

온도와 질량유속이 불화중수소 화학 레이저 성능에 미치는 영향

Effects of Temperature and Mass Flux on Deuterium Fluoride Chemical Laser Performance

박 병 서* 이 정 환*
Park, Byung-Suh Lee, Jung-Hwan

ABSTRACT

The effects of adiabatic flame temperature and mass flux on deuterium fluoride(DF) chemical laser performance were investigated. The power flux and specific power, which are important parameters containing the information of scaling effects of laser device magnitude, and chemical efficiency were selected as a judging parameter of DF laser performance. For the specific power, it was decreased by the increase of power flux of DF laser. Higher the adiabatic flame temperature of atomic fluorine generator, higher the chemical efficiency of DF laser was changed. It seems that the mass flux effect on the chemical efficiency is not remarkable.

주요기술용어(주제어) : Deuterium Fluoride Chemical Laser(불화중수소 화학레이저), Chemical Efficiency(화학효율), Specific Power(비출력), Power Flux(출력밀도), Mass Flux(질량유속), Adiabatic Flame Temperature(단열화염온도)

1. 머리말

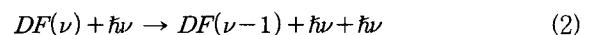
불화중수소 화학레이저(deuterium fluoride)는 불소원자(atomic fluorine)와 중수소(deuterium)의 화학반응을 통해 활성매질(active medium)인 기상태의 불화중수소($DF(\nu)$ 혹은 DF^*)를 발생시키고, 이 활성매질의 유도방출(stimulated emission) 및 이완반응(relaxation) 과정에서 에너지 준위 차이만큼의 레이저를 발생시킨다.^[1,2] 이때 역

기반응, 유도방출 및 이완반응은 식 (1)~(3)로 표현된다.

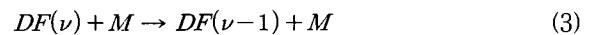
여기반응 :



유도방출 :



이완반응 :



연속발진형(continuous wave) 불화중수소 화학
레이저는 연료인 불소원자와 중수소를 확산에 의한

† 2004년 10월 22일 접수~2004년 12월 8일 심사완료

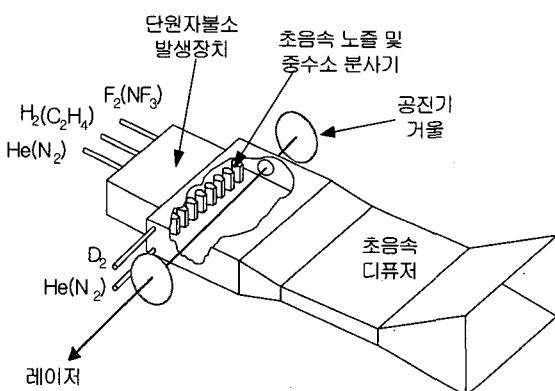
* 국방과학연구소(Agency for Defense Development)

기술연구본부

주저자 이메일 : parkbs@add.re.kr

화학반응을 통해 활성매질을 발생시킨다. 불소원자는 단원자불소발생장치에서 불소공급원인 불소(F_2)나 삼불화질소(NF_3)를 수소(H_2) 혹은 에칠렌(C_2H_4) 기체 등과 반응시킨 후 초음속노즐을 통해 광학공동(optical cavity)으로 공급된다. 공급된 불소원자 초음속유동은 광학공동의 입구에서 별도로 분사된 중수소와 반응하게 된다. 그림 1은 불화중수소 화학레이저의 개략적인 구조를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 단원자불소발생장치, 초음속노즐, 중수소 분사기가 차례로 위치하게 되고, 활성매질은 공진기 거울사이의 광학공동에서 레이저를 발생시킨 후 하류의 진공탱크 혹은 초음속디퓨저로 흐르게 된다.

고출력 레이저를 발생시키기 위해서는 식 (1)과 (3)에서 알 수 있듯이 우선 활성매질이 가능한 많이 발생되도록 해야 하므로 불소원자의 유량이 커야만 한다. 그런데 실제로는 레이저를 구성하는 구조물의 크기 제한으로 인해 불소원자의 유량은 제한될 수 밖에 없다. 즉, 불소원자를 대량으로 발생시키기 위해서는 단원자불소 발생장치를 크게 하거나 고압으로 작동시키게 되지만, 크기를 크게 하는 경우에는 전체 레이저 장치의 크기가 비례하여 커지게 되며, 고압으로 작동시키는 경우에는 기계적 견전성이 감소되는 문제점이 있을 뿐만 아니라 실제 활성매질이 발생되는 영역인 광학공동으로 공급되는 유동의 압력이 증가하여 레이저 발생효율을 감소시키게 된다. 따라서 최적의 레이저를 설계하기 위해서는 기체유량을 가능한 크게 유지하면서 레이저 발생 효율이 감소되지 않



[그림 1] 불화중수소 화학레이저 외형개략도

도록 해야 한다.

불화중수소 화학레이저의 발생효율은 일반적으로 화학효율로 표시하며 식 (4)와 같이 정의 된다.^[1] 화학효율은 공급된 불소원자가 중수소와 반응하여 모두 불화중수소로 변환될 때 발생되는 반응엔탈피(reaction enthalpy)와 레이저출력의 비율을 의미하며, 이 값이 높을수록 레이저의 크기는 상대적으로 소형화된다. 현재 구현된 외국의 불화중수소 레이저의 화학효율은 10~15% 범위에 이른다.^[3,4]

$$\eta_i [\%] = 100 \times \frac{P}{133 \cdot n_F} \quad (4)$$

레이저의 성능을 표시하는 또 다른 변수로 비출력(specific power, J/g)이 있다. 비출력은 레이저발생에 소모되는 총기체유량과 레이저 출력과의 비로 정의된다. 이 값은 단위질량당 발생되는 레이저 출력을 의미하므로 이 값이 클수록 레이저에 소모되는 기체유량은 감소한다.

전술한 화학효율과 비출력은 레이저의 출력특성을 표시하는 인자로서 레이저 장치의 크기에 대한 정보는 포함하고 있지 않다. 레이저의 크기정보를 포함하는 레이저 성능변수로 출력밀도(power flux, W/cm²)가 있다. 출력밀도는 불화중수소 레이저의 노즐뱅크(nozzle bank)의 출구단면적에 대한 레이저 출력의 비로서 이 값이 크면 레이저의 크기가 상대적으로 작아진다.

비출력과 출력밀도의 비(출력밀도/비출력)로부터 정의되는 인자로서 질량유속(mass flux, g/cm²-s)이 있다. 이 값은 레이저의 성능을 직접적으로 표시하지는 않으나 레이저의 기체유동과 관련된 중요한 변수이다. 물리적으로 질량유속은 노즐뱅크 단면적을 통과하는 기체유량을 의미하는데 이 값이 클수록 레이저 유로의 단위면적당 유량이 증가하므로 광학공동의 압력(static pressure)은 증가할 가능성이 높다. 또한 이 값은 유동의 레이놀드수(Reynolds number)와 비례하므로 이 값이 크면 유동의 관성력(inertia force)은 증가하게 되어 초음속 디퓨저의 작동에 유리하게 작용한다.^[4,5] 따라서 질량유속도 레이저 설계에 있어 중요한 인자이다.

그간의 DF 레이저 관련 연구^[1~9]들은 주로 레이저의 출력과 효율을 공급기체의 종류 및 성분비 관점에서 분석하거나 활성매질을 발생시키는 초음속노즐 및 중수소 분사방법에 집중되어 있었으며, 전술한 여러 성능인자 관점에서 다루어진 연구는 매우 적다. 특히, 고출력 레이저를 설계할 경우에 소규모의 모델을 통해 확인된 실험결과를 활용하기 위해서는 단순한 기체비율이나 단위부품의 형태보다는 전체 하드웨어의 크기변화에 대한 효과가 더욱 중요해진다. 그러나 이렇게 크기효과에 대한 정보가 구체적으로 다루어진 연구는 찾기 어려운 실정이다.

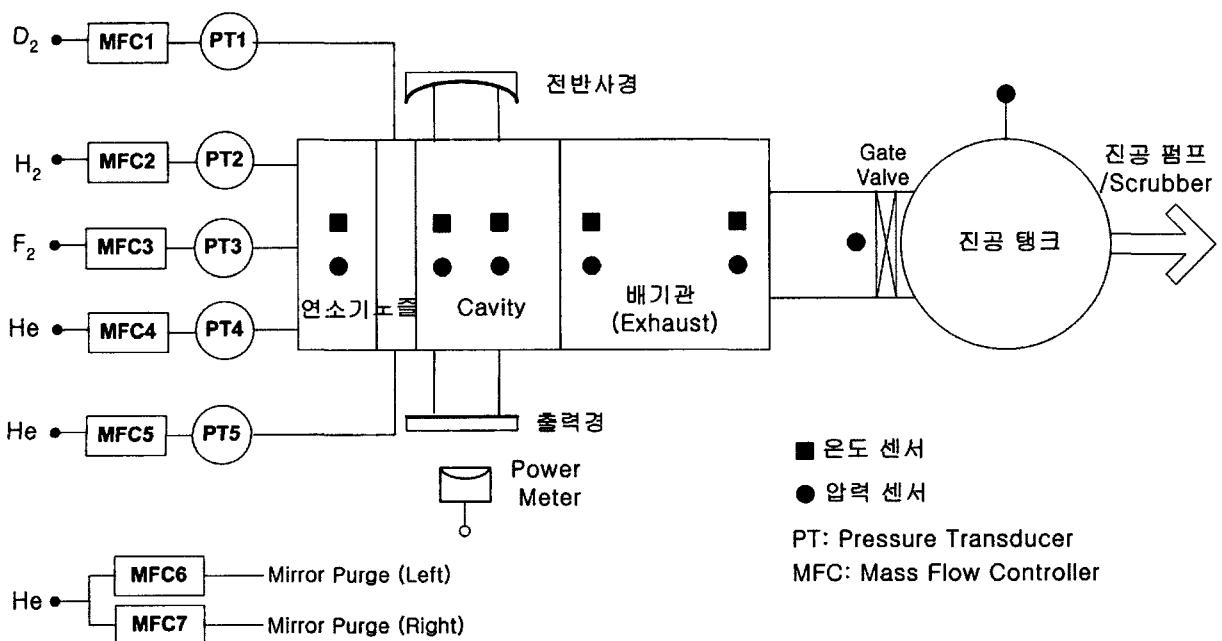
본 연구에서는 크기효과를 유추하기 위해 전술한 여러 인자간의 관계와 이들 인자들의 성능을 결정하는 주된 요인들을 알아보았다.

2. 실험

가. 실험장치

실험에 사용된 장치를 그림 2에 개념적으로 나타내었다. DF 레이저는 실험장치가 매우 복잡하고 사용

기체의 독성과 폭발위험성 때문에 모든 기체밸브와 압력조절기 등은 원격제어가 가능하도록 제작하였다. 단원자불소 발생장치에 사용된 기체는 불소(F_2)와 수소(H_2) 및 헬륨(He)이며, 각 기체의 유량은 유량조절기(MFC, mass flow controller, Sierra)와 원격압력조절기(remote pressure regulator, Tescom) 및 소닉노즐(sonic nozzle)로 조절된다. 레이저 출력은 레이저출력계(Coherent, Power sensor 모델 1000 및 Ophir 8000W)를 사용하여 측정하였다. 모든 압력조절기와 밸브, 압력, 온도센서 및 출력계 등은 PLC(programmable logic controller, AB사 모델 SLC 500)를 통해 제어하고 실시간으로 데이터를 수집하였다. 또한 발진이 종료된 기체는 진공탱크로 배출한 후 진공펌프를 통해 배기시키고 중화장치를 통과시켜 독성을 제거하였다. 실험순서는 초기에 진공펌프를 사용하여 불화중수소 레이저 유로 전체와 진공탱크를 진공화한 후 기체공급라인의 밸브를 개방하여 기체를 공급하였다. 기체공급시간은 1회 발진에 10초간이다. 레이저 출력은 8kW이하인 경우에는 Ophir사의 광출력계(모델 8000W)를 사용하여 레이저를 직접 출력계 센서에 조사시켜 측정하였고, 8kW 이상인 경우에는

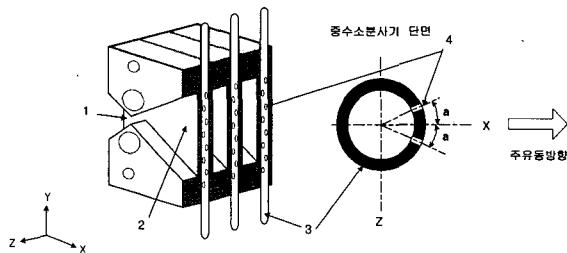


[그림 2] 불화중소 레이저 기능개략도

레이저 광선의 일부를 분리한 후 Coherent사의 광출력계에 조사시켜 측정하였다.

나. 초음속노즐 및 중수소분사기

그림 3에는 실험에 사용된 초음속노즐과 중수소분사기의 개략적인 형상을 나타내었다. 그림 3에서 1과 2는 각각 초음속노즐의 축소부 및 팽창부이며, 3은 중수소분사기를, 4는 중수소 분사구멍을 나타낸다. 그림에서 보듯이 초음속노즐의 기체팽창면은 상하면이고 노즐의 면적비는 15, 노즐간의 광축방향간격(그림 3의 Z방향)은 5mm이다. 중수소분사기는 외경 2mm의 원관에 직경 0.3mm의 분사구멍을 가공하여 제작하



[그림 3] 초음속노즐 및 중수소분사기 형상

였다.

증수소 분사각(그림 3의 α)은 주유동방향에 대해 20도이다. 이러한 분사방법은 중수소와 단원자불소의 반응이 활발하게 유도되는 반면에 혼합효과(mixing effect)가 증가하여 압력손실은 상대적으로 크게 나타나는 구조이다.

다. 실험조건 및 성능분석방법

본 연구에서 사용된 기체는 단원자불소발생장치에 공급되는 불소(F_2)와 수소(H_2) 및 헬륨(He)과 광학공동 입구에 분사되는 중수소(D_2)이다. 각 기체의 공급비율은 식 (5)로 표시된다.

$$\alpha = \frac{n_{F_2}}{n_{H_2}}, \quad \Psi = \frac{n_{H_2}}{n_{F_2} - n_{H_2}}, \quad \alpha_2 = \frac{n_{D_2}}{n_{F_2} - n_{H_2}} \quad (5)$$

식 (5)의 n_i 는 기체 i 의 몰유량(mole flowrate)을 나타낸다. 식에서 보듯이 α 는 단원자불소 발생장치에 공급되는 산화제 초과공급비율(equivalence ratio), Ψ 는 초과공급된 산화제(불소)에 대한 회석기체(헬륨)의 비율, α_2 는 초과공급된 산화제에 대한 중수소의 비율

[표 1] 실험조건 및 결과

번호	a	y	a_2	Mass Flux (g/cm ² -s)	Power Flux (W/cm ²)	Specific Power (J/g)	T _{adiabatic} (K)	h/h _{ref}
1	1.53	13.2	16.2	0.24	37.7	159.2	2400	1.39
2	1.67	21.0	24.0	0.84	63.1	75.5	1400	0.79
3	1.70	13.2	15.7	0.26	49.2	191.2	1800	1.52
4	1.70	17.5	15.7	0.28	51.7	185.6	1550	1.59
5	1.70	16.6	15.7	0.27	50.5	184.1	1600	1.55
6	1.70	16.2	16.2	0.33	58.1	176.6	1600	1.49
7	1.80	17.2	18.2	0.83	87.4	105.5	1380	0.91
8	1.82	17.4	21.7	0.42	47.8	113.7	1300	1.00
9	1.84	14.6	13.7	0.35	36.5	104.6	1450	0.78
10	1.87	18.9	18.0	0.85	77.7	91.9	1250	0.80
11	1.96	13.0	11.1	0.36	55.6	155.8	1380	1.03

을 의미한다. 식 (5)로 정의된 공급비율에 따른 반응식은 식 (6)과 같다. 실험을 수행한 기체비율은 표 1에 나타내었다.

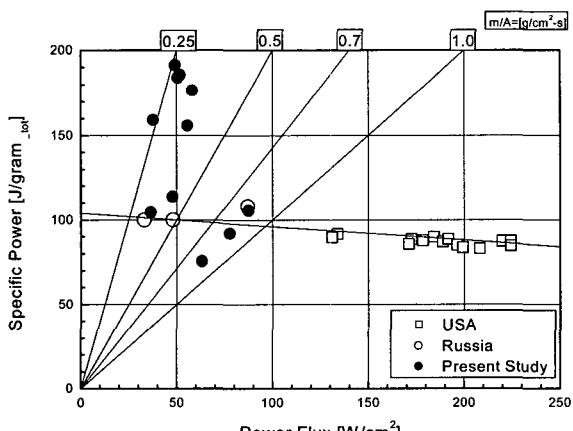
$$\begin{aligned} & \alpha F_2 + H_2 + \Psi(\alpha-1)He + \alpha_2(\alpha-1)D_2 \\ & \rightarrow 2HF + 2(\alpha-1)F + \Psi(\alpha-1)He + \alpha_2(\alpha-1)D_2 \quad (6) \end{aligned}$$

본 연구에서 레이저의 성능을 판단하는 인자로는 비출력과 출력밀도 및 화학효율비를 사용하였다. 화학효율비는 식 (4)를 이용해 구한 각 실험조건의 화학효율을 식 (7)과 같이 표 1의 실험번호 8번의 화학효율을 기준으로 무차원화하였다. 실험 8번을 기준값으로 사용한 것은 특별한 물리적 의미는 없으며, 실험결과중에서 중간값을 선택한 것이다.

$$\text{화학효율비} = \frac{\eta_i}{\eta_{ref}} \quad (7)$$

레이저 성능에 미치는 기체 온도의 영향을 파악하기 위해 기체비율을 이용하여 초과 공급된 불소가 완전히 해리(dissociation)된다는 가정하에 단열화염온도(adiabatic flame temperature, $T_{\text{adiabatic}}$)를 계산하였다.

단원자불소 발생장치의 기체는 강한 산화성으로 인해 열전대나 기타 비접촉식 방법을 이용한 실제 유동온도를 측정하기 곤란하기 때문에 계산된 온도를 사용하였다.



[그림 4] 출력밀도와 비출력의 관계

용하여 레이저의 성능을 분석하였다.

공진기 광축위치는 고정하여(노즐출구면으로부터 1.5cm 하류) 광축위치 변경에 따른 영향을 제거하였다.

3. 실험결과 및 토의

가. 출력밀도와 비출력

표 1에 나타난 실험결과를 이용하여 출력밀도와 비출력의 관계를 그림 4에 표시하였다. 그림에서 미국과 러시아의 연구결과는 레이저 출력이 수십 kW급의 실험결과로 추정되는 결과이며 본 연구의 출력은 약 10kW 부근의 결과이다. 출력밀도와 비출력은 클수록 효율이 우수한 레이저이지만 정해진 크기에서는 두 값이 한계가 있다. 즉, 그림 4에 표시된 외국의 연구결과^[1~3,6]를 보면 출력밀도가 증가하면 비출력이 감소하는 것으로 나타났다. 정해진 크기의 레이저에서 출력밀도를 증가시키기 위해서는 활성매질의 발생량을 증가시켜야 하는 것을 의미한다. 활성매질을 증가시키는 것은 공급기체유량을 증가시키거나 화학효율을 증가시켜야 하는 것을 의미하는데 공급기체유량을 증가시키는 것은 유로의 압력을 증가시키는 것을 의미한다. 화학레이저는 압력이 증가하면 활성매질이 주변 기체와의 충돌에 의한 이완 확률이 증가하여 레이저의 효율을 감소시키게 된다. 실제로 그림 4에서 보듯이 출력밀도가 약 50W/cm²이하인 경우의 본 연구결과를 보면 비출력은 상당히 높게 나타났는데 이것은 단위공간에 분포된 기체수가 적은 경우에 화학효율이 상대적으로 매우 높게 나타나는 것을 의미한다. 출력밀도가 증가하면 비출력이 대체로 감소하는 경향은 외국의 연구결과에서도 동일하게 나타나고 있다.

흥미로운 것은 러시아의 연구결과는 대체로 비출력은 본 연구결과의 중간값 정도이고 출력밀도는 본연구결과와 유사한 100W/cm²이하의 값을 보이고 있는데 비해 미국의 연구결과는 출력밀도가 100W/cm²이상의 높은 값을 보이고 있는 점이다. 그림 4에 표시된 질량유속(mass flux)값을 보면 러시아와 본 연구에서는 최대 약 0.8g/cm²-s 정도의 값에 이르지만 미국의 경우는 약 1.2g/cm²-s 이상의 영역에 분포되어 있다. 이

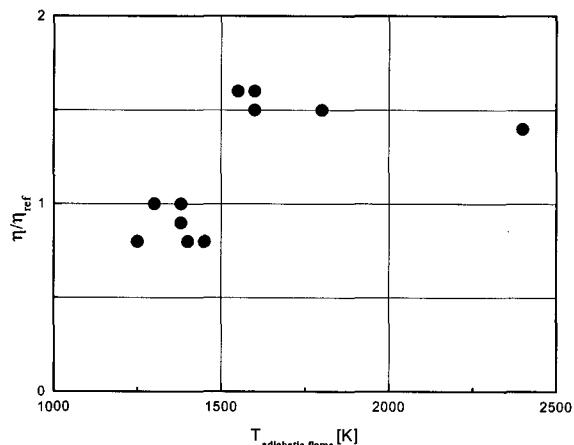
것은 미국에 비해 러시아와 본 연구에서 단원자불소 발생장치의 압력이 미국에 비해 저압이고 상대적으로 레이저의 외형크기가 크다는 것을 의미한다. 이러한 차이에도 불구하고 러시아의 출력밀도가 미국의 실험결과를 100W/cm^2 이하로 외삽(extrapolation)한 선상에 위치하는 것은 불화증수소 레이저의 화학효율과 질량유속과의 관계를 설명하는 것으로 해석된다. 본 연구에서 실험장치의 한계로 질량유속을 1.0W/cm^2 이상의 영역에서 실험을 수행하지 못했으나 향후 보완을 통해 좀더 넓은 영역에서 출력밀도와 비출력의 관계를 파악할 예정이다.

나. 단열화염온도와 화학효율

그림 5에는 단원자불소 발생장치의 단열화염온도에 따른 화학효율 변화를 나타내었다. 그림에서 보듯이 2000K 이하에서는 온도가 증가하면 화학효율은 증가하고, 2000K 이상의 구간에서는 데이터 부족으로 경향을 확실히 알 수 없다. 그러나 2400K 에서의 화학효율비는 1.39 로서 $1600\sim1800\text{K}$ 구간의 값보다는 작은 값을 보이고 있다. 1800K 이하 영역에서 온도증가에 따라 화학효율이 증가하는 것은 단원자불소 발생장치에서 진행되는 불소 해리 특성과 관련되기 때문인 것으로 판단된다. 불소의 해리는 온도가 1500K 이상일 경우에 95% 이상이 되지만 온도가 감소하면 재결합경향이 강해진다.^[1]

한편 1800K 이상의 영역에서는 단원자불소 발생장치에서 불소해리율은 증가하지만 초음속노즐을 통과한 기체온도가 비례하여 증가하게 되므로 광학공동에서 중수소와 반응한 기체의 온도도 증가하여 화학효율을 감소시키는 것으로 보인다. 즉, 기체의 온도가 증가하면 전술한 바와 같이 충돌이완 확률이 증가하기 때문이다. 광학공동에서 온도가 600K 이상인 경우에는 레이저의 이득발생은 거의 없는 것으로 알려져 있다.^[10]

본 연구에서는 레이저 발생지역에서 유동의 온도를 직접 측정하지는 않았으나 단원자불소 발생장치의 온도가 1800K 일 경우에 본 연구의 실험조건에 해당하는 기체조성범위에서 초음속노즐을 통과한 기체의 온도는 등엔트로피 가정을 적용할 경우에 약 250K 정도가 된다.



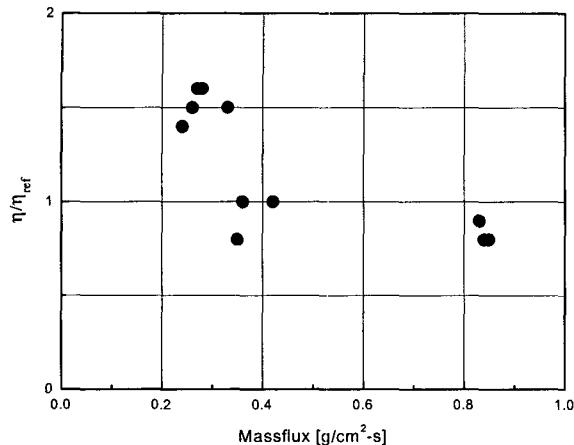
[그림 5] 단열화염온도와 화학효율

그리고 광학공동에서 단원자불소와 중수소의 반응열에 의한 온도증가는 약 200K 정도가 된다. 따라서 단원자불소 발생장치에서 온도가 과도하게 증가하는 경우에는 온도증가에 따른 불소해리율의 증가에도 불구하고 광학공동에서의 온도증가로 인해 화학효율이 감소하므로 최적온도범위가 존재하게 되는데 본 연구의 결과로 판단할 때 대체로 $1500\sim2000\text{K}$ 구간으로 판단된다.

다. 질량유속과 화학효율

그림 6에는 질량유속과 화학효율의 관계를 나타내었다. 그림에서 보듯이 전체적으로 질량유속이 $0.3\text{g/cm}^2\text{-s}$ 에서 화학효율비는 1.5 정도이지만 질량유속이 $0.8\text{g/cm}^2\text{-s}$ 정도에 이르면 화학효율비는 약 0.8 로 감소한다.

질량유속이 $0.4\text{g/cm}^2\text{-s}$ 인 경우에도 화학효율비는 약 $0.8\sim1$ 사이의 값을 보이고 있는데 이것은 표 1에서 알 수 있듯이 단원자불소 발생장치의 단열화염온도가 $1300\sim1500\text{K}$ 정도로 질량유속이 $0.8\text{g/cm}^2\text{-s}$ 부근의 실험조건과 단열화염온도는 유사하다. 따라서 질량유속이 $0.4\sim0.8\text{g/cm}^2\text{-s}$ 구간에서는 본연구의 실험결과로는 화학효율은 큰 차이가 없는 것으로 보인다. 즉, 질량유속의 영향보다는 온도의 영향이 더욱 지배적임을 알 수 있다. 본 연구의 실험범위에서 질량유속이 증가하여도 화학효율의 변화가 거의 없는 점은 고출력 레이저를 설계할 때 매우 유용하게 사용할



[그림 6] 질량유속과 화학효율

수 있는 특징으로서 단원자불소 발생장치의 온도를 좀더 최적화시키면 질량유속을 더욱 증가시킬 수 있는 가능성이 있는 것을 의미한다. 질량유속이 증가하면 그만큼 레이저의 크기를 감소시킬 수 있는 장점이 있다.

4. 맺음말

본 연구에서는 불화중수소 화학레이저에서 단원자불소 발생장치의 기체온도와 광학공동의 질량유속이 레이저의 성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 그 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 출력밀도와 비출력은 대체로 반비례하는 경향을 보인다.

둘째, 불화중수소 레이저의 화학효율은 단원자불소 발생장치의 온도가 증가하면 대체로 증가하지만 2000K 이상의 영역에서는 감소하며 최적온도구간은 1500~2000K 구간이다.

셋째, 질량유속의 영향보다 온도의 영향이 더욱 지배적이며, 질량유속 0.4~0.8g/cm³·s 구간에서는 질량유속 증가에 따른 화학효율의 변화는 거의 없다.

이상의 결과를 바탕으로 단원자불소발생장치의 온도가 2000K 이상의 영역에 대한 실험과 각 온도구간에 따른 질량유속 변화실험을 보완한다면 고출력 레이저를 설계하는데 적용가능한 크기척도효과(scaling

effects)를 충분히 파악가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] R. W. F. Gross & J. F. Bott, *Handbook of Chemical Lasers*, Wiley, 1976.
- [2] I. A. Fedorov, *HF/DF continuous wave Chemical Laser*, Baltic State Technical University, 1994.
- [3] V. K. Rebene et al., "Influence of the Secondary-fuel Feed Method on the Energy and Gasdynamic Characteristics of a Supersonic cw Chemical HF Laser with a Radial-expansion Nozzle Array", *Quantum Electronics*, Vol. 28, No. 5, 1998, pp.394~396.
- [4] L. E. Wilson, "Deuterium Fluoride cw Chemical Lasers", *Journal de Physique, Colloque C9*, 1980.
- [5] J. W. Raymonda, M. Subbiah et al., *Advanced HF and DF Chemical Laser Performance Modeling*, USAMDC Technical Report DRCPM -HEL-CR-79-7, Vol. 1, 1979, pp.47~51.
- [6] I. A. Fedorov et al., "A continuous-wave DF Chemical Laser on an Ethylene-based Fuel Composition", *Quantum Electronics*, Vol. 33, No. 12, 2003, pp.1038~1042.
- [7] 이정환, 박병서, 김재기, "연속발진 불화중수소 화학 레이저 출력특성," *한국광학회지*, 제 13권, 제 1호, 2002, pp.65~69.
- [8] 전용근, 김재기, 이정환, "불화중수소 화학 레이저의 이득 및 출력 시뮬레이션," 2002년도 군사 과학기술학회 종합학술대회.
- [9] J. E. Ferrell, "Design & Fabrication of a Fine Orifice Injector," RK-CR-75-9 (ADA024219), Acurex Corp., 1974.
- [10] I. I. Galaev et al., "Supersonic cw Chemical HF Laser with a Three-jet Nozzle Array", *Quantum Electronics*, Vol. 26, No. 3, 1996, pp.211~214.