

화학레이저 압력회복을 위한 축소형 이젝터의 성능변수

김세훈*·김형준**·권세진***

Parametric Study of Subscale Ejector for Pressure Recovery of Chemical Lasers

Sehoon Kim*, Hyungjun Kim** and Sejin Kwon***

Keywords : Supersonic Ejector(초음속 이젝터), Chemical Laser(화학레이저), Pressure Recovery System, Motive Gas

Abstract

High-speed ejection of burnt gases from the resonator cavity is essential for performance optimization of the chemical laser system. Additionally, to maintain the population of lasing species at a level for maximum optical power, the pressure within the cavity must be of order of 10 torr. In the present study, a small-scale ejector was designed and built for parametric study of its performance. High-pressure air was used as a motive gas. Measurements include schlieren visualization and pressure distribution trace near the ejector nozzle and along the diffuser downstream of the ejector. Preliminary tests showed performance of the ejector is a function of parameters including mass flow rate and stagnation pressure of the motive gas, ejector nozzle area ratio, throat area of the diffuser downstream of the ejector.

1. 서론

화학레이저의 구동에 이용되는 초음속 이젝터의 성능을 평가하는 여러 조건 중에서 부유동의 압력조건이 매우 중요하다. 그 이유는 효율적이고 높은 출력의 화학레이저 작동을 위해 공진기(resonator)에서의 압력을 10-25torr로 유지하여야 하기 때문이다[1]. 이러한 조건을 만족시키기 위하여 초음속 유동을 이용하는데, 초음속 노즐 출구에서 낮은 압력을 확보하기 위해서는 노즐 입구의 전압을 낮추어야 한다. 그러나 낮은 전압으로 높은 대기압의 배압을 극복하며 초음속 유동장을 형성시키는 것은 불가능하므로 진공챔버나 초음속 이젝터등의 초음속 유동 유도장치가 필요하다. 초음속 이젝터는 진공펌프에 비해 같은 출력의 레이저를 작동시킬 때 1/100의 용적을 차지하므로 전체 레이저 시스템의 부피를 줄일 수 있고, 특히 이동식 레이저 체계에 적합하다.

본 연구에서는 초음속 이젝터의 설계에 있어서 이젝터의 성능을 결정하는 설계변수를 정의하고 그 효과를 확인하였다. 본 연구에서 설정한 주요 초음속 이젝터 설계 변수로는 주유동의 마하수, 주유동의 전압, 주유동 노즐목의 면적, 혼합챔버의 단면적, 혼합챔버의 길이 그리고 부유동 노즐 목의 단면적이 있다.

본 연구에서는 화학레이저용 압력회복 장치인 초음속 이젝터 설계 변수 도출을 위하여 압축공기로 구동하는 이차원 소형 초음속 이젝터를 설계하고 제작하여 실험을 수행하였다. 실험을 통하여 이젝터 성능에 큰 영향을 미치는 설계변수

를 도출하였고 그 영향을 알아보았다.

2. 초음속 이젝터 설계 변수

2.1 설계 변수 설정

본 연구에서 초음속 이젝터 설계 변수를 정의하여 효율적인 이젝터 설계를 위한 정보를 얻고자 하였다. 초음속 이젝터의 개념도는 그림 1과 같이 크게 주유동 노즐, 부유동 노즐 그리고 혼합챔버로 구성된다. 화학레이저용 이젝터에서는 부유동 노즐 출구 이후에 레이징(lasing)을 하는 캐비티(cavity)가 위치하므로 여기서의 압력 조건이 이젝터 설계에서 매우 중요하다.

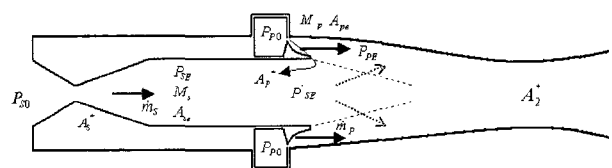


그림 1. 초음속 이젝터의 설계 개념도 및 설계 변수

본 연구에서는 주유동의 마하수, 주유동의 전압, 주유동 노즐목의 면적, 혼합챔버의 단면적, 혼합챔버의 길이 그리고 부유동 노즐 목의 단면적등을 이젝터 설계 변수로 정의하여 이것들이 이젝터 작동에 미치는 효과에 대하여 연구를 수행하였다.

2.2 이젝터 설계 및 제작

초음속 이젝터 내의 유동에는 회전운동이 없으므로 quasi-one dimensional analysis를 이용하여 초음속 이젝터 설계를 수행하였다. 본 연구에서 제한 조건은 주유동을 형성

* 한국과학기술원, sse@kaist.ac.kr
** 한국과학기술원, elquin@pknu.ac.kr
*** 한국과학기술원, melody@kaist.ac.kr

시키는 압축공기 탱크이다. 압축탱크의 최대압력 25기압이고, 부피는 11m³이다. 주유동 및 부유동의 수축확산 노즐은 MOC(Method of Characteristics)를 이용하였다. 초음속 부유동을 확인하기 위하여 부유동 노즐을 이차원으로 제작하였고, 재질은 플라스틱으로 제작하였다.

이젝터의 작동에서 혼합챔버의 역할은 매우 중요하다. 초음속 유동인 주유동과 아음속이 된 부유동간의 모멘텀(momentum) 교환이 잘 이루어져야 이젝터가 효율적으로 작동을 하고 낮은 부유동 압력조건을 만족시킬 수 있다. 그리고 낮은 이젝터 내의 압력을 높은 배압의 조건으로 뽑아주기 위해 다시 수축확산 노즐형태의 두 번째 목(second throat)을 장치한다. 그렇게 되면 이젝터가 작동을 시작한 후 두 번째 목에서 수직충격파(normal shock)이 형성하여 낮은 주유동 전압조건에서 이젝터가 작동할 수 있다. 본 연구를 위해 설계된 초음속 이젝터의 설계도는 그림 2와 같다.

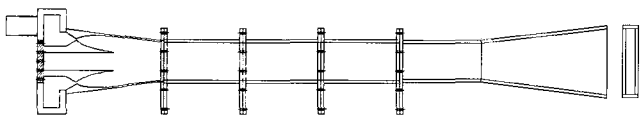


그림 2. 초음속 이젝터 설계도

본 연구에서 설계 및 제작된 초음속 이젝터 제원은 다음의 표 1과 같다. 실험에서 혼합챔버의 길이와 단면적을 변화시키는 실험과 주유동 탱크압력과 부유동 노즐 목의 단면적을 변화시키며 이젝터의 성능평가를 수행하였다.

제원	크기
주유동 면적비	10
부유동 면적비	1.25
주유동 노즐 목 넓이	5cm(너비) X 0.5cm(높이) X 2개
부유동 노즐 목 넓이	2cm(너비) X 0.8cm(높이)
주유동 분사각	7도
이젝터 너비	5cm
혼합챔버의 길이	25cm, 50cm, 75cm, 100cm
혼합챔버의 단면적	30cm ² , 45cm ² , 60cm ²

표1. 초음속 이젝터 제원

3. 이젝터 실험 및 결과

3.1 부유동 가시화

본 연구에서 제작된 이젝터의 작동여부를 확인하기 위하여 부유동 노즐 이후의 유동을 가시화 하여 관찰하였다. 이때 노즐 출구에서 초음속 유동을 확인하기 위하여 벽면 웨지(wedge)를 장치하여 경사충격파(oblique shock)를 촬영하였다. 유동 가시화는 Schlieren image technique을 사용하였는데, 가시화에서 점광원으로는 150W Xe 램프를 이용하였고 초점거리 160cm, 직경 20cm의 오목 거울을 사용하였다.

그림 3은 이젝터 작동 후 부유동 노즐의 가시화 결과이다. 유동은 위에서 좌로 흐르고 노즐 출구 이후에 벽면 웨지에서 경사 충격파가 형성되는 것을 확인할 수 있다.

본 실험에서 주유동의 전압 조건은 20기압이었고, 압축탱크를 20기압으로 채우고 한번에 불어내는 blow-down으로 실험을 수행하였다. 본 실험결과 부유동이 잘 형성하는 주유동

의 탱크기압이 존재하는 것을 확인하였다.

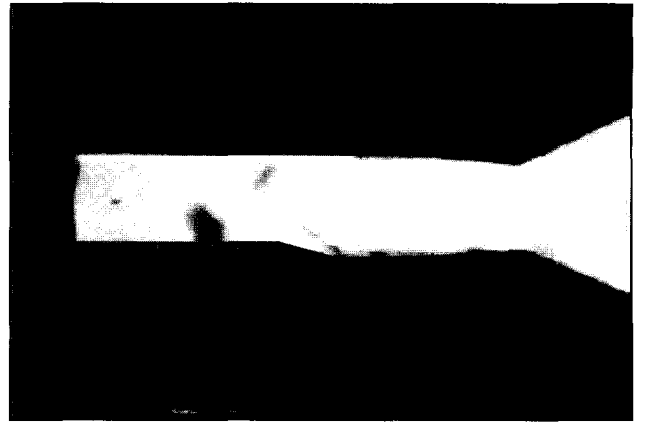


그림 3. 이젝터 부유동 가시화

3.2 이젝터 및 혼합챔버 내의 압력측정

이젝터 내의 압력 분포를 측정하기 위하여 다섯 개의 piezo type 압력 센서를 이용하였다. 압력 센서의 sampling rate는 7ms 이고 측정 범위는 절대기압으로 0~3기압이며 정확도는 0.01% 이다. 그림 4는 이젝터 내의 압력측정 위치를 나타낸 그림이고, 그림 5는 혼합챔버 내의 압력측정 위치 및 시간에 따른 압력 곡선이다.

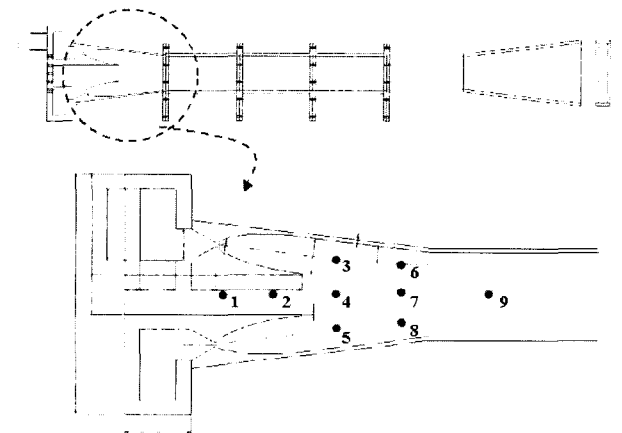


그림 4. 이젝터 내의 압력 측정 위치

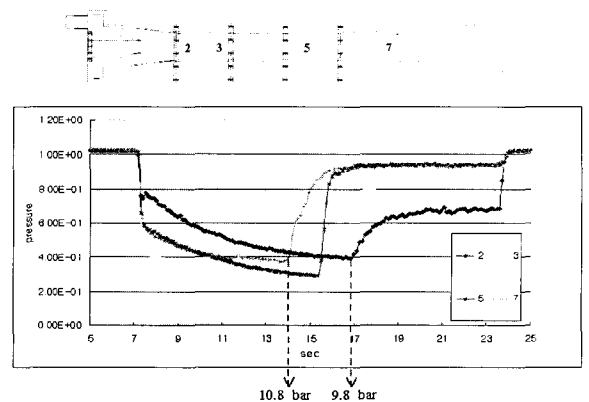


그림 5. 혼합챔버 내의 압력측정 위치 및 시간에 따른 압력 곡선

그림 5은 이젝터를 작동시키고 혼합챔버 내의 압력을 측정한 그림이다. 압축탱크를 20기압으로 채우고 한번에 불어주며

혼합챔버 내의 압력 분포를 측정하였다. 그림에서 x축은 이젝터 작동 시간이고 y축은 혼합챔버 내의 각 점에서 압력이다. 그림을 보면 이젝터 작동 초기에 주유동 탱크의 압력이 떨어짐에 따라 혼합챔버 내에서 전체적으로 균일하게 압력이 감소함을 볼 수 있다. 그리고 일정 시간(일정 압력)이 되면 혼합챔버의 출구(그림 5에서 7번 점)에서 급격하게 압력이 증가함을 볼 수 있다. 이것은 탱크압력이 떨어짐에 따라 혼합챔버를 초음속으로 다 못 채우고 수직충격파가 혼합챔버 내로 들어온 것이다. 더욱 압력이 떨어지면 수직충격파가 혼합챔버의 앞쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 본 실험의 결과 부유동에서 초음속 유동이 잘 형성되는 탱크의 압력 구간이 수직 충격파가 혼합챔버 내에 존재할 때임을 확인 하였다. 그림 6은 그림 5의 그래프를 시간별 위치에 따른 압력 그래프로 나타낸 그림이다. 이 그림에서 수직 충격파가 앞으로 이동함을 쉽게 알 수 있다.

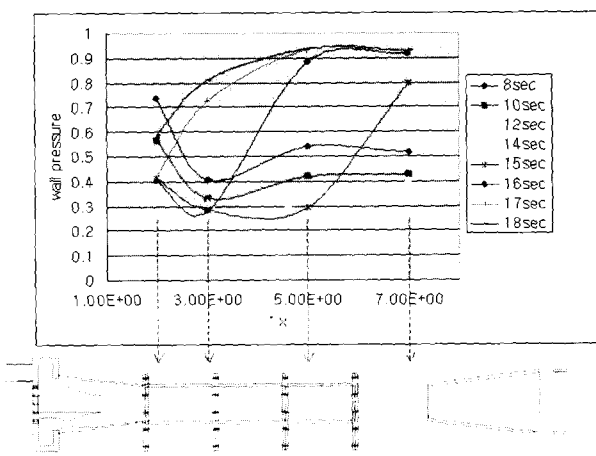


그림 6. 혼합챔버 내의 시간별 위치에 따른 압력 분포

본 연구에서 혼합챔버의 단면적의 효과와 주유동 유량의 관계를 확인하기 위해 그 크기를 30cm^2 , 45cm^2 그리고 60cm^2 으로 바꾸어가며 이젝터 실험을 수행하였다. 단면적이 30cm^2 와 45cm^2 일 때는 탱크압력 20기압에서 혼합챔버의 단면적이 주유동의 유량을 소화하지 못하고 역류하는 현상이 나타났고 단면적이 60cm^2 일 때는 이젝터가 작동함을 확인하였다.

본 연구에서는 혼합챔버 뿐만 아니라 이젝터 내의 압력분포를 측정하였는데, 압축탱크를 20기압으로 채워 한번에 불어주며 압력을 측정하였다. 시간에 따른 압력 그래프는 그림 7과 같다.

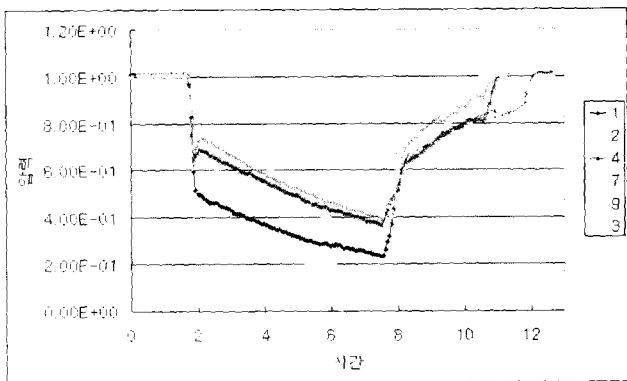


그림 7. 이젝터 내의 압력 분포

그림 7에서 x축은 이젝터 작동 시간이고, y축은 이젝터 내의 압력이다. 그림에서 일정시간 일 때(일정 탱크압력에서) 주유동 노즐 출구에서의 압력이 가장 낮음을 알 수 있고, 부유동에서 혼합챔버 쪽으로 가면서 점점 압력이 증가함을 볼 수 있다. 그림 7의 일정시간에서 위치별 압력을 그 시간의 노즐 출구 압력으로 나눈 값을 그래프로 그리면 그림 8과 같다. 그림 8은 시간에 따른 이젝터 내의 압력 분포는 일정하게 변함을 보여준다. x축은 이젝터의 길이방향의 거리이고(단위 : mm), y축은 일정 시간일 때 각 위치에서의 노즐출구 압력에 대한 비이다.

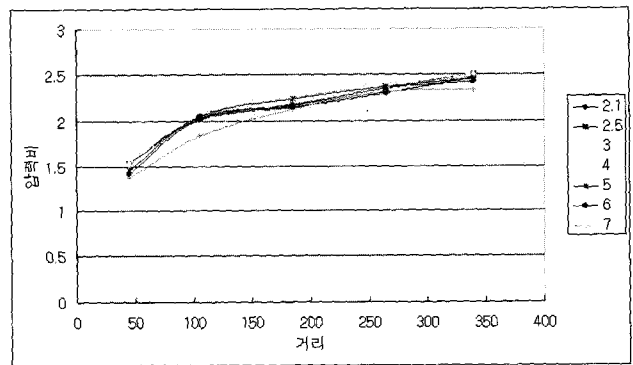


그림 8. 일정 시간에 각 위치에서의 압력과 노즐 출구 압력의 비

그림 8에서 기울기가 크게 두 가지로 나뉘어지는데 주유동 노즐 출구(거리 180mm)를 기준으로 부유동쪽으로 갈수록 기울기가 급하고 혼합챔버쪽으로 갈수록 기울기가 완만하다. 그리고 본 연구에서 캐비티(부유동의 노즐 출구) 최소 압력은 노즐 출구의 압력에 1.5배까지 낮아짐을 확인하였다.

그림 9은 11기압의 일정한 주유동 노즐 전압에서 부유동의 노즐목 면적에 따른 이젝터 내의 압력 그래프이다. 실험결과에서 전체적으로 노즐목 면적이 증가함에 따라 이젝터 내의 압력이 점점 증가하는 것을 확인하였는데, 그 크기가 작아지면 그 영향은 크지않음을 확인하였다.

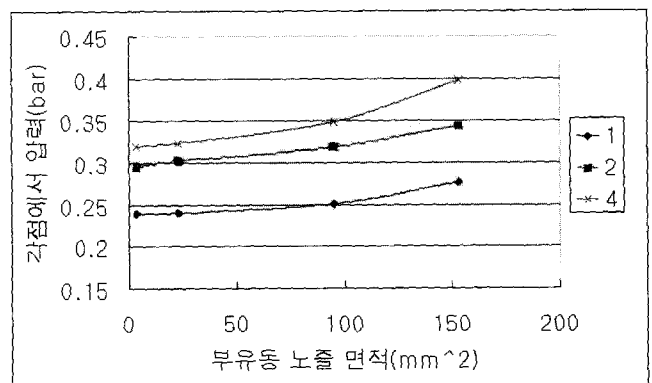


그림 9. 부유동 노즐 목의 단면적에 따른 이젝터 내의 압력 분포

4. 결론

본 연구에서 초음속 이젝터의 성능을 결정하는 설계 변수에 대하여 연구를 수행하기 위하여 압축공기를 이용한 이차원 소형 초음속 이젝터를 설계 및 제작하였다. 성능평가 결과 혼합

챔버의 길이와 단면적, 주유동 노즐 면적비, 주유동 전압 그리고 부유동의 노즐 목 면적 등이 이젝터 성능에 큰 영향을 미치는 변수들이었다.

혼합챔버의 길이는 이젝터의 작동 조건에서 매우 중요하다. 수직충격과가 혼합챔버 내에 존재할 때 효율적인 이젝터 작동이 이루어졌다. 그러므로 혼합챔버의 길이를 길게 하면 수직충격과가 존재할 시간이 길어지므로 효율적이고 안정적인 이젝터 작동을 위한 주유동의 압력 범위가 넓어진다. 그리고 혼합챔버의 단면적은 주유동과 부유동의 유량을 소화할 수 있을 만큼 확보되어야 한다. 하지만 너무 넓으면 효율적인 혼합효과가 떨어지므로 최적의 설계가 필요하다.

주유동의 면적비를 크게 하면 노즐 출구의 압력을 낮출 수 있으므로 캐비티의 압력을 낮추는데 유리하지만 노즐 면적비를 크게 하면 노즐입구 전압을 높여야 초음속 유동을 형성할 수 있다. 그러므로 제한조건에 한해서 주유동 면적비를 최대한 키우는 것이 중요하다. 그리고 부유동의 노즐 목 면적을 크게 하면 캐비티로 유입되는 유량이 커지므로 캐비티 내의 압력은 높아진다. 그러나 유량이 작으면 그 영향은 작다.

본 연구에서는 주유동의 분사 각도, 주유동 노즐·출구면적과 부유동 노즐의 출구 면적비, 3차원 이젝터 노즐 효과 등에 대해서 계속 연구가 수행되고 있다. 또한 상용 코드를 이용하여 이차원, 삼차원 이젝터 계산을 수행하고 있다. 이것을 통하여 이젝터 초기 작동 메커니즘을 연구하고 있다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원 전자광학특화연구센터 통한 국방 과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Javan A., Bennett W. R. Jr. and Herriott D. R., "Population Inversion and Continuous Optical Maser Oscillation in a Gas Discharge Containing He-Ne Mixture.", *Physical Review Letters*, Vol. 6, No. 3 (1961), pp. 106-110.
- [2] 김세훈, 김형준, 권세진, "압축공기로 구동하는 소형 초음속 이젝터", *춘계 한국항공우주공학회* (2002), pp. 92-95.
- [3] 김희동, 이준희, 우선훈, 최보규, "초음속 증기 이젝터 시스템의 작동 특성에 관한 연구", *한국추진공학회지*, Vol. 5, No. 3 (2001), pp. 33-40.
- [4] 김세훈, 김형준, 권세진, "화학 레이저용 진공화 기술 연구", *한국군사과학기술학회* (2001), pp. 308-310.
- [5] 김형준, 김세훈, 권세진, "화학 레이저 압력회복을 위한 초음속 디퓨저의 특성", *한국추진공학회* (2001), p. 82.
- [6] A.S. Boreisho, V.M. Khailov, V.M. Malkov, A.V. Savin, "Pressure recovery system for high power gas flow chemical laser", *Proceedings of XIII International Symposium On Gas Flow & Chemical laser - High Power Laser Conference*, September 18th-22nd, 2000, Florence, Italy
- [7] J.C. Dutton, C.D. Mikkelsen, A.L. Addy, "A Theoretical and Experimental Investigation of the Constant Area, Supersonic-Supersonic Ejector", *AIAA J.*, Vol. 20, No. 10 (1981).
- [8] R.J. Driscoll, L.F. Moon, "Pressure recovery in Chemical lasers", *AIAA J.*, Vol. 15, No.5 (1977), p. 665.