

## 화학레이저 구동용 이젝터 시스템 개발 (II)

- 이차목 형태의 환형 초음속 이젝터 최적 설계 -

김세훈\* · 진정근\*\* · 권세진†

(2004 년 5 월 27 일 접수, 2004 년 7 월 30 일 심사완료)

### Development of an Ejector System for Operation of Chemical Lasers (II)

- Optimal Design of the Second-Throat Type Annular Supersonic Ejector -

Sehoon Kim, Jungkun Jin and Sejin Kwon

**Key Words :** Annual Supersonic Ejector(환형 초음속 이젝터), Second-Throat(이차목), Chemical Laser(화학레이저)

#### Abstract

Determination of geometric design parameters of a second-throat type annual supersonic ejector is described. Tested geometric parameters were primary nozzle area ratio, cross-sectional area of second-throat, L/D ratio of second-throat and primary flow injection angle. Varying these four geometric parameters, we build a test matrix made of 81 test conditions, and experimental apparatus was fabricated to accommodate them. For each test condition, the stagnation pressure of primary flow and the static pressure of the secondary flow were measured simultaneously along with their transition to steady operation and finally to unstarting condition. Comparing the performance curve of every case focused on starting pressure, the unstarting pressure and the minimum secondary pressure, we could derive correlations that the parameters have on the performance of the ejector and presented the optimal design method of the ejector. Additional experiments were carried out to find effects of temperature and mass flow rate of the secondary flow.

기호설명	
A	: 단면적
D	: 지름
L	: 길이
m	: 유량
P	: 압력
T	: 온도
$\alpha$	: 주유동 분사각
$A_p/A_p^*$	: 주유동 노즐 면적비

하첨자	
0	: 정체조건
2	: 이차목
a	: 대기조건
m	: 혼합챔버(mixing chamber)
p	: 주유동
s	: 부유동
min	: 최소값
st	: 작동 조건
un	: 작동멈춤 조건

\* 회원, 한국과학기술원 대학원 항공우주공학전공

\*\* 한국과학기술원 대학원 항공우주공학전공

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

E-mail : trumpet@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3721, FAX : (042)869-3710

#### 1. 서론

이차목 형태의 초음속 이젝터(ejector)를 이용한

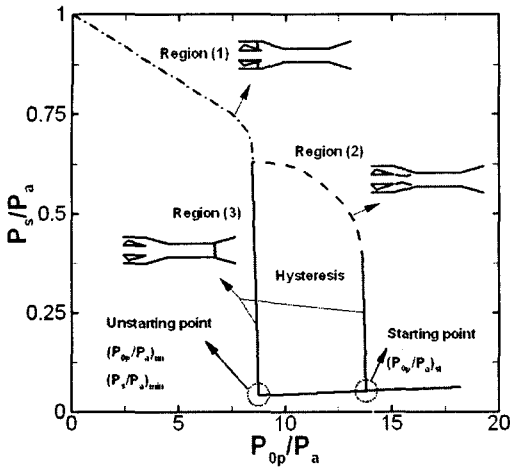


Fig. 1 Performance curve of a typical annular type supersonic ejector with a converging-diverging diffuser

고진공(high altitude) 모사방법은 화학레이저의 압력회복장치나 고고도 모사장치 등에 유용하게 활용된다.<sup>(1-3)</sup> 이젝터 성능은 주유동과 부유동의 유량비, 부유동의 압력 그리고 이젝터의 작동압력 및 작동멈춤압력 등으로 평가될 수 있으나, 효율적인 고진공 모사장치 연구에서는 부유동의 압력과 이젝터의 작동압력 및 작동멈춤압력이 주된 평가의 대상이다. 본 연구에서는 김<sup>(4,5)</sup>등이 수행한 이차목 형태의 환형 이젝터 설계방법을 실험적으로 평가하고 주요 형상변수가 고진공용 이젝터 성능에 미치는 영향을 확인하여 화학레이저용 이젝터의 최적 설계에 대한 연구를 수행하였다.

대부분의 앞선 이젝터 연구에서는 주유동을 중앙에서 분사시키는 중앙 분사방법이었다.<sup>(6)</sup> 중앙 분사방법은 형상이 단순하여 해석이 용이하기 때문이다. 환형 분사방법의 경우 주유동 노즐 출구에서 경사충격파가 발생하고 혼합 챔버 벽면의 초음속 경계층이 형성하므로 그 해석이 더욱 어렵다. 하지만 부유동이 중앙으로 흐르므로 이젝터 전단에 레이징 장치를 결합시키기 용이하다. 이러한 이유로 화학레이저용 이젝터의 대부분은 환형 분사방법을 사용한다.<sup>(1,2)</sup> 또한 보다 낮은 압력으로 이젝터를 작동시키기 위해 이차목 형태의 디퓨저(diffuser)를 이젝터 후류에 장치한다. 부유동 압력은 혼합챔버 내의 혼합압력에 의해 결정되고, 혼합압력은 주유동 노즐 출구의 압력이다. 따라서 부유동 압력을 낮추기 위해 낮은 주유동 압력으로 이젝터를 작동시켜야 하는데, 이차목 형태의 초음속 이젝터의 경우 이차목 형태의 초음속 풍동과

Table 1 Configuration of geometric parameters

Geometric parameters	Tested conditions
$A_p/A_p^*$	8.97, 10.78, 12.95
$A_2$	$(\pi/4)27^2 \text{ mm}^2, (\pi/4)28^2 \text{ mm}^2, (\pi/4)29^2 \text{ mm}^2$
$(L/D)_2$	6, 8, 10
$\alpha$	$4^\circ, 7^\circ, 10^\circ$

같이 작동압력보다 낮은 압력에서도 작동을 유지할 수 있다. 이차목이 없는 경우 이젝터 작동압력과 작동멈춤압력은 같지만,<sup>(7,8)</sup> 이차목이 있는 경우 Fig. 1 과 같이 이젝터가 작동을 한 후 작동압력보다 낮은 주유동 압력에서 이젝터의 작동은 유지되기 때문에 주유동 유량의 소모를 줄일 수 있고, 부유동의 압력을 더욱 낮출 수 있다.<sup>(9,10)</sup>

Fig. 1 은 일반적인 이차목 형태의 초음속 이젝터의 성능곡선의 개념도이다. 가로축은 주유동 압력이고 세로축은 부유동 압력이다. 두 압력은 대기압으로 무차원화 되었다. 먼저 주유동의 압력을 증가시키면 영역 1 과 같이 주유동 노즐목에서 초킹(choking)이 일어나고 충격파가 노즐 출구로 이동하게 된다. 이때 혼합챔버에서는 아음속 혼합이 일어나고 부유동의 압력이 감소한다. 주유동 압력이 일정압력 이상이 되면 충격파가 주유동 노즐 출구로 나오고 혼합챔버에서 부분적으로 초음속 혼합이 일어난다(영역 2). 주유동 압력이 일정압력 이상이 되면 충격파가 이차목 후단으로 빨려 들어가게 되고 혼합챔버 전체에서는 초음속 혼합이 일어난다. 따라서 부유동의 압력이 급격하게 감소하는데, 이때의 주유동 압력을 작동압력이라고 한다(영역 3). 이젝터의 작동이 시작된 후의 부유동의 압력은 주유동 압력에 대하여 선형적으로 움직인다. 이젝터가 작동을 하면 주유동의 압력을 이젝터 작동압력보다 낮추어도 작동 상태를 유지하다가 일정 압력 이하가 되면 작동을 멈추고 부유동의 압력은 급격히 증가한다. 이때의 주유동 압력을 작동멈춤압력이라 하고, 부유동의 압력은 최소가 된다. 이러한 현상을 히스테리시스(hysteresis)라 하며, 일반적으로 이차목 형태의 초음속 장치의 작동은 작동멈춤압력 근처에서 이루어진다.

본 연구에서는 이젝터 형상변수가 이젝터 성능곡선의 히스테리시스에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하였다. 김<sup>(4,5)</sup>등이 수행한 네 가지 형상변수에 대하여 Table 1 과 같이 세 가지의 경우씩 81 가지 형상조건에서 실험을 수행하였고, 비교 성능평가를 통해 최적의 설계조건을 확보하였다. 네 가지 형상변수는 주유동 노즐 면적비( $A_p/A_p^*$ ), 이

차목 면적( $A_2^*$ ), 이차목 길이지름비( $(L/D)_2$ ) 그리고 주유동 분사각( $\alpha$ )이다. 또한 실제 레이저 발진시 연소 부산물의 온도는 1200K 까지 증가하므로 설계변수로서 부유동의 온도에 대한 연구를 수행하였다. 모든 실험에서 다양한 부유동 유량조건에서 실험을 수행하여 부유동 유량에 대한 영향도 알아보았다.

## 2. 실험 방법 및 조건

Fig. 2 는 이차목 형태의 환형 이젝터 실험 장치의 개략도 이다. 주유동으로는 압축공기를 환형 노즐을 통하여 대기로 불어주었다. 압축공기 탱크의 최대 압력은 30bar 이고 부피는 11m<sup>3</sup>이다. 부유동의 전압과 배압(back pressure)은 대기압이다. 부유동의 유량은 MFC(mass flow controller)를 이용하여 조절을 하였고, 최대 유량은 4.1g/s, 정확도는 0.01g/s 이다. 압전소자(piezoelectric)를 이용한 압력 센서로 주유동 전압력과 부유동 압력을 동시에 측정하였다. 주유동 전압력을 측정하기 위해 절대압 1-30bar 범위의 0.08%정확도의 센서를 이용하였고, 부유동 압력 측정은 절대압 0-250mbar 범위의 0.06%정확도의 센서를 사용하였다.

주유동 압력을 이젝터 작동압력까지 서서히 증가시키고 이젝터가 작동하면 다시 주유동 압력을 낮추어 작동을 멈추게 하여 모든 형상 실험조건에서 Fig. 1 과 같은 성능 곡선을 얻어 비교 성능평가

를 하였다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 형상변수의 영향

Fig. 3 은 주유동 노즐 면적비 변화에 대한 이젝터 성능곡선이다. 면적비가 커지면 노즐을 초음속으로 채우기 위한 필요 압력비가 증가하므로 이젝터 작동압력이 증가한다. 이와 반대로 부유동 압력은 면적비가 증가하면 감소한다. 이것은 노즐 면적비가 클수록 노즐 출구의 압력이 감소하여 부유동과의 혼합압력이 낮기 때문이다. 작동멈춤압력은 작동압력과 같이 증가한다.

Fig. 4 는 이차목 단면적의 영향이다. 단면적이 증가하면 이젝터 작동압력은 감소하고 작동멈춤압력은 증가한다. 즉 히스테리시스의 폭이 좁아지는 것이다. 본 연구의 실험 장치는 주유동 노즐 출구 최대 지름이 정해져 있으므로 혼합챔버의 길이는 주유동의 분사각과 이차목 지름에 의해 정해진다. 이차목 지름이 커지면 혼합챔버의 길이가 짧아지므로 이젝터 작동압력이 낮아지는 것이다. 또한 이차목에 걸린 충격파의 강도가 약해지므로 작동멈춤이 빨리 일어난다. 결국, 이차목의 지름이 주유동 노즐 출구 최대 지름과 같아지면 이차목 형상은 사라지고 히스테리시스도 보이지 않게 된다.

Fig. 5 는 이차목 L/D 비가 성능에 미치는 영향이다. L/D 비가 증가하면 이젝터 작동압력이 증가하

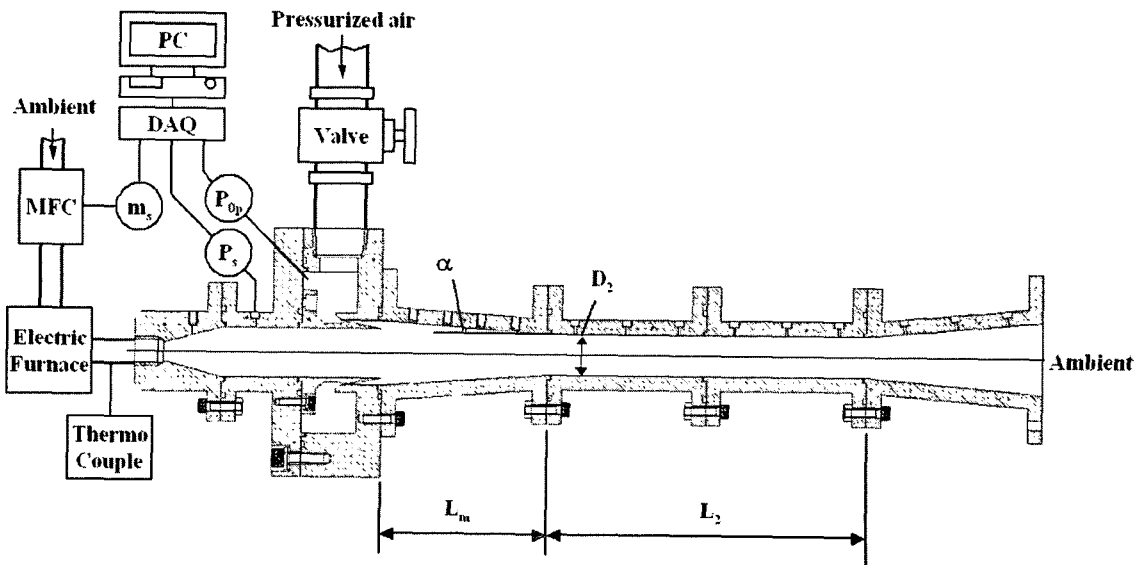


Fig. 2 Schematic of an ejector-diffuser system and cold test installation

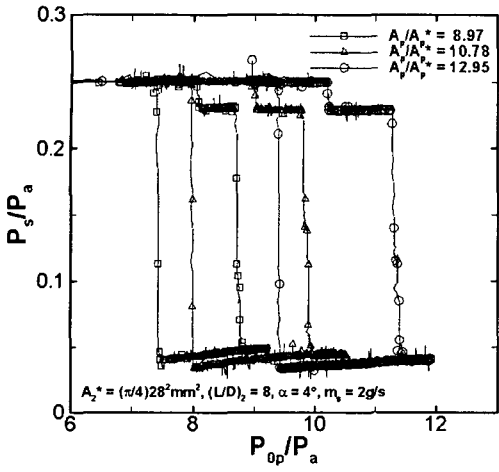


Fig. 3 Performance curves of varying  $A_p/A_p^*$

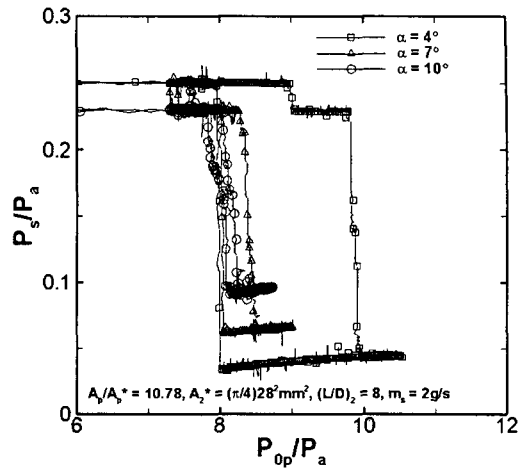


Fig. 6 Performance curves of varying  $\alpha$

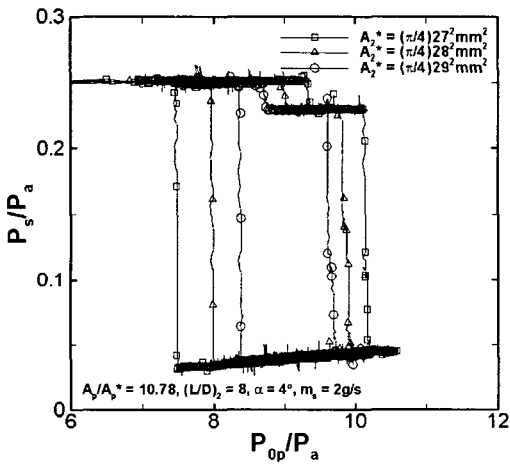


Fig. 4 Performance curves of varying  $A_2^*$

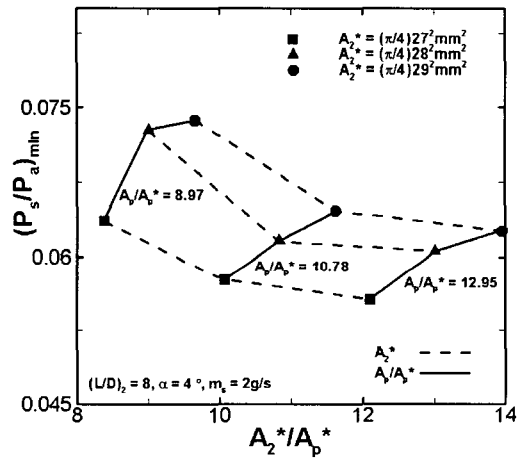


Fig. 7 Effect of  $A_2^*/A_p^*$  on  $(P_s/P_a)_{\min}$

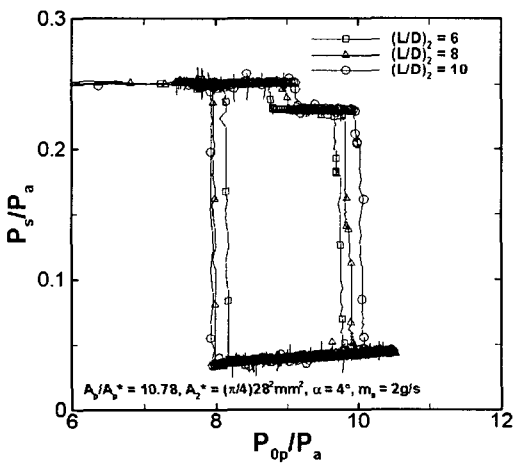


Fig. 5 Performance curves of varying  $(L/D)_2$

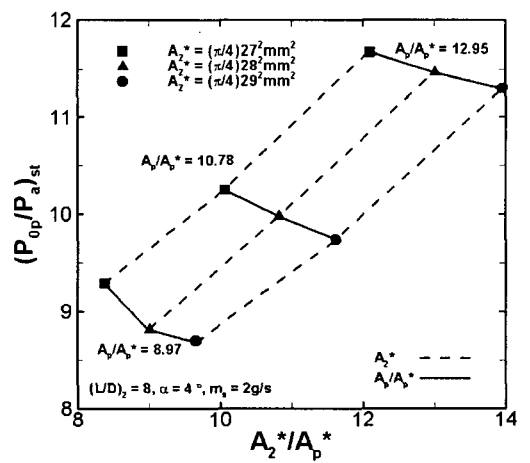


Fig. 8 Effect of  $A_2^*/A_p^*$  on  $(P_{op}/P_a)_{st}$

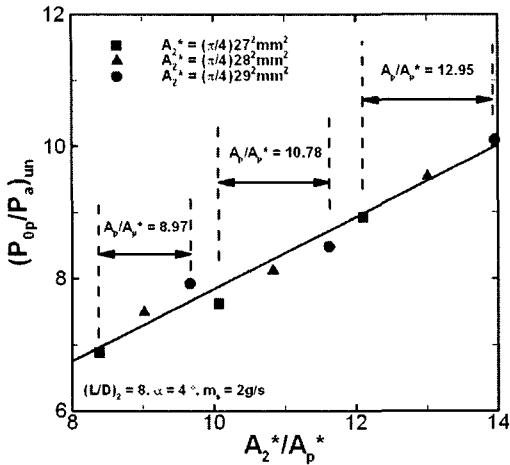


Fig. 9 Effect of  $A_2^*/A_p^*$  on  $(P_{op}/P_a)_{un}$

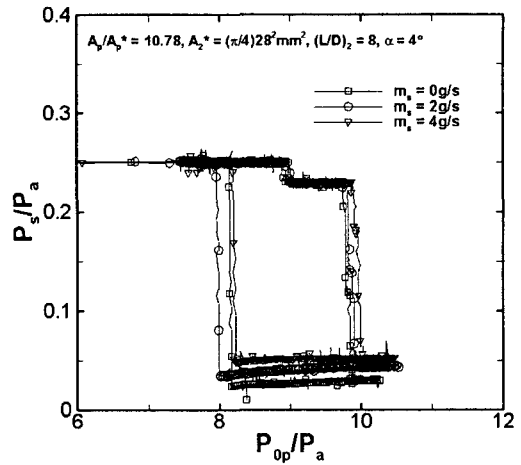


Fig. 10 Performance curves of varying  $m_2$

고 작동멈춤압력이 감소한다. 작동압력이 증가하는 이유는 이차목 벽면의 마찰 때문이다. 또한 작동멈춤압력이 감소하는 이유는 이차목 벽면의 초음속 경계층 효과 때문이다. 이차목의 길이가 길어지면 초음속 경계층도 두꺼워지므로 이차목 후단의 단면적은 줄어드는 효과가 발생하여 충격파의 강도가 커지고 좀더 오랫동안 버틸 수 있다. 하지만 이차목의 L/D 비 영향은 이차목 단면적의 영향에 비해 매우 작다.

Fig. 6 은 주유동의 분사각의 영향이다. 분사각이 커지면 혼합챔버의 길이가 줄어들므로 작동압력은 크게 감소한다. 그러나 주유동 노즐 출구에서 큰 각도로 꺾이게 되고 강한 경사충격파에 의해 압력이 크게 증가하여 부유동의 압력이 증가한다. 하지만 작동멈춤압력은 큰 변화가 없다.

Fig. 7 은 이차목 면적과 주유동 노즐목 면적의 비가 부유동 최소압력에 미치는 영향이다. 주유동 노즐 면적비가 일정할 경우 이차목의 면적이 작을수록 부유동 최소압력은 감소한다. 이것은 혼합챔버의 길이가 길어지기 때문이다. 또한 이차목 면적이 일정할 경우 주유동 노즐 면적비가 증가할수록 부유동 최소압력이 감소하는데, 그 이유는 노즐 출구의 압력이 낮아지기 때문이다.

Fig. 8 은 이차목 면적과 주유동 노즐목 면적의 비가 이젝터 작동압력에 미치는 영향이다. 이젝터 작동압력은 앞에서와 같이 주유동 노즐 면적비가 증가할수록, 이차목 단면적이 감소할수록 증가한다.

Fig. 9 는 이차목 면적과 주유동 노즐목 면적의 비가 이젝터 작동멈춤압력에 미치는 영향이다. 이젝터 작동멈춤압력은 작동압력과 달리 주유동 노

즐 면적비와 이차목 단면적에 독립적으로 영향을 받지 않고 이차목 면적과 주유동 노즐목 면적의 비에만 영향을 받는다. 이것은 작동멈춤압력이 이차목에 걸린 충격파의 강도에 의해 결정되기 때문이고, 충격파의 강도는 이차목 형태의 초음속 풍동에서와 같이 일차목과 이차목의 비에 의해 결정되기 때문이다.

### 3.2 부유동 유량의 영향

Fig. 10 은 부유동 유량의 변화가 이젝터 성능곡선에 미치는 영향이다. 그림에서와 같이 부유동 유량은 이젝터 작동압력과 작동멈춤압력에 큰 영향을 주지 못하지만 부유동 유량이 증가하면 부유동 압력도 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 간단한 질량보전에 의해 이해될 수 있다. 따라서 많은 부유동 유량을 확보함과 동시에 원하는 낮은 부유동 압력을 얻기 위해서는 혼합압력을 낮추어 고진공 환경을 만들어주어야 한다.

### 3.3 부유동 온도의 영향

서론에서 언급한 바와 같이 화학레이저에서의 연소부산물의 온도는 매우 높다. 이러한 고온의 부유동을 뽑아낼 때, 이젝터의 성능변화를 확인하기 위하여 본 연구에서는 로(furnace)를 이용하여 부유동 온도를 높여주었다. Fig. 2 에서와 같이 MFC 와 이젝터 사이에 로를 장치하였고 이젝터 부유동 덕트로 들어가기 직전의 온도를 열전대(thermo-couple)를 이용하여 측정하였다. 본 연구에서는 부유동의 온도를 750K 까지 높일 수 있었다. Fig. 11 은 부유동 온도의 변화에 대한 이젝터 작

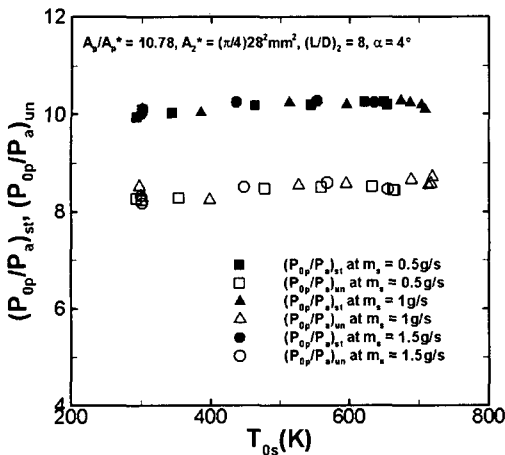


Fig. 11 Effect of  $T_{0s}$  on  $(P_{0p}/P_a)_{st}$  and  $(P_{0p}/P_a)_{un}$

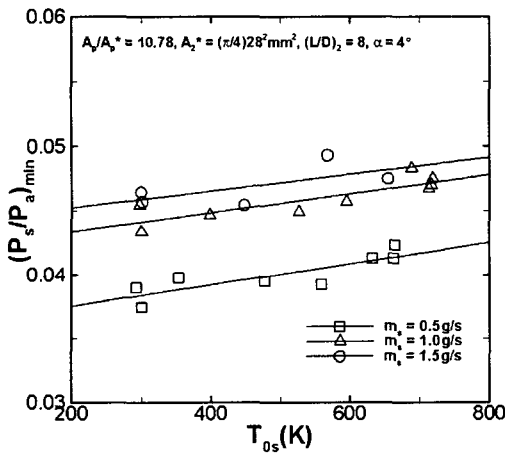


Fig. 12 Effect of  $T_{0s}$  on  $(P_s/P_a)_{min}$

동압력과 작동멈춤압력의 결과이다. 부유동 유량이 0.5g/s, 1g/s 그리고 1.5g/s 인 경우 모두 작동압력과 작동멈춤압력에는 큰 변화가 없었다. Fig. 12는 부유동 온도변화에 대한 부유동 최소압력의 결과이다. 부유동 온도에 대하여 부유동의 최소압력이 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 이상기체방정식을 통하여 이해할 수 있다. 결론적으로 부유동의 유량 및 온도는 이젝터 작동압력 및 작동멈춤압력은 큰 영향을 주지 못하고, 부유동 압력에만 영향을 미친다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 효율적인 화학레이저 구동을 위

한 이차목 형태의 환형 초음속 이젝터 설계변수에 대한 연구가 수행되었다. 먼저 주유동의 주요 형상변수인 노즐 면적비, 이차목 단면적, 이차목 L/D 비 그리고 주유동 분사각이 이젝터 성능에 미치는 효과에 대한 연구를 수행하였다. 부유동 압력을 낮추기 위하여 주유동 노즐 면적비를 증가시키고 이차목 단면적을 줄여야 하지만 이젝터 작동압력도 같이 증가하게 된다. 또한 이차목 L/D 비가 6-10 인 경우 이젝터 성능에 큰 영향을 미치지 않는다. 주유동 분사각을 크게 하면 이젝터 작동압력은 감소하지만 부유동 압력은 크게 증가한다. 형상변수 연구를 통하여 이젝터 작동압력은 주유동 노즐 면적비와 혼합챔버의 길이에 큰 영향을 받는 것을 확인하였고, 작동멈춤압력은 이차목 단면적과 주유동 노즐목 면적의 비에만 영향을 받는 것을 확인하였다. 또한 부유동 압력은 혼합압력에 의해 결정되는데, 혼합압력은 주유동 노즐 출구의 압력 및 혼합의 효율에 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 이론적으로 일정한 단면적을 가진 이차목 내에서는 충격파가 존재할 수 없으나, 벽면의 초음속 경계층 효과로 인해 이차목의 후단에 충격파가 생성되는 것을 확인할 수 있었다.

형상변수 이외에 부유동 유량 및 온도가 이젝터 성능에 미치는 영향을 알아보았다. 부유동 유량이 증가하면 질량보존 관계식에 의해 부유동 압력은 증가하나 이젝터 작동압력 및 작동멈춤압력에는 큰 영향을 주지 못했다. 부유동 온도 또한 이젝터 작동압력과 작동멈춤압력에 큰 영향을 주지 못하지만, 부유동 압력을 상승시켰다. 이것은 단순히 이상기체 관계식을 통해 이해할 수 있었다. 부유동 조건 변화에 대한 실험을 통하여 부유동 조건이 이젝터 작동압력과 작동멈춤압력에 영향을 주지 못하였는데, 이것은 주유동의 유량이 부유동 유량의 30 배 정도로 크기 때문인 것으로 이해된다. 결론적으로 화학레이저용 초음속 이젝터를 설계할 때 가장 중요한 형상변수로는 주유동 노즐 면적비와 이차목 단면적임을 알았고, 설계시 응용되는 부유동의 유량 및 온도조건을 고려해야 한다는 것을 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학기술원 전자광학특화연구센터를 통한 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Boreysho, A. S., Khailov, V. M., Malkov, V. M. and Savin, A. V., 2000, "Pressure Recovery Systems for High Power Gas Flow Chemical Lasers," *13<sup>th</sup> GCL-HPL*.
- (2) Malkov, V. M., Boreysho, A. S., Savin, A. V., Kiselev, I. A. and Orlov, A. E., 2000, "About Choice of Working Parameters of Pressure Recovery Systems for High Power Gas Flow Chemical Lasers," *13<sup>th</sup> GCL-HPL*.
- (3) Goethert, B. H., 1962, "High Altitude and Space Simulation Testing," *ARS Journal*, Vol. 32, No. 12, pp. 872 ~ 882.
- (4) Kim, S. and Kwon, S., 2003, "Development of Ejector System for Chemical Lasers Operating (I)," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 27, No. 12, pp. 1673 ~ 1680.
- (5) Kim, S., Kim, C. and Kwon, S., 2003, "Study of Ejector System for Pressure Recovery of Chemical Lasers," *KSPE Conference Proc.*, pp. 49 ~ 53.
- (6) Sun, Da-wen and Eames, I. W., 1995, "Recent Developments in the Design Theories and Applications of Ejectors - A Review," *Journal of the Institute of Energy*, 68, pp. 65 ~ 79.
- (7) Annamalai, K., Visvanathan, K., Sriramulu, V. and Bhaskaran, K. A., 1998, "Evaluation of the Performance of Supersonic Exhaust Diffuser Using Scaled Down Models," *Experimental Thermal and Science*, 17, pp. 217 ~ 229.
- (8) Roschke, E. J., Massier, P. F. and Geer, H. L., 1962, "Experimental Investigation of Diffusers for Rocket Engine," *JPL Report TR 32-210*.
- (9) German, R. C., Bauer, R. C. and Panesci, J. H., 1966, "Methods for Determining the Performance of Ejector-Diffuser Systems," *J. Spacecraft*, 3, pp. 193 ~ 200.
- (10) Annamalai, K., Satyanarayana, T. N. V., Sriramulu, V. and Bhaskaran, K. A., 2000, "Development of Design Methods for Short Cylindrical Supersonic Exhaust Diffuser," *Experiments in Fluids*, 29, pp. 305 ~ 308.