) \times \left(1 + C_f \frac{l}{2d}\right) - \gamma_s M_s^2 \right] \quad (9)$$

$$t = \frac{M_s \left(\frac{\dot{m}_p}{m_s} + 1\right)}{M_{ex} \left(1 + \frac{\gamma_{ex} - 1}{2} M_{ex}^2\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{A_p}{A_s} + 1\right)} \quad (10)$$

$$\times \sqrt{\frac{\left(1 + \frac{\dot{m}_p R_p}{m_s R_s}\right) \left(\frac{c_{pp} \dot{m}_p (T_p)_o}{c_{ps} \dot{m}_s (T_s)_o} + 1\right)}{\beta \left(1 + \frac{\dot{m}_p \gamma_p}{m_s \gamma_s}\right) \left(\frac{c_{pp} \dot{m}_p}{c_{ps} \dot{m}_s} + 1\right)}} \frac{(T_s)_o}{T_s}$$

2.3 성능 해석

초음속 이젝터의 경우 유동이 Shock Diffuser를 지나 아음속으로 감속하며 이때 압력비는 수직 충격과 발생 시 압력비와 동일하고 충격과 전후에 마하수 관계식을 이용하여 이젝터 압력

비를 나타내면 다음과 같다.

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

$$= \frac{2\gamma_{ex} M_{ex}^2 - (\gamma_{ex} - 1)}{\gamma_{ex} + 1}$$

$$\times \left[1 + \frac{\gamma_{ex} - 1}{2} \frac{(\gamma_{ex} - 1) M_{ex}^2 + 2}{2\gamma_{ex} M_{ex}^2 - (\gamma_{ex} - 1)}\right]^{\frac{\gamma_{ex}}{\gamma_{ex} - 1}} \quad (11)$$

3. 결과 및 고찰

특정 압력비에서 1차 유동의 마하수와 2차 유동의 마하수 관계 그래프는 Eq. 10과 Eq. 12를 통해 알 수 있듯이 타원형 그래프이기 때문에 특정 1차 유동 마하수에 대해 두 개의 2차 유동이 존재할 수 있다. 본 연구에서는 2차 유동이 아음속인 경우로 코드 검증을 수행하였으며 이때 1차 유동과 2차 유동은 Table 1과 같다.

Table 1. Flow Properties

| M_S | γ_P | γ_S | R_S/R_P | C_{ps}/C_{pp} | $(T_p)_o/(T_s)_o$ |
|-------|------------|------------|-----------|-----------------|-------------------|
| 0.2 | 1.4 | 1.5 | 0.38 | 0.35 | 1.0 |

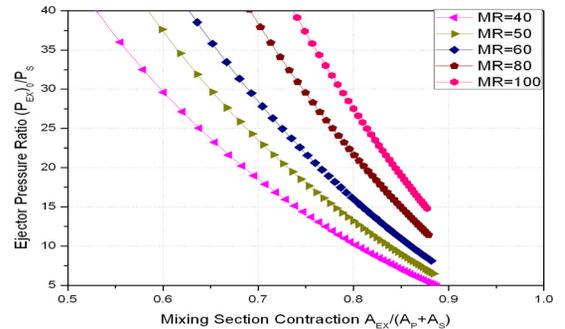


Fig. 2 Effect of Mass Flow Rate Ratio

Figure 2에서 수축률(Contraction Ratio)은 동일 압력비에서 질량유량이 증가할수록 커지는 것을 알 수 있다.

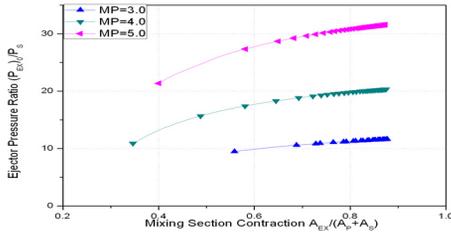


Fig. 3 Effect of Primary Mach Number

Figure 3에서 1차 유동의 마하수가 클수록 동일 압력비에서 수축률이 감소하는 것을 알 수 있다. 반면, 동일 수축률에서 마하수가 증가할수록 압력비가 증가한다.

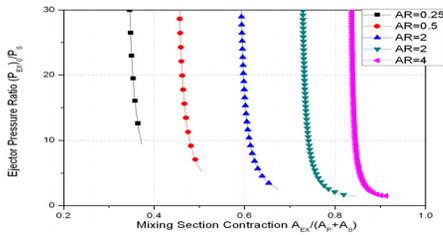


Fig. 4 Effect of Area Ratio (A_p/A_s)

일정 압력비에서 면적비가 증가할수록 수축률이 커지는 것을 알 수 있다. 또 동일 면적비에서 압력비는 수축률에 큰 영향을 미치지 않는다 (Fig. 4). 위에 기술된 해석 기법을 사용하며, 특정 이젝터의 작동점을 구하고, (Table 2, Fig. 5), 그 결과를 통해 도출된 조건에서 CFD 해석을 수행하였다.

Table 2. Flow Properties

| M_S | γ_P | γ_S | R_S/R_P | C_{p8}/C_{pp} | $(T_P)_o/(T_S)_o$ |
|-------|------------|------------|-----------|-----------------|-------------------|
| 0.15 | 1.4 | 1.4 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |

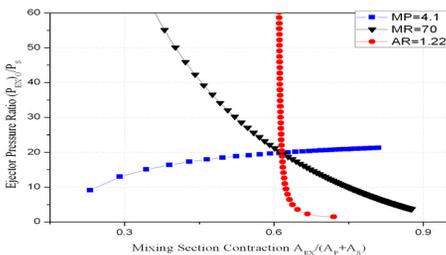


Fig. 5 Design Parameters of Typical Ejector

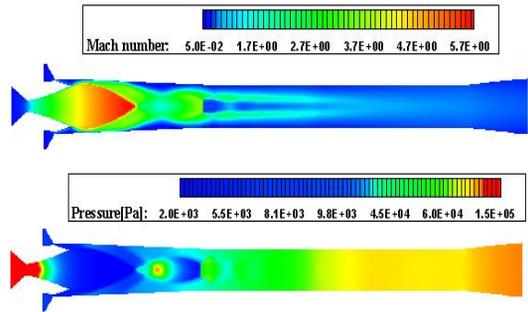


Fig. 6 Mach Number and Pressure Contours

1차 유동의 출구 마하수는 4.1이며 2차 유동의 마하수는 0.15이다. 혼합 영역(동일 압력 영역)에서 마하수는 예상대로 약 4가 됨을 알 수 있다 (Fig. 6). 이차원 가정을 통한 CFD 해석 결과는 1-D 가정을 통해 얻어낸 결과 혼합 영역에서 1차 유동 출구와 2차 유동 출구에서 압력이 유사함을 알 수 있다.

4. 결 론

2차목을 갖는 초음속 이젝터의 시동 조건을 만족하는 설계 기법을 제시하고 그결과를 수치 해석과 검증하였다. 이를 통해 이젝터 설계인자의 영향을 살펴보았으며 다음과 같은 결과를 도출하였다. 1) 1차 유동의 마하수가 클수록 동일 압력비에서 수축률이 감소하며, 동일 수축률에서 마하수가 증가할수록 압력비가 증가한다. 2) 일정 압력비에서 면적비가 커질수록 수축률이 증가하며, 동일 면적비에서 압력비는 수축률에 큰 영향을 미치지 않는다.

참 고 문 헌

- 윤시경, 성홍계, 신완순, "2차 노즐 목을 갖는 초음속 이젝터의 설계 인자 연구," 항공우주시스템공학회, 2008.4., pp.127~130
- George Emanuel, "Optimum performance for a single-stage gaseous ejector", AIAA J., Vol. 14, No. 9.