

음속/초음속 이젝터 시스템의 2차정체실 압력특성

정성재*·이준희*·이권희**·최보규***·김희동****

The Secondary Chamber Pressure Characteristics of Sonic/Supersonic Ejector-Diffuser System

S.J.Jung*, J.H.Lee*, K.H.Lee**, B.G.Choi***and H.D.Kim****

Key Words: Compressible Flow(압축성 유동), Sonic/Supersonic Ejector(음속/초음속 이젝터), Ejector Nozzle(이젝터 노즐), Diffuser(디퓨저), Shock Wave(충격파)

Abstract

The present study is an experimental work of the sonic/supersonic air ejector-diffuser system. The pressure-time dependence in the secondary chamber of this ejector system is measured to investigate the steady operation of the ejector system. Six different primary nozzles of two sonic nozzles, two supersonic nozzles, petal nozzle, and lobed nozzle are employed to drive the ejector system at the conditions of different operating pressure ratios. Static pressures on the ejector-diffuser walls are to analyze the complicated flows occurring inside the system. The volume of the secondary chamber is changed to investigate the effect on the steady operation. the results obtained show that the volume of the secondary chamber does not affect the steady operation of the ejector-diffuser system but the time-dependent pressure in the secondary chamber is a strong function of the volume of the secondary chamber.

1. 서론

일반적으로 고압의 유체를 노즐을 통하여 가속시켜 얻어지는 제트유동에서는 제트 주위와의 압력차와 제트 경계에서 발생하는 강한 전단력에 의해 제트 주위의 유체는 제트 내부로 혼입하게 된다.

이러한 유동의 원리를 응용하는 대표적인 유체기계로서 이젝터를 들 수 있다. 대개의 경우 이젝터는 1차 구동노즐과 혼합부 및 디퓨저로 구성되어, 1차 구동노즐 출구에서 가속된 유체가 2차 측 유체를 혼합부로 흡인하여 2차 정체실의 압력

을 변화시키거나 2차 유동을 수송하는 일종의 유체펌프라 할 수 있다.

이젝터의 구동은 1차 유체와 2차 유체의 순수한 운동량 교환에 의존하기 때문에 이젝터 전체의 효율이 낮은 단점이 있다. 그러나 통상적인 유체기계와는 달리 구조가 매우 간단하고 내부에 활동부분을 가지지 않아 고장의 요소가 없으며, 유지 및 보수가 거의 불필요하므로 반영구적으로 사용할 수 있을 뿐만 아니라 대용량의 유체를 압축, 수송할 수 있는 장점 때문에 현재 V/STOL 항공기의 추력증강,⁽¹⁾ 고고도 시뮬레이션 장치⁽²⁾를 비롯하여 각종 플랜트시설,⁽³⁾ 냉공조시설,⁽⁴⁾ 화학공업⁽⁵⁾ 및 소음저감⁽⁶⁾등에 널리 활용되고 있다.

대개의 경우, 이젝터는 사용형태가 주로 2차 유동의 수송을 목적으로 하는 추기펌프형과 2차 정체실의 압력을 낮추기 위한 진공펌프형으로 구분할 수 있다.^(7,8) 이러한 이젝터의 사용 형태와는 무관하게 2차측의 압력은 이젝터의 구동 및 운전

* 안동대학교 기계공학과 대학원
** 회원, 안동대학교 기계공학과 BK21연구원
*** 회원, (주)동화정기 기술연구소
**** 회원, 안동대학교 기계공학부

특성에 의존하게 되며, 이젝터 시스템의 전체 성능을 결정하는 매우 중요한 요인이다. 그러나 대부분 산업현장에서 활용되고 있는 이젝터는 소형이며, 특별한 경우를 제외하고는 이젝터의 2차 정체실 체적은 크지 않다. 이 경우, 이젝터가 운전되고 난 후부터 2차 정체실내에서 압력의 시간 의존성은 매우 중요하며, 실제 산업현장에서 전체 시스템의 정상운전을 결정하는데 결정적인 요인으로 작용하게 된다.

더욱이 이젝터 시스템에서 2차 정체실의 압력은 2차 정체실의 체적에도 의존할 수 있으며, 2차 정체실의 체적과 압력 시간의존 관계를 규명하는 것은 산업용 이젝터 시스템의 설계에서 간과해서는 안될 중요한 변수이다.

이젝터의 2차 정체실의 압력특성에 관하여 지금까지의 연구는 대부분 이젝터가 정상운전된 상태의 가정하에서 2차 정체실의 체적을 일정하게 하여 2차 정체실에서 발생하는 정상압력을 조사한 것이었다.⁽⁹⁾ 따라서 이젝터의 2차 정체실에서 발생하는 압력의 시간 의존성과 정체실 체적의 영향은 고려되지 않았다.

본 연구에서는 2차 정체실의 체적, 구동노즐의 형상 및 작동압력비와 2차 정체실의 압력 시간 의존성의 관계를 실험적으로 조사하기 위하여 형상이 다른 여섯 개의 구동노즐과 체적이 다른 세 개의 2차 정체실을 제작하였다. 실험에서는 이젝터의 작동압력비를 변화시켜, 2차 정체실 및 이젝터 내부의 압력측정을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도를 나타낸 것으로, 압축기, 1차/2차 정체실, 이젝터, 계측시스템으로 구성되어 있다. 1차 정체실에 저장된 압축공기는 음속/초음속 노즐을 통과하여 가속되며, 분류 주변에 생기는 강한 전단력으로 2차 유동을 흡인하게 되어 2차 정체실의 압력변화가 발생하게 된다. 또 노즐로부터 방출되는 1차 유동과 2차 흡인유동은 이젝터 혼합부에서 혼합되어 이젝터 노즐과 디퓨저를 통과하여 대기로 방출된다.

본 연구에서는 이젝터의 혼합부, 목, 디퓨저의 형상 및 치수는 구동노즐의 형상변화에 상관없이 동일한 것으로 하였으며, 2차 정체실의 체적을 각각 $V=0.45\text{m}^3$, 0.9m^3 , 1.35m^3 으로 변화시켰다.

Fig. 2와 표 1에는 실험에서 사용된 구동노즐

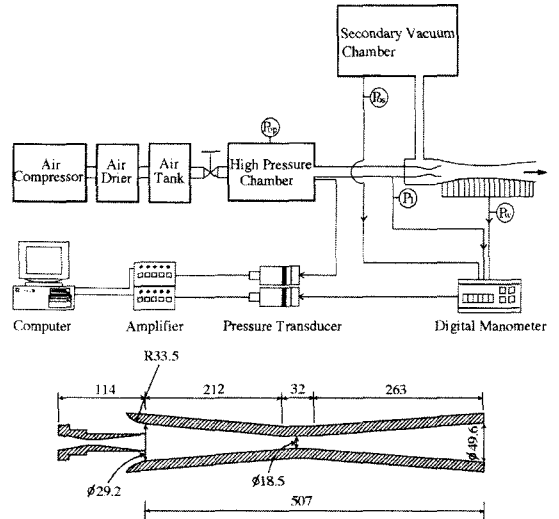


Fig. 1 Experimental facility and ejector dimension

의 상세형상 및 각부의 주요 치수를 나타내었다. 표 1에서 D_i , D_t , D_e 는 각각 노즐 입구, 목, 출구에서의 직경을 나타내며, M_e 는 노즐 출구에서의 설계 마하수이다. 구동노즐은 출구 마하수가 1.0인 음속노즐(Nozzle A,B)의 출구의 면적을 변화시켰으며, 초음속 노즐(Nozzle C,D)에 대해서는

Table 1 Dimensions of the primary nozzles

	$D_i(\text{mm})$	$D_t(\text{mm})$	$D_e(\text{mm})$	M_e
Nozzle A	20	-	9.25	1
Nozzle B	20	-	13.1	1
Nozzle C	20	5.8	17.5	3.82
Nozzle D	20	6.9	17.5	3.44
Nozzle E	20	5.1	17.5	-
Nozzle F	20	5.1	17.5	-

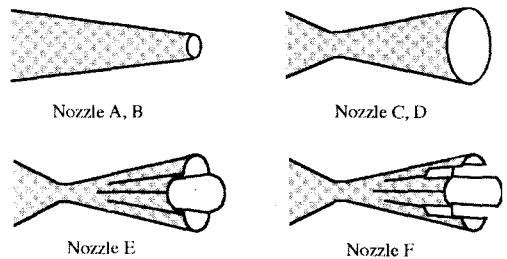


Fig. 2 Primary nozzle configurations

노즐목의 크기를 변화시켜 노즐 출구에서의 마하수를 3.44와 3.82로 하였다. 또한 노즐 출구의 형상변화에 따른 2차 정체실의 압력특성을 조사하기 위하여 Fig. 2의 Nozzle E와 F에 나타낸 바와 같이 각각 petal형과 lobe형을 설계제작하였다. 실험에서는 압력측정을 위해 구동노즐의 입구, 이젝터 혼합부, 목 및 디퓨저와 2차 정체실 내벽에 압력센서를 부착하였다. 또 이젝터 내부 유동을 조사하기 위해서, 직경 1mm의 정압공을 10mm간격으로 설치하여, 벽면압력을 상세하게 측정하였다. 본 실험에서는 구동노즐의 공급압력 P_{op} 와 배압 P_a (대기압)의 비를 이젝터의 작동압력비 P_{op}/P_a 로 정의하여, 이값을 1.5에서 10까지 변화시켰다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3에는 이젝터 벽면의 유동특성을 고찰하기 위하여 1차 구동노즐의 형상이 음속노즐(Nozzle B)인 경우와 초음속노즐(Nozzle C)인 경우에 대하여 이젝터가 정상 가동된 후 이젝터 벽면의 정압분포를 나타내었다. 그림의 횡축은 1차 구동노즐 출구를 원점으로 한 이젝터 축방향의 무차원 거리(x/D_1 ; 여기에서 D_1 는 1차 구동노즐 출구의 직경)를 나타내며, 종축은 이젝터 벽면의 정압을 1차 정체실의 정압으로 무차원한 값이다. 그림에서 이젝터가 음속노즐인 Nozzle B에 대

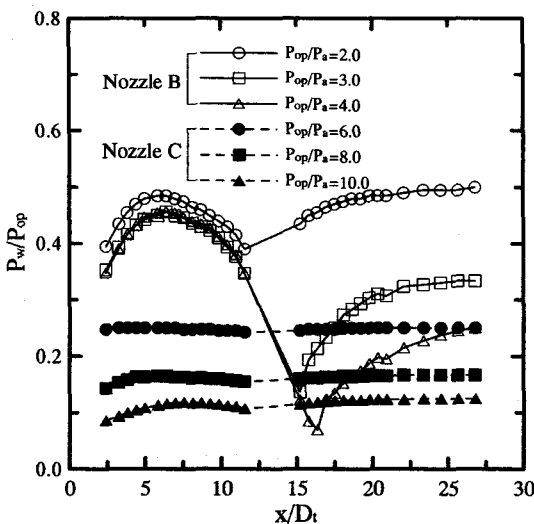


Fig. 3 Static pressure distributions along the wall surface

하여 이젝터 작동압력비 P_{op}/P_a 가 비교적 낮은 2.0에서 운전되는 경우, $x/D_1 < \text{약 } 6.5$ 의 영역 즉 이젝터의 혼합부에서는 벽면압력은 거리에 따라 증가하나, 그후부터는 감소하여 $x/D_1 = \text{약 } 12.0$ 부근에서 최소값을 가진 후 이젝터 디퓨저내에서 압력이 유동방향으로 증가하는 경향을 보인다. 동일한 Nozzle B를 사용한 경우, 작동압력비 P_{op}/P_a 가 증가함에 따라 유동은 이젝터 목에서 초크하여, 이젝터 디퓨저에서 발생하는 충격파 시스템으로 인하여 압력이 증가하게 된다. 따라서 이젝터 디퓨저에서 발생하는 충격파 상류에서는 유동이 초음속으로, 디퓨저 내에서 충격파와 디퓨저 벽면의 경계층과 상호간섭현상이 발생하게 된다.

한편 Nozzle C의 경우 이젝터 벽면에서 압력은 유동방향으로 크게 변화하지 않는 것으로 보인다. 예를 들면, 이젝터의 작동압력비 P_{op}/P_a 가 6.0인 경우 이젝터 벽면에서 압력은 유동방향으로 거의 일정하며, 그 값은 상류정체실 압력의 대략 25% 정도로 된다는 것을 알 수 있다. 작동압력비 P_{op}/P_a 가 더욱 증가하는 경우, 압력은 이젝터의 혼합부에서 약간 증가하다가 감소하는 것으로 보이지만, 그러나 Nozzle B에 비하여 변화의 정도는 크지 않다. 이것은 Nozzle C의 경우 본 연구에서 적용된 작동압력비 P_{op}/P_a 가 10이하로 높지 않으므로, 1차 구동 노즐유동은 과팽창 상태로 되며, 노즐 내에 충격파가 발생할 것으로 판단된다. 따라서 이젝터 혼합부와 디퓨저를 통과하는 유동은 아음속 제트와 같은 상태로 유동할 것으로 판단된다.

Fig. 4는 본 연구에서 사용된 음속/초음속 공기 이젝터의 시스템에 있어서, 1차노즐 입구(측정점 P_1)와 2차 정체실 내에서 발생하는 압력의 시간변화를 나타낸 모식도이다. 실험에서 이젝터 상

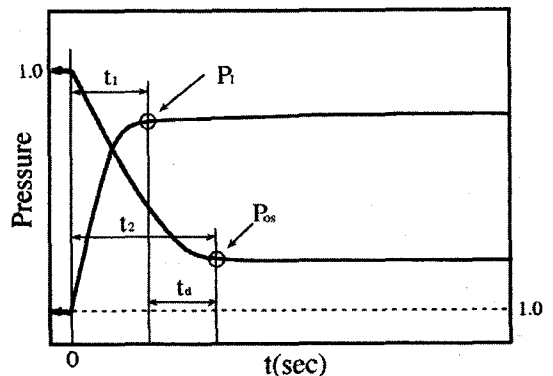


Fig. 4 Typical ejector operation

류 정체실의 압력을 일정하게 하도록 밸브를 열게 되면, 1차 구동노즐 입구에서 압력은 급격하게 증가하여 어느 일정값 P_1 으로 도달하게 되며, 그후부터 이젝터의 1차 노즐출구 즉 이젝터 구동노즐유동은 시간과는 무관한 정상유동이 개시된다. 본 연구에서는 1차 노즐 입구에서 유동이 정상 즉 압력이 P_1 으로 되는 시간을 t_1 이라 정의한다.

한편 이젝터의 2차 정체실에는 1차 구동노즐유동이 개시되어 정상상태로 됨에 따라 정체실내의 압력은 감소하여 어느 일정값 P_{os} 로 유지된다. 이때까지의 소요시간을 t_2 로 정의하면, 실제 유동에서는 항상 $t_2 > t_1$ 로 되며, 본 연구에서는 t_2 와 t_1 의 차를 1차 구동 노즐의 정상유동과 2차 정체실내의 정상 압력까지의 시간지연으로 정의하며, t_d 로 나타내었다. 실제 산업현장에서 사용되는 이젝터의 경우 이젝터운전이 정상상태까지 도달하는데 필요한 시간 t_d 는 매우 중요하며, 소형 이젝터의 경우 t_2 와 t_1 은 길지 않다. 따라서 본 연구에서는 t_d 에 미치는 이젝터의 작동압력비와 2차정체실체적의 영향을 조사하였다.

Fig. 5에는 2차 정체실의 체적이 $V=0.45m^3$ 이고 1차구동 노즐이 Nozzle A인 음속 이젝터의 경우, 1차구동 노즐의 입구에서 압력 P_1 과 2차 정체실의 압력 P_{os} 의 시간 의존성을 나타내었다. 그림의 횡축의 값은 이젝터 상류정체실 입구에 설치한 밸브가 열린 직후의 경과시간 t 를 나타내며, 그림의 종축은 이젝터의 배압 즉 대기압 P_a 로 무차원한 값을 나타낸다. 그림에서 이젝터의 작동압력비 P_{op}/P_a 가 증가할수록 P_1 의 값은 증가하며, 일정 P_1 의 값까지 도달하는데 걸리는 시간은 길어진다. 이를 알 수 있다.

또 이젝터의 주어진 작동압력비에 대하여, 2차 정체실의 압력 P_{os} 는 시간이 경과함에 따라 급격하게 감소하여, 어느 일정값에 도달하게 된다. 이러한 2차 정체실내에 압력 P_{os} 는 시간에 따라 다소 변동하는 것으로 보이지만, 그 변동의 크기는 크지 않다. 한편 1차 노즐의 입구에서 압력 P_1 과는 달리, 2차 정체실의 압력 P_{os} 는 시간 의존성은 매우 다르다. 예를들면, 이젝터의 작동압력비가 증가할수록 일정 P_{os} 값까지 도달하는데 걸리는 시간은 단순히 증가하지 않는 것으로 보인다. 이것은 1차 구동노즐내에서 발생하는 유동특성이 일정 P_{os} 값에 영향을 미치지 때문이다.

Fig. 6에는 작동압력비, 1차구동 노즐의 형상, 및 2차정체실의 체적을 변화시켰을 때, 이젝터가 정상상태로 운전된 후 일정하게 유지되는 2차정

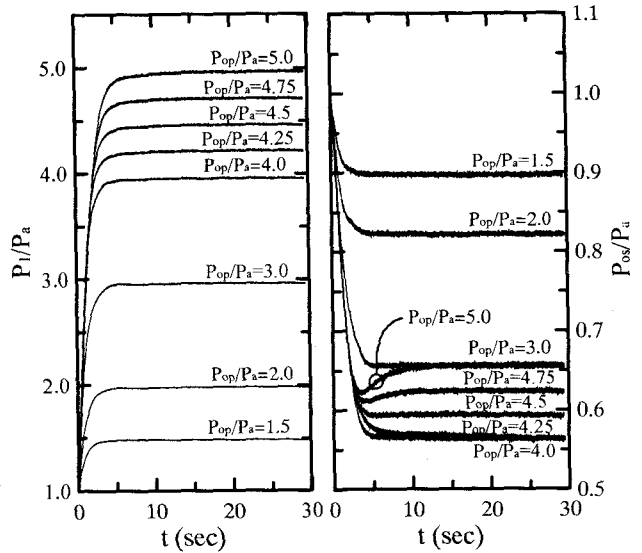


Fig. 5 P_1/P_a and P_{os}/P_a vs t

체실의 압력을 대기압으로 무차원하여 비교하였다. 1차구동 노즐이 음속노즐인 경우 작동압력비가 증가할수록 2차 정체실의 압력은 급격하게 낮아지다 다시 급격하게 상승하며, 구체적으로 Nozzle A는 작동압력비 P_{op}/P_a 가 4.0에서, Nozzle B는 2.0에서 2차 정체실의 최저압력값을 갖는다. 1차 구동노즐이 초음속 노즐인 경우, 2차정체실

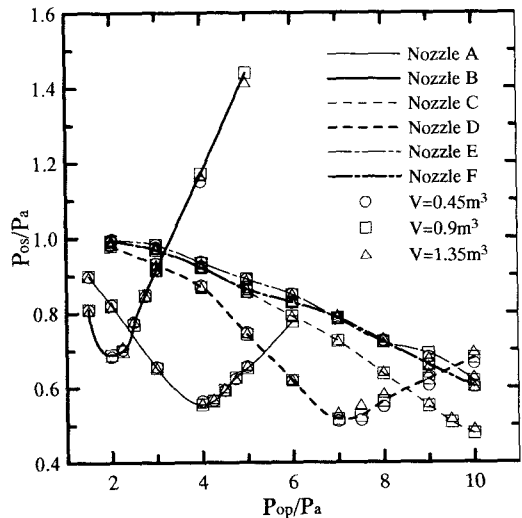


Fig. 6 P_{os}/P_a vs P_{op}/P_a

에서 최저압력값은 보다 높은 작동압력비 P_{op}/P_a 에서 발생하며, 예를 들어 Nozzle D의 경우 $P_{op}/P_a=7.0$ 에서 최소 압력값을 보인다. 위의 결과로부터 작동압력비 P_{op}/P_a 가 매우 낮을 경우(구체적으로 Nozzle B의 경우 $P_{op}/P_a=3.0$, 그리고 Nozzle A의 경우 $P_{op}/P_a=5.0$)에는 음속이펙터가 초음속이펙터보다 2차정체실에서 압력이 낮다. 한편 petal형 및 lobe형의 노즐(Nozzle E와F)에서는 작동압력비가 증가하면 2차 정체실의 압력은 초음속 노즐(Nozzle C와D)에 비해, 단조롭게 감소하여, 작동압력비 $P_{op}/P_a=10.0$ (Nozzle C와D)에서 2차 정체실의 압력이 대기압의 약 63%정도였으며, 노즐 출구에 lobe를 만들어 전단의 효과를 더 높인 Nozzle F의 경우는 Nozzle E에 비해 2차 정체실의 체적변화에 따른 압력변화는 거의 없어, 2차 정체실 정상압력과 체적의 의존특성은 나타나지 않았다.

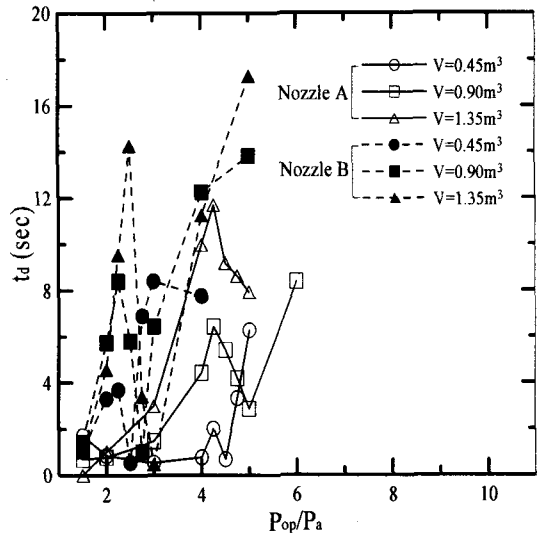
본 실험의 작동압력범위 내에서 음속노즐 A,B 및 초음속노즐 D의 경우 2차 정체실의 압력이 감소하다 증가하는 이유는 문헌(10)에서 규명한 바와 같이 1차 구동노즐내에서 발생한 부족팽창 체트유동이 이펙터 혼합부에서 재순환 유동을 일으켜 2차 정체실에 역류하기 때문이다. 또 Nozzle A, B 및 D의 2차 정체실 최저압력은 노즐출구직경이 작고 마하수가 클수록 작동압력비가 높은 경향을 나타내며, 이것은 체트의 직경이 작을수록 이펙터 벽면에서 충돌분류의 재순환 영역이 발생할 수 있는 작동압력비가 높아야하고, 노즐 출구에서 유동의 마하수가 클수록 흡인작용이 크게 되기 때문이다.

Fig. 7에는 임의의 작동압력비에 대한 2차정체실의 압력특성을 조사하기 위하여, t_d 에 미치는 작동압력비와 2차정체실 체적 및 1차구동 노즐형상의 영향을 비교하였다. 음속노즐인 Nozzle A에서 2차 정체실의 체적이 $V=0.45m^3, 0.9m^3, 1.35m^3$ 일 경우 작동압력비가 1.5에서 4.5사이에서 t_d 는 각 구간마다 2차 정체실의 체적에 비례하여 증가하지만, 작동압력비가 4.5이상에서는 t_d 와 P_{op}/P_a 의 일관된 관계를 기술하기가 곤란하다. 또 Nozzle A보다 출구직경이 큰 음속노즐인 Nozzle B의 경우 작동압력비와 2차정체실 체적이 t_d 에 미치는 영향은 작동압력비 1.5와 2.0사이로 매우 좁다.

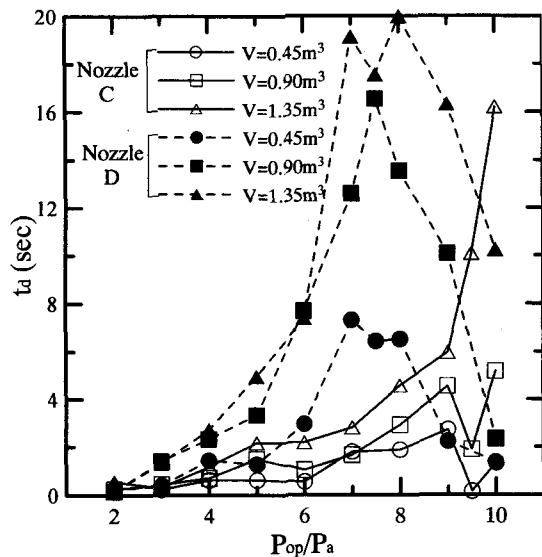
초음속노즐의 경우 t_d 는 Nozzle C에서 작동압력비 2.0에서 9.0까지 2차 정체실 체적에 비례하여 완만하게 증가하였고, Nozzle D의 경우 작동

압력비 5.0까지는 완만하게 증가하다 작동압력비 5.0과 7.0사이에서는 급격하게 증가하였는데, 이 구간에서 t_d 에 미치는 2차정체실 체적의 영향도 더욱 큰 것으로 보인다.

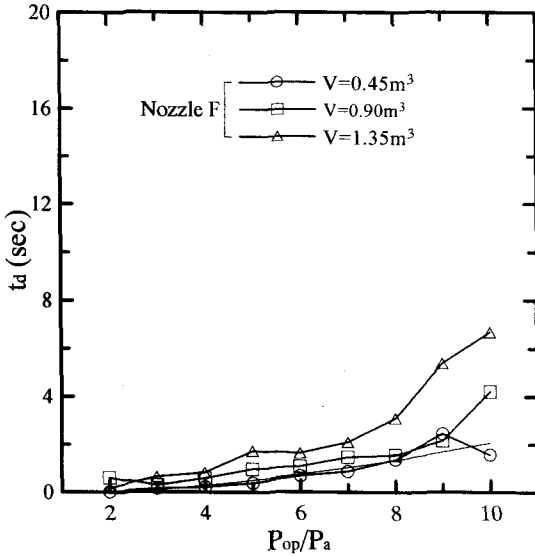
Lobe형 노즐인 Nozzle F의 경우 전 작동압력비 구간에서 t_d 는 2차정체실의 체적과 작동압력비에 비례해서 완만하게 증가했으며 초음속노즐



(a) Nozzle A, B



(b) Nozzle C, D



(c) Nozzle F

Fig. 7 P_{op}/P_a vs t_d

의 경우와 비교하여 t_d 는 약 절반정도에 불과하다. 이것은 petal 노즐에 lobe를 설치한 Nozzle F가 다른 구동노즐에 비해 전단의 효과가 높기 때문이다.

4. 결론

본 연구는 음속/초음속 이젝터에서 2차 정체실의 압력/시간 의존성을 조사하기 위하여 1차 구동노즐의 형상이 2차 정체실의 압력특성에 미치는 영향을 조사하여 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 이젝터의 작동압력비 P_{op}/P_a 가 증가할수록 1차 구동노즐의 입구에서 P_1 의 값은 증가하며, 일정 P_1 의 값까지 도달하는데 걸리는 시간은 길어진다.
- (2) 이젝터의 주어진 작동압력비에 대하여, 2차 정체실의 압력 P_{0s} 는 시간이 경과함에 따라 급격하게 감소하여, 어느 일정값에 도달하게 된다.

- (3) 음속 이젝터에 있어서 2차 정체실의 압력값은 이젝터의 작동압력비가 증가함에 따라 감소하다가 어느 최소값을 갖고, 다시 증가한다.
- (4) 1차 구동노즐로 lobe형 노즐을 사용한 경우, 전체 작동 압력비 범위에서 t_d 는 초음속 노즐에 비하여 절반 정도로 줄어든다.

후기

이 논문은 2001년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Alperin, M. and Wu, J. J., 1983, "Thrust Augmenting Ejector, Part 2," AIAA Journal, Vol. 21, No. 12, pp.1698~1706.
- (2) Quinn, B., 1976, "Ejector Performance at High Temperatures and Pressures," Journal Aircraft, Vol.13, No.12, pp.948~954.
- (3) Knight, J., 1967, "The Use of Steam Ejector for the Vacuum Degassing of Steel," Jour. IMech., Vol.181, No.10, pp.225~239.
- (4) 今木清康, 1980, "空氣調和工學," 産業圖書.
- (5) 化學工學協會, 1974, "化學工學便覽," 丸善.
- (6) Viets, H., Campbell, J. R. and Korkan, K. D., 1981, "Acoustic Interactions in Ejectors," AIAA Paper, No. 81-2045.
- (7) Kim, H. D., Lee, J. S. and Shin, H. S., 1995, "Study on the Operation Characteristics of supersonic Ejector for a Exhaust Pump," KSME Annual Spring Meeting, Vol.B, pp.361~366.
- (8) 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.
- (9) Hale, J. W., 1964, "Influence of Pertinent Parameters on Ejector Diffuser Performance with and without Ejector Mass," Arnold Engineering Development Center, AEDC-TDR-64-134.
- (10) 이영기, 1998, "2차목을 가지는 음속/초음속 이젝터 유동에 관한 수치해석적 연구," 안동대학교 대학원 공학석사 학위논문.