

고효율 CO₂ Laser 개발연구 : SMPS 방식 펄스형 CO₂ Laser의 출력특성

論 文
48C - 11 - 3

A Study on the Development of High Efficiency CO₂ Laser : Output Characteristics of Pulsed CO₂ Laser Using SMPS Method

鄭賢株* · 李東勳** · 南京勳*** · 金度完* · 鄭永煥* · 李有秀*** · 金熙齊§ · 曹井守§§
(Hyun-Ju Chung · Dong-Hoon Lee · Gyung-Hoon Nahm · Do-Wan Kim · Young-Hwan Chung
Yu-Soo Lee · Hee-Je Kim · Jung-Soo Cho)

Abstract - In this study, it is the purpose to develop a cheap and compact repetitively pulsed CO₂ laser with pulse repetition rate range of 180 Hz. We used a SCR switched power supply as a high voltage pulsed supply, which is cheap and simple comparing to others. PIC one-chip microprocessor was used for precise control of a laser power supply on the control part. And the laser cavity was fabricated as an axial and water cooled type.

The laser performance characteristics as various parameters, such as pulse repetition rate and gas pressure have been investigated. The experiment was done under the condition of total pressure of CO₂, N₂ and He from 4 Torr to 16 Torr and pulse repetition rate from 4 Hz to 180 Hz. As a result, the maximum average output was about 19.6W at the total pressure of 12 Torr and the pulse repetition rate of 180 Hz.

Key Words : Pulsed CO₂ laser, Pulse transformer, Pulse repetition rate, PIC one-chip microprocessor

1. 서 론

CO₂ 레이저는 적외선 영역인 10.6 μm 파장의 고출력 펄스 또는 연속파를 방출시킬 수 있으며, 약 15% 이상의 높은 효율을 내면서도 매우 안정된 동작 특성을 보이기 때문에 산업용, 군사용, 의료용, 각종 물리·화학의 기초 연구용 등의 광범위한 응용 분야에서 각광을 받고 있다[1-5].

CO₂ 레이저는 대부분 수 W에서 수 십 kW급의 연속형 레이저이거나 수 십 μs에서 수 백 μs의 펄스폭을 갖는 수 W에서 수 백 W급의 고반복 펄스형 레이저이다.

급속의 정밀절단, 심용접에서는 수 십 Hz로부터 수 kHz의 펄스 출력이 필요하며, 펄스방식은 Normal Pulse와 Super Pulse로 크게 나눌 수 있다. Normal Pulse의 경우에는 Pulse의 파고치가 연속파의 파고치와 동일하기 때문에 펄스시의 평균 출력은 연속파의 경우보다 낮다. Super Pulse의 경우에는 Pulse 파고치를 연속파의 파고치보다 훨씬 높게 할 수 있으므로 평균 출력은 낮지만 첨두 출력이 높아서 유리 등 세라믹 재료의 가공에 널리 사용된다[6].

최근 펄스형 CO₂ 레이저의 이용이 증가함에 따라 우수한

품질, 유지와 보수의 편리성, 장치의 소형화, 저가격화 등이 요구되고 있으며, 이러한 특성을 충족시키기 위해서는 레이저 전원장치의 경제적인 설계가 매우 중요하다.

펄스형 CO₂ 레이저 발전을 위한 고압 펄스 전원장치는 사용되는 스위치의 종류에 따라 RSG(Rotating Spark Gap)형, SCR(Thyristor)형, 싸이라트론(Thyratron)형의 세 가지가 있다. RSG형은 제작이 용이하고 1 μs이내의 짧은 펄스폭을 가지는 에너지 전달에는 유리하나, 스위치가 on시 스파크 갭 전극이 서로 접촉하므로 전극의 기계적 마모가 심하여 수명이 짧고 고주파의 에너지 전달에는 부적합하다. SCR형은 커패시터에 반복적으로 충전된 저압의 에너지를 스위칭 소자인 SCR과 권선비가 큰 고압·고주파 펄스 변압기를 이용하여 고압의 펄스로 변환한 후 부하에 인가한다. 이것은 SCR의 낮은 di/dt 특성으로 인하여 좁은 펄스의 에너지 전달에는 한계가 있으나, 저압측을 스위칭함으로써 제어하기가 용이하고 SCR은 시중에서 쉽게 구할 수 있으며 또한 가격이 저가이므로 수 백 Hz의 펄스 반복율과 100 μs 이상의 펄스폭을 가지는 전원의 설계에 적합하다. 싸이라트론형은 고주파의 펄스 반복율과 높은 di/dt 특성 때문에 아주 짧은 펄스폭의 에너지 전달이 가능하다는 장점은 있으나 가격이 매우 고가이고 스위칭을 위한 트리거(trigger)회로의 설계가 복잡하다[7].

기존의 저출력용 펄스형 CO₂ 레이저는 펄스 전원장치의 스위칭 소자로서 싸이라트론을 사용한 TEA 방식이 사용되어졌다[9]~[12]. 따라서 이 방식은 싸이라트론 자체가 아주 고가이므로 전원장치가 비싸게 되는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 100 Hz 부근의 펄스 반복율을 가지는 경제적인 펄스형 CO₂ 레이저의 설계 및 제작을 위하여 스위칭

* 準 會 員 : 釜山大 電氣工學科 碩士課程

** 正 會 員 : 釜山大 電氣工學科 博士課程

*** 準 會 員 : 釜山大 電氣工學科 碩士卒業

§ 正 會 員 : 釜山大 電氣工學科 助教授 · 工博

§§ 正 會 員 : 釜山大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1999年 7月 6日

最終完了 : 1999年 10月 8日

소자로서 저가의 SCR과 고압·고주파 펄스 트랜스를 이용한 SCR형 펄스 전원 장치를 레이저에 적용하여 새로운 방식의 고반복 펄스형 CO₂ 레이저를 설계 제작하였다. 공진기는 장치의 유지·보수가 용이한 저속 축류형의 구조를 채택하였고 글로우(Glow) 방전이 안정되게 지속될 때 펄스 반복율과 동작압력의 변화에 따른 레이저빔의 출력 특성을 조사하여 얻어진 결과를 정리하였다.

2. 레이저 장치의 구성

전체 시스템은 크게 나누어 공진기와 펄스 전원장치로 구성되어 있으며, 그 외에 냉각장치, 가스 공급장치, 진공 펌프와 압력계 등이 있다.

2.1. 공진기 시스템

본 연구에서는 그림 1에서 보는 바와 같이 방전 경로와 광축이 동일한 축류형을 채택하였다. 레이저 방전관으로는 길이 100 cm, 내경 24 mm, 두께 2 mm인 파이렉스(Pyrex)관을 사용하였고 방전 플라즈마를 발생시키기 위한 방전관의 체적은 407cm³이다. 방전부는 알루미늄으로 만든 원통형의 음극과 침 모양의 양극을 방전관에 부착하여 만들었으며, 전극간 거리는 약 90 cm로 하였다. 방전관 외벽에는 연속 동작시 방전 플라즈마로 인한 온도 상승에 의해 야기되는 출력의 불안정을 방지하기 위하여 내경 30 mm, 두께 2 mm인 파이렉스관을 이중으로 제작하여 물순환 냉각 장치를 구성하였다. 냉각수 온도는 방전시 약 18 °C 정도로 일정하게 유지하였다. 방전관에 순간적인 대전류가 흐르면 방전관의 음극측과 양극측에 압력차가 생긴다. 이 때문에 레이저 발진 효율이 떨어지고 발진정지 등의 상태가 생긴다. 이것을 방지하기 위해 바이패스(Bypass)관을 설치하여 전극 주위 가스 과열에 의한 방전관의 온도 상승과 압력차를 작게 하고 방전시 CO₂ 분자의 해리에 의한 불순물의 발생을 감소시켰다.

레이저 발진을 위한 전반사경은 열 팽창계수가 작고 열전도도가 크며 경도가 높은 직경 1.5 인치, 곡률 반경 10 m, 반사율 99.5 %인 몰리브덴 렌즈를 사용하였고, 부분반사경은 발진문턱치를 낮추기 위해 반사율은 90 %이고 기계적 강도와 열전도도가 크며, 흡수계수가 적은 ZnSe(Zinc Selenide)렌즈를 채택하였다.

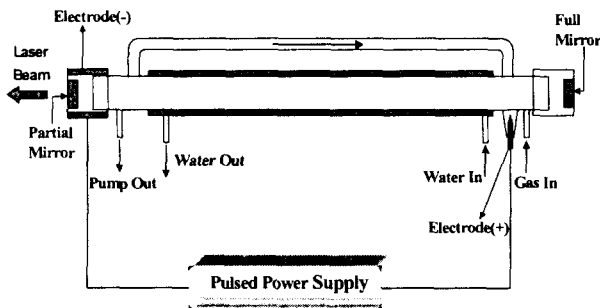


그림 1 펄스형 레이저 시스템의 개략도
Fig. 1 Schematic diagram of Pulsed Laser System

2.2. 펄스 전원 장치

본 연구에서 사용된 펄스 발생 장치는 실험실에서 직접 설계 및 제작한 SMPS방식의 전원이다. 스위칭 소자는 수 십 Hz에서 수 백 Hz의 스위칭에 적합한 SCR(AEG T46F1600 CEC-5VN)을 사용하였고 커패시터(marcon사 제품 : 8μf)에 충전된 에너지를 고압·고주파 펄스 변압기를 사용하여 고압의 펄스로 변환시킨 후 방전관에 인가하였다. 출력밀도 제어는 일정한 펄스폭에서 펄스반복율을 가변시킬 수 있도록 하였다. 반복율은 1~180 Hz까지 가변할 수 있도록 설계하였고 전원에서 얻을 수 있는 최대 펄스 전압은 약 25 kV였다. 레이저 매질을 여기시키기 위한 펄스 전원장치의 주요부는 그림 2와 같이 정류부, 스위칭부, 고압·고주파 펄스 변압기부, 마이크로 프로세서를 이용한 제어부로 구성되어 있다. 그림 3은 압력 12 Torr에서 방전관에 고압의 펄스를 인가하였을 때 양 전극사이의 전압파형을 1000:1 분압기(Tektronix : P6015A Opt.1R)를 사용하여 측정된 파형이다. 그림 3에서 알 수 있듯이 동작압력 12 Torr에서 글로우(Glow) 방전이 안정되게 지속될 때, 한 개의 펄스파형을 포착하여 펄스폭을 측정하였더니 약 80 μs였다.

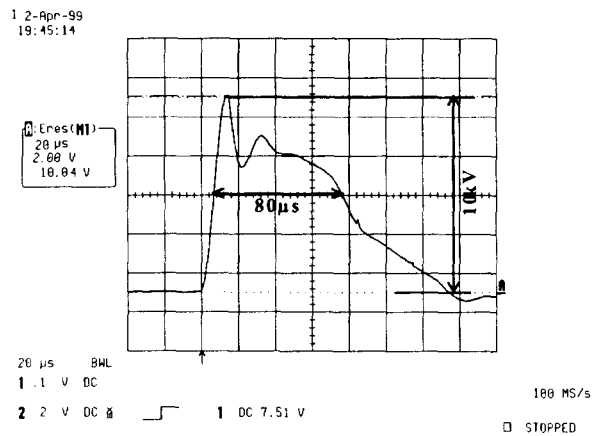


그림 2 글로우 방전중인 한 펄스의 전압파형 (12 Torr)
Fig. 2 Voltage waveform of single pulse in glowdischarge

2.2.1. 정류부

정류부는 단상 교류 전압 조정기, 승압용 변압기, 돌입전류 제한 및 단상 브릿지 다이오드 정류기, 평활용 콘덴서로 구성된다. 부하 변동에 따른 입력 전압의 변동은 단상 교류 전압 조정기로 미세 조절할 수 있도록 하였다.

2.2.2. 스위칭부

스위칭부는 그림 2와 같이 스위칭 소자(S1, S2)와 충전·방전용 커패시터(C)로 구성된다. S1은 정류부로부터 C에 전달되는 에너지를 투입 또는 차단시키는 역할을 하고 S2는 C에 충전된 에너지를 방전시키는 역할을 한다. 이 방식은 C에 충전이 완료된 후에는 정류단을 스위칭부로부터 차단시킴으로서 커패시터의 에너지를 완벽하게 부하에 전달할 수 있도록 장치를 구성하였다. 회로의 동작 순서는 다음과 같다.

S1(on) → C 충전 → S1(off) → S2(on) → C방전 → S2(off) → S1(on)

처음에 S1이 on되면 정류부로부터 공급된 에너지가 ① DC_{CAP} → D1 → C → D2 → DC_{CAP}를 통해 C에 충전된다. C에 충전된 전압과 정류부의 전압(DC_{CAP})이 같게되는 순간 S1은 off된다. 그 다음 S2가 on되면 커패시터에 충전된 에너지가 ② C → S2 → 변압기 1차측 → D3 → C를 통해 방전되며 방전이 완료되면 S2는 off되고 다시 S1이 on된다.

2.3.3. 펄스 변압기

펄스 변압기는 1차, 2차측의 결합도가 우수한 페라이트 코어(TDK3415)를 사용하였다. 1차측의 권선으로는 φ 0.55의 에나멜선을 3000턴으로 감았고, 2차측은 φ 0.2의 에나멜선을 120턴으로 감아 사용하였다. 디지털 LCR 메터(HUNG CHANG사 모델명 Z216)로 측정 하였더니 1차측의 인덕턴스 값은 72 [mH]였고, 2차측은 42 [H]였다. 1차, 2차측의 전압비는 식(1)과 같다.

$$a \approx \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} = \frac{V_2}{V_1} \tag{1}$$

따라서, 설계 제작한 변압기의 권수비 a는 약 25로서 1차, 2차측의 변압비가 약 1 : 25임을 알 수 있었다[8].

제작한 변압기는 사이즈가 큰 코어를 사용하여 공간, 연면 거리(변압기의 1차-2차간, 1차 - 코어, 2차 - 코어간등의 거리)를 확보하였고, 내열성과 절연내력이 뛰어난 테프론 테이프로 층간 절연을 하였으며, 보빈에 의해 코일과 코어간의 절연을 강화하였다. 마지막으로 절연유 속에 함침시켜 변압기의 절연내력을 보강하였다.

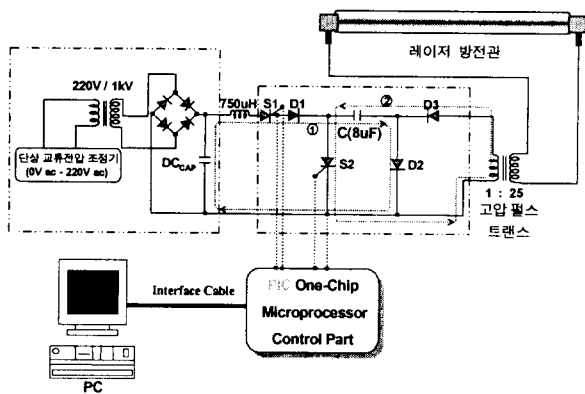


그림 3 고압 펄스 전원 및 제어부의 개략도
Fig. 3 Schematic diagram of high voltage Pulsed Power Supply and the control part

2.3.4. 마이크로프로세서를 이용한 제어부

2개의 SCR을 순차적으로 턴-온, 턴-오프시키기 위해 제

어부로는 PIC one-chip 마이크로 프로세서를 사용하였다. 전원부와 레이저 출력을 총괄적으로 제어하며 동시에 입·출력의 감시와 외부 프로세서와의 인터페이스를 하고 전체적인 동작에 필요한 레이저 빔, 표적 조명 및 모니터링 시스템, 주변 부품과의 인터록 등도 동시에 처리하도록 제어부를 설계하였다. 또한 정밀한 동작의 MPFN(Modified Pulse Forming Network)의 실시간 입력/출력 모니터링을 위해 연산회로부, 인터페이스 보드, 레이저 빔 구동 및 지시 조명용 전원, 인터록 및 제어용 비교기 회로부 등을 내장하였고, 각 부분을 서로 연계시켜 컴퓨터의 키보드를 통해 레이저 펄스 반복율을 4 Hz에서 180 Hz까지 자유자재로 조절할 수 있게 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서는 펄스형 CO₂ 레이저의 출력에 영향을 미치는 중요한 요소인 동작 압력과 펄스 반복율에 따른 레이저 출력 특성을 연구하였다. 실험 방법으로는 로타리 펌프로 광공진기 내의 배경 가스압을 10⁻² Torr까지 배기시킨 후 CO₂, N₂, He 혼합 가스를 일정 압력까지 주입하고, 양단 전극에 고압 펄스를 인가하여 글로우(Glow) 방전을 일으켰다. 글로우(Glow) 방전이 안정화된 시점에서 펄스 반복율과 동작압력을 변화시켜가며 레이저 출력 변화를 비교·검토하였다. 동작압력 4 Torr에서 레이저가 발진하였으며, 실험범위는 글로우(Glow) 방전이 안정되게 지속되는 펄스 반복율 4~180 Hz와 동작압력 4~16 Torr까지로 하였다.

출력은 CO₂ 레이저용 에너지미터(Gentec사 모델명 : PS-1K)로 측정하였고 레이저 매질 가스는 여러 문헌들과 직접 실험한 결과를 토대로 얻어진 최적 혼합비율인 CO₂ : N₂ : He = 1 : 3 : 10 으로 하였다[13-17].

3.1. 펄스 반복율에 따른 레이저 출력 특성

그림 4는 일정 압력하에서 펄스 반복율에 따른 레이저 출력 특성을 나타내고 있다. 각 실험 데이터는 다섯번 실험한 결과의 평균치를 표시하고 있다. 4 Hz에서 발진을 시작하여 180 Hz에서 최대치에 도달하였고, 특히 12 Torr에서 최대 19.3 W를 얻었다. 이 때, 단상 교류 전력계(Hwashin사 모델명 7013)로 측정된 전기 입력은 약 160 W였으므로 출력 효율은 약 12 %가 된다. 본 실험에서는 SCR의 턴-온, 턴-오프가 소자 특성상 200 Hz 이상에서는 안정되게 동작하지 않으므로 180 Hz까지만 실험하였다. 반복율이 증가함에 따라 레이저 출력도 증가하고 있지만 그 증가폭이 120 Hz부터 점점 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 그 원인을 분석하면 내부의 기체 역학적인 측면에서 반복율이 증가하게 되면 입력에너지가 증대된다. 즉, 방전관내의 전자밀도가 높아지므로 상위준위로의 펌핑율이 증가하고, 밀도방전이 커지게 되어 출력은 증가한다. 그러나 펄스 반복율을 증가시킴에 따라 전기 입력이 커지게 되어 방전관 중앙으로부터 기체의 온도가 상승한다. 기체의 온도가 상승하게 되면 상위 레이저 준위에서의 충돌에 의한 감쇠율이 급격히 증가하여 상위 준위 밀도의 감소를 가져오게 되고, 상대적으로 하위준위의 열적 밀도가 증가하여 밀도 방전이 소멸된다. 즉 반복율을 증가시키는 초기 단계에는 밀도방전과 이득이 증가하지만 점차로 기체 온도상

승의 효과가 지배적으로 되기 때문에 출력의 감소를 보이게 되는 것이다.

빔 모드는 각각의 펄스 반복율과 동작압력에 따라서 약간의 차이는 있지만 레이저 출력이 감소되기 시작하는 시점(펄스 반복율 150Hz)까지는 TEM₀₀가 관찰되었고 펄스 반복율 150 Hz 이상에서는 TEM₀₀와 TEM₀₁이 함께 관찰되었다.

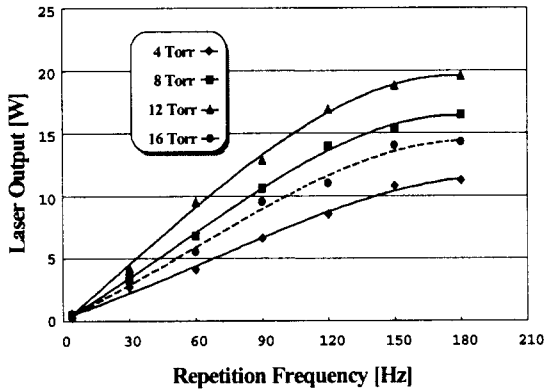


그림 4 반복율의 변화에 따른 레이저 출력 특성
Fig. 4 Laser output vs. repetition frequency

3.2. 동작압력에 따른 출력 특성

그림 6은 동작압력에 따른 레이저 출력의 변화를 나타낸다. 동작압력을 4 Torr에서 16 Torr까지 2 Torr씩 증가시키면서 출력을 측정하였다. 반복율이 일정할 때 압력이 증가하면 출력도 증가하였지만 약 12 Torr 부근에서 최대치를 보이고 12 Torr 이상에서는 그 출력이 감소하였다.

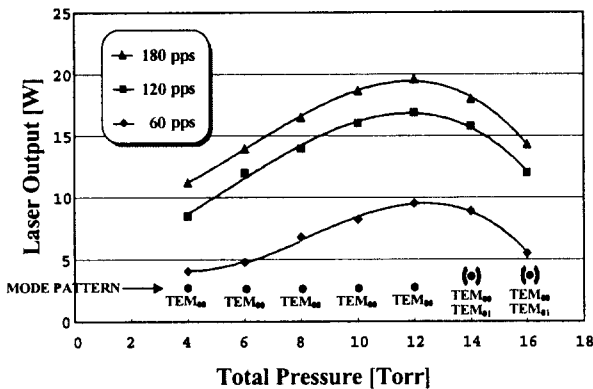


그림 5 압력에 따른 레이저 출력 특성
Fig. 5 Laser output vs. total pressure

동작압력이 상승함에 따라 12 Torr까지는 CO₂ 및 N₂ 분자의 밀도가 증가하므로 레이저 여기 준위의 밀도가 늘어나고 충돌 단면적의 증가에 따른 확산 냉각 효과 때문에 레이저 출력이 증가한다. 그러나 그 이상의 압력에서는 글로우(Glow) 방전을 유지시키기 위해 더 높은 전압을 인가해야 하

므로 전극 사이에 강한 전기장이 걸려 전자밀도가 증가하게 된다. 결과적으로 입력이 증가하게 되므로 기체의 온도 상승을 초래하여 상위 준위 밀도를 감소시켜 레이저 출력을 포화시킨다. 따라서 이득을 최대로 하기 위해서는 압력을 최적화하여야 한다. 이와 같은 축류형 CO₂ 레이저는 확산 냉각이 지배적이기 때문에 단위 체적당 투입할 수 있는 최대 입력이 0.5 W/cm² 정도로 제한되어 있다. 따라서, 더 높은 출력을 얻기 위해서는 단위체적당 투입되는 에너지를 증대시킬 수 있는 고속 축류형이나 횡류형 등을 사용해야 할 것이다[17].

4. 결 론

100 Hz 부근의 펄스 반복율을 가지는 저가격의 컴팩트한 펄스형 CO₂ 레이저를 개발하기 위하여 고압·고주파 펄스 변압기와 수 백 Hz의 스위칭에 적합한 소자인 SCR을 사용한 방식을 채택한 고압 펄스전원으로 새로운 방식의 고반복 CO₂ 레이저 장치를 개발하였다. 완성된 장치의 펄스 반복율, 동작 압력에 따른 레이저 출력 특성실험을 통하여 펄스 반복율 180 Hz, 동작압력 12 Torr에서 최대 레이저 출력 약 19.3 W, 최대 효율 약 12 %를 달성하였다.

향후, 공진기 시스템의 일부를 개선하여 고속 가스 순환 방식을 적용하고 스위칭 소자로서 SCR 대신 IGBT로 대체하여 펄스 반복율을 높인다면 더 높은 출력을 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 1997년도 한국학술진흥재단 대학 부설 연구소 과제 연구비에 의하여 수행된 연구로서, 관계 부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] P. Loosen, "Recent Development of lasers for Materials Preprocessing", Proc of LAMP '92, Nagaoka, Vol. 1, pp.61-66 (1992)
- [2] J.K.R. Weber, J.J. Felten and P.C. Nordine, "laser Hearth Melt Processing of Ceramic Materials," Rev. Sci. Instrum. 67, pp.522-524 (1996)
- [3] R C. Harney, "CO₂ lasers for Military Applications," SPIE Vol. 1042 CO₂ lasers and Applications, pp.42-54 (1989)
- [4] 最先端レーザー・テクノロジー集成, オプトロニクス社 (1989)
- [5] E. Hirota, High-Resolution Spectroscopy of Transient molecules, Springer, Heidelberg, Germany (1985)
- [6] I. BLACK, "laser cutting of thick ceramic tile", Optics & laser Technology, Vol.29, No. 4, pp. 193-205 (1997)
- [7] Jen-Shin Chang, "Handbook of Electrostatic Processes", Macel Dekker Inc, pp. 221-223 (1990)
- [8] G.N.Glasoe, J.V.Lebacqz, "Pulse Generators", McGRAW - HILL book company, pp. 499-598

- (1948)
- [9] Yu. A. Baloshin and I. V. Pavlishin, repetitively pulsed short-pulse TEA CO₂ laser with UV pre-ionization, *J. Opt. Technol.* 65(1), pp. 61-62 (1998)
- [10] K. R. Rickwood and J. McInnes, "High repetition rate mini TEA CO₂ laser using a semiconductor prionizer", *Rev. Sci. Instrum.* 53(11), pp. 1667-1669 (1982)
- [11] C Baker, "Design of a compact high PRF TEA CO₂ laser and performance under multimode and single mode conditions", *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol. 14, pp. 1167~1170 (1981)
- [12] N. Menyuk and P. F. Moulton, "Development of a high-repetition-rate mini-TEA CO₂ laser", *Rev. Sci. Instrum.* 51(2), pp. 216~pp.220 (1998)
- [13] G. A. Abil'sitov, E.P. Velikhov, V.S. Golubev and F.V. Lebedev, "Promising systems and methods for pumping high-power technological CO₂ laser", *Sov. J. Quantum Electron.* Vol. 11, No. 12, pp.1535-1549 (1981)
- [14] W. J. Witteman, *The CO₂ laser*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany (1987)
- [15] H. Sugawara, K. Kuwabara, K. Sasaki, and S. Shiono, "Development of a 20 kW Fast Axial Flow CO₂ laser", *Rev. laser Eng.* Vol. 15, No. 4, pp.34-38 (1987)
- [16] A. Lapucci, "Hybrid stable-unstable resonators for diffusion-cooled CO₂ slab lasers", *Appl. Opt.* Vol. 35, No. 18, pp.3185-3191 (1996)
- [17] K. Terai, "Characteristics of RF Excited CO₂ lasers", *Rev. laser Eng.* Vol. 21, No. 4, pp.39-48 (1993)

저 자 소 개

정 현 주 (鄭 鉉 珠)

전기학회논문지 제48C권 제8호 참조
Tel : 051-510-2770, Fax : 051-513-0212
E-mail : hyunju30@hanmail.net

이 동 훈 (李 東 勳)

전기학회논문지 제48C권 제8호 참조
Tel : 051-510-2770, Fax : 051-513-0212
E-mail : dhlee6@pusan.ac.kr



남 경 훈 (南 京 勳)

1974년 2월 2일 생. 1997년 부산대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
Tel : 051-510-2770, Fax : 051-513-0212
E-mail : ghnahm@hanmail.net



김 도 완 (金 度 完)

1972년 8월 25일 생. 1999년 부경대 전기공학과 졸업. 1999년~현재 부산대 전기공학과 석사과정
Tel : 051-510-2770, Fax : 051-513-0212
E-mail : dowank@pusan.ac.kr



정 영 환 (鄭 永 煥)

1975년 4월 29일 생. 1998년 부산대 전기공학과 졸업. 1998년~현재 부산대 전기공학과 석사과정
Tel : 051-510-2770, Fax : 051-513-0212
E-mail : chungyh@hanmail.net



이 유 수 (李 有 秀)

1961년 5월 19일 생. 1988년 부경대 전기공학과 졸업. 1997년~1999년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사) 현재 한전 신울산 전력소 과장
Tel : 052-270-4321
E-mail : eusoo@chollian.net

김 희 제 (金 熙 齊)

전기학회논문지 제48C권 제8호 참조
Tel : 051-510-2364, Fax : 051-513-0212
E-mail : heeje@pusan.ac.kr

조 정 수 (曹 井 守)

전기학회논문지 제48C권 제8호 참조
Tel : 051-510-2365, Fax : 051-513-0212