

넓은 범위의 압력에서 Xe 농도 변화에 대한 XeF(C→A) 레이저의 출력특성

류한용 · 이주희

경희대학교 전자공학과

(1994년 6월 30일 받음)

레이저매질의 넓은 압력범위(0.5~3.5 기압)에 대해 70 ns [FWHM]의 전자빔 가속기(800 kV, 21 kA)로 여기할 때 free-running XeF(C→A) 엑시머 레이저의 출력과 Xe 농도와의 상호관계를 조사하였다. 공진기를 쌍색성의 출력거울로 구성하고, 레이저 출력을 레이저매질(Xe/F₂/Ar)의 총압력과 가스혼합비의 함수로써 최적화 하였다. F₂ 0.46%를 고정한 조건에서, 레이저 고유효율은 총압력 1, 2, 3 기압에서 최대 0.38%, 1.03%, 0.29%로 측정되었다. 이때 레이저의 최대 고유효율은 레이저매질의 총압력이 낮을수록 높은 Xe 농도에서 높게 나타났다. 이같은 상호관계를 XeF*(C)의 형성효율 및 XeF(C→A) 레이저 총출효율에 대해 동력학적으로 해석하므로써 Xe 농도의 의존성을 설명하였다. 그 결과로 대기압 XeF(C→A) 레이저의 효율적인 동작을 제안한다.

I. 서 론

XeF(C→A) 엑시머 레이저의 free-running 특성은 약 480 nm의 중심파장에서 넓은 가시영역의 스펙트럼 분포를 갖고 있으므로 레이저를 이용하는 원격탐사에 유용하고 또한 파장 가변성의 특성을 이용한 레이저 분광학 및 생의학, 물질가공 등에서 응용 가능성이 크다. 더욱이 C→A 천이의 분광학적 특징은 희ガ스 할라이드(Rare-gas halide, RgX) 엑시머의 매우 큰 천이확률을 갖는 B→X 천이와 비교되므로 최근 이에 대한 연구가 활발하다.

최근의 XeF(C→A) 레이저 연구는 다양하여 이의 대표적인 것은 170 J의 전자빔여기 펄스 레이저 개발^[1], TW급의 극초단 펄스증폭^[2], 대역폭의 단일 모드 동작^[3], 방전여기 레이저의 개발^[4,5], 표면 방전을 이용한 XeF₂ 광분해^[6] 등이 보고되고 있다.

한편 대출력 전자빔여기 RgX 엑시머 레이저에서는 순간 회절계수 변화로 레이저의 성능이 감소하는 광학적 비선형성이 제기되었다^[7]. 이것을 억제하기 위한 한 방법으로 레이저 매질의 압력을 대기압 이하로 하는 제안이 ArF 레이저^[8], KrF 레이저^[9,10], XeF(C→A) 레이저^[11]에 대하여 보고된 바 있다. 레이저매질을 대기압 이하로 사용할 때 대구경 증폭시스템을 경량화 할 수 있고 시스템의 비용을 절감할 수 있는 장점이 있다. 반면에 이와 같은 레이저 시스템의 동작효율을 증진시키기 위해서

는 전자빔 축적능력(stopping power)이 큰 완충가스(buffer gas)를 사용하여 높은 전자빔 축적에너지를 유도하거나 동력학(kinetics)에 근거한 가스 혼합비율 및 총압력의 최적화가 이루어져야 한다.

RgX*엑시머 형성을 위한 직접적인 모체(precursor)가 되는 Rg⁺ 및 Rg*의 수밀도를 증가시키기 위해 많은 양의 Rg를 사용한 예도 있다. Suda 등^[9]은 1~1.7 MW/cm³의 여기밀도를 갖는 전자빔으로 Kr/F₂/Ar의 혼합가스를 사용한 1기압 KrF 레이저에서 Kr 농도 20%일 때 약 6%의 최대효율을 보고하였고, Bhatnagar 등^[10]은 방전여기 KrF 레이저에서 600 Torr 근처의 1기압 미만의 레이저 혼합가스에 대해 Kr 농도 12.3%때 최대 출력임을 보고하였다. Bhatnagar 등의 결과는 일반적인 방전여기 방식에서 He 또는 Ne 완충가스를 사용하지 않고 Ar을 사용하므로써 낮은 압력에서도 높은 여기밀도(1.5 MW/cm³)의 입력에너지를 유지시켜 효율적인 저압력 KrF 레이저를 가능하게 했다. 이와 달리 Nighan 등^[12]은 고압력의 혼합가스를 전자빔여기(10 MW/cm³)하여 XeF(C→A) 레이저의 최적 동작조건을 Ar과 Kr의 두 완충가스를 사용하여 확인하였다. 이들은 Kr 완충가스를 첨가하므로써 Xe의 농도를 1% 미만으로 사용하였고, 이로써 Xe에 의한 청록색 광장대역의 흡수반응을 줄인 것을 동력학적으로 해석하였다. 대출력 고효율을 지향한 XeF(C→A) 레이저의 연구^[12]는 활발하였으나 대기압 레이저의 효

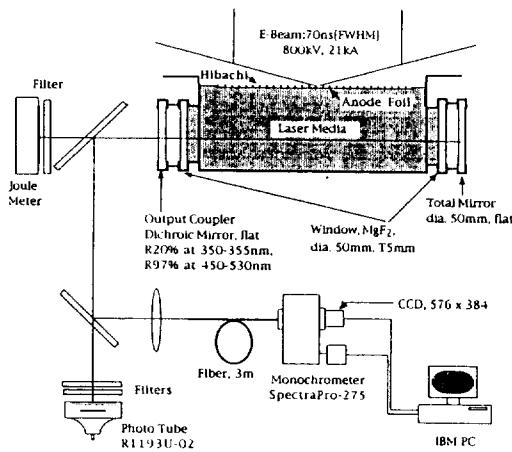


그림 1. Experimental layout.

율적인 동작을 조사한 보고는 아직까지 없다.

본 연구에서는 이와 같은 관점에서, 혼합가스($Xe/F_2/Ar$)의 총압력을 넓은 압력범위(0.5~3.5기압)로 변화하면서 70 ns [FWHM]의 전자빔 가속기(800 kV, 21 kA)로 여기할 때 free-running $XeF(C \rightarrow A)$ 레이저 출력을 Xe 농도의 함수로써 조사하였다. 실험에서 얻은 레이저 출력은 레이저매질의 총압력이 낮아질수록 높은 Xe 농도에서 높게 나타났다. 이의 상관관계를 저자들이 보고한 시뮬레이션^[13]의 해석 범위를 확장, 개선하므로써 고유효율, 형성효율, 추출효율에 대해 동력학적으로 해석하여 설명하였고, 그에 따라 대기압 $XeF(C \rightarrow A)$ 레이저의 효율적인 동작을 제시하고자 한다. 또한 최적화한 대기압의 레이저매질에 대한 Ne 완충가스 첨가효과, 동일한 레이저매질에서 동시에 발진하는 $XeF(B \rightarrow X)$ 및 $XeF(C \rightarrow A)$ 의 레이저 펄스, 스펙트럼 등의 측정 결과를 토론한다.

II. 실험장치

본 실험에 사용한 시스템은 그림 1과 같다. 전체 실험장치는 전자빔 가속기와 펄스 자계 코일, 레이저 공진기로 구성되어 있으며^[14], 그림 1은 레이저 공진기와 검출장치를 중심으로 나타내었다. 70 ns [FWHM]의 펄스폭을 갖는 전자빔 가속기의 전압과 전류는 각각 800 kV와 21 kA이며, 전자빔 가속기의 다이오드와 레이저 공진기 외부에서 인가하는 펄스 자계에 의해 전자빔을 제어하였다. 이때 전자빔 가속기의 다이오드에서 측정한 출력전압과 전류의 대표적인 과정을 그림 2에 나타내었다. 레이저 챔버에 입사하는 전자빔은 1기압 Ar 매질에서

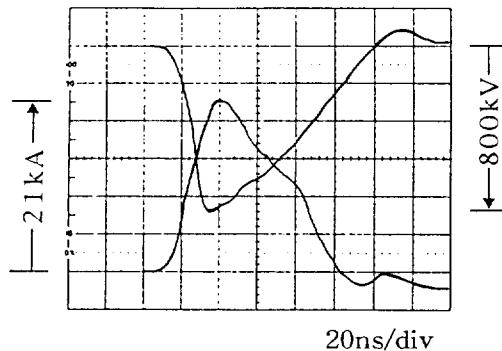


그림 2. Time histories of typical diode voltage and current of the electron-beam accelerator.

표 1. Parameters of the electron-beam and pulsed magnetic coil used in this experiments.

E-Beam

Voltage	800 kV
Current	21 kA
Pulse Width [FWHM]	70 ns
Anode (A)	Ti 50 m
Cathode (K)	L260 × W10 mm ²
A-K Gap	21 mm
Excitation Volume	2 × 28 × 6 cm ³
Deposition Energy	24~36 J at 1~3 atm
Pulsed Magnetic Coil	
Flux Density	4.7 kG
Inductance	1.23 mH

약 24 J의 전자빔 축적에너지를 가지며 이때 약 1 MW/cm³의 여기밀도를 갖는다. 표 1은 실험에 사용된 전자빔 가속기와 펄스자계 코일의 파라메타를 나타낸 것으로 전자빔에 의한 여기체적은 Ar 완충가스에서 전자빔 세기의 공간적인 분포를 측정하여 산출하였다.

레이저 공진기의 전반사거울과 출력거울은 레이저챔버(길이 65 cm)의 레이저창(재질 MgF₂, 지름 2인치, 두께 5 mm, 양면 AR 코팅, ARC)의 플랜지에 부착하여 평행평판형의 안정공진기로 70 cm 길이로 하였다. 전반사거울(지름 2 인치)은 Al 코팅하였고, 출력거울은 자외역($B \rightarrow X$ 천이)과 가시역($C \rightarrow A$ 천이) 레이저가 동시에 발진할 수 있도록 351~355 nm와 450~530 nm에서 각각 20%와 97%의 반사율을 갖는 평면의 쌍색성거울(dichroic mirror, 지름 40 mm, 두께 1/4 인치, PIC Russia)을 사용하였다. 레이저 에너지의 측정은 Molelectron J3-09와 Gentec ED-500의 에너지메타를 사용하였다. $B \rightarrow X$ 와 C

→A 레이저 펄스는 가시역과 자외역 차단필터(PIC, Russia)를 각각 사용하여 고속응답속도를 갖는 광전관(R1193U-02, Hamamatsu)으로 측정하였고 광전관의 포화를 방지하기 위해 감쇄필터를 사용하였다. 자외역에서부터 가시역의 청록색에 이르는 스펙트럼을 측정하기 위해 1200 Gr의 grating이 내장된 분해능 0.1 nm의 모노크로메타(SpectraPro-275, ARC)와 물과 질소 가스를 훌려 냉각하는 Cooled Intensified CCD(PI) 시스템을 사용하였다. 이 시스템은 과장에 대해서는 수은등으로, 세기에 대해서는 텅스텐 등과 뉴트륨등으로 눈금맞추기(calibration)를 하였다. 모노크로메타의 출력신호는 576×384 픽셀을 갖는 CCD면에 조사되어 이의 데이터는 PC-386으로 실시간 신호처리하였다. 레이저 가스는 실험연구용의 고순도 가스로서 Air Product사의 Ar(99.999%), Ne (>99.99%), Kr(>99.99%), F₂(He 50% balance, 99.5%)과 Linde(Germany)사의 Xe(99.99%)을 사용하였다. 실험에 앞서 Ar에 F₂ 10%를 혼합해 레이저 챔버에 약 24시간을 채워 충분한 passivation을 하므로써 실험시 레이저 혼합가스가 레이저 챔버 내벽(SUS-304) 및 양극막(티타늄)과 반응하는 암반응을 억제할 수 있었다.

III. 출력특성

1. 가스혼합비의 최적화

Xe/F₂/Ar의 레이저매질을 사용하는 XeF(C→A) 엑시머 레이저 시스템에서 우선되어야 할 파라미터는 일정한 여기에너지에 대한 가스혼합비의 최적화이며 이에 대한 동력학의 이해가 요구된다. XeF*(C) 분자의 형성, 상준위에서의 소광(quenching)과 완화, 청록색 파장에 대한 매질들의 흡수과정들이 가스 혼합비를 최적화하므로써 설명되어질 수 있기 때문이다. 먼저 매질의 총압력을 2.5기압으로 고정한 채 F₂ 할로겐 도우너(donor)에 의존하는 XeF(C→A) 레이저 출력에너지를 조사하였다. 그림 3은 F₂ 농도에 대한 레이저 에너지를 1기압과 2.5기압에 대해 나타낸 것이다. 이때 1기압에 대한 출력을 자세히 보기 위해, 1기압 레이저매질에 대한 XeF(C→A) 레이저 출력에너지는 2차 Y-축에 나타냈다. 2.5기압의 경우, Xe 농도를 1.84%(35 Torr)로 고정한 후 F₂ 농도를 변화 했을 때 F₂ 0.26%(5 Torr)에서 약 90 mJ의 최대 에너지가 측정되었고, 1 기압의 경우는 Xe 농도를 4%(30 Torr)로 고정하고 F₂ 농도를 변화시켜 0.46%(3.5 Torr)에서 최대 에너지가 26 mJ로 측정되었다. 두 곡선의 경향에서 볼 수 있듯이 RgX 엑시머 레이저는 할로겐 도우너 농도의 소량 변화에도 출력에 큰 영향이 미치는 것을 알 수 있다.

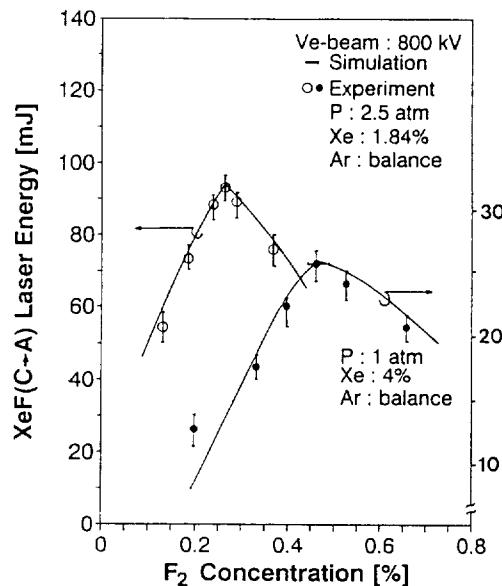


그림 3. XeF(C→A) laser output energy as a function of F₂ halogen donor concentration with 1 atm (●—●) and 2.5 atm (○—○). The circles and lines depict the data of experiment and simulation, respectively.

여기서 오차의 범위가 표시된 데이터의 한 점은 한 혼합가스에 대해 2회씩 5회 반복 측정하여 높은 빈도수를 얻은 값에 대해 기록한 것이고 실선은 컴퓨터 시뮬레이션의 결과로써 나타낸 것이다^[13]. 이때 측정값의 오차는 전자빔 입력에너지 및 레이저가스의 수동공급에 의한 오차에 의해 발생되는 것으로 판단된다. 레이저매질내에서 F₂ 할로겐 도우너는 전자와의 충돌반응에 의해 F 원자와 F⁻ 음이온으로 분리되고, Xe의 여기(Xe*, Xe₂*, Xe^{**}, Xe₂^{**})되거나 이온화(Xe⁺, Xe₂⁺)된 종류들과 결합하여 XeF* 엑시머의 B-상태로 형성된 후 F₂ 분자와의 충돌혼합에 의해 XeF*(C)를 형성하게 된다. 또한 F₂ 분자 또는 F 원자는 XeF* 엑시머가 레이저 천이를 하기 전에 충돌하여 축퇴되는 소광반응과 청록색 파장의 광자흡수 반응으로 레이저 동작에 손실로써 작용되는 이면성이 있기 때문에 이의 최적화는 매우 중요하다^[15].

그림 4는 Xe 농도에 대한 XeF(C→A) 레이저 출력을 나타낸 것으로, 데이터의 표현방법은 그림 3과 같다. F₂ 농도는 그림 3의 결과에서 얻은 값으로 2.5기압과 1기압에 대해 각각 0.26% (5 Torr)와 0.46% (3.5 Torr)로 고정하였다. 여기서 할로겐 도우너로 사용한 F₂ 가스는 He와 1:1로 혼합되어 있으나 본 연구에서는 He의 양은

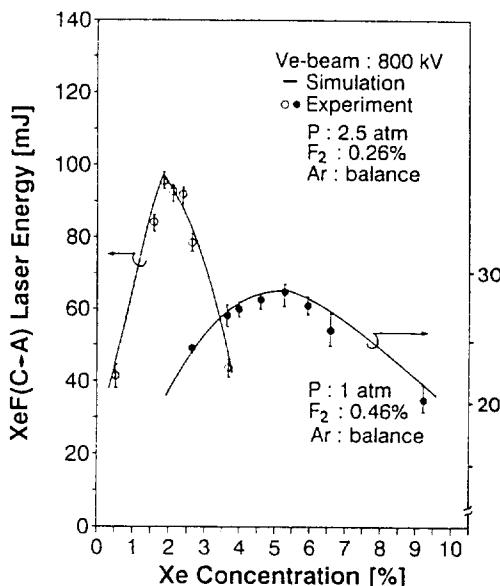


그림 4. $\text{XeF}(C \rightarrow A)$ laser output energy as a function of Xe concentration with 1 atm (●—●) and 2.5 atm (○—○). The circles and lines depict the data of experiment and simulation, respectively.

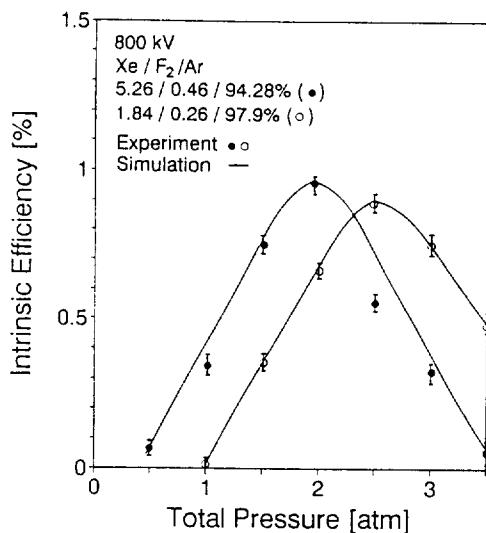


그림 5. $\text{XeF}(C \rightarrow A)$ laser intrinsic efficiency as a function of total gas pressure. The optimal values of Xe/F₂/Ar gas mixture are fixed with 1.84/0.26/97.9% and 5.26/0.46/94.28% for 2.5 atm (○—○) and 1 atm (●—●), respectively. The circles and the lines depict the data of experiment and simulation, respectively.

무시한 채 순수 F₂ 양만을 고려했다. 왜냐하면 He에 대한 전자빔의 에너지 축적능력은 완충가스로 사용한 Ar에 비해 극히 작기 때문에 무시할 수 있었다. 레이저매질의 총압력이 2.5와 1기압 일 때 최대 출력에너지는 96 mJ과 28.5 mJ로 각각 측정되었고, 이때 Xe 농도는 각각 1.84% 와 5.26%이었다. Xe은 $\text{XeF}^*(C)$ 의 형성에 매우 중요한 충돌대상자로서 작용할 뿐만아니라 $\text{XeF}^*(C)$ 의 소광인자 ($8.8 \times 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$ ^[16])와 청록색 파장의 흡수인자($\text{Xe}^{**} + h\nu_{B0} \rightarrow \text{Xe}^+ + e$, $2.0 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ ^[17])로 잘 알려져 있다. $\text{XeF}^*(C)$ 상태는 $\text{XeF}^*(B) + M(\text{Ar}, \text{Xe}) \rightarrow \text{XeF}^*(C) + M(\text{Ar}, \text{Xe})$ 와 같은 반응으로 레이저 상준위에서의 충돌혼합에 의해 형성되는데, 이러한 반응에서 Xe는 Ar에 비해 약 70배 이상 큰 속도정수 ($6.0 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$ ^[18])를 갖고 있다. 또한 Xe의 원자량은 완충가스로 사용한 Ar의 원자량에 비해 약 3배 이상 커서 전자빔 축적에너지를 증가시키는 역할도 하게 된다. 따라서 이와같은 형성, 완화, 흡수작용에 대한 동력학을 종합해 볼 때, 1기압 조건에서의 Xe 농도는 2.5기압에서보다 높게 요구되는 것으로 판단된다.

그림 5는 1기압과 2.5기압에서 최적화된 가스 혼합비에 대한 $\text{XeF}^*(C \rightarrow A)$ 레이저 고유효율(레이저 에너지/전자

빔 축적에너지)을 총압력의 함수로써 나타낸 것으로 약 1%의 최대 효율이 2, 2.5기압에서 실험 및 시뮬레이션 결과로 얻어졌다. 그림 3과 4를 통해 얻은 2.5와 1기압 조건에 대해 Xe/F₂/Ar=1.84/0.26/97.9%, 5.26/0.46/94.28%의 혼합비를 각각 얻었다. 전자빔 에너지를 800 kV로 일정하게 하고 레이저 매질의 압력을 변화시키는 것은 전자빔에 의한 모체들 개개의 밀도수가 변화되어, 동력학의 결과는 레이저 출력 에너지에 영향을 주게된다. 일정한 여기 에너지 조건에서 압력의 연속적인 증가는 전자빔 축적에너지를 증가시킬 수 있으나 매질 내에서 전자빔의 전자전파특성을 감소시켜 여기체적이 줄어들어 XeF^* 형성효율이 저하된다. 뿐만아니라 $\text{XeF}^*(C)$ 상태에 대한 소광 및 비여기체적에서의 청록색 파장대역의 광자흡수의 증가로 인해 레이저 발진을 저해하는 손실의 증가로 판단된다. 따라서 두 혼합가스가 2.5기압 및 2기압보다 큰 압력 조건에서는 레이저 에너지가 줄어들기 때문에 고유효율은 크게 감소하는 것으로 나타난다. 반면에 Xe/F₂/Ar=1.84/0.26/97.9%의 혼합비 경우, 1기압에서 약 1 mJ 정도의 에너지가 얻어졌고 이때의 고유효율 또한 매우 낮다. 이것은 모체(Xe^- , Xe_2^- , Xe^* , Xe_2^* 등)의 수밀도 생성이 적어 $\text{XeF}^*(C)$ 상태를 형성하는 반응률이

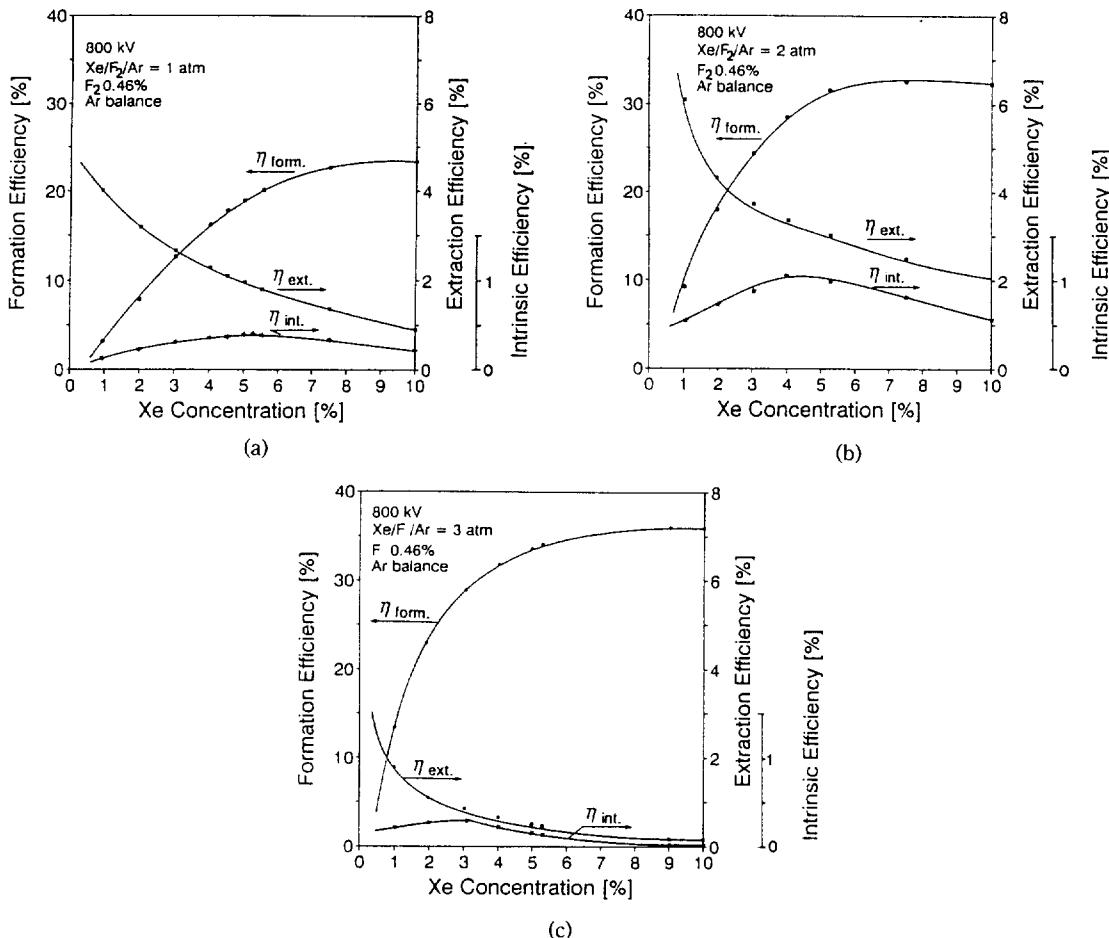


그림 6. (a)-(c). Simulation results of formation efficiency, extraction efficiency, and intrinsic efficiency as a function of Xe concentration. The F₂ of 0.46% concentration is fixed and 70 ns [FWHM] electron-beam accelerator (800 kV, 21 kA) is used as an excitation energy. (a) 1 atm, (b) 2 atm, and (c) 3 atm.

감소하는 것으로 나타났다. 이때 개발한 컴퓨터 시뮬레이션^[13]의 해석범위를 확장, 개선하여 레이저 고유효율을 총압력에 대해 정성적으로 해석할 수 있었다. 시뮬레이션은 0차원 계산의 수치적 모델에 근거하고 이미 보고된 속도정수들을 선별하여 속도방정식(rate equation)을 구성하였다. 각 반응과 반응과정에 대한 속도방정식은 4차 Runge-Kutta 수치해석법을 사용해 해를 구하며 레이저 매질에 주입되는 전자빔의 임력시간에 대해 각 모체들의 수밀도를 계산했다. 결과적으로 레이저 에너지와 효율 등을 얻을 수 있다.

그림 6의 (a)~(c)는 시뮬레이션 결과로써 형성효율 ($\eta_{form.}$ = 생성된 XeF*(C)의 수/전자빔 축적에너지), 추출효율 ($\eta_{ext.}$ = 광자의 수/생성된 XeF*(C)의 수) 및 레이저

고유효율 ($\eta_{int.} = \eta_{form.} \times \eta_{ext.}$)을 1~3 기압에 대해 나타낸 것이다. 70 ns [FWHM]의 전자빔 가속기(800 kV, 21 kA)에 의해 여기된 대기압의 레이저매질(Xe/F₂/Ar)에서 얻은 F₂ 농도를 0.46%로 고정했을 때, Xe 농도 변화에 대한 XeF(C→A) 레이저 출력의 의존성을 고유효율로 환산하여 나타냈다. 0.38%, 1.03%, 및 0.29%의 레이저 고유효율이 각각 Xe 농도 5.26%(1 기압), 4%(2 기압), 및 3%(3 기압)일 때 얻어졌다. 그림 (a)~(c)를 통해 알 수 있듯이 레이저매질의 총압력이 커질수록 Xe 농도 증가에 대한 XeF*(C)의 형성효율은 증가하나 추출효율은 비례하지 않는 것으로 나타났다. 이것은 Xe 농도의 증가에 따라 Xe% 및 Xe* 등의 수밀도가 증가해 XeF*(C)의 형성이 함께 증가하나 청록색 파장에 대한 광자흡수 및

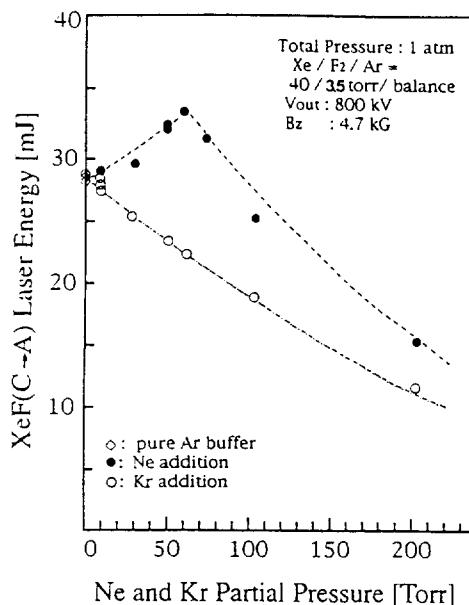


그림 7. Measured $\text{XeF}(\text{C}\rightarrow\text{A})$ laser output energy as a function of Ne (●—●) and Kr (○—○) buffer gas partial pressure with atmospheric pressure including Xe 5.26% (40 Torr) and F_2 0.46% (3.5 Torr). Diamonds (◊—◊) are pure Ar buffer without both Ne and Kr. The 70 ns [FWHM] electron-beam accelerator (800 kV, 21 kA) is used as an excitation energy.

소광작용에 밀접한 관계를 갖는 레이저 축출효율은 크게 감소하여 비롯된 결과로 해석된다. 1기압 레이저매질에 대한 Xe 농도는 5.26%의 비교적 높은 수치를 기록했으나 Kr 농도를 많이 사용한 1기압 KrF 레이저^[9,10]의 경우에 비하면 매우 적은데, 이 원인은 Xe에 의한 축출효율이 감소하게 되어 Xe 농도가 더이상 증가하지 않는 것으로 생각된다.

그림 7은 대기압 레이저매질에서 $\text{XeF}(\text{C}\rightarrow\text{A})$ 레이저 출력력에 대한 완충가스의 영향을 나타낸 것이다. 최적화한 Xe 5.26% (40 Torr)와 F_2 0.46% (3.5 Torr)를 고정한 채 Kr 및 Ne 완충가스를 첨가하고 Ar으로 1 기압을 유지시켰다. Kr의 첨가는 레이저 출력 에너지를 계속 감소시켰으나, Ne을 첨가하므로써 출력은 증가를 보이다 다시 감소하였다. Ne 60 Torr(약 8%)첨가시, 출력은 순수한 Ar만의 완충가스를 사용한 경우보다 약 18%가 증가된 33.6 mJ의 에너지로 측정되었다. 완충가스로써 Ne을 첨가하여 나타난 출력의 상승원인은 $\text{Ne}^* + \text{Ar}(\text{Xe}) \rightarrow \text{Ar}^*(\text{Xe}^*) + \text{Ne} + e_s$ 및 $\text{Ne}^* + \text{Ar}(\text{Xe}) \rightarrow \text{Ar}^*(\text{Xe}^*) + \text{Ne} + e_s$

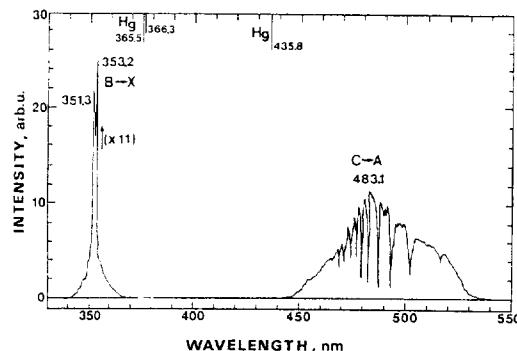


그림 8. Typical spectral distribution of wideband XeF excimer laser with atmospheric pressure laser medium of Xe 5.26%, F_2 0.46%, and Ar 94.28% as measured on combined the monochromator and cooled intensified CCD system. Mercury lines are also shown inset.

과 같은 반응으로 Ne 이 XeF^* 분자를 형성할 수 있는 모체의 밀도를 증가시켜 XeF^* 의 형성효율이 증가하는 것으로 해석된다^[15]. 또한 생성된 Ne_2^+ 은 청록색 파장에 대한 광자흡수 단면적이 Ar^{2+} 과 Xe_2^+ 에 비해 매우 작아 청록색역의 광자흡수가 줄은 이유로 해석될 수 있다^[19]. 반면에 Ne 이 Ar보다 전자빔 축적능력이 2배 가량 낮기 때문에 100 Torr(약 13%)이상의 Ne 첨가는 레이저매질에 축적되는 전자빔 에너지가 감소하며 그에 따른 XeF^* 의 형성이 줄기 때문이라고 생각된다. Nighan 등^[12]은 6기압 이상의 레이저매질($\text{Xe}/\text{F}_2/\text{Ar}/\text{NF}_3$)에 Kr 완충가스를 첨가하므로써 $B\rightarrow X$ 천이를 줄이고 $C\rightarrow A$ 천이를 향상시킨 결과를 보고했으나, 본 연구에서 얻은 결과로써는 Kr 첨가로 인한 레이저 에너지의 감소를 정확히 설명하기는 아직 어렵다.

2. 광대역 XeF 레이저 스펙트럼

$\text{Xe}/\text{F}_2/\text{Ar}=5.26/0.46/94.28\%$ 의 대기압 레이저매질에서 자외역과 가시역의 청록색 XeF 레이저의 전형적인 스펙트럼 분포를 측정한 것을 그림 8에 나타내었다. 450~530 nm의 폭넓은 청록색 파장대역은 CCD 시스템에서 20 nm씩 측정한 후 서로 연결하므로써 그릴 수 있었고, 이때 Xe^{**} 원자의 흡수선이 나타나고 있다. $\text{Xe}/\text{F}_2/\text{Ar}$ 의 레이저매질에 Ne 완충가스를 60 Torr 첨가했을 때, $\text{XeF}(\text{C}\rightarrow\text{A})$ 레이저는 청록색 파장대역에서 약간의 변화가 측정되었으나 스펙트럼의 중심파장은 변화가 없는 것으로 나타났다. 자외역의 좁고 강한 크기를 갖는 XeF ($B\rightarrow X$) 레이저는 351.3과 353.2 nm(밴드폭 0.5 nm,

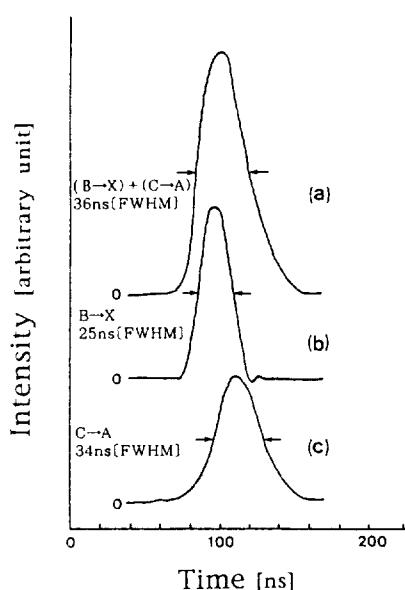


그림 9. Oscilloscope traces of typical time-resolved XeF lasers. (a) XeF($C \rightarrow A$) and $B \rightarrow X$: 36 ns [FWHM], (b) XeF ($B \rightarrow X$): 25 ns [FWHM], and (c) XeF ($C \rightarrow A$): 34 ns [FWHM] from mixture with atmospheric pressure laser medium of Xe 5.26%, F₂ 0.46%, and Ar 94.28%. Dichroic mirror is used as output coupler with R 97% at 450~530 nm and R 20% at 350~355 nm.

FWHM)에서, 청록색 XeF($C \rightarrow A$) 레이저는 중심파장 483.1 nm(밴드폭 ~40 nm, FWHM)로 측정되었다. 이와 같은 스펙트럼의 양상은 $C \rightarrow A$ 천이의 유도방출단면적 ($\sigma \sim 1 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$)이 $B \rightarrow X$ 에 비해 한 order정도 작고 방사수명 ($\tau \sim 100 \text{ ns}$)이 길기 때문인 것으로 나타난다^[19].

3. XeF($C \rightarrow A$)와 XeF($B \rightarrow X$) 레이저 펄스

동일한 레이저매질에서 동시에 발진하는 XeF($C \rightarrow A$)와 XeF($B \rightarrow X$) 레이저 펄스의 전형적인 파형을 그림 9에 나타냈으며, 이때의 실험조건은 그림 7의 조건과 동일한 상태에서 측정한 것이다. 자외역 및 가시역 차단필터를 각각 사용하여 측정된 $C \rightarrow A$ 펄스(c)는 $B \rightarrow X$ 펄스(b)보다 다소 지연(16~17 ns)되어 나타났다. 이것은 C -상태가 전자빔 에너지에 의해 직접적으로 여기되지 않고, 먼저 B -상태가 형성된 이후 B -상태의 진동완화에 의한 C -상태로의 천이와 B - C 상태 사이의 충돌혼합에 의한 에너지 전달과정에 의해 C -상태가 생성되는 동력학을 나타내고 있는 것으로 해석된다. 이와 같은 현상은 Brashears와 Set-

ser^[18] 및 Sauerbrey 등^[16]의 실험에서도 같은 양상으로 보고되고 있다. 차단필터들을 사용하지 않고 직접 측정한 레이저 펄스(a)는 (b)의 $B \rightarrow X$ (25 ns, FWHM)와 (c)의 $C \rightarrow A$ (34 ns, FWHM) 펄스를 중첩하여 그런 펄스파형과 매우 잘 일치하였다. 이때 (a)의 레이저 펄스 (36 ns, FWHM)를 분산프리즘(30°)을 사용하여 분산시킴으로써 $B \rightarrow X$ 와 $C \rightarrow A$ 천이의 레이저 공간분포를 볼 수 있었다. 따라서 $B \rightarrow X$ 와 $C \rightarrow A$ 레이저의 발진 메카니즘을 함께 고려하는 것은 $C \rightarrow A$ 천이의 효율적 동작을 가능하게 한다.

IV. 결 론

70 ns[FWHM]의 전자빔 가속기 (800 kV, 21 kA)로 여기한 Xe/F₂/Ar 레이저매질에서 청록색 free-running XeF($C \rightarrow A$) 레이저의 출력에 대한 Xe 농도의 의존성을 레이저 에너지, 레이저 고유효율, 형성효율, 축출효율의 함수로써 조사하였다. 넓은 압력범위(0.5~3.5기압)의 레이저매질에서 XeF($C \rightarrow A$) 레이저의 발진을 실험적으로 얻었고, 시뮬레이션을 통해 1~3 기압의 총압력에 대한 Xe 농도의 최적치를 확인하였다. 이로써 레이저 고유효율을 증가시킬 수 있었으며, 이때 레이저 고유효율은 Xe 농도 5.26%(1기압), 4%(2기압) 및 3%(3기압)일 때 각각 0.38%, 1.03% 및 0.29%로 얻어졌다. 또한 Xe/F₂/Ar = 5.26/0.46/94.28%의 혼합비를 갖는 1기압 레이저매질에 Ne 완충가스를 60 Torr 약 8%첨가시켜 레이저 출력에너지와 레이저 고유효율을 각각 약 18%와 23%로 증가시켰다. 반면에 동일한 1기압 매질에서 동시에 발진하는 자외 XeF($B \rightarrow X$)와 청록색 XeF($C \rightarrow A$) 레이저의 시간적 변화와 스펙트럼을 측정하므로써 XeF($C \rightarrow A$) 레이저에 대한 동력학을 확인할 수 있었다. 그러나 현재 까지의 결과로써는 대기압 XeF($C \rightarrow A$) 레이저의 출력이 미흡하지만 레이저 시스템의 전반적인 최적화가 이루어지면 보다 효율적인 동작이 가능하리라 생각된다.

이상의 결과는 대출력 고효율의 전자빔여기 XeF($C \rightarrow A$) 역시며 레이저에 대한 실험의 귀중한 기초연구자료가 될 것으로 생각되며, 특히 대구경 대기압 XeF($C \rightarrow A$) 레이저 증폭시스템 설계시 유용한 파라메타로 제시될 수 있으리라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술처 국제공동연구과제 (94-I-0057)의 연구비에 의해 부분적으로 수행되었기에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] L. N. Litzenberger and M. J. Smith, IEEE J. Quantum Electron., **QE-31**(3), 546(1995).
- [2] Th. Hofmann, T. E. Sharp, C. B. Dane, P. J. Wissott, W. L. Wilson, F. K. Tittel, and G. Szabo, IEEE J. Quantum Electron., **QE-28**(5), 1366(1992).
- [3] D. E. Klimek and A. Mandl, IEEE J. Quantum Electron., **QE-30**(12), 2929(1994).
- [4] R. C. Sze, T. Sakai, M. Vannini, and M. L. Sentis, IEEE J. Quantum Electron., **QE-27**(1), 77(1991).
- [5] Y. -K. Cheng, S. -P. Yang, M. -X. Wang, and Z. -G. Ma, Appl. Phys. Lett. **62**(1), 4(1993).
- [6] V. S. Zuev, G. N. Kashnikov, and S. B. Mamaev, Sov. J. Quantum Electron. **22**(11), 973(1992).
- [7] S. F. Fulghum, D. W. Trainor, and C. H. Appel, IEEE J. Quantum Electron., **QE-25**(5), 955(1989), M. J. Kushner and T. J. Moratz, Appl. Phys. Lett., **52**, 1856(1988).
- [8] Y. -W. Lee, E. Matsui, F. Kannari, and M. Obara, IEEE J. Quantum electron., **QE-25**(9), 2053(1989).
- [9] A. Suda, H. Kumagai, and M. Obara, Appl. Phys. Lett. **51**(4), 218(1987), Y. -W. Lee, J. Jethwa, A. Endoh, and F. P. Schafer, Opt. Comm. **94**, 546 (1992).
- [10] P. Bhatnagar, B. Singh, and U. Nundy, Opt. Eng. **33**, 1905(1994).
- [11] H. -Y. Ryu, C. H. Lee, Y. -W. Lee, and Y. -P. Kim, Technical Digest of the Conference on Lasers and Electro-Optics(Optical Society of America, Washington, D.C., 1994) 8, paper CFH6, p. 425.
- [12] W. L. Nighan and M. C. Fowler, IEEE J. Quantum Electron., **QE-25**(4), 791 (1989).
- [13] 류한용, 이주희, 한국광학회지, **6**(3), (1995. 9. 개재예정).
- [14] 류한용, 이주희, 김용평, 한국광학회지, **5**(3), 386 (1994).
- [15] Ch. K. Rhodes, "Rare gas halogen excimers," *Excimer Lasers*, Chap.4, p. 87, Springer-Verlag(1984).
- [16] R. Sauerbrey, W. Walter, F. K. Tittel, and W. L. Wilson, J. Chem. Phys. **78**(2), 735(1983).
- [17] Y. Nachshon, F. K. Tittel, and W. L. Wilson, Jr., J. Appl. Phys. **56**(1), 36(1984).
- [18] H. C. Brashears and D. W. Setser, J. Chem. Phys. **76**(10), 4932(1982).
- [19] W. R. Wadt, J. Chem. Phys., **73**, 3915(1980).

Output Characteristics of XeF(C→A) Laser for the variation of Xe concentration under the pressures of broad region

Han-Yong Ryu and Choo Hie Lee

Department of Electronic Engineering, Kyung Hee University, Youngin 449-701, Korea

(Received: June 30, 1994)

When the broad pressure region (0.5~3.5 atm) of laser media is pumped by 70 ns [FWHM] electron-beam accelerator (800 kV, 21 kA), the correlation between free-running XeF(C→A) excimer laser output and Xe concentration are studied. The resonator consisted of dichroic output coupler, and the laser output is optimized with laser media (Xe/F₂/Ar) as functions of total pressure and gas mixing ratio. Under the condition of F₂ 0.46% fixed, the laser intrinsic efficiencies of 0.38%, 1.03%, and 0.29% are obtained at 1, 2, and 3 atm, respectively. So then the peaks of laser intrinsic efficiency occurred to the higher Xe concentration with decreasing total gas pressure. By analyzing the kinetics for the XeF*(C) formation efficiency and XeF(C→A) laser extraction efficiency the dependence of Xe concentration on their correlation is explained. As the results we propose efficient operation of an atmospheric-pressure XeF(C→A) laser.