연속발진 고출력 화학레이저 구동용 이젝터 시스템 연구

김세훈† · 진정근* · 권세진**

Study of Ejector System for cw High Power Chemical Lasers Operating

Sehoon Kim, Jungkun Jin and Sejin Kwon

Key Words : Chemical Lasers(화학레이저), High Power(고출력), Ejector(이젝터)

Abstract

An in-house supersonic ejector was designed to ensure low pressure and high speed scavenging of resonating cavity of chemical lasers. For given primary flow condition, 100g/s secondary mass flow rate was observed at the design pressure. Performance validation of a supersonic ejector system along with an investigation of effects of supersonic diffuser was conducted. Placement of diffuser at the secondary inlet further reduced diffuser upstream pressure to 1/4-1/5 relieving the local to the primary supply unit. In order to increase the secondary flow, we put two ejectors capable of removing 50g/s each of secondary flows together to deal with higher mass flow. Test of the parallel unit demonstrated the secondary flow rate was proportional to the numbers of individual units that were brought together. Additionally, flow calculations with a commercial code were carried out in every case of experiment and compared with results.

기호설명

A_p/A_p^* : 주유동 노즐 면적비
α : 주유동 분사각
$\dot{m}_p$: 주유동 유량
P_p : 주유동 압력
P_{0p} : 주유동 정체압
M_p : 주유동 마하수
$\dot{m}_s$: 부유동 유량
P_s : 부유동 압력
P_{0s} : 부유동 정체압
M_s : 부유동 마하수
D_2 : 이차목 직경
A_2 : 이차목 단면적
$(L/D)_2$: 이차목 가로세로비

하첨자

p : 주유동
s : 부유동
2 : 이차목
0 : 정체조건

† 회원, 한국과학기술원(KAIST) 항공우주공학과
E-mail : sse@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3761 FAX : (042)869-3710
* 회원, 한국과학기술원(KAIST) 항공우주공학과
** 회원, 한국과학기술원(KAIST) 항공우주공학과

1. 서 론

1.1 고출력 화학레이저

화학 레이저는 반응성이 좋은 기체의 자발적인 화학반응에 의해 발진시킬 수 있으므로 외부로부터 별도의 에너지 공급이 필요 없는 장점이 있다[1-2]. 또한 높은 출력 및 에너지의 레이저광을 높은 효율로 얻을 수 있기 때문에 주로 군사적 활용 목적으로 많은 연구가 수행되었다[3-5]. 화학 레이저에는 여러 종류가 있지만, 에너지가 높은 레이저광으로 표적을 직접 파괴하는 고에너지 레이저 무기체계(High Energy Laser Weapon System)에 활용하기 위하여 불화중수소(DF) 레이저, 불화수소(HF) 레이저, 산소-요오드 화학 레이저(COIL,

Chemical Oxygen-Iodine Laser) 등이 오랫동안 연구되었다. 특히 DF 레이저는 발진 파장이 3.8μm 로 대기 투과성이 좋아 지상배치 무기체계 응용을 위해서 주로 연구되었다. 본 연구에서는 지상에서 레이저 발진 조건을 확보하기위한 구동 장치에 대한 대한 연구를 수행하였다.

1.2 이젝터 시스템

고출력 화학 레이저를 연속적으로 발진시키기 위해 발진에 사용된 연소부산물 가스를 빠른 속도록 배출시켜야 한다. 또한 레이저 발진영역의 압력을 낮출수록 광자의 배출이 활발해져 레이저 발진 효율을 높일 수 있다[6]. 이러한 발진 환경 조건을 만족시키기 위한 방법으로 초음속 이젝터 연구가 수행되고 있다[7-8]. 화학 레이저 구동용 초음속 이젝터의 설계요구조건으로는 부유동 압력과 부유동 유량이 있는데, 낮은 부유동 압력은 발진 효율을 결정하고 큰 부유동 유량은 발진 출력을 결정한다. 초음속 이젝터 시스템을 이용한 화학 레이저 발진과정을 살펴보면 반응물이 초음속 노즐을 통과하여 발진영역에서 화학 반응이 일어나고 발진이 이루어진 후 빠른 속도로 초음속 디퓨저와 초음속 이젝터를 통하여 대기중으로 배출된다. 초음속 디퓨저는 이젝터로 들어가기 전 일정량의 압력을 회복시켜 이젝터의 부하를 줄이는 역할을 한다. 레이저 발진영역 즉, 초음속 디퓨저 입구의 반응물의 물성치는 표 1 과 같다[9]. 표 1 에서와 같이 효율적인 발진을 위한 발진영역에서의 압력은 20torr 미만이다. HF/DF 레이저의 경우 부유동 유량과 레이저 출력의 관계는 표 2 와 같다. 많은 부유동 유량을 확보하면서 20torr 미만의 낮은 압력장을 얻기 위해 이젝터 시스템의 크기가 커진다. 화학 레이저를 군사적 활동 목적인 무기체계에 응용하기위해서는 간결하고 작은 크기의 시스템이 필수적이고 화학 레이저 시스템에서 이젝터 시스템의 크기는 매우 큰 비중을 차지하고 있으므로 최적의 이젝터 시스템설계가 필요하다. 본 연구에서는 고출력 화학 레이저를 구동시키기 위한 이젝터 시스템 연구를 수행하였다. 먼저 표 2 에서와 같이 레이징 효율 10%의 10kW 급 화학 레이저용 이젝터 시스템인 100g/s 의 부유동 유량을 확보하는 이젝터 시스템 연구를 수행하였고, 같은 이젝터에 50g/s 초음속 디퓨저를 장치하여 실제 레이저 발진 압력인 20torr 미만의 압력장을 확보하였다. 또한 50g/s 부유동 유량용 이젝터 두기를 병렬 시스템으로 구축하여 100g/s 이젝터 시스템과 비교 성능평가를 수행하였다. 이러한 성능평가를 통하여 다양한 이젝터 설계 기술을 확립하였고 이젝터 내의 압력변화를 통하여 충격파의 거동을 확인할 수 있었다. 또한 상용코드를 이용하여 계산을 수행하여 실험과 비교를 통해 이젝터 설계방법을 검증하였다.

Table 1 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 2 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

2. 100g/s 부유동 이젝터

2.1 설계 및 제작

본 연구에서는 유동을 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[7-8]등이 사용한 설계방법을 이용하였다. 설계요구조건으로는 100g/s 의 부유동 유량과 50torr 미만의 압력이다. 본 연구에서는 초음속 디퓨저를 장치하지 않았기 때문에 3-5 배의 압력회복을 고려한 설계요구조건이다. 설계된 이젝터 제원은 표 3 과 같고 제작된 제작된 이젝터는 그림 1 과 같다. 성능평가를 위하여 압전소자를 이용한 전압센서를 이용하여 이젝터 각 위치에서의 압력을 측정하였고 부유동 유량은 대기압과의 압력차와 오리피스의 면적을 통하여 조절하였다. 주유동으로 사용된 고압공기탱크의 최대압력은 30bar 이고 부피는 $11m^3$ 이다.

2.2 성능평가

성능평가를 위해 볼밸브를 이용하여 주유동의 압력을 서서히 증가시키면 일정압력(작동압력)에서 이젝터가 작동하고 다시 밸브를 잠그면 작동압력 보다 낮은 압력에서 작동하다가 일정압력이 되면 작동이 멈추게 된다. 그림 2 은 이젝터 성능곡

Table 3 Specification of 100g/s ejector

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

Fig. 1 100g/s single ejector

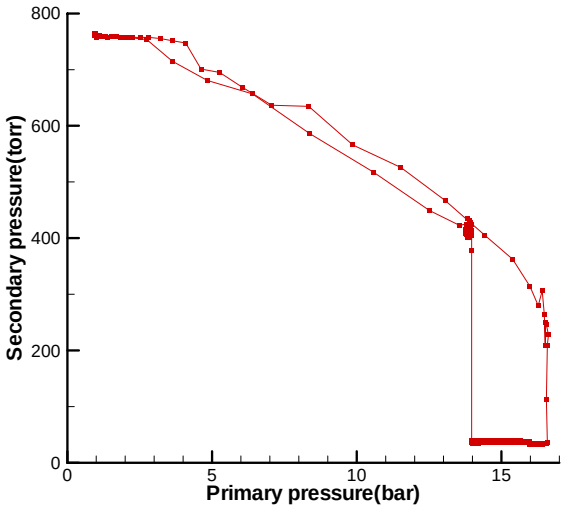

Fig. 2 Ejector performance contour

선인 주유동에 대한 부유동의 압력이다. 그림에서와 같이 주유동 압력이 작동압력 이상이 되면 부유동 압력이 50torr 미만으로 떨어지는 것을 볼 수 있다. 그림 3 은 상용코드를 이용하여 이젝터 내부 유동을 계산한 결과이고, 그림 4 는 이젝터 내부 벽면의 압력분포를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 실험결과와 계산결과가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 5 는 두 가지 주유동 압력조건에서 이젝터 내부 벽면의 압력분포 결과이다. 그림에서 색칠된 부분이 강한 충격파의 위치이다. 그림에서와 같이 이젝터 작동초기의 강한 충격파가 이차목 끝에 걸쳐있다. 주유동 압력이 감소하면서 이차목 전체에 걸쳐 위치하는 것을 알 수 있다.

3. 실제 레이저 발진 조건 확보

3.1 설계 및 제작

실제 레이저 발진 조건을 확보하기위해 초음속 디퓨저를 설계 제작하였다. 50g/s 의 유량을 확보할

Fig. 3 Pressure contour of ejector

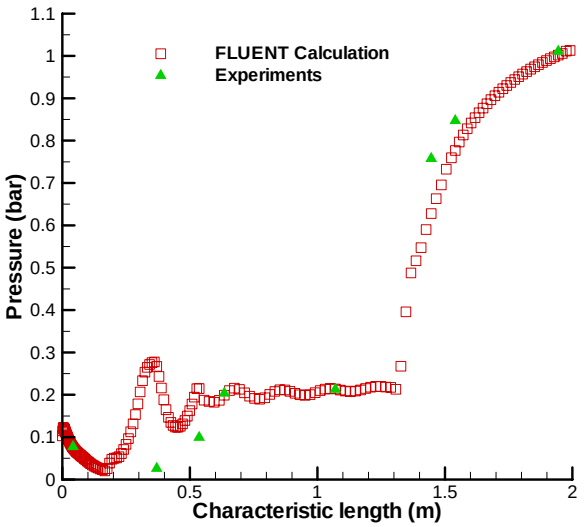

Fig. 4 Pressure distribution along the inner wall of the ejector

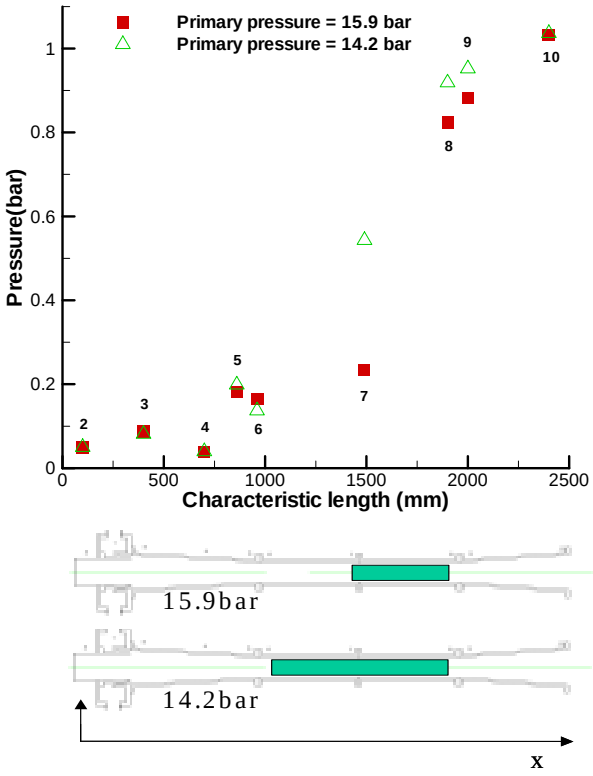

Fig. 5 Strong shock location

수 있도록 설계를 하였고, 100g/s 부유동 이젝터에 설치하여 성능평가를 수행하였다. 초음속 디퓨저 앞단에 초음속 노즐을 장치하여 실제 화학 레이저 시스템과 동일한 시스템을 구축하였다. 제작된 초음속 디퓨저와 이젝터 시스템은 그림 6 과 같다.

3.2 성능평가

성능평가는 100g/s 이젝터 성능평가와 동일한 방법으로 하였고 디퓨저 내부 벽면의 압력을 측정하였다. 또한 상용코드를 이용하여 디퓨저 내부의 유동을 계산하였다. 계산 결과는 압력 분포는 그림 7 과 같고 측정결과와 나타내면 그림 8 과 같다. 그림에서와 같이 초음속 디퓨저 입구 즉, 레이저 발진 영역에서 10torr 미만의 압력을 확보하였다. 디퓨저 내의 압력은 이젝터 주유동의 압력변화에 큰 영향을 받지 않는데 이것은 디퓨저 입구 조건이 일정하고 출구 조건의 변화가 작기 때문이다. 본 연구를 통하여 실제 레이저 발진 조건을 확보하였다.

Fig. 6 Assembling supersonic diffuser

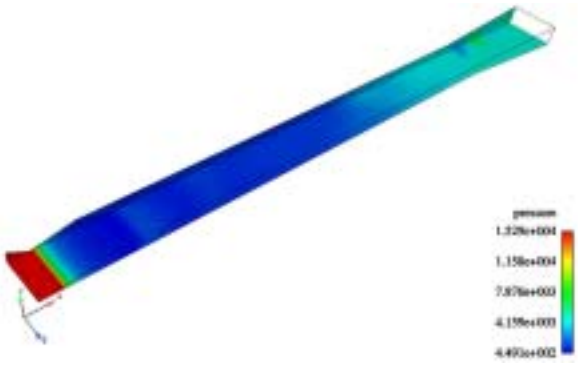

Fig. 7 Pressure contour of diffuser

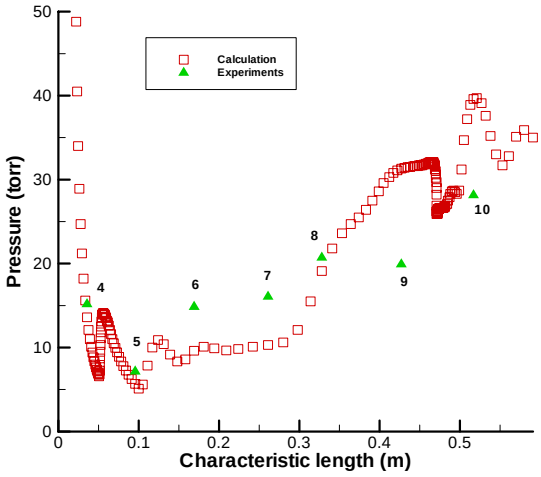

Fig. 8 Pressure distribution along the inner wall of the diffuser with single ejector

4. 병렬 이젝터 시스템

4.1 설계 및 제작

레이저의 출력을 높이기 위해 부유동 유량을 증가시켜야 한다. 따라서 필연적으로 부유동 유량을 증가시키기 위해 이젝터의 크기는 커진다. 하지만 군사적 응용을 위해서는 크기를 줄여야 할 것이다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기위해 병렬 이젝터 시스템에 대한 성능평가를 수행하였다. 병렬 이젝터 시스템은 부유동 압력은 일정하게 하고 유량만 증가시킬 수 있으므로 적당한 방법이 될 수 있다. 또한 레이저 발진 경로를 길게 하는 것이 유리하므로 이것 또한 병렬 이젝터 시스템의 장점이 된다. 성능평가를 위해 그림 9 와 같이 50g/s 부유동 이젝터 두 기를 병렬화 하여 하나의 부유동 챔버에 연결하였다. 그리고 초음속 디퓨저를 부유동 챔버에 장치하여 시스템을 구축하였다.

Fig. 9 Parallel ejector system

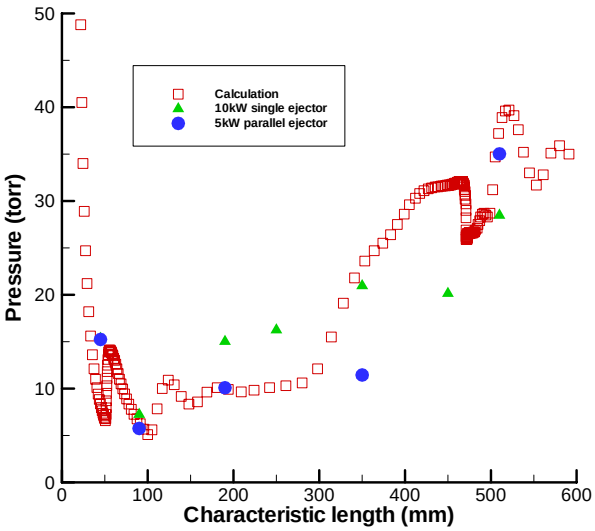

Fig. 10 Pressure distribution along the inner wall of the diffuser with parallel ejector system

4.2 성능평가

50g/s 부유동 이젝터 두 기의 병렬화 시스템의 성능평가 결과 그림 10 과 같이 100g/s 부유동 이젝터와 비교적 큰 차이 없는 성능을 나타내었다. 또한 상용코드의 계산 결과와도 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 고출력 화학 레이저를 연속으로 발진 시키기 위한 초음속 이젝터 시스템에 대한 연구를 수행하였다. 100g/s 부유동 유량을 확보하는 이젝터를 설계 제작하여 성능평가에 성공하였고, 이젝터 길이방향으로 벽면 압력을 측정하여 이젝터 내부의 충격파 거동을 확인할 수 있었다. 실제 화학레이저 시스템과 같이 초음속 디퓨저와 초음속 노즐을 이젝터 앞에 장치하여 실제 화학레이저 발진 조건인 20torr 미만의 압력장을 확보하였다. 또한 병렬 이젝터 시스템을 구축하여 그 효과를 시험해본 결과, 부유동의 유량은 병렬 이젝터의 수가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 것을 확인하였고, 이러한 방법을 이용하면 고출력 화학 레이저 구동용 이젝터 시스템의 크기를 줄일 수 있을 것으로 예상된다. 실험과 함께 상용코드를 이용한 계산을 함께 수행하여 이젝터 내부 유동의 거동을 확인하였고, 이젝터 및 디퓨저 설계 기술을 검증할 수 있었다. 현재 과산화수소 촉매반응을 이용한 가스발생기를 연구 중이며 시스템화를 통하여 보다 작은 크기의 화학 레이저 구동 장치를 구축할 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

(1) R. W. F. Gross and J. F. Bott, 1976, *Handbook of Chemical Lasers*, John Wiley & Sons, New York, USA, Chapter 1

(2) W. R. Warren Jr., April 1975, “Chemical lasers”, *Astronautics and Aeronautics*, pp. 36-49

(3) R. W. Waldo, 1993, “Advanced cw hydrogen fluoride chemical laser performance”, *AIAA 24th Plasmadynamics & Lasers Conference*, Orlando, USA, Paper 93-3184

(4) R. Ackerman, D. Callahan, A. Cordi, H. Lurie and M. Thomson, 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) K. A. Truesdell, C. A. Helms and G. D. Hager, 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) 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

(7) S. Kim and S. Kwon, 2003, “Development of ejector system for chemical lasers operating (I)”, *KSME B*, vol. 27, no. 12, pp. 1673-1680

(8) S. Kim, C. Kim and S. Kwon, 2003, “Study of ejector system for pressure recovery of chemical lasers”, *KSPE Conference Proc*. pp. 49-53

(9) A. S. Boreysho, V. M. Khailov, V. M. Malkov and A. V. Savin, 2000, “Pressure recovery system for high power gas flow chemical laser”, *XIII International Symposium On Gas Flow & Chemical Lasers – High Power Laser Conference Proc*. Florence, Italy