

< 논문 >

화학레이저 구동용 이젝터 시스템 개발 (III)

- 고출력 화학레이저용 실물 크기의 이젝터 시스템 개발 및 성능 검증 -

김세훈* · 진정근** · 권세진†

(2004년 5월 27일 접수, 2004년 11월 9일 심사완료)

Development of an Ejector System for Operating of Chemical Lasers (III)

- Development and Performance Validation of a Full-Scale Ejector System for High Power Chemical Lasers -

Sehoon Kim, Jungkun Jin and Sejin Kwon

Key Words : High Power Chemical Laser(고출력 화학레이저), Pressure Recovery System(압력 회복 장치), Parallel Ejector System(병렬 이젝터 시스템)

Abstract

From the geometric parameter study, an optimal ejector design procedure of pressure recovery system for chemical lasers was acquired. For given primary flow reservoir conditions, an up-scaled ejector was designed and manufactured. In the performance test, secondary mass flow rate of 100g/s air was entrained satisfying the design secondary pressure, 40 ~ 50torr. Performance validation of a supersonic ejector system along with an investigation of effects of supersonic diffuser was conducted. Placement of the diffuser at the secondary inlet further reduced diffuser upstream pressure to 7torr. Lastly, the duplicate of apparatus (air 500g/s secondary mass flow rate each) was built and connected in parallel to assess proportionality behavior on a system to handle larger mass flow rate. Test and comparison of the parallel unit demonstrated the secondary mass flow rate was proportional to the number of individual units that were brought together maintaining the lasing pressure.

기호설명

A	: 단면적
D	: 지름
L	: 길이
m	: 유량
P	: 압력
α	: 주유동 분사각
γ	: 비열비

하첨자

0	: 정체조건
2	: 이차목
e	: 주유동 노즐출구
p	: 주유동 조건
s	: 부유동 조건

* 회원, 한국과학기술원 대학원 항공우주공학전공

** 한국과학기술원 대학원 항공우주공학전공

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 항공우주공학전공

Email : trumpet@kaist.ac.kr

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

1. 서론

화학레이저는 반응성이 좋은 기체의 자발적인 화학반응에 의해 발진시킬 수 있으므로 외부로부

터 별도의 에너지 공급이 필요 없는 장점이 있다.^(1,2) 또한 높은 출력의 레이저 광을 높은 효율로 얻을 수 있기 때문에 주로 군사적 활용 목적으로 많은 연구가 수행되었다.⁽³⁻⁶⁾ 화학레이저에는 여러 종류가 있지만, 에너지가 높은 레이저 광으로 표적을 직접 파괴하는 고에너지 레이저 무기체계(High Energy Laser Weapon System)에 활용하기 위하여 불화중수소(DF) 레이저, 불화수소(HF) 레이저 그리고 산소-요오드 화학레이저(COIL, Chemical Oxygen-Iodine Laser) 등이 오랫동안 연구되었다. 특히 DF 레이저는 발진 파장이 3.8 μ m 로 대기 투과성이 좋아 지상배치 무기체계 응용을 위해서 주로 연구되었다. 본 연구에서는 지상에서 레이저 발진 조건을 확보하기 위한 구동 장치에 대한 연구를 수행하였다.

고출력 화학레이저를 연속적으로 발진시키기 위해 발진에 사용된 연소부산물을 빠른 속도로 배출시켜야 한다. 또한 레이저 발진영역의 압력 및 온도를 낮출수록 광자의 배출이 활발해져 레이저 발진 효율을 높일 수 있으므로,⁽⁷⁾ 초음속 이젝터(ejector)를 이용한다. 초음속 이젝터를 이용한 화학레이저 발진에서 반응물 가스는 부유동이 되고, 주유동은 압축가스나 가스발생기 등을 이용한다.^(8,9) 본 연구에서는 주유동으로 압축공기를 사용하였다.

부유동의 압력 및 온도는 레이저 발진 효율을 결정하고, 부유동의 유량은 반응물의 양이므로 레이저 출력을 결정한다. Table 1 은 부유동 유량과 레이저 출력과의 관계이다. 일반적으로 미사일 타격용 레이저의 출력은 150-200kW 이므로, 발진 효율이 10%인 경우 필요한 부유동 유량은 1.5kg-2kg 이다. 본 연구에서는 김^(10,11) 등의 선행연구에서 구축한 설계방법을 이용하여 100g/s 의 부유동 유량을 50torr 이하의 부유동 압력장을 유지하며 확보하는 초음속 이젝터를 설계하여 성능평가를 수행하였다.

Table 2 는 HF/DF 레이저와 COIL 의 발진 영역 기체의 물성치이다.^(8,9) HF/DF 레이저의 경우 압력이 15-20torr 이고, COIL 의 경우 10torr 이하이다. 김^(10,11) 등의 연구에 의하면 부유동의 압력을 낮추

기 위해 혼합 압력인 주유동 노즐 출구의 압력을 낮추어야 하고 이를 위하여 주유동 노즐 면적비를 키워야 한다. 그러나 주유동 노즐 면적비가 커지면 이젝터 작동압력이 높아지므로 이젝터 작동을 위한 주유동 공급장치가 커지게 된다. 따라서 대부분의 화학레이저 발진용 이젝터 시스템에는 초음속 디퓨저(diffuser)가 장치된다.^(8,9) Fig. 1 은 화학레이저에 사용되는 초음속 디퓨저의 개념도이다. 그림에서와 같이 디퓨저 내부에 파일론(pylon)을 장치하여 능동적으로 디퓨저의 길이를 짧게 할 수 있다. 본 연구에서도 레이저 발진 영역과 초음속 이젝터의 부유동 사이에 초음속 디퓨저를 장치하고 이젝터 시스템을 구축하여 실제 레이저 발진 압력을 확보하였다. 그러나 본 연구에서는 디퓨저의 크기가 크지 않아 파일론을 장치하지 않았다.

앞에서 언급한 바와 같이 군사적 무기로 응용하기 위한 필요 부유동 유량은 매우 큼으로 하나의 초음속 이젝터로 구현하려면 그 크기가 매우 커진다. 본 연구에서는 병렬 이젝터 시스템을 이용하여 부유동 유량을 증가시키는 방법을 검증하였다. 같은 설계 방법으로 50g/s 의 부유동 유량을 확보하는 이젝터를 두 기 제작하여 병렬로 연결하였다. 성능평가를 위해 100g/s 의 부유동 유량을 확보하는 한 기의 이젝터와 비교 성능 검증을 수행하였다. 이러한 성능평가를 통하여 고출력 화학레이저용 이젝터 시스템의 설계 기술을 확립하였다.

또한 이젝터 내의 벽면 압력변화를 측정하여 주유동 압력 조건에서 충격파의 거동을 확인할 수 있었다. 모든 실험 형상에 대하여 상용코드를 이

Table 2 Characteristics of the chemical laser gas mixture in resonator cavity

Laser	Temp. (K)	γ	P_s (torr)
HF/DF	1400-1900	1.5	15-20
COIL	300-400	1.5	5-7

Table 1 Lasing power according to secondary mass flow rate and lasing efficiency

Secondary mass flow rate	Lasing efficiency		
	5%	10%	15%
50g/s	2.5kW	5kW	7.5kW
100g/s	5kW	10kW	15kW

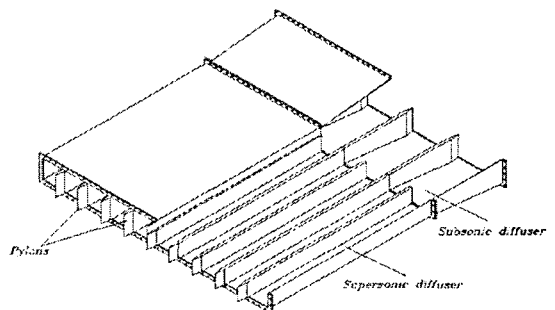


Fig. 1 Schematic of a supersonic diffuser

용한 계산을 수행하여 비교해봄으로써 크기가 확장된 이젝터 설계 방법을 검증하였다

2. 100g/s 부유동 이젝터

2.1 설계 및 제작

본 연구에서는 주유동을 축대칭 환형 초음속 노즐을 이용하여 분사해주는 방식을 택하였고, 이차목 형태의 디퓨저를 통하여 이젝터 작동 후 낮은 주유동 전압력조건에서 안정된 작동을 할 수 있도록 설계하였다. 주된 설계방법은 김^(10,11)등이 사용한 설계방법을 이용하였다. 설계요구조건으로는 100g/s 의 부유동 유량과 50torr 미만의 압력이다. 부유동 압력을 50torr 로 정한 이유는 초음속 디퓨저를 장치하지 않았기 때문에 5-6 배의 압력 회복을 고려한 설계요구조건이다. 설계된 이젝터 제원은 Table 3 과 같고, 제작되어진 이젝터 장치는 Fig. 2 와 같다. 성능평가를 위하여 압전소자(piezoelectric)를 이용한 압력센서를 이용하여 이젝터 각 위치에서의 압력을 측정하였고, 부유동 유량은 대기압과의 압력 차와 오리피스(orifice)의 면적을 통하여 조절하였다. 주유동으로 사용된 고압공기탱크의 최대압력은 30bar 이고 부피는 11m³ 이다. 제작 직후 1차 시도에서 이젝터는 작동하지 않았다. 그 이유는 내부 벽의 큰 마찰력으로 인해 주유동이 이차목을 통과하지 못했기 때문이다. 표면을 매끄럽게 코팅한 후 이젝터는 작동을 하였다.

2.2 성능평가

성능평가는 압력 측정으로 이루어졌다. 부유동을 막은 상태에서 주유동 파이프 라인(pipe line)의 밸브를 서서히 열어 주유동의 전압력을 증가시키면 일정 압력에서 이젝터가 작동하게 된다. 이때 부유동의 압력은 급격히 감소하고 이때의 주유동 압력을 작동압력이라 한다. 이젝터가 작동하면 부유동을 열어주고 실제 작동 상태가 된다. 다시 주유동 유량을 줄이면 주유동 전압력이 감소하는데, 충격파가 이차목 후단에 위치하여 작동압력 보다 낮은 압력에서도 작동을 유지하게 된다. 주유동 전압력이 더욱 감소하여 일정 압력이 되면 이젝터

작동은 멈추고 부유동 압력은 급격히 증가하게 된다. 이때의 주유동 전압력을 작동멈춤압력이라고 하고 이때 부유동 압력은 최소압력이 된다. 일단적으로 최대한 낮은 부유동 압력을 얻기 위해 이젝터는 작동멈춤압력 근처에서 작동된다.

본 연구에서 제작된 크기 확장된 이젝터의 성능 곡선은 Fig. 3 과 같다. Fig. 3 은 부유동 유량이 108g/s 일 때이다. 가로축은 주유동 압력이고, 세로축은 부유동 압력이다. 그림에서와 같이 주유동 압력이 작동압력 이상이 되면 부유동 압력이 50torr 미만으로 떨어지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 2 와 같이 이젝터의 벽면에 길이 방향으로 다수의 압력센서를 장치하여 주유동 전압력이 15.9bar 와 14.2bar 일 때 이젝터 벽면의 내부 압력 분포를 측정하였다. 그 결과는 Fig. 4 와 같다. 그림에서와 같이 주유동 전압력이 높을 경우 충격파는 이차목 후단에 걸려있지만, 압력이 감소하면

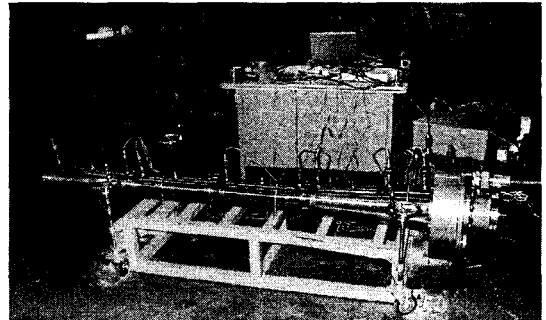


Fig. 2 100g/s single ejector

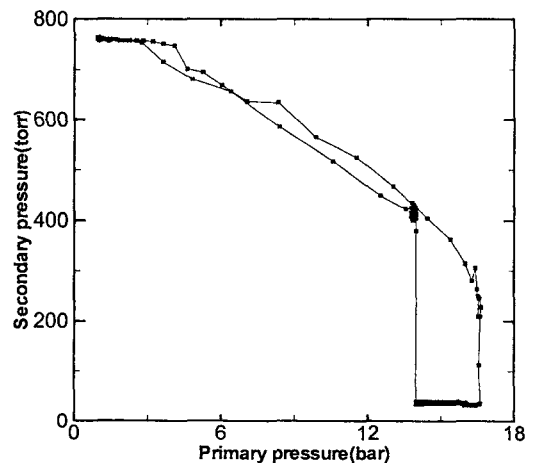


Fig. 3 Ejector performance contour

Table 3 Specification of 100g/s ejector

Geometric parameters	A_{pc} / A_p^*	α	A_2	$(L/D)_2$
Specification	15	4°	160%	8

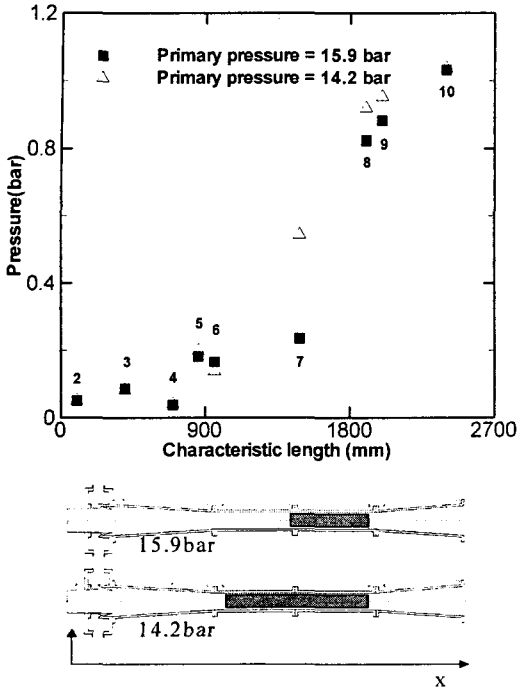


Fig. 4 Shock location

충격파의 위치는 이차목 전체에 걸쳐서 위치하는 것을 볼 수 있다. 실제로 일정한 단면적의 덕트(duct)에는 충격파가 존재할 수 없으나 이차목 벽면에 초음속 경계층이 형성되므로 이차목 후류에서의 단면적이 가장 작은 효과가 발생하게 된다.

본 연구에서는 상용코드인 FLUENT 를 이용하여 이젝터 내부의 유동장을 계산하였다. 입구 조건으로 주유동 전압을 16bar 그리고 부유동 전압을 대기압 조건으로 주었고, 출구조건 또한 대기압 조건으로 주었다. Fig. 5 는 이젝터 내부의 압력장 계산 결과이다. 계산에서 실험과 같이 이차목 후단에 급격한 압력상승이 확인되었다. 또한 이차목 전단에 경사충격파가 형성하여 이차목 후단까지 이어져있는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 6 은 이젝터 내부 벽면의 압력분포를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 실험결과와 계산결과가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

3. 실제 레이저 발진 조건 확보

3.1 설계 및 제작

실제 레이저 발진 조건을 확보하기 위해 50g/s

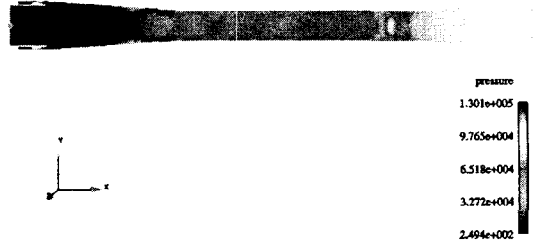


Fig. 5 Pressure contour of ejector

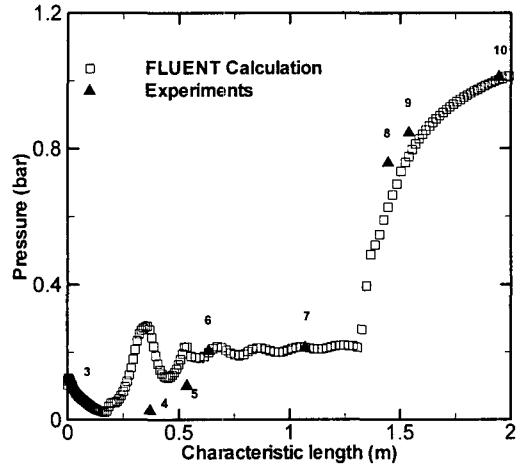


Fig. 6 Pressure distribution along the inner wall of the ejector

의 유량을 확보할 수 있는 초음속 디퓨저를 설계하여 이젝터 부유동 덕트 전단에 장치함으로써 실제 화학레이저의 압력회복장치와 동일한 시스템을 구축하였다. 실제 화학레이저의 초음속 디퓨저 전단에는 불소와 수소를 초음속으로 혼합 시키기 위한 초음속 노즐이 수십 개 배열되지만 본 연구에서는 하나의 노즐로써 이를 모사하였다. 노즐 목면적은 2mm(높이) x 80mm(폭)이고, 확장비는 10이다. 따라서 초음속 디퓨저의 높이는 20mm 이다. 초음속 디퓨저의 크기가 작아 파일런은 장치하지 않았다. 장치된 초음속 디퓨저는 Fig. 7 과 같다. 그림에서와 같이 압력 측정을 위하여 압력센서를 장치하였다.

3.2 성능평가

성능평가는 100g/s 이젝터 성능평가와 동일한 방법으로 하였고 디퓨저 내부 벽면의 압력분포를 측정하였다. 그 결과는 Fig. 8 과 같다. 그림에서와 같이 초음속 디퓨저 입구 측, 레이저 발진 영역에서 10torr 미만의 압력을 확보하였다. 디퓨저 내의

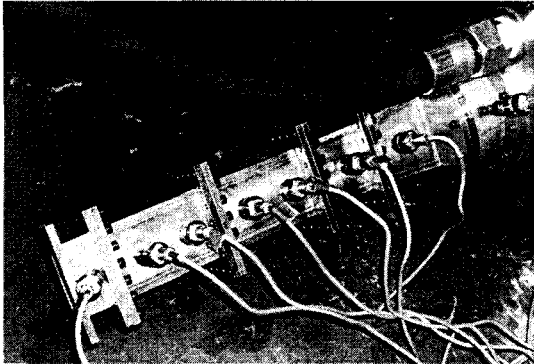


Fig. 7 Assembled supersonic diffuser

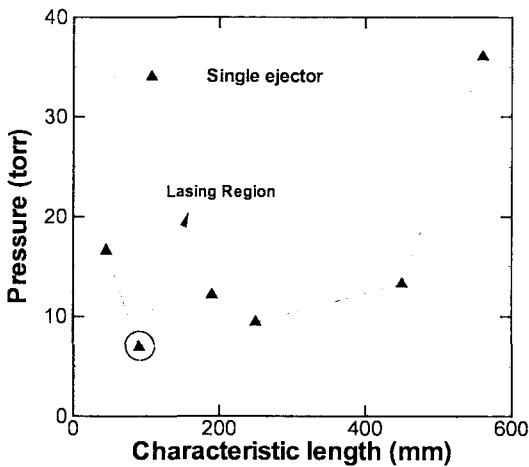


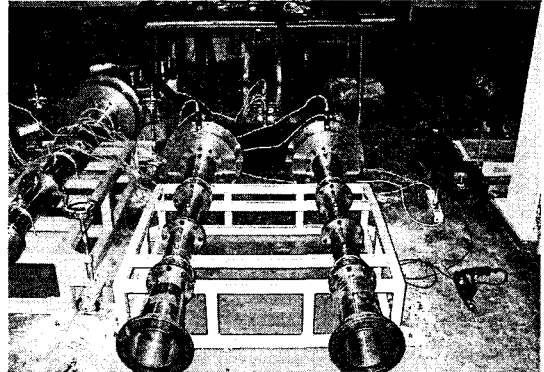
Fig. 8 Pressure distribution along the inner wall of the diffuser with single ejector

압력은 이젝터 주유동의 압력 변화에 큰 영향을 받지 않는데 이것은 디퓨저 입구 조건이 일정하고 출구 조건의 변화가 작기 때문이다. 본 연구를 통하여 실제 레이저 발진 조건을 확인하였고 설계 방법을 확보하였다.

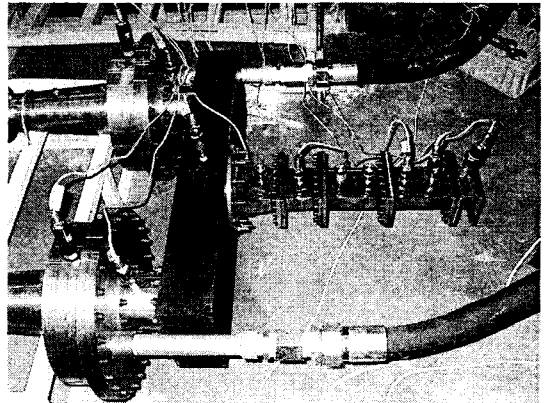
4. 병렬 이젝터 시스템

4.1 설계 및 제작

서론에서 언급한 바와 같이 레이저의 출력을 높이기 위해 부유동 유량을 증가시켜야 한다. 따라



(a) Front



(b) Back

Fig. 9 Parallel ejector system

서 필연적으로 부유동 유량을 증가시키기 위해 이젝터의 크기는 커진다. 하지만 이동성 및 은폐의 필요성이 높은 군사적 응용을 위해서는 크기의 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해 Fig. 9(a)와 같이 병렬 이젝터 시스템을 구축하여 이러한 문제점을 보완하고자 하였다. 병렬 이젝터 시스템은 부유동 압력은 일정하게 하고 유량만 증가시킬 수 있으므로, 작은 크기의 이젝터를 다수 병렬로 연결한다면 이러한 문제점을 해결할 수 있다. 또한 레이저 발진 시 광의 경로를 길게 하는 것이 유리하므로 이것 또한 병렬 이젝터 시스템의 장점이 된다. 성능평가를 위해 Fig. 9(b)와 같이 50g/s 부유동 이젝터 두 기를 병렬화하여 하나의 부유동 챔버(chamber)에 연결하였다. 그리고 초음속 디퓨저를 부유동 챔버에 장치하여 시스템을 구축하였다.

4.2 성능평가

병렬 이젝터 시스템의 성능평가를 하기에 앞서

초음속 디퓨저 내부 유동장을 계산하였다. 이젝터와 동일한 방법으로 상용코드인 FLUENT 를 사용하였다. 입구조건은 대기압으로 주었고, 출구조건으로는 이젝터 부유동 압력을 주었다. 그 결과는 Fig. 10 과 같다. 그림에서와 같이 디퓨저 후단으로 갈수록 압력이 회복되는 것을 알 수 있다.

50g/s 부유동 이젝터 두 기의 병렬 이젝터의 성능평가를 위해 앞선 100g/s 부유동 이젝터 한 기와 비교평가를 수행하였다. 두 경우 모두 100g/s 의 부유동 유량을 확보하는 시스템이고, 여기에 같은 초음속 디퓨저를 장치하여 디퓨저 벽면 압력 분포를 측정하였다. 실험 결과는 Fig. 11 과 같다. 또한 Fig. 11 에서 계산결과를 같이 비교하였다. 두 실험값과 계산결과가 잘 일치하는 것을 볼 수 있고, 레이저 발진 영역에서 10torr 미만의 압력이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이 결과를 통하여 부유동 유량을 증가시키기 위해 병렬 이젝터 시스템을 이용한 방법이 효과적임을 확인할 수 있었다.

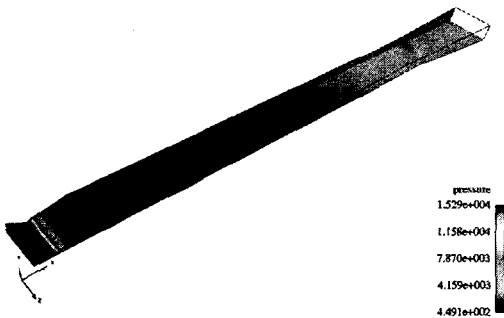


Fig. 10 Pressure contour of diffuser

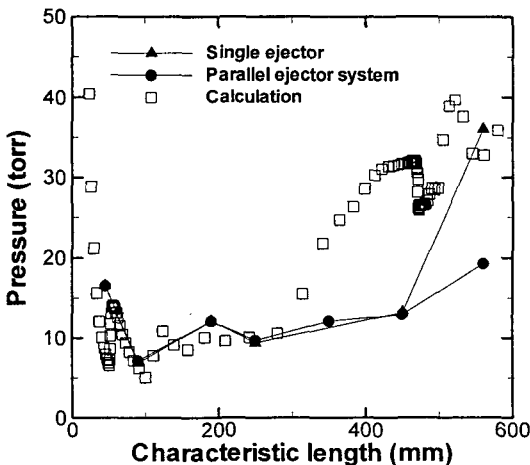


Fig. 11 Pressure distribution along the inner wall of the diffuser with parallel ejector system

5. 결론

본 연구에서는 연속으로 발진하는 고출력 화학레이저의 압력회복을 위한 초음속 이젝터 시스템에 대한 연구를 수행하였다. 작은 크기에서 얻은 형상변수 효과를 이용하여 큰 크기인 100g/s 부유동 유량을 확보하는 이젝터를 설계 제작하여 성능평가에 성공하였고, 이젝터 길이 방향으로 벽면 압력을 측정하여 이젝터 내부의 충격과 거동을 확인할 수 있었다. 실제 화학레이저 발진 압력 조건을 얻기 위해 이젝터 부유동 덕트 전단에 초음속 디퓨저를 장치하여, 발진 영역인 초음속 디퓨저 입구 위치에서 10torr 미만의 압력을 확보하는데 성공하였다. 레이저의 출력을 높이기 위해 부유동 유량을 증가시키는 방법으로 병렬 이젝터 방법을 이용하였다. 50g/s 부유동 유량을 확보하는 이젝터 두 기를 병렬로 연결하여, 100g/s 부유동 유량을 얻는 한 기의 이젝터와 비교 성능평가를 수행하였다. 그 결과 부유동의 유량은 병렬 이젝터의 수가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 것을 확인하였고, 이러한 방법을 이용하면 고출력 화학레이저용 이젝터 시스템의 크기를 줄일 수 있을 것으로 예상된다. 실험과 함께 상용코드를 이용한 계산을 함께 수행하여 이젝터 내부 유동의 거동을 확인하였고, 이젝터 및 디퓨저 설계기술을 검증할 수 있었다. 현재 과산화수소 촉매반응을 이용한 가스발생기를 연구 중이며 시스템화를 통하여 보다 작은 크기의 화학 레이저 구동장치를 구축할 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원 전자광학특화연구센터를 통한 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Gross, R. W. F. and Bott, J. F., 1976, *Handbook of Chemical Lasers*, John Wiley & Sons, New York, USA, Chapter 1.
- (2) Warren, W. R. Jr., 1975, "Chemical Lasers," *Astronautics and Aeronautics*, April, pp. 36 ~ 49.
- (3) Waldo, R. W., 1993, "Advanced cw Hydrogen Fluoride Chemical Laser Performance," *AIAA 24th Plasmadynamics & Lasers Conference*, Orlando, USA, Paper 93-3184.
- (4) Ackerman, R., Callahan, D., Cordi, A., Lurie, H. and Thomson, M., 1994, "Alpha High Power Chemical

- Laser Program," *Gas Flow and Chemical Lasers*, W. L. Gohn and H. Hugerl, Ed., Proc. SPIE, Vol. 2502, pp. 358 ~ 364.
- (5) Truesdell, K. A., Helms, C. A. and Hager, G. D., 1994, "A History of COIL Development in the USA," *Gas Flow and Chemical Lasers*, W. L. Gohn and H. Hugerl, Ed., Proc. SPIE, Vol. 2502, pp. 217 ~ 237.
- (6) Wachs, J., 2000, "Tactical High Energy Laser Status," *AIAA* 2000-2496.
- (7) Javan, A., Bennett, W. R. Jr. and Herriott, D. R., 1961, "Propulsion Inversion and Continuous Optical Master Oscillation in a Gas Discharge Containing He-Ne Mixture," *Physical Review Letters*, Vol. 6, No. 3, pp. 106 ~ 110.
- (8) Boreysho, A. S., Khailov, V. M., Malkov, V. M. and Savin, A. V., 2000, "Pressure Recovery Systems for High Power Gas Flow Chemical Lasers," *13th GCL-HPL*.
- (9) 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," *13th GCL-HPL*.
- (10) 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.
- (11) Kim, S., Kim, C. and Kwon, S., 2003, "Study of Ejector System for Pressure Recovery of Chemical Lasers," *KSPE Conference Proc.* pp. 49 ~ 53.