

아음속/음속 이젝터의 유동에 관한 해석적 연구

최보규* · 김희동* · 김덕줄**

Analytical Study of the Subsonic/Sonic Ejector Flows

B. G. Choi* · H. D. Kim* · D. J. Kim**

ABSTRACT

In order to predict the performance of subsonic/sonic ejector system and to provide fundamental data for a cost effective design, one dimensional gas dynamics theory was applied to the subsonic and sonic ejector systems with the second throat. In the current theoretical analyses, ejector throat area ratio, mass flow ratio and secondary stagnation pressure were derived as a function of the operating pressure ratio of the ejector, and the discharge coefficient of the primary nozzle and the loss coefficient of the diffuser were incorporated into the whole performance of the ejector system. The results of theoretical analysis can be applied to practical industrial use of subsonic and sonic gas ejector systems.

초 록

본 연구에서는 아음속/음속 이젝터의 성능을 평가하고, 공학적 설계를 위한 기초적 연구의 일환으로 일차원 기체역학 이론을 이용하여 이론해석을 수행하였다. 이론해석에서는 1차노즐의 유량계수, 디퓨저의 손실계수를 도입하여, 아음속/음속 이젝터의 목면적비, 유량비, 2차정체실의 압력 등을 이젝터 압축비의 함수로 도출하였다. 본 연구에서 제시된 이론해석법은 아음속/음속 이젝터의 성능을 평가하는데 유용할 뿐만 아니라 이젝터 설계를 위한 자료로 활용될 수 있다.

기 호 설 명

A : 면적

c : 음속, $\sqrt{\gamma RT}$

C_d : 기체의 정압비열

C_v : 기체의 정적비열

d : 직경

mF : 충격함수, $PA + \dot{m}u$

\dot{m} : 질량유량

M : 마하수

P : 압력

P_4/P_{0s} : 이젝터의 압축비

R : 기체상수

T : 온도

* 안동대학교 기계공학부 (Andong National University, School of Mechanical Eng.)

** 부산대학교 기계공학부 (Pusan National University, School of Mechanical Eng.)

- u : 유속
 τ_d : 디퓨저의 팽창비, $(d_4/d_3)^2$
 Ψ : 목 면적비, A_{1e}/A_{1e}
 λ : 2차 흡입 유동의 손실계수
 κ : 비열비, C_p/C_v
 β_d : 디퓨저 유동의 손실계수
 ρ : 밀도
 ϕ : 1, 2차 유동의 전압력비, P_{0p}/P_{0s}
 ω : 유량비, \dot{m}_s/\dot{m}_p

참 자

- d : 디퓨저
 $isen$: 등엔트로피 유동
 m : 이젝터 목단면
 o : 정체점 상태
 op : 1차유동
 os : 2차유동
 x, y : 수직충격파 상·하류의 상태
 $1e$: 1차 노즐 출구단면
 $2e$: 이젝터 입구단면
 3 : 디퓨저의 입구
 4 : 디퓨저의 출구

1. 서 론

일반적으로 이젝터(ejector)는 고압의 유체를 노즐로 분출시켜, 그 분류 주변의 저압기체와 운동량 교환을 통하여 저압의 유체를 보다 높은 압력까지 압축하여 수송하는 장치이다. 이젝터는 노즐(nozzle), 혼합부(mixing section) 및 디퓨저(diffuser)로 구성⁽¹⁾되어 있으며, 이젝터 시스템 전체에 어떤 회전부분이나 활동부분을 가지지 않는 유체기계이므로 고장이 적고, 소형임에도 불구하고 대용량의 유체를 압축 또는 수송 할 수 있는 특징을 가지고 있다.

이젝터는 1차 노즐로부터 방출되는 유동이 아

음속(subsonic), 음속(sonic) 그리고 초음속(supersonic)인 경우 각각 아음속, 음속 및 초음속 이젝터로 분류된다. 일반적으로 산업적 용도로 사용되는 이젝터에 있어서, 1차 노즐의 구동 유체가 증기나 기타 압축성 기체인 경우에 대부분의 이젝터는 초음속 상태로 운전되며, 종래 이러한 초음속 이젝터들은 V/STOL 항공기의 추력증강⁽²⁾이나, 로켓트엔진의 고고도상태(high altitude)의 모사,⁽³⁾ 연소시험,⁽⁴⁾ 천연가스 재생,⁽⁵⁾ 식품제조,⁽⁶⁾ 건조 및 탈취,⁽⁷⁾ 소음저감⁽⁸⁾ 그리고 각종 화학공업⁽⁹⁾ 등에 널리 활용되고 있다.

초음속 이젝터의 경우 1차노즐의 구동압력은 비교적 높으며, 현재까지 이젝터의 성능계산과 공학적 설계법에 대해서 상당히 많은 연구가 수행되어 왔다^(10,11).

이들 연구 결과에 의하면, 초음속 이젝터의 최적 성능은 수직충격파(normal shock wave)가 이젝터 목에 위치하고 있을 때 얻어지며, 이 경우 수직충격파에 의한 전압손실은 최소가 된다. 따라서 현재까지 대부분의 이젝터 설계는 최적 성능에 상응하는 기하학적 형상을 결정하는 것에 초점을 맞추었다.

최근 들어 각종 건설기계, 증장비 및 전자장치들의 냉각,⁽¹²⁾ 소음저감설비,⁽¹³⁾ 환기 및 탈취,⁽¹⁴⁾ 각종 유체수송 및 펌프⁽¹⁵⁾ 등에 이젝터 시스템이 다양하게 활용되고 있으며, 이 경우 이젝터의 구동압력비가 비교적 낮으므로, 1차노즐 출구에서 유동은 아음속이거나 음속상태로 된다.

현재까지 아음속 및 음속 이젝터 유동에 관한 연구결과는 많지 않으며, 이젝터의 성능평가나 실용적 설계를 위한 연구자료는 매우 부족한 실정에 있다. 이것은 이젝터가 아음속 상태로 운전되는 경우, 이젝터 내부에서 발생하는 1차유동 및 2차유동의 혼합특성, 배기성능 및 진공성능 등의 이젝터 유동 특성들은 이젝터의 구동압력비에 강하게 의존하게 되므로, 단순한 이론적 수단으로 아음속/음속 이젝터의 성능을 평가하는 것은 용이하지 않기 때문이다. 또 부분적으로는 이젝터의 성능에 밀접하게 관계하는 1차노즐의 직경, 이젝터의 목직경, 혼합부의 길이, 디

퓨저의 길이 등 초음속 이젝터 유동에 비하여 많은 유동 특성길이 존재하게 되므로, 아음속 이젝터 유동장을 해석하는 것은 매우 곤란하다.

최근 고속의 연산 능력을 갖춘 대형 공학계산기의 발달로, 아음속 및 음속 이젝터의 유동장을 수치적으로 모사할 수 있게 되었으나^(16,17,18), 이젝터 내부유동은 1차유동과 2차유동의 혼합, 비정상성, 3차원성 등 매우 복잡하며⁽¹⁹⁾, 이젝터 유동을 적절하게 모사하기 위한 난류모델의 개발 등 많은 해결되지 않은 공학적 문제가 산재하고 있다. 또 최근까지 개발된 매우 정교한 난류모델을 이용한다고 하더라도 아음속 및 음속 이젝터 유동을 정확하게 예측하는 것은 대단히 어려우며, 이에 관한 연구결과는 아직까지 보고되지 않았다.

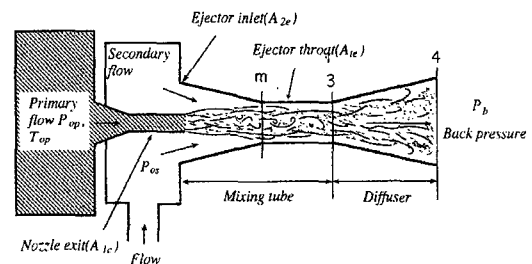
수치계산의 경우 계산시간의 과다 및 비경제적인 연산비용 등으로 인하여 산업현장에서 아음속 및 음속 이젝터를 용이하게 설계하는 데는 어려움이 있다. 따라서 단순한 이론적 수단으로 아음속 및 음속 이젝터 유동을 예측하고, 이젝터 시스템의 효과적 설계를 위한 실용적 자료가 매우 절실하게 요구되고 있다.

본 연구에서는 1차원 기체역학 이론에 1, 2차 유동의 압축비, 디퓨저의 손실계수, 2차 유동의 손실계수 및 디퓨저의 팽창비를 적용하였다. 또 아음속/음속 이젝터의 목면적비, 1, 2차 유동의 유량비, 1차 노즐의 출구 마하수를 이젝터의 구동압력비와 이젝터 목면적비의 함수로 나타내어, 이젝터 시스템의 설계나 성능평가가 용이하도록 하였다.

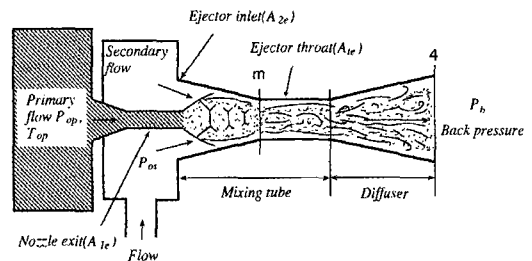
2. 아음속/음속 이젝터 유동장

아음속 및 음속 이젝터 유동의 개요를 각각 Fig. 1의 (a)와 (b)에 나타내었다. 1차 정체실의 고압의 기체(전압력 P_{op} , 전온도 T_{op} , 기체상수 R , 비열비 κ)가 출구 단면적 A_{1c} 인 축소노즐(convergent nozzle)로부터 방출되는 경우에, 발생하는 분류의 전단작용에 의해 2차 정체실의 저

압기체(전압력 P_{os} , 전온도 T_{os} , 기체상수 R , 비열비 κ)가 입구 단면적 A_{2c} 인 이젝터 입구로 흡인되어 1차 유동인 분류와 혼합한다. 1차 유동과 2차 유동의 혼합기체는 이젝터의 목(단면적 A_{1e}) m 과 단면 3 부분에서 완전히 혼합된 후, 디퓨저(입구 단면 3, 출구 단면 4)를 통하여 대기로 방출된다.



(a) Subsonic Ejector



(b) Sonic Ejector

Fig. 1 Subsonic and Sonic Ejector Flows

본 연구에서는 이젝터 유동의 이론 해석을 간단화하기 위하여 다음과 같이 가정하였다. 이젝터의 1차 및 2차 유동은 완전기체($\kappa=1.40$)이며 이젝터 내부에서 발생하는 유동은 단일 유동이다. 또 노즐과 디퓨저의 유동은 입구 상태량만에 의하여 결정되며, 혼합영역에서 두 유동의 혼합손실은 무시한다. 이러한 가정들을 이용하여 정상 일차원 유동에 대한 이론식을 전개하면 다음과 같이 된다.

정상 압축성 일차원 단일유동의 식에서 마하

수 M 인 유동의 압력을 P , 온도 T , 단면적 A , 질량유량을 \dot{m} 라 하는 경우, 이들 상태량들은 마하수의 함수로 다음과 같이 쓰여진다.

$$\overline{P}(M) = \frac{P_{op}}{P} = \left(1 + \frac{x-1}{2} M^2\right)^{x/(x-1)} \quad \text{--- (1)}$$

$$\overline{T}(M) = \frac{T_{op}}{T} = \frac{1}{1 + \frac{x-1}{2} M^2} \quad \text{--- (2)}$$

$$\overline{A}(M) = \frac{A}{A_{cr}} = \frac{1}{M} \left\{ \frac{2}{x+1} \left(1 + \frac{x-1}{2} M^2\right) \right\}^{(x+1)/2(x-1)} \quad \text{--- (3)}$$

$$\overline{F}(M) = \frac{F}{F_{cr}} = \frac{1 + xM^2}{M \sqrt{2(x+1) \left(1 + \frac{x-1}{2} M^2\right)}} \quad \text{--- (4)}$$

$$\overline{m}(M) = \frac{\dot{m}}{AP_{1e}} \sqrt{\frac{R}{x} T_{1e}} = M \left(1 + \frac{x-1}{2} M^2\right)^{-(x+1)/2(x-1)} \quad \text{--- (5)}$$

앞의 식들에서 A_{cr} 은 1차 노즐 목의 임계단면적을 나타내며, F_{cr} 은 1차 노즐 유동의 임계 충격함수, P_{1e} 은 1차 노즐 출구의 압력, T_{1e} 은 1차 노즐 출구에서의 온도를 나타낸다.

2.1 이론해석법

본 연구에서는 1차 노즐 유동, 이젝터 내부에서 발생하는 혼합유동, 그리고 디퓨저를 통하는 유동의 손실들을 이론 해석에 도입하기 위하여, 다음과 같은 압력비를 σ 의 함수로 나타내었다.

$$\sigma_{op} = \frac{P_{ole}}{P_{op}}, \quad \sigma_{os} = \frac{P_{ole}}{P_{os}}, \quad \sigma_{43} = \frac{P_{o4}}{P_{o3}} \quad \text{--- (6)}$$

윗식에서 하첨자 1e은 노즐목의 상태, op는 1차 유동의 정체점 상태, 2e는 2차 유동의 입구 상태, os는 2차 유동의 정체점 상태, 3은 디퓨저 입구 단면, 4는 디퓨저 출구단면을 나타낸다.

1차 및 2차 유동의 유량비 $\omega = \dot{m}_s / \dot{m}_p$ 를 가정한 경우, 이젝터의 혼합부 입구(단면 A_{2e})에서 유동의 마하수 M_{2e} 는 다음의 식으로 주어진다.

$$\overline{A}(M_{2e}) = \frac{(\Psi-1) \sigma_{2e} \overline{A}(M_{1e})}{\phi \sigma_{1e} \omega} \quad \text{--- (7)}$$

또 2차 정체실의 압력 P_{os} 와 이젝터 출구에서의 압력 P_4 의 비는 식 (8)로 쓰여진다.

$$\frac{P_4}{P_{os}} = \frac{(\omega+1) \phi \sigma_{1e} \sigma_{43} \sigma_{3m} \overline{A}(M_m)}{\Psi \overline{A}(M_{1e})} \quad \text{--- (8)}$$

따라서 위의 식 (7)과 (8)을 이용하여, 이젝터 내 혼합부(단면 m)에서 유동의 마하수는 식 (9)로부터 구해진다.

$$\overline{F}(M_m) = \frac{\omega \overline{F}(M_{2e}) + \overline{F}(M_{1e})}{(\omega+1)} \quad \text{--- (9)}$$

2.2 유동의 손실계수

또 단일 유동의 경우 식 (6)의 σ_{op} 는 1차 노즐 유동의 유량계수와 일치하며, 일반적으로 유동의 손실을 무시한 등엔트로피 유동 \dot{m}_{isen} 에 대한 실제의 유량 \dot{m} 의 비로 정의된다. 따라서 이론유량과 실제의 유량과의 관계를 다음 식 (10)과 같이 정의한다.

$$\overline{m}(M_{isen}) = \frac{\overline{m}(M_{1e})}{\sigma_{op}} \quad \text{--- (10)}$$

한편 이젝터 입구에 있어서 2차 유동의 흡입 기체의 유동손실을 고려하기 위하여 유동 손실계수를 사용하여 $P_{os} - P_{2e} = (1/2) \lambda \rho_{2e} u_{2e}^2$ 로 정의한다.

$$\sigma_{os} = \frac{2P_{os} - \lambda \rho_s u_{2e}^2}{2P_{os}} \quad \text{--- (11)}$$

식 (11)에 있어서 $u_{2e} = c_{2e} M_{2e}$, $P_{os} / \rho_s = R T_{os}$, $T_{os} = T_{2e}$ (단열유동)의 관계 및 앞절의 식 (2)를 사용하여 식 (12)를 얻는다.

$$\sigma_{21e} = \frac{2 - \lambda x \overline{T}(M_{2e}) M_{2e}^2}{2} \quad \text{--- (12)}$$

또 디퓨저 단면 3 및 4에서의 혼합기체의 유동 손실을 고려하기 위하여 손실계수 β_d 를 도입하여,

$$P_3 - P_4 = (1/2)\beta_d \left(\frac{\tau_d^2 - 1}{\tau_d^2} \right) \rho_3 u_3^2$$
 으로 쓸 수 있으며, 위의 식 (6)의 σ_{43} 은 식 (13)으로 정리된다. 위의 식에서 τ_d 는 디퓨저의 기하학적 형상을 나타내는 팽창비로 $(d_4/d_3)^2$ 로 주어진다.

$$\sigma_{43} = 1 - \frac{\beta_d \left(\frac{\tau_d - 1}{\tau_d} \right)^2 u_3^2}{2 \left(\frac{P_4}{\rho_4} + \frac{u_4^2}{2} + \beta_d \left(\frac{\tau_d - 1}{\tau_d} \right)^2 \frac{u_3^2}{2} \right)} \quad (13)$$

또 식 (13)은 $u_3 = c_3 M_3$, $P_4/\rho_4 = RT_4 \approx RT_3$, $u_4 = u_3/\tau_d$ 의 관계를 이용하여 정리하면, 다음의 식 (14)를 얻는다.

$$\sigma_{43} = \frac{\left(\frac{2}{x T(M_3) M_3^2} + \left\{ \beta_d \left(\frac{\tau_d - 1}{\tau_d} \right)^2 + \frac{1}{\tau_d^2} \right\} \right) - \beta_d \left(\frac{\tau_d - 1}{\tau_d} \right)^2}{\frac{2}{x T(M_3) M_3^2} + \left\{ \beta_d \left(\frac{\tau_d - 1}{\tau_d} \right)^2 + \frac{1}{\tau_d^2} \right\}} \quad (14)$$

한편 Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 이젝터 단면 m과 단면 3의 사이에서 발생하는 유동손실을 무시하는 경우 $\sigma_{3m} = 1$ 이 된다. 따라서 1차 유동과 2차 유동의 혼합이 디퓨저 입구 상류에서 완료되는 것으로 가정한다. 그러나 Fig. 1의 (b)에 도식적으로 나타내는 바와 같이 1차 노즐로부터 방출되는 유동이 초음속 부족팽창 분류 (under-expanded jet)인 경우에는 1차노즐 출구와 이젝터 단면 3 사이에서 수직충격파(실제로는 다수의 충격파가 발생)가 발생한다. 이 경우 수직충격파에 의한 압력손실을 고려하여, 다음의 식 (15)를 얻을 수 있다.

$$\sigma_{3m} = \frac{\bar{A}(M_3)}{A(M_m)} = \frac{\bar{A}(M_y)}{A(M_x)} \quad (15)$$

여기서 하첨자 x, y는 충격파 상·하류의 상태를 나타내며, 위의 식 (7)을 이용하면 다음의 식 (16)을 얻는다.

$$\frac{P_4}{P_{os}} = \frac{(\omega + 1)\phi \sigma_{1e} \sigma_{43} \bar{A}(M_3)}{\psi A(M_{1e})} \quad (16)$$

위의 식에서 M_3 는 1차 유동과 2차 유동이 완전히 혼합되는 경우, 디퓨저 입구에서 혼합유동의 마하수를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

일반적으로 이젝터 시스템을 설계하고 성능을 평가하기 위해서는 이젝터 시스템 전체의 상세한 기하학적 형상과 그리고 작동기체의 특성 및 상태량 등이 알려져야 한다. 이 경우 구동유체인 1차 유동과 흡인유체인 2차 유동의 유량비 $\omega (= \dot{m}_s / \dot{m}_p)$ 와 P_4/P_{os} 를 이젝터의 기하학적 형상의 함수로 구하는 것이 필요하다.

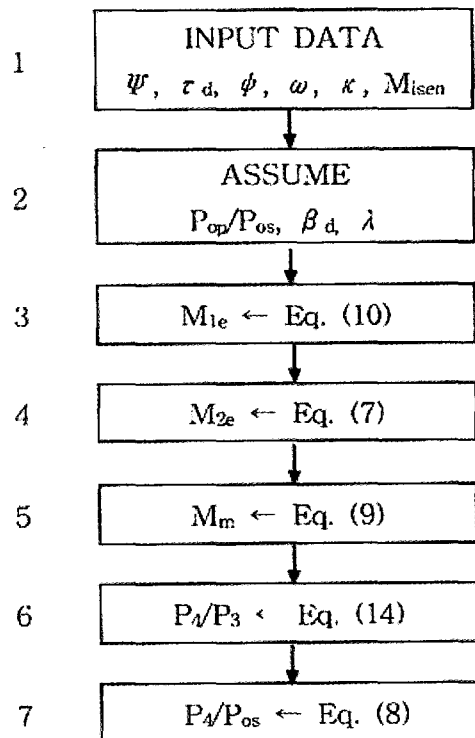


Fig. 2 Calculation Procedure

Fig. 2에는 본 이론해석에서 사용된 계산의 수순을 나타내었다. 그림에서 Step 3, 4 및 5는 식 (10), 식 (7) 및 식 (9)을 이용하여 각각의 마하수를 계산하는데 Newton-Raphson법이 사용되었다.

본 연구에서는 이론해석을 간단화하기 위하여, 기체의 비열비 $\gamma=1.40$, $\lambda=0.10$ 그리고 σ_{1e} 의 값을 0.99로 고정하였다. 또 실용적인 산업용 이젝터의 경우, 이젝터의 목면적비 Ψ 는 1.1~5.0의 범위에 있으며, 본 연구에서는 이러한 범위에서 Ψ 의 값을 적용하였다. 더욱이 디퓨저의 팽창비 $\tau_d=4.2$ 로 고정하였으며, 아음속/음속 이젝터의 경우 P_{op}/P_{os} 의 값이 2.0이하이므로, $P_{op}/P_{os} < 2.0$ 의 범위에 대하여 이론해석을 수행하였다. 또 디퓨저의 손실계수의 값으로 실험결과와 잘 일치하는 β_d 의 값을 채택하였다.⁽²⁰⁾

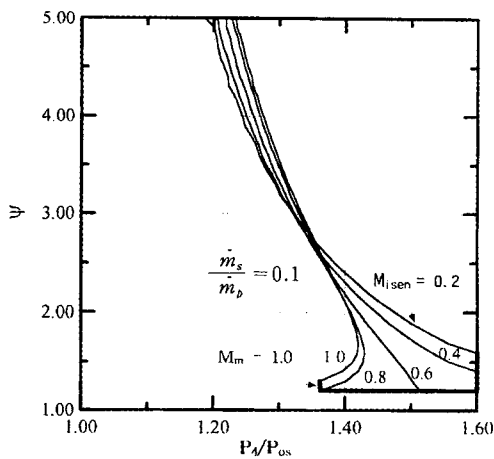


Fig. 3 Relationship between Ψ and P_4/P_{os}

$$(\dot{m}_s/\dot{m}_b=0.1)$$

Fig. 3에는 1차유동 \dot{m}_b 과 2차유동 \dot{m}_s 의 유량비 $\omega (= \dot{m}_s/\dot{m}_b)$ 가 비교적 작은 0.1인 경우, 이젝터 목면적비 Ψ 와 P_4/P_{os} 의 관계를 나타

내었다. 1차 노즐의 출구 마하수 M_{isen} 는 σ_{1e} 의 값이 주어지는 경우, 등엔트로피 관계식으로 부터 1차 유동의 공급 압력으로 주어지므로, 본 연구에서는 1차 노즐 출구에서 등엔트로피 마하수($M_{isen}=0.2 \sim 1.0$)를 매개변수로 사용하였다. 또 그림에서 각 마하수 M_{isen} 의 곡선 우측 하단부의 굵은 실선은 1차 유동 및 2차 유동이 이젝터 목에서 초크하는 것($M_m=1.0$)을 나타낸다.

그림에서 나타내는 바와 같이 $M_{isen} < 0.6$ 인 경우 Ψ 가 증가할수록 P_4/P_{os} 는 감소한다. 그러나 1차 유동 출구에서 마하수 M_{isen} 가 큰 $M_{isen} > 0.6$ 이상인 경우, Ψ 가 증가함에 따라 P_4/P_{os} 는 증가하다가 어느 최대값을 가진 후 Ψ 의 증가에 따라 감소하게 된다.

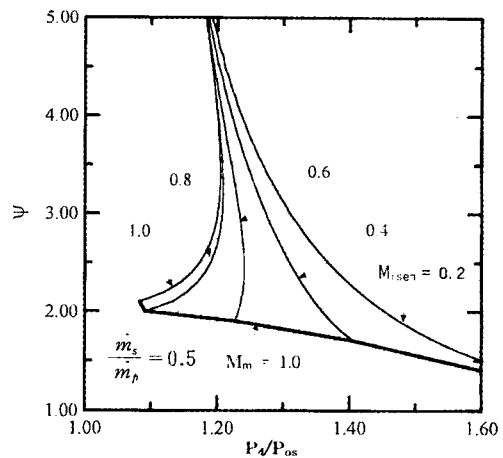


Fig. 4 Relationship between Ψ and P_4/P_{os}

$$(\dot{m}_s/\dot{m}_b=0.5)$$

한편 Ψ 가 약 2.7 이상인 영역에서는 동일 목면적비에 대해서 마하수가 증가할수록 P_4/P_{os} 은 약간 증가하지만, Ψ 가 2.7 이하인 영역에서는 동일 목면적비에 대하여 마하수의 증가에 따라 P_4/P_{os} 이 급격하게 감소하는 경향을 나타

낸다. M_{isen} 이 0.8과 1.0인 경우 Ψ 가 1.8보다 작은 영역에서 Ψ 가 감소함에 따라 P_4/P_{os} 가 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 Ψ 가 감소함에 따라 2차 유동의 마하수 M_{2e} 이 증가하여 디퓨저 출구 압력이 감소하기 때문이다.

Fig. 4에는 1차유동 \dot{m}_p 과 2차유동 \dot{m}_s 의 유량비 ω 가 0.5인 경우, Ψ 와 P_4/P_{os} 의 관계를 나타내었다. 그림에서 동일 목면적비에 대하여 마하수가 클수록 P_4/P_{os} 은 작게 나타난다. 또 동일한 P_4/P_{os} 일 경우 마하수가 클수록 넓은 범위의 목면적비를 취할 수 있다는 것을 알 수 있다.

한편 마하수 M_{isen} 이 0.2 및 0.4에서는 목면적비 Ψ 가 증가할수록 P_4/P_{os} 은 급격하게 감소하게 되지만, M_{isen} 이 0.6인 경우, Ψ 에 대한 P_4/P_{os} 의 의존도는 크지 않다. 그러나 마하수가 비교적 큰 0.8 및 1.0에서는 Ψ 가 2.0에서 3.0으로 증가할 때 P_4/P_{os} 는 급격하게 증가하다가 목면적비가 3.0 이상에서는 거의 변화하지 않는다. 또 그림에서 알 수 있는 바와 같이 마하수가 0.6, 0.8 및 1.0인 경우 목면적비가 3.0 이상인 영역에서는 P_4/P_{os} 가 거의 변화하지 않는다는 것을 알 수 있다. 이것은 아음속/음속 이젝터의 설계에 있어 적절한 유량비 ω 와 M_{isen} 을 취하면 목면적비의 설계 여유가 다소 있더라도 P_4/P_{os} 는 거의 일정하게 될 수 있다는 것을 의미한다.

Fig. 5에는 ω 가 1.0인 경우에 대한 이젝터 Ψ 와 P_4/P_{os} 의 관계를 나타내었다. 그림에서 마하수가 0.2에서는 목면적비의 증가에 따라 P_4/P_{os} 는 급격하게 감소하지만, 마하수가 0.4 및 0.6인 경우 Ψ 의 변화에 따른 P_4/P_{os} 의 변화는 크지 않다. 또 마하수가 0.8 및 1.0에서는 목면적비 Ψ 의 증가에 따라 P_4/P_{os} 는 증가하게 된다.

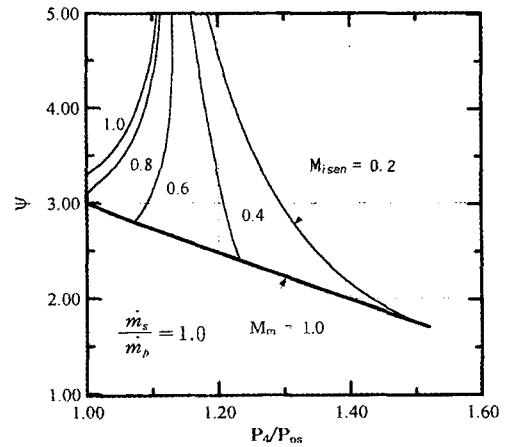


Fig. 5 Relationship between Ψ and P_4/P_{os}
($\dot{m}_s/\dot{m}_p = 1.0$)

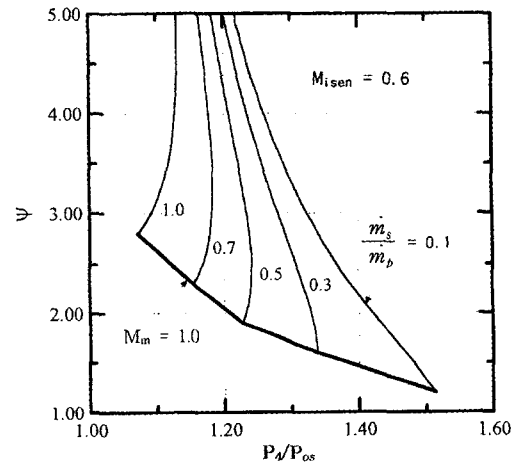


Fig. 6 Relationship between Ψ and P_4/P_{os}
($M_{isen} = 0.6$)

본 연구의 결과로부터 1차 노즐 유동의 마하수가 비교적 낮은 아음속의 경우와 높은 아음속의 경우에 있어, Ψ 에 따른 P_4/P_{os} 의 변화는 크게 달라진다는 것을 알 수 있다. 따라서 저아음속 영역에서 운전되는 이젝터와 고아음속 영

역에서 운전되는 이젝터 시스템의 설계에 있어서 동일한 P_4/P_{os} 를 얻기 위해서 다른 Ψ 의 값을 적용하여야 한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에는 1차 노즐의 출구 마하수 M_{isen} 이 0.6인 경우, ω 를 매개변수로 하여 P_4/P_{os} 와 Ψ 의 관계를 나타내었다. 그림에서 $\omega=0.1$ 및 0.3에서는 Ψ 의 증가에 따라 P_4/P_{os} 가 크게 감소하지만, $\omega=0.5$ 및 0.7에서는 Ψ 의 증가에 따라 P_4/P_{os} 는 거의 변화하지 않는다. 그러나 $\omega=1.0$ 에서는 Ψ 의 증가에 따라 P_4/P_{os} 는 증가하게 된다.

Fig. 7에는 M_{isen} 이 0.8 및 1.0인 경우에 대한 P_4/P_{os} 와 Ψ 의 관계를 나타내었다. M_{isen} 이 0.8인 경우, $\omega=0.1, 0.3$ 및 0.5에서는 Ψ 의 증가에 따라 P_4/P_{os} 는 증가하였다가 감소하게 된다. 그러나 $\omega=1.0$ 에서는 Ψ 의 증가에 따라 P_4/P_{os} 도 증가하는 것을 나타낸다. 한편 M_{isen} 이 1.0으로 증가하는 경우 위와 같은 현상은 거의 유사한 것으로 나타난다.

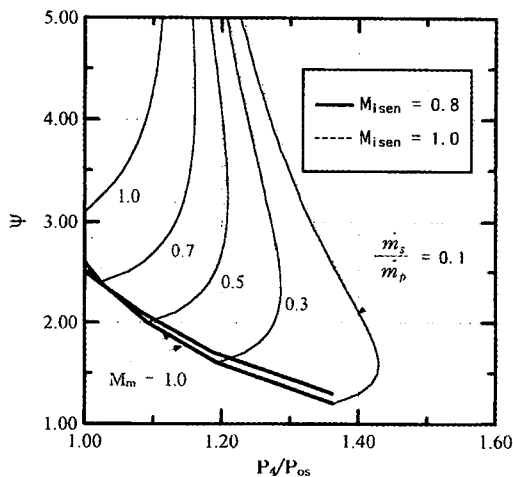


Fig. 7 Relationship between Ψ and P_4/P_{os} ($M_{isen}=0.8$ and 1.0)

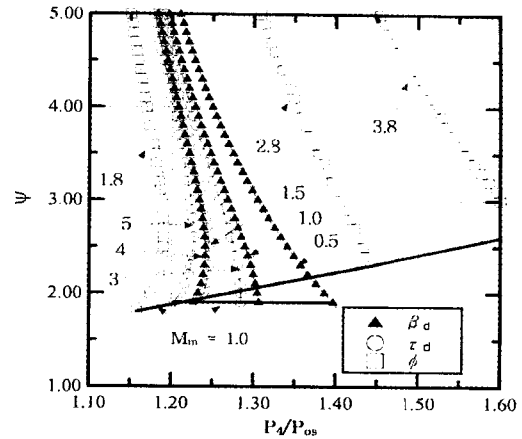


Fig. 8 β_d , τ_d and ϕ on the Relationship between Ψ and P_4/P_{os} in Sonic Ejector

Fig. 8에는 M_{isen} 을 0.6, $\omega=0.5$, $\phi(=P_{ob}/P_{os})$ 를 1.8, 2.8 및 3.8, 디퓨저의 팽창비 τ_d 를 3, 4 및 5, 디퓨저의 손실계수 β_d 를 1.5, 1.0 및 0.5로 변화시킨 경우에 대한 P_4/P_{os} 의 변화를 나타내었다. 그림으로부터 디퓨저 팽창비와 디퓨저 유동의 손실계수 변화는 P_4/P_{os} 의 변화에 큰 영향을 미치지 않지만, ϕ 는 P_4/P_{os} 에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 동일한 Ψ 의 값인 경우 디퓨저 팽창비와 디퓨저의 유동의 손실계수가 증가할수록 P_4/P_{os} 의 값은 작아지며, 이러한 경향은 Ψ 의 값이 작을수록 뚜렷하게 나타난다. 그러나 동일한 Ψ 의 값에 대하여 1, 2차 유동의 압력비 ϕ 가 증가할수록 P_4/P_{os} 는 크게 증가한다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 아음속/음속 이젝터의 성능을 평가하고, 공학적 설계를 위한 기초적 연구의 일환으로 일차원 기체역학 이론을 이용하여, 이론해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 동일한 이젝터 목면적비 Ψ 의 변화에 대하여 유량비가 작은 경우에는 마하수의 변화가 이젝터 압력비 P_4/P_{os} 에 큰 영향을 미치지 않는다.
- 2) 유량비 ω 와 마하수 M_{isen} 의 변화에 따른 P_4/P_{os} 는 목면적비 Ψ 가 큰 경우에 비해 작은 경우가 크게 변화였다.
- 3) 동일한 유량비와 마하수 M_{isen} 에 대하여 디퓨저 팽창비, 디퓨저 손실계수의 변화에 대한 P_4/P_{os} 의 변화는 크지 않으나, 1, 2차 정체실의 압력비의 변화는 P_4/P_{os} 에 큰 영향을 미친다.
- 4) 아음속/음속 이젝터의 설계에 있어 적절한 유량비 ω 와 M_{isen} 을 선택하는 경우, P_4/P_{os} 의 값이 이젝터 목면적비 Ψ 에 크게 의존하지 않는 유량비와 M_{isen} 값이 존재한다.

참고문헌

1. J.H.Keenan, E.P.Neumann, and F.Lustwerk, "An Investigation of Ejector Design by Analysis and Experiment," Journal of Applied Mechanics, Vol.17, No.3, 1950, pp.299~309.
2. M.Alperin, and J.J.Wu, "Thrust Augmenting Ejector, Part 2," AIAA Journal, Vol.21, No.12, 1983, pp.1698~1706.
3. B.Quinn, "Ejector Performance at High Temperatures and Pressures," Journal Aircraft, Vol.13, No.12, 1976, pp.948~954.
4. W.E.Francis, M.L.Hoggarth, and J.J.Templeman, "The Design of Jet Pumps and Injectors for Gas Distribution and Combustion Purposes," Symposium on Jet Pumps and Ejector, BHRA Fluid Engineering-Institution of Chemical Engineers, London, England, No.6, 1972, pp.81~96.
5. J.C.Dutton, and B.F.Carroll, "Optimized Ejector-Diffuser Design Procedure for Natural Gas Vapor Recovery," Trans. of ASME, Journal of Energy Resources Technology, Vol.105, 1983, pp.388~393.
6. J.Nagahiro, J.Iwamoto, and K.Higuchi, "Experiments for Fine Air Bubble Production in Liquids Using Ejectors," Trans. American Society of Agricultural Engineers, Vol.35, No.5, 1992, pp.1581~1590.
7. 今木清康, "空氣調和工學," 産業圖書, 1980.
8. T.N.Aiken, "Aerodynamics and Noise Measurements on a Quasi-Two-Dimensional Augmentor Wing Model with Lose-Type Nozzles," NASA TMX-62237, Sept.1973.
9. 化學工學協會, "化學工學便覽," 丸善, 1974.
10. H.D.Kim, and Y.G.Kim., "Simple Calculation Method for Performance Estimation of Supersonic Ejector," KSPE Annual Conference, 1995, pp.3-13.
11. W.L.Chow, and A.L.Addy, "Interaction between Primary and Secondary Streams of Supersonic Ejector System and Their Performance Characteristics," AIAA Jour. Vol.2, No.4, 1961, pp.680~695.
12. J.W.Lim, and S.H.Lee, "Engine Room Cooling System Using Jet Pump," KSME Spring Annual Meeting, Vol.B, 2000, pp.162~167.
13. H.Viets, J.R.Campbell, and K.D.Korkan, "Acoustic Interactions in Ejectors," AIAA Paper 81-2045, Oct, 1981.
14. J.Knight, "The Use of Steam Ejector for the Vacuum Degassing of Steel," Jour. IMech., Vol.181, No.10, 1967, pp.225~239.
15. C.T.Hsu, "Investigation of an Ejector Heat Pump by Analytical Methods," ORNL/CON-144, Oak Ridge National Laboratory, July, 1984.
16. H.D.Kim, Setoguchi, T.,S.Yu, and S. Raghunathan, "Navier-Stokes Computations of the Supersonic Ejector-Diffuser System with a

- Second Throat," *International Jour. of Thermal Science*, Vol.8, No.2, 1999, pp.79-88.
17. H.D.Kim, Y.K.Lee, T.Setoguchi, and S.Yu, "Numerical Simulation of the Supersonic Flows in the Second Throat Ejector-Diffuser Systems," *Journal of Thermal Science*, Vol.8, No.4, 1999, pp.214~222.
18. B.G.Choi, Y.K.Lee, H.D.Kim, and D.J.Kim, "Computations of the Supersonic Ejector Flows with the Second Throat," *KSME Jour.*, 2000, Vol.24, No.8.
19. H.D.Kim, "Shock Train and Pseudo-Shock Phenomena in Internal Gas Flows," *Progress in Aerospace Sciences*, Pergamon Press, Vol.226, 1999, pp.23~100, 1999.
20. F.Yamamoto, and Y.Iemoto, "A Calculation Method of Performance of Subsonic Air Ejector," *JSME, Series B*, Vol.50, No.458, 1984, pp.2643~2648.