

1 kHz 고반복 엑시머레이저의 출력 특성*

박홍진 · 이주희

경희대학교 전자공학과 및 레이저공학연구소, 경기도 용인시 기흥읍 서천리 1번지 449-701

(1996년 8월 26일 받음)

레이저 가스를 하나의 횡류팬만으로 순환시키는 동심 원통형 구조의 소형 엑시머레이저를 개발하였다. 이 장치를 1 kHz의 고속으로 반복동작시켰을 때 KrF 레이저의 평균출력은 56 watt였다. 본 논문에서는 kHz급의 소형 엑시머레이저를 실현할 수 있는 설계 파라미터와 레이저 가스의 CR(Clearing Ratio) 특성을 분석하였다. 평균출력 56 watt일 때 레이저 효율은 1.2%, CR은 2.97, 출력변동율 $\pm 9\%$ 이다. 이 때 레이저 가스용적은 10 liter이고 방전체적은 $1.8(\text{높이}) \times 1.2(\text{폭}) \times 30(\text{길이}) = 64.8 \text{ cm}^3$ 이다.

I. 서 론

최근 반도체 정밀가공^[1] 등의 분야에서 소형이고 큰 출력의 엑시머레이저의 수요가 증가하면서 레이저의 펄스당 에너지를 적게하고 반복동작율은 높여서 평균출력을 크게하는 연구^[2]가 활발하다. 엑시머레이저를 고반복화하는 연구는 1976년 C.P.Wang^[3]이 처음 시도한 이후 최근 실험실 수준에서 kHz급 레이저^[4], 일반 상용은 500 Hz급 레이저의 개발^[5]이 보고되고 있다. 엑시머레이저의 고속 반복 동작을 위해서 반복 충전, 반복 스위칭, 레이저 가스의 순환 및 냉각 등의 문제가 고려되어야 한다. 특히 kHz급의 소형 엑시머레이저는 레이저 가스의 순환 문제가 가장 중요하다^[6]. 최근 kHz급의 고속 반복 동작 레이저들은 반복동작에 필요한 $\sim 40 \text{ m/s}$ 이상의 빠른 유속을 얻기 위해 축류팬(axial flow fan)^[7]을 2개 이상 또는 대형의 것을 사용하여 고속 반복동작을 실현하고 있으나 반대로 장치의 소형화를 이루지 못하는 문제점을 가지고 있다^[8].

본 연구에서는 가스용적이 10 liter 이하이고, 하나의 횡류팬(line cross flow fan)^[9]을 사용한 동심원통형 유로구조의 소형 엑시머레이저를 개발하여 1 kHz 동작을 실현하였다. 이것은 본 연구실에서 지금까지 개발하였던 120 Hz급 엑시머레이저^[10]와 500 Hz급 엑시머레이저^[11]의 유로구조와 이의 관련 기술을 분석, 보완함으로써 이루어졌다. 따라서 새로운 동심형 유로 구조를 개발하고

전극간격을 좁혀서 37 m/s 이상의 매우 빠른 유속을 얻었다. 또 여기회로는 용량이행형 방식, 예비전리는 주전극 직렬 UV 예비전리방식을 사용하고, 피킹캐패시터는 동심원통형 레이저관의 내부원통에 배치하여 소형화를 이루었다. 이것은 결과적으로 주방전 회로의 인덕턴스를 5.6 nH 이하로 적게하므로서 엑시머의 상준위 유지에 적합한 여기전류의 상승시간과 레이저 효율을 향상시킬 수 있다^[12]. KrF 레이저를 1 kHz 반복동작으로 출력하였을 때 전극간격은 1.8 cm, 유속은 횡류팬의 회전수 5000 rpm에서 가스유속 37 m/s가 측정되었다. 펄스당 출력 에너지는 총 가스압력 3기압에서 142 mJ, 1 kHz 동작시의 평균출력은 56 watt, 최대 효율은 1.2%이다. 총 가스압력 2기압에서 1 kHz로 동작했을 때 CR 값 2.97에서 가장 안정된 동작을 하였다. 이 때 출력 변동율은 $\pm 9\%$ 이다.

II. 레이저 장치 구조

2.1 레이저 관

그림 1은 kHz급의 반복동작을 실현하기 위하여 개발한 소형이고 큰 출력에 적합한 엑시머레이저의 구조이다. 레이저 관은 kHz급에 필요한 가스속도를 얻기위해 동심 원통형 구조로 유로를 구성하였고 여기회로는 용량이행형 방식, 예비전리는 주전극 직렬 UV 예비전리방식을 사용하여 소형화 하였다. 또 피킹캐패시터를 동심원통의 내부원통속에 배치하고 충전캐패시터는 외부원통 밖에 배치하였다. 이 결과로 주 방전부 회로의 방전 인덕턴스는 5.6 nH이었다. 그림 1에서 (a)는 고반복 스위칭을 위해 사용한 EG & G 사의 싸이라트론, (b)는 충전캐

*본 연구는 과학기술처 95년도 국제공동연구과제 [I-1-068]에 의해 과학기술처와 LG산전 주식회사의 지원을 받아 수행되었기에 감사를 드립니다.

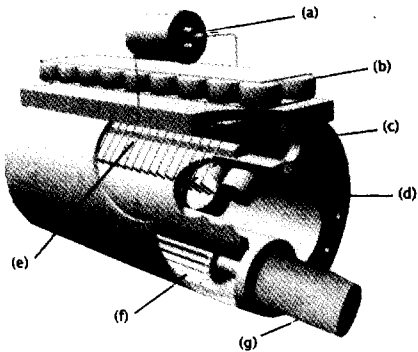


그림 1. External view of 1 kHz excimer laser.
 (a) Thyratron (b) Storage Capacitor (c) Pre-ionization Pin (d) Electrodes (e) Peacking Capacitor (f) Line flow fan (g) Ferro fluidic seal and DC motor

패시터이고 용량은 34 nF, (c)는 UV 예비전리용의 아크 핀이다^[13]. 아크핀은 주전극의 양 옆에서 2.7 cm 떨어진 거리에 배열하고 각 핀 사이는 2 cm 간격으로 하여 총 32개를 설치하였다. 이 때 아크핀의 전극간 거리는 2 mm이다. 그림 1의 (d)는 주전극이며, 균일한 전계분포를 얻기 위하여 Ernst형^[14]으로 제작하였고, 이 때 $k_0=0.15$, $k_1=2.81 \times 10^{-3}$, $k_2=7.4 \times 10^{-7}$ 이고 전극길이는 34 cm이다. 그림 1의 (e)는 동심 원통형의 내부 원통 안에 배치된 피킹캐피터이며 캐피터 용량은 27 nF이다. 방전관 내의 절연재로는 알루미늄 세라믹과 PVDF를, 전극을 포함한 모든 도체는 STS 304를 각각 사용하여 레이저 가스 중의 할로젠 성분에 의한 레이저관 내에 있는 재료들의 화학반응을 억제하였다. PVDF는 내할로젠 특성이 우수하지만 UV광에 해리되어 불순물을 발생 시키므로^[15], 알루미늄 세라믹 판으로 대체시켰다. 또한 캐피터는 그림 1의 (b), (e)와 같이 레이저 관의 외부에 설치하여 레이저 가스가 캐피터 피복에 의하여 반응되는 문제를 제거하였다.

2.2 횡류팬 및 측정장치

고속 반복동작에서 안정한 레이저 출력을 얻기 위해서는 주전극의 방전영역에 새로운 가스를 계속 공급해야한다. 특히 1kHz급의 높은 반복율로 동작하기 위해서는 전극사이에 $\sim 40 \text{ m/s}$ ^[16]에 이르는 매우 빠른 가스유속이 필요하다. 이러한 유속을 얻기위해 지금까지 전형적으로 축류팬을 2개 이상 또는 대형의 것을 사용하는 대형 고속 전송장치를 사용하였다^[17]. 따라서 장치의 거대화화 이로 인한 높은 비용이 문제가 되어왔다.

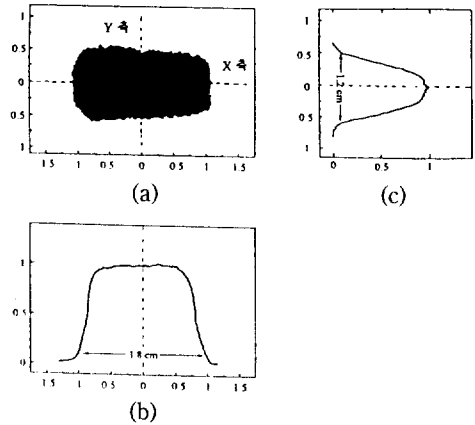


그림 2. Beam Pattern and Beam Profile of KrF laser.
 (a) KrF laser beam pattern measured by UV laser card (b) beam profile of X axis (c) beam profile of Y axis

본 실험에서는 레이저 유로의 구조를 동심 원통형 구조로하여 가스의 유로를 개선하고, 전극 간격을 18 mm로 좁게함으로 인하여, 1 kHz 동작에 필요한 유속을 얻기 위해 길이 340 mm, 외경 90 mm의 소형 횡류팬 하나만을 사용할 수 있었다. 횡류팬을 회전시키기 위하여 레이저 용기의 압력을 지탱하면서 회전할 수 있고, 레이저 용기의 외부에서 제어되는 자성유체 밀봉의 구조를 사용하였다. 횡류팬은 최대 회전수 12000 rpm의 250 watt급 DC 모터를 사용하여 회전되었고, 직경 17 mm의 수냉식 열교환용 파이프 3개가 레이저 가스의 냉각을 위해 사용되었다. 이와 같은 소형화 설계의 결과 레이저 가스의 실용적용 총 10 liter로 축소시킬 수 있었다.

레이저 출력의 펄스당 에너지는 Gentec ED-500, 반복 동작시의 에너지는 Moletron J-3, 펄스파형은 R1193U-02 (Hamamatsu), 레이저 빔 형상(pattern)은 Sensor Physics사의 UV 카드와 UV 필름 판독기^[18]를 사용하여 측정하였다. 또 반복 동작때 가스 유속의 측정은 피토 관 (pito-tube)^[19]을 사용하였다

III. 고반복동작 특성

3.1 출력특성

그림 2는 레이저가스의 혼합비 $F_2/Kr/He=0.2/2/97.8$ %, 총압력 2기압, 충전전압 27 kV일 때 KrF 레이저 빔의 공간분포로서 (a)는 UV 레이저 카드로 측정된 빔 패턴이고, (b)(c)는 이것을 UV 필름 판독기로 판독한 결과이다. 레이저 공진기 바로 뒤에서 측정된 빔의 공간분

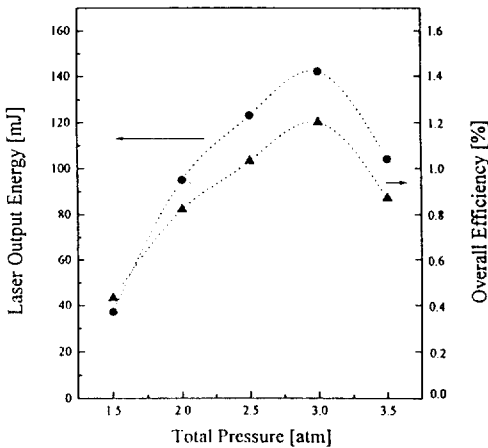


그림 3. KrF laser output energy and overall efficiency as a function of total pressure.

또는 1.2 cm(w)×1.8 cm(h)이다. 그림2의 (b)에 보여지는 X축의 파형은 전극간격 1.8 cm와 거의 일치하는 구형적인 파형이 관측되었고, CR 계산에서 빔 폭을 나타내는 그림 2의 (c) Y축 파형은 거의 가우시안 분포를 보였다. 빔 크기를 결정하기위해 빔의 한계는 빔 세기가 1/e²이 되는 지점으로 결정하였다.²⁰⁾

그림 3은 전극간격 18 mm, 충전전압 27 kV에서 가스 혼합비를 F₂/Kr/He=0.2/2/97.8%로 일정하게 유지할 때 전체 가스압력 변화에 대한 레이저 출력과 전체 효율의 의존성을 나타낸 것이다. 최대 출력에너지는 전체 압력 3기압에서 142 mJ이고, 이 때의 전체 효율은 1.2%이다. 효율이 낮은 이유는 유속을 얻기 위해 전극간격을 좁힘으로 인해 방전전극에 전달된 전기 효율이 낮아졌기 때문이다²¹⁾. 그림에서 3기압까지는 레이저 출력은 증가하지만 3기압 이상의 기압에서는 레이저 출력이 감소하고 있다. 이것은 충전전압 27 kV가 3기압 이상의 기압에서 안정된 방전을 유지하기에 낮은 전압이기 때문으로 판단된다²²⁾. 최대 효율이 얻어진 3기압에서 방전 유효체적에 대한 레이저 출력 에너지 비로 정의되는 특성 에너지는 2.05 joule/liter이다.

3.2 CR 특성

방전여기 레이저에서는 방전에 의한 급격한 에너지 주입에 의해, 레이저 매질의 방전영역과 외부사이에 온도차가 발생해 압력의 불연속면이 형성된다. 또 주 방전과 예비전리에 의해 불순물이 발생하여, 방전영역 외부의 매질과 혼합된 상태로 회복되는데, 그 회복시간은 수백 ms~수 s로 길다²³⁾. 이것을 그대로 방치한 상태로

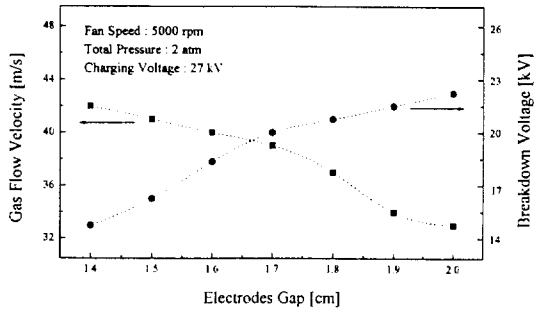


그림 4. Gas flow velocity and breakdown voltage as a function of Electrodes gap.

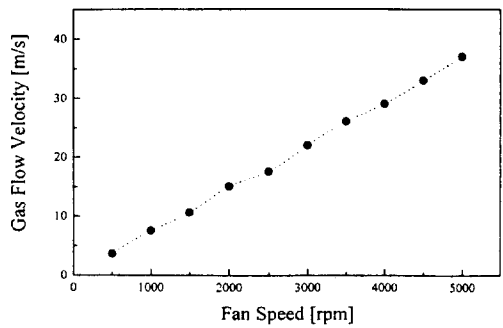


그림 5. Gas flow velocity as a function of rotational number of line flow fan.

레이저의 반복주파수를 높이면 다음 방전에 영향을 준다. 따라서 안정한 고속 반복 동작을 위해서는 방전영역에 새로운 가스를 공급해야 한다. 레이저 가스의 유속은 주방전 영역 근방의 구조에 의존해 안정한 방전을 위한 밀도분포와 유속분포를 얻기 위해 실제 요구되는 유속은 더욱 크게된다. 그림 4는 방전전극 간격 변화에 대한 가스유속의 의존성과 방전전압을 나타낸다. 실험은 그림 1(d)의 위쪽 음극을 이동하여 간격 2.0 cm 부터 1.4 cm 까지 조절하며 행하였다. 가스 유속은 양극과 음극사이의 중심부분에 피토폴을 삽입하여 측정하였다. 레이저 가스 유속은 전극 간격을 2.0 cm 부터 1.4 cm까지 좁힘에 따라 34 m/s에서 42 m/s까지 증가하였다. 전극간격 1.8 cm에서 37 m/s의 유속이 측정되어 1 kHz 동작이 이루어졌다. KrF 레이저의 여기밀도와 얻게될 출력을 고려하여 레이저 장치의 전극 간격은 그림에서 볼 수 있듯이 방전 전압 21 kV가 얻어진 1.8 cm로 하였다. 그림 5는 팬 회전수에 대한 레이저 가스 유속 의존성을 보여준다. 측정은 피토폴을 사용하여 He 가스 2 기압에서 행하였다. 팬 회전수가 증가함에 따라 가스유속은 선형적으로 증

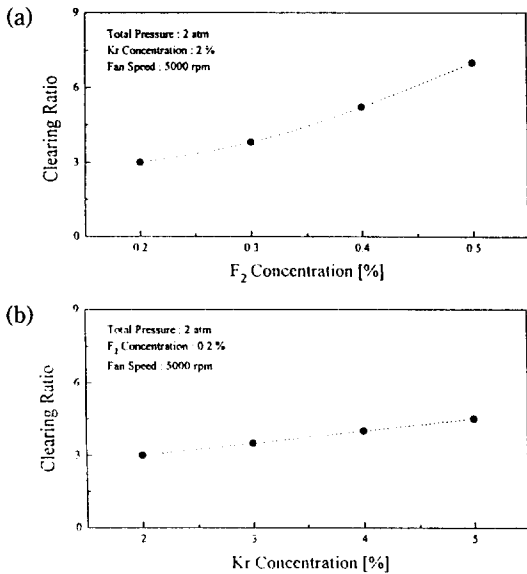


그림 6. CR dependence on Kr and F₂ concentration.

가하고 있고, 회전수 5000 rpm에서 37 m/s의 속도가 얻어졌다. 이 결과는 이 장치 이전에 보고하였던^[11] 500 Hz 레이저 장치의 결과보다 42% 증가하였다. 이것은 레이저 관 유로 구조의 개선에 의해 33%, 전극간격을 2.0 cm로부터 1.8 cm로 줄임으로 인해 9%의 유속 증가가 이루어진 결과이다.

고반복 동작을 위해 필요한 가스의 유속을 검토할 때 다음의 CR 식^[11)]을 사용한다.

$$CR \equiv \frac{1/f}{W/V} = \frac{V}{f \cdot W}$$

여기서 f 는 반복 주파수, W 는 방전폭, V 는 가스유속이다. 레이저 반복 주파수는 일정한 가스 유속에 대해 클로우 방전이 불안정하여 아크방전이 발생할 때까지 상승한다. 아크의 개시는 평균출력의 제한을 가져온다. 그림 6은 F₂와 Kr의 농도에 대한 CR의 의존성을 나타낸다. 그림으로부터 F₂와 Kr 농도가 증가함에 따라 CR이 증가함을 알 수 있다. 이것은 F₂, Kr의 혼합비가 높으면 역시머의 상준위에서 생성효율이 높아져, 안정한 방전을 얻기 힘들기 때문에 CR에 영향을 주게된다. 장치가 소형이 되기 위해서는 가스 순환장치가 소형이 되어야 하는데 이를 위해선 CR 값은 작아야 한다. 실험으로부터 CR은 레이저 장치 구조, 가스 혼합비에 크게 의존함을 알 수 있었다. 특히 가스의 유속이 레이저 장치의 구조에 크게 의존하였으므로 CR 또한 레이저 장치의 구조에 크게 의존

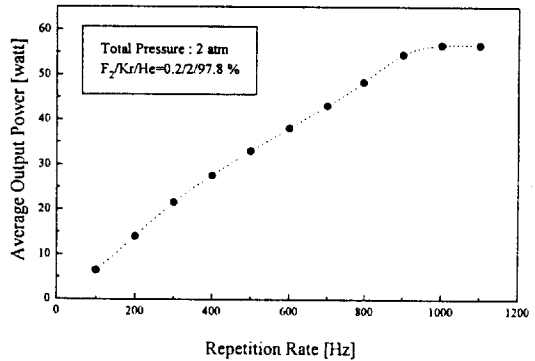


그림 7. Laser output powers versus of repetition rate.

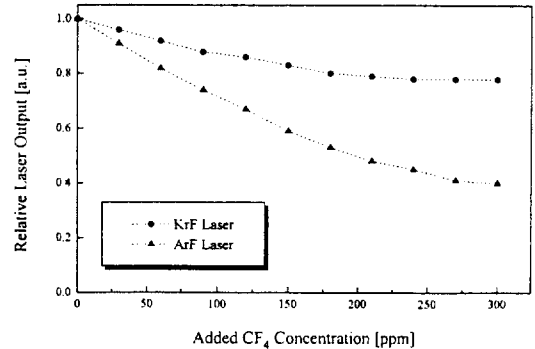


그림 8. Laser output power dependence on intentionally added CF₄ concentration

하였다. 총압력 2기압, 가스 혼합비 F₂/Kr/He=0.2/2/97.8%, 반복율 1 kHz의 경우 CR값 2.97일 때 출력 변동율은 ±9%이다. CR 값 2.97은 같은 1 kHz 동작에 대해 보고한 M. Matera의 CR 값 5^[24)]와 500 Hz 동작에서 CR 값 5를 보고한 O.P.Uteza^[21)]에 비해 비교적 적은 값이다.

그림 7은 반복율에 대한 KrF 레이저 평균출력 의존성을 나타낸다. 레이저 평균출력은 1 kHz까지 증가하였고 그 이상의 반복율에서는 1 kHz 때보다 오히려 평균출력이 감소하여 포화되는 부분이 나타났다. 그림에서 볼 수 있듯이 1 kHz 이상의 동작에서 포화부분이 나타나는 것은 개발된 장치가 1 kHz 동작을 위하여 개발되어 1 kHz 이상의 동작에 필요한 유속을 공급하지 못했기 때문이다. 1 kHz 동작에서 평균출력은 56 watt 이었다.

3.3 CF₄ 영향

그림 8은 CF₄ 농도에 대한 KrF 레이저와 ArF 레이저의 출력 의존성을 나타낸다. 절연체로 사용되는

PVDF는 [(C₂H₂F₂)_n]와 같이 조성되어있다. 이것은 F₂ 또는 HCl 등의 내할로젠 특성과 전기적 절연특성이 우수하고 가공이 용이하여 엑시머레이저에 주로 사용되지만, 강한 UV광이 조사되면 UV광에 해리되어 CF₄와 HF가 발생되어 레이저 가스의 수명을 단축시키는 특성을 갖는다^[25]. 본 연구에서는 이를 방지하기 위하여 PVDF 봉을 세라믹 판으로 차폐시켜 UV광이 PVDF 봉에 직접 노출되지 않도록 했다. 실험은 CF₄ 가스를 레이저 관에 첨가하며 행하여 졌다. 그림으로 부터 레이저 관 내에 150 ppm의 CF₄ 가스가 발생하면 KrF 레이저는 처음의 약 20%, ArF 레이저는 약 40%의 레이저 출력이 감소하였다. 이 결과로 부터 엑시머레이저 가스의 장수명화를 위해 레이저 관 내에서 CF₄ 가스의 발생을 억제 하는것은 매우 중요함을 알 수 있다. 세라믹 판을 사용하여 장수명화가 이루어진 결과는 이장치 이전에 개발되었던 500 Hz 반복 엑시머레이저^[11]에서 보고한 바 있다.

IV. 결 론

하나의 횡류팬만을 이용한 동심원통형 구조의 가스용적 10 liter인 소형 엑시머레이저를 개발하여 1 kHz 반복동작을 실현하고, 고속 반복동작에 중요한 파라메터인 유속과 CR 특성을 조사하였다. 장치의 소형화를 위해 예비전리는 간단한 구조로 강한 예비전리 효과가 얻어지는 UV 예비전리 방식을 사용하였고, 전극은 콤팩트한 형상으로 공간적으로 균일한 전계분포가 얻어지는 Ernst형을 사용하였다. 또 피크캐패시터는 방전 인덕턴스를 적게하기 위해 동심원통형 구조의 내부 원통에 배치하여 5.6 nH의 비교적 작은 값이 되도록 하였다. 본 실험에서 레이저 관의 구조를 환류가 발생하지 않는 원활한 가스의 흐름을 얻기위해 동심원통형 구조로 하고 전극간격을 좁혀서 유속을 증가시킴으로 길이 340 mm, 외경 90 mm의 소형 횡류팬 하나만으로 1 kHz 동작을 위해 필요한 유속 37 m/s를 얻었다. 또 논문에서 가스의 수명연장을 위해 방전관 내부에 알루미늄 세라믹을 사용해 PVDF가 UV광에 해리되는 것을 막는 구조를 연구하였다. KrF 레이저를 발진시켰을 때 대표적인 특성은 다음과 같다. 전극간격 1.8 cm, 팬 회전수 5000 rpm에서 37 m/s가 측정되었다. 펄스당 출력 에너지는 총가압력 3기압에서 142 mJ, 1 kHz 동작 때의 평균출력은 56 watt, 최대 효율은 1.2%이다. 총압력 2기압에서 1 kHz 동작했을 때 CR 값 2.97에서 가장 안정된 동작을 하였다. 이 때 출력 변동율은 ± 9%이다.

이와 같은 특성으로 얻어지는 장치의 파라메터들은

상용의 소형 고반복 엑시머레이저 개발을 위해 유익하게 이용될 것이라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] J.G. Black, S.P. Doran, M. Rothschild and D.J. Ehrlich, Appl. Phys. Lett., **56**, 1072 (1990).
- [2] M.L. Sentis, B.M. Forestier, J.P. Truong, B. Lacour and H. Brunet, Technical Dig. CLEO '91 CThE4, 376 (1991).
- [3] C.P. Wang, Appl. Phys. Lett., **29**, 29, 103 (1976).
- [4] S. Takagi, K. Kakitaki, N. Okamoto, F. Endo, K. Ishikawa and T. Goto, Technical Dig. CLEO/Pacific Rim '95 WH4, 76 (1995).
- [5] Lambda Physik Excimer Laser catalog (1996 publish).
- [6] C.P. Wang and O.L. Gibb, IEEE. J. Quantum Electron QE-15, 318 (1979).
- [7] A.R. George and S.T. Chou, J. Aircraft., **21**, 583 (1984).
- [8] Y. Sato, M. Inue, K. Haruta, H. Nagai and Y. Murai, Appl. Phys. Lett., **64**, 679 (1993).
- [9] D. Raj and W.B. Swin, Trans. ASME, J. Power., **130**, 393 (1981).
- [10] 박홍진, 최부연, 이주희, 경희대학교 레이저공학논문지., **3**, 43 (1992).
- [11] 박홍진, 이주희, 한국광학회지., **7**, 232 (1996).
- [12] H.J. Park and C.H. Lee, Technical Dig. CLEO/Pacific Rim '95 WH2, 75 (1995).
- [13] 박홍진, 최부연, 이주희, 새물리 **33**, 149 (1993).
- [14] G.J. Ernst, Opt. Commun., **49**, 275 (1984).
- [15] M. Arai, S. Ito and K. Hotta, Technical Dig. CLEO '91 CThA4, 346 (1991).
- [16] G.S. Dzakowic and S.A. Watzke, J. Appl. Phys., **44**, 5011 (1973).
- [17] J.L. Miller, J. Dickie, J. Davin, J. Swingle and T. Kon, Appl. Phys. Lett., **35**, 912 (1979).
- [18] Sensor Physics UV film scanner catalog.
- [19] H.M. von. Bergmann, G.L. Bredenkamp and P.H. Swart, Spie vol 1023 Excimer Lasers and Applications, 20 (1988).
- [20] O.P. Uteza, M.L. Sentis, Ph.C. Delporte, B.M. Forestier and B.L. Fontaine, Optic. Commun., **102**, 523 (1993).
- [21] 최부연, 이주희, 전기학회논문지., **39**, 977 (1990).
- [22] S. Watanabe, T. Sato and H. Kashiwagi, IEEE J.Quantum Electron QE-15, 322 (1979).
- [23] H. Hatanaka, N. Kawahara, M. Obara, K. Midori-

kawa and H. Tashiro, The Review of Laser Engineering., **11**, 55 (1989).
[24] M. Matera, R. Buffa, P. Burlamacchi, L. Fini and

R. Salimbeni, Rev. Sci. Instrum., **56**, 205 (1985).
[25] G.M. Jurisich, W.A. Von Drasek, R.K. Brinacombe and J. Reid, Appl Optics. **31**, 1975 (1992).

Output Characteristics of 1 kHz High Repetition Rate Excimer Laser

Hong Jin Park and Choo Hie Lee
*Kyung Hee University Institute for Laser Engineering,
Dep. of Electronic Engineering, Kiheung-Eup, Yongin,
Kyungki-Do, 449-701, Korea*

(Received: August 26, 1996)

A compact excimer laser was developed with coaxial type which the one line cross flow fan is only used. At 1 kHz repetitive operation, average power of KrF laser is 56 watt. In this paper, Design parameter and CR characteristic are investigated for attainment of the compact 1 kHz excimer laser. We have obtained overall efficiency of 1.2% with KrF laser gas. At this time, CR and the variation of laser output are $2.97, \pm 9\%$. Laser gas volume and active volume are 10 liter, $1.8(H) \times 1.2(W) \times 30(L) = 64.8 \text{ cm}^3$, respectively.