

13.56 MHz로 여기되는 도파관 CO₂ 레이저의 동작특성 및 Xe 첨가효과

김영식 · 권혁상 · 신고철 · 백찬기

단국대학교 물리학과

김운명 · 박재환

단국대학교 전자공학과

(1992년 9월 29일 받음)

금속(stainless steel)과 판유리를 이용한 도파관 탄산가스 레이저를 제작하고 출력특성을 조사하였다. 도파관의 길이는 50 cm, 내부 단면적은 $6 \times 6 \text{ mm}^2$ 이며 13.56 MHz의 고주파로 횡여기시키는 방식이다. 가스 밀폐형으로 동작될 때 입력전력과 가스압력 변화에 의한 레이저 출력의 측정 결과 가스 분압비 He : CO₂ : N₂ : Xe = 6 : 1 : 2 : 1, 전체 가스압력 50 Torr, 고주파 입력전력이 180 W인 조건에서 최대출력 9.5 W로 발전하고 있다.

I. 서 론

도파관 탄산가스 레이저는 1972년 Bridges 등^[1]에 의하여 개발된 이후 도파관의 모양과 여기방식이 여러 가지 형태로 발전되어 왔다. 특히 1978년 Lachambre 등^[2]에 의하여 금속(Al)과 유전체(BeO)를 사용한 도파관에 고주파 횡여기 방식이 적용되면서 탄산가스 레이저의 높은 효율과 도파관 레이저의 간편성을 겸할 수 있는 레이저로 각광받게 되었다. 왜냐하면 고주파 횡여기 방식은 음극이 없는 방전이므로 공진기 거울의 손상이 없고 안정저항 없이 낮은 전압에서 동작되며 매질의 광이득이 높고 밀폐형으로 동작시킬 수 있으므로 수 십 W 이내의 출력이 요구되는 목적으로 제작되는 이동식 레이저로서의 구성이 용이하기 때문이다. 일반적인 탄산가스 레이저의 경우 대부분 레이저 공진기의 종축에 전극을 설치하여 고전압으로 직류방전 시키는 여기방식을 택하고 기체를 연속적으로 흘려 주어야 하므로, 규모가 크고 비경제적이며 간단한 이동식으로 제작되기 힘든 단점이 있었다. 본 연구실에서는 이미 놋쇠(brass)와 알루미늄(Al₂O₃)을 사용하여 길이 30 cm, 단면적 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 의 도파관을 제작하고 방전특성과 레이저의 출력특성을 실험하여 3 W 이상의 출력을 얻은 바 있다.^[3,4] 이때 사용된 입력의

주파수는 100 MHz 정도로 크기 때문에 도파관의 종축 방향의 위치에 따르는 전압변동이 커서 이것을 해결하는 방법도 함께 고려되었다.^[5] 본 연구에서는 도파관의 길이를 50 cm, 단면적을 $6 \times 6 \text{ mm}^2$ 로 확대 제작하였으며 인가되는 고주파 전력의 주파수는 13.56 MHz로 낮추어서 도파관의 종축 위치에 따르는 전압 불균일성을 줄이고 출력특성을 조사하였다. 도파관의 금속 부분은 크롬을 도금한 stainless steel로 되어있고, 유전체 부분은 지금까지 사용된 적이 없는 일반적인 판유리로 되어있다. 레이저 출력은 사용기체인 이산화탄소, 질소, 헬륨의 분압비와 전체 기체 압력, 고주파 입력 등의 변화에 따라 측정되었으며 밀폐상태에서 시간에 따르는 출력변화와 첨가기체인 Xe의 투입에 따르는 변화도 조사하였다.

II. 공진기 설계 및 제작

사각형 단면을 가진 도파관을 구성하는 방법으로 가장 최근에 개발된 것은 사면 모두 금속으로 구성하는 방법이다.^[6] 이 방법은 이전에 사용되어 왔던 두 가지 방법, 즉 사면 모두 유전체로 도파관을 구성하고 두장의 전극용 금속 사이에 삽입하는 방법과^[2] 두면은 유전체로 다른 두면은 금속으로 도파관을 구성하여 금속면이 전극을

경하도록 하는 방법^{7,8,9)}에 비하여 몇 가지 장점을 갖고 있다. 이것의 장점은 제작이 용이하고 제작비가 적게들 뿐 아니라 도파관 내부의 온도상승을 효율적으로 제어할 수 있어서 보다 큰 출력을 얻을 수 있다는 것이다. 지금까지 사용되어 왔던 도파관은 열의 발산이 주로 전도(conduction)에 의한 것이었으나 새로운 형태의 도파관은 모든면이 금속이므로 열전도율도 높지만 절연(Insulation)을 위하여 도파관의 각 금속면 사이에 약간의 간격이 있기 때문에 이곳으로 자연스런 대류(Convection)가 일어나서 더욱 효과적으로 레이저 기체의 냉각이 이루어진다.

본 연구에서는 그림 1과 같이 도파관의 모든면을 금속으로 길이 50 cm, 내부 단면적 6.5×6.5 mm²의 크기를 갖는 도파관을 제작하였다. 금속은 stainless steel에 크롬을 도금한 것으로 각 금속면 사이는 0.05 mm의 간격을 두었다. 그러나 방전 실험 결과 금속면의 바깥쪽으로 방전이 주로 이루어져 레이저 발진을 시킬 수 없었다.

그림 2는 그림 1의 도파관에서 옆면을 판유리로 대

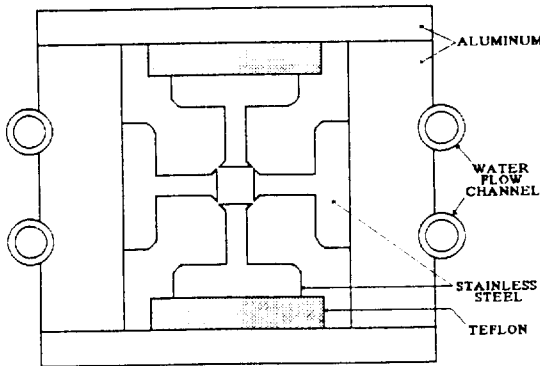


그림 1. 모든면이 금속인 도파관의 단면도.

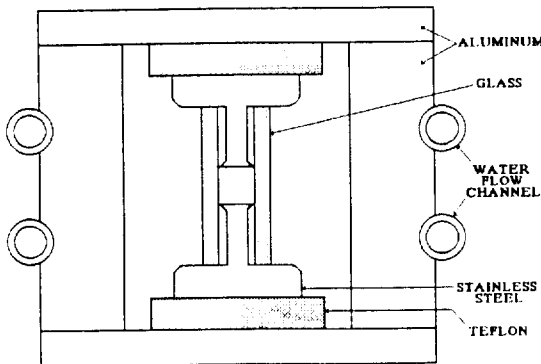


그림 2. 금속과 판유리를 사용한 도파관의 단면도.

체시킨 것을 나타낸다. 이렇게 되어서 도파관의 단면적은 6×6 mm²로 줄어들었다. 판유리는 시중의 유리상점에서 구입할 수 있는 두께 3 mm의 floating glass로 평편도가 좋은 것이다. 처음에는 레이저 방전시 발생하는 열에 의하여 깨어질 것을 염려하여 석영유리로 할 것을 고려하였으나 비용이 많이 들어 판유리로 결정하였는데 실험 결과 열에 의하여 파손된 적은 없었으며 결과도 만족스러웠다. 지금까지 도파관에 사용되어 왔던 베릴리아(BeO)나 알루미늄(Al₂O₃) 등과 비교하여 볼 때 가공의 용이성과 경제적인 면에서 우월하나 같은 규격 조건하에서 출력도 높게될지는 의문이다. 앞으로 이들을 비교하는 실험도 흥미있을 것으로 생각된다.

그림 3은 레이저 도파관과 공진거울이 들어있는 진공 원통(반경 28 cm, 높이 32 cm)을 나타내고 있다. 초기에 제작된 바 있는 도파관 레이저는 도파관과 공진거울 사이의 거리를 가능한한 가깝게 하기 위하여 공진거울들이 진공용기 속에 들어 있었으므로 레이저 발진 시작전에만 광축조정이 가능하다는 불편함이 있었다.⁴⁾ 본 실험에 사용된 레이저 도파관은 이전의 것에 비하여 도파관 내부 단면적이 크게 늘어나도록 설계되었으므로 도파관과 공진거울 사이의 거리가 어느정도 떨어져도 결합효율은 크게 낮아지지 않게 된다. 따라서 진공 원통 측면의 바깥쪽 양끝에 광축을 따라 전반사경과 출력경을 설치하여 레이저가 발진하고 있는 동안에도 거울의 미세 각도조정이 가능하도록 설계하였다. 레이저의 전반사경은 Si에 금을 증착한 곡률반경 2 m의 거울이며 출력경은 탄산가스 레이저의 파장인 10.6 m 영역에서 흡수가 없는 ZnSe에 유전체 박막이 증착되어 95%의 반사율을 가진 곡률반경 2 m의 거울이다. 출력경 앞에는 레이저 출력계(Spectra-Physics model 405)를 설치하여 레이저 출력을 측정하였다.

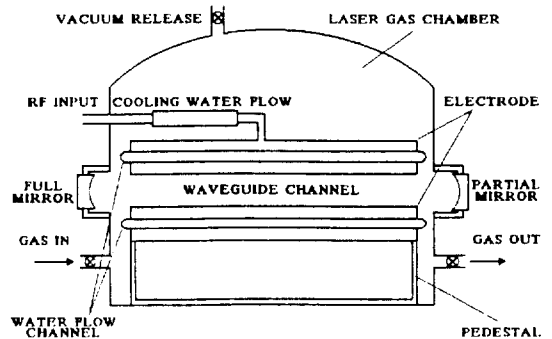


그림 3. 고주파 횡여기 도파관 탄산가스 레이저 공진기의 장치도.

레이저 여기에 사용된 고주파전력 공급장치는 국내의 관련업체에서 만든 것으로 13.56 MHz 의 고주파 전력을 최대 300 W까지 공급할 수 있게 설계·제작되었다. 고주파전력 공급장치와 레이저 도파관의 전극 사이에는 임피던스 매칭 회로를 삽입하여 최대의 전력이 공급될 수 있도록 하였다.

III. 실험 및 결과

전반사경과 부분반사경, 레이저 도파관의 광축을 일치시키기 위하여 헬륨-네온 레이저를 이용하였으며 광축조정이 끝난 후 레이저 공진기가 들어 있는 진공용기를 진공펌프로 배기시키고 이산화탄소, 질소, 헬륨 등의 기체를 차례로 주입한 후 원하는 압력하에서 밀폐시켰다. 다음 단계로는 고주파 전력 공급장치를 가동시키고 임피던스 매칭 회로의 가변 축전기를 조절하여 도파관에 방전이 일어나도록 해야한다. 방전이 일어나면 레이저가 발진하기 시작하는데 이때 고주파 전력계를 사용하여 방전관(레이저 도파관)으로부터 반사되어 나오는 고주파의 전력을 측정하면서 이것이 최소가 될 때까지 임피던스 매칭 회로를 조절한다. 이렇게 반사되어 되돌아 나가는 전력을 줄임으로써 레이저 도파관에는 동일한 입력조건에서 최대의 전력이 공급되며 레이저를 효율적으로 동작시킬 수 있게 된다.

레이저의 출력특성을 알아보기 위하여 크게 나누어 세 가지의 실험조건을 변화 시켰다. 첫째는 레이저 기체의 전체압력과 각 기체의 혼합비의 변화이고 둘째는 레이저에 입력되는 고주파 전력의 변화, 마지막으로 Xe를 첨가했을 때 이것이 레이저 출력에 미치는 영향에 대하여 고주파 전력과 동작시간에 따른 출력의 변화 등을 차례로 조사하였다.

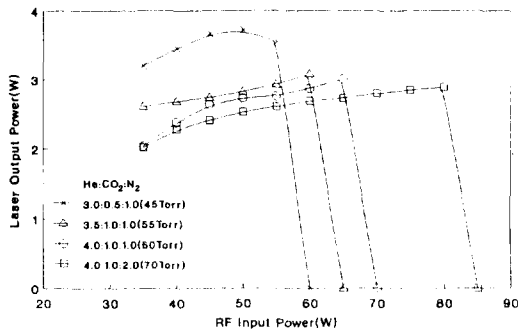


그림 4. 레이저 기체 분압비와 입력전력의 변화에 따른 레이저 출력.

그림 4는 헬륨, 이산화탄소, 질소 등의 기체 분압비와 고주파 입력 전력의 변화에 따른 레이저 출력의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 기체의 분압비가 He : CO₂ : N₂ = 6 : 1 : 2이고 전체압력이 45 Torr, 고주파 입력전력이 50 W 일때 레이저는 3.7 W의 최대 출력으로 발진하였다. 세 가지 레이저 혼합기체중 헬륨이 차지하는 비율이 상대적으로 높은 경우 레이저 출력은 약간 떨어지지만 좀 더 높은 입력전력의 조건에서도 레이저가 발진하고 있으며 입력전력의 변화에 따른 출력의 변화도 거의 없이 균일한 출력을 보이고 있다. 이것은 He이 방전을 안정시키는 역할을 하기 때문이다. 그러나 입력전력이 너무 높아지면 방전의 균일성이 깨어지고 streak 현상이 발생하여 레이저 출력이 몇게된다.

그림 5는 헬륨 : 탄산가스 : 질소의 분압비를 6 : 1 : 2로 고정시키고 전체압력을 변화시키면서 측정한 레이저 출력의 변화이다. 여기서 보면 전체압력이 45 Torr에서 레이저 출력은 최대이며, 기체 압력이 높아짐에 따라 레이저가 발진을 시작하거나 발진이 멈추게되는 입력전

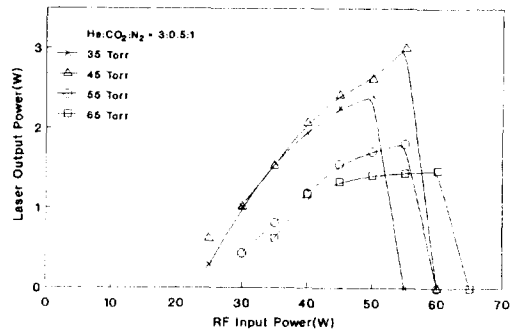


그림 5. 레이저 기체의 전체압력 변화에 따르는 레이저 출력의 변화.
(가스 혼합비; He : CO₂ : N₂ = 6 : 1 : 2)

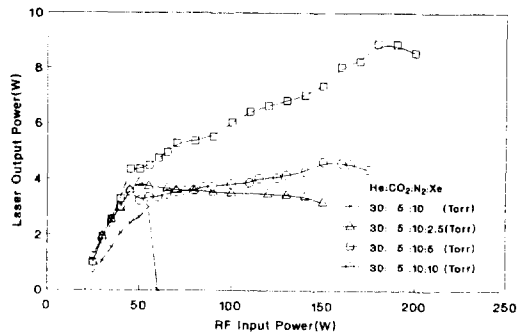


그림 6. 첨가기체 Xe에 의한 레이저 출력의 변화.

력의 값이 높은쪽으로 이동함을 알 수 있다. 그 이유는 기체압력이 증가되면 더욱 높은 방전전압이 필요하며^[9] 포화강도(saturation intensity)가 증가하므로^[10] 레이저 출력은 입력전력에 더 크게 의존하기 때문이다.

그림 6은 첨가기체 Xe이 레이저 출력에 미치는 영향을 알아보는 실험결과를 설명하고 있다. 헬륨:탄산가스:질소의 분압비가 6:1:2이고 전체 압력이 45 Torr인 혼합기체에 첨가기체 Xe을 각각 2.5 Torr, 5 Torr, 10 Torr 첨가하여 고주파 입력전력의 변화에 따른 레이저 출력변화를 알아보았다. 그 결과 입력전력이 200 W 이상으로 높아져도 도파관 내부의 방전 균일성이 깨어지거나 streak 현상이 발생하지 않기 때문에 높은 레이저 출력을 얻을 수 있었다. Xe을 5 Torr 첨가한 경우가 가장 좋은 결과를 보였으며 입력전력 180 W일 때 레이저 출력은 9.5 W의 최대 출력을 얻을 수 있었다.

그림 7은 헬륨:탄산가스:질소의 분압비가 6:1:2이고 전체 압력이 45 Torr인 경우 Xe을 각각 3 Torr, 5 Torr, 10 Torr 첨가했을 때 동일한 입력전력(40W) 하에서 레이저의 동작시간에 따른 출력의 변화를 연속적으로 측정한 것이다. 약 1.5 시간동안 가스순환 없이 동작시킨 결과 최대 출력과 최소 출력의 차이는 Xe이 없는 경우 약 0.7 W, Xe이 5% 투입된 경우 약 0.5 W 정도로서 비교적 안정된 출력을 보이고 있다. 첨가기체 Xe은 균일방전을 도모하여 레이저 출력을 증가시키지만 시간에 따른 출력의 안정화에는 크게 기여하지 않는 것으로 나타났다. 따라서 시간에 따른 출력의 변화율은 도파관 내부의 온도변화 및 그에 따르는 기계적 장치의 미세진동 또는 고주파 전원장치 및 임피던스매칭 회로의

불안정 등에 의하여 더욱 큰 영향을 받고 있다고 생각된다.

IV. 결 론

본 연구에 사용된 고주파 횡여기 탄산가스 레이저는 밀폐형으로 동작되며 헬륨:탄산가스:질소의 분압비 6:1:2, 5 Torr의 Xe을 첨가한 후의 전체 기체압력이 50 Torr, 입력된 고주파 전력이 180 W 일 때 9.5 W의 출력으로 발진하고 있다. 고주파 전력의 1/3 정도를 손실로 볼 때, 도파관 내의 펌핑 입력은 10 W/cm₃이고 단위 체적당 레이저 출력은 0.53 W/cm³로서 이전^[4]에 비하여 약 두 배이상 증가하였다. 또한 사용된 고주파의 주파수도 이전의 100 MHz^[4]에서 상용으로 널리 쓰이는 13.56 MHz로 낮춤으로써 고주파 증폭기(RF Amplifier) 등의 전원장치 모두를 국내에서 제작할 수 있는 장점을 갖고 있다.

첨가기체 Xe은 streak 현상을 제거하고 방전이 균일하게 일어나도록 도와서 결과적으로 레이저 출력을 3배 정도로 증가시킬 수 있다. 시간에 따른 출력의 변화율은 그림 7의 실험결과에서 볼 수 있는 바와 같이 Xe을 투입한 경우가 Xe이 없는 경우에 비하여 변화폭이 개선된 것은 대략 0.1 W 정도로, 오랜시간 동안의 레이저 동작시 일정한 출력이 유지되도록 하는데에는 Xe의 투입이 팔목할 만큼 큰 효과를 갖지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 일정한 출력이 안정적으로 유지되도록 하는데에는 Xe의 투입에 의한 효과 이외에 실험장치 주변의 여러 가지 다른 문제점-도파관 내부의 온도변화 및 그에 따르는 기계적 장치의 미세진동 또는 고주파 전원장치 및 임피던스매칭 회로의 불안정 등-을 더욱 개선 시켜야 할 것으로 판단하고 있다. 고주파 입력전력이 커질 때 발생하여 레이저 동작을 멎게하는 streak 현상의 근본적인 해결은 도파관 사이의 평행도를 높임으로써 해결할 수 있을 것으로 보고 있으며, 도파관 제작시 발생하는 가공 오차를 줄일 수 있다면 사면이 모두 금속인 도파관^[6]에 의한 레이저 발진도 가능하리라고 생각된다.

본 도파관 탄산가스 레이저는 밀폐시킨 상태에서 한 시간 이상 동작시켜도 출력의 변화가 거의 없으며 사용된 가스의 교환없이 몇 시간이 경과된 후에 다시 동작시킬 수 있으므로 용도에 따라 잦은 이동이 요구되는 목적에 적합하다.

참 고 문 헌

[1] T. J. Bridges, E. G. Burkardt, and P. W. Smith,

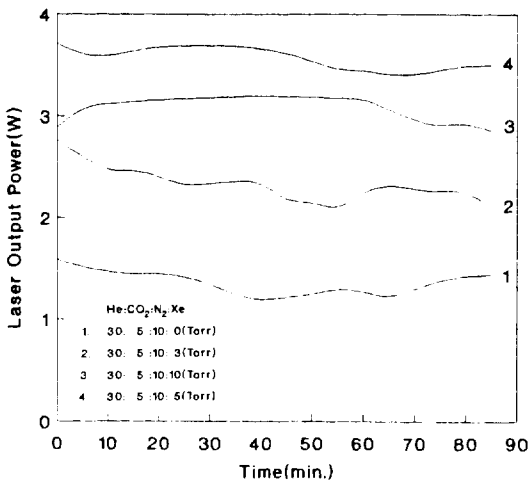


그림 7. 동작시간에 따른 레이저 출력의 변화.

- Appl. Phys. Lett. **20**, 403 (1972).
- [2] J. L. Lachambre, J. Macfarlane, G. Otis, and P. Lavigne, Appl. Phys. Lett. **32**, 652 (1978).
- [3] 김영식, 김윤명, 나정웅, 응용물리 **2**, 261 (1989).
- [4] 김영식, 김윤명, 윤찬의, 나정웅, 응용물리 **3**, 55 (1990).
- [5] Y. M. Kim, C. E. Youn, J. W. Ra, and Y. S. Kim, J. Appl. Phys. **67**, 1127 (1990).
- [6] P. Laakmann, Lasers and Optronics **8**, 35 (1989).
- [7] G. A. Griffith, SPIE **335**, 69 (1982).
- [8] D. He and D. R. Hall, J. Appl. Phys. **54**, 4367 (1983).
- [9] R. L. Sinclair and J. Tulip, J. Appl. Phys. **56**, 2497 (1984).
- [10] R. L. Abrams and W. B. Bridges, IEEE J. Quantum Electron. **QE-9**, 940 (1973).

Operating Characteristics of a Waveguide CO₂ Laser Excited by 13.56 MHz and Additional Xe Effect

Yeong-Sik Kim, Hyuk-Sang Kwon, Kyo-Chul Sin and Chan-Gi Back
Department of Physics, Dankook University, Cheonan 330-714, Korea

Youn-Myung Kim and Jae-Whan Park
Department of Electronics Engineering, Dankook University, Seoul 140-714, Korea

(Received: September 29, 1992)

A sealed-off waveguide CO₂ laser with a length of 50 cm and a cross-sectional area of 6.6 mm² has been designed and constructed. The laser is transversely excited by RF (13.56 MHz) discharge. Output characteristics of the laser has been investigated performing variations of total gas pressure, input rf power, and mixing ratios of gases. The maximum output power of 9.5 W was obtained under the condition of total gas pressure of 50 Torr, input rf power of 180 W, and gas mixture of 6 : 1 : 2 : 1 of He : CO₂ : N₂ : Xe.