

500 Hz급 엑시머레이저의 반복동작특성

박흥진 · 이주희

경희대학교 레이저공학연구소

(1996년 4월 13일 받음)

대기오염 원격측정용 LIDAR의 레이저광으로 사용하기 위해 반복율 500 Hz급 엑시머 레이저를 개발하고, 이의 고반복 레이저 출력특성, 레이저 가스의 유로구조와 CR(clearing ratio) 특성을 조사하였다. 레이저 장치는 유선형의 가스유로, 주전극 직렬 UV 예비전리방식 등의 방법을 사용하고 컴팩트한 구조로 제작하여 가스 실용적용 10 liter 이하로 소형화하였다. KrF 레이저를 500 Hz로 동작할 때의 최대출력은 53 watt, 출력변동율은 $\pm 6.7\%$, CR은 2.3, 방전체적은 $2.0(H) \times 1.2(W) \times 56(L) = 134 \text{ cm}^3$ 이다. 이때 초기 출력에너지의 50%까지 출력이 감소할 때의 레이저가스의 수명은 3×10^6 shots이다.

I. 서 론

엑시머레이저는 자외영역의 파장에서 대출력, 고효율을 얻을 수 있으므로 대기중의 오염물질 농도 또는 오존농도의 원격측정^[1], 고집적 반도체 리소그래피^[2], 의용^[3] 등의 분야에서 각광을 받고 있다. 이런 분야에서 적합한 레이저의 성능은 수 백 Hz의 높은 반복율과 10^6 shot 이상의 동작수명을 가져야 한다. 그러나 고반복 동작의 레이저는 단펄스(single pulse) 동작의 경우에 비해 충전전원의 고반복 동작, 주전극의 반복 스위칭, 방전의 안정성, 레이저 가스의 순환 및 냉각 등의 문제를 해결해야 하는 문제가 있다. 고반복 엑시머레이저를 최초로 보고한 것은 1976년에 C.P. Wang의 방전여기 회 가스 할라이드 엑시머레이저 개발이다^[4]. 그 이후 펄스 전원장치와 반복 스위칭 등의 주변기기의 개발, 예비전리 방식의 개선, 그리고 레이저 가스의 CR 특성 향상^[5] 등을 중심으로 많은 연구가 이루어져 최근 반복율 kHz급에 이르는 레이저의 개발^[6]이 보고 되었다. 그러나 대부분의 보고들은 개발된 장치의 에너지 특성과 구조의 기본원리만 기술되어 있어서 장치제작에 필요한 설계 파라미터를 응용함에는 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 고반복이면서 소형의 엑시머레이저를 개발하고 이의 특성을 조사하여 대용량 레이저의 개발에 이용할 수 있는 설계 파라미터를 제시하고자

한다. 본 연구를 위해 개발된 엑시머레이저는 대기오염 원격측정의 LIDAR에 사용할 수 있도록 소형화된 구조로 설계하여 가스 실용적용은 매우 적은 10 liter이고 최대 반복율은 500 Hz이다. 따라서 장치는 구조가 소형화되고, 수명은 장수명화가 가능하도록 UV 예비전리 핀을 주전극에 직렬 연결하였고, 주 방전 회로의 인덕턴스는 6 nH 이하가 되는 최단거리의 방전회로를 구성하였다. 그리고 가스유로는 준 유선형 구조, 방전관의 내벽은 알루미늄 세라믹 재료를 사용하는 것 등의 방식이 주로 연구되었다.

개발된 레이저 장치로 KrF 레이저를 500 Hz로 반복 동작할 때 이의 대표적인 특성은 다음과 같다. 최대 출력은 53 watt, 출력변동율은 $\pm 6.7\%$, 초기 출력에너지의 50%까지 감소할 때 레이저 가스 수명은 3×10^6 shots이다. 그리고 펄스당 최대평균 출력에너지는 총 가스 압력 3기압에서 250 mJ, 최대효율은 1.5%이다.

II. 실험 장치

실험을 위하여 설계, 제작한 엑시머레이저의 단면도는 그림 1과 같다.

레이저 장치는 구조가 소형화되고 고반복과 장수명의 동작에 적합하게 설계되었다. 따라서 장치의 피킹캐패시터(peaking capacitor)는 예비전리용 아크핀과 주전극에 직렬로 연결하였으며 주전극의 방전이 완전히 형성되기 전에 아크핀에 의한 UV 광이 레이저 가스를 예비전리시키는 방식을 사용했다^[7]. 아크핀은 주전극의 양

*본 연구는 과학기술처 94년도 국제공동연구과제[94-I-1310]에 의해 과학기술처와 LG산전 주식회사의 지원을 받아 수행되었기에 감사를 드립니다.

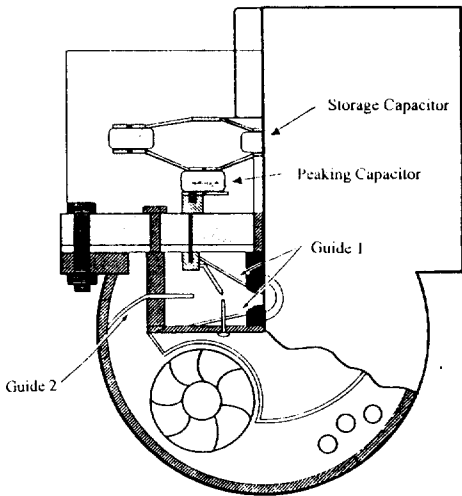


그림 1. Cross-sectional view of the 500 Hz excimer laser.

옆에서 3 cm 떨어진 거리에 배열하고 각 핀 사이는 2 cm 간격으로하여 총 62개를 설치하였다. 이때 아르곤의 전극간 거리는 2 mm이다. 주방전전극은 Ernst형^[8]으로 제작하였고, 이때 k 의 값은 $k_0=0.15$, $k_1=2.81 \times 10^{-3}$, $k_2=7.4 \times 10^{-7}$ 이고 전극길이는 64 cm이다. 주 방전 회로의 인덕턴스 값은 6 nH 이하가 되도록 주방전부의 구조를 가능한 단순화하였다. 인덕턴스를 6 nH 이하로 하는 이유는 방전전류의 빠른 상승을 얻기 위해서이다. 전류의 빠른 상승은 균일한 글로우방전 생성과 고효율의 레이저 출력을 위해 매우 중요하다. 회로의 인덕턴스 계산은 주방전부의 전기회로 길이를 측정하여 이것을 솔레노이드 형태로 1회 감은 것으로 가정하여 계산한다^[9]. 또한 충전 캐패시터를 포함한 충전회로의 인덕턴스는 170 nH이다.

고반복 동작시의 레이저 출력을 일정하게 유지하기 위해 레이저가스의 유로구조를 준 유선형이 되도록 하였다. 그리고 유로중에서 발생하는 와류를 억제하기 위해 전극 주위에 가스 흐름을 조절하는 가이드를 설치하였다^[10]. 또 고속 반복동작때 레이저 헤드에 의해 가열되는 레이저 가스를 냉각하기 위해 수냉식의 열교환용 파이프 3개를 설치하였다. 직경은 17 mm이다. 열교환 스텔레스관의 인접거리에 가스순환용 라인플로우팬(line flow fan)을 설치하였다. 이것은 외경 90 mm, 길이 600 mm이다. 라인플로우팬은 레이저 용기내의 고압 가스를 순환시키고, 레이저 용기의 외부에서 제어하여야 한다. 그러므로 레이저 용기의 압력을 지탱하면서 회전할 수 있는 자

성유체 밀봉의 구조를 사용하였다. 이와 같은 소형화 설계의 결과 레이저 가스의 실용적은 매우 축소되어 총 10 liter가 실현 되었다.

고반복동작의 분위기하에서 레이저 가스의 장수명화를 달성하기 위해 전극을 포함한 모든 도체는 STS-304를, 절연재로는 알루미늄 세라믹판과 PVDF봉을 각각 사용하여 레이저 가스중의 할로젠 성분에 의한 레이저관내의 재료들의 화학반응을 최소한으로 억제하였다.

PVDF봉은 강한 UV 광에 노출되면 쉽게 분해될 수 있으므로^[11], UV 광에 노출되지 않도록 알루미늄 세라믹판으로 가렸다. 또한 모든 캐패시터는 레이저관의 밖에 설치하여 레이저 가스가 캐패시터 피복에 의하여 반응되는 문제를 제거하였다.

레이저를 고반복으로 펌핑하는 반복스위치는 EG & G의 사이라트론 HY 3202를 사용하였다. 레이저 공진기의 길이는 100 cm이고, 이에 부착되어 있는 레이저 창은 직경 2인치인 CaF₂를 사용하였다. 레이저 거울의 반사율은 완전반사 거울과 출력 거울이 각각 99%, 18% 이다. 레이저 출력의 펄스당 에너지는 Gentec ED-500, 반복동작때 에너지는 Moletron J3, 펄스 파형은 광전관 R 1193U-02 (Hamamatsu), 빔의 패턴은 UV 카드^[12]를 각각 사용하여 측정하였다. 또 반복동작때 가스 유속의 측정은 피토 관(pito-tube)을 사용하였다.

III. 반복동작 특성

3.1 레이저 출력특성

희가스 할라이드계의 엑시머레이저는 여기준위가 높고 (ArF: 6.4 eV, KrF: 5.0 eV, XeCl: 4.0 eV)^[13], 상준위에 머무르는 엑시머의 수명은 수 ns (ArF: 4.2 ns, KrF: 6.7 ns, XeCl: 11 ns)^[14]로 매우 짧다. 따라서 안정된 레이저 출력을 얻기 위해서는 레이저 여기전원의 펄스 상승시간, 즉 여기시간은 수 십 ns 이내, 여기강도는 수 MW/cm³ (ArF: ≥ 1.2 MW/cm³, KrF: ≥ 0.8 MW/cm³, XeCl: ≥ 0.6 MW/cm³)^[14]의 조건을 갖추어야 한다. 그림 2는 KrF 레이저일 때 측정된 대표적인 주방전 전압파형과 레이저 출력파형이다. 전압파형으로부터 예비전리 전압과 주방전 전압간의 시간지연은 130 ns, 여기시간은 50 ns 임을 알 수 있다. 이 결과는 주방전 회로의 인덕턴스가 레이저를 여기시키기에 적합한 값인 것을 설명한다. 이때 레이저 출력펄스의 반치폭(FWHM)은 15 ns이다.

그림 3은 충전전압 30 kV, 가스혼합비 F₂/Kr/He=0.2/3/96.8%으로 일정하게 유지할 때 전체 가스압력에 대한 레이저출력의 의존성을 나타낸다. 이때 전체 압력 3기

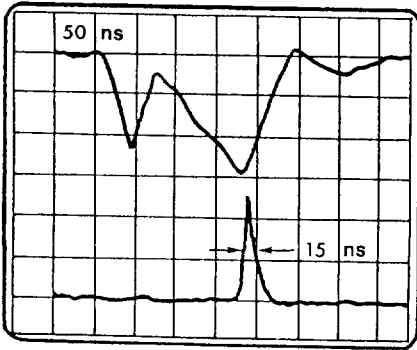


그림 2. Typical temporal histories of the discharge voltage and KrF laser emission.

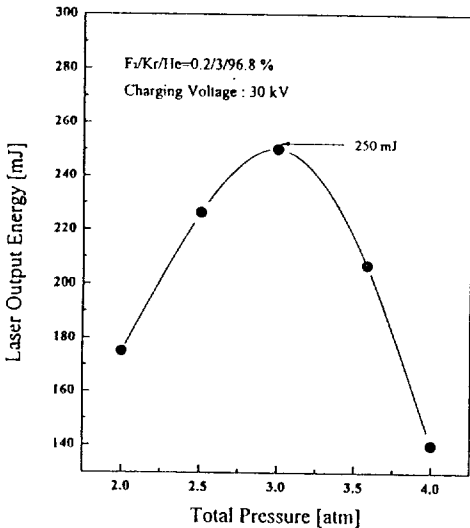


그림 3. KrF laser output energy as a function of total pressure.

압에서 최대 출력에너지는 250 mJ이다. 방전 유효체적에 대한 레이저 출력에너지의 비로 정의되는 특성에너지는 2.0 Joule/liter이다. 또한 그림에서 2기압에서 3기압까지의 범위안에서 레이저출력은 증가하지만 3.5기압과 4기압까지의 범위안에서는 레이저 출력은 감소하고 있다. 이것은 주전극의 구조상 결합때문에 균일 방전에 한계를 갖고 있는 것을 설명한다.

3.2 레이저가스 순환특성

고반복 동작하에서 레이저 출력을 거의 일정하게 유지하기 위해서는 전기방전의 분위기에 노출된 가스는 다음 동작전에 순환을 시켜야한다. 그림 4는 라인플로우팬의 회전때 유로의 구조가 유속에 주는 영향을 고

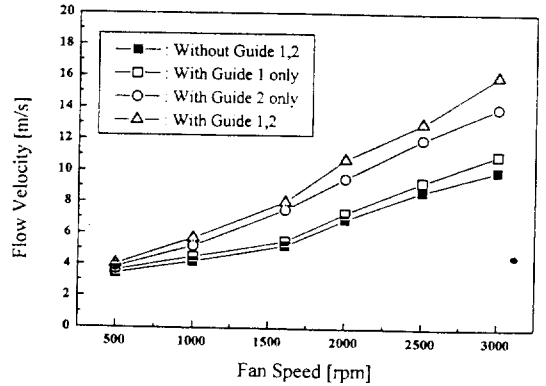


그림 4. Gas flow velocity versus of rotational speed of line cross flow fan.

찰하기 위해 2종류의 가이드를 유로속에 설치하여 유속의 변화를 측정된 결과이다. 가스 유속은 아노드 전극과 캐소드 전극사이의 중심부분에 피도 관을 삽입하여 측정하였다. 실험에서 가이드를 모두 사용하지 않을 때 팬 속도 3000 rpm의 경우 유속은 9.8 m/s, 가이드를 1 또는 2 중의 하나만 사용했을 때 각각 10.5 m/s, 13 m/s이다. 또한 가이드를 1, 2 모두를 사용했을 경우 16 m/s이다. 이 결과는 가스 유속은 유로 구조에 크게 의존하는 것을 나타낸다. 따라서 고반복의 엑시머레이저는 가스유로의 최적설계가 매우 중요함을 설명한다.

레이저 가스의 고속 순환에 의해 고반복 동작을 실현할 수 있다. 레이저 가스가 방전 분위기 속에 노출되면 방전 생성물 뿐만 아니라 음향적, 열적 불균형을 형성하므로 그대로 방치하면 다음 방전에 영향을 준다. 이것은 레이저 출력을 불안정하게 하는 원인이되므로 다음 방전 전에 레이저가스를 신선한 것으로 순환시킴으로써 안정 동작 조건으로 회복한다. 이때 신선한 가스로 회복시키는 관계식 CR은 가스유속과 반복주파수, 전기 방전폭으로 표현한다^[5].

$$CR(\text{clearing ratio}) = \frac{V}{W \times f}$$

여기서 V는 가스유속, W는 방전 폭, f는 반복 주파수이다. CR의 값이 작고, 속도 V가 작아야 가스 순환 계통은 소형구조가 되어 레이저 장치의 체적을 축소할 수 있다. CR의 값은 가스흐름의 유로, 레이저 가스의 혼합비 및 가스압력등에 따라 다르게 된다. 그림 5는 CR 값에 대한 레이저 출력의 변동을 관계를 나타낸다. 본 연구는 CR 값에 대한 레이저 평균출력의 의존성을 밝히는데 있으므로 가스의 유속과 반복 주파수를 파라메

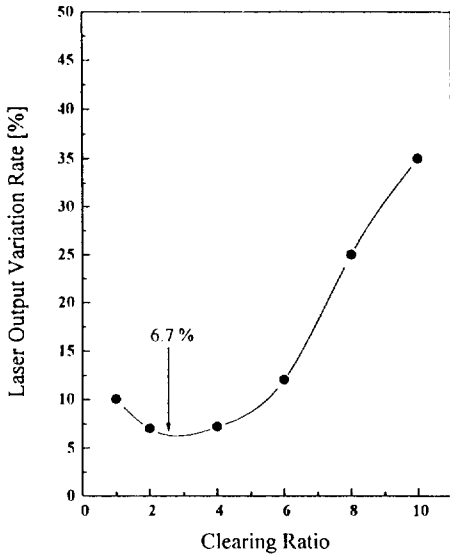


그림 5. Laser output variation rate versus of CR value.

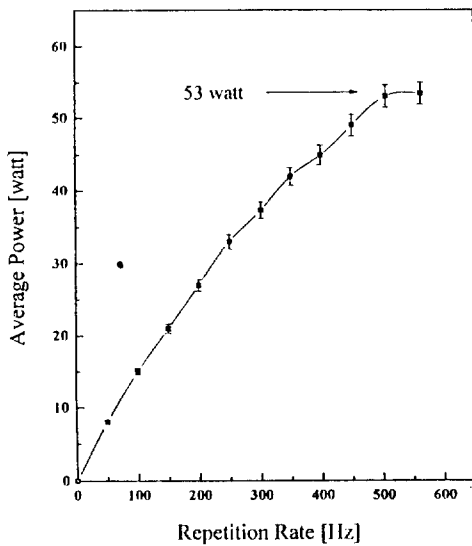


그림 6. Laser output power versus of repetition rate.

터로 변화해 가며 실험하였다. 이때 방전 폭은 1.2 cm 이다. 가스 혼합비 $F_2/Kr/He=0.2/3/96.8\%$, 총기압 2 atm, 반복율 500 Hz의 경우 CR의 값이 2.3일 때 출력 변동율은 $\pm 6.7\%$ 가 되어 가장 안정된 동작을 하였다.

그림 6은 반복율에 대한 레이저 평균출력의 의존성을 나타낸다. 레이저 평균출력은 반복율 500 Hz까지 거의 선형적으로 증가하고 그 이상의 반복율에서는 포화상태에 이른다. 이때 평균출력의 최대값은 53 watt이다. 이와같은 평균출력의 포화원인은 라인플로우팬에 연결된

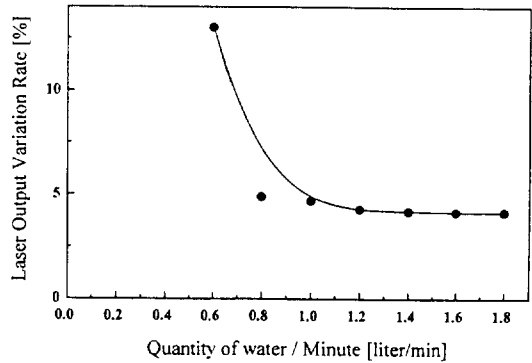


그림 7. Laser output variation rate versus of quantity of water.

마그네틱 커플러의 회전속도 한계 때문에 팬의 회전수가 제한되어 그 이상의 반복 동작에서 신선한 가스의 유속을 공급하지 못한 결과이다.

전기방전의 분위기에 노출된 레이저가스는 반복율이 높고, 동작지속시간이 길어지면 가스 온도는 현저하게 상승하여, 레이저관의 벽면재료로부터 흡착물질을 재방출한다. 이러한 불순물의 발생과 그로 인한 아크의 유발은 레이저 가스의 노화를 더욱 가속시킨다^[15]. 이의 대책으로 흔히 수냉식의 열교환기를 사용한다. 본 연구에서는 가스의 유로속에 수냉식의 열교환용 역할을하는 sus 파이프를 설치하였다. 그림 7은 냉각수의 양에 대한 레이저 출력의 변동율을 나타낸다. 그림으로부터 본 실험을 위해 제작된 레이저는 분당 0.8 liter 이상을 공급 할때 레이저 출력이 안정됨을 알 수 있다.

3.3 레이저가스의 수명

레이저 가스의 수명은 동작회수에 의존하므로 초기 출력에너지의 50%로 감소할 때까지의 동작회수로 정의한다^[16]. 레이저 가스중의 할로젠 도우너는 전기방전의 분위기 속에서는 주변의 물질과 반응하여 여러가지 불순물을 생성한다. 이와 같은 불순물들은 할로젠 도우너의 감소, 레이저관의 흡수, 예비전리용 UV광의 흡수, 방전의 불안정, 엑시머 형성의 영향, 레이저 창 오염 등의 원인이 되어 결과적으로 레이저 출력을 감소시킨다^[17,18]. 따라서 본 연구에서는 레이저 가스의 장수명화를 위해 전극을 포함한 레이저관 내의 모든 도체는 STS-304를, 절연물질은 PVDF와 알루미늄 세라믹을 사용했다. 특히 PVDF는 F_2 등의 할로젠가스에는 안정한 절연재료이지만 강한 UV 광에 쬐이면 해리되어 CF_4 등의 불순물을 발생하므로 레이저가스의 수명을 단축시킨다. 따라서 본 장치에서는 이것을 방지하기 위해 알루미늄 세라믹판의

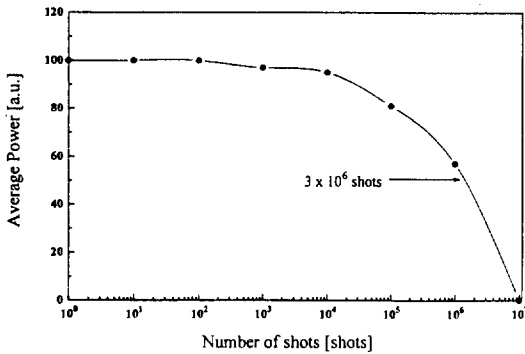


그림 8. Gas life time.

로 PVDF가 UV광에 노출되는 것을 가렸다. 알루미늄 세라믹을 사용하였을 때 레이저가스의 수명은 알루미늄 세라믹 판을 사용하지 않았을 때의 2×10^6 shot 보다 1.5 배 연장되었다. 그림 8은 KrF 레이저 때 가스수명을 나타내며 초기출력의 50%까지 감소할 때 수명은 3×10^6 shots임을 보인다. 이것은 냉각트랩을 사용하지 않은 경우이며 만약 냉각트랩을 사용하면 가스수명은 3배 정도 더 길어진다^[16].

IV. 결 론

대기오염 측정 LIDAR에 사용하기 위해 반복율 500 Hz, 가스 실용적 10 liter의 소형화된 엑시머레이저를 개발하였다. 레이저 장치를 소형화된 구조로 제작하기 위해 예비전리는 UV 예비전리방식을 사용하였고, 주방전 회로의 인덕턴스는 6 nH, 가스유로의 구조는 준 유선형이 되도록 설계하였다. 또 장수명 동작을 위해 주방전 캐패시터는 레이저 관 밖에 설치하였고 특히 레이저 관 내의 유전체는 알루미늄 세라믹판을 사용하였다.

본 연구에서는 CR 특성과 유로구조가 가스의 속도에 미치는 영향을 조사하기 위해 전극주변에 몇가지 형태의 가이드를 설치하여 실험하였다. 축소구조의 엑시머레이저를 실현하기 위해 낮은 CR값과 환류발생의 억제에 매우 중요함을 밝혔다. KrF 레이저를 반복주파수 500 Hz로 동작할 때 최대 평균출력은 53 Watt, 출력 변동율은 $\pm 6.7\%$ 이다. 이때 CR값은 2.3이다. 레이저 가스는 3×10^6 shots에서 초기에너지의 50%로 감소하였다. 이때 알루미늄 세라믹을 사용하였으며 알루미늄 세라믹을 사용하지 않았을 때 보다 수명은 1.5배 연장되었다. 자외선 레이저 카드를 사용해 측정된 KrF 엑시머 레이저의 방

전폭은 1.2 cm이다. 그리고 펄스 발진하였을 때 충전전압 30 kV, 총 가스압력 3기압의 조건에서 레이저의 최대 출력에너지는 250 mJ, 레이저 펄스폭 (FWHM)은 15 ns 이다. 이와 같은 특성으로 얻어지는 장치의 설계 파라미터들은 대용량 또는 상용 레이저 개발을 위해 매우 유익하게 이용될 것이라 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] R. Barbini, F. Colao, R. Fontani, A. Palucci and S. Ribezzo, ENEA Contribution ENEA report RT/INN 192/41 (1992).
- [2] M. Shinbo and K. Sato, Jpn J. Appl. Phys. **34**, 5640 (1995).
- [3] R. S. Taylor, K. E. Leopold, R. K. Brimmonconbe, W. J. Keon and L. Higginson, Proc. SPIE **906-38**, 225 (1988).
- [4] C. P. Wang, Appl. phys. Lett., **29**, 103 (1976).
- [5] G. S. Dzakowic and S. A. Watzke, J. Appl. phys., **44**, 5011 (1973).
- [6] S. Takagi, K. Kakitaki, N. Okamoto, F. Endo, K. Ishikawa, and T. Goto, Technical Dig. CLEO/Pacific Rim'95 WH4, 76 (1995).
- [7] 박흥진, 최부연, 이주희, 새물리 **33**, 149 (1993).
- [8] G. J. Ernst, Opt. Commun., **49**, 275 (1984).
- [9] 최부연, 정재근, 이주희, 전기학회논문지 **38**, 788 (1989).
- [10] H. J. Park and C. H. Lee, Technical Dig. CLEO/Pacific Rim'95 WH2, 75 (1995).
- [11] M. Arai, S. Ito and K. Hotta., Proc. CLEO'91 p. 346 (1991).
- [12] Laser Card™, UV Sensitive Paper by Sensor Physics.
- [13] 최부연, 이주희, 한국광학회지 **1**, 33 (1990).
- [14] M. Rokni, J. A. Mangano, J. H. Jacob and J. C. Hsia, IEEE J. Quantum Electron. **QE-14**, 464 (1978).
- [15] O. P. Uteza, M. L. Sentis, Ph. C. Delaporte, B. M. Forestier and B. L. Fontaine, Optics Communication **102**, 523 (1993).
- [16] Questek, Technical note No. 3 May 1983.
- [17] G. L. Jursich, W. A. Von Drasek, R. K. Brimmonconbe, and J. Reid, Appl Optics., **31**, 1975 (1992).
- [18] M. L. Sentis, P. Delaporte, B. M. Forestier, and B. L. Fontaine, IEEE J. Quantum Elect **QE-27**, 2332 (1991).

Repetitive Operation Characteristics of 500 Hz Class Excimer Laser

Hong Jin Park and Choo Hie Lee

Institute for Laser Engineering, Kyung Hee University, Yongin 449-701, Korea

(Received: April 13, 1996)

A 500 Hz repetition rate excimer laser was developed as light source for pollution lidar. In this paper, the high repetitive output characteristics, the gas flow loop structure, and CR(clearing ratio) characteristics were investigated. Our laser system was constructed compact structure with a streamline gas flow loop and UV preionization. The real gas volume of laser is 10 liter. At 500 Hz repetitive operation, we have obtained average power of 53 watt with KrF laser gas. The variation of laser output, CR, and active volume are $\pm 6.7\%$, 2.3, and $2.0(H) \times 1.2(W) \times 56(L) = 134 \text{ cm}^3$, respectively. Laser output power is declined to half at 3×10^6 shots.