

축소 팽창 디퓨저가 장착된 초음속 이젝터의 시동 특성

박근홍* · 김세훈** · 진정근* · 권세진**

The Starting Behaviour of a Supersonic Ejector Equipped with a Converging-Diverging Diffuser

GeunHong Park* · SeHoon Kim** · JungKun Jin* · SeJin Kwon**

ABSTRACT

An axisymmetric supersonic ejector equipped with a converging-diverging diffuser was built and pressure at various locations along the ejector-diffuser system was recorded with emphasis on the supersonic starting of the secondary flow. In order to find the effects of the opening size of the secondary flow, a number of openings were used with a constant primary pressure. Supersonic starting was possible only for d/D , the ratio of the opening diameter and the diffuser throat diameter, less than 0.306. For larger values of d/D , the ejection begins at subsonic secondary flow condition. With the closure of the opening, the primary flow brings the normal shock downstream of the converging-diverging diffuser. And the starting of the ejector continues even after the closure was removed.

초 록

축소-팽창 디퓨저가 장착된 초음속 이젝터를 제작하여, 다양한 위치에서의 측정된 압력으로 부유동의 초음속 시동조건을 찾아내었다. 우선 부유동 흡입구의 크기의 영향을 알아내기 위하여 다양한 흡입구 직경으로 실험하였으며, 부유동의 초음속 시동은 흡입구 직경과 축소-팽창 디퓨저 직경의 비, d/D 가 0.306 미만인 경우에만 일어났다. 이보다 큰 d/D 에서는, 아음속 시동이 먼저 시작되고, 흡입구를 막으면서 주유동의 유입이 전 유동장을 채우게 되어 수직 충격파를 축소-팽창 디퓨저의 하류로 내려 보내게 된다. 이러한 상황에서 다시 흡입구를 열어도 히스테리시스의 영향으로 초음속 시동이 유지된다.

Key Words: Supersonic Ejector(초음속 이젝터), Hysteresis(히스테리시스)

1. 서 론

1.1 초음속 이젝터

이젝터(ejector)는 높은 유속과 고압의 유체

† 2004년 12월 23일 접수 ~ 2005년 3월 7일 심사완료

* 학생회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

** 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과
연락처, E-mail: propulse@kaist.ac.kr

즉, 1차 유동(주유동 : primary flow, 이하 주유동)을 노즐로 분사시켜 그 운동에너지를 이용하여 주변의 저압기체와 운동량 교환을 통하여 저에너지의 유체를 흡입, 2차유동 (부유동 : secondary flow, 이하 부유동)을 얻는 일종의 펌프이다. 이젝터는 주유동의 속도에 따라 아음속, 음속 그리고 초음속 이젝터로 분류되고, 주유동의 종류에 따라 공기, 증기 그리고 물 이젝터로 나뉜다. 또한 축대칭 이젝터에서 주유동의 분사 방법에 따라 중앙분사 방법과 환형분사 방법으로 나뉜다. 이젝터는 기체역학에만 의존하는 장치이므로 외부의 어떠한 파워소스도 필요하지 않고, 시스템 전체에 어떠한 회전부나나 활동 부분을 가지지 않기 때문에 소형으로 대용량의 부유동을 얻을 수 있으며, 고장요소가 적고 간단한 구조와 운전 성능이 일정하며 수명이 길고 유지보수가 용이한 장점을 가지고 있다.

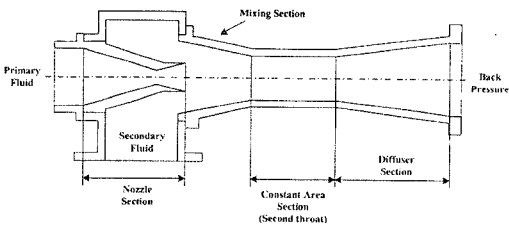


Fig. 1 A schematic of general ejector

이러한 장점을 이용하여 오래전부터 진공건조, 농축, 증류, 탈취, 결정, 배기, 함침, 혼합, 냉각, 이송, V/STOL 항공기의 추력증강, 연소시험, 소음저감 그리고 각종 화학공업 등에서 널리 활용되었고, 최근에는 고출력 화학레이저의 압력회복(pressure recovery system)장치와 고공비행환경 모사장치, 차세대 추진개념인 RBCC (Rocket Based Combined Cycle)엔진 등에 응용되고 있다[1-4].

1.2 초음속 이젝터의 성능 곡선

Figure 2는 초음속 이젝터의 성능 곡선(performance curve)를 보여준다. 성능 곡선은 주유동 압력을 변화시켜 초음속 이젝터를 구동

하였을 때 얻어지는 주유동-부유동 압력의 곡선으로 초음속 이젝터의 성능을 한번에 확인할 수 있다는 장점이 있다. 그림에서 a영역에서 아음속 이젝터로 작동하기 시작한 후 주유동 압력이 더 증가하면 부유동 압력이 b처럼 갑자기 감소하며 수직 충격과가 축소-팽창 디퓨저에 놓이게 된다. 이때의 주유동 압력을 작동 압력(starting pressure)이라 한다. 초음속 이젝터가 작동된 후 주유동 압력을 감소 시켜도 c처럼 초음속 이젝터는 작동을 유지한다. 주유동 압력이 더욱 감소하면 임의의 압력에서 d와 같이 이젝터의 작동이 중단되며 아음속 이젝터의 성능을 보인다. 이때의 주유동 압력을 작동 멈춤 압력(unstarting pressure)이라 한다.

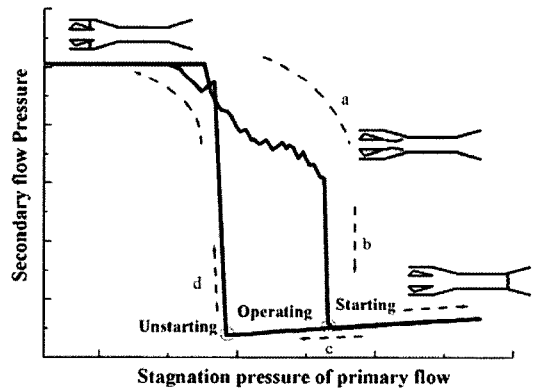


Fig. 2 Performance curve of general ejector

초음속 이젝터를 구동하기 위해서는 초기에 주유동 기체가 작동 압력 보다 높은 압력으로 공급되어야 한다. 그러나 실제 작동 영역에서는 이보다 낮은 압력으로도 작동을 유지할 수 있으나 작동 멈춤 압력보다는 높아야 한다[3].

1.3 연구 목적 및 내용

본 연구에서는 축대칭 환형 초음속 이젝터에 대하여 이젝터 형상 변수 중 부유동 입구 면적을 조절하여 각각의 이젝터 작동압력과 작동 멈춤 압력을 실험으로 측정하여 이젝터 내부의 현상을 예측하였으며, 부유동 입구의 조건을 대기압에 노출시킨 상태와 유입 차단 상태로 변화시

커가며 실험하여 유동의 천이과정에서 발생하는 이젝터 내부유동 특성에 대하여 조사하였다. 이를 통해 이젝터 작동 시 내부 유동장의 변화에 대한 관찰과 이젝터 작동에 있어 히스테리시스 현상에 대한 물리적 고찰이 이루어졌다.

2. 부유동 변화에 따른 이젝터의 유동 특성

2.1 이젝터 실험

실험 목표는 부유동 입구조건 변화에 따른 이젝터 내부유동의 특성을 조사하는 것으로서 부유동의 조건이 대기압 조건 혹은 대기로부터의 유입 차단 상태이거나 각 조건으로의 천이과정인 경우에 이젝터의 작동에 미치는 영향을 파악하고, 결과를 통해 초음속 이젝터 내의 비정상상태에서의 여러 가지 물리적 현상을 이해하는데 있다.

2.1.1 이젝터 형상

본 연구에서 사용한 이젝터의 기본 형상은 Fig. 3과 같다. 3차원 환형 이젝터로, 주유동이 혼합 챔버 벽면을 따라 분사되어 부유동과 혼합되며 혼합 기체는 축소-팽창 디퓨저를 통해 대기중으로 방출된다. 여기서 D는 축소-팽창 디퓨저 이차목의 지름이고, d는 부유동 흡입구의 지름이다. 실험에서 사용한 이젝터의 형상은 Table 1과 같다.

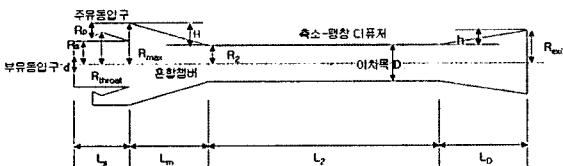


Fig. 3 Axisymmetric supersonic ejector

실험에 사용한 이젝터는 고효율 화학레이저 구동용 이젝터로 제작된 것으로서 설계 요구조건은 부유동 입구에서 50 torr 미만의 압력이다 [5].

Table 1. Geometric Parameter

단위: mm

R_s	56.57	R_{throat}	68.19
R_{max}	68.94	R_2	41.72
R_{exit}	72.34	R_p	12.37
L_m	389.26	L_2	666.0
L_d	350.0	L_s	100.0
H	54.44	h	61.24

2.1.2 실험 구성도

실험은 부피가 11 m³이고 최고 압력이 30 bar인 압축공기 탱크에 부피 1 m³, 최고 압력 25 bar인 작은 압축공기 탱크를 장치하여 압력 조절기를 통해 주유동 압력을 제어하였다. 공압 자동 밸브를 사용하였고 이를 위해 5bar의 서비스 탱크를 사용하였다. 주유동 노즐의 면적비는 15이고 설계 마하수는 약 4.39, 설계유량은 1.35 kg/s이다.

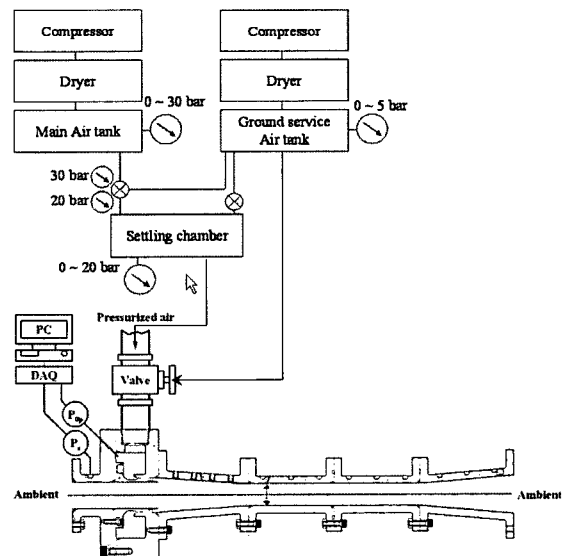


Fig. 4 A Schematic of experimental apparatus

압력측정은 Fig. 5에서와 같이 혼합 챔버에 3개, 디퓨저 이차목에서 6개, 디퓨저 팽창부에서 3개 그리고 주유동, 부유동에서 각각 한 개씩 총 14군데에서 압력을 측정하였다. 측정점 Pm1은 주유동 노즐 출구로부터 50 mm 떨어진 곳

에 위치하고 Pm2, Pm3는 145 mm의 등간격이다. 디퓨저 이차목 내부의 측정위치는 디퓨저 입구로부터 50 mm 떨어진 곳에 위치한 P21로부터 116.5 mm의 등간격으로 위치해 있다. 디퓨저 팽창부는 125 mm의 등간격으로 압력을 측정하였고 마지막 측정점 Pd3는 이젝터 출구로부터 50 mm 떨어진 곳에 위치한다.

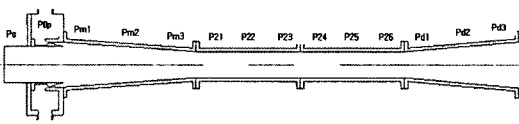


Fig. 5 Location of pressure sensor and its label

압력은 아날로그 압전소자를 이용한 전압센서를 사용하여 측정하였다. 실험 데이터 처리를 위해, 측정된 압력 데이터는 내셔널 인스트루먼트사(National Instruments)의 DAQ(Data acquisition)보드를 통하여 랩뷰(Lab. VIEW 6.0) 프로그램을 이용하여 얻어낼 수 있었다.

22 부유동 면적에 따른 이젝터의 성능

Table 2. Diameter ratio d/D and mass flow rate

직경비 d/D	부유동 유량 (g/s)
0.251	81.910
0.264	89.899
0.276	98.259
0.294	111.497
0.306	120.786
0.318	130.448
0.330	140.482

우선 이젝터에서 부유동 입구의 면적을 바꾸어 가며 얼마의 부유동 유량을 흡입할 수 있으며 어떤 작동현상을 보이는지에 대하여 알아보았다. 흡입구 직경과 축소-팽창 디퓨저 직경의 비, d/D와 부유동 흡입 유량을 위의 Table 2에

표시하였다.

2.2.1 실험 결과

Figure 6은 시간에 따른 이젝터 각 위치의 압력 변화에 대한 선도이다. 직경비 0.251인 경우 주유동이 17기압에 도달하게 되면 부유동 압력이 급격히 50 torr 미만으로 낮아지며 이젝터가 작동하는 상태가 됨을 확인할 수 있다. 이젝터가 일단 작동하면 주유동 압력을 증가시켜도 부유동 압력은 큰 변화가 없다. 또한, 초음속 이젝터로 작동하면 강한 수직 충격파가 디퓨저 이차목 끝단에 형성되며, 실험시 강한 충격파 소음을 들을 수 있다.

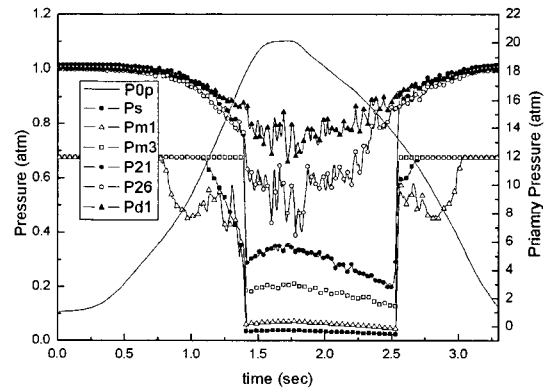


Fig. 6 Wall pressure history (Diameter ratio d/D=0.251)

직경비 0.306인 Fig. 7을 보면 작동 상태에서 부유동 압력이 0.1기압으로 설계 요구조건을 만족하지 못하며 내부의 각 측정위치의 압력도 주유동이 완전 초음속으로 발달해 축소-팽창 디퓨저 입구까지 초음속 유동이 형성되는 직경비 0.251의 경우와 비교하면 보다 높은 상태를 유지하고 있는데, 이런 경우는 주유동이 완전 초음속으로 발달하지 못하여 축소-팽창 디퓨저 입구 부분을 초음속 영역으로 만들지 못하게 된다. 이에 따라 디퓨저 이차목 내부는 아음속 유동이 되는 것으로 예측되며, 이는 실험에서 강한 충격파 소음이 나타나지 않는 것으로 설명이 가능하다.

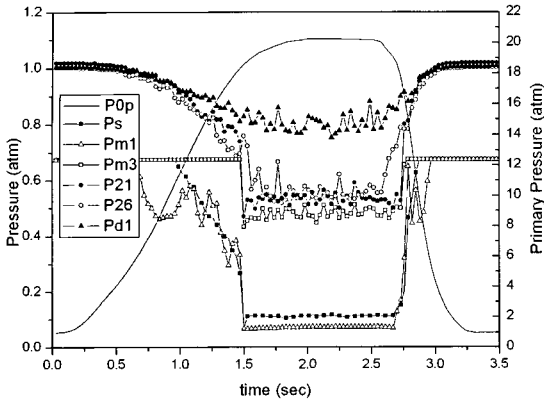


Fig. 7 Wall pressure history (Diameter ratio $d/D=0.306$)

결국 부유동 입구의 지름을 계속 증가시키면 Fig. 8 결과와 같이 Pm1, Ps가 더 증가하며, 이젝터는 초음속 이젝터로 작동하지 못하고 설계 요구조건을 만족 시키지 못하게 된다.

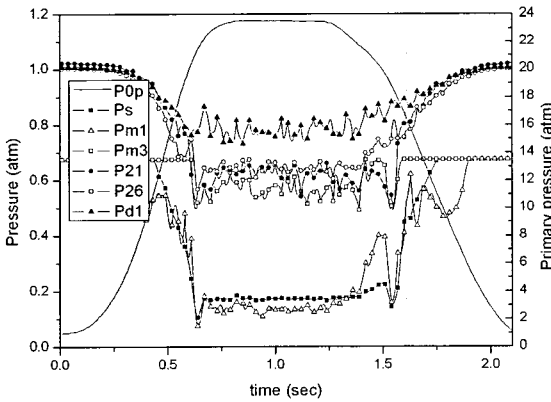


Fig. 8 Wall Pressure history (Diameter ratio $d/D=0.330$)

Figure 9는 주유동과 부유동의 압력으로 표시한 이젝터의 성능곡선이다. 직경비가 증가함에 따라 이젝터의 작동 압력과 멈춤 압력이 같이 증가하는 것을 알 수 있다.

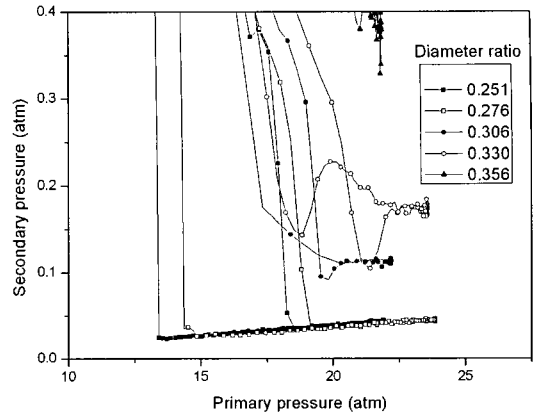


Fig. 9 Ejector performance curve

여기서 작동 압력과 멈춤 압력이 일치하지 않는 이유는 앞서 설명한 바와 같이 디퓨저 이차목을 가진 이젝터의 특징으로서, 초음속 이젝터를 구동하기 위해서는 초기에 주유동 기체가 작동 압력보다 높은 압력으로 공급되어야 하지만 실제 작동 영역에서는 이보다 낮은 압력으로도 작동을 유지하는 히스테리시스 현상 때문이다 [3]. 압력 선도에서 직경비가 0.306 이상이 되게 되면 부유동 압력이 50 torr 미만으로 충분히 떨어지지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한 직경비 0.306 이상에서는 실험중 충격과 소음이 발생하지 않는 것으로 보아 아음속 이젝터로 작동함을 예측할 수 있다. 따라서 실험에 사용한 초음속 이젝터는 Table 2와 비교하면 약 120g/s의 유량이 성능의 한계임을 알 수 있다. 어떤 한계 이상으로 부유동 입구 면적이 늘어나게 되면 초음속 이젝터 작동 상태에서 아음속 이젝터 상태로 작동을 하게 되며 이러한 작동 상태에서 이젝터의 흡입 효율은 초기 설계와 달리 떨어지게 된다.

2.3 부유동 조건 변화에 따른 이젝터의 성능

2.3.1 close-open mode 히스테리시스 현상

다음으로 부유동 조건을 이젝터가 작동하는

상태에서 변화시켜 이젝터 내부의 비정상상태 특성을 살펴보았다. Fig. 10은 직경비 0.264인 경우의 실험결과로서 시간에 대한 각 측정위치에서의 압력을 나타내었다. 초기에 부유동 입구 조건을 대기압으로 준 상태에서 작동을 시킨 후 작동 도중 부유동 입구를 막아 유량 공급을 중지시켰다. 그 결과 주유동과 부유동 압력비인 $P0p/Ps$ 가 증가하는 영향으로 작용하여 혼합 챔버 끝단과 디퓨저 이차목 입구 부분에서 압력이 더 떨어지는 것을 확인할 수 있다[6]. 다시 입구를 대기압에 노출시키게 되면 내부 유동은 초기와 같은 상태로 다시 돌아간다.

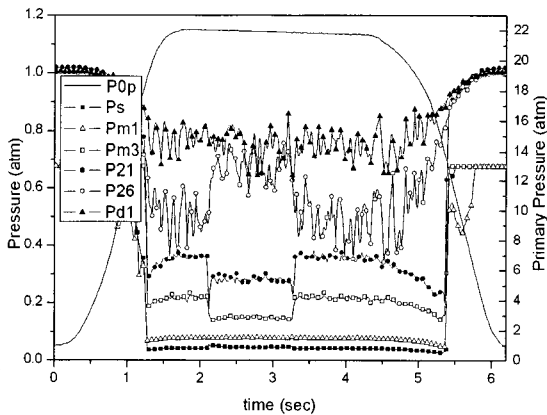


Fig. 10 Wall Pressure history (Diameter ratio $d/D=0.264$)

위의 실험 조건은 대기압 상태에서도 초음속으로 작동하는 부유동 입구 조건이다. 이번에는 앞서 대기압 상태에서 초음속 이젝터로 작동하지 않았던 조건을 실험하였다. 직경비 0.306인 경우 부유동이 대기압 상태에 노출되었을 때 초음속 이젝터로서 작동을 하지 못했다. Fig. 11에 시간에 따른 압력 선도를 나타내었다. 이 결과는 주유동의 압력을 낮춰 부유동 압력이 Fig. 7과 달리 더 높은 상태임을 알 수 있다. 대기압 상태로 우선 실험을 시작한 후 부유동 입구를 막은 결과 이젝터는 초음속 이젝터로서 작동을 하였다. 부유동 입구를 막게 되면 어떠한 직경비에 대하여도 같은 현상이 되므로 이와 관계없

이 이젝터는 무조건 작동한다. 이 상태에서 다시 부유동 입구를 대기압에 노출시켰다.

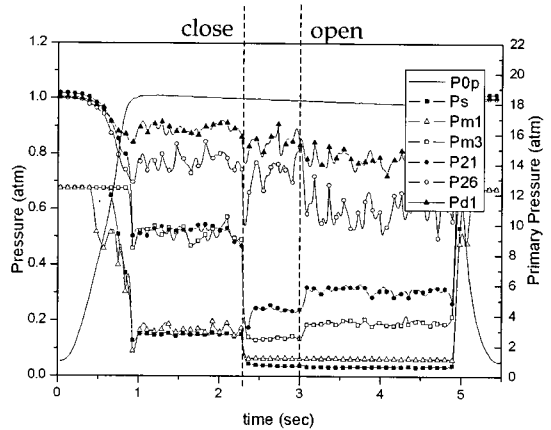


Fig. 11 Wall Pressure history (Diameter ratio $d/D=0.306$)

하지만 이젝터는 계속 초음속 이젝터의 상태를 유지하는 것을 알 수 있다. Fig. 10과 비교하여 혼합 챔버와 디퓨저 이차목 입구의 압력도 같은 수준을 유지하는 것을 알 수 있다. 이러한 부유동 입구의 close-open mode에서의 실험에서 히스테리시스 현상이 일어나는 것은 디퓨저 이차목의 영향으로 보인다. 앞서 밝혔듯이 이젝터가 작동하게 되면 디퓨저 이차목 끝단에 수직 충격파가 형성되며 일정한 유량을 흡입하게 되는데 이때 부유동 입구를 막게 되면 $P0p/Ps$ 가 증가하게 되어 Fig. 10과 같은 결과를 보인다. 대기압 조건에서 작동하지 않는 이젝터의 경우도 부유동 입구를 막게 되면 이와 같은 원리로서 작동하게 되는 것이다. 이때 부유동을 다시 대기압에 노출시키면 반대로 $P0p/Ps$ 가 줄어들게 되어 상대적으로 주유동의 압력을 낮추는 영향으로 작용하는데 일단 작동 상태에서 주유동 압력을 낮춰도 작동하는 축소-팽창 디퓨저 이젝터의 특징처럼 이차목 끝단에 형성된 수직 충격파는 사라지지 않고 있다가 어느 한계 이상으로 압력저하가 발생하게 된 후에야 작동을 멈추게 된다[7]. Fig. 12는 같은 직경비 0.306에서 두 가지 부유동 입구 조건을 비교한 성능곡선 결과가

다. 그림에 표시된 ①번 부분은 부유동 입구가 대기압에 노출된 상태로서, 결과에서 보듯이 설계요구조건인 50 torr 미만으로 내려가지 못하며 실험에서 충격과 소음이 나타나지 않는 아음속 이젝터로 작동하는 영역이다. 하지만 부유동 유량을 차단하였다가 다시 대기압에 노출시키게 되면 ②번과 같이 50 torr 미만의 압력을 유지함을 알 수 있다. 이때 실험에서는 충격과 소음을 동반하게 되는데 이것으로 이젝터는 초음속 이젝터로서 작동함을 알 수 있다.

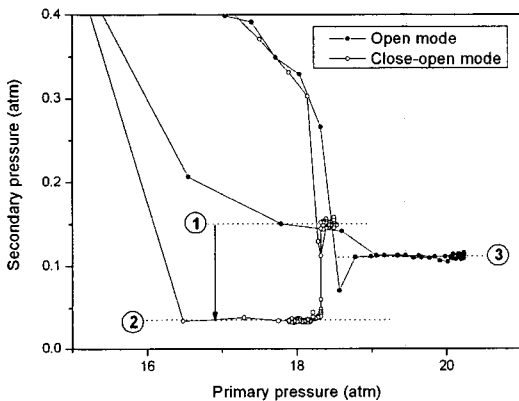


Fig. 12 Ejector performance curve (Diameter ratio $d/D=0.306$)

이러한 close-open mode 히스테리시스 현상을 이용한다면 이젝터를 작동시킬 때 작동 압력을 작동 멈춤 압력보다 크게 높이지 않아도 되며 이젝터의 작동 압력을 낮출 수 있어 여러 응용 분야에 큰 도움을 줄 것으로 예상된다. 그림의 ③번의 실험은 ①, ②에 비해서 더 높은 주유동 압력이지만 부유동은 설계요구조건을 만족시키지 못한다. 하지만 더 낮은 주유동 압력이라도 ②번과 같이 close-open mode 히스테리시스 현상을 이용하면 50 torr 미만으로 작동시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 초음속 이젝터에 대한 비정상 상태 유동에 초점을 맞춰 연구를 수행하였다. 이젝터의 형상은 축소-팽창 디퓨저를 가진 축대칭 환형이며 작동 유체는 압축 공기이다. 이젝터의 실험을 통하여 부유동 조건 변화에 따라 이젝터 각 부위에서 압력을 측정하였다. 실험 결과, 작동시의 유동특성과 히스테리시스 현상을 관찰할 수 있었다. 축소-팽창 디퓨저를 가진 이젝터의 특징인 작동, 작동멈춤의 히스테리시스 현상뿐만 아니라 close-open 모드 히스테리시스도 관찰되었다. 실험에서 관찰된 히스테리시스 현상들은 잘 활용한다면 더 낮은 작동 압력으로도 이젝터를 구동시킬 수 있어 여러 응용 분야에 큰 도움을 줄 수 있을 것이라 예상된다. 앞으로 실험과 비정상상태의 수치해석을 통하여 이젝터의 작동 원리와 히스테리시스 현상에 대해 많은 연구가 수행될 것이며, 여러 부유동 조건 변화에 따른 실험을 통하여 여러 가지 환경조건에서의 이젝터 응용분야에 활용할 수 있도록 연구가 진행되고 있다.

참 고 문 헌

1. 김세훈, 권세진, "화학레이저 구동용 이젝터 시스템 개발(I) - 화학레이저 구동용 초음속 이젝터 설계 변수 연구," 대한기계학회 논문집(B) 제27권 12호, 2003년, pp. 1673-1680
2. Sun, D. and I. W. Eames, "Recent Developments in the Design Theories and Applications of Ejectors - a review," J. the Institute of Energy, 1968, pp. 33-40
3. Kim, S., Jin, J., Kwon, H. and Kwon, S., "Development of rational design procedure of pressure recovery system of HPCL," 15th GCL-HPL, 2004
4. Aoki, S., Lee, J. and Masuya, G., "Experimental Investigation of an Ejector-Jet," AIAA Journal, 2003, pp. 2003-188

5. 김세훈, 진정근, 권세진, “연속발전 고효율 화학레이저 구동용 이젝터 시스템 연구,” 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, 2004년 4월 문집, 2005년 4월
6. 박근홍, 김세훈, 진정근, 권세진, “부유동 조건에 따른 초음속 이젝터 유동특성의 수치적 연구,” 한국항공우주학회 춘계학술발표회 논문집, 2005년 4월
7. B. K. Hodge and Keith Koenig, Compressible Fluid Dynamics, Prentice-Hall International Inc., New Jersey, Part III., 1995