

## 연속발진 불화중수소(DF) 레이저 출력특성

### Output Characteristics of CW DF Laser

김 재 기\*

국방과학연구소

j0k0kim@hotmail.com

본 연구에서는 연속발진 출력을 얻기 위해서 일차적으로 수소와 불소를 연소시켜 발생된 열에너지를 이용하여 불소분자( $F_2$ )를 원자상태의 불소(F)로 분리하고, 이 불소원자(F)를 초음속 노즐을 통해서 흐르게 한 후 중수소( $D_2$ )와 화학 반응시켜 활성매질인 들뜬상태의 중수소분자( $DF^*$ )를 얻는다. 발진된 레이저 최대 출력 값은 약 11.5kW이며, 발진라인은 10개로 최대 세기를 갖는 라인인  $P(10)-3.752\mu m$ 이다. 또한 최적의 유량조건에서 얻은 화학 효율은 약 16 %, specific power는 약 188J/g이다.

연속발진 DF 화학 레이저는 산화제인 F원자와 연료인  $D_2$  기체의 화학반응에 의해 DF 여기분자를 발생시켜 진동-회전 준위간의 전이에 의해 레이저광을 얻는다.<sup>(1)</sup> 따라서 레이저 발진기의 가장 중요한 부분은 활성매질인 들뜬상태의 불화중수소( $DF^*$ )를 발생시키는 이득매질발생장치와 유도 방출된 빛을 증폭시켜주는 공진기로 구성된다. 레이저 활성매질인 들뜬상태의 불화중수소를 효율적으로 얻기 위해서  $F+D_2 \rightarrow DF+D$  화학반응(cold reaction)을 이용한다. 따라서 일차적으로 원자상태의 불소를 공급해 주어야 하는데, 일반적으로 불소분자( $F_2$ )나 불소화합물을 분해하여 얻어진 불소원자를 이용한다.

본 연구에서 개발된 불화중수소 레이저에서는 연소장치(combustor) 내에서 불소와 수소를 연소시켜 발생된 열에너지를 이용하여 불소( $F_2$ )를 분리함으로써 단 원자상태의 불소(F)를 얻었으며, 레이저 활성매질인  $DF^*$ 의 빠른 교체 및 균일한 공간적 분포를 얻기 위해서 134개의 Spray bar형 초음속 노즐격자(nozzle array)를 사용하여  $F+D_2 \rightarrow DF+D$  화학반응을 일어나게 하였다. 연소장치와 초음속노즐/분사장치의 설계에 필요한 연소유동 상태의 시뮬레이션 조건 설정을 위해서 기체역학 근사식을 이용한 프로그램을 자체 개발하여 사용하였으며, 본격적인 연소/유동 상태 시뮬레이션에는 상용 프로그램인 FLUENT 5.2를 활용하였다.<sup>(2)</sup>

레이저 발진 실험장치는  $F_2$ ,  $H_2$ , He,  $N_2$ ,  $D_2$  등의 기체공급장치, 불소원자를 발생시키는  $F_2-H_2$  연소장치, 불소원자 기체의 초음속 흐름을 유지하고 중수소를 분사하여 활성매질인  $DF^*$ 를 발생시키는 F- $D_2$  연소장치, 수동형 공진기, 진공탱크, 진공펌프, 유독기체 중화장치, 유동특성측정을 위한 계측장비, 원격 제어 및 데이터 저장을 위한 컴퓨터 시스템 등으로 구성되어 있으며, 유독기체 누출 시 경보를 발하는 탐지센서/경보장치로 구성되어 있다.<sup>(3)</sup> 레이저발진에 사용되는 불소는 부식성이 강하므로 인체에 극히 유독하고 수소나 중수소는 폭발성이 있으며, 또한 배출기체인 HF나 DF도 매우 유독하므로 안전성을 고려하여 기체공급 조정이 원격제어가 가능하도록 제작하였다. 또한 각 유동 부위의 압력 및 온도 측정을 위하여 센서를 설치하고, 측정값이 레이저가 발진하는 시간 동안 통신라인을 통해 PC에 자동 저장되도록 하였다.

연소장치용 공급기체( $F_2$ ,  $H_2$ ,  $D_2$ , He), Brewster window 및 레이저 거울을 보호하기 위한 purge용 He 기체 등의 유량은 MFC(Mass Flow Controller ; Lintec Co. Ltd., 모델 MC-2200NO)와 소닉노즐 유

량을 사용하여 각각 필요한 값으로 정밀하게 조절한 후, 레이저를 발진시킬 때는 MFC 양단에 설치된 공압 슬레노이드 밸브와 PLC(Programmable Logic Controller, Allen-Braley사, 모델 1746-en-p)를 이용하여 밸브의 개폐만을 원격 제어한다.

불소원자를 발생시키는 F<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> 연소장치는 불소와 수소의 화학반응이 균일하게 잘 일어나도록 하기 위하여 직경 0.6mm인 홀 array(594개)를 통해서 불소분자와 수소분자가 80°각으로 충돌하는 구조로 되어 있다. 불소기체가 분사되는 홀에 헬륨 기체를 혼합하여 흘러 보내고, 헬륨기체 유량을 조절하여 불소-수소 화학반응 속도를 조절할 수 있다. 여기상태의 중수소분자를 발생시키는 F-D<sub>2</sub> 연소장치는 균일한 DF 활성매질을 얻기 위하여 134개의 노즐로 구성된 노즐격자와 다수의 분사 홀로 구성된 Spray bar중 수소의 분사장치로 구성되어 있다. 연속발진 레이저에서 높은 출력을 얻기 위해서는 활성매질을 빠르게 교체해주어야 하는데, 일반적으로 활성매질의 흐름을 초음속노즐을 이용하여 아음속에서 초음속으로 변환시켜준다. 본 연구에서 넓은 영역에서 균일한 초음속 흐름을 얻기 위해, 134개의 단위 초음속노즐로 구성된 노즐격자(2×67개)를 사용하였다. 단위노즐은 3~4범위의 마하 수를 얻도록 설계되었으며, 초음속노즐 목의 높이가 약 1.95mm, 노즐 폭은 3.0mm이며, D<sub>2</sub> 분사 홀은 직경이 0.3mm로 spray bar 1개 당 60개 홀이 F기체 흐름과 80°로 충돌하도록 뚫어져 있다. 레이저 공진기는 지름 4인치, 반사율 99.5%, 곡률반경 10m인 ZnSe 전반사경과 지름 4 인치, 반사율 87 %인 평면 ZnSe 출력경으로 구성된 길이 1m의 안정형 공진기 구조로 제작되었다. 발진실험 동안 진공탱크에 저장된 유독기체의 주성분은 주로 HF, DF, F<sub>2</sub> 등이므로, 이러한 기체를 3종의 화학물질(NaOH, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Activated Carbon) 층을 통과시켜 3단계 화학반응을 이용하여 중화시켰다.

레이저 발진출력은 공급기체의 총 유량이 1.11g/sec(F<sub>2</sub>=0.65971 mol/sec, H<sub>2</sub>=0.38831 mol/sec, He=4.3841 mol/sec, D<sub>2</sub>=4.3841 mol/sec)일 때는 11.5kW의 출력을 얻었다.<sup>(4)</sup> 이 경우 화학효율은 15.9 %, specific power는 188.3 J/g가 된다. Spectrum Analyzer(Macken Instruments, Inc. 모델 16D-DF)를 사용하여 DF 레이저 분광을 측정된 결과, 발진라인은 P1(8), P1(9), P1(10), P1(11), P2(8), P2(9), P2(10), P3(8), P3(9), P3(10) 등 10개의 진동-회전준위 전이 대응하여 3.680~4.005μm 범위에 분포되어 있으며, 발진라인 P1(10)-3.752μm에서 세기가 최대가 됨을 확인하였다.

연소방식에 의한 F원자 발생하고, 초음속노즐을 이용하여 F+D<sub>2</sub> 반응에 의한 DF 여기분자를 발생시키는 출력 10kW의 연속발진형 DF 화학 레이저를 설계/제작하고 출력경 반사율이 87 %인 안정형 공진기 구조에서 9초의 발진지속시간 동안 11.5kW의 출력을 얻었다. 이 경우 레이저의 화학효율은 15.9%로서 현재까지 발표된 문헌상의 수치를 상회하는 좋은 연구결과를 얻었다. 따라서 본 연구에서 개발된 불화중수소 레이저에 사용된 이득매질발생장치는 매우 우수한 성능을 발휘하도록 설계/제작되었다고 판단된다. 또한 본 실험에서 얻은 레이저 출력은 설계 값의 60%에 해당하는 기체유량을 공급하여 레이저를 발진시켜 얻은 것이므로 설계 값대로 기체유량을 공급할 경우 약 20kW 출력을 얻을 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

1. F. Vizard, "Return to Star Wars," Popular Science", pp. 56-61(April 1999)
2. 김 재 기, "10kW급 불화중수소 화학레이저 설계", ADD TEDC-520-011129, 35-80(2001).
3. 김 재 기, "10kW급 불화중수소 화학레이저 제작", ADD TEDC-520-021025, 2-114(2002).
4. 김 재 기, "10kW급 불화중수소 화학레이저 발진실험 결과 및 분석", ADD TEDC-520-021039, 52-64(2002).