

## XeCl 레이저 증폭기의 활성기체 압력에 따른 포화 에너지 밀도와 소신호 이득계수 측정

김규욱 · 김용평

한국표준과학연구원 역학연구부 레이저그룹

(1994년 6월 2일 받음)

XeCl 레이저 증폭기의 포화 에너지 밀도와 소신호 이득계수를 활성기체의 압력을 변화시키면서 측정하였다. Xe이 30 mb, He이 2000 mb일 때, HCl이 34, 52, 73, 92으로 압력이 높아짐에 따라 포화 에너지 밀도는 1.3, 1.45, 2.0, 2.3 mJ/cm<sup>2</sup>로 거의 선형적으로 증가하였지만, 소신호 이득계수는 6.5, 7.5, 7.0, 7.0 %/cm로 거의 변화하지 않았다.

### I. 첫머리에

포화 에너지 밀도(saturation energy density)  $E_s$ 와 소신호 이득계수(small signal gain coefficient)  $g$ 는 레이저 증폭기를 설계하거나 효과적으로 운영하고자 할 때 중요한 역할을 하는 변수들이다. 따라서 이들 변수의 측정은 레이저 증폭기를 사용하는 연구자들에게는 항상 관심의 대상이 되고 있다. 엑시머 레이저 증폭기에서 ps 또는 fs 펄스를 이용하여 이들 변수의 측정 결과가 많이 발표되었다. XeCl 레이저 증폭기의 경우 0.22~600 ps 펄스에 대해  $E_s=0.85\sim 2.5$  mJ/cm<sup>2</sup>의 측정결과가 얻어지고 있다.<sup>[1-5]</sup> XeCl 레이저는 이득 동력학(gain dynamics) 때문에 40~50 ps과 수 ns의 두 가지 이득회복(gain recovery) 성분을 가지고 있다고 알려져 있다.<sup>[3,4]</sup> 이 때문에  $E_s$ 는 입력 펄스 폭이 200 ps 보다 긴 경우에는 2.5 mJ/cm<sup>2</sup> 정도이고, 5 ps 보다 짧은 경우에는 1.0 mJ/cm<sup>2</sup> 정도라고 추정되고 있다.<sup>[3,4,5]</sup>

한편 엑시머 레이저에서  $E_s$ 와  $g$ 는 각종 기체의 압력에(혼합비) 따라 다른 값이 얻어지고 있지만,<sup>[6]</sup> 활성기체(active gas)의 압력에 의한 영향이 많이 조사되지 않고 있다. 본 논문에서는 XeCl 레이저 증폭기에서 Xe과 HCl 등 활성기체의 압력에 의하여 변화하는  $E_s$ 와  $g$  값의 측정 결과에 대하여 기술한다.

### II. 실험 및 결과

그림 1은 XeCl 레이저 증폭기에서 포화 에너지 밀도와 소신호 이득계수를 측정하기 위한 실험장치도이다.<sup>[7]</sup> 두

대의 동일한 엑시머 레이저(Questek 2560v $\beta$ )를 각각 발진기와 증폭기로 사용하였다. 본 연구의 실험 전체를 통해서 발진기에 넣는 기체의 압력은 항상 Xe/HCl/He=40/50/2000 mb로 하였다. 이때 발진기의 출력 에너지는 140 mJ, 반치폭은 20 ns 정도이었다. 여기에서 사용한 HCl은 He에 5%로 희석된 것이다. 증폭기의 입력 에너지는 연속 가변 감쇠기(continuously variable attenuator, CVI, ABS-50-UVH)를 사용하여 정밀하게 조절하였고, 입력 에너지와 출력 에너지는 각각 Gentec ED-200과 Moletron J-50 에너지미터로 측정하였다. 그리고 그림 1과 같이 광속 분할기(beam splitter)를 증폭기 앞에 설치하여 입·출력 에너지를 동시에 측정할 수 있도록 하였다. 이때 입력 레이저 빔과 출력 레이저 빔의 직경은 각각 1.0, 1.6 cm이다. 증폭기와 발진기의 동작시간은

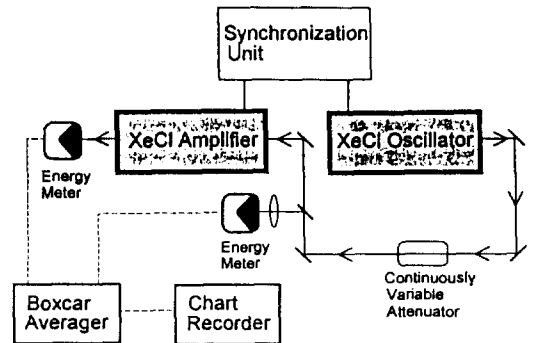


그림 1. Experimental setup for the measurement of saturation energy density and small signal gain coefficient.

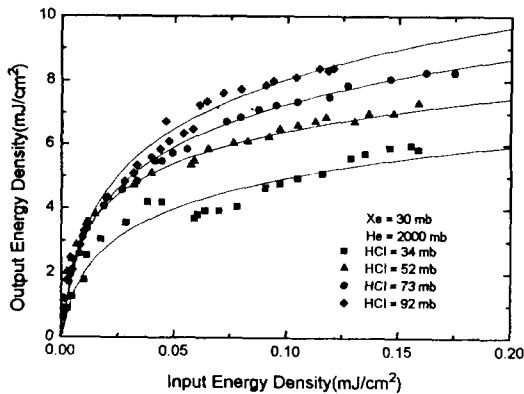


그림 2. Energy extraction curves for Xe/HCl/He=30/34,52,73,92/2000 mb. The solid curves are least-square-fits of the data to the Franzt-Nodvik equation.

시간 동기 장치(synchronization unit)를 사용하여 증폭이 안정되게 잘 일어나도록 조절하였다. 증폭기와 발진기에서 발생하는 각각의 형광(fluorescence)을 광섬유를 통하여 시간 동기 장치에 입력하여 둘 사이의 동작시간 차이를 조절할 수 있다. 이때 증폭기에 넣는 압력에 따라 동작시간 차이는 조금씩 다르기 때문에 증폭기의 압력을 변화시킬 때 마다 증폭되는 펄스의 모양을 오실로스코프로 보면서 가장 증폭이 잘 일어나도록 시간차이를 조절하였다. 본 연구의 실험은 진부 10 Hz로 하였으며, 실험 결과는 boxcar averager(Stanford Research System, SR250)으로 처리한 후 chart recorder(Yokogawa, LR-4210)으로 기록하였다.

활성기체의 압력이  $E_s$ 와  $g$ 에 미치는 영향을 조사하기 위하여 표 1과 같이 XeCl 레이저 증폭기에 넣는 기체의 압력을 He=2000 mb와 He=2500 mb의 두 가지 경우에 대하여 Xe과 HCl를 각각 거의 20 mb씩 변화시켰다. 그림 2는 Xe/HCl/He=30/34,52,73,92/2000 mb일 때 실험적으로 측정된 입력 에너지 밀도와 출력 에너지 밀도이다. 이 결과로부터  $E_s$ 와  $g$ 를 얻기 위해서 이들을 아래와 같은 Franzt-Nodvik 공식에<sup>[8]</sup> 대입하여 최소자승법으로 curve fitting하였으며, 이러한 방법은  $E_s$ 와  $g$ 를 측정하는 일반적인 방법이다.

$$E_{out} = E_s \cdot \ln[1 + \exp(gl)\{\exp(E_{in}/E_s) - 1\}] \quad (1)$$

여기에서  $E_{in}$ 과  $E_{out}$ 은 각각 입력, 출력 에너지 밀도이고,  $l$ 은 증폭기의 길이로 본 연구에서 사용한 증폭기의 경우 94 cm이다.

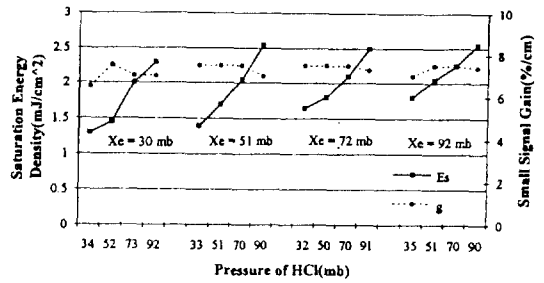


그림 3. Saturation energy density( $E_s$ ) and small signal gain( $g$ ) when the pressure of Xe was 30, 51, 72, and 92 mb, and the pressure of He was 2000 mb.

표 1. Experimental conditions of gas pressure in XeCl laser amplifier.

Xe (mb)	HCl (mb)	He (mb)	Xe (mb)	HCl (mb)	He (mb)
30	34	2000	31	33	2500
	52			53	
	73			73	
	92			93	
51	33	2000	50	32	2500
	51			52	
	70			72	
	90			92	
72	32	2000	72	32	2500
	50			54	
	70			73	
	91			94	
92	35	2000	92	32	2500
	51			50	
	70			70	
	90			94	

그림 3과 그림 4는 He의 압력이 각각 2000 mb와 2500 mb이고 Xe, HCl의 압력이 표 1과 같은 조건에서 실험적으로 구한  $E_s$ 와  $g$ 를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 HCl의 압력이 높아짐에 따라  $E_s$ 는 거의 선형적으로 증가하지만,  $g$ 는 어느 정도 일정한 값을 가지는 것으로 나타났다. 그리고 그림 4의 Xe=50 mb인 경우를 제외하면 모든 경우에서 Xe의 압력이 증가함에 따라  $E_s$ 의 최소값이 증가하고 있다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 기체 레이저에서 레이저 chamber 안의

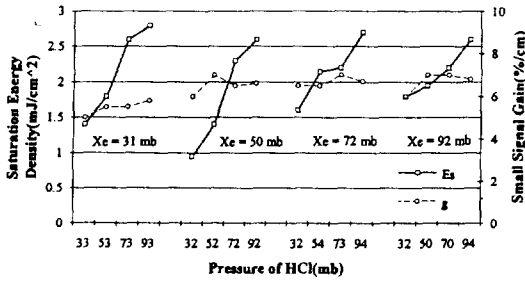


그림 4. Saturation energy density( $E_s$ ) and small signal gain( $g$ ) when the pressure of Xe was 31, 50, 72, and 92 mb, and the pressure of He was 2500 mb.

기체 압력이 증가하면, 유도방출단면적(stimulated emission crosssection)  $\sigma$ 는 압력에 의한 선평확대(pressure broadening) 때문에 감소한다. 이때  $E_s$ 와  $\sigma$ 와의 관계식  $E_s \sim h\nu/\sigma$ 에서 알 수 있듯이 기체 압력이 증가하면  $E_s$ 도 증가한다. 따라서 그림 3과 그림 4와 같이 Xe이나 HCl의 압력이 증가함에 따라  $E_s$ 가 증가하는 것으로 생각할 수 있다. 한편 활성기체의 압력이 증가해도  $g$ 가 거의 변화하지 않는 것은 활성기체의 압력이 높아지면, 밀도반전(population inversion density)  $\Delta N$ 이 커지게 되어  $\sigma$ 가 감소하더라도 소신호 이득계수  $g(=\sigma\Delta N)$ 은 거의 일정하게 유지된다고 생각할 수 있다.

대부분의 엑시머 레이저와 마찬가지로 XeCl 레이저도 반응 동작(reaction mechanism)이 매우 복잡하고, 특히  $\text{Xe}_2^*$  엑시머의 복사 수명시간(radiative lifetime)이  $5.5 \pm 1.0$  ns 정도로<sup>[4]</sup> 짧기 때문에 포화 에너지 밀도나 소신호 이득계수 등의 측정 또는 레이저 펄스의 증폭특성을 정확히 조사하기 위해서는 이보다 짧은 시간폭을 갖는 레이저 펄스를 입사시켜야 한다. 따라서 본 연구의 실험과 같이 20 ns의 긴 반치폭을 갖는 레이저 펄스가 증폭기에 입사할 경우 증폭특성을 정확하게 이해하기 위해서는 비율 방정식(rate equation)의 해를 구하는 것이 좋다. 특히 본 실험과 같이 레이저 chamber 안의 기체 압력을 변화시킬 때에는 복사 스펙트럼(radiation spectrum)을 조사하는 것이 필요하다.

### III. 끝 맺으며

XeCl 레이저 증폭기에 넣는 기체의 압력에 따른 포화 에너지 밀도와 소신호 이득계수를 측정하였다. Xe, HCl 등 활성기체의 압력이 증가할수록 포화 에너지 밀도는 증가하였지만, 소신호 이득계수는 크게 변화하지 않는 것으로 나타났다. 본 연구에서 사용한 입력 레이저 펄스폭이 20 ns 정도로 길기 때문에 이러한 현상을 정확하게 이해하기 위하여 현재 비율 방정식의 해를 구하고 있고, 또한 기체 압력에 따라 변화하는 복사 스펙트럼을 조사하는 연구가 진행되고 있다. 그 결과와 본 실험의 결과를 비교 분석하여 계속 발표할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술처 시행 특정연구 개발사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 표한다.

### 참 고 문 헌

- [1] J. H. Glowina, J. Misewich, and P.P. Sorokin, J. Opt. Soc. Am. **B4**, 1061(1987).
- [2] S. Watanabe, A. Endoh, M. Watanabe, and N. Sarukura, Opt. Lett. **13**, 580(1988).
- [3] P. B. Corkum and R. S. Taylor, IEEE J. Quantum Electron. **QE-18**, 1962 (1982).
- [4] S. Szatmari and F. P. Schafer, J. Opt. Soc. Am. **B4**, 1943(1987).
- [5] A. J. Taylor, T. R. Gosnell, and J. P. Roberts, Opt. Lett. **15**, 118 (1990).
- [6] T. Hammer, Appl. Phys. **B56**, 243(1993).
- [7] Gyu Ug Kim and Yong Pyung Kim, Proceedings of the International Conference on LASERS'93, edited by V. J. Corcoran and T. A. Goldman (STS Press, U.S.A., 1994), p. 522.
- [8] L. M. Frantz and J. S. Nodvik, J. Appl. Phys. **34**, 2346(1963).
- [9] B. Schneider and J. S. Cohen, J. Chem. Phys. **61**, 3240(1974); J. W. Keto, R. E. Gleason, and G. K. Walters, Phys. Rev. Lett. **33**, 1375(1974).

**Measurements of Saturation Energy Density and Small Signal  
Gain Coefficient Dependent on the Active Gas Pressure  
in XeCl Laser Amplifier**

Gyu Ug Kim and Yong Pyung Kim  
*Laser Group, Division of Mechanical Metrology,  
Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-606*

(Received: June 2, 1994)

Dependence of saturation energy density and small signal gain coefficient on the active gas pressure in XeCl laser amplifier has been investigated. The saturation energy density was increased almost linearly as 1.3, 1.45, 2.0, and 2.3 mJ/cm<sup>2</sup> when the pressure of Xe and He were 30 and 2000 mb, and the pressure of HCl was varied as 34, 52, 73, and 92 mb. Whereas the small signal gain coefficient was measured to be 6.5, 7.5, 7.0, 7.0 %/cm, which shows that the small signal gain did not varies not so much.