

연속발진 불화증수소 화학 레이저 출력특성

이정환[†] · 박병서 · 김재기

국방과학연구소 기술연구본부 1부 5팀

④ 305-600 대전시 유성우체국 사서함 35-5호

(2001년 8월 21일 받음, 2002년 1월 9일 수정본 받음)

불소원자(F)와 D₂ 기체의 발열반응에 의해 레이저 이득매질인 DF 여기분자를 생성시키는 구조의 연속발진형 불화증수소(DF) 화학 레이저를 설계, 제작하고 발진 실험을 수행하였다. 불소원자는 F₂ 기체와 H₂ 기체를 연소시켜 생성시키고, 불소원자를 초음속 노즐을 통과시킨 직후에 D₂ 기체를 분사하여 형성된 DF 여기분자 초음속 흐름을 활성 매질로 사용하여 레이저를 발진시켰다. 본 연구에서 얻은 레이저 발진 출력은 101 W이며, 최적의 유량조건에서 얻은 화학 효율은 5.12%, 비출력은 96.5 J/g이다.

주제어 : gas laser, optical sciences, optical instrumentation.

I. 서 론

화학 레이저^[1,2]는 별도의 에너지 공급이 없이 사용기체의 자발적인 화학반응에 의해 발생된 에너지를 이용하여 레이저를 발진시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 효율이 높고 높은 출력 및 높은 에너지의 레이저광을 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 불화증수소(DF) 레이저, 불화수소(HF) 레이저, 산소-요오드 화학 레이저(COIL, Chemical Oxygen-Iodine Laser) 등이 오랫동안 연구되었다. DF 레이저는 발진 파장이 3.8 μm로 대기 투과성이 좋아 지상배치 무기체계 응용을 위해서, COIL은 발진 파장이 1.3 μm로 대기 투과성이 나쁘기 때문에 대기권 밖에서 운용되는 항공기 탈재형(Air-borne Laser) 무기체계에 응용되며, HF 레이저는 발진 파장이 2.7 μm로 미국에서 우주배치 레이저 무기체계 응용 목적으로 출력 증대를 위한 연구가 장기간 수행되고 있다.^[6]

지상배치 무기체계에 활용되는 연속발진형 DF 화학 레이저^[7]는 산화제인 불소원자(F)와 연료인 D₂ 기체의 화학반응에 의해 DF 여기분자를 발생시켜 전동-회전 준위간의 전이에 의해 레이저광을 얻는다. 따라서 레이저 발진기의 핵심 부품중의 하나는 불소분자(F₂)나 불소화합물을 분해하여 불소원자를 발생시켜 공급해주는 장치이다. 이러한 장치는 F₂ 또는 불소화합물을 분해를 위해 외부에서 에너지를 공급받거나,^[8] 자발적 화학반응에 의하여 자체적으로 생성된 에너지를 사용한다. 특히 자체 생성 에너지 사용 방법 중에서 F₂(또는 불소화합물)과 수소(또는 탄화수소 계열의 연료)의 연소반응식을 생성된 열을 이용하여 F₂나 불소화합물을 분해하여 불소원자를 얻는 열분해방식^[9]은 일정 시간동안 연속발진 동작이 필요한 무기체계 응

용에 적합하다. 이와 같은 연소방식에 의한 DF 화학 레이저 발진은 미국 United Aircraft 연구소의 Meinzer에 의해 최초로 시도되었다.^[10] 여기에서 사용한 불소원자 발생장치는 F₂ 기체와 H₂ 기체의 연소반응을 이용한 것으로, 약 30 mW의 DF 레이저 출력을 얻었다. 이후에 고에너지 레이저 무기체계의 실용화 가능성을 연구하기 위해 미국에서 MIRACL(Mid-InfraRed Advanced Chemical Laser)^[11]라고 하는 약 2 MW 출력의 DF 화학 레이저가 개발되었으며, 고에너지 레이저 무기체계의 개념형성 및 기술개발에 크게 활용되었다.

본 연구에서 개발된 DF 화학 레이저에서는 불소원자 발생장치로서 F₂-H₂ 연소방식을 이용한 연소기(combustor)를 사용하였으며, 레이저 이득매질인 DF 여기분자를 발생시키기 위해서 trip형 초음속 노즐^[12]을 사용하였다. 이와 같은 연소기나 초음속 노즐의 설계에는 기체역학, 화학, 연소공학 등이 동시에 적용되는 연소유동에서 시뮬레이션이 필요하다.^[13]

본 논문에서는 위와 같이 설계된 연소기와 초음속 노즐을 사용한 DF 화학 레이저의 제작과 출력 특성에 대한 실험 결과가 기술된다. 레이저 실험장치에서 레이저 발진기는 원격제어가 가능하도록 제작되었으며, 각 유통 부위의 압력 및 온도 측정을 위하여 센서를 설치하고, 측정값이 레이저가 발진하는 시간 동안 컴퓨터에 자동 저장되도록 하였다. 레이저 발진 실험결과 브루스터창(Brewster window)이 부착된 경우에 출력 48 W를 얻었으며, 브루스터창을 제거한 경우에는 출력 101 W를 얻었다. DF 레이저 전용 분광기와 CCD 카메라를 이용하여 분광 측정을 한 결과 10개의 회전-진동 준위 전이에 대응하는 발진 라인을 관측할 수 있었다.

II. 실험 장치

DF 화학 레이저는 실험장치가 매우 복잡할 뿐만 아니라 반응성이 매우 높고 유독한 불소기체와 폭발위험이 높은 수소 및 중수소 기체를 사용하기 때문에 원격제어가 가능하도록 실

[†]E-mail: junghwan@add.re.kr

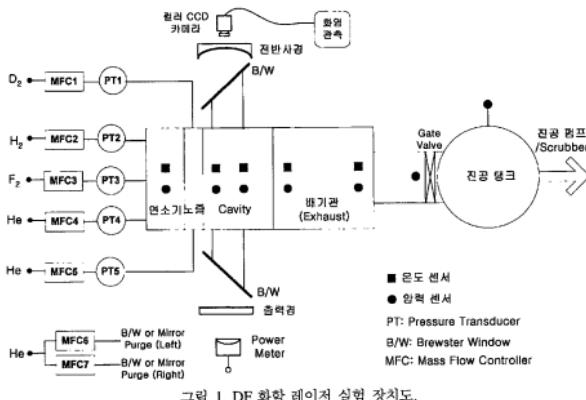
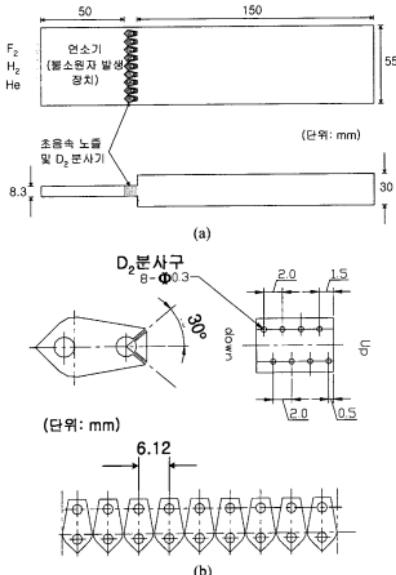


그림 1. DF 화학 레이저 실험 장치도.

험장치를 구성하였다. 본 실험에서 사용된 발진기 시스템의 구성도 및 측정장치는 그림 1과 같다. 기체공급은 각각의 기체 실린더 출구에 레귤레이터(regulator)를 설치하여 압력을 조정하도록 하였으며, 연소기 공급기체(F_2 , H_2 , He), 공동(cavity) 공급기체(D_2 , He), 브루스터창 및 레이저 거울 보호용 He 등의 공급 라인에 MFC(Mass Flow Controller, Lintec Co., Ltd. 모델 MC-2200NO)를 부착하여 독립적으로 유량을 제어 할 수 있도록 구성하였다. MFC 양단에는 공압 솔레노이드 밸브를 설치하고 PLC(Programmable Logic Controller, Allen-Bradley사 모델 1746-en-p) 프로그램에 의해 공압밸브의 개폐를 자동 제어함으로써 기체공급을 자동 원격제어할 수 있도록 구성하였으며 또한 MFC 출구쪽에 압력센서 PT(Pressure Transducer)를 설치하여 이득매질 발생장치로 실제 공급될 때의 기체압력을 실시간으로 모니터링하였다. 배기장치로는 25 m³/분 용량의 진공탱크를 사용하여 현재의 공급기체 유동조건에서 최대 약 30초간 발진이 가능하도록 하였으며 발진실험이 끝난 후에는 진공펌프와 건식형 중화장치를 통해 불소화물을 처리할 수 있도록 하였다.

레이저 공진기는 전반사경으로서 지름 2인치, 반사율 99.5%, 광률반경 5 m인 ZnSe와 출력경으로는 지름 2인치, 반사율 97%인 평면 ZnSe를 사용한 안정형 공진기 구조이다. 공급기체 유동조건 및 광축위치에 따른 출력특성 측정시에 부착시킨 브루스터창으로는 직사각형의 CaF₂를 사용하였으며 최대출력 조건을 구한 후에는 브루스터창을 제거하고 레이저 거울을 공동에 직접 부착시켜 출력을 측정하였다. 레이저 출력 측정에는 Coherent사의 출력센서(모델 1000)와 측정계기(FieldMaster)를 사용하였으며, 연소기, 공동, 배기기관으로 구성된 유동구조부에 설치된 압력 및 온도 센서는 기체 흐름에 방해를 주지 않기 위해 가능한 한 벽쪽으로 설치되었으며 측정은 PLC에 의해 실시간으로 기록되도록 구성하였다. 또한 공동에서 화학반응에 의해 발생되는 화염 양상을 관측하기 위해 전반사경쪽에

그림 2. DF 화학 레이저 이득매질 발생장치 (a) 이득매질 발생장치 구성도 (b) 초음속 노즐 및 D₂ 분사기.

컬러 CCD 카메라를 설치하였다.

이득매질 발생장치는 그림 2에 나타낸 바와 같이 산화제로

서 F_2 기체, 연료로서 H_2 기체, 히스테로서 He 기체를 사용하여 $F_2 + H_2$ 반응시 발생되는 열($F_2 + H_2 \rightarrow 2HF, \Delta H = -130$ kcal/mol F_2)에 의해 잉여의 F_2 분자를 열분해하므로써 F원자를 만드는 연소기(불소원자 발생장치)와 초음속 확산혼합에 의한 $F+D_2$ 반응에 의해 DF 여기분자를 만드는 초음속 노즐 및 D_2 분사기로 구성하였다. 설계 마하수 4.0인 9개의 단위노즐로 구성된 초음속 노즐격자는 높이 약 1 cm, 출구폭 약 5.5 cm이며, D_2 분사기는 연소기로부터 초음속 노즐을 통해 나오는 불소원자 기체와 D_2 기체의 혼합에 확실하게 이루어지도록 D_2 기체가 30° 각도로 분사되는 구조로 제작하였다. 이와 같은 이득매질 발생장치의 설계에는 연소유동 상태의 시뮬레이션에 필요한 조건 설정을 위해서 기체역학 근사식을 이용하여 자체 개발한 프로그램을 사용하였고, 본격적인 연소유동 상태 시뮬레이션에는 상용 프로그램인 FLUENT 5.2를 활용하였다. $F+D_2$ 반응시 방출되는 열량은 32 kcal/mol(F)이기 때문에 생성된 F원자가 모두 반응에 사용되었다고 가정하면 화학효율은 $\eta(\%) = 100 \times P/(P_{\text{f}} \cdot n_F)$ (P 는 레이저 출력, kW; n_F 는 F원자 몰유량, mol/sec)와 같이 계산되며 kW급 이상의 고출력 DF 레이저인 경우 ~10%의 전형적인 값을 갖는다.^[9]

III. 실험 결과 및 토의

본 실험에서는 발진실험 이전에 연소기에만 기체를 공급하여 유동특성과 공동에서의 화염발생 여부를 조사하여 연소기의 불소원자 발생성능을 간접적으로 평가하였다. 이 경우에 연소기 압력은 공급기체 유량에 따라 1~2 기압, 공동에서의 압력은 약 1 torr로서 설계값에서 크게 벗어나지 않았고 공동에서는 화염이 관측되지 않아 연소기에서 H_2 기체는 원천연소되는 것으로 추정된다. 이와 같은 연소기 조건에서 공동에 D_2 기체를 공급할 때는 $F+D_2$ 반응시 발생되는 것으로 알려진 녹황색의 화염을 관측하였고 공동압력도 2~3 torr로서 DF 레이저 발진조건을 만족한다는 것을 확인하였다. 발진실험 시간은 기체소모량 및 안전성을 고려하여 가능한 한 짧게 유지하면서 레이저 출력특성을 충분히 나타낼 수 있도록 약 10초간 동작시켰다. 레이저의 유동특성은 브루스터창의 사용여부와 관계없이 동일하며 $F_2 = 0.0173$ mol/sec, $H_2 = 0.0115$ mol/sec, 연소기 He = 0.0115 mol/sec, $D_2 = 0.0228$ mol/sec의 유량조건 하에서 레이저 발진시간 동안 측정한 각 위치별 압력 특성은 그림 3에 나타나 있다. 여기에서 나타난 바와 같이 기체공급이 시작될 때 공동에서의 압력이 급격히 상승하는 것으로 보아 불소와 중수소기체의 반응이 잘 일어나는 것을 알 수 있으며 배기장치로서 진공탱크를 사용하였기 때문에 기체공급이 중단된 후에는 일정한 압력을 유지하고 있다.^[14]

이와 같은 결과를 토대로 브루스터창을 사용한 레이저에서 최대출력을 얻을 수 있는 공급기체 유량조건을 찾기 위해 먼저 D_2 기체의 공급유량을 변화시켜 F_2 기체 공급률에 따른 출력변화를 측정하고, 다음에 다른 유량 변수는 고정시키고 F_2 기체 공급률의 최적값을 결정하였으며, 마지막으로 연소기 He 유량을 변화시켜 연소기 He 히스테를 따른 출력변화를 계측하였다. 또한 빙의 크기 및 단면분포(도드)를 파악하기 위해서

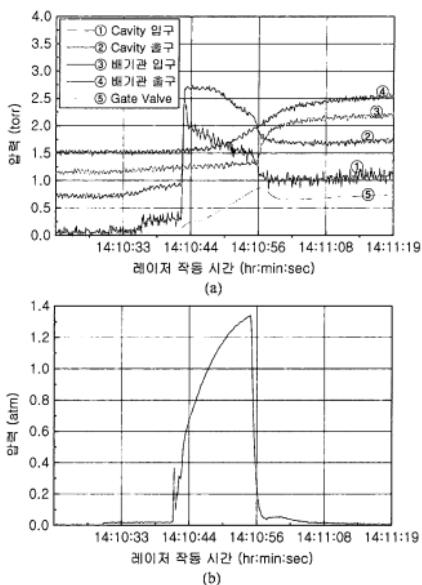


그림 3. DF 화학 레이저의 압력특성 측정결과(최적 유량조건, 출력 79.0 W) (a) 각 위치별 압력 특성 (b) 연소기 압력 특성.

일반적 방법인 아크릴판을 이용한 탄무늬(burn pattern) 관측방법을 사용하였다.^[15] 탄무늬 관측 결과 화학반응 영역이 노즐 출구 바로 후단 부위에 분포되어 있음을 알 수 있었으며, 균일한 빔강도 분포는 아니지만 최대출력 조건에서 대략적으로 높이가 약 1 cm, 길이가 약 2 cm인 직사각형의 단면면 모양을 확인하였다. 이득매질 발생장치의 구조상 이득매질의 단면이 직사각형(초음속 노즐격자 높이: 약 1 cm)으로 예측되고 이득매질에 비해 공진기 거울의 크기(지름 2인치)가 매우 크며 공진기 내에 별도의 모드 제한 요소를 설치하지 않았기 때문에 다중모드로 이득매질의 거의 전영역에서 발진한 것으로 판단된다. 이와 같은 실험에 의해 최대출력을 나타내는 조건은 초음속노즐 출구면에서 광축까지의 거리가 15 mm인 공진기 구성에서 H_2 몰유량비 F_2 몰유량비가 약 1.5, 연소기 He 몰유량비가 약 1.0, D_2 몰유량비가 약 2.0인 기체공급비율을 갖는다는 것을 알 수 있었다. 이 경우에 얻어진 출력의 최대값은 48.2 W이다. 또한 분광계(Macken Instruments, Inc. 모델 16D-DF)를 사용하여 10개의 DF 레이저 발진라인 [P1(8)-3.680 μm, P1(9)-3.716 μm, P1(10)-3.752 μm, P1(11)-3.790 μm, P2(8)-3.800 μm, P2(9)-3.838 μm, P2(10)-3.876 μm, P3(8)-3.927 μm, P3(9)-3.965 μm, P3(10)-4.005 μm]을 관측하므로써 진동-회전준위 진이에 의한 DF 화학 레이저의 다중선

발진 특성을 확인하였다.

이와 같이 구한 최적조건에서 공진기 손실을 최소화시키기 위해 브루스터창을 제거하고 레이저 거울을 직접 공동에 부착 시킨 후에 공급기체의 총유량에 따른 레이저 출력 특성을 측정하였다. 이 경우에도 불소화합물로부터 레이저 거울을 보호하고 이득 손실을 가져오는 바탕상태 DF 분자의 재순환을 방지하기 위해 브루스터창을 사용할 때와 마찬가지로 거울면의 앞부분에 He 기체를 분사시켰다.

앞에서 구한 기체공급 비율을 갖는 기준 공급기체 유량조건은 $F_1 = 0.0173 \text{ mol/sec}$, $H_1 = 0.0115 \text{ mol/sec}$, 연소기 He = 0.0115 mol/sec, $D_2 = 0.0228 \text{ mol/sec}$ 이며, 이 경우에 측정된 레이저 출력은 79.0 W이다. 연소기에서 H_2 기체가 완전 연소되고 잉여의 F_2 기체가 모두 불소원자로 분해된다면 가정하면 $F = 0.0116 \text{ mol/sec}$ 이기 때문에 앞에서 정의된 화학효율은 5.12%, 공급기체 총유량에 대한 레이저 출력비인 비출력(specific power)은 96.5 J/g으로서 기존의 발진기에 비해 다소 낮은 성능을 나타내고 있다. 이와 같이 발진기 성능이 다소 낮은 결과는 연소기의 불소원자 발생효율 및 초음속 노즐/D₂ 분사기에 의한 DF 여기분자 발생효율이 낮거나 출력경 반사율의 최적값 차이 등에 의한 것으로 생각되지만 현재로서는 각각의 성능을 직접 평가할 수단이 없어 레이저 출력값으로 전체적인 성능만을 판단하였다. 출력을 증가시키기 위해 공급기체의 총유량 증기에 따른 출력 특성을 조사한 결과, 총유량이 1.02 g/sec ($F_2 = 0.0224 \text{ mol/sec}$, $H_2 = 0.0150 \text{ mol/sec}$, 연소기 He = 0.0150 mol/sec, $D_2 = 0.0187 \text{ mol/sec}$)일 때 레이저 출력은 91.0 W이

었으며, 1.11 g/sec ($F_2 = 0.0241 \text{ mol/sec}$, $H_2 = 0.0161 \text{ mol/sec}$, 연소기 He = 0.0161 mol/sec, $D_2 = 0.0241 \text{ mol/sec}$)일 때는 101 W의 출력을 나타내었다. 이 경우에 화학효율은 각각 4.62%와 4.75%, 비출력은 89.5 J/g과 91.0 J/g이며 유량증가에 따라 연소기 압력이 계속 증가하여 안전성 문제로 더 이상 유량을 증가시키지 않았다. 공급기체의 유량이 증가함에 따라 DF 여기분자의 밀도가 증가하여 이득은 증가하지만 압력과 온도 또한 증가하고 HF, D₂ 등의 충돌이원자의 밀도도 증가하여 밀도반전을 감소시키는 충돌이원률이 증가한다. 따라서 그림 4에 나타낸 바와 같이 유량증가에 따라 레이저 출력은 증가하지만 효율은 낮아지는 것을 알 수 있으며 이것은 일반적인 DF 화학 레이저의 특성과 일치한다. 또한 발진 조건인 기체 유량비를 변화시키면서 10회 이상 출력을 측정한 결과, 기체 유량비가 일정한 경우 출력값의 변화는 ±0.5 W내에 있다. 이러한 출력의 안정성은 레이저 이득배질이 안정된 기계적 구조(조음 속 노즐)에 의해 생성되는 화학 레이저의 고유한 특성으로 생각된다.

IV. 결 론

연소방식에 의한 불소원자 발생과 초음속 노즐을 통한 F+D₂ 반응에 의해 DF 여기분자를 발생시키는 100 W급의 연속발진형 DF 화학 레이저를 제작하고 출력경 반사율이 97%인 안정형 공진기 구조에서 발진 실험을 수행하였다. 브루스터창을 부착한 공진기를 구성하여 최대출력을 나타내는 공급기체의 유량조건 및 공진기의 광축위치를 구하는 실험을 먼저 수행하여 최적조건을 찾았으며, 다음에 공진기 손실을 최소화시키기 위해 브루스터창을 제거하고 레이저 거울을 직접 공동에 부착시켜 101 W의 출력을 달성하였다. 이러한 이득배질 발행장치는 고출력의 DF 레이저광을 얻기 위해 필수적인 방식으로 현재 화학효율은 약 5%로서 다소 낮은 수준이지만 연소유동 시뮬레이션을 통한 해석과 축소장치 실험을 통해 향후에는 약 10%의 화학효율을 얻을 수 있는 수준까지 가능할 것으로 판단된다. 이와 같은 발진기 성능의 기선을 통해 실제로 적용할 수 있는 수십 kW급 이상의 고출력 DF 화학 레이저 개발을 위한 기본기술이 확보될 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] R. W. F. Gross and J. F. Bott, *Handbook of Chemical Lasers* (John Wiley & Sons, New York, USA, 1976), Chapter 1.
- [2] W. R. Warren Jr., "Chemical lasers," *Astronautics and Aeronautics*, vol. 13, no. 4, pp. 36-49, 1975.
- [3] R. W. Waldo, "Advanced cw hydrogen fluoride chemical laser performance," in *AIAA 24th Plasmadynamics & Lasers Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Orlando, USA, 1993, AIAA Paper 93-3184.
- [4] R. Ackerman, D. Callahan, A. Cordi, H. Lurie, and M. Thomson, "Alpha high power chemical laser program," in *Gas Flow and Chemical Lasers*, W. L. Bohm and H. Hugel, Eds., *Proc. SPIE*, vol. 2502, pp. 358-364, 1994.

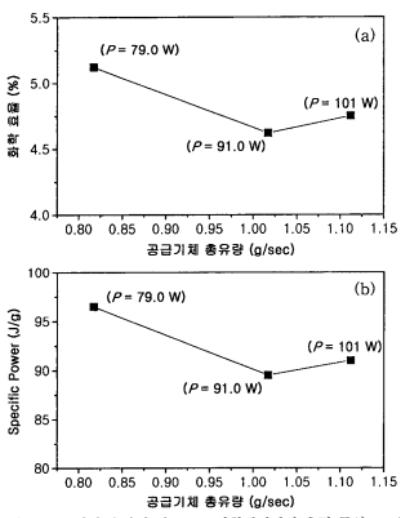


그림 4. 공급기체 유량에 따른 DF 화학레이저의 출력 특성 (a) 화학 효율 (b) Specific Power.

- [5] K. A. Truesdell, C. A. Helms, and G. D. Hager, "A history of COIL development in the USA," in *Gas Flow and Chemical Lasers*, W. L. Bohn and H. Hugel, Ed., *Proc. SPIE*, vol. 2502, pp. 217-237, 1994.
- [6] F. Vizard, "Return to star wars," *Popular Science*, pp. 56-61, April 1999.
- [7] W. R. Warren Jr., "Reacting flow and pressure recovery processes in HF/DF chemical lasers," *Acta Astronautica*, vol. 1, pp. 813-834, 1974.
- [8] D. J. Spencer, H. Mirels, and T. A. Jacobs, "Comparison of HF and DF continuous chemical lasers: I. Power," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 16, no. 10, pp. 384-386, 1970.
- [9] L. E. Wilson, "Deuterium fluoride cw chemical lasers," *Journal de Physique*, vol. C9-N11, no. 41, pp. C9_1-C9_8, 1980.
- [10] R. A. Meinzer, "A continuous-wave combustion laser," *Int. J. Chem. Kinetics*, vol. 2, p 335, 1970.
- [11] D. C. McCarthy, "A few good beams: a light-speed defense against mach-speed missiles," *Photonics Spectra*, pp. 102-112, April 1999.
- [12] R. J. Driscoll and G. W. Tregay, "Flowfield experiments on a tripped DF chemical laser," in *AIAA 14th Fluid and Plasma Dynamics Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Palo Alto, California, USA, 1981, AIAA Paper 81-1271.
- [13] R. W. F. Gross and J. F. Bott, *Handbook of Chemical Lasers* (John Wiley & Sons, New York, USA, 1976), Chapter 5.
- [14] 김재기, 이정환, 박병서, "100 W급 불화증수소 화학레이저 설계," TEDC-520-000852, 국방과학연구소, 2000.
- [15] R. W. F. Gross and J. F. Bott, *Handbook of Chemical Lasers* (John Wiley & Sons, New York, USA, 1976), Chapter 4.

Output characteristics of a continuous wave deuterium fluoride chemical laser

Jung Hwan Lee[†], Byung Suh Park, and Jai Ki Kim
Agency for Defense Development, Daejon 305-600, KOREA
[†]E-mail: junghwan@add.re.kr

(Received August 21, 2001 ; revised manuscript received January 9, 2002)

A continuous wave deuterium fluoride (DF) chemical laser was designed and manufactured, and we have achieved DF laser beam generation with the maximum output power of 101 W. The gain medium is vibration-rotationally excited DF molecules produced by F+D₂ cold reaction through supersonic diffusion mixing in an optical cavity. F atoms are produced in a combustor by F₂+H₂ reaction and injected into the cavity through a supersonic nozzle. The optimal chemical efficiency was measured to be 5.12% and specific power to be 96.5 J/g.

Classification codes : LO.040, OS.010, SM.020.