

# 화학레이저 구동용 이젝터 시스템 개발 (I)

- 화학레이저 구동용 초음속 이젝터 설계 변수 연구 -

김 세 훈\* · 권 세 진†

(2003년 3월 31일 접수, 2003년 11월 17일 심사완료)

## Development of Ejector System for Chemical Lasers Operating (I)

- Design Parameter Study of Supersonic Ejector for Chemical Lasers Operating -

Sehoon Kim and Sejin Kwon

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

### Abstract

It is essential to operate chemical lasers with supersonic ejector system as the laser output power goes up. In this research, ejector design parameter study was carried out for optimal ejector design through understanding the ejector characteristics and design requirements for chemical lasers operating. Designed ejector was 3D annular type with 2<sup>nd</sup>-throat geometry and pressurized air was used for primary flow. Ejector design was carried out with two steps, quasi-1D gas dynamics was used for first design and commercial code was used to verify the first design. In this study, to get the effect of ejector geometry on its performance, three cases of primary nozzle area ratio and 2<sup>nd</sup>-throat cross sectional area and two cases of 2<sup>nd</sup>-throat L/D ratio experiments were carried out. Primary and secondary pressures were measured to get the mass flow rate ratio, minimum secondary pressure, ejector starting pressure and unstaring pressure at every case. In the result, better performance than design level was shown and optimal ejector design method for chemical lasers was obtained.

#### 기호설명

R : 반지름

L : 길이

D : 지름

$\alpha$  : 주유동 분사각

$\beta$  : 아음속 디퓨저 퍼짐각

L/D : 이차목 길이지름비

$A_{pe}/A_p^*$  : 주유동 노즐 면적비

p : 주유동

s : 부유동

m : 혼합 챔버

2 : 이차목

D : 아음속 디퓨저

max : 주유동 노즐 최대반경

throat : 주유동 노즐목까지의 반경

### 1. 서론

화학레이저는 산소-요오드(COIL, Chemical Oxygen-Iodine Laser), 불소(F)-수소(H) 그리고 불소

하첨자

\* 회원, KAIST 항공우주공학 전공

† 책임저자, 회원, KAIST 항공우주공학 전공

E-mail : melody@kaist.ac.kr

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

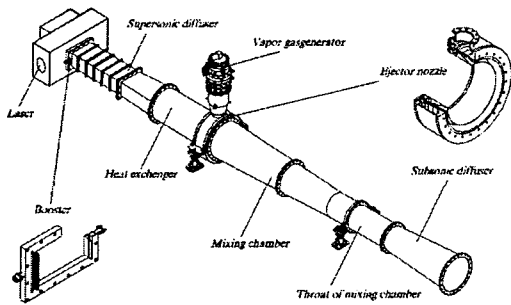


Fig. 1 Pressure recovery system

(F)-중수소(D) 등과 같이 반응성이 좋은 기체를 연소시켜 에너지를 얻는 것으로 외부로부터 별도의 에너지 공급 없이 자발적인 화학반응에 의해 발생된 에너지를 이용하여 발진 시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 높은 광에너지를 고효율로 얻을 수 있기 때문에 고출력 레이저 제작에 많이 사용된다. 특히 최근 높은 광에너지를 비행체 요격 등의 군사적인 목적에 사용하는 연구가 수행되고 있다.<sup>(1-3)</sup>

고출력 화학레이저는 높은 효율의 발진을 위하여 발진 캐비티에서 낮은 압력 조건(10torr 미만)이 필요하고 높은 출력을 얻기 위하여 많은 유량이 필수적이므로 반응 기체들을 초음속 유동으로 흘러주어 레이저의 발진 조건을 확보하게 된다. 하지만 낮은 초기압력 조건으로 빠른 속도의 유동장을 확보하기 위해 노즐 후류에 진공화 장치가 필요하다. 화학레이저용 진공화 장치로는 진공 펌프와 진공 챔버를 이용하는 진공 시스템과 기체 역학적 압력회복장치(pressure recovery system)인 초음속 이젝터가 있다.

레이저는 Fig. 1의 'Laser'라고 적힌 캐비티에서 발진이 이루어지고, 압력회복장치는 Fig. 1과 같이 발진 캐비티 이후의 장치들을 말한다. 압력회복장치는 대부분이 초음속 디퓨저, 열교환기 그리고 초음속 이젝터 등으로 구성된 이젝터 시스템이 사용된다.<sup>(4)</sup> 그림에서 주유동은 가스발생기에서 이젝터 노즐을 통과하여 분사되고 혼합챔버에서 부유동과 혼합된 후 이차목(throat of mixing chamber)을 통과하여 디퓨저를 통해 대기로 방출된다. 혼합챔버에서 주유동과의 운동량 교환으로 부유동이 생성되고 이것이 레이저 발진 조건을 만드는 것이다. 본 연구에서는 이젝터의 성능평가에 중점을 두었기 때문에 초음속 디퓨저와 열교환기가 없으므로 부유동 덕트는 열교환기가 된다. 이젝터 시스템의 장점은 어떠한 외부의 전기적 에너지가 필요 없이 작동한다는 것과 내부에 회전 유동이나 기계적인 장치가 없어 작은 주유동 유량으로 많은 부유동 유량을 뽑아낼 수 있다는 것이다.<sup>(5)</sup> 그리고 가장 큰 장점은 크기가 작다는 것이다. 진공 시스템을

사용하는 방법은 제작 및 작동에서 용이하기 때문에 출력이 kW 급 이하인 대부분의 화학레이저에서 사용되고 있지만 레이저 출력 대비 크기가 매우 큰 단점이 있다. 특히 같은 출력의 발진을 위해서 필요한 진공 시스템의 부피가 이젝터에 비해 수십 배 정도 크기 때문에 출력이 높아질수록 그 크기는 기하급수적으로 증가하게 된다. 또한 고출력 화학레이저의 주된 응용 분야인 군사적인 사용에서 이동이 용이하고 비밀성을 확보하는 것이 매우 중요하므로 화학레이저 전체의 크기를 줄이기 위해 이젝터를 이용한 화학레이저 작동이 필수적이다.

지금까지 수행된 대부분의 이젝터 관련 연구에서는 온도조절장치나 냉동기 등에 초점을 두어 주유동 전압력, 부유동 전압력 그리고 배압이 부유동 유량에 미치는 영향이나 부유동 유량과 주유동 유량의 비가 중요한 연구 결과였다.<sup>(6)</sup> 하지만 본 연구에서 수행된 화학레이저용 이젝터는 그 응용이 다르고 설계 요구조건이 다르다. 화학레이저용 이젝터의 환경 제한변수는 기존의 이젝터 연구와 같지만, 정해진 주위 압력조건에서 레이저 발진의 가부를 결정하는 낮은 부유동 압력 그리고 높은 레이저 출력을 얻기 위한 다량의 부유동 유량을 확보해야 하는 것이다. 흡입되는 부유동의 압력과 유량은 반비례하므로 이 두 가지 설계요구조건을 동시에 만족하려면 정확하고 정밀한 이젝터 설계가 필요하다. 또한 최대한 작은 크기의 이젝터 시스템을 개발하기 위해서는 효율의 저하도 고려해야 한다.

본 연구에서는 화학레이저용 이젝터 설계 기술을 확립하기 위해 고압 공기를 주유동으로 하고 초음속 디퓨저가 없는 이차목 형태의 이젝터를 설계 및 제작하여 성능평가를 수행하였다. Fig. 1의 우측상단과 같이 부유동 둘레에서 고리모양으로 쏘아주는 삼차원 환형(annular type)으로 설계하였다. 본 연구에서는 2g/s의 부유동 유량을 확보하며 50torr 미만의 부유동 압력 조건을 만족시키는 이젝터를 설계 및 제작하였고 성능평가를 수행하였다. 특히 환경 변수와 설계요구조건이 주어졌을 경우 효율적이고 간결한 이젝터를 설계하기 위한 설계 변수 결정방법에 대하여 중점적인 연구가 수행되었다. 그 중에서도 주유동 노즐 면적비, 부유동 덕트(duct) 단면적, 이차목 단면적 그리고 이차목의 L/D 비가 이젝터 성능에 미치는 영향을 알아 보았다.

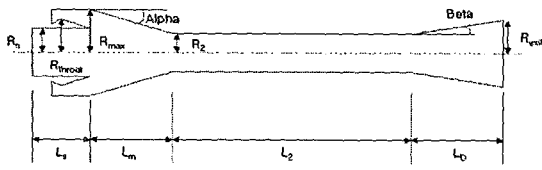


Fig. 2 Geometric parameters of 3D annular type ejector

2. 이젝터 설계

2.1 이젝터 설계 변수

화학레이저용 이젝터를 설계하기 위한 변수로는 환경 제한변수, 형상 설계변수 그리고 설계 요구조건 등이 있다. 환경 제한변수에는 주유동 전압력, 부유동 전압력 그리고 배압 등의 제한적 변수와 두 유동의 물리적 특성 등이 있고, 형상변수에는 주유동 노즐 면적비, 분사각, 부유동 덕트 단면적 그리고 이차목 단면적과 이차목의 L/D 비 등이 있다. 설계 요구조건에는 레이저 작동여부를 결정하는 부유동 압력과 레이저 출력을 결정하는 부유동 유량이 있다. 이젝터의 개념도와 설계변수를 나타낸 그림은 Fig. 2 와 같다.

본 연구에서 설계한 이젝터는 3 차원 환형이고 부피 11m<sup>3</sup>, 최고압력 30bar 의 공기 압축 탱크를 이용하여 주유동을 확보하였다. 부유동 전압과 배압은 대기압이었다. 작동 초기 높은 압력으로 주유동이 분사되면 분무기 원리와 같이 혼합 챔버에서 부유동과 혼합이 일어나고 주유동과 부유동의 운동량 전달에 의해 부유동이 생성된다.

2.2 이젝터 설계 방법

초음속 이젝터는 난류를 포함하여 두 유동의 혼합현상과 충격파간의 상호작용 등의 예측하기 어려운 현상들이 동시에 일어나는 복잡한 장치이므로 이젝터를 모사하기에는 어려움이 많다.<sup>(6)</sup> 그러므로 이젝터 설계 후 여러 방법으로 검증하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 1 차원 기체 역학을 이용하여 이젝터 설계를 수행하고 이를 상용코드를 이용하여 난류, 혼합효율, 충격파 그리고 초음속 경계층 등의 현상에서 오는 압력 강하를 보정하며 이젝터 설계를 수행하였다. 본 연구에서 수행된 이젝터 설계 순서도는 Fig. 3 과 같다.

Fig. 3 에서와 같이 환경 변수인 주유동 전압력으로 최대 극복할 수 있는 주유동 초음속 노즐의 면적비를 결정한다. 면적비를 크게 할수록 주유동

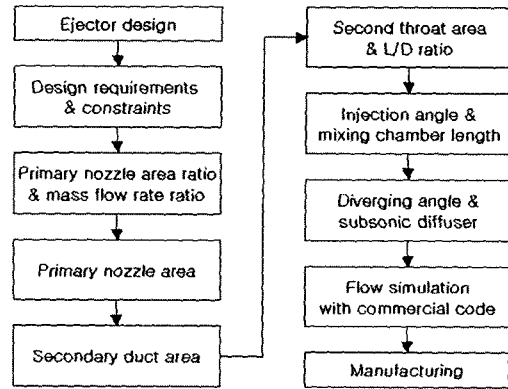


Fig. 3 Flow chart of ejector design



Fig. 4 Mach number distribution with secondary duct radius 15mm

압력이 낮아지므로 낮은 부유동 압력을 얻을 수 있지만 확보할 수 있는 주유동 전압력에 한계가 있으므로 이를 고려하여야 한다. 다음은 설계요구 조건인 부유동 유량을 이용하여 정상상태 작동시 이젝터의 주유동과 부유동의 유량비를 결정하여 주유동의 유량을 결정한다. 주유동과 부유동 유량비의 역수를 배출계수(ejection coefficient :  $\eta$ )라고 하는데 본 연구에서는 안정적인 이젝터 작동을 위해 배출계수를 1/70 로 정하였다.

부유동 덕트의 단면적은 이젝터 설계에서 매우 중요한 설계 변수 중에 하나이다. 그 이유는 이젝터 효율을 결정하기 때문이다. 환형의 이젝터에서 부유동 덕트의 단면적이 작으면 Fig. 4 와 같이 중심 부분에서 주유동이 만나 닫힌 형상이 되어 부유동이 효율적으로 뽑히지 못하고, 덕트의 단면적이 크면 Fig. 5 와 같이 중심부분에서 혼합효율이 떨어져 이젝터 효율이 떨어지게 된다. 부유동 덕트 단면적 계산에는 부유동 압력 및 부유동 유량이 필요하다. 온도는 주위 온도를 사용하였고 마하수는 상용코드 계산을 통하여 가장 좋은 효율을 나타내는 결과로 역산하였다.

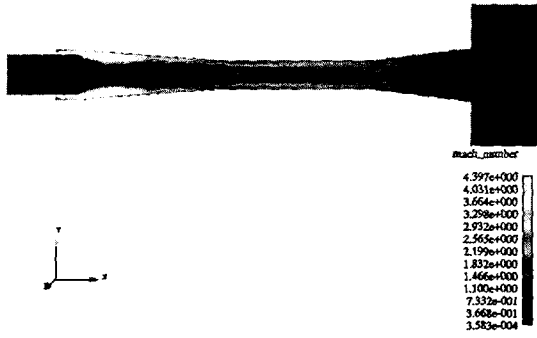


Fig. 5 Mach number distribution with secondary duct radius 20mm

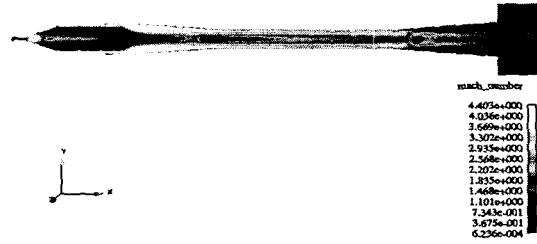


Fig. 6 Mach number distribution with secondary duct radius 17mm

부유동 덕트 단면적이 계산되면 주유동 노즐 면적을 통하여 주유동 노즐목과 노즐 출구의 반지름이 결정된다. 다음으로 결정될 이차목 단면적은 이젝터 작동 여부를 결정하는 중요한 설계변수이다. 본 연구에서는 이차목 형상을 갖는 초음속 풍동 설계방법을 이용하여 등엔트로피(isentropic relation) 가정으로 설계를 수행하였다. 초기 설계시 부유동의 유량은 주유동에 비하여 매우 작으므로 고려하지 않았지만 주유동과 부유동의 혼합현상과 충격파에 의한 압력 강하를 다시 보정하였다. 압력 강하 보정시 이차목의 단면적이 작으면 이차목이 유량을 극복하지 못하고 역류하여 이젝터가 작동하지 않게 되고 또한 보정이 너무 크게 되면 이젝터의 효율이 떨어지게 된다.<sup>(7,8)</sup> 본 연구에서는 단면 이차목 초음속 풍동 설계방법을 이용하였고 경계층효과와 충격파 그리고 부유동과의 혼합에 의한 압력 손실을 실험적으로 보정해주는 방법을 사용하여 이차목 단면적을 보정하였다.

주유동 노즐 출구 반지름과 이차목 반지름이 결정되면 주유동 분사각에 의해 혼합챔버의 길이가 결정된다. 분사각을 크게하면 혼합챔버의 길이가 짧아지고 혼합이 빨리 이루어지지만 충격파에 의한 압력 강하가 크고 혼합챔버의 길이가 짧아져 효율적인 혼합이 일어나지 못한다. 본 연구에서는 4도의 분사각을 주었다. 이차목 이후의 아음속 디퓨저의 확산각과 길이는 이차목 출구에서 수직충격파가 안정적으로 존재할 수 있도록 설계를 하였다.

모든 이젝터 설계가 끝나면 다시 상용코드를 이용하여 설계를 검증한다. Fig. 6은 설계요구조건에 따라 부유동이 2g/s으로 뽑힐 때를 모사한 결과이다. 계산결과 부유동 압력이 충분히 50torr 이하로 떨어지는 것을 확인하였다.

Table 1 Geometric parameters

Geometric parameters	Components
Primary nozzle area ratio	8.97, 10.78, 12.95
2 <sup>nd</sup> -throat diameter(mm)	27, 28, 29
2 <sup>nd</sup> -throat L/D ratio	4, 8

Table 2 Correction factors

	%	2 <sup>nd</sup> -throat diameter(mm)		
		27	28	29
Primary nozzle area ratio	8.97	137.8	148.2	159.0
	10.78	138.6	149.1	159.9
	12.95	140.9	151.5	162.5

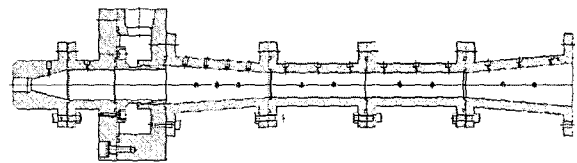


Fig. 7 Final ejector design

### 3. 이젝터 제작

#### 3.1 이젝터 설계도 및 제작된 이젝터

본 연구에서 주유동 면적비와 이차목 단면적 그리고 이차목 L/D 비의 영향을 알아보기 위해 형상 변수를 바꿀 수 있도록 구성 요소들을 설계하고 제작하였다. 제작된 이젝터 장치 구성요소는 아래 Table 1과 같이 총 18가지로 바꿀 수 있도록 제작하였다. 이차목 단면적 보정에서 최적의 보정값을 찾기 위해 Table 2와 같이 본 연구의 최종

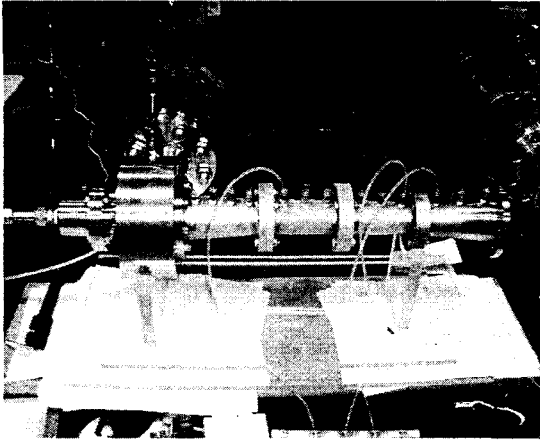


Fig. 8 Equipment setting

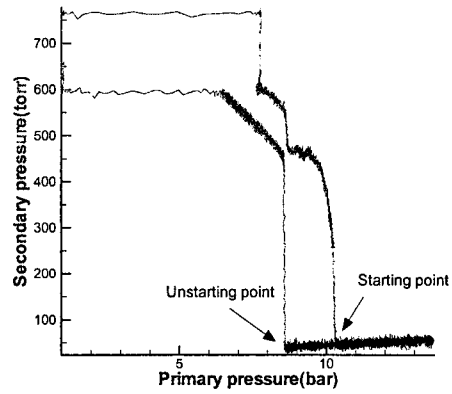


Fig. 11 Primary-secondary pressure history

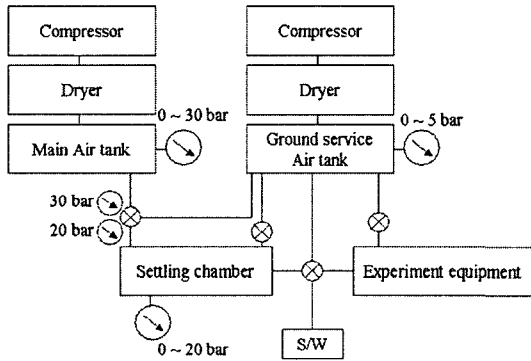


Fig. 9 Schematic of experimental setup

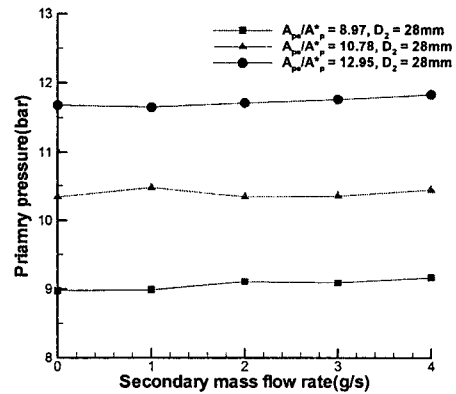


Fig. 12 Starting pressure according to primary nozzle area ratio

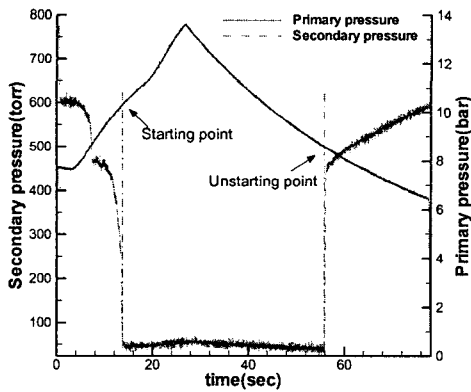


Fig. 10 Pressure-time history

보정 값인 150%에서 10%씩 줄이고 늘여 설계하였다. 18 가지의 이젝터 형상 중 면적비가 10.78,

이차목 지름이 28mm 그리고 이차목 L/D 비가 8 인 이젝터의 설계도는 Fig. 7 과 같고 제작된 이젝터는 Fig. 8 과 같다.

3.2 실험 장치 및 구성도

실험은 부피가 11m<sup>3</sup> 이고 최고 압력이 30bar 인 압축공기 탱크에 부피 1m<sup>3</sup>, 최고 압력 25bar 인 작은 압축공기 탱크를 장치하여 압력 조절기를 통해 주유동 압력을 제어하였다. 공압 자동 밸브를 사용하였고 이를 위해 5bar 의 서비스 탱크를 사용하였다. 실험 장치 개략도는 Fig. 9 와 같다.

본 연구에서는 여러 가지 이젝터 형상을 바꾸며 부유동 유량에 따른 주유동과 부유동 압력을 동시에 측정하였다. 유량은 최대 4.1g/s 까지 제어 가능한 유량제어기(mass flow controller)를 사용하여 제어하였다.

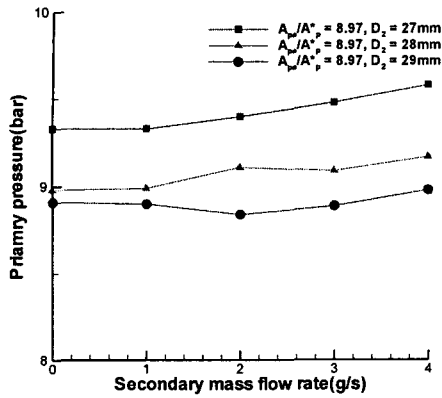


Fig. 13 Starting pressure according to 2nd-throat cross sectional area

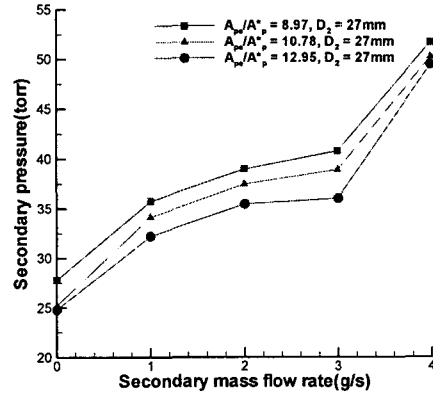


Fig. 16 Min. secondary pressure according to primary nozzle area ratio

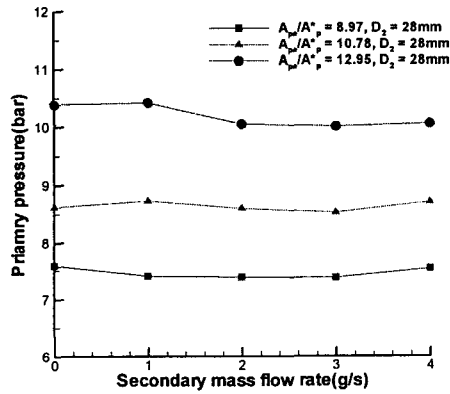


Fig. 14 Unstarting pressure according to primary nozzle area ratio

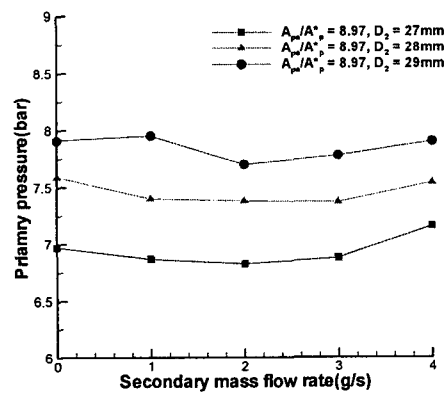


Fig. 15 Unstarting pressure according to 2nd-throat cross sectional area

#### 4. 성능평가

##### 4.1 압력측정

본 연구의 성능평가는 이젝터 형상과 부유동 흡입 유량에 따른 주유동과 부유동의 압력을 동시에 측정하여 이젝터 작동압력(starting pressure)과 작동멈춤압력(unstarting pressure)을 측정하였고 각 형상 조건에서 부유동 최소압력과 유량비를 측정하였다. 압력은 압전소자(piezoelectric)를 이용한 저압용 센서를 사용하였다. Fig. 10은 주유동 면적비가 10.78, 이차목의 지름이 28mm 그리고 이차목의 L/D 비가 8인 형상에서 부유동을 2g/s 흡입할 때의 주유동과 부유동의 압력을 시간에 대하여 나타낸 그림이다. 이젝터가 안정적으로 작동할 때까지 주유동의 압력을 조금씩 증가시켰다가 다시 압력을 감소시켜 이젝터가 작동을 멈추는 압력을 측정하였다. 이젝터 작동이 멈출 때 부유동 압력은 최소가 되었고 주유동과 부유동의 유량비도 최소가 되었다. Fig. 11은 Fig. 10을 주유동 압력에 대한 부유동 압력으로 그린 그림이다. Fig. 11을 보면 주유동 압력이 작동 압력 이상이 되면 이젝터가 작동하게 되는데 이젝터 작동 후 주유동 압력이 증가하여도 부유동 압력은 큰 변화가 없다. 다시 압력을 낮추면 이젝터는 작동압력에서 작동을 멈추는 것이 아니라 충격파가 이차목에 걸려 유동을 잡아 주기 때문에 작동압력보다 낮은 압력에서 이젝터 작동을 멈추게 된다.<sup>(9)</sup>

##### 4.2 형상 변수 영향

Fig. 12는 세가지 주유동 노즐 면적비에 대해서 부유동 유량에 따른 이젝터 작동압력 결과이다. 작동압력은 부유동 유량에 큰 영향을 받지 않고

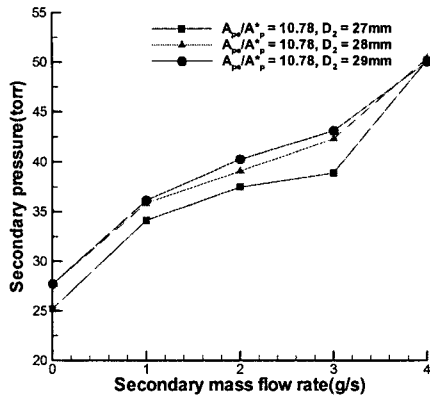


Fig. 17 Min. secondary pressure according to 2nd-throat cross sectional area

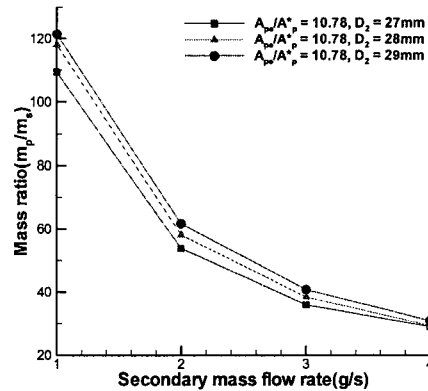


Fig. 19 Mass flow rate ratio according to 2nd-throat cross sectional area

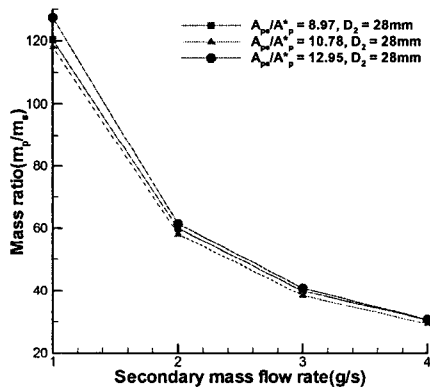


Fig. 18 Mass flow rate ratio according to primary nozzle area ratio

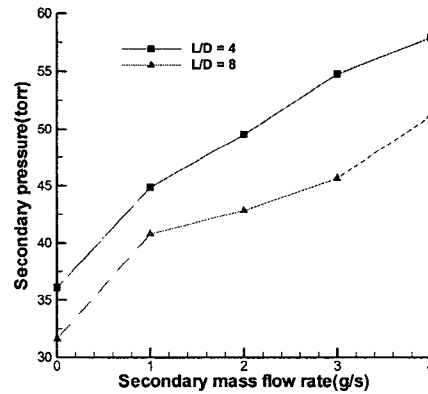


Fig. 20 Min. secondary pressure according to 2nd-throat L/D ratio

주유동 면적비가 커지면 높아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 13 은 세 가지 이차목 단면적에 대해서 부유동 유량에 따른 이젝터 작동압력 결과이다. 이젝터 작동압력은 이차목 단면적이 클수록 낮아지는 것을 알 수 있다. Fig. 14 와 15 는 이젝터 작동 멈춤압력인데 면적비가 커질수록 커지고 이차목 단면적이 클수록 커지는 것을 알 수 있다. Fig. 16 과 17 은 부유동 최소 압력에 대한 결과이다. 부유동 최소 압력은 Fig. 11 에서와 같이 이젝터 작동이 멈추기 바로 직전의 압력이다. 실험 결과 면적비가 클수록 낮고 이차목 면적이 작을수록 낮다. Fig. 18 과 19 는 유량비에 대한 결과이다. 실험 결과 노즐면적비가 10.78 일 때가 가장 작고 이차목 면적이 작을수록 작다. Fig. 20 은 이차목 L/D 비에 대한 부유동 최소압력 결과이다. 실험결과 부유동

압력은 L/D 비가 8 일 때가 4 일 때보다 낮은 것을 볼 수 있는데, 이것은 혼합챔버 내에서 주유동과 부유동이 완전히 혼합된다는 이상적인 경우와 달리 실제에서는 혼합챔버 뿐만 아니라 이차목 덕트 내에서도 주유동과 부유동의 혼합이 이루어지고 있다는 것을 보여준다. 하지만 이차목 L/D 를 너무 크게 하면 이젝터의 작동 압력이 높아짐으로 설계시 필요한 부유동 압력과 얻을 수 있는 이젝터 작동 압력을 잘 고려해야 한다.

### 5. 결론

본 연구에서는 화학레이저 작동용 초음속 이젝터의 최적 설계를 위한 형상 설계변수 연구를 수행하였다. 다양한 형상변수가 이젝터 작동에 미치

는 영향을 확인하기 위하여 작은 크기의 3 차원 환형 이젝터를 설계 및 제작하여 성능평가를 수행하였다. 성능평가에서는 주유동과 부유동의 압력을 동시에 측정하여 초음속 이젝터의 작동압력, 작동멈춤압력, 부유동 최소압력 그리고 주유동과 부유동의 유량비를 측정하였다.

성능평가 결과 가장 중요한 설계요구조건인 부유동 최소압력은 주유동 면적비가 커질수록 그리고 이차목 단면적 보정이 150%보다 작을수록 낮아졌고 이차목 L/D 비가 8 일 때가 낮았다. 유량비는 주유동 면적비에 큰 영향을 받지 않았고 이차목 단면적 보정이 작을수록 작아졌다. 두 실험결과 주유동 노즐 면적비가 클수록 그리고 이차목의 단면적 보정이 작을수록 이젝터는 좋은 성능을 나타내었지만 이젝터의 작동압력이 증가하였다.

화학레이저용 이젝터 시스템을 설계할 때 높은 주유동 압력을 확보하려면 높은 출력의 가스발생기(gas generator)가 필요하게 되므로 설계 요구조건을 만족하는 범위에서 이젝터의 효율을 손해 보더라도 작은 크기의 이젝터 시스템 구현이 더욱 결정적일수 있다. 그 이유는 고�출력 화학레이저는 기동성과 은폐성이 필요한 무기체계에 응용이 가능하기 때문이다. 크기를 줄일 수 있는 방법에는 이차목 L/D 비를 줄이거나 주유동 분사각을 키우는 방법이 있다. 화학레이저의 발진조건을 확보할 수 있다면 성능이 떨어지더라도 L/D 비를 줄이고 분사각을 키우면 이젝터의 크기를 줄일 수 있다. 그러므로 이젝터 시스템화에서 각 하부시스템간의 성능 조율이 중요하다. 이젝터 시스템의 크기를 줄이기 위한 주유동 분사각에 대한 성능평가는 수행 중에 있다.

또한 본 연구의 연장으로 부유동의 온도효과와 크기영향(Scale up effect)에 대한 연구가 수행 중에 있고, 초음속 디퓨저와 가스발생기의 시스템화 연

구도 수행중이다. 이 두 가지의 중요 하부시스템이 개발되면 이젝터 시스템을 이용한 화학레이저 발진이 가능해 질것으로 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, Chapter 1.
- (2) Warren, W. R. Jr., 1975, "Chemical Lasers," *Astronautics and Aeronautics*, April, pp. 36 ~ 49.
- (3) Wachs, J., Graves, B. and Patterson, S., 2000, "Tactical High Energy Laser Status," *AIAA 2000-2496*.
- (4) 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*.
- (5) Kim, H. D., Lee, J. H., Woo, S. H. and Choi, B. G., 2001, "Study of the Operation Characteristics of the Supersonic Steam Ejector System," *J. KSPE*, Vol. 5, No. 3, pp. 33 ~ 40.
- (6) DA-WEN SUN and Ian W. Eames, 1995, "Recent Developments in the Design Theories and Applications of Ejectors - a review," *J. the Institute of Energy*, 68, pp. 65 ~ 79.
- (7) Kim, S., Kim, H. and Kwon, S., 2002, "Subscale Supersonic Ejector Driven by High Pressure Air," *2002 KSAS Spring conference*, pp. 92 ~ 95.
- (8) Kim, S., Kim, H. and Kwon, S., 2002, "Parametric Study of Subscale Ejector for Pressure Recovery of Chemical Laser," *2<sup>nd</sup> National Congress on Fluids Engineering*, pp. 135 ~ 138.
- (9) Hodge, B. K. and Keith Koenig, 1995, *Compressible Fluid Dynamics*, Prentice-Hall International Inc., New Jersey, Part III.