

## 2차목을 가지는 초음속 이젝터 유동에 관한 수치계산

최보규\* · 이영기\*\* · 김희동\*\*\* · 김덕줄\*\*\*\*  
(2000년 4월 22일 접수)

### Computations of the Supersonic Ejector Flows with the Second Throat

Bo-Gyu Choi, Young-Ki Lee, Heuy-Dong Kim and Duck-Jool Kim

Key Words: Compressible Flow(압축성 유동), Supersonic Ejector(초음속 이젝터), Supersonic Nozzle(초음속 노즐), Shock Wave(충격파), Internal Flow(내부유동), Supersonic Diffuser(초음속 디퓨저), Second Throat(2차목)

#### Abstract

Pumping action in ejector systems is generally achieved through the mixing of a high-velocity and high-energy stream with a lower-velocity and lower-energy stream within a duct. The design and performance evaluation of the ejector systems has developed as a combination of scale-model experiments, empiricism and theoretical analyses applicable only to very simplified configurations, because of the generic complexity of the flow phenomena. In order to predict the detailed performance characteristics of such systems, the flow phenomena throughout the operating regimes of the ejector system should be fully understood. This paper presents the computational results for the two-dimensional supersonic ejector system with a second throat. The numerical simulations are based on a fully implicit finite volume scheme of the compressible Reynolds-averaged Navier-Stokes equation in a domain that extends from the stagnation chamber to the diffuser exit. For a wide range of the operating pressure ratio the flow field inside the ejector system is investigated in detail. The results show that the supersonic ejector systems have an optimal throat area for the operating pressure ratio to be minimized.

#### 1. 서 론

일반적으로 이젝터(ejector)는 고압의 기체를 노즐로 분출시켜, 그 분류 주변의 저압기체와 운동량 교환을 통하여 저압의 기체를 보다 높은 압력까지 압축하여 수송하는 장치이다. 이젝터는 노

즐(nozzle), 혼합부(mixing section) 및 디퓨저(diffuser)로 구성되어 있으며, 이젝터 시스템 내부에 어떤 회전부분이나 활동부분을 가지지 않으므로 고장이 적고, 소형임에도 불구하고 대용량의 유체를 압축할 수 있는 특징을 가지고 있다.

이젝터는 약 50년전 증기터빈 복수기(condenser)의 추기(bleed)용 펌프용으로 이용되기 시작하여, 진공펌프, 배기펌프 및 열압축기 등에 주로 이용되어 왔다.<sup>(1,2)</sup> 또 최근에는 연소장치, 천연가스장치, 식품제조장치, 공조시설, 건조 및 탈취장치, 각종 화학분야 등에 다양하게 이용되고 있을 뿐만 아니라, 수력발전소에서 홍수에 대비하여 비상용으로 설치하고 있는 제트펌프(jet pump), 금속 가공용 블라스트 노즐(blast nozzle),

\* 회원, 안동대학교 BK21 연구원

\*\* 안동대학교 대학원

\*\*\* 회원, 안동대학교 기계공학부

E-mail : kimhd@andong.ac.kr

TEL : (054)850-5622 FAX : (054)841-1630

\*\*\*\* 회원, 부산대학교 기계공학부

로켓트 엔진의 고고도 모사실험 장치나 V/STOL의 추력증강장치 등에 응용되면서 많은 실험 및 이론적 연구가 수행되어 왔다.<sup>(3,4)</sup>

이젝터의 주된 사용목적은 일반적으로 고진공을 얻기 위한 것, 대용량 유체의 추기를 위한 것과 추력증가를 위한 것이며, 고진공을 얻기 위한 목적으로 사용되는 이젝터에서 2차유동(secondary flow)의 유량은 거의 없으며, 2차정체실에서의 진공도는 매우 높다. 또 대용량의 추기를 위한 목적으로 사용되는 이젝터에서 2차유동의 유량은 상당히 많으며, 2차정체실의 진공도는 크지 않다. 추력증가용으로 사용되는 이젝터에서는 1차노즐 유동에 의하여 발생하는 추력에 흡인되는 2차유동의 추력을 부가한다.

이와 같은 이젝터 유동에 대한 최근의 연구결과로, 문헌 (5)에서는 1차원 압축성유동 관계식의 운동량방정식을 적용하여 초음속 이젝터의 성능에 미치는 이젝터 내부의 노즐, 덕트 및 디퓨저의 기하학적 형상 변화의 영향을 조사하였다. 또 문헌 (6,7)에서는 TVD(Total Variation Diminishing) 및 CSCM(Conservative Supra-Characteristic Method)기법을 적용한 2차원 수치계산을 수행하여 이젝터 내부의 복잡한 유동장을 모사하였으며, 초음속 이젝터의 작동조건이 혼합부내의 유동장 형태에 크게 의존함을 밝혔다. 그러나 이 연구들은 일정 단면적 디퓨저를 적용한 단순한 형상에 대한 결과로 목면적비의 효과를 고려하지 않았다.

문헌 (8,9)에서는 초음속 이젝터의 혼합성능 향상을 위하여 1차노즐 출구부분에 mixer lobe를 적용하여 실험적·이론적인 연구를 수행하였으며, 문헌 (10)에서는 이러한 mixer lobe의 형상변화가 2차유동의 추기성능에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였으나, 이젝터 내부 유동장의 특성에 대한 상세한 고찰이 행하여지지 않았다.

한편 이젝터 성능개선을 위한 연구의 일환으로, 문헌 (11)에서는 Addy 등<sup>(12)</sup>에 의해 제안된 1차원 일정단면적 이젝터 모델을 적용하여 초킹(choking)조건에 따른 성능해석을 수행한 결과, 초킹 조건은 1차유동과 2차유동의 전온도비 및 미열비에 의존함을 밝혔다. 또 문헌 (13)에서는 다양한 1차노즐의 형상에 대한 실험적 연구를 수행하여, 이젝터의 사용목적에 따른 적합한 노즐

형상을 제시하였다. 그러나 이러한 연구들에서는 단순한 이론적 예측이나 이젝터 벽면에서의 압력 측정에 의한 이젝터 내부유동장의 1차원적 추론에 그쳤으며, 이젝터 내부의 유동특성들은 단지 정성적으로 해석되는데 불과하였다.

문헌 (14,15)에서는 진공펌프용 초음속 이젝터 성능개선을 위한 실험적 연구를 수행한 결과, 2차정체실의 압력변화가 최소로 되는 이젝터 압력비를 제시하였다. 그러나 2차정체실의 압력이 최소로 되었다가 다시 증가하게 되는 원인을 규명하지 않았으며, 2차목의 효과가 단지 실험결과로 추정되었는데 불과하여 이에 대한 정량적 평가가 필요하다.

본 연구에서는 기존에 수행되었던 초음속 이젝터에 대한 실험적 연구의 타당성을 검증하고, 진공펌프 용도로 이젝터를 사용하는 경우에 이젝터의 작동 특성을 규명하기 위하여 이젝터 내부 유동장에 대하여 상세한 수치모사를 수행하였다. 수치계산에는 이젝터 목을 가지는 초음속 이젝터 유동장에 대하여 표준  $k-\epsilon$  난류모델<sup>(17)</sup>을 포함하는 2차원 압축성 유동방정식에 유한체적법을 적용하였으며, 상용코드인 FLUENT를 이용하였다. 수치계산 조건으로 1차노즐의 설계마하수가 2.11과 3.41인 경우에 다양한 목면적비(throat area ratio) 및 이젝터 작동압력비에 대해 수행되었다. 수치계산 결과들은 이젝터 내부의 유동특성들을 조사하는데 이용되었으며, 진공펌프의 용도로 이젝터를 사용하는 경우, 최대의 진공성능을 나타내는 최적의 이젝터 압력비와 목면적비가 존재함을 알았다.

## 2. 2차원 압축성유동의 수치계산

### 2.1 지배방정식

본 연구에서는 이젝터 내부의 유동장을 수치적으로 모사하기 위하여, 표준  $k-\epsilon$  난류모델을 포함하는 2차원 압축성 유동방정식에 유한체적법을 적용하였다. 2차원 정상 압축성유동의 지배방정식은 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식과 에너지 방정식으로부터 각각 다음으로 쓰여진다.

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

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

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

여기에서  $u_i, u_j$  ( $i, j = 1, 2$ )는 각각  $x_i, x_j$ 에 대응하는 직교좌표계의 속도성분들이며,  $\rho$ 는 밀도,  $p$ 는 압력,  $\mu$ 는 점성계수,  $H$ 는 비엔탈피,  $\chi$ 는 열전도율,  $\mu_t$ 는 난류점성계수,  $Pr_t$ 는 난류 Prandtl수,  $\tau_{ij}$ 는 deviatoric stress tensor를 나타낸다. 또 표준  $k-\epsilon$ 모델에서, Reynolds 응력들은 다음과 같이 쓰여진다.

여기에서  $u'_i, u'_j$  ( $i, j = 1, 2$ )는 각각 직교좌표계의 변동속도성분,  $\delta_{ij}$ 는 Kronecker delta이며, 난류점성계수는 다음과 같이 주어진다.

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (4)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

위의 식 (5)에서 난류운동에너지  $k$ 와 소산율  $\epsilon$ 은 난류에너지의 수송이론으로부터 다음과 같은 방정식들로 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - G_b - \rho \epsilon (1 + 2 M_t^2) \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \{ G_k + (1 - C_{3\epsilon}) G_b \} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (7)$$

여기에서  $M_t$ 는 난류마하수이며,  $M_t = (k/a^2)^{0.5}$ 로 정의되었다. 또  $G_k$ 는 난류응력에 의한  $k$ 의 발생량,  $G_b$ 는 부력에 의한  $k$ 의 발생량으로 이상기체의 경우에 각각 다음과 같이 정의된다.

$$G_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (8)$$

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (9)$$

위의 식들에서 부력(buoyancy force)의 효과가 무시되는 경우에  $G_b$ 는 고려되지 않는다. 또 본 난류모델에 이용된 상수들은 실험으로부터 얻어진 다음과 같은 값들이 적용되었다.

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, Pr_t = 0.85 \quad (10)$$

2.2 수치해석 유동장 및 경계조건

본 수치계산에 사용된 초음속 이젝터에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에 나타난 초음속 이젝터는 1차정체실(primary stagnation chamber)로부터 고압의 공기유동을 가속시키기 위한 초음속 노즐, 2차정체실(secondary stagnation chamber), 2차목 및 디퓨저로 구성이 되어있다.

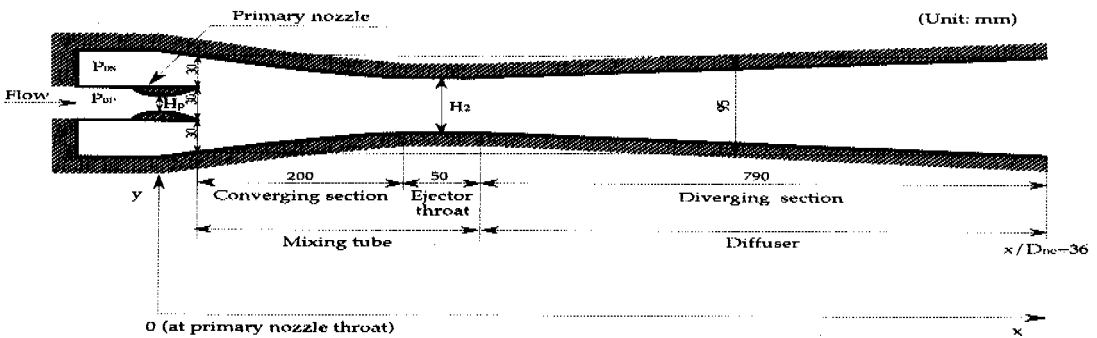


Fig. 1 Schematic of supersonic ejector flow field

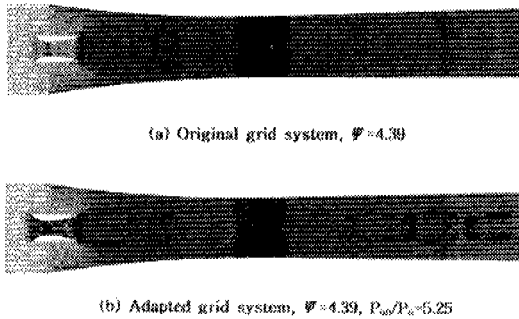


Fig. 2 Unstructured grid system

수치계산에서는 두 가지 종류의 초음속 노즐을 사용하였으며, 1차노즐 출구에서 설계마하수  $M_{1b}$ 를 각각 2.11과 3.41로 설정하였다. 그림에서  $P_{0b}$ 와  $P_{0s}$ 은 각각 1차정체실과 2차정체실의 압력을 나타내며,  $H_1$ 와  $H_2$ 는 각각 노즐목과 이젝터목의 높이를 나타낸다. 1차노즐과 2차유동의 혼합부 입구높이는 각각 30mm, 혼합부의 높이는 95mm로 하였으며 1차노즐 tip의 두께를 2.5mm로 하였다. 또 혼합부의 축소부분의 길이는 200mm, 이젝터목의 길이는 50mm이며, 이젝터목의 하류에 연결되어 있는 디퓨저의 길이는 790mm이다. 계산에서는 1차노즐목의 높이  $H_1$ 와 이젝터목의 높이  $H_2$ 의 비로 나타나는 이젝터 목면적비 ( $\Psi = H_2/H_1$ )를 정의하여,  $\Psi$ 의 값을 변화시켰다.

Fig. 2에는 본 연구에서 사용된 격자계를 나타내었다. 그림 (a)는  $\Psi=4.39$ 인 경우에 적용된 비정렬격자계(unstructured grid system)로, 본 연구에서는 격자점을 1차노즐 출구 부근 및 이젝터 내부유동이 매우 복잡한 양상을 나타내는 혼합부입구 하류에 집중하도록 하였으며, 약 25000개의 격자점이 적용되었다. 그림의 (b)는 그림 (a)의 격자계에  $P_{0b}/P_a = 5.2$ 인 경우, gradient grid adaptation을 통한 격자의 재생성 결과로 압력구배가 큰 영역에 격자점이 집중되도록 하였다.

경계조건으로는 초음속 노즐입구와 디퓨저 출구에, 각각 유입조건과 유출조건에 해당하는 전압  $P_{0b}$ 과 정압  $P_a$ (여기에서  $P_a$ 는 대기압으로 일정한 것으로 가정)를 적용하였으며, 벽면에서는

no-slip조건이 적용되었다. 본 연구에서 사용된  $k-\epsilon$  난류모델은 이젝터 중심축에 대하여 대칭 형태이므로, 유로의 상반부에 대해서만 계산을 수행하였다. 계산 과정은 이젝터목을 설치한 경우 이젝터의 성능에 미치는 영향을 조사하기 위하여 노즐 설계마하수  $M_{1b}$ 가 2.11과 3.41인 두 경우에 대해  $\Psi$ 를 변화시켰다. 또 디퓨저 하류의 배압을 대기압으로 고정하여 1차정체실의 압력  $P_{0b}$ 를 변화시켰으며, 이젝터의 작동압력비  $P_{0b}/P_a^{(17)}$ 가 20 이하인 비교적 낮은 범위에 대하여 계산을 수행하였다. 본 계산의 경과로 수치해의 수렴은 소산율  $\epsilon=10^{-3}$ 에 대하여 약 5000회의 반복계산이 소요되었다.

### 3. 결과 및 고찰

2차목을 가지는 이젝터는 1차유동과 2차유동 혼합부의 단면적이 일정한 이젝터에 비해 효율을 향상시킬 목적으로 고안되었다. 초음속 이젝터의 효율향상을 위해 여러 가지의 디퓨저 형상과 노즐확대각 및 노즐 출구 부분의 형상 변화, 디퓨저의 길이 변화, 덕트길이와 직경 및 램프각의 변화 등 다양한 기하학적 조건에 대하여 최근에 많은 연구결과<sup>(5,8,10)</sup>들이 보고 되었다. 본 연구에서는 초음속 이젝터의 성능개선을 위한 기초적 연구의 일환으로, 이젝터의 2차목이 이젝터 성능에 미치는 영향을 조사하기 위하여 기하학적 형상에 대해서는 목면적비  $\Psi$ 만을 변화시켰다.

Fig. 3에는  $M_{1b}$ 가 2.11이고  $P_{0b}/P_a$ 가 10인 경우,  $\Psi$ 의 변화에 따른 초음속 이젝터 유동에 대한 등밀도선도를 나타내었다. 각 그림들은 1차정체실로부터 고압의 공기가 노즐을 통해 팽창하여 얻어진 운동에너지를 이용하여, 2차정체실의 공기를 이젝터 출구로 수송하는 형태의 유동을 나타낸다.

목면적비  $\Psi$ 가 2.01로 작은 경우에 1차노즐의 출구에서 유동은 부족팽창 제트상태<sup>(18)</sup>로 유동은 노즐을 통하여 급속히 팽창하며, 제트경계면에서 압축파로 반사한 후 바렐형상의 충격파를 구성한다. 그후 충격파는 노즐출구로부터 약간 하류의

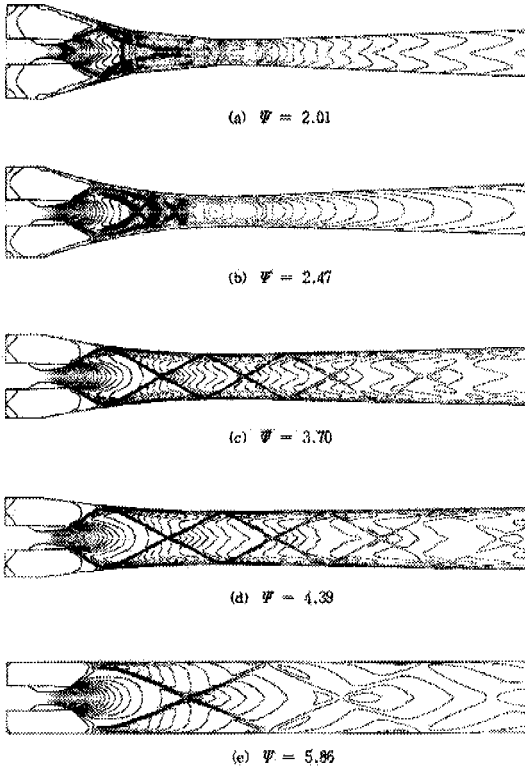


Fig. 3 Contours of density for various throat area ratios ( $M_{1p}=2.11$ ,  $P_{0p}/P_a=10$ )

위치에서 마하반사(Mach reflection)하여 마하스텝(Mach stem)을 형성한다. 따라서 1차노즐을 통하여 초음속으로 가속된 유동은 이러한 마하스텝에 의하여 감속된 후 이젝터 목을 지나 하류로 유동하게 되며, 이젝터복과 디퓨저를 통하여 재가속한 후 출구로 방출된다. 거의 유사한 형태로 나타난다. 거의 유사한 형태로 나타난다.

$\Psi=2.47$ 인 경우는 그림 (a)와 유사한 유동형태를 나타내지만 바렐형의 충격파는 이젝터 중심축에서 정상반사(regular reflection)의 형태로 반사하여 이젝터 중심축 부근에서 충격파를 형성한다. 이젝터 중심축을 지나는 유동은 이 충격파를 통하여 감속하였다가 축소유로를 통해 재가속한 후, 그 하류에서 다시 유사한 형태의 약한 충격파를 형성한다. 이러한 충격파를 통해 감속된 유동은 그림 (a)의 경우와 같이 재가속하여 출구로 방출된다.

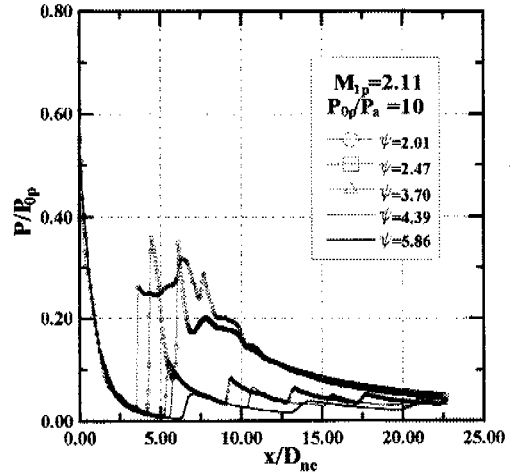


Fig. 4 Static pressure distributions along the ejector centerline for various throat area ratios ( $M_{1p}=2.11$ ,  $P_{0p}/P_a=10$ )

복면적비  $\Psi$ 가 3.70, 4.39 그리고 5.86으로 더욱 증가하는 경우에, 1차노즐의 출구에서 발생하는 부족팽창의 상태나 이젝터 내부에서 발생하는 경사충격파(oblique shock wave)의 형상들이 매우 유사함을 관찰할 수 있다. 구체적으로 1차노즐 내벽에서부터 발생하는 팽창파(expansion wave)로 인하여 유동은 노즐 출구에서 부족팽창 제트상태로 급격히 확대된다. 이러한 팽창파는 제트경계에 충돌하여 압축파(compression wave)로서 반사하며, 이들 압축파는 상호 집적되어 바렐형의 충격파를 형성한다. 그후 충격파는 이젝터 중심축에서 거의 정상반사에 가까운 형태로 반사하여 경사충격파를 형성한다. 이 경사충격파는 다시 디퓨저 벽면으로 진파하여 디퓨저 벽면에서 마하 반사하여 새로운 경사충격파를 형성한다. 따라서 이젝터 내부의 유동장에는 반복적인 경사충격파가 관찰된다. 그림의 등밀도선도로부터 이젝터 벽근처에서 발생하는 충격파와 경계층의 간섭현상은 명확하게 관찰할 수 없지만, 벽면에서 경사충격파의 역압력구배에 의하여 경계층의 두께가 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 또  $\Psi$ 의 증가에 따라 제 1충격파의 발생위치는 하류방향으로 약간씩 이동한다는 것을 알 수 있다.

이젝터 내부 유동의 특성을 더욱 자세히 고찰

하기 위하여, Fig. 4에는 Fig. 3에 나타낸 결과들을 이용하여 이젝터 중심축을 따르는 정압분포를 나타내었다. 그림의 횡축은 1차노즐의 목을 원점으로 하는 이젝터 축방향의 무차원 거리  $x/D_{ne}$  (여기에서  $D_{ne}$ 는 1차노즐 출구의 직경)를 나타내며, 종축은 1차정체실 압력  $P_{0p}$ 로 무차원한 국소정압을 나타낸다.

$\Psi=2.01$ 과 2.47의 경우, 유동은 수직충격파를 통해 압력이 급격하게 상승한 후, 이젝터 출구까지 압력이 완만하게 감소한다. 이와는 달리  $\Psi=3.70$  이상의 경우, 유동은 다수의 경사충격파군을 통해 팽창과 압축을 반복하며,  $\Psi$ 가 변화하는 경우에서 정성적으로 유사한 유동형태를 나타내지만,  $\Psi$ 가 증가함에 따라 세 1충격파의 발생위치는 약간씩 하류방향으로 이동함을 볼 수 있다.

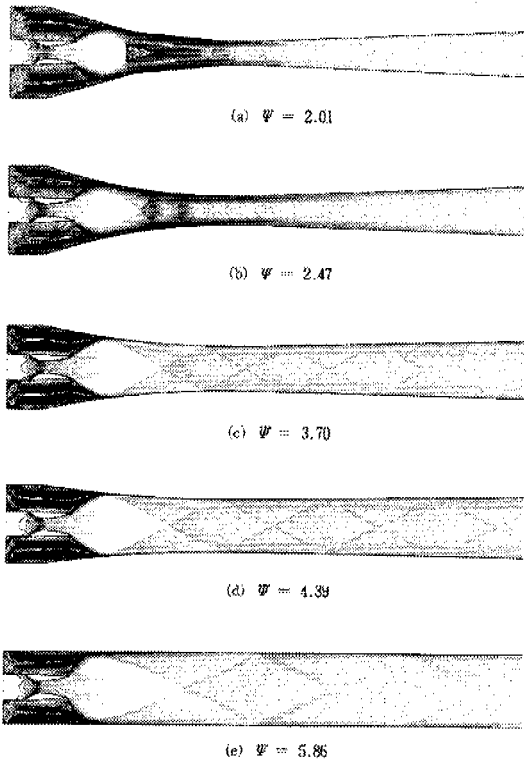


Fig. 5 Contours of Mach number for various throat area ratios ( $M_{1p}=2.11, P_{0p}/P_a=10$ )

Fig. 5에는  $M_{1p}$ 가 2.11이고,  $P_{0p}/P_a$ 가 10인 경우의 등마하수 선도를 나타내었다.  $\Psi=2.01$ 과 2.47인 경우, 이젝터 내부의 유동형태는 Fig. 3에서 기술한 바와 같으며, 충격파를 통한 유동의 감속을 뚜렷하게 관찰할 수 있다.  $\Psi \geq 3.70$ 인 경우, 노즐로부터 유동은 급격히 팽창하여 제트경계면에서 압축파로 반사하여 집적된 경사충격파는 중심축 부근에서 다시 경사충격파로 반사하게 된다. 특히 혼합부 입구 하류의 축소유로에서 벽면 근처의 유동과 중심축 부근의 유동은 각각 다른 강도의 충격파를 통과하여 큰 유속차 때문에 뚜렷한 전단층을 형성한다. 또 중심축에서 반사된 경사충격파는 벽면의 경계층과 간섭을 일으켜 다시 경사충격파로 마하반사한다. 이러한 형태의 유동은 목면적비를 증가시킴에 따라 점차 약하게 나타나며,  $\Psi=5.86$ 인 경우 벽면유동과 중심축 부근의 유동은 혼합부와 디퓨저를 통하는 유동영역에서 가장 잘 혼합된 형태를 나타내고 있다.

Fig. 6에는 목면적비  $\Psi$ 가 2.01에서 일정 단면적의 이젝터 형태인 5.86까지 변화하는 경우, 이젝터 중심축을 따르는 유동의 마하수 분포를 나타내었다.  $\Psi=2.01$ 과 2.47인 경우 이젝터 중심축 선상에서 마하수는 1차노즐 출구하류의 혼합

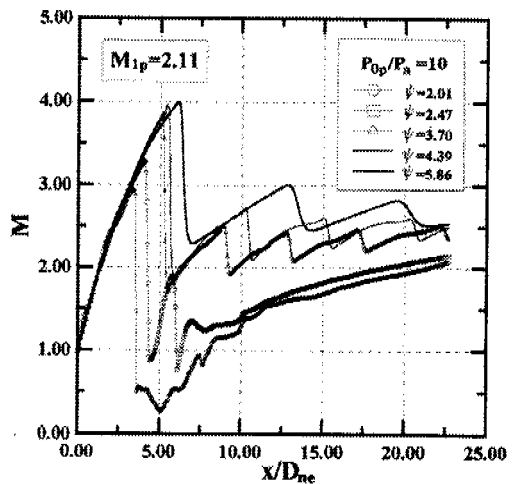


Fig. 6 Mach number distributions along the ejector centerline for various throat area ratios ( $M_{1p}=2.11, P_{0p}/P_a=10$ )

부 축소유로에서 발생하는 수직충격파를 통하여 초음속에서 아음속상태로 된 후, 축소유로, 이젝터목, 디퓨저를 거쳐서 점차 증가하게 된다.

그러나  $\Psi \geq 3.70$ 인 경우에 이젝터 중심축 선상의 마하수는 거의 유사한 형태로 나타난다. 각 마하수 분포선도에 대해 1차노즐로부터 방출되는 부속팽창 제트유동의 최대마하수는  $\Psi$ 가 증가함에 따라 팽창이 지속되는 거리가 길어지게 되어  $\Psi = 5.86$ 인 경우에 혼합부 축소유로에서 약 4.0 가량으로 된다는 것을 알 수 있다. 이러한 고마하수의 유동은 충격파에 의하여 급격하게 감속한 후, 초음속상태에서 유동의 마하수의 증가와 감소를 반복하게 되며, 디퓨저 출구에서 중심축 선상의 마하수는 초음속상태이다. 이러한 유동에서는  $\Psi$ 가 증가함에 따라 디퓨저 출구에서 보다 균일한 유동이 얻어지고 있음을 관찰할 수 있다.

Fig. 7은 이젝터 압력비가  $P_{0p}/P_a = 10$ 이고 1차노즐의 출구마하수  $M_{1p} = 3.41$ 인 경우에 대하여  $\Psi$ 에 따른 유동의 변화를 살펴보기 위해  $\Psi = 5.8, 6.4, 7.84, 15.7$ 인 경우에 얻어진 유동의

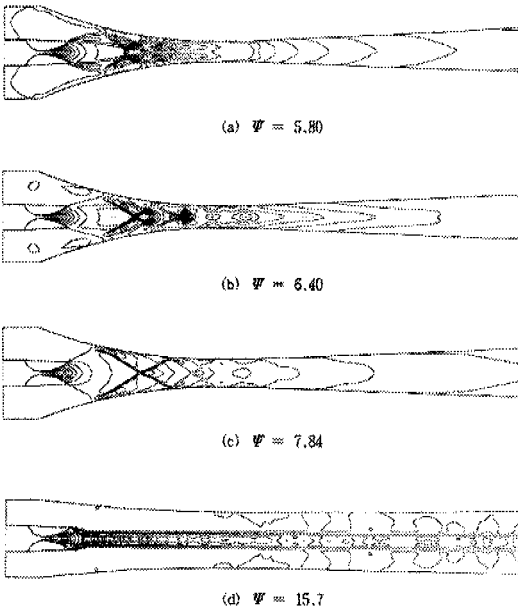


Fig. 7 Contours of density for various throat area ratios ( $M_{1p} = 3.41, P_{0p}/P_a = 10$ )

등마하수 선도를 나타내었다.  $\Psi = 5.8$ 에서 7.84까지는 Fig. 3의  $M_{1p} = 2.11$ 인 경우의 유동장들과 유사하지만,  $\Psi = 15.7$ 로 목면적비가 매우 큰 경우의 이젝터 내부유동장은 상당히 다른 형태를 나타낸다. 이 경우 1차노즐 출구에서 유동은 과팽창 제트 유동형태<sup>(18)</sup>를 나타내어 노즐 출구부근에서는 경사충격파가 발생한다. 이러한 경사충격파는 노즐 중심축에서 마하반사하여  $\lambda$ 형태의 충격파를 형성하게 되므로 1차노즐을 통하여 초음속으로 가속된 유동은  $\lambda$ 충격파에 의하여 감속된 후, 이젝터 목을 지나 하류로 유동하게 된다. 이 경우 1차노즐을 통하는 유동과 2차정체실로부터 흡인되는 유동은 이젝터 출구에서 완전히 혼합되지 않는 것으로 나타난다. 1차노즐 출구로부터 방출되는 제트 형상은 노즐 출구 하류에서 발생하는  $\lambda$ 충격파로 인하여 제트폭이 약간 감소한 후 하류방향으로 약간 증가하게 된다.

Fig. 8은 이젝터 중심축을 따르는 정압분포를 나타낸다.  $\Psi = 5.8$ 에서 7.84인 경우에 압력분포는 Fig. 6에서 설명한 바와 유사하다. 그러나  $\Psi = 15.7$ 인 경우, 노즐을 통한 유동의 팽창으로 인해 압력은 급격하게 감소하다가 노즐 출구 하류에서 발생하는  $\lambda$ 충격파에 의해 급격하게 상승

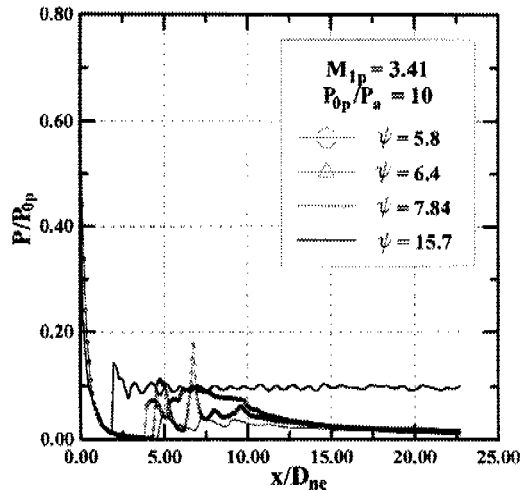


Fig. 8 Static pressure distributions along the ejector centerline for various throat area ratios ( $M_{1p} = 3.41, P_{0p}/P_a = 10$ )

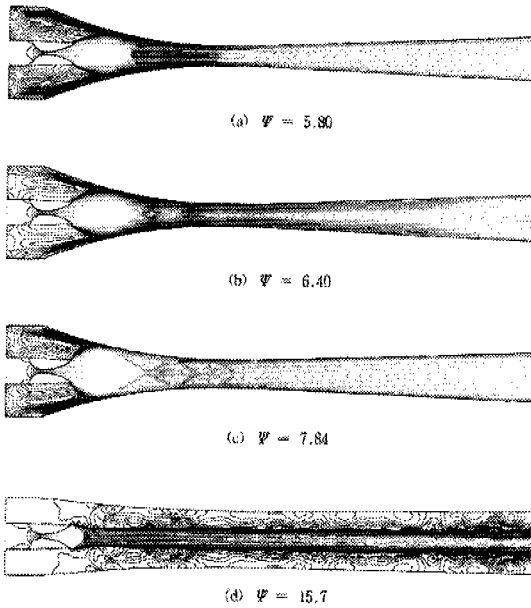


Fig. 9 Contours of Mach number for various throat area ratios ( $M_{1p} = 3.41$ ,  $P_{0p}/P_a = 10$ )

하게 된다. 그후 유동은 약한 팽창과 압축을 반복하지만 출구까지 거의 일정한 압력을 나타낸다. 또 전체적으로  $\psi$ 가 증가함에 따라 제 1충격파의 위치는 하류방향으로 약간씩 이동하게 되지만,  $\psi = 15.7$ 인 경우는 오히려 가장 상류지점에서 충격파가 발생한다. 이것은 1차노즐 출구에서 과팽창 제트유동이 발생하기 때문이다.

Fig. 9와 Fig. 10은 Fig. 7과 같은 조건에서 얻어진 유동의 등마하수 선도와 이젝터 중심축을 따르는 마하수 분포를 나타내며, 그림에서 이젝터 내부의 복잡한 유동현상들을 더욱 자세히 고찰할 수 있다. 유동의 마하수 분포로부터  $\psi = 5.8$ 인 경우 노즐 출구하류의 중심축 부근에서 발생하는 수직충격파로 인하여 유동이 아음속으로 감속됨을 확인할 수 있다. 또  $\psi = 7.84$  이하의 목면적비에서는 충격파를 통하여 압축과 팽창을 반복한 유동이 이젝터목과 디퓨저를 통하여 서서히 가속한다. 그러나  $\psi = 15.7$ 의 경우, 마하수는 유동방향으로 작은 쪽으로 변동하지만 거의 음속에 가까운 일정한 상태로 출구까지 지속된

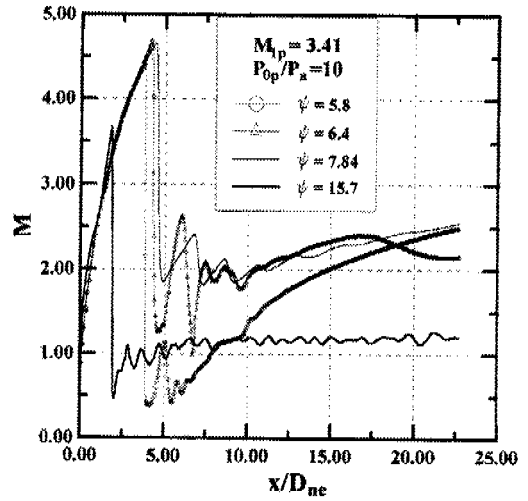


Fig. 10 Mach number distributions along the ejector centerline for various throat area ratios ( $M_{1p} = 3.41$ ,  $P_{0p}/P_a = 10$ )

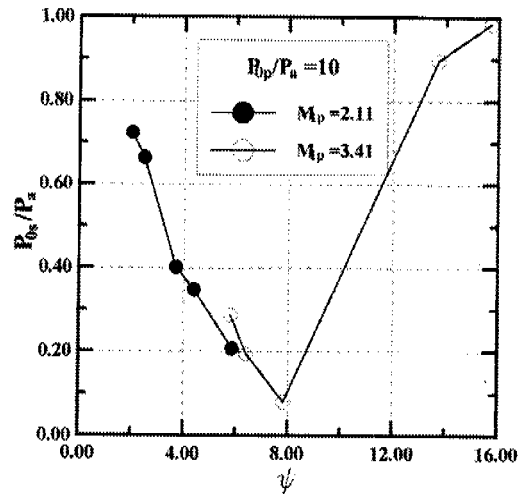


Fig. 11 Variation of  $P_{0s}/P_a$  with throat area ratio

다. 이 경우 등마하수 선도로부터 1차노즐의 출구로부터 얻어진 과팽창 제트유동이 2차유동과 잘 혼합되지 않는다는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 11은  $P_{0p}/P_a = 10$ 이고  $M_{1p} = 2.11$ 과 3.41인 경우, 목면적비  $\psi$ 의 변화에 따른 2차정체실 전압  $P_{0s}/P_a$ 의 변화를 나타낸다. 중축의 2차



정체실 압력  $P_{0s}$ 는 대기압  $P_a$ 로 무차원하였다. 그림에서  $M_{1p}$ 가 2.11인 경우는  $\Psi$ 의 증가에 따라  $P_{0s}/P_a$ 가 급격히 감소하여 일정 단면적의 이젝터 형태가  $\Psi=5.8$ 에서 최소를 나타낸다. 그러나  $M_{1p}$ 가 3.41인 경우는  $\Psi$ 의 증가에 따라  $P_{0s}/P_a$ 가 감소하다가  $\Psi=7.84$ 에서 약 0.08로 최소값을 가진후 다시 증가한다.  $\Psi=13.7$ 과 15.7인 경우는 주로 1차노즐 출구의 하류에서 2차유동의 재순환이 이루어 지므로, 다량의 2차정체실의 공기를 혼합부 내로 흡인하기가 어렵기 때문에 낮은 진공성능을 나타낸다.<sup>(19)</sup> 따라서 작동압력비에 대하여 2차정체실의 압력  $P_{0s}/P_a$ 를 최소로 하는 최적 목면적비가 존재함을 알 수 있다.

Fig. 12는 이젝터 압력비와 목면적비를 변화시키는 경우 2차정체실 압력의 변화를 나타낸다. 그림에서  $\Psi=4.39$ 와 5.86의 경우를 비교해 보면,  $P_{0p}/P_a$ 가 10일 때를 제외하고는 동일한 압력비에 대해  $\Psi$ 가 작을수록  $P_{0s}/P_a$ 값이 낮게 나타난다. 즉 같은  $P_{0s}/P_a$ 를 얻기 위해서 요구되는  $P_{0p}/P_a$ 의 값은 이젝터의 2차목을 가지지 않는

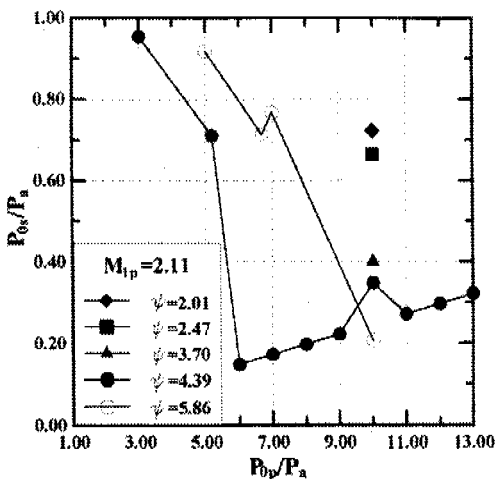


Fig. 12 Variation of  $P_{0s}/P_a$  with ejector pressure ratio and throat area ratio ( $M_{1p}=2.11$ )

경우( $\Psi=5.86$ )보다 2차목을 설치하는 경우에 작게 나타난다는 것을 알 수 있다. 구체적으로  $\Psi=5.86$ 인 경우에  $P_{0p}/P_a=10$ 으로 이젝터를 작동시키면  $P_{0s}/P_a=0.2$ 가 얻어지는 반면에,  $\Psi=4.39$ 인 경우에  $P_{0s}/P_a=0.2$ 를 얻기 위해서 필요한  $P_{0p}/P_a$ 는 8로 된다. 따라서 이젝터를 진공펌프의 용도로 사용하는 경우 동일한 진공도를 얻기 위해서는 이젝터에 2차목을 설치하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

목면적비  $\Psi$ 를 4.39로 일정하게 하는 경우,  $P_{0p}/P_a$ 를 증가시키에 따라  $P_{0s}/P_a$ 는 급격히 감소하여  $P_{0p}/P_a=6$ 에서 약 0.14로 최소값을 가진 후 점차 증가하게 된다. 이것은 1차노즐 출구로부터 방출되는 제트유동이 이젝터 벽면에 충돌하여 2차정체실 내부에 재순환유동이 형성되기 때문이며, 이젝터 압력비를 증가시키에 따라 재순환유동은 보다 강해지게 되어 2차정체실 내부의 압력도 증가하기 때문이다.<sup>(18)</sup> 따라서 진공펌프의 용도로 이젝터를 사용하는 경우, 이젝터 작동압력비  $P_{0p}/P_a$ 를 최소로 하고 2차정체실 압력  $P_{0s}/P_a$ 를 최소로 하는 최적의 작동압력비가 존재함을 알 수 있다. 또 이젝터 압력비  $P_{0p}/P_a$ 가 10인 경우에 대하여  $\Psi$ 의 변화에 따른 2차정체실 압력  $P_{0s}/P_a$ 의 변화를 살펴보면,  $\Psi$ 가 2.01에서 5.86까지 증가 함에 따라  $P_{0s}/P_a$ 가 낮아진다는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 9에서 나타낸 유동의 등마하수 선도로부터 알 수 있듯이,  $\Psi$ 가 증가할 수록 1차유동과 2차유동이 더욱 잘 혼합되기 때문이다.

Fig. 13은 이젝터의 진공성능에 미치는  $P_{0p}/P_a$ 와  $\Psi$ 의 영향을 나타내기 위하여  $M_{1p}=3.41$ 인 경우를 나타내었다. 그림에서  $\Psi=5.8$ 과 6.4인 경우, 2차 정체실 압력  $P_{0s}/P_a$ 는  $P_{0p}/P_a$ 가 증가함에 따라 증가하며,  $\Psi=7.84$ 인 경우는 전체적으로  $P_{0s}$ 가 10kPa 미만의 진공 성능을 나타낸다. 또  $P_{0p}/P_a$ 를 7과 10으로 일정하게 하는 경우,

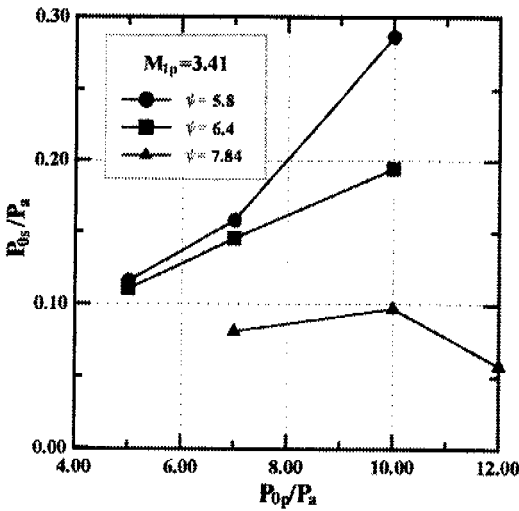


Fig. 13 Variation of  $P_{0s}/P_a$  with ejector pressure ratio and throat area ratio ( $M_{1p}=3.41$ )

$\Psi$ 가 5.8에서 7.84까지 증가함에 따라  $P_{0s}/P_a$ 가 낮게 나타났다.

한편  $\Psi$ 를 일정하는 경우 이젝터의 진공성능에 미치는  $M_{1p}$ 의 영향을 살펴보기 위하여 Fig. 12의  $\Psi=5.86$ 의 계산값과 유사한 목면적비를 가지는  $\Psi=5.8$ 의 계산값을 비교해보면,  $M_{1p}$ 가 더 큰 후자의 경우가 진공성능이 높게 나타남을 알 수 있다. 구체적으로  $P_{0p}/P_a=7$ 일 때  $P_{0s}/P_a$  값은 Fig. 12의  $\Psi=5.86$ 인 일정단면적 이젝터의 경우 약 0.76인 반면에, 그림의  $\Psi=5.8$ 의 경우는 약 0.16으로 나타나 진공도가 약 79%가량 향상되었다. 따라서 동일한 목면적비에 대하여  $M_{1p}$ 를 증가시키는 경우 2차목이 축소되므로 이젝터의 진공성능이 높게 나타나며, 이상의 결과로부터 이젝터의 진공성능은  $P_{0p}/P_a$ 와  $\Psi$  모두에 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11에서 Fig. 13의 결과로부터, 일정단면적 이젝터에 2차목을 설치하여 이젝터의 성능을 향상시킬 수 있으며, 각 목면적비에 대하여  $P_{0p}/P_a$ 를 최소로 하며 2차정체실 압력을 최소로

하여 고진공 상태를 얻을 수 있는 최적 압력비가 존재함을 알 수 있다. 한편  $P_{0p}/P_a$ 를 일정하게 하고 목면적비  $\Psi$ 를 변화시키는 경우, 2차정체실 압력  $P_{0s}/P_a$ 가 최소가 되는  $\Psi$ 값이 존재함을 알 수 있다. 이 결과들은 문헌 (14,15)의 실험적 연구결과들과 정성적으로 잘 일치하는 것이며, 앞으로 계산방법을 수정·보완하여 정량적인 결과 또한 비교 검토할 계획이다.

#### 4. 결론

아음속 및 초음속 이젝터의 성능개선을 위한 기초적 연구의 일환으로, 본 연구에서는 2차목을 가지는 초음속 이젝터 유동에 대하여 Navier-Stokes 방정식을 적용하여 수치계산을 수행하였다. 수치계산에서는 밀폐된 2차정체실과 1차노즐 그리고 혼합부 및 디퓨저로 이루어지는 이젝터 내부유동장에 대하여 비점열적자를 적용하였다. 본 연구의 결과로부터, 이젝터에 2차목을 설치하는 경우가 일정단면적 형태의 이젝터 보다 높은 진공성능을 나타내었으며,  $\Psi$ 를 일정하게 하는 경우  $M_{1p}$ 를 증가시키면 2차목이 축소되므로 이젝터의 진공성능이 향상됨을 알 수 있었다. 한편 이젝터 압력비  $P_{0p}/P_a$ 를 일정하게 하고 목면적비  $\Psi$ 를 변화시키는 경우에 2차정체실 압력  $P_{0s}/P_a$ 가 최소가 되는  $\Psi$ 가 존재하였다. 또 이젝터 목면적비  $\Psi$ 를 일정하게 하고 이젝터 압력비  $P_{0p}/P_a$ 를 변화시키는 경우 2차정체실의 압력비 최소가 되는  $P_{0p}/P_a$ 값이 존재함을 알았다. 따라서 각 목면적비에 대해  $P_{0p}/P_a$ 를 최소로 하며,  $P_{0s}/P_a$ 를 최소로 하는 이젝터의 최적 작동압력비가 존재하며, 이러한 최적 작동압력비로 이젝터를 구동시키는 경우 효율을 최대로 할 수 있는 목면적비가 존재함을 알 수 있다.

#### 참고문헌

(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) Fabri, J. and Siestruck, R., 1958, "Supersonic Air Ejectors," *Advances in Applied Mechanics*, New York, N. Y., Academic Press, Vol. 5, pp. 1~34.
- (3) Alperin, M. and Wu, J. J., 1983, "Thrust Augmenting Ejectors, Part 2," *AIAA Jour.*, Vol. 21, No. 12, pp. 1698~1706.
- (4) Yang, T. T., Ntone, F., Jiang, T. and Pitts, D. R., 1985, "An Investigation of High Performance, Short Thrust Augmenting Ejectors," *Jour. Fluids Eng.*, Vol. 107, pp. 23~30.
- (5) Liu, C. F. and Chen, F., 1992, "Analysis of Performance of The Second-Throat Ejector-Diffuser," *Jour. Chinese Soc. Mech. Engr.*, Vol. 13, No. 5 pp. 478~482.
- (6) Chen, F., Liu, C. F. and Yang, J. Y., 1994, "Supersonic Flow in the Second-Throat Ejector-Diffuser System," *Jour. Spacecraft and Rockets*, Vol. 31, No. 1, pp. 123~129.
- (7) Wang, J. J. and Chen, F., 1996, "On the Start Condition of a Second-Throat Ejector-Diffuser," *Aeronautical Jour.*, Paper No. 2168, pp. 321~326.
- (8) Tillman, T. G. and Presz Jr., W. M., 1995, "Thrust Characteristics of a Supersonic Mixer Ejector," *Jour. Propulsion and Powers*, Vol. 11, No. 5, pp. 931~937.
- (9) Kumar, R. R. and Kurian, J., 1995, "Estimation of Mixing of High-Speed Streams," *Jour. Propulsion and Powers*, Vol. 12, No. 2, pp. 429~431.
- (10) Presz Jr., W., Blinn, R. F. and Morin, B., 1987, "Short Efficient Ejector Systems," *AIAA/SAE/ASME/ASEE 23rd Joint Propulsion Conf.*, San Diego, California.
- (11) Dutton, J. C. and Carroll, B. F., 1988, "Limitation of Ejector Performance Due to Exit Choking," *Jour. Fluids Eng.*, Vol. 110, pp. 91~93.
- (12) Addy, A. L., Dutton, J. C. and Mikkelsen, C. D., 1981, "Supersonic Ejector-Diffuser Theory and Experiments," Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Report No. UILU-ENG-82-4001.
- (13) Nicholas, T. M. T., Narayanan, A. K. and Muthunayagam, A. E., 1995, "Mixing Pressure-Rise Parameter for Effect of Nozzle Geometry in Diffuser-Ejectors," *Jour. Propulsion and Powers*, Vol. 12, No. 2, pp. 431~433.
- (14) Matsuo, K., Sasaguchi, K., Tasaki, K. and Mochizuki, H., 1981, "Investigation of Supersonic Air Ejectors, Part 1. Performance in the Case of Zero-Secondary Flow," *Bulletin of the JSME*, Series B, Vol. 24, No. 198, pp. 2090~2097.
- (15) Matsuo, K., Sasaguchi, K., Tasaki, K. and Mochizuki, H., 1982, "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, pp. 1898~1905.
- (16) Hoffmann, K. A. and Chiang, S. T., 1993, "Computational Fluid Dynamics for Engineers," Engineering Education System, Vol. II, Chap. 17.
- (17) Matsuo, K. and Kim, H. D., 1999 "Shock Train and Pseudo-Shock Phenomena in Internal Gas Flows." *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 35, No. 1, pp. 33~100
- (18) Kim, H. D., Setoguchi, T., Yu, S., and Raghunathan, R., 1999, "Two-Dimensional Computations of the Sonic/Supersonic Ejector Flows." *4<sup>th</sup> Intl. Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamic of Internal Flows*, Germany, pp. 1~10.
- (19) Kim, H. D., Lee, Y. K., Setoguchi, T. and Yu, S., 2000, "Numerical Simulation of the Supersonic Flows in the Second Throat Ejector-Diffuser Systems." *Jour. of Thermal Science*, Vol. 8, No. 4, pp. 215~222.
- (20) 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.