

초음속 증기 이젝터 시스템의 작동 특성에 관한 연구

김희동* · 이준희* · 우선훈* · 최보규**

Study of the Operation Characteristics of the Supersonic Steam Ejector System

H.D.Kim, J.H.Lee, S.H.Woo and B.G.Choi

Key Words: Compressible Flow(압축성 유동), Supersonic Steam Ejector(초음속 증기 이젝터), Supersonic Nozzle(초음속 노즐), Shock Wave(충격파), Diffuser(디퓨저), Entrainment Ratio(혼입 유량비).

Abstract

In order to investigate the operating characteristics of a supersonic steam ejector, the axisymmetric, compressible, Reynolds-averaged, Navier-Stokes computations are performed using a finite volume method. The secondary and back pressures of the ejector system with a second throat are changed to investigate their effects on the suction mass flow. Three operation modes of the steam ejector system, the critical mode, subcritical mode and back flow mode, are discussed to predict the critical suction mass flow. The present computations are validated with some experimental results. The secondary and back pressures of the supersonic steam ejector significantly affect the critical suction mass flow. The present computations predict the experimented critical mass flow with fairly good accuracy. A good correlation is obtained for the critical suction mass flow. The present results show that provided the primary nozzle configuration and secondary pressure are known, we can predict the critical mass flow with good accuracy.

1. 서 론

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

일반적으로 이젝터는 1차 노즐로부터 방출되는 유동이 아음속(subsonic), 음속(sonic) 그리고 초음속(supersonic)인 경우 각각 아음속, 음속 및

초음속 이젝터로 분류된다. 또 1차노즐로부터 유체를 가속하여 2차 유체를 이송하거나 압축하게 되는 경우 1차노즐의 유동이 구동유체가 된다. 이 경우 구동유체가 공기이거나 증기 또는 물인 경우 각각 공기이젝터, 증기이젝터 그리고 물이젝터라고 한다.

1차 노즐의 구동유체가 증기나 기타 압축성 기체인 경우, 대부분의 이젝터는 초음속 상태로 운전되며, 현재까지 초음속 이젝터유동에 관해서는 상당히 많은 연구가 수행되었다^(2,3,4). 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⁽⁵⁾. 따라서 초음속 이젝터의 설계는 1차구동 유동축의 상태량, 2차의 흡인유량과 이젝터 압축비 등이 입력자료로 주어지는 경우 이젝터 상세형상을 결정할 수 있다. 그러나 이러한 설계법은 모두 1차원 기체역

* 안동대학교 기계공학과

** (주)동화정기 기술연구소

학적 이론식을 기초로 한 것이며, 그 실용적 타당성이 충분히 검증되어 있지 않다. 이것은 1차와 2차 유동의 혼합, 충격파와 경계층의 상호간섭, 두 혼합유동의 초크 등 이젝터 내부에서 발생하는 유동이 매우 복잡하므로, 1차원 유동의 가정으로 이젝터 유동을 묘사하는데 한계가 있기 때문이다.

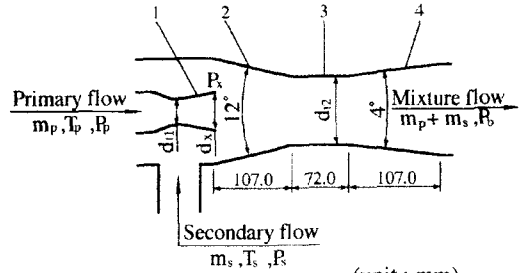
한편 이젝터 시스템의 작동특성은 1차유동의 상태량 및 운전조건이 주어진다고 하더라도 2차 유량과 이젝터 배압에 강하게 의존하게 된다. 그러나 지금까지의 대부분의 연구에서는 이젝터의 배압을 일정하게 하여 배압의 효과를 고려하지 않았으며, 2차유량은 일정 압력조건에서 흡인되는 것으로 가정되었다^(6,7,8). 따라서 2차유동측의 압력 변화에 대한 이젝터 작동특성의 변화를 조사하는 것은 이젝터 시스템의 성능예측에 있어서 대단히 중요하다.

본 연구에서는 압축성 축대칭 Navier-Stokes 방정식의 수치해법을 이용하여, 추기펄프용으로 사용되는 초음속 증기 이젝터 시스템의 작동특성을 조사하여, 기존의 실험결과와 비교하였다. 수치계산에서는 1차노즐의 설계마하수 Ma 가 2.70과 4.35인 두 형태의 초음속 이젝터를 대상으로, 이젝터의 배압과 2차 유동의 압력을 변화시켜, 이들이 이젝터의 작동특성에 어떠한 영향을 미치는지 조사하였다.

2. 초음속 증기 이젝터 시스템

Fig.1에는 본 연구에서 적용된 초음속 증기 이젝터 시스템의 개략도를 나타내었다. 그림에서 1은 1차구동노즐, 2는 이젝터의 혼합부, 3은 이젝터의 목을 그리고 4는 이젝터 디퓨저를 각각 나타낸다. 1차 노즐로부터 고속 유동(공급압력 P_p , 온도 T_p , 질량유량 m_p)의 전단작용과 압력강화작용으로 인하여, 2차 유동(공급압력 P_s , 온도 T_s , 질량유량 m_s)이 이젝터의 혼합부로 흡인되며, 1차 유동과 2차 흡인유동은 이젝터 혼합부에서 혼합하여 이젝터의 목을 통과한 후에 배압 P_b 인 디퓨저로 향하게 된다. 그림에는 이젝터 시스템의 상세제원을 함께 나타내었으며, 본 연구에서는 1차구동 노즐의 형태를 변화시켜, 1차 노즐출구에서 설계마하수 $Ma=2.70$ 과 4.35인 두 초음속 증기 이젝터를 수치해석적 방법으로 조사하였다.

Fig.2에는 본 연구에서 사용된 초음속 증기 이젝터의 작동특성을 나타내었다. 그림의 종축의 값 w 는 1차구동 노즐을 통하는 질량유량 m_p 와 2차 흡인 유량 m_s 의 비($=m_s/m_p$)를 나타내며, 횡축의 값은 이젝터의 배압 P_b 를 나타낸다. 이젝터의 배압 P_b 가 어떤 압력 P_{b0} 보다 큰 경우, 이젝터 내부의 유동은 이젝터 디퓨저에서 발생하는 역압력 구배로 인하여 부분적으로 박리하여 역류가 발생한다. 이 경우 $w < 0$ 으로 본 연구에서는 이러한 배압조건이 부여되는 경우를 역류모드(Back flow mode)라고 정의한다. 실제 이젝터가 역류모드에



(unit : mm)

	Ejector 1	Ejector 2
Ma	2.70	4.35
d_{11}	5.8	2.0
d_{12}	17.8	17.8
d_x	12.5	9.3

Fig.1 Ejector configuration and dimensions

서 운전되면, 이젝터의 2차 유동측의 압력이 불규칙하게 상승하거나 이젝터 내에서 유동에는 심한 불안정성이 발생하게 된다. 따라서 P_{b0} 를 예측하는 것은 이젝터의 안전운전에 있어서 대단히 중요하지만, 일반적으로 P_{b0} 는 1차와 2차유동의 혼합과정 및 이젝터의 기하학적 형상에 강하게 의존하게 되므로, 이를 단순한 이론적 수단으로 예측하는 것은 용이하지 않다.

P_b 가 어떤 임계압력 P_b^* 보다 크고 P_{b0} 보다 작은 영역에서는 $w(>0)$ 가 P_b 에 의존하여 P_b 가 감소할수록 증가하게 되며, 동일한 이젝터의 작동압력 비라고 하더라도 2차 흡인유량은 P_b 의 함수로 된다. 이 경우 이젝터의 운전은 아임계모드(Subcritical mode)라고 정의하며, 이젝터가 아임계 모드로 운전되는 경우 일정 2차 흡인유량을 얻기가 곤란해진다. 이것은 초음속 이젝터의 성능이 배압에 의존하여 변화하는 것을 의미한다.

한편 P_b 가 P_b^* 보다 작은 경우 w 는 이젝터의 배압에 무관하게 일정하게 된다. 본 연구에서는 이러한 이젝터의 작동을 임계모드(Critical mode)라고 정의하며, 이젝터가 임계모드로 운전되는 경우 이젝터 성능 및 작동특성은 1차구동 유체와 2차유동의 상태량 만에 의하여 결정되며, $P_b < P_b^*$

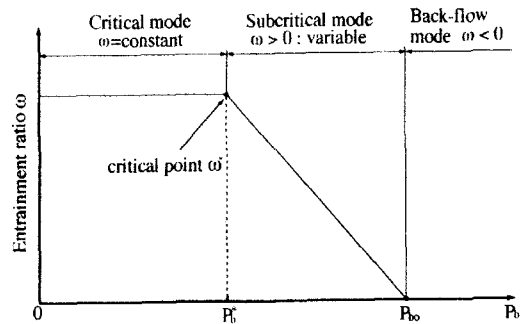


Fig.2 Ejector operating mode

의 영역에서는 이젝터의 배압이 변화한다고 하더라도 일정 2차 흡인유량을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 수치계산법을 이용하여, 임계모드로 운전할 수 있는 초음속 증기 이젝터의 작동조건을 조사하였다.

3. 지배방정식 및 수치해석법

본 연구에서는 이젝터 내부의 유동장을 수치적으로 묘사하기 위하여, 다음과 같이 주어지는 축대칭 압축성 유동방정식에 유한체적법을 적용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho u_j u_i) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i H) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(x + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_j (\tau_{ij})_{eff} \right] \quad (3)$$

수치계산에서 사용된 지배방정식의 이산화 및 표준 $k-\epsilon$ 난류모델에 관해서는 문헌(9.10)에 상세하게 기술되어 있으므로, 여기에서는 생략한다. 수치계산에 적용된 경계조건으로, 구동노즐인 축소/확대노즐 입구와 이젝터 입구에서 유입조건을 적용하였으며, 이젝터 디퓨저 출구에는 유출조건을 적용하였다. 또 모든 고체벽면에는 no-slip조건을 적용하였다. 본 연구의 이젝터 유동장이 이젝터 중심축에 대하여 대칭 형태이므로, 유로의 상반부에 대해서만 계산을 수행하였다.

본 연구의 수치해의 수렴은 소산율 $\epsilon = 10^{-4}$ 에 대하여 약 6000회의 반복계산이 소요되었으며, 축소/확대노즐과 이젝터 입구 그리고 이젝터 디퓨저 출구에서 질량유량의 변화를 조사하여, 이러한 계산영역의 경계를 출입하는 질량유량의 합이 $\pm 0.5\%$ 이하로 되는 조건을 수치해가 수렴한 것으로 판정하였다. 수치계산을 위하여 구동노즐 출구 부근과 이젝터 내부에서 강한 전단력 혹은 충격파가 발생하리라 예상되는 부분에 격자를 집중하였으며, 고체벽면에서 발생하는 경계층 유동을 효과적으로 계산하기 위하여, y^+ 의 값을 1.0이하로 하였다. 수치계산에서는 약 60000개의 정렬 격자점이 적용되었다.

4. 결과 및 고찰

Fig.3은 $Ma=4.35$ 이고, 2차흡인 유동의 압력이 $P_s=9.8\text{torr}$ 로 일정한 경우 1차유동의 압력 P_p 가 초음속 증기 이젝터의 작동특성에 미치는 영향을 나타내었다. 초음속 증기 이젝터 내부유동의 복잡성을 고려하는 경우, 본 연구의 수치계산의 결과는 비교적 실험결과⁽¹¹⁾와 잘 일치하는 것으로

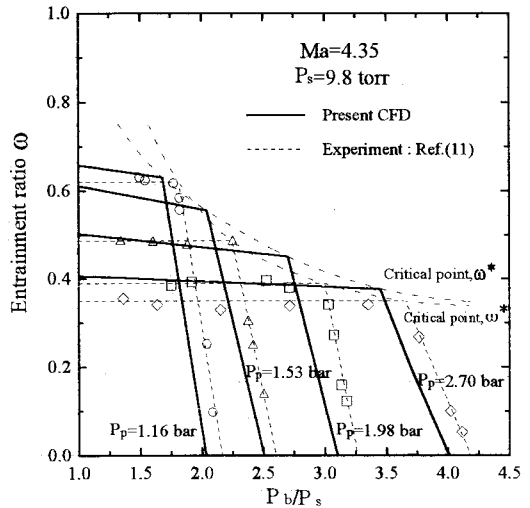


Fig.3 Entrainment ratio w vs P_b/P_s

보인다. 그림으로부터 P_p 가 증가할수록 임계모드에서 발생하는 w 즉 w^* 의 값은 작아진다는 것을 알 수 있다. 이것은 P_p 가 증가할수록 1차구동노즐 출구에서 압력이 증가하게 되므로, 2차 유동의 압력 P_s 와의 차압이 작아지게 되기 때문이다. 그림의 점선으로 나타낸 임계유량비 w^* 와 P_b/P_s 의 관계로부터 P_b/P_s 가 증가할수록 w^* 의 값은 작아진다는 것을 알 수 있다.

한편 그림으로부터 1차 구동노즐의 압력 P_p 가 증가하게 되면 w^* 는 감소하게 되지만, 초음속 증기이젝터를 임계모드로 작동시킬 수 있는 압력비 P_b/P_s 의 범위가 더욱 넓어진다는 것을 알 수 있다. 또 그림으로부터 P_p 가 감소할수록 아임계모드에 대한 P_b/P_s 의 변화비율이 급격해진다는 것을 알 수 있다. 이것은 어떤 이젝터가 진공펌프로 사용되는 경우, P_b/P_s 가 약간만 변화하더라도 2차 진공실에서 일정압력을 용이하게 얻을 수 있다는 것을 의미한다.

Fig.4에는 $Ma=4.35$ 이고, 1차 구동유동의 압력이 $P_p=1.98\text{bar}$ 로 일정한 경우, 2차흡인유동의 압력 P_s 가 초음속 증기 이젝터의 작동특성에 미치는 영향을 나타내었다. 그림으로부터 w^* 값은 P_s 가 증가할수록 증가하게 되며, 또 w^* 의 값은 P_b/P_p 의 값에 강하게 의존하는 것으로 보인다. 즉 P_b/P_p 가 증가하게 되면 w^* 의 값은 크게 증가하는 것으로 보인다. 이 경우 Fig.3의 결과와는 달리, P_s 가 증가할수록 임계모드로 작동할 수 있는 P_b/P_p 의 범위는 넓어진다.

위의 두 결과로부터 2차 흡인유량은 1차노즐 출구에서 발생하는 압력 P_e 에 의존할 것으로 판단된다. Fig.5에는 $Ma=2.70$ 과 4.35 의 두 이젝터에 대하여, 1차노즐의 출구압력 P_e 가 임계모드의 질량유량비 w^* 에 미치는 영향을 나타내었다. 그림

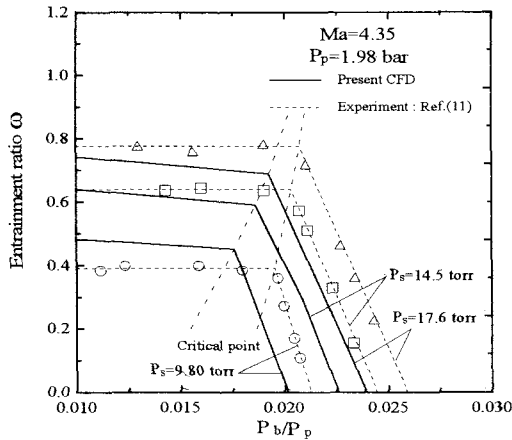


Fig.4 Entrainment ratio w vs P_b/P_p

에서 2차 유량 측의 압력 P_s 에 상관없이 w^* 는 P_e/P_s 가 증가할수록 작아진다는 것을 알 수 있다. 수치계산의 결과로부터 동일한 P_e/P_s 의 값에 대하여, w^* 의 값은 마하수에 의존하며, 1차노즐의 설계마하수가 증가할수록 w^* 은 증가한다. 그러나 $Ma=2.70$ 과 4.35 의 두 실험결과는 w^* 값이 마하수

에 의존하지 않는다는 것을 보여준다. 실제 초음속 증기 이젝터가 1차구동 유동의 전단작용과 압력강하의 두 작용으로 2차 구동유동이 흡인된다고 하는 가정하는 경우, 1차 노즐 출구에서 발생하는 고속기류의 전단작용은 마하수에 의존할 것으로 판단된다. 본 연구의 수치계산의 결과는 이와 같은 경향을 보여주는 반면, 실험결과는 w^* 가 1차 노즐의 설계마하수 즉 1차노즐의 형태와는 무관하다는 것을 보여준다. 실험과 수치계산의 이러한 차이는 현재로서는 분명하지 않지만, 보다 정교한 난류모델의 이용과 3차원 수치계산이 이러한 불일치의 원인을 밝혀줄지 모른다.

Fig.6에는 Fig.5와 동일한 유동조건에 대하여, w^* 와 $(P_s - P_e)/P_s$ 의 관계를 나타내었다. 그림의 수치계산결과와 실험결과는 w^* 의 값은 $(P_s - P_e)/P_s$ 가 증가할수록 모두 증가하는 경향을 나타내지만, 수치계산에서는 w^* 에 미치는 1차노즐의 설계마하수의 영향은 여전히 나타나는 반면에 실험에서는 나타나지 않는다. 이것은 1차노즐의 구동압력 P_p 가 일정하다고 하더라도 노즐 설계마하수에 따라 1차노즐의 출구에서 발생하는 압력 P_e 의 값이 달라지게 되기 때문이다. 따라서 Fig.7에는 w^* 를 $(P_s - P_e)/P_p$ 의 함수로 나타내었다. 그림으로부터 w^* 와 $(P_s - P_e)/P_p$ 의 상관관계들을 얻을 수 있다. 분명히 수치계산과 실험의 두 결과는 모두 1차노

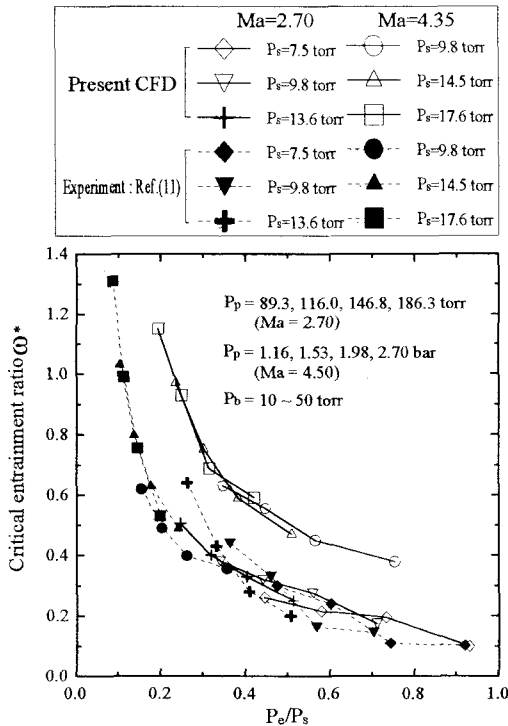


Fig.5 Critical entrainment ratio w^* vs P_e/P_s

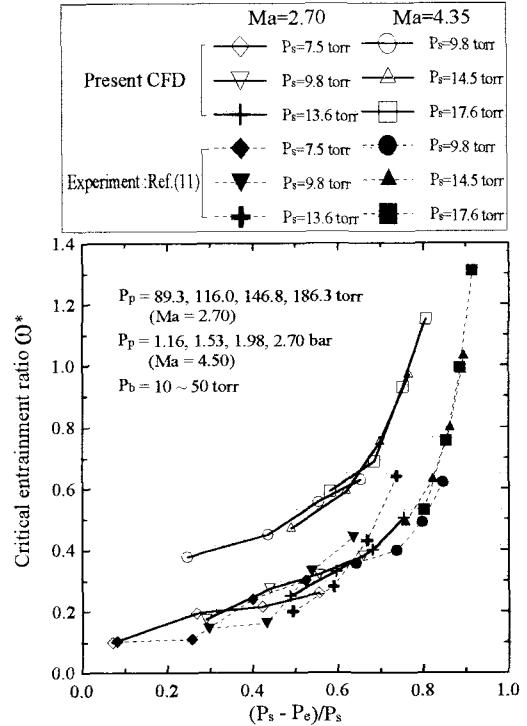


Fig.6 Critical entrainment ratio w^* vs $(P_s - P_e)/P_s$

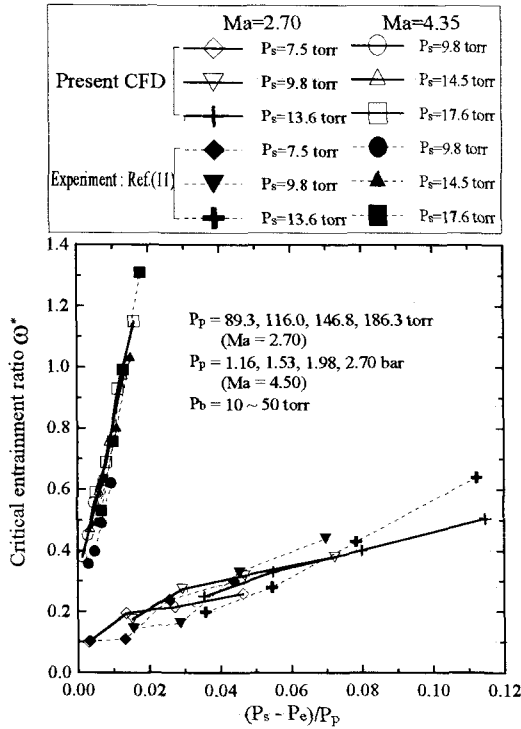


Fig.7 Critical entrainment ratio w^* vs $(P_s - P_e)/P_p$

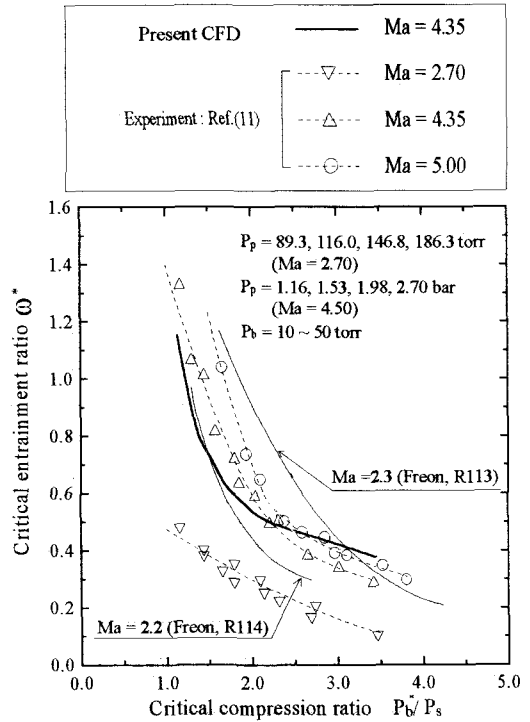


Fig.8 Critical entrainment ratio w^* vs $(P_s - P_e)/P_s$

즐의 마하수의 영향을 나타내고 있다. 예를 들면 1차노즐의 설계마하수 Ma 가 4.35인 경우 실험결과와 수치계산결과는 잘 일치하며, w^* 는 $(P_s - P_e)/P_p$ 가 증가할수록 급격하게 증가하는 경향을 보인다. 그러나 1차노즐의 설계마하수 Ma 가 2.70인 경우, w^* 는 $(P_s - P_e)/P_p$ 가 증가할수록 증가하지만, 그 증가비율은 $Ma=4.35$ 인 경우에 비해 상당히 작다. 또 동일한 $(P_s - P_e)/P_p$ 값에 대하여, w^* 의 값은 1차노즐의 설계마하수가 증가할수록 크게 된다. 따라서 동일한 구동압력으로 2차 흡인 유량을 크게 하려고 하는 경우에는 1차 구동노즐의 마하수 Ma 를 크게 설계할 필요가 있다는 것을 알 수 있다. 또 그림의 결과로부터 1차 구동노즐의 형상과 구동압력 P_p 가 주어지는 경우 P_e 는 이론계산으로 산출이 용이하므로, 2차 흡인 유동의 압력이 주어지는 경우 임계유량비 w^* 를 예측할 수 있다는 것을 알 수 있다.

Fig.8에는 초음속 증기이젝터의 임계압축비 P_b^*/P_s 와 임계유량비 w^* 와의 관계를 나타내었다. 또 그림에는 초음속 이젝터 냉동기에서 자주 사용되는 Freon기체를 1차노즐의 구동유체로 한 경우의 수치계산 결과를 함께 나타내었다. 그림으로부터 작동기체가 증기와 프레온 모두 임계압축비 P_b^*/P_s 가 증가하는 경우에 임계유량비 w^* 가 작아지며, 1차노즐의 설계마하수가 클수록 w^* 의

감소비율이 큰 것으로 보인다. 이것은 1차노즐의 마하수가 커지는 경우, 1차노즐의 마하수에 대한 2차 흡인유량의 의존성이 커지기 때문이라고 판단된다. 또 그림으로부터 증기이젝터에 대하여 동일한 임계압축비 P_b^*/P_s 가 적용되는 경우, 임계유량비 w^* 는 1차 노즐의 설계마하수가 커질수록 증가한다. 한편 그림의 결과로부터 임계유량비 w^* 와 임계압축비 P_b^*/P_s 는 거의 반비례 관계가 있는 것으로 나타난다. 즉 이젝터를 추기의 목적으로 사용하는 경우에 이젝터의 압축비는 낮아지게 되며, 반면에 이젝터를 압축기로 사용하는 경우에는 2차 흡인 유량이 작아지는 것을 알 수 있다. Fig.9에는 문헌 (11)로부터 얻어진 실험결과와 본 수치계산결과로부터, 초음속 증기 이젝터의 임계배압 P_b^* 과 임계유량비 w^* 의 관계를 나타내었다. 비록 실험과 수치계산결과에서 차이가 있지만, 본 수치계산은 w^* 와 P_b^* 의 실험적 관계를 잘 보여준다. 1차 구동노즐의 설계마하수가 4.35인 경우, 보다 넓은 범위의 P_b^* 에 대하여 w^* 가 얻어지게 된다는 것을 알 수 있다. 그림으로부터 P_b^* 가 일정한 경우, w^* 는 P_b^* 가 증가할수록 증가하게 되며, w^* 의 증가비율은 P_b^* 가 작을수록 크다. 그러나 P_s 가 일정한 경우 w^* 는 P_b^* 가 증가할수록 작아지며, w^* 의 감소비율은 P_s 가 증가할수록 작아지는 것으로 나타난다. 이러한 경향은 Ma 가 클수록 뚜렷하게 나타나므로, 이젝터 내부를 통하는 유

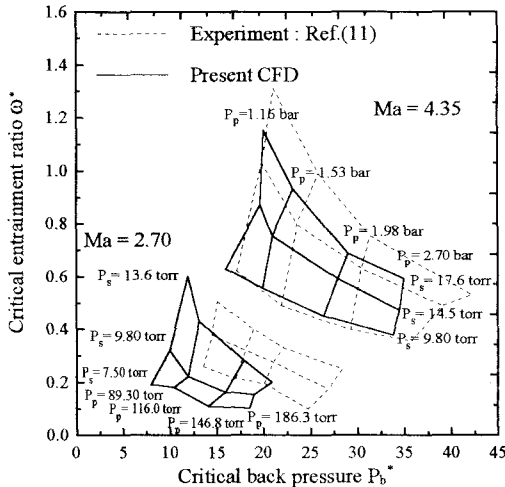


Fig.9 Critical entrainment ratio ω^* vs critical back pressure P_b^*/P_s

동은 1차노즐의 마하수에 보다 강하게 의존하게 된다는 것을 의미한다.

5. 결론

본 연구에서는 압축성 축대칭 Navier-Stokes 방정식의 수치해법을 행하여, 초음속 증기 이젝터의 작동 특성에 대해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 2차 유량 측의 압력이 일정한 경우 배압의 증가에 따라 임계혼입유량비는 감소하고, 1차 구동 유동의 압력이 일정한 경우 배압의 증가에 따라서 임계혼입유량비는 증가한다.
- (2) 초음속 증기 이젝터의 2차 흡입유량은 구동노즐 출구압력에 의존하며, 2차 유동의 압력이 일정한 경우 임계혼입유량비는 구동노즐 출구압력이 증가할수록 작아진다.
- (3) 동일한 구동노즐 및 출구압력 조건에서 임계혼입유량비는 마하수에 의존하며, 1차 노즐의 설계마하수가 증가할수록 임계혼입유량비는 증가한다.
- (4) 1차구동노즐의 형상과 2차유동의 압력이 주어지는 경우 임계혼입유량비를 예측할 수 있다.

후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

- (1) Keenan, J. H., Neumann, E. P. and Lustwerk, F., 1950, "An Investigation of Ejector Design by Analysis and Experiment," *Journal of Applied Mechanics*, Vol.17, No.3, pp.299-309.
- (2) Kim, H. D. and Kim, Y. G., 1995, "Simple Calculation Method for Performance Estimation of Supersonic Ejector," *KSPE Annual Conference*, pp.3-13
- (3) 최보규, 이영기, 김희동, 김덕출, 2000, "2차목을 가지는 초음속 이젝터 유동에 관한 수치계산," *대한기계학회 논문집 B권, 제24권 제8호*, pp.1128-1138.
- (4) 이영기, 김희동, 서태원, 1999, "축대칭 초음속 이젝터 펌프에 대한 수치해석적 연구," *대한기계학회 추계학술대회논문집 B권*, pp.518-523
- (5) Chow, W. L. and Addy, A. L., 1961, "Interaction between Primary and Secondary Streams of Supersonic Ejector System and Their Performance Characteristics," *AIAA Jour.* Vol.2, No.4, pp.680-695.
- (6) 최보규, 김희동, 우선훈, 2000, "아음속/음속 이젝터 유동의 성능해석," *제1회 한국유체공학학술대회 논문집*, pp.235-238
- (7) 김희동, 권오식, 구병수, 최보규, 2000, "추기 펌프용 아음속/음속 이젝터유동에 관한 수치해석적 연구," *추계학술대회논문집 B권*, pp.485-490.
- (8) 최보규, 김희동, 김덕출, 2000, "아음속/음속 이젝터의 유동에 관한 해석적 연구," *한국추진공학회지, 제4권 제3호*, pp.1-10.
- (9) Kim, H. D., Setoguchi, T., Yu, S., and Raghunathan, S., 1999, "Navier-Stokes Computations of the Supersonic Ejector-Diffuser System with a Second Throat," *Jour. of Thermal Science*, Vol.8, No.2, pp.79-88.
- (10) Kim, H. D., Lee, Y. K., Setoguchi, T. and Yu, S., 1999, "Numerical Simulation of the Supersonic Flows in the Second Throat Ejector-Diffuser Systems," *Journal of Thermal Science*, Vol.8, No.4, pp.214-222.
- (11) Chen, Y. M. and Sun, C. Y., 1997, "Experimental Study of the Performance Characteristics of a Steam-Ejector Refrigeration System," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.15, pp.384-394.