

초음속 이젝터의 배기성능에 관한 연구

Study on the Exhaust Performance of Supersonic Ejector

이종수* (안동공업전문대학 기계과)

김희동 (안동대학교 기계공학과)

Lee J.S. (Dept. of Mechanics in Andong Tech. College)

Kim H.D. (Dept. of Mechanical Eng. in Andong Univ.)

1. 서 론

이젝터(Ejector)에 관한 연구는 약 50년전부터, 주로 진공펌프, 배기펌프 및 열압축기 등을 대상으로 진행되어 왔다^{1~3)}. 또 최근에는 석유의 정제, 식용유 및 합성섬유 등의 탈취분야, 진공건조분야, 수력발전소에서 홍수에 대비하기 위하여 설치하는 제트펌프, 금속가공용 블라스트 노즐, 또는 지상으로부터 매우 높은 고도에서 비상하는 로켓엔진의 성능시험장치⁴⁾나 V/STOL⁵⁾의 추력 증대용 등에 폭넓게 이용되고 있다.

이와 같이 이젝터에 관한 관심이 증대되면서 많은 실험적 및 이론적 연구가 수행되어 이젝터를 설계하기 위한 기초적 자료들이 보고 되어 있다.

그러나 이젝트의 내부의 유동형태가 매우 복잡하고 유동에 미치는 인자들이 매우 많기 때문에 이젝터의 작동특성에 관한 물리적 현상이 충분히 이해되지 않고 있으며, 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다. 일반적으로 이젝터는 1차 노즐흐름이 아음속인 경우와 초음속인 경우를 각각 아음속 이젝터(Subsonic ejector)와 초음속 이젝터(Supersonic ejector)라고 하고 있으며, 1차 노즐로부터 방출되는 흐름과 2차 정체실로부터 흡인되는 흐름이 혼합되는 혼합부는 단면적이 일정한 경우(4,7,8)와 혼합부에 목(제2의 throat라 한다)을 설치하는 경우(2,6,9,10)가 있다. 혼합부의 단면적이 일정한 이젝터에 관해서는 지금까지 많은 연구가 수행되어 이젝터 작동특성이 잘 알려져 있다. 그러나 이젝터의 목을 가지는 초음속 이젝터에 대해서는 이젝터 내부에서 발생하는 충격파가 벽면 경계층과 복잡한 간섭(interaction)을 하고, 또 경우에 따라서는 흐름장이 심하게 진동하는 등 많은 미해결 문제가 남아 있을 뿐만 아니라 이젝터 목의 크기나 형상이 초음속 이젝터의 작동특성에 미치는 영향 등이 규명

되지 않아서 초음속 이젝터의 설계나 응용에 상당한 어려움을 겪고 있다.

최근 저자들은 고성능 이젝터를 개발할 목적으로, 초음속 풍동을 사용하여 진공펌프용 초음속 이젝터를 시험하였다.⁸⁾ 그 결과 이젝트의 목을 설치함으로써 발생하는 이중초우크현상과 이젝터의 최적작동 상태를 얻기 위한 흐름의 제조건 등을 실험적으로 구하였다. 또 이와 같은 최적상태에 미치는 흐름변수들의 영향⁹⁾을 규명하여 이젝터의 경제적인 운전조건을 제시하였다. 더욱이 저자들은 혼합부의 단면적이 일정한 경우와 이젝터의 목을 설치한 경우의 실험결과를 비교하여 초음속 이젝터에 목을 설치함으로써 성능이 개선될수 있다는 확신을 얻게 되었다.

본 연구에서는 김희동 등에 의한 이전의 연구 “진공펌프용 초음속 이젝터에 관한 연구”⁸⁾에 이어서 배기펌프용으로 사용되는 초음속 이젝터를 시험하였다. 실험은 Blow-down형인 초음속 풍동을 사용하여 이젝터의 혼합부에 목(throat)을 설치한 경우 배기성능을 조사하였다. 이젝터의 내부흐름장을 광학적으로 관찰하기 위하여 슈리렌 가시화법을 이용하였으며, 이젝터 작동특성을 조사하기 위하여 벽면정압을 측정하였다. 이와 같은 실험값을 이용하여 1차 노즐의 출구마하수, 혼합부의 목의 설치 유무, 목면적비 등을 변화시킨 경우에 대하여 배기펌프용으로 사용되는 초음속 이젝터의 작동특성을 정량화 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에 사용한 실험장치는 Fig.1과 같다. 압축기(1)에서 약 31 ata의 고압으로 압축된 압축공기는 (3)의 고압탱크에 저장된다. 이 탱크내의 고압의 건조공기는 1

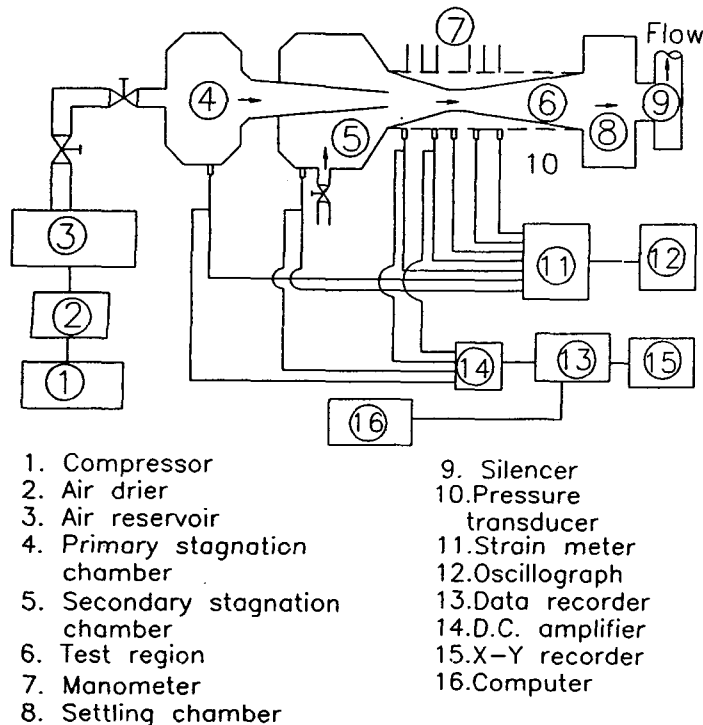


Fig. 1 Schematic diagram of experimental facility

3. 실험결과

일반적으로 1차 노즐의 목면적이 알려지는 경우, 1차 정체실 압력 P_{0p} 를 일정하게 유지하면 1차 질량유량 \dot{m}_p 는 일정하게 된다. 이 상태에서 2차 질량유량 \dot{m}_s 을 0에서부터 최대질량유량까지 증가시키고, 다시 최대질량유량에서 0까지 감소시킨 경우에, 2차 정체실 압력 P_{0s}/P_a 와 1,2차 흐름의 질량유량비 \dot{m}_s/\dot{m}_p 와의 관계를 Fig.3에 나타내었다. 여기에서 P_a 는 대기압으로 일정하다. 1차 노즐 출구 마하수 $M_{1p}=3.05$ 이며, 그림중의 ○,△,◇의 실험값은 \dot{m}_s 를 증가시키는 경우, 반대로 ●,▲,◆은 \dot{m}_s 를 감소시키는 과정에서 얻어진 것이다. 실험값 ①은 목면적비 $\psi=15.7$, $P_{0p}/P_a=14.6$ 에 대한 경우이며, P_{0s}/P_a 는 \dot{m}_s/\dot{m}_p 의 증가와 함께 거의 직선적으로 증가하여 유량이 최대로 되는 a점에서 최대로 되며, 이 조건에서 \dot{m}_s/\dot{m}_p 의 증가과정과 감소과정에 대한 이력현상(hysteresis)은 나타나지 않는다. $\psi=15.7$ 이고 $P_{0p}/P_a=9.0$ 인 실험값 ②는 ①과 정성적으로 유사한 변화를 나타내지만, P_{0p}/P_a 는 이전의 연구에서 정의한 최적작동점($\dot{m}_s=0$)의 값 $(P_{0p}/P_a)_{0,m}$ 보다 상당히 작기 때문에, 종축상의 $\dot{m}_s/\dot{m}_p=0$ 에서 P_{0s}/P_a 의 값은 상당히 크고 저진공 성능을 나타내고 있다. 한편 $P_{0p}/P_a=8.84$, $\psi=7.84$ 인 실험값 ③에서는 P_{0s}/P_a 의 변화가 ① 및 ②에 비하여 변화구배가 급격하며, \dot{m}_s/\dot{m}_p 가 증가하는 경우와 감소하는 경우에 서로 다른 특성이 나타나고 있다.

Fig.3에 표시한 a,b,c점에서 2차유량의 최대점을 나타내는 $(\dot{m}_s)_{max}$ 와 2차유량을 최대로 하는 2차정체실 압력 $(P_{0s}/P_a)_{max}$ 에 미치는 1차정체실 압력 P_{0p}/P_a 의 영향

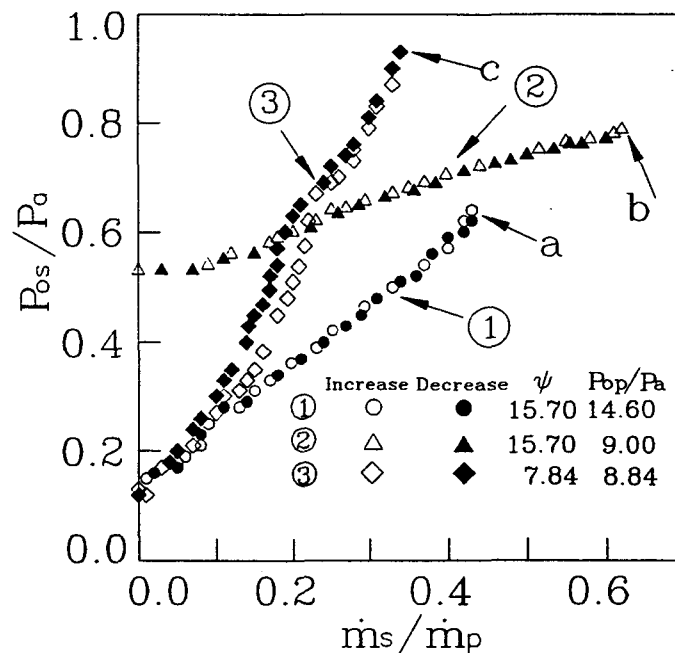


Fig. 3 Relation secondary stagnation pressure to secondary mass flow rate

을 Fig.4와 5에 나타내었다. Fig.4와 5는 각각 $M_{1p}=3.05$ 와 $M_{1p}=2.05$ 에 대한 경우로서, 그림중의 실선은 ψ 가 일정한 점을 연결한 것이다. Fig.4로부터 각 ψ 에 대하여 $(\dot{m}_s)_{max}$ 는 1차정체실 압력 Pop/Pa 의 증가하게 되면, 최초 급격히 증가해서 최대로 된 후 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 한편 $(Pos/Pa)_{max}$ 는 Pop/Pa 가 증가할수록 감소하게 되며, $(\dot{m}_s)_{max}$ 를 최대로 하는 Pop/Pa 점에서 최소로 된 후 다시 증가하게 된다. 그림의 점선은 각각의 목면적비 ψ 에 대하여 $(\dot{m}_s)_{max}$ 가 최대이고 $(Pos/Pa)_{max}$ 가 최소로 되는 실험값들을 연결한 선이며, 본 연구에서는 이와 같은 실험값들에 대응하는 Pop/Pa 를 2차유량이 있는 경우의 최적작동점 $(Pop/Pa)_{o.c}$ 으로 정의하였으며, 각 ψ 에 대하여 횡축상에 그 값들을 나타내었다. 한편 $M_{1p}=2.05$ 인 Fig.5는 정성적으로 Fig.4와 유사한 경향을 나타내며, 역시 2차유량을 최대와 하고 최고의 진공도를 만족하는 $(Pop/Pa)_{o.c}$ 가 존재한다는 것을 알 수 있다.

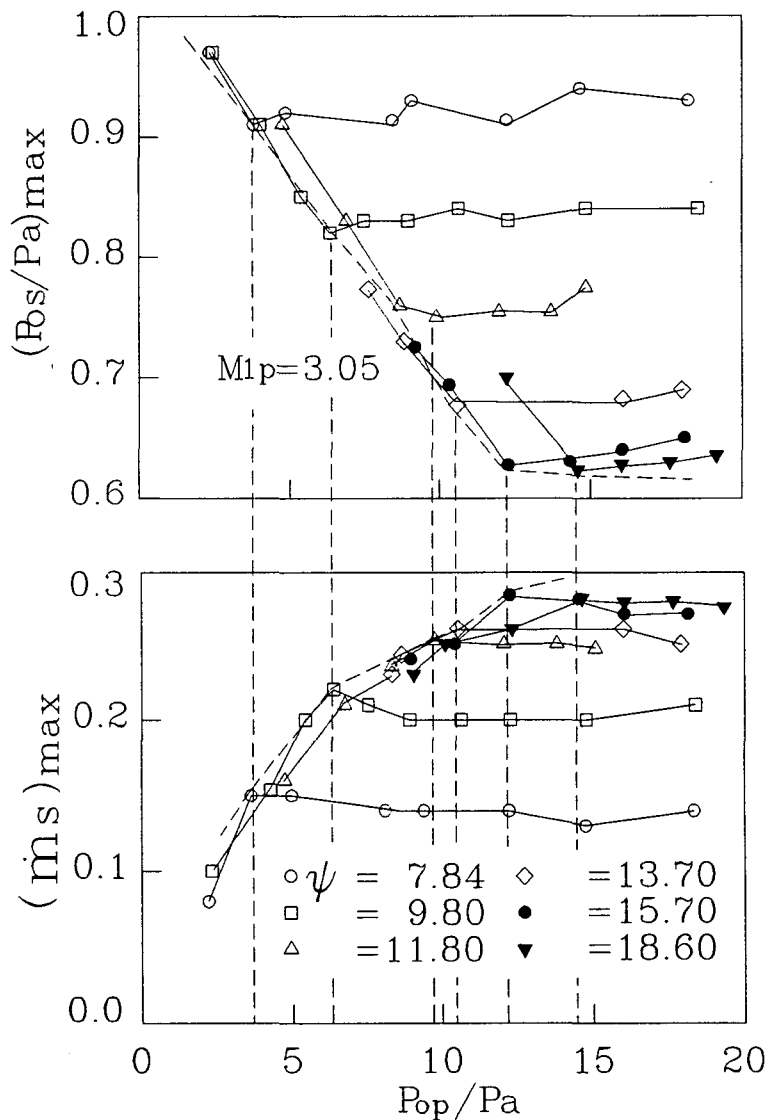


Fig. 4 Variation of maximum flow rate and secondary stagnation pressure with primary stagnation pressure ($M_{1p}=3.05$)

일반적으로 이젝터의 효율은 1차 흐름의 전압 P_{op} 로부터 대기압 P_a 까지 등엔트로피적으로 팽창하는 경우에 이루어지는 일과 2차 흐름의 전압 P_{os} 로부터 대기압 P_a 까지 등엔트로피적으로 압축되는 일의 비로서 다음 식으로 표시된다.

$$\eta = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_p} \frac{T_{os}}{T_{op}} \frac{\left(\frac{P_{os}}{P_a}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} - 1}{1 - \left(\frac{P_{op}}{P_a}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}} \dots \dots (1)$$

여기서 γ 는 비열비(Specific heat ratio)이며, T_{op} 와 T_{os} 는 각각 1차와 2차 정체실 온도로, 본 연구에서는 대기의 온도와 같이 설정하였다.

2차유량이 최대인 $(\dot{m}_s)_{max}$ 에 대하여, 이젝터의 효율 η_{max} 와 P_{op}/P_a 의 관계를 Fig.6과 7에 나타내었다. Fig.6은 1차노즐 출구에서 마하수가 $M_{1p}=3.05$ 인 경우에 대한 것으로, 각각의 ψ 에 대해 η_{max} 는 P_{op}/P_a 가 증가함에 따라 급격히 증가해서 최대로 된 후, 급격히 감소하게 된다. 이때 η_{max} 가 최대로 되는 점에 대응하는 P_{op}/P_a 의 값은 Fig.4에서 얻어지는 $(P_{op}/P_a)_{o.c}$ 의 값과 거의 일치하게 되지만, Fig.7의 $M_{1p}=2.05$ 의 경우에는 Fig.5로부터 구한 $(P_{op}/P_a)_{o.c}$ 의 값과는 다르다. 이것은 이

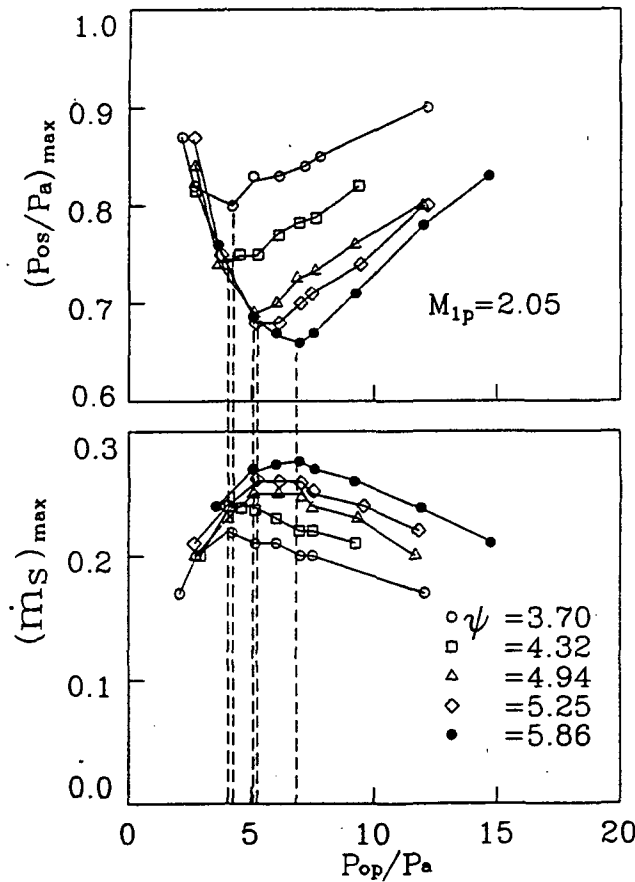


Fig. 5 Variation of maximum flow rate and secondary stagnation pressure with primary stagnation pressure($M_{1p}=2.05$)

젝터내에서 흐름장은 의사충격파(Pseudo-shock waves)가 존재하는 등, 일반적으로 등엔트로피흐름으로 되지 않기 때문에, 이젝터내의 흐름을 등엔트로피 흐름으로 가정한 식 (1)에 의한 효율로서 이젝터의 성능을 평가하는 것은 어렵다고 판단된다.

Fig.8은 각각의 ψ 에 대하여 최적작동점 $(P_{0p}/P_a)_{o.c}$ 에서 얻어지는 $(P_{0s}/P_a)_{max}$ 와 $(\dot{m}_s)_{max}$ 을 나타낸다. 그림의 횡축에는 ψ 값 이외에 혼합부의 목높이 H_2 와 혼합부 입구높이 H_1 의 비인 H_2/H_1 도 함께 나타내었다. 그림으로부터 각각의 M_{1p} 에 대하여, ψ 가 증가할수록 $(P_{0p}/P_a)_{max}$ 는 감소하고, 반대로 $(\dot{m}_s)_{max}$ 는 증가한다는 것을 관찰할 수 있다. 더욱이 $(P_{0p}/P_a)_{max}$ 의 최소점과 $(\dot{m}_s)_{max}$ 의 최대점에 각각 대응

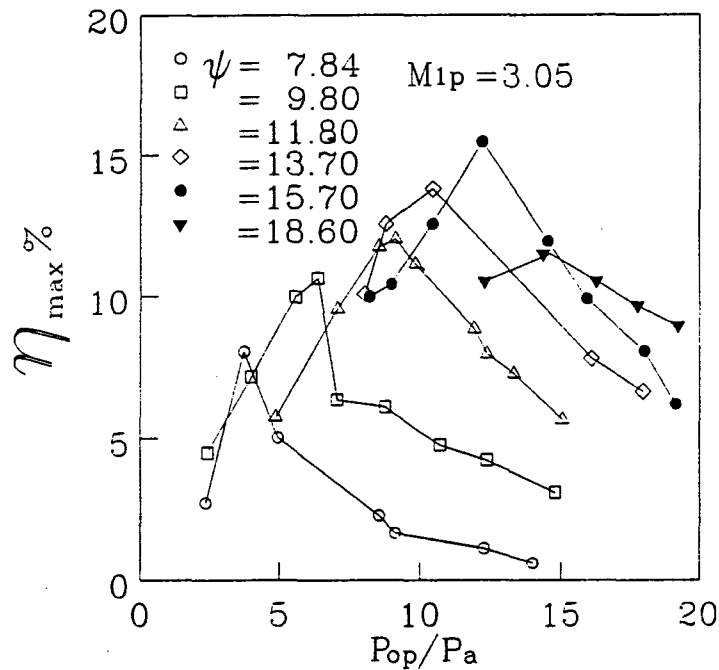


Fig. 6 Maximum efficiency of supersonic ejector with variation in primary stagnation pressure

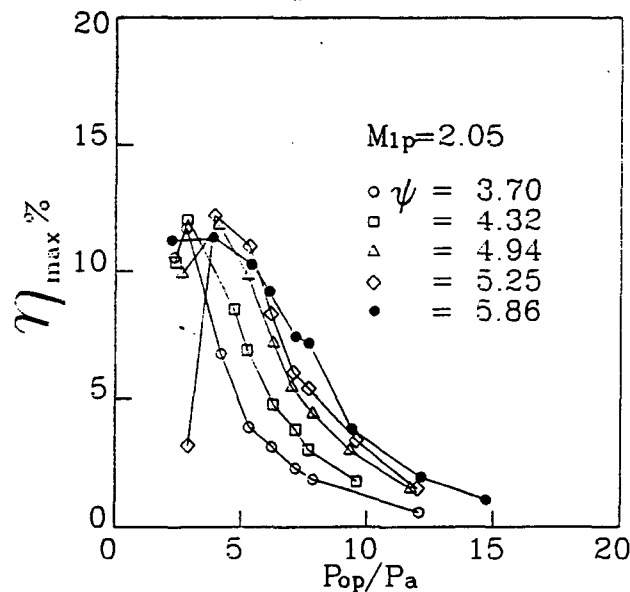


Fig. 7 Variation in maximum efficiency of supersonic ejector with primary stagnation pressure

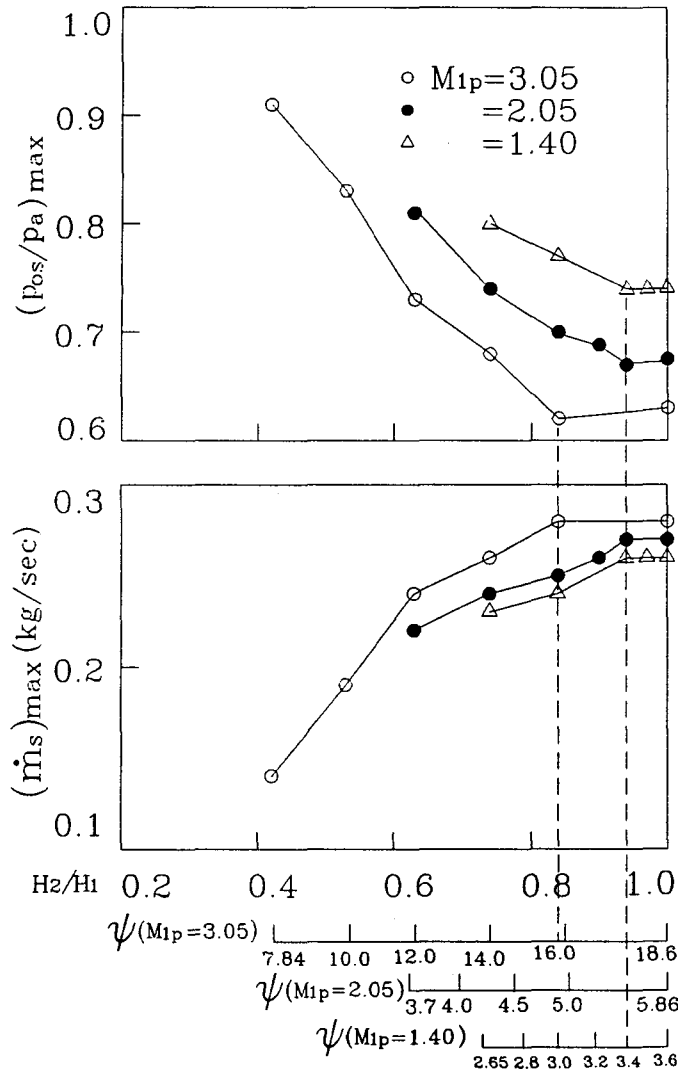
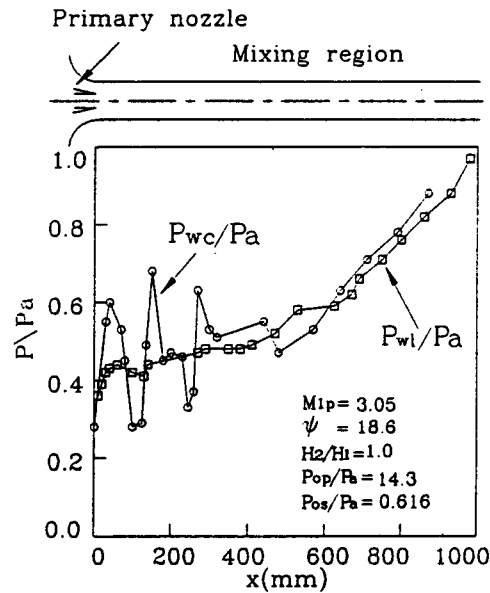


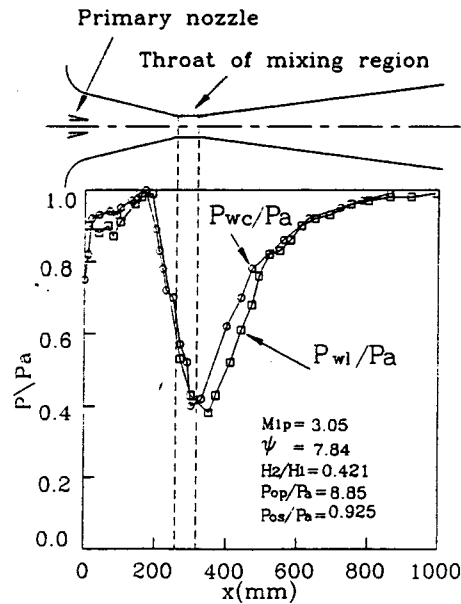
Fig. 8 Effect of shape of supersonic ejector on operation characteristics

하는 ψ 의 값은 일치하게 된다. 따라서 이와 같은 ψ 의 값을 2차유량이 있는 경우의 최적목면적비이라고 할수 있으며, 본 연구에서는 $\psi_{o.c}$ 로 정의하였다. 그림으로부터 $\psi > \psi_{o.c}$ 인 경우에 대해서는 $(Pos/Pa)_{max}$ 와 $(\dot{m}_s)_{max}$ 는 모두 ψ 에 관계없이 일정한 값으로 된다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 얻어진 $\psi_{o.c}$ 의 값은 $M_{1p}=1.40, 2.05, 3.05$ 에 대하여 각각 3.41, 5.56, 15.7이었으며, 참고로 2차유량이 없는 진공펌프의 경우에는 각각 $\psi_{o.m}=2.65, 3.70, 7.84$ 로 2차유량이 있는 배기펌프에 대한 $\psi_{o.c}$ 가 상당히 크다는 것을 알 수 있다.

Fig.9(a)와 (b)는 Pop/Pa 와 ψ 에 대한 $(Pos/Pa)_{max}$ 와 $(\dot{m}_s)_{max}$ 의 변화를 이해하기 위하여 흐름방향의 정압분포를 나타내었다. 그림의 횡축에는 1차노즐 출구를 원점으로 하는 관측방향의 거리 x , 종축에는 대기압 Pa 로 무차원화한 국소정압 P/Pa 을 나타내었으며, 실험값들중 P_{wc}/Pa 는 관측벽상의 중심선에서 측정된 정압분포, P_{w1}/Pa 는 관하벽의 중심선에서 측정된 정압분포를 나타내었다. 그림 (a)는 $M_{1p}=3.05, \psi=18.6, H_2/H_1=1.0, Pop/Pa=14.3, Pos/Pa=0.616$ 이며, 혼합부의 단면적이 일정한 경우의



(a) supersonic ejector without throat in mixing region



(b) supersonic ejector with throat in mixing region

Fig. 9 Streamwise wall pressure distributions in supersonic ejector

실험값이다. 따라서 이 경우 P_{op}/P_a 의 값은 $(P_{op}/P_a)_{o.c}$ 에 대응한다. 그림에서 P_{wc}/P_a 는 혼합부 입구에서부터 어느 정도의 하류까지 x축 방향으로 불규칙하게 변동하지만, 그후부터는 완만하게 증가하는 경향을 나타내고 있다. 반면 P_{wl}/P_a 는 혼합부에서부터 단조로운 증가경향을 나타내고 있다. 이와같이 관의 측벽과 하벽에서 측정된 정압분포의 차이는 1차흐름로부터 분류가 혼합부의 단면 전체로 확대되지 않고, 흡인되는 2차흐름과 완전히 혼합되지 않기 때문이다. 한편 그림 (b)는 (a)에 비하여 $\psi=7.84$ 로 상대적으로 작은 경우이며, P_{op}/P_a 는 $(P_{op}/P_a)_{o.c}$ 보다 큰 8.85이므로 앞의 Fig.3의 실험점 C의 조건에 대응한다. 그림에서 P_{wl}/P_a 와 P_{wc}/P_a 는 모두 혼합부 목의 하류에서 급격히 감소한 후 의사충격파에 의해 완만하게 증가한다. 따라서 그림 (a)의 경우와는 달리, 흐름은 혼합부 목의 하류에서 1차흐름과 2차흐름이

잘 혼합되어 균일흐름으로 된다고 생각할 수 있다.

Fig.10에는 1차정체실 압력 P_{0p} 을 일정하게 유지하고(즉 1차 질량유량 \dot{m}_s 를 일정하게 유지), 2차 질량유량 \dot{m}_s 를 0에서부터 서서히 증가 또는 감소시키는 경우에 발생하는 이젝터 작동특성의 이력현상을 나타내었다. 그림중의 ○은 \dot{m}_s 를 증가시키는 과정, ●는 감소시키는 과정에 대한 실험값을 나타낸다. P_{0p}/P_a 를 일정하게 유지하면서 2차 질량유량 \dot{m}_s 를 0에서부터 서서히 증가시키는 경우, 이젝터의 작동특성은 처음에는 경로 ABC와 같이 되며 고진공 성능을 나타낸다. P_{0s}/P_a 는 C점에서부터 급격히 증가하여 D점에 이르게 된다. 더욱 더 \dot{m}_s 를 증가시키면 이젝터의 작동특성은 DE와 같이 저진공으로 되며, 최종적으로는 최대유량점인 E점에 도달하게 된다.

한편 최대유량점 E에서 \dot{m}_s 를 감소시키는 경우, 이젝터는 EDF의 경로를 따라 저진공으로 되며, D점보다 \dot{m}_s 가 작은 F점에서 급격히 B점으로 이동하여 BA와 같이 고진공 성능을 나타내게 된다. 일반적으로 진공펌프 및 배기펌프로써 사용되는 이젝터는 고진공이 필요하며, Fig.10에서 나타나는 바와 같은 작동특성의 이중성은 실용상 바람직하지 못하다. 따라서 이와 같은 이력현상에 대해 종래 많은 연구결과가 보고되어 있다. 이들 연구에서는 이젝터내의 1차흐름과 2차흐름을 완전히 혼합하는 균일흐름이라고 가정하거나^{11,12)}, 1차흐름에서 발생하는 충격파에 진동으로써 이력현상을 설명하고 있으나,¹³⁾ 정체점 상태가 전혀 다른 두 흐름이 공존하는 흐름장에 적용하기에는 문제가 있는 것으로 생각된다. 이와같이 2차유량의 증감과정에서 발생하

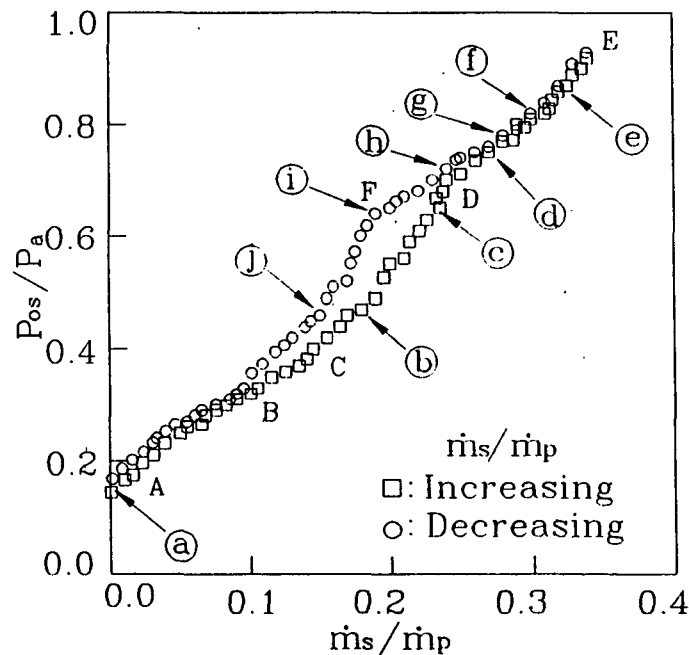


Fig. 10 Hysteresis shown in increasing and decreasing processes of secondary mass flow rate

는 이력현상에 대해서는 아직까지 많은 의문점들이 남아 있으며, 체계적인 연구가 필요하다.

배기펌프용으로 사용되는 초음속이젝터의 이력현상을 이해하기 위해서 본 연구에서는 슈리렌 가시화법을 이용하여 흐름장을 광학적으로 관찰하였다. Fig.11의 (a)~(j)는 Fig.10에 ㉔~㉑로 표시한 각점에 대응하는 흐름조건인 경우, 혼합부내의 흐름을 가시화한 슈리렌사진이다. m_s 의 증가과정을 나타내는 점 ㉔~㉑의 조건에 해당하는 흐름장을 Fig.11의 (a)~(e)에 나타내었으며, m_s 의 감소과정을 나타내는 점 ㉒~㉑의 조건에 해당하는 흐름장은 그림의 (f)~(j)에 나타나 있다. 그림 (a)는 m_s 가 0이고, $Pop/Pa < (Pop/Pa)_{o.c}$ 인 경우이다. 1차노즐 출구에서 흐름은 부족팽창(Under - expansion)으로 되며, 노즐 출구로부터 팽창파가 관찰된다. 노즐목의 하류에서부터 발생한 충격파는 혼합부 목의 상류보다도 하류에서 벽면 경계층과 복잡한 간섭(Interaction)을 일으켜 의사충격파로 관찰된다. 따라서 이와 같은 흐름상태는 2차유량이 0인 경우에 대한 최적작동점 부근의 상태에 상당한다는 것을 알 수 있다. 그림 (b)는 Fig.10에 나타낸 C점 보다 더욱 m_s 를 증가시킨 상태에 대응하며, 1차노즐 출구에서 경사충격파(Oblique shock wave)가 관찰된다. 또 혼합부 목으로부터 상류의 1차흐름에서 의사충격파 발생하며, 혼합부 목의 하류에는 제2의 충격파가 관찰되므로 흐름은 혼합부 목에서 초우크(Choke)한다는 것을 알 수 있다. m_s 를 더욱 증가시킨 그림 (c,d)는 저진공 상태를 나타내는 점 D보다 약간 큰 m_s 의 경우이며, 그림 (b)에서 관찰된 경사충격파는 1차노즐 출구에서 배압의 상승에 의해 노즐내로 들어가서 의사충격파로 된다. 또 그림(b)에서 나타나는 혼합부 목하류의 제2의 충격파는 더욱 더 하류로 이동하여 벽면 경계층과 간섭하게 된다. 그림 (e)는 더욱 더 m_s 를 증가시킨 상태에 대응한다. 1차노즐 내에서 발생하는 의사충격파는 더욱 상류로 이동하며, 혼합부목으로부터 하류에 위치하는 의사충격파는 더욱 하류로 이동한다는 것을 알 수 있다. 한편 그림 (f)~(h)는 m_s 의 감소과정에서 나타나는 흐름장의 변화를 나타낸다. 이 경우 m_s 의 증가과정과는 달리, m_s 가 감소함에 따라 1차노즐내에서 발생한 의사충격파는 하류로 이동하고, 혼합부목 하류의 의사충격파는 반대로 상류로 이동하는 것이 관찰된다. Fig.10의 D점 근방에서 흐름상태는 그림 (i)에서 관찰될 수 있다. 이상태에서 m_s / m_s 의 값은 m_s 증가과정을 나타낸 그림 (c)와 거의 같으며, Pos/Pa 의 값은 그림 (b)와 거의 같음에도 불구하고 흐름장의 형태는 전혀 다른 저진공성능을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그림 (j)는 더욱 m_s 를 감소시킨 경우의 흐름상태를 나타내고 있다. 1차노즐내에 충격파가 존재하는 저진공성능 영역에서 흐름상태를 나타내는 그림 (d)~(i)와는 달리, 혼합부목 하류에서 의사충격파는 명확하게 관찰되지않는다. 이 상태보다 더욱 더 m_s 를 감소시키면,

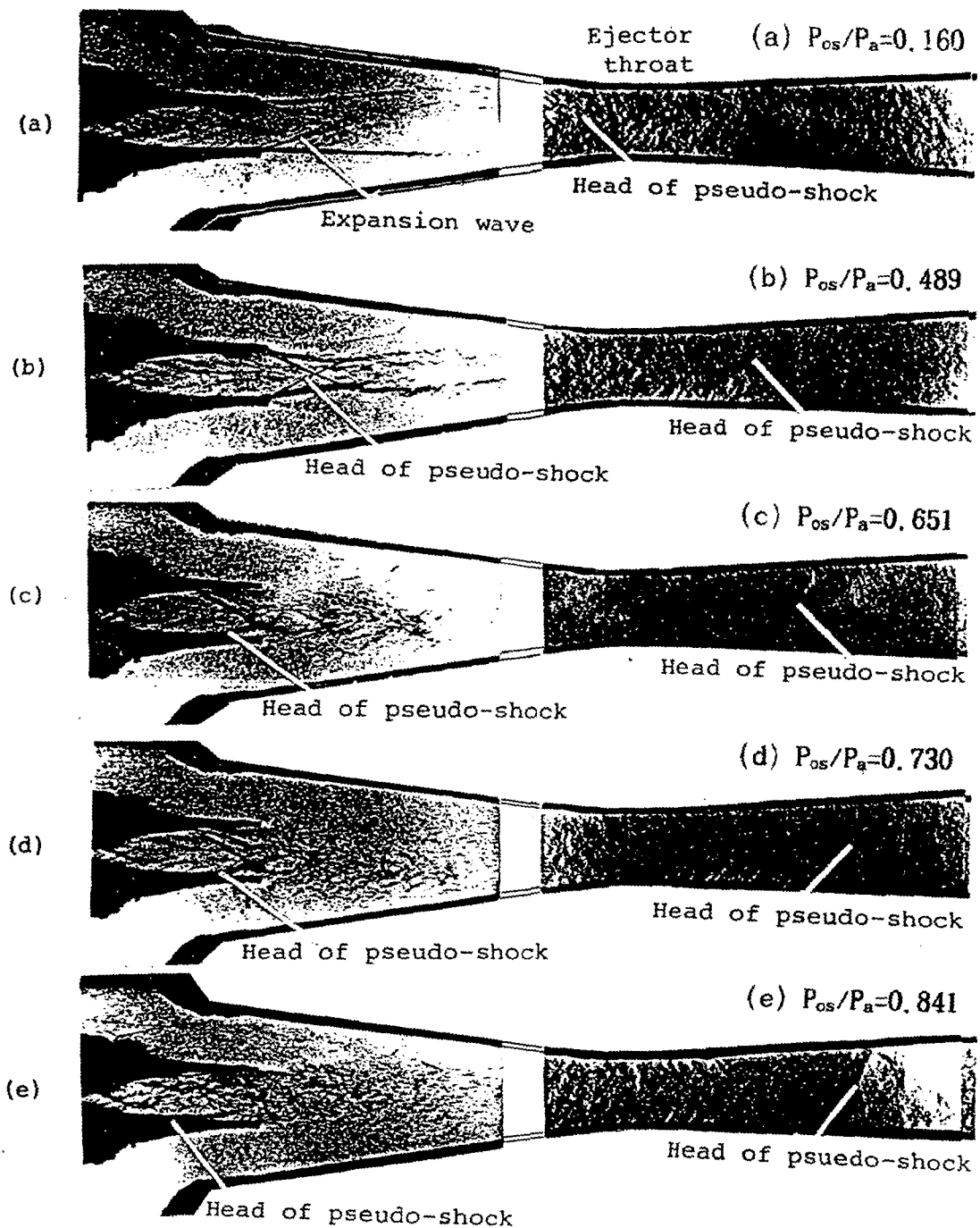


Fig. 11 Schlieren photographs of flow fields in supersonic ejector
(a~e) Increasing process of secondary mass flow rate

Fig.10의 B점에서 관찰된 바와 같은 이중초우크 현상은 관찰되지 않게 되며, BA경로를 거쳐 $m_s=0$ 인 상태로 되어서 그림(a)와 동일한 유동형태를 취하게 된다.

이상으로부터 이중진공현상은 1차흐름이 2차흐름의 존재에 의하여 이중초우크에 의하여 발생된 혼합부목 상류의 충격파(압축파)와 또한 1차흐름과 2차흐름의 혼재에 의하여 초우크하여 생성된 혼합부목 하류의 충격파인 2개 충격파 즉 혼합부목 상류의 충격파와 혼합부목하류의 충격파의 존재에 의해 생기는 현상이라고 생각된다.

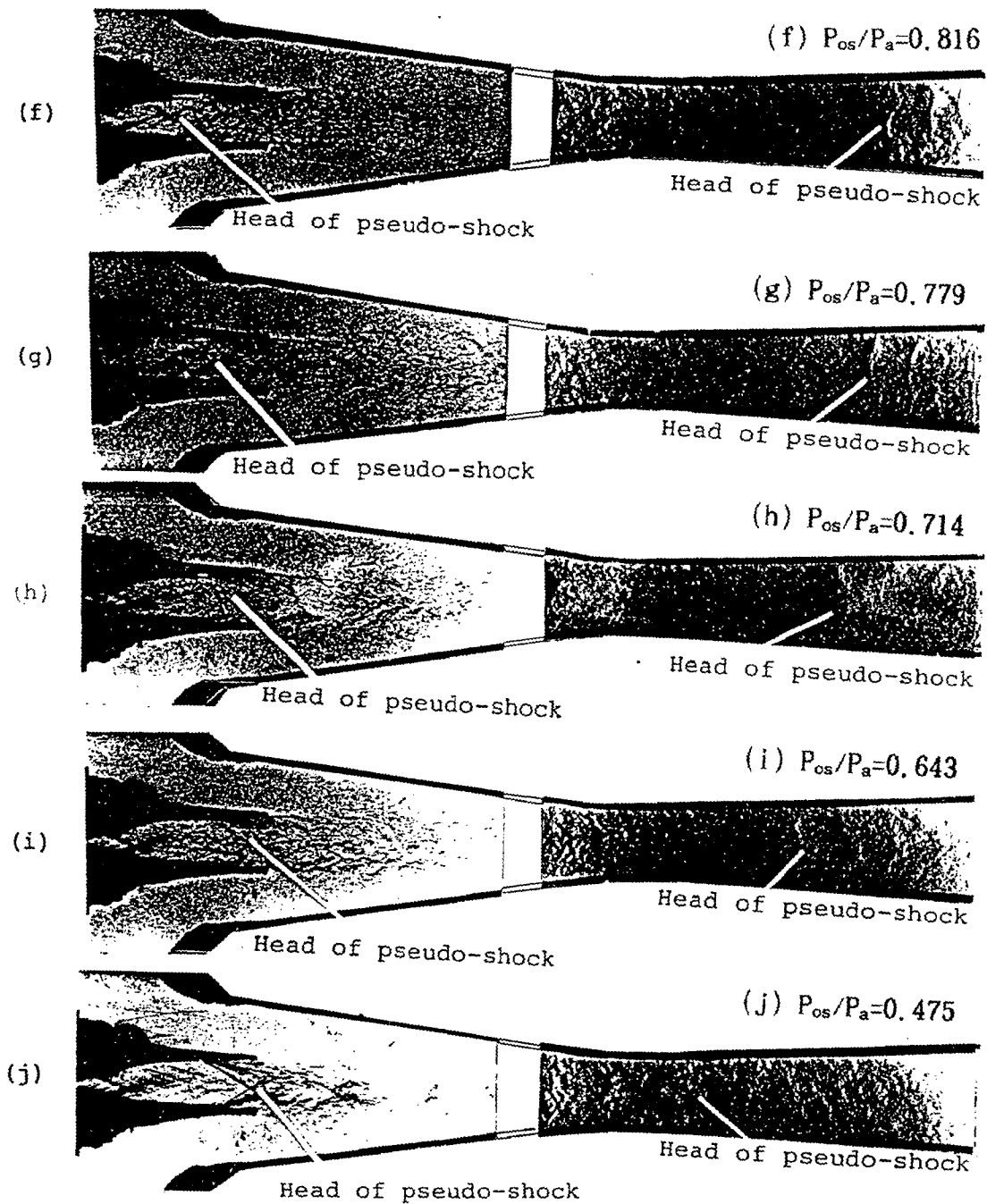


Fig. 11 (f~j) Decreasing process of secondary mass flow rate

4. 결 론

배기펌프로 이용되는 초음속 이젝터에서 2차질량유량을 증가 또는 감소시키는 경우에 노즐출구마하수, 혼합부의 목면적비가 초음속 이젝터의 작동특성과 내부유동에 미치는 영향에 대하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 2차질량유량을 영에서 증가 또는 감소시키는 과정의 경우에 그 작동특성선의 최대 유량점에 대한 초음속 이젝터의 유동장은 일차정체실전압과 목면적비에 대하여 3개 영역으로 나누어 진다.

1) 고진공 성능을 갖는 영역으로서 2차흐름만의 초우크가 존재한다.

2) 이중진공현상이 존재하는 영역.

3) 저진공 성능만을 갖는 영역으로서 위의 두개영역 이외의 경우이다.

(2) 목면적비가 일정할 때 고진공영역 및 이중진공현상이 존재하는 영역과 저진공영역의 경계에 위치하는 일차정체실압력이 최적작동점이고, 이 1차정체실압력에 의해 각 목면적비에 대하여 최대의 2차질량유량과 최대의 압축비를 얻는것이 가능하다.

(3) 고진공영역에 대해서 혼합부 면적이 일정한 경우 2차질량유량을 증가시키면 2차흐름의 초우크점은 차차 혼합부 입구로 접근되고, 최후에 초우크는 2차흐름의 혼합부 입구에 존재하는 것으로 되지만, 혼합부에 목을 갖는 경우 2차질량유량을 증가시키면 2차흐름의 초우크점은 혼합부 목에 존재하는 것으로 되고, 그후 2차질량유량을 증가시켜도 그 초우크점은 혼합부 입구로는 이동하지 않는다.

(4) 고진공영역에 대해서 최대의 2차질량을 얻기 위한 최적목면적비가 존재하고, 이 최적목면적비에서 최대의 2차질량유량을 얻기 위한 1차정체실압력은 최적작동점과 일치한다. 이때 혼합부 목에 대해서 2차흐름이 차지하는 면적은 최대로 된다.

(5) 초음속 이젝터의 작동특성의 이중성을 나타내고 이력현상을 발생시키는 이중진공현상은 1차류의 이중초우크에 의해서 발생한 혼합부 목상류의 압축파(의사충격파)와 또 1차, 2차 흐름이 존재하고 혼합부목에서 초우크한 결과 생성된 혼합부목하류의 의사충격파에 의해서 발생되는 현상이다.

참 고 문 헌

(1) Keenan, J.H., Neumann,E.P. and Lustwerk,F., 1950, "Investigation of Ejector Design by Analysis and Experiment," Journal of Applied Mech., Vol.17, No.3.

(2) Vogel,R.,1956,"Practical Application of air Ejectors," NASA TT F-9352.

(3) 高島, 長谷川, 1954,化學工學, 第18卷9號.

(4) Fortini, A., 1959, "Performance Investigation of a Nonpumping Rocket - Ejector system for Altitude Simulation," NASA TN.D-257.

(5) Quinn,B., 1973, "A Simple Estimate of the Effect of ejector Length on Thrust Augmentation," Journal of Aircraft, Vol.10, No.5.

(6) De Han , R.E.,1964,"Supersonic Ejectors With Mixing at constant Cross Section,1. Theoretical Part," Applied Scientific Research, Vol.12A, No.3, pp293-313.

(7) Panesci,J.H. and German,R.C., 1963, "An Analysis of Second - Throat Diffuser Performance for Zero - Secondary - Flow Ejector systems," Arnold Engineering Development Center Report No.AEDE-TDR-63-249.

- (8) 金義東, 李鍾洙, 1994, "眞空펌프용 超音速 이젝터에 관한 研究," 大韓機械學會 秋季學術大會 論文集.
- (9) 김희동, 김윤근, 1995, "超音速 이젝터의 簡單한 最適 性能 計算法," 第5次 誘導 武器 學術大會 論文集.
- (10) 生井武文, 松尾一泰, 1977, 壓縮性流體の力學, " 理工學社.
- (11) Mikkelsen, C.D., Sandberg, M.R. and Addy, A.L., 1976, "Theoretical and Experimental Analysis of the Constant-Area, Supersonic-Supersonic Ejectors," US Army Reserach Office Grant Number DAHC 04-75-G-0046.
- (12) Fabri, J. and Siestrunk, R., 1958, "Supersonic Air Ejectors," Advances in Applied Mechanics, New York, N.Y., Academic Press, Vol.5, pp.1-34.
- (13) Ueda, T., 1961, "On Performance Characteristics of Steam Ejectors," Bulletin of JSME, Vol.4, No.13.