

초음속 이젝터 펌프 유동에 관한 수치해석

이영기* · 김화동* · 서태원*

A CFD Study of the Supersonic Ejector-Pump Flows

Youngki Lee* · Heuydong Kim* · Taewon Seo*

ABSTRACT

The flow characteristics of supersonic ejectors is often subject to compressibility, unsteadiness and shock wave systems. The numerical works carried out thus far have been of one-dimensional analyses or some Computational Fluid Dynamics(CFD) which has been applied to only a very simplified configuration. For the design of effective ejector-pump systems the effects of secondary mass flow on the supersonic ejector flow should be fully understood. In the present work the supersonic ejector-pump flows with a secondary mass flow were simulated using CFD. A fully implicit finite volume scheme was applied to axisymmetric compressible Navier-Stokes equations. The standard two-equation turbulence model was employed to predict turbulent stresses. The results obtained showed that the flow characteristics of constant area mixing tube types were nearly independent of the secondary flow rate, but the flow fields of ejector system with the second-throat were strongly dependent on the secondary flow rate due to the effect of the back pressure near the primary nozzle exit.

초 록

초음속 이젝터 유동특성은 압축성, 비정상성, 충격파 등으로 인하여 충분히 알려져 있지 않다. 종래의 이론적/실험적 연구결과들은 대부분 1차원 가정 하에서 얻어진 것들이며, 현재까지 수치계산법을 이용하여 이젝터 내부 유동장을 해석한 실례가 많지 않다. 뿐만 아니라 기존의 수치계산 결과들은 2차유동의 질량유량이 매우 작거나 없는 단순한 유동장에 대한 것들이었다. 본 연구에서는 초음속 이젝터-펌프 유동장을 수치적으로 해석하기 위하여 축대칭 수치계산 모델을 이용하였다. 수치계산은 축대칭 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한체적법을 적용하였으며, 표준형 $k-\epsilon$ 난류모델을 이용하였고, 2차유동의 질량유량을 변화시켜 1차유동과 2차유동의 질량비의 변화에 따른 이젝터 내부 유동장의 변화를 조사하였다. 그 결과, 2차목을 가지지 않는 일정 단면적의 혼합부를 가지는 이젝터의 경우, 이젝터 내부의 유동장

* 안동대학교 기계공학부(Andong Univ. School of Mechanical Eng.)

특성은 2차유동의 질량유량의 변화와 거의 무관하게 나타났다. 그러나 2차목을 가지는 경우는 2차유동의 질량유량의 증가에 따른 노즐출구 주위에서 배압으로 인하여 이젝터 내부 유동장이 크게 변화하였다.

기호설명

- C_p : 정압비열(specific heat at constant pressure)
 D : 직경(diameter of nozzle exit)
 E : 전에너지(total energy)
 H : 전엔탈피(total enthalpy)
 H_p : 노즐목의 높이(height of nozzle throat)
 H_2 : 2차목의 높이(height of second throat)
 M_{1p} : 1차 노즐 설계마하수(design Mach number)
 p : 압력(pressure)
 q : 열유속 벡터(heat flux vector)
 T : 정온도(static temperature)
 t : 시간(time)
 U_r : 기준속도(reference velocity)
 v : 속도(velocity)
 x : 위치벡터(position vector)
 Ψ : 목면적비(throat area ratio), $= H_2/H_p$
 ϵ : 소산율(rate of dissipation)
 ρ : 밀도(density)
 τ_{ij} : 점성 응력텐서(viscous stress tensor)

Subscripts

- 0 : 정체점 상태(stagnation state)
 a : 대기압 상태(atmospheric condition)
 ne : 노즐 출구(nozzle exit)
 p : 1차유동(primary flow)
 s : 2차유동(secondary flow)

1. 서론

이젝터(ejector)는 고속의 주 유동과 그 주위의 낮은 운동량을 가지는 유동사이의 운동량 교환을 통하여 기체를 압축시켜 수송하는 장치이다. 이젝터는 진공펌프나 배기펌프 혹은 추력증강의 용도^(1,2)가 가장 일반적이며, 이젝터-펌프 시스템(ejector-pump system)은 배기펌프의 용도로 주로 활용된다. 이젝터-펌프는 두 유동사이의 순수한 전단 작용이나 혼합관내에서의 난류혼합 작용만을 이용하여 유체를 수송하는 장치로, 그 효율이 일반적인 터보기계에 비하여 매우 낮다. 따라서 이젝터-펌프 시스템의 성능향상을 위해서는 이젝터 내부 유동특성들이 충분히 알려져야 하며, 경제적인 운전이 될 수 있는 적절한 작동조건의 부여가 필수적이다.

이젝터-펌프 시스템은 정류, 식용유, 합성섬유 등의 탈취, 진공건조 및 각종화학 공업 등에서 응용되고 있으며, 수력발전소의 홍수 대비용 제트펌프, 금속 가공용 블라스트 노즐, 로켓 엔진의 고고도 모사실험 장치나 V/STOL의 추력증강장치등에도 활용되고 있다^(3,4).

이와 같은 이젝터 유동에 대한 종래의 연구결과로, Liu 등⁽⁵⁾은 1차원 압축성유동 관계식의 운동량 방정식을 적용하여 초음속 이젝터의 성능에 미치는 이젝터 내부의 노즐, 덕트 및 디퓨저의 기하학적 형상 변화의 영향을 조사하였다. 또 Chen과 Benson 등^(6,7)은 TVD(Total Variation Diminishing) 및 특성곡선법(method of characteristics)을 적용한 2차원 수치계산을 수행하여 이젝터 내부의 복잡한 유동장을 모사하였으며, 초음속 이젝터의 작동조건이 혼합부내의 유동장 형태 및 1차유동과 2차유동의 질량유량비에 크게 의존함을 밝혔다. 그러나 이 연구들은 일정단면적 디퓨저를 적용한 단순한 형상에 대한 결과로 목면적비의 효과를 고려하지 않았다.

Tillman과 Kumar 등^(8,9)은 초음속 이젝터의 혼합성능 향상을 위하여 1차노즐 출구부분에 mixer

lobe를 적용하여 실험적·이론적인 연구를 수행하였으며, Presz Jr. 등⁽¹⁰⁾은 이러한 mixer lobe의 형상 변화가 2차유동의 추가성능에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였으나, 이젝터 내부 유동장의 특성에 대한 상세한 고찰이 행하여지지 않았다. 특히 이젝터에 대한 이러한 강제 혼합기구(forced mixer)들은 난류혼합을 촉진시키기 위한 것^(11,12)으로, 최근에는 제트소음을 경감시키는 방법으로도 이용하고 있다⁽¹³⁾.

한편 이젝터 성능개선을 위한 연구의 일환으로, Dutton 등⁽¹⁴⁾은 1차원 일정단면적 이젝터 모델을 적용하여 초우킹(choking)조건에 따른 성능해석을 수행한 결과, 초우킹 조건은 1차유동과 2차유동의 전온도비 및 비열비에 의존함을 밝혔다. 또 Nicholas 등⁽¹⁵⁾은 다양한 1차노즐의 형상에 대한 실험적 연구를 수행하여, 이젝터의 사용목적에 따른 적합한 노즐형상을 제시하였다. 그러나 이러한 연구들에서는 단순한 이론적 예측이나 이젝터 벽면에서의 압력측정에 의한 이젝터 내부유동장의 1차원적 추론에 그쳤으며, 이젝터 내부의 유동특성들은 단지 정성적으로 해석되는데 불과하였다.

Matsuo 등⁽¹⁶⁾은 배기펌프용 초음속 이젝터 성능개선을 위한 실험적 연구를 수행하여, 이젝터의 작동조건에 따른 2차유동의 흡입성능을 최대로 할 수 있는 이젝터 목면적비를 제시하였다. 그러나 2차목의 효과가 단지 실험결과로 추정되었는데 불과하여 이에 대한 정량적 평가가 필요하다. 최근 김 등^(17,18)은 진공펌프로 사용되는 이젝터-디퓨저 시스템에 수치해석법을 적용하여 이젝터 유동을 해석한 바 있다.

본 연구에서는 초음속 이젝터-펌프 유동장을 수치적으로 모사하기 위하여 Navier-Stokes 방정식을 이용하였으며, $k-\epsilon$ 난류모델을 적용하였다. 정상 축대칭 압축성 유동의 지배방정식은 유한체적법을 사용하여 수치적으로 모사되었으며, 시간항의 적분은 다단계 Runge-Kutta 방법을 이용하였다. 수치계산에서는 이젝터-펌프 시스템의 상반부에 약 40000개 정도의 격자점을 가지는 정렬격자(structured grid)를 사용하였다. 계산결과들은 초음속 이젝터 내부의 유동 특성들을 조사하고, 이젝터 목이 2차유동의 배기성능에 미치는 영향을 고찰

하는데 이용되었다.

2. 축대칭 점성 압축성 유동모델

2.1 지배방정식

본 연구에서는 이젝터 내부의 유동장을 수치적으로 모사하기 위하여, 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 포함하는 축대칭 압축성 유동방정식에 유한체적법을 적용하였다.

$$\Gamma \frac{\partial}{\partial t} \int_V Q dV + \oint [F - G] \cdot dA = 0 \quad (1)$$

식 (1)에서 F , G , Q 는 각각 보존형의 점성, 비점성 유속 벡터(flux vector) 및 주변수들에 대한 종속벡터로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F &= [\rho v, \rho v v_x + p i, \rho v v_y + p j, \rho v v_z + p k, \rho v H]^T \\ G &= [0, \tau_{xi}, \tau_{yj}, \tau_{zi}, \tau_{ij} v_j + q] \\ Q &= [p, v_x, v_y, v_z, T]^T \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 ρ , v ($v_x i + v_y j + v_z k$), H ($= E + p/\rho$)는 각각 밀도, 속도 및 단위질량당 전엔탈피(total enthalpy)이며, E 는 단위질량당 전에너지(total energy)로 내부에너지와 운동에너지의 합을 나타낸다. 또 τ_{ij} 와 q 는 각각 점성응력텐서(viscous stress tensor)와 열유속벡터(heat flux vector)를 나타낸다.

식 (1)에 포함된 전처리 행렬(preconditioning matrix) Γ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \theta & 0 & 0 & 0 & \rho T \\ \theta v_x & \rho & 0 & 0 & \rho T v_x \\ \theta v_y & \rho & 0 & 0 & \rho T v_y \\ \theta v_z & \rho & 0 & 0 & \rho T v_z \\ \theta H - 1 & \rho v_x & \rho v_y & \rho v_z & \rho T H + \rho C_p \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 ρT 는 일정압력인 경우의 온도에 대한 밀도의 도함수로, 이상기체와 비압축성 유체에 대하여

각각, $-p/RT$ 와 0의 값을 가진다. 또 매개변수 θ 는 다음으로 정의된다.

$$\theta = (1/U_r^2) - (\rho_T/\rho C_p) \quad (4)$$

위 식에서 기준속도(reference velocity) U_r 은 다음에 따라 결정된다.

$$U_r = \max(|v|, \nu/\Delta x, \epsilon\sqrt{\delta p/\rho}) \quad (5)$$

여기서 $\nu/\Delta x$ 는 국소 확산속도(local diffusion velocity)로, ν 는 국소 점성, 열 혹은 질량 소산계수의 최대값으로 취하며, Δx 는 소산이 발생하는 값 이상의 셀의 크기(inter-cell length scale)이다. 또 δp 와 ϵ 은 각각 인접한 셀 간의 압력차와 scaling parameter를 나타낸다.

2.2 수치계산방법

위의 지배방정식에 대한 정상해를 얻기 위하여 다중격자 수렴가속 기법(multigrid convergence acceleration scheme)을 적용한 time-marching scheme이 이용되었다. 공간 미분항의 적분에 이용된 수치해법은 완전 음적 유한체적법(fully implicit finite volume scheme)으로, 물리적 영역(physical domain)을 계산 셀(numerical cell)들로 나누고, 각 셀들에 대하여 적분방정식을 적용하였다. 공간 미분항의 적분은 2차 정도의 upwind scheme을 사용하였으며, 시간 미분항의 적분은 다단계 Runge-Kutta 방법을 적용하였다.

2.3 수치해석 유동장

본 수치계산에 사용된 초음속 이젝터에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에 나타난 초음속 이젝터는 1차정체실(primary stagnation chamber)

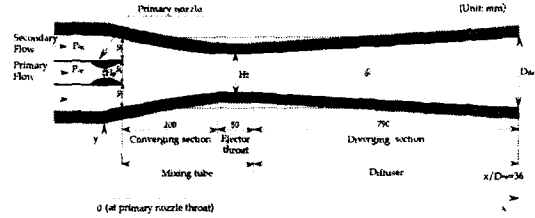


Fig. 1 Schematic diagram of supersonic ejector-pump flows

로부터 고압의 공기유동을 가속시키기 위한 초음속 노즐, 초음속 기류에 의하여 흡입되는 2차유동, 2차목 및 디퓨저로 구성되어 있다.

수치계산에서는 노즐출구에서의 설계마하수 $M_{1p} = 2.11$ 인 초음속 노즐을 사용하였다. 그림에서 p_{0p} 와 p_{0s} 은 각각 1차정체실과 2차유동의 전압력을 나타내며, H_p 와 H_2 는 각각 노즐 목과 이젝터 목의 높이를 나타낸다. 또 혼합부의 높이는 95 mm, 혼합부의 축소부분의 길이는 200mm, 이젝터 목의 길이는 50mm이며, 이젝터 목의 하류에 연결되어 있는 디퓨저의 길이는 790mm이다. 계산에서는 1차노즐 목의 높이 H_p 와 이젝터 목의 높이 H_2 의 비로 나타나는 이젝터 목면적비 $\Psi (= H_2/H_p)$ 를 정의하여, Ψ 의 값을 변화시켰다.

2.4 계산격자 및 경계조건

Fig. 2에는 본 연구에서 사용된 격자계를 나타내었다. 그림은 $\Psi = 4.39$ 인 경우에 적용된 정렬격자계로, 본 연구에서는 격자점을 1차노즐 출구 부근 및 혼합부입구 하류에 집중하도록 하였으며, 약 40000개의 격자점이 적용되었다. 또 벽 근처의 유동을 상세하게 조사하기 위하여 벽면부근에 격자를 집중하도록 하였다.

경계조건으로는 초음속 노즐입구와 디퓨저 출구에, 각각 유입조건과 유출조건에 해당하는 전압 p_{0p}



Fig. 2 Structured grid system, $\Psi = 4.39$

과 정압 p_a 를 적용하였다. 또 2차정체실 입구에서의 압력비 p_{0s}/p_a 로부터 유속(mass influx)을 산출하여 적용하였으며, 모든 벽면에는 no-slip 조건을 적용하였다.

본 연구에서 적용된 초음속 이젝터는 유로 중심축에 대하여 대칭형태이므로, 유로의 상반부에 대해서만 계산을 수행하였다. 수치계산에서는 이젝터의 작동압력비 p_{0p}/p_a 를 10으로 일정하게 하고, 목면적비 Ψ 및 2차유동의 질량유량 \dot{m}_s 를 변화시켰다.

본 수치계산의 수렴해는 계산잔차 $\epsilon < 0.001$ 의 조건과 계산경계를 통하는 mass imbalance 량이 무시할 수 있을 정도로 작은 값일 경우에 얻어지는 것으로 하였다. 이러한 수렴조건까지는 약 6000회의 반복계산이 소요되었다.

3. 결과 및 고찰

일반적으로 이젝터의 성능은 1차노즐 및 디퓨저 확대각, 1차노즐의 형상, 혼합부의 길이 등의 다양한 기하학적 조건들에 강하게 의존한다. 그러나 본 연구에서는 초음속 이젝터의 2차목이 이젝터의 유동특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 기하학적 형상에 대해서는 목면적비 Ψ 만을 변화시켰으며, 1차유동에 대한 2차유동의 질량유량비를 변화시켰다.

Fig. 3은 2차목을 가지지 않는 형태로 Ψ 가 5.86이고 p_{0p}/p_a 가 10인 경우, $\dot{m}_s/\dot{m}_p = 0.30$ 인 초음속 이젝터 유동에 대한 등밀도 선도이다. 그림에 나타난 유동장은 초음속 이젝터 내부의 유동특성들을 명확하게 관찰하고, 2차목을 가지는 경우의 유동특성들과 비교하기 위하여 x/D_{ne} 가 약 12인 지점까지 나타내었다.

Fig. 3에서 1차정체실로부터 고압의 공기가 노즐을 통해 팽창하여 얻어진 운동에너지를 이용하여, 2차정체실의 공기를 이젝터 출구로 수송하는 형태의 유동을 나타낸다. 구체적으로, 1차노즐의 출구에서 유동은 과팽창 제트 유동형태⁽¹⁸⁾로 노즐 출구부근에서는 경사충격파가 발생한다. 그후 경사충격파는 이젝터 중심축에서 정상반사(regular reflection)의 형태에 가깝게 반사하여 또 다른 형태의 경사충격파를

형성한다⁽¹⁹⁾. 이젝터 중심축을 지나는 유동은 이 충격파를 통하여 압축과 팽창을 반복하면서 하류로 향하게 되며 저속의 2차유동과 혼합하게 된다.

Fig. 4에는 Fig. 3과 동일한 압력비에서 Ψ 가 4.39로 이젝터 목을 가지는 경우의 등밀도 선도를 나타내었다. Fig. 4에서 질량유량비가 비교적 낮은 $\dot{m}_s/\dot{m}_p < 0.25$ 의 조건에서는 Fig. 3에서 기술한 유동특성과 매우 유사하지만, $\dot{m}_s/\dot{m}_p > 0.25$ 의 조건에서는 다소 다른 유동특성들을 나타낸다.

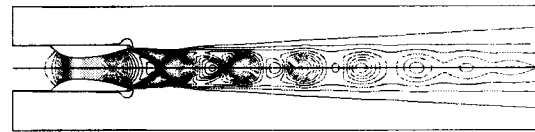
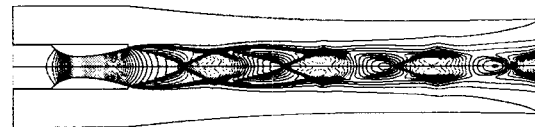
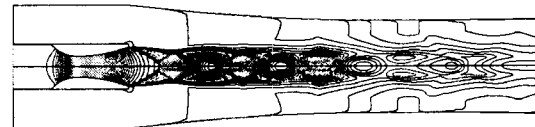


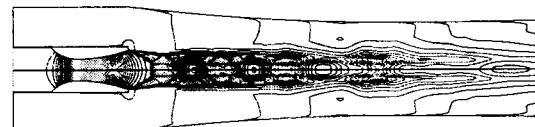
Fig. 3 Isopycnics for $\dot{m}_s/\dot{m}_p = 0.30$ ($\Psi = 5.86$, $p_{0p}/p_a = 10$)



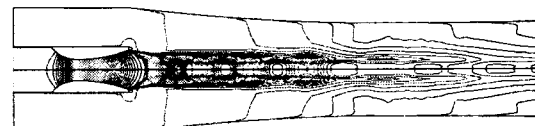
(a) $\dot{m}_s/\dot{m}_p = 0.12$



(b) $\dot{m}_s/\dot{m}_p = 0.25$



(c) $\dot{m}_s/\dot{m}_p = 0.30$



(d) $\dot{m}_s/\dot{m}_p = 0.35$

Fig. 4 Isopycnics for various \dot{m}_s/\dot{m}_p values ($\Psi = 4.39$, $p_{0p}/p_a = 10$)

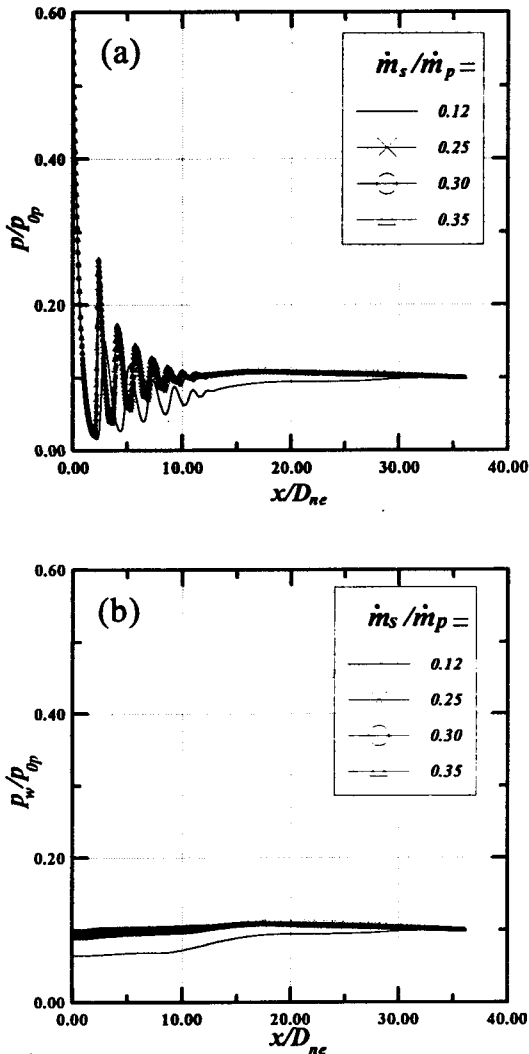


Fig. 5 Static pressure distributions for various \dot{m}_s/\dot{m}_p values ($\Psi=5.86$, $p_{0p}/p_a=10$): (a) along the axis, (b) along the wall

즉 노즐출구 부근에서 발생한 경사충격파가 노즐 출구로부터 약간 하류의 위치에서 마하반사(Mach reflection)하여 마하디스크(Mach disk)를 형성한다. 따라서 1차노즐을 통하여 초음속으로 가속된 유동은 이러한 마하디스크를 지나 감속하며, 제트경계 부근에서 형성되는 경사충격파를 지나는 유동과 혼합하여 재가속하여, 그 하류에서 유사한 형태의 약한 충격파를 형성한다. 또 노즐출구 하류에서 마하

디스크를 지나는 아음속 유동과 경사충격파를 지나는 초음속 유동의 경계에 미끄럼선(slip line)을 형성하게 된다.

Fig. 5의 (a)와 (b)에는 \dot{m}_s/\dot{m}_p 의 값을 변화시킨 경우, 일정 단면적의 혼합부를 가지는 이젝터의 중심축 및 벽면을 따르는 정압분포를 나타내었다. 그림 (a)와 (b)의 종축은 국소정압을 1차정체실 압력 p_{0p} 로 무차원한 값이다. 먼저 Fig. 5 (a)의 이젝터 중심축을 따르는 유동은 다수의 충격파를 지나 압축과 팽창을 반복한 후, 출구까지는 거의 일정한 압력을 유지하며 출구에서 대기압 상태로 방출된다. 이러한 경향은 \dot{m}_s/\dot{m}_p 에 관계없이 유사하게 나타나지만, \dot{m}_s/\dot{m}_p 가 비교적 큰 값을 가지는 경우들에서 압력분포가 거의 일치하고 있으므로, 중심축을 따르는 유동은 2차유동의 질량유량의 변화에 거의 무관하다는 것을 알 수 있다. 그러나 \dot{m}_s/\dot{m}_p 가 0.12로 작은 경우는 1차유동은 다른 조건에 비하여 상대적으로 낮은 운동량을 가지는 2차유동과 상호작용을 하게 되므로 충격파의 강도는 약하게 나타난다.

한편 Fig. 5(b)의 이젝터 벽면을 따르는 유동은 이젝터 중심축을 따르는 유동과는 달리 유동방향의 압력은 크게 변화하지 않는다. x/D_{ne} =약 13보다 상류에서 중심축을 따르는 유동은 다수의 충격파에 의하여 심한 압력변동을 겪게 되지만, 벽면 근처의 유동의 압력은 거의 일정하므로, 일정 단면적의 혼합부를 가지는 이젝터 내부에서는 1차유동과 2차유동의 혼합이 활발히 이루어지지 않는다는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 5(a)와 (b)로부터 동일한 \dot{m}_s/\dot{m}_p 에 대하여 압력분포를 비교하여 보면, x/D_{ne} =약 13보다 하류에서는 중심축과 벽면의 압력이 거의 같다. 따라서 $\Psi=5.86$ 의 경우는 x/D_{ne} 가 약 13 이상에서 1차유동과 2차유동이 혼합하여, 단면에 걸쳐 거의 균일한 유동으로 된다. 특히 \dot{m}_s/\dot{m}_p 가 0.12로 작은 경우는 1차유동으로 인한 2차유동의 흡입작용이 다른 조건들과 비교하여 상대적으로 크므로 2차유동 입구에서의 압력은 낮은 값을 나타낸다.

Fig. 6에는 $\Psi=4.39$ 인 이젝터-펌프 시스템의 중

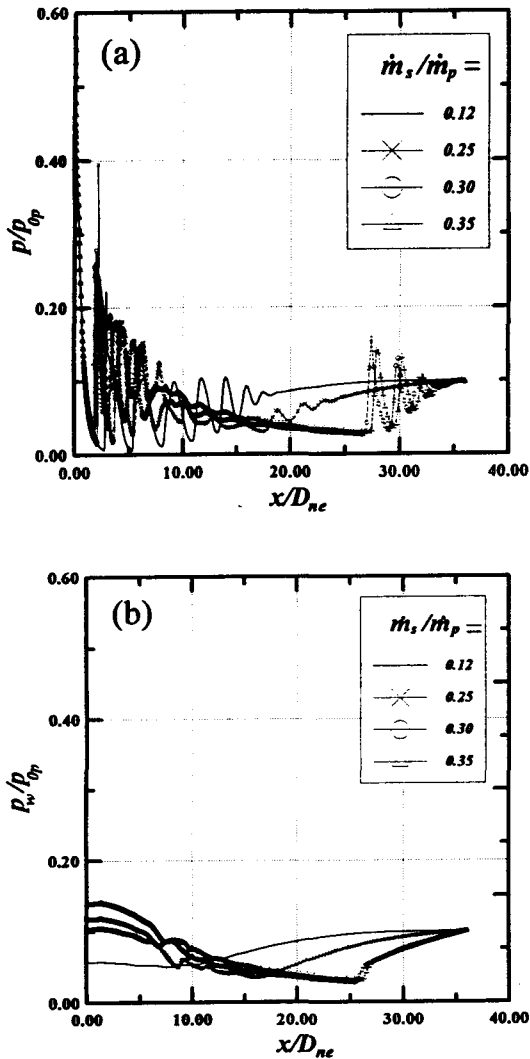


Fig. 6 Static pressure distributions for various values ($\Psi=4.39$, $p_{0p}/p_a=10$); (a) along the axis, (b) along the wall

심축 및 벽면을 따르는 정압분포를 나타내었다. Fig. 6(a)에서 $\dot{m}_s/\dot{m}_p < 0.25$ 인 경우, 유동특성은 Fig. 5(a)에서 기술한 바와 정성적으로 매우 유사하며, 유동은 2차목에서 초크하지 않는다. 따라서 \dot{m}_s/\dot{m}_p 의 증가에 따라 1차노즐의 출구로부터 발생하는 충격파 시스템은 하류로 이동하며, 디퓨저 출구부근에서 충격파는 발생하지 않는다. 그러나

$\dot{m}_s/\dot{m}_p = 0.25$ 이상에서는 노즐출구부근에서 배압의 영향으로 인하여 전체적인 유동장은 일정 단면적 혼합부를 가지는 경우와 다르게 나타난다. 구체적으로 $\dot{m}_s/\dot{m}_p > 0.25$ 의 경우에서, 유동은 디퓨저내에서 가속하다가 디퓨저의 하류영역, 즉 $x/D_{ne} \approx 27$ 의 위치에서 발생하는 다수의 충격파를 지나서 감속한 후 외부로 방출된다. 따라서 이젝터 내부에서 발생하는 유동은 1차노즐 목과 2차목에서 이중 초크하여, 이젝터의 혼합부에서 유동은 디퓨저 출구에서 발생하는 유동장에 의존하지 않게 된다.

Fig. 6(b)의 이젝터 벽면을 따르는 유동의 정압분포에 미치는 질량유량비의 영향은 $\dot{m}_s/\dot{m}_p > 0.25$ 에 대하여 크지 않다. 특히 $\dot{m}_s/\dot{m}_p > 0.25$ 의 경우, 디퓨저 출구 부근의 첫 번째 충격파가 발생하는 위치에서 벽면 근처의 유동 역시 큰 압력상승을 겪는다. 그러나 $\dot{m}_s/\dot{m}_p < 0.25$ 인 경우, 유동은 2차목에서 초크하지 않으므로 혼합부 상류의 유동은 하류의 상태에 의존하여 변하게 된다. 또 \dot{m}_s/\dot{m}_p 가 0.12로 작은 경우는 Fig. 5(b)에서 기술한 바와 같은 이유로 2차유동 출구의 압력은 낮다. 더욱이 Fig. 6(a)와 비교하여 $x/D_{ne} \approx 10$ 인 지점에서 중심축과 벽면의 압력이 거의 일치하므로 $x/D_{ne}=10$ 을 지나서 1차유동과 2차유동의 혼합이 잘 이루어짐을 관찰할 수 있다. 따라서 이 결과는 Fig. 5와 비교하여 초음속 이젝터에 2차목을 설치하면 이젝터의 혼합 성능이 향상된다는 것을 의미한다.

Fig. 7에는 이젝터의 중심축을 따르는 전압분포를 나타내었으며, 종축의 국소전압을 1차정체실 압력 p_{0p} 로 무차원화하였다. 그림에서 전압은 첫 번째 충격파가 발생하는 위치에서 가장 급격하게 감소하며, 그 하류에서 발생하는 충격파들에 의한 전압손실은 첫 번째 충격파에 비하여 크지 않다. Fig. 7(a)는 이젝터가 일정 단면적의 혼합부를 가지는 경우로, 이젝터 내부의 유동이 다수의 충격파군을 지날 때 발생하는 전압의 변화는 \dot{m}_s/\dot{m}_p 에 거의 무관하게 나타난다. 따라서 일정 단면 혼합부를 가지는 이젝터 내부의 유동은 \dot{m}_s/\dot{m}_p 의 변화에 크게 의존하지 않는다

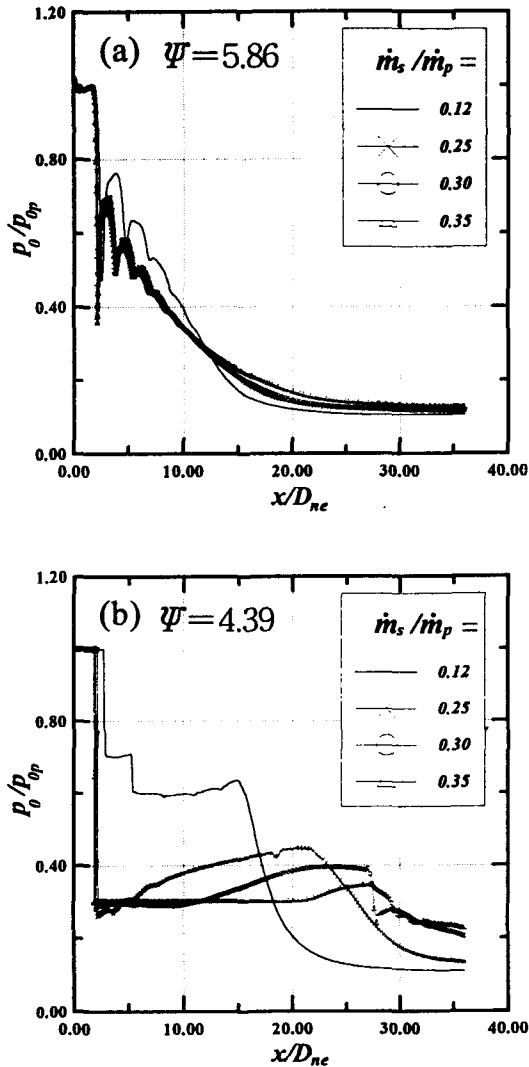


Fig. 7 Total pressure distributions along the axis for various \dot{m}_s/\dot{m}_p values, $p_{0p}/p_a = 10$; (a) $\Psi = 5.86$, (b) $\Psi = 4.39$

한편, Fig. 7(b)는 이젝터가 2차목을 가지는 $\Psi = 4.39$ 의 경우로, Fig. 7(a)에 비하여 \dot{m}_s/\dot{m}_p 가 유동장에 미치는 영향은 상대적으로 크다. 구체적으로 $\dot{m}_s/\dot{m}_p > 0.25$ 인 경우, 유동의 전압은 마하디스크를 지나면서 급격하게 감소하며, 디퓨저 하류에서 다소 강한 충격파가 발생함을 알 수 있다. Fig. 7(a)와 (b)에서 전압손실의 크기는 주로 이젝터-펌

프 내부 유동장에서 발생하는 충격파의 강도에 의존하지만, 전압이 증가하는 요인은 유동방향을 따르는 국소마하수의 증가에 기인한다. 구체적으로 Fig. 7(a)와 (b)에서 노즐출구 하류에서 발생하는 충격파군의 내부에서 유동이 팽창하는 부분과 Fig. 7(b)의 $\dot{m}_s/\dot{m}_p > 0.25$ 인 경우 이젝터의 2차목에서 유동이 초크하여 디퓨저 출구부근에서 충격파가 발생하는 위치까지 국소마하수의 증가에 의하여 유동의 전압은 증가하게 된다.

4. 결 론

초음속 이젝터-펌프 시스템에서 발생하는 유동장을 조사하기 위하여, 본 연구에서는 2차목을 가지는 이젝터와 일정단면 혼합관을 가지는 이젝터 유동장에 수치계산법을 적용하였다. 계산조건으로는 이젝터의 1차유동과 2차유동의 혼합특성을 조사하기 위하여, 이젝터 목면적비와 두 유동의 질량유량비를 변화시켰다. 그 결과 일정 단면적의 혼합부를 가지는 이젝터의 경우, 이젝터 내부의 유동특성은 \dot{m}_s/\dot{m}_p 의 변화에 크게 의존하지 않았지만, 2차목을 가지는 경우에는 1차유동의 특성이 \dot{m}_s/\dot{m}_p 에 크게 의존하는 것으로 나타났다. 2차목을 가지는 이젝터-펌프 시스템에 대하여 \dot{m}_s/\dot{m}_p 가 큰 경우, 디퓨저 하류에 새로운 충격파들이 발생하여 2차목에서 유동은 이중초크한다는 것을 알았다.

참 고 문 헌

1. Fabri, J. and Siestrunk, R., "Supersonic Air Ejectors," Advances in Applied Mechanics, New York, N. Y., Academic Press, Vol.5, 1958, pp.1~34.
2. Vogel, R., "Practical Application of Air Ejectors," NASA TT F-9352, 1956.
3. Alperin, M. and Wu, J. J., "Thrust Augmenting Ejectors, Part 2," AIAA Jour.,

- Vol.21, No.12, 1983, pp.1698~1706.
4. Yang, T. T., Ntone, F., Jiang, T. and Pitts, D. R., "An Investigation of High Performance, Short Thrust Augmenting Ejectors," *Jour. Fluids Eng.*, Vol.107, 1985, pp.23~30.
 5. Liu, C. F. and Chen, F., "Analysis of Performance of The Second-Throat Ejector-Diffuser," *Jour. Chinese Soc. Mech. Engr.*, Vol.13, No.5, 1992, pp.478~482.
 6. Chen, F., Liu, C. F. and Yang, J. Y., "Supersonic Flow in the Second-Throat Ejector-Diffuser System," *Jour. Spacecraft and Rockets*, Vol.31, No.1, 1994, pp.123~129.
 7. Benson, R. S. and Eustace, V.A., "A Study of Two-Dimensional Supersonic Air Ejector Systems," *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol.187, 1973, pp.733~743.
 8. Tillman, T. G. and Presz Jr., W. M., "Thrust Characteristics of a Supersonic Mixer Ejector," *Jour. Propulsion and Powers*, Vol.11, No.5, 1995, pp.931~937.
 9. Kumar, R. R. and Kurian, J., "Estimation of Mixing of High-Speed Streams," *Jour. Propulsion and Power*, Vol.12, No.2, 1995, pp.429~431.
 10. Presz Jr., W., Blinn, R. F. and Morin, B., "Short Efficient Ejector Systems," *AIAA/SAE/ASME/ASEE 23rd Joint Propulsion Conf.*, San Diego, California, 1987, pp.1~9.
 11. Yu, Simon C. M., Yip, T. H. and Liu, C. Y., "Mixing Characteristics of Forced Mixers with Scalloped Lobes," *Jour. Propulsion and Power*, Vol.13, No.2, 1997, pp.305~311.
 12. Belovich, V. M. and Samimy, M., "Mixing Processes in a Coaxial Geometry with a Central Lobed Mixer-Nozzle," *Jour. AIAA*, Vol.35, No.5, 1997, pp.838~841.
 13. Dong, T. Z. and Mankbadi, R. R., "Simulation of Unsteady Flow in Nozzle-Ejector Mixer," *Jour. Propulsion and Power*, Vol.15, No.4, 1999, pp.539~543.
 14. Dutton, J. C. and Carroll, B. F., "Limitation of Ejector Performance Due to Exit Choking," *Jour. Fluids Eng.*, Vol.110, 1988, pp.91~93.
 15. Nicholas, T. M. T., Narayanan, A. K. and Muthunayagam, A. E., "Mixing Pressure-Rise Parameter for Effect of Nozzle Geometry in Diffuser-Ejectors," *Jour. Propulsion and Power*, Vol.12, No.2, 1995, pp.431~433.
 16. Matsuo, K., Sasaguchi, K., Tasaki, K. and Mochizuki, H., "Investigation of Supersonic Air Ejectors, Part 2. Effects of Throat-Area-Ratio on Ejector Performance," *Bulletin of the JSME, Series B*, Vol.25, No.210, 1982, pp.1898~1905.
 17. 김희동, 이영기, 서태원, "이차원 초음속 이젝터 유동에 대한 수치해석적 연구," *한국추진공학회 논문집*, 제2권, 제1호, 1998, pp.1~12.
 18. Kim, H. D. et al., "Navier-Stokes Computations of Supersonic Ejector-Diffuser System with a Second-Throat," *Jour. Thermal Science*, Vol.8, No.2, 1999, pp.79~88.
 19. Matsuo, K. and Kim, H. D., "Shock Train and Pseudo-Shock Phenomena in Internal Gas Flows," *Progress in Aerospace Sciences*, Vol.35, No.1, 1999, pp.33~100.