

레이저 계측용 일산화탄소 레이저의 동작 특성 및 그 응용

Operational Characteristics of a Carbon Monoxide Laser for Instrumentation and its Applications.

김용평, 최중운, 김규욱, 원종욱

한국표준연구소 레이저연구실

Abstract

The carbon monoxide laser is one of useful light sources for precision laser instrumentation because of its high efficiency and wideband characteristics. In this presentation, the liquid nitrogen cooled cw CO laser which is developed in KSRI will be reviewed.

1. 서론

일산화탄소(CO) 레이저는 1965년 Patel [1]에 의해 처음 개발된 이래 중적외선 영역에서의 고출력, 고효율 레이저의 하나로 큰 기대를 모았으나 유일한 기술상 난점이었던 가스냉각 문제로 거의 동시기에 개발된 CO₂ 레이저에 비해 상대적으로 지지부진한 발전을 해 왔다. 그러나 양자효율(레이저 매질에 주입된 에너지로 부터 레이저 광에너지로 뽑아낼 수 있는 비율)이 거의 100%에 가깝고, 동작 파장 영역도 중적외선 영역에서 4.8~8.2 μm로 광대역인 점등 CO₂ 레이저에 비해 뛰어난 장점을 갖고 있다. 따라서 CO 레이저는 높은 효율 및 단파장성을 살려 재료가공분야에서 CO₂ 레이저의 대체 레이저로서 활발히 개발이 진행되고 있고, 넓은 발진파장영역을 이용하여 분광학연구의 광원으로 연구가 이루어지고 있다.

CO레이저의 광대역 동작특성을 이용한 대표적 응용에는 CO레이저의 수많은 발진선을 레이저 자기공명분광기의 복사광원으로 이용하는 것이다. 레이저 자기공명분광법(Laser Magnetic Resonance: LMR)은 1968년 Evenson [2]에 의해 개발된 이래, 원자, 자유기(free radical) 및 준안정 상태의 분자(metastable molecule) 등에 대한 강력한 고분해 분광수단으로 폭넓게 이용되고 있다. LMR은 잘 알려진 전자상자성공명(Electron Paramagnetic Resonance: EPR) [3]과 매우 유사한 분광법으로, 분자나 원자전이 주파수를 고정된 주파수원(frequency source)과 동조시키는데 Zeeman 효과를 이용하는 방법이다.

LMR은 지금까지 주로 40~100 μm 사이의 원적외선(far-infrared: FIR) 영역에서 원자 및 분자스펙트럼을 얻은 고감도(high sensitive), 고분해능(high resolution)의 분광법으로 이용되어 왔고 [4], 따라서 얻어진 정보는 주로 회전전이(pure rotational transition)에 관한 것이었다.

한편, 최근에는 지금까지의 FIR 레이저를 중적외선(mid-infrared: MIR) 레이저로 대체한 새로운 LMR 분광기가 개발되어 분자의 진동-회전전이(vibration rotational transition)에 관한 분광도 가능하게 되었다. [5] 그러나 지금까지 중적외선 영역에서 LMR 분광기에 이용된 레이저는 CO₂, N₂O, 레이저 뿐으로 그 동작 주파수 범위가 극히 제한되어 있고, 또 그 감도 및 분해능도 FIR 영역에서의 LMR 분광기에 비해 극히 낮은 실정이다.

따라서 한국표준연구소 레이저연구실에는 중적외선 영역에서 광대역에 고감도, 고분해능을 갖는 LMR 분광기의 개발에 관한 연구를 수행중에 있다. 여기서 채택한 분광기용 레이저는 CO 레이저로서, 이는 지금까지 중적외선 영역에서 개발된 레이저중 CO 레이저가 가장 넓은 동작

파장(4.9~8.2 μm) 영역을 갖고, 원리상 고효율동작이 가능하기 때문이다. 본고에서는, LMR의 일반적인 원리에 대해서는 이미 발표돼 있는 해설서에 넘기고 [6], 일산화탄소 레이저의 동작원리 및 본 연구소 레이저연구실에서 제작한 액체질소 냉각형 방전여기 일산화탄소 레이저의 개략 및 그 동작특성에 대해 기술하고자 한다.

II. 동작원리

1. CO 레이저의 발진원리

그림 1에 CO 분자의 에너지 준위의 일부를 비교설명용 위하여 CO₂ 분자 및 N₂ 분자의 에너지준위와 함께 나타내었다. CO₂ 레이저의 경우 바닥상태에 있는 CO₂ 분자($\Sigma 00^0 0$)는 방전전자와의 충돌, 또는 여기진동준위에 있는 N₂ 분자와의 진동-진동 에너지 전달 과정에 의해 비대칭 신축모드(asymmetrical stretching mode)의 여기상태($00 1$)로 여기된다. 레이저 동작은 이준위와 대칭 신축모드(symmetrical stretching mode)의 여기준위($10 0$) 또는 굽곡모드(bending mode)의 여기준위($02^0 0$) 사이에서 일어난다. Lower level에 있는 CO₂ 분자는 Fermi 공명에 의해 ($01, 0$) 준위에 완화한 다음 진동-회전 완화과정(vibration-rotational relaxation process)에 의해 바닥상태로 완화한다. 이 경우 레이저 광으로서 이용가능한 에너지는 upper level의 에너지(2349.16 cm)의 일부(960.99 cm, 1063.77 cm)에 지나지 않고, 나머지는 열에너지로 변한다. 한편 CO 레이저의 경우, 방전전자와의 비탄성충돌 또는 여기진동준위의 N₂ 분자와의 진동-진동 에너지 전달과정에 의해 여기된 CO 분자는 다른 CO 분자와의 진동-진동 에너지 완화과정에 의해 더욱 높은 진동준위에 여기된다. 레이저 발진으로 광자를 방출하고 일단 낮은 진동 준위에 천이된 CO 분자는 더욱 낮은 진동준위에 cascade 천이를 일으키거나, 방전전자와의 충돌 또는 진동-진동 에너지 완화과정에 의해 다시 보다 높은 진동준위에 여기된다. 따라서 CO 레이저에 있어서 에너지 손실은 진동-병진 에너지 완화과정에 의한 진동에너지의 열화, 즉 gas의 kinetic process에 의한 것으로 CO₂ 레이저와 같은 발진 매카니즘 자체로 부터 유래하는 손실과는 성질을 달리한다. 따라서 CO 레이저의 효율은 여기과정, 방전분포 형성과정, 광에너지 추출과정에 있어서 gas의 kinetic process를 최적화 함으로서 원리적으로 1에 가까운 효율을 얻을 수 있다.

2. CO 레이저의 여기매카니즘

방전여기 방식의 CO 레이저에 있어서 CO 분자의 여기는 전계로 가속된 전자들 CO 분자와 충돌시켜 전자의 운동에너지를 CO 분자의 진동에너지로 직접 변환시키거나, 전자의 운동에너지를 N₂ 등 CO 이외의 분자의 진동에너지로 변환시킨 다음 이들 분자와 CO 분자와의 진동-진동 에너지 교환을 일으키어서 이루어진다. CO나 N₂ 분자는 전자와의 비탄성 충돌에 의한 진동 에너지의 변환에 대단히 큰 여기단면적

(excitation cross section)을 갖고 있고, 전자에너지의 약 90 % 정도가 진동에너지로 변환된다. 그러나 전자충돌에 의한 직접여기의 충돌단면적은 진동준위나 높을수록 작아져, CO나 N₂ 어느쪽도 $v = 8$ 이상의 진동 준위에서는 무시할 정도로 작다 [7]. 실제로 CO 레이저에 있어서 레이저 발진을 가능하게 하는 반전분포는 여기된 CO 분자 상호간의 진동-진동 에너지 완화 과정에 의해 형성된다. 진동-진동 에너지 완화 과정은 진동-병진 에너지 완화과정보다 훨씬 빠른 반응 속도를 갖기 때문에 진동준위사이의 밀도분포 (population distribution)는 non-Boltzmann 분포를 이룬다. 이러한 현상은 소위 비조화 펌핑 과정 (anharmonic pumping process)이라 불리어지는데, 이로 인해 CO 분자의 진동준위에는 완전반전분포(total inversion) 보다는 부분반전분포(partial inversion)가 형성된다. 그림 2에 2개의 인접한 진동준위에 있어서 회전준위의 밀도분포를 보인다. 그림에서 두진동준위의 밀도(population)가 같아질지라도, 반전분포는 2개의 p-branch($J'=5 \rightarrow J=6, J'=4 \rightarrow J=5$)와 2개의 R-branch($J'=2 \rightarrow J=1, J'=1 \rightarrow J=0$) 사이에 형성된다. 이러한 부분 반전분포 상태하에서 레이저 발진은 가능하게 된다. 일단 레이저 발진이 일어나면, 레이저 상준위의 밀도는 줄어들고, 레이저 하준위의 밀도는 높아지는데, 소위 cascading 현상에 의해 밀도가 줄어든 상준위는 그보다 높은 여기준위에 대해 레이저 하준위로 작용하고, 레이저 하준위는 그보다 낮은 진동준위에 대해 레이저 상준위로 작용한다. 이러한 cascading 과정은 대단히 작은 반응 속도의 진동-병진 완화율과 결합하여 대부분의 진동에너지를 레이저 에너지로 추출가능하게 한다. CO 레이저에 있어서 저온 동작의 필요성은 비조화 펌핑 과정에 기인한다. 그림 3에 병진온도 (translation temperature)를 변수로 해서 진동에너지 준위에 대한 밀도분포의 변화를 보인다. 그림에서 병진온도(translation temperature)가 낮을 수록 높은 진동준위의 밀도는 비약적으로 높아짐을 알 수 있다. 이것은 cascading 과정을 촉진시켜 고효율 동작을 가능하게 한다. 한편, 진동-병진 완화율도 저온에서 그 값이 작아짐은 잘 알려진 사실이다.

III. CO 레이저의 고효율 광대역 동작조건

1. CO 레이저의 고효율 동작

양자효율이 대단히 큰 특성등 CO 레이저가 고효율 레이저로서의 잠재력을 갖추고 있는 사실은 전술한 [6] 대로지만, 그 특성을 살리기 위해서는 몇가지 중요한 포인트가 있다. 그 하나는 여기방전에 관한 것으로, 방전의 E/N (평균전자 에너지)를 CO 또는 N₂의 진동여기의 적당한 조건에 맞추는 것이다. 여기에는 2가지 방법이 알려져 있다. 그 하나는 레이저 가스중에 Xe과 같은 전리 전압이 비교적 낮은 가스를 첨가하는 방법이다. Xe의 첨가에 의해 방전전압이 주로 Xe로부터 공급되게 되어 레이저가스의 전도도가 높아지게 되기 때문에 E/N이 저하된다. 동등한 효과가 기대되는 첨가 가스로서는 Hg, O₂ 등이 있지만, 이 방법으로는 E/N과 방전전류를 독립적으로 제어할 수 없기 때문에 방전인력 밀도를 높이는 데 한계가 있다. 이 결정이 있다. 보다 적극적인 방법으로는 전자빔 제어방전등의 외부적 자극을 이용하는 것이다. 이 경우, 방전유지에 필요한 전자는 외부로부터 공급되기 때문에 전자밀도를 증가시키는 것이 가능하다. 또 인가전압을 제어함에 의해 효율적인 진동여기도 달성할 수 있다. 이 방법의 결정은 장치의 대형화, 복잡화를 초래하는 것으로 실용상으로는 문제가 많다. 또 전자빔을 이용하는 경우 그 투과파의 수명등이 짧기 때문에 메인テナンス에 많은 시간이 필요하다. 다음으로 중요한 것은 레이저가스의 냉각기술이다. 가스냉각의 효과는 V-V 여기의 역반응 및 V-T 완화의

제어등으로 앞서 설명한 대로지만, 이 효과는 레이저 가스가 얼지 않는 한 저온이면 저온일수록 좋다. 1968년 Osgood 등이 레이저관외 수냉여기의 수냉여기 액체질소 (liquid nitrogen, LN₂) 냉각으로 0.5 %의 전기변환 효율을 일거에 9 % 까지 높인것은 CO 레이저의 역사중 가장 획기적인 사건중의 하나였다 [8].

CO 레이저가스 냉각의 방법으로서서는 이와같이 LN₂ 등의 냉매를 사용하는 방법외에 단열팽창을 이용하는 방법이 있다. 이 방법은 LN₂ 온도 이하의 가스온도가 달성가능하고, 예비냉각이 불필요한 장점이 있지만, 가스 순환형으로 하는 경우 상당히 큰 동압을 실현시켜야 하기 때문에 압축기가 대규모가 된다. 따라서 압축기의 소비전력이 팽대해져 레이저 전 시스템의 효율을 저하시키기 때문에 실용적이 못된다. 이에 반해, 최근 LN₂를 싼값으로 구입가능해진 사실을 생각하면 오히려 LN₂냉각방식이 타당하다고 하겠다.

이상 CO 레이저에 있어서 중요한 기술로서 방전기술과 가스냉각 기술에 대해 논했는데, 이들은 서로 밀접한 관련을 갖고 있다. 레이저의 효율적인 여기에는 공간적으로 균일한 글로우 (glow) 방전이 필요한데 이들 조건은 레이저 매질의 균일성에 큰 영향을 받는다. 다시 말해 균일한 온도분포, 균일한 속도분포를 갖는 레이저 매질의 실현이 중요하게 된다.

2. CO 레이저의 광대역 동작

방전여기 CO 레이저로 지금까지 보고된 발진 범위 (스펙트럼 영역)은 $v = 1 \rightarrow 0$ (4.7 μm)로 부터 $v = 37 - 36$ (8.2 μm) [9] 까지 넓으며, 이하 이 진동준위의 발진범위를 중심으로 그 결과를 정리한다.

CO 레이저는 비조화 진동자에 의한 메카니즘으로 동작하기 때문에 낮은 진동준위에서 천이 할수록 높은 광자에너지, 즉 짧은 파장으로 동작하게 된다. 따라서 방전여기 CO 레이저에 있어서 그 발진파장 영역은 비조화 진동자의 여기메카니즘에 대한 몇가지 파라미터에 의해 좌우된다.

파장이 짧은 저진동준위에서는 발진, 특히 5 μm 이하의 짧은 파장은 높은 진동준위에서의 발진보다도 대기투과 특성이 뛰어나다 [10]. 저진동 준위에서의 발진은 효율, 출력률 최적화한 조건에서는 얻어지지 않고 특별한 조건이 필요하다. 전진동 준위의 발진을 향상시키기 위해서는 V-T 완화 및 저진동 준위의 여기를 증가시켜, 고진동 준위의 V-V 여기를 억제할 필요가 있다. 즉 CO 분압을 낮게해서 고진동준위의 V-V 여기를 억제해야 하고, 다량의 He에 의해서 V-T 완화를 증대시키고 병진온도는 저하시켜야 하며, N₂ 온도를 높게하여 평균전자에너지를 낮추므로서 N₂의 진동준위 에의 전자충돌여기를 향상시켜서, N₂의 $v = 6 \rightarrow v = 5$ 와 CO의 $v \rightarrow v+1$ 의 공명 V-V 교환에 의한 CO의 저진동 준위에서의 여기를 높여야 한다.

파장이 긴 고진동 준위에서의 발진은, 고진동 준위에서의 V-T 완화와 크기 때문에 방전형 CO 레이저에서 가능한 최고 진동준위는 $V = 37 \rightarrow 36$ 의 8.2 μm 정도가 그 한계로 알려져 있다 [7]. 앞서 논술한 대로, CO 레이저에 있어서 높은 진동준위의 밀도를 높이기 위해서는 병진온도를 낮추어야 하며, CO 분자 기리의 V-V 여기를 증대시켜야 한다. 한편 충격외선 영역에서는 수분에 의한 광자의 흡수가 일어나는데, 그 흡수단면적은 CO 레이저의 장파장쪽에서 큰 흡수 단면적을 가지고 있다. 따라서 고진동 준위에서의 발진을 향상시키기 위해서는 V-T 완화의 저감 및 V-V 여기의 증대를 위한 레이저 매질의 냉각과, 수분에 의한 흡수를 제거하기 위한 공진기 자체의 water-free 조건하에서의 동작이 필요하다.

IV. 액체질소 냉각형 연속동작 CO 레이저의 설계 및 제작

본 연구에서는 앞서 설명한 대로 충격외선 영역에서

- 분광가능한 주파수 대역이 넓고(versatility)
 - 소형(compact) 이며
 - 고분해능(high resolution)
- 이 가능한 레이저 자기공명 분광기의 개발을 목표로 하고 있다.

이를 위해 복사원 (radiation source) 으로 선정할 것은 액체질소 (LN₂) 냉각형의 방전여기 cw CO 레이저로서 동작파장영역은 현재까지 보고된 $\nu = 1 \rightarrow 0$ (4.7 μm) 에서 $\nu = 37 \rightarrow 36$ (8.2 μm) 대를 개발목표로 하고 있다. CO 레이저 시스템은 크게 보아

- 레이저 본체
- 냉각장치
- 전원부

로 나누어 설계 제작하였는데 이하 이에 대하여 기술한다.

1. 레이저 본체

가능한 시스템을 간소화 (compact) 하기 위해 레이저 본체는 하나의 받침대 위에 설치할 수 있도록 하였으며, 특히 잠음 (진동, 열팽창) 에 의한 레이저 출력특성의 변화를 방지하기 위해, 받침대는 16 x 16 x 250 cm 의 석봉 (granite bar) 를 사용하였다.

가. 레이저 방전관

레이저 방전관은 내경 1.5 cm, 두께 2 mm, 길이 120 cm 의 pyrex 유리관으로 제작하였는데 그림 4에 이를 보인다. 레이저 동작에 기여하는 전극사이의 길이는 110 cm 로 하였다. 전극구성은 그림에 표시한 바와 같이 방전관의 중앙에 니켈(Ni) 공동(hollow)으로된 공동의 음극(cathode)을 설치하고, 방전관의 양단부근의 텅스텐 붕으로된 음극을 설치하여 균일한 방전을 얻을 수 있도록 하였다. 여기서 중요한 것은 전극의 배치이다. 즉 방전관의 중앙에 위치한 음극은 방전관에 평행한 공동으로 하지 않고 양극과 같은 형태로 수직으로 설치하면 음극부근에서 plasma focusing effect를 일으켜, 레이저 튜브를 고온으로 가열하여 녹이게 된다. 방전관의 양단에는 66 x 25.4 x 3 mm 의 ZnSe plate를 이용하여 Brewster window를 설치 하였다. Brewster angle은 파장 5.3 μm 에서 ZnSe의 굴절률이 $n = 2.4861$ 이기 때문에 $\tan \theta = n$ 으로 부터 68.088° 이다. 따라서 알루미늄으로 Mount를 제작하여 광축과 Window 면이 이루는 각도를 21.91° 가 되도록 하였다.

나. 레이저 공진기

공진기는 회절격자-반사경 쌍을 이용하여 구성, 진동-회전 천이선율 선택적으로 발진시킬 수 있도록 하였다. 즉 회절격자의 제1차 회절을 이용하여 이득제한을 얻고, 출력은 제0차 회절에 결합시켰다. 사용된 반사경은 직경 1 inch, 곡률반경 15 m 의 금으로 코팅된 오목거울이고, 회절격자는 크기 1 x 1 inch, 150 groove/mm 및 300 groove/mm 인 Jobin-Yvon 사 제품을 사용하였다. 회절격자는 고분해능을 얻기 위해 초정밀 조정 (감도: 0.001°/knoh)이 가능한 회전대(rotating stage)위에, 역시 미세조정이 가능한 Mount에 붙여 설치하였다. 반사경은 레이저의 출력을 이득분포의 최대치에서 안정화 시킬 수 있도록 조정하기 위해 PZT 위에 설치 하였다. 한편 공진기내에서의 수분에 의한 흡수 (intracavity absorption)를 방지하기 위해, 알루미늄으로 진공상자를 구성하여, 반사경 및 회절격자를 water-free 조건하에서 조정할 수 있도록 하였다.

다. 레이저 가스 주입장치

레이저 가스는 그림 4에 표시한 바와 같이 레이저관의 양단으로 주입되도록 하였고, 중간의 음극부분을 통하여 배출되도록 하였다. 가스의 혼합은 레이저관에 가스가 도달하기 전 online line system으로 예비혼합 (premixing) 되도록 하였다. 여기서 사용한 가스배관은 유기성 관에서는 outgasing의 우려가 있기 때문에 모두 동파이프를 사용 하였다. 전술한 바와 같이 각 동작 파장에서 가스 혼합비율은 서로 다르기 때문에 micro value를 설치하여 각각의 회절치를 손쉽게 조절할 수

있도록 하였다.

방전관 속의 진공도는 rotary pump를 이용하여 40 mTorr 정도를 유지하게 한 다음, 레이저 가스를 주입 하였는데, 이용된 압력계는 < 1 Torr 에서는 pirani gauge를 > 1 Torr 에서는 0 ~ 100 mbar 까지 눈금이 매겨져 있는 Swiss Balzer사의 제품이다.

2. 냉각시스템

CO 레이저에 있어서 가스냉각은, 레이저의 고효율 동작뿐만 아니라 광대역 동작을 위해서는 필수적인데, 특히 동작중 온도의 변화는 출력의 변화로 곧바로 연결 되기 때문에 안정된 냉각시스템은 CO 레이저 설계에 필수적 사항이다.

여기서는 냉매로 액체질소 (LN₂)를 사용하였는데, 그림 4에 보인 바와 같이 레이저 방전관의 가스 입력부는 효율적인 냉각을 위해 LN₂ 와의 접촉면을 가능한 한 크게해 나선형으로 하였다. 또한 레이저의 장시간 연속동작에 의한 LN₂ 의 감소분을 보충하기 위해 LN₂ 의 automatic discharging system을 채용, 항상 일정한 양의 LN₂ 가 유지되도록 하였다.

그림 4에 보인 바와 같이 LN₂ 를 담은 냉각조는 공기와의 직접접촉을 피하기 위해 2중구조로 하고 있다. 이는 공기와의 직접접촉에 의한 LN₂ 의 급속한 증발을 억제하는 것과 냉각조의 표면이 공기중 수분에 의해 얼어붙는 것을 방지하기 위한 2가지의 의미가 있다. 이런 이중구조에 있어서 중요한 것은, LN₂ 냉각조와 공기와의 접촉면 사이에 둔 진공부분 속의 레이저 방전관이 열팽창계수의 차이에 의해 파열되는 것을 방지하는 것이다. 이를 위해 흔히 사용되는 방법은 진공부분속의 레이저 방전관에 주름을 주는 것이다. 이는 pyrex 유리관과 같은 재료에서 효과적인 방법이 못된다. 따라서 여기서는 그림 5에 보인 구조로 하여 공기와 접촉하는 부분과 레이저 방전관 사이에 O-ring을 설치함으로써 이 문제를 해결하였다. 즉 레이저 방전관은 냉각조의 액체질소에 의해 냉각되면 부피가 줄어 관의 중심을 향해 끌리게 되는데, 진공조는 액체질소와 직접 접촉하지 않으므로 그 팽창정도가 다르다. 따라서 진공조와 레이저 방전관의 사이에 O-ring을 설치하여 이 차이를 보상함으로써 파열을 방지하게 된다.

3. 전원부 설계

레이저 발진을 위한 펄핑용 전원으로 사용하기 위하여 30 kV, 100 mA 의 DC power supply를 설계하였다. H.V(high voltage)를 얻기 위하여, 상용 110 V AC 전원을 승압 transformer를 사용하여 최고 30 kV 까지 승압한 후 bridge 정류하여 capacitor filter로 평활 하였다. H.V 가변은 slidac을 사용하였다. 여기에서 최대출력시에 출력전압 변동율을 1 %로 정하였으므로,

$$V = \frac{V}{100} = 30 \text{ kV} \times \frac{1}{100} = 300 \text{ V}$$

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{100 \times 10^{-6} \times \frac{1}{200}}{300} = 2.77 \mu\text{F}$$

이 된다. 그러므로 2.77 μF 이상의 capacitor를 filter 부분에 사용하면 1 %의 전압변동율을 얻을 수

있다.

실험에서는 4 μF , 20 kV capacitor를 3개 직렬로 연결 후 다시 2개를 병렬로 연결하여 2.66 μF 를 구하였다.

정류기는 내압이 12 kV 이고 350 mA 전류를 흘릴 수 있는 GENERAL INSTRUMENT CORP. 사의 HVPR15-12를 4개씩 직렬로 연결하여 사용하였다.

Laser 발진관에 과전류가 흐르는 것을 방지하기 위하여 100 mA 이상 전류가 부하에 흐를 경우 R_1 양단에 전압강하가 Relay K_1 의 동작전압 이상이 되므로서 입력 전원을 차단하도록 설계 하였고, R_1 값을 가변하므로서 부하에 흘릴 수 있는 최대전류를 정할 수 있도록 하였다.

Power Supply의 전압가변을 사용자의 안전성을 위하여 AC motor를 사용하여 원격지에서 siidac를 조정하도록 설계 하였다.

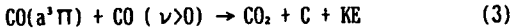
실험에 사용한 레이저 발진관은 관내에 균일한 plasma 밀도를 유지하기 위하여 양극을 2개 설치하였으므로, 양전극에 ballast 저항을 각각 설치하여 양쪽 방전관의 특성이 일치하지 않는 경우나 어느 한쪽이 먼저 방전을 개시하더라도 계속 일정한 전압을 각각 유지하도록 하였다.

V. 액체질소 냉각형 cw CO 레이저의 동작특성

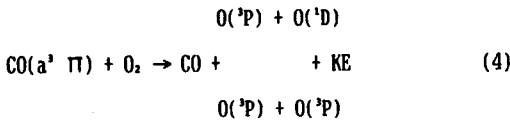
1. 방전특성

방전실험은 먼저 CO/N₂/He의 3종 혼합 가스를 이용하여 측정하였는데, 어떤 가스조성비에서도 단 시간의 방전으로 양쪽 전극 및 레이저 방전관이 다갈색의 물질로 심하게 오염되어 안정된 방전유지가 어려웠다. 이 물질은 CO 분자가 해리되어 생성된 탄소(C)나 CN으로 생각되어 지는데, 이 현상을 억제 하기 위해 미량의 산소를 첨가한 결과 전극 및 레이저 방전관의 오염이 눈에 띄게 개선돼 안정된 방전을 얻을 수 있었다. CO 레이저에 있어서 O₂의 첨가효과 는 CO 분자 해리의 억제외에도 많은 현상이 보고 되어 있다.[11-15] 그러나 여기 방식이나 동작조건에 따라 다르고 또 포괄적인 이론이 아직 확립돼 있지 않지만 Keren 등에 의한 다음과 같은 해석이 일반적으로 받아들여지고 있다.[11]

CO의 해리는 전자여기 상태 a¹Π에 있는 CO 분자와 다음과 같은 충돌에 의 일어난다.



여기서 K.E는 Kinetic Energy를, ν 는 진동준위를 각각 나타낸다. O₂를 첨가하면 먼저 O₂의 전리전압이 낮기 때문에 Xe 첨가의 경우와 마찬가지로 방전의 E/N이 저하되어 평균 전자에너지가 감소한다. 이 결과 CO의 전자여기가 억제되어 CO(a¹Π)의 밀도가 감소된다. 다음으로 CO(a¹Π)와 O₂의 충돌에 의해 다음과 같이 준안정 상태로 여기된다.



이 결과에 의해서도 CO(a¹Π)는 감소하며 이들 효과에 의해 CO의 해리가 억제된다. O₂의 첨가는 방전 plasma의 E/N을 감소시키기 때문에 CO의 진동여기 효율도 개선 시킨다. 식(3)으로부터 알 수 있듯이 O₂의 첨가는 식(4)의 반응을 촉진시켜 O₂의 생성을 억제한다. CO는 V-T 완화에 의해 CO의 진동에너지 열 에너지(운동에너지)로 변환시키기 때문에 CO

레이저의 효율의 관점에서는 대단히 유해하며 그 제거가 기술상 하나의 난제로 되어 있다.

그러나 O₂의 첨가량이 많으면 또다시 불안정한 방전상태로 되는 것을 관찰할 수 있었다. CO₂ 레이저의 경우 O₂의 첨가는 오히려 방전의 불안정성을 초래하는 것으로 알려져 있다. 이것은 O₂가 전기적으로 - 이어서 방전전자의 손실과정이 증대하기 때문이다. Fisher 등에 의하면 CO 레이저 방전에 있어서 O₂를 첨가한 경우 생성되는 주된 양이온은 O₂⁺이고 첨가하지 않았을 경우는 C₂O₂⁺인 것으로 알려져 있다[12]. 이들 양이온의 재결합 계수를 비교하면 C₂O₂⁺ 쪽이 수십배 정도 커서 이에 의한 전자 손실이 불안전 방전의 주된 원인인 것을 알 수 있다. 다시말해 O₂ 양이 적은 경우에는 양이온의 재결합, 많은 경우에는 전자 부착이 방전 불안정화의 원인이 된다.

2. 레이저의 출력특성

레이저 출력특성을 측정하기 위해 구성된 공진기는 전반사경으로 직경 1 inch, 두께 3 mm, 쏠집거리 4m인 미국 II-VI사의 금으로 코팅된 오프구울을 사용하고, 출력경으로는 직경 1 inch 두께 3 mm, 파장 5.3 μm 에서 반사율 80 (출력 결합율 20 인 ZnSe 평면경을 이용하여 구성하였다. 한편 공진기 길이인 전반사경과 출력경 사이의 거리는 160 cm로 하였다.

그림 6은 전압 20 Torr에서 CO, O₂의 조성비를 일정하게 하고 N₂의 농도를 변화시키면서 (He balance) 레이저 출력과 전기변환효율(방전입력에 대한 레이저 출력의 비율)의 변화를 측정 한 결과이다. N₂를 첨가하지 않았을 때와 4 Torr 첨가했을 때를 비교하면 출력이 11배, 전기변환효율이 10배 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 그 이상 N₂를 첨가하면 출력, 효율 어느쪽도 어느정도는 증가하나 양쪽 모두 포함되고 있는 것을 알 수 있다. 출력의 증가는 N₂를 첨가하면 방전유지 전압이 상승하는데 이에 따라 레이저 매질에 주입되는 에너지도 커지기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 그림 6은 출력의 증가와 함께 전기 변환효율도 증가하는 것을 보여주고 있다. 따라서 N₂의 첨가에는 그외의 다른 효과가 존재하지 않으면 안된다. 여기에는 다음의 2가지 추정이 가능하다. 첫째 CO의 V-T 완화속도는 충돌상대가 He인 경우 CO의 그것에 비하여 3~4 십배 빠르다[16]. 본 실험에서는 He을 balance로 했기 때문에 N₂가 증가하면 He이 그만큼 감소하여, 그 결과로서 V-T 완화에 의한 진동에너지의 손실이 감소한다. 둘째, 방전 에너지가 CO에 직접 주입되는 경우와 N₂를 경유하여 주입되는 경우는 CO의 진동에너지 분포가 다른데 후자의 경우가 레이저 동작이 보다 효율적인 분포일 가능성이 있다. V-T 완화속도는 진동준위가 높아지면 빨라지기 때문에 아무리 높은 준위에 여기해도 V-T 완화에 의해 열에너지로 변할 뿐이다. N₂로부터 CO에의 이종분자간 V-V 완화(Vibrational-Vibrational Relaxation)는 near resonant가 되는 $\nu = 8$ 부근에서 그 속도가 최대로 되기 때문에 일반적으로 유도방출이 방출이 일어나기 쉬운 이 부근의 CO 분자의 진동준위에 효율적인 에너지 주입이 일어난다[7]. 한편 N₂의 분압이 4 Torr 이상되면 거꾸로 레이저 출력 및 효율 모두 급격히 포화되고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 과입력 (방전유지전압 상승)에 의한 가스온도 상승으로 V-T 완화속도가 커지기 때문이다.

그림 7은 전압 20 Torr에서 N₂, O₂의 조성비를 일정하게 하고 CO의 농도를 변화시키면서 (He balance) 레이저 출력과 전기변환효율의 변화를 측정 한 결과이다. 레이저 출력 및 효율은 모두 CO 분압의 증가에 따라 증가하여 분압 4 Torr에서 최대치를 보이고 그 이상에서는 감소하는 것을 알 수 있다. CO 분압의 증가에 따른 출력 및 효율의 증가는, N₂의 경우와 동일한 메커니즘에 의한 것으로 생각된다.

그러나 CO 분압 4 Torr 이상에서 출력 및 효율이 감소하는 것은 방전에너지의 손실에 기인한다. 즉 방전전압과 CO 분자가 충돌해 C가 생성되고 이것이 전극 및 레이저 방전관 벽에 부착해 방전전류가 방전관 벽을 타고 흘러 레이저 매질에 에너지 주입이 감소하게 되기 때문이다. 또한 CO 밀도의 증가에 따라 방전유지 전압이 상승하고 이에 따라 가스온도가 상승하여 V-T 완화속도가 커지는 것도 그한 이유로 생각된다.

O₂는 그 농도가 다른 첨가 가스에 비해 극히 낮음에도 불구하고 출력 및 효율에 미치는 영향이 매우 크다. 그림 8은 전압 20 Torr에서 CO, N₂의 조성비를 일정하게 하고 (He balance) O₂의 농도를 변화시켰을 때 레이저 출력과 전기변환 효율의 변화를 측정한 결과이다. O₂를 첨가하지 않았을 경우에는 전술한 대로 전극 및 레이저관까지 심하게 오염돼 안정된 방전이 이루어 지지 않고 레이저관을 타고 전류가 흘러 레이저 방진을 관측할 수 없었다. 그러나 이 현상은 극히 소량의 O₂를 첨가하면 개선되어 O₂ 분압 300 mTorr에서 출력, 효율 모두 최대치를 보이고 있다. 그러나 그 이상의 O₂ 분압에서는 출력, 효율 모두 급격히 감소되고 또다른 암색상의 물질이 레이저 방전관에 부착됨이 관측되었다. O₂의 증가에 따른 출력 및 효율의 저하는 O₂ 분자 또는 전자와의 충돌에 의해 해리된 O 원자에 의한 V-T 완화 속도가 커져 진동에너지가 손실되기 때문인 것으로 생각된다.

실험에 의해 얻어진 최적가스 조성비 Air/O₂/N₂/CO/He = 0.3/1.7/0.77/6.6(%)를 이용하여 가스압력을 변화시키며 레이저 출력 및 효율의 변화를 측정하는데 그 결과를 그림 9에 보인다. 레이저 출력은 가스압력의 상승에 따라 비교적 단조롭게 증가하나 전기변환효율은 전압 약 20 Torr에서 최고치를 보이며 그 이상에서는 감소하는 것을 알 수 있다. 여기서 가스압력의 증가에 따른 출력 및 전기변환 효율의 증가는 방전유지전압이 상승함에 따라 레이저 매질에 에너지 주입이 커지기 때문이며 높은 가스압력에서 출력이 포화현상을 보이고 전기변환효율이 감소하는 것은 방전유지 전압이 상승함에 따라 가스온도가 높아지고 방전이 불안정 해져 V-T 완화속도가 빨라지기 때문이라 생각된다.

이상의 실험결과를 토대로 최대출력 추출을 시도한 결과 Air/O₂/N₂/CO/He = 0.07/0.5/6/4/balance = 23 Torr 에서 방전전류 33 mA, 방전전압 10.5 kV로 출력 16.5 W를 전기변환효율 5 %로 얻을 수 있었다.

3. 발진스펙트럼

CO 레이저는 비조화 진동자에 의한 메카니즘으로 동작하기 때문에 낮은 진동준위에서 천이할수록 높은 광자에너지, 즉 짧은 파장에서 동작하게 된다. 따라서 방전여기 CO 레이저에 있어서 발진파장영역은 비조화 진동자의 여기 메카니즘에 대한 몇가지 파라미터에 의해 좌우된다.

파장이 짧은 저진동준위에서의 발진은 효율, 출력을 최적화한 조건에서는 얻어지지 않고 특별한 조건이 필요하다. 전진동 준위의 발진을 향상시키기 위해서는 V-T 완화 및 저진동 준위의 여기를 증가시켜, 고진동 준위에서의 V-V 여기를 억제할 필요가 있다. 즉 CO 분압을 낮게 해서 고진동준위에서의 V-V여기를 억제해야 하고, 다량의 He에 의해서 V-T 완화를 증대시키고 병진온도는 저하시켜야 한다. 또한 N₂ 농도를 높게 하여 평균전자에너지를 낮추며 N₂ 진동준위에 대한 에너지 주입은 크게해 N₂의 $v=6 \rightarrow v=5$ 와 CO의 $v \rightarrow v+1$ 의 공명 V-V 교환에 의한 CO의 저진동 준위에 대한 여기를 높여야 한다. 한편 파장이 긴 고진동 준위에서의 발진은 고진동 준위에서의 V-T 완화가 크기 때문에 방전여기용 CO 레이저에서 가능한 최고 진동준위는 $V = 37 \rightarrow 36$ 의 8.2 μm 정도가 그 한계로 알려져 있다[7]. CO 레이저에 있어서 높은 진동 준위의

밀도를 높이기 위해서는 가스압력을 낮게 하여 병진온도를 낮추어야 하며, 상대적으로 CO 분압을 높여 CO 분자끼리의 V-V여기를 증대 시켜야 한다.

그림 10은 CO 레이저의 발진 스펙트럼 특성을 측정하기 위해 이용된 실험장치의 개략도이다. 공진기는 grating (1x1 inch, 150 g/mm)을 전반사경으로, 직경 1 inch, 반사율 80 % (출력결함율 20 %)의 평면경을 출력경으로 이용하여 구성하였는데, 발진선은 grating을 각각의 발진파장에 맞춰 제1회절파를 feedback 시켜 얻었다. Grating을 조정하여 얻어진 입의 발진선은 ZnSe plate의 beam splitter를 통하여 2가닥의 beam으로 분리된 후 하나는 power meter에 의해 크기가 측정되고, 나머지 하나는 spectrum analyzer에 의해 그 파장이 측정된다.

그림 11은 각각의 가스조성비를 변화시켰을 때 얻어진 레이저 발진 스펙트럼의 특성을 측정한 결과이다. (a)는 가스조성비 Air/O₂/N₂/CO/He = 0.42/0.5/6/4/22.4 (Torr)에서 측정한 스펙트럼의 상대적인 크기를 나타낸 결과이다. 최대 발진선은 5.42 μm 에서 나타나고 있는데 전 발진 스펙트럼영역은 5.07 μm 에 걸쳐 있는 것을 알 수 있다. 한편 전술한 대로 단파장 쪽에서의 발진특성을 알아보기 위해 CO의 분압을 줄이고 전 가스압력을 높여 가스조성비 air/O₂/N₂/CO/He = 0.42/0.5/6/2/30 (Torr)에서 측정한 spectrum의 상대적인 값은 (b)에 나타나 있다. 최대 발진파장은 5.09 μm 인데 전체적인 스펙트럼 분포는 단파장쪽에서 상대적으로 강한 발진을 하고 있는 것을 알 수 있다. (c)는 장파장쪽에서의 발진특성을 알아보기 위해 N₂분압 및 전 가스 압력을 줄인 상태에서 측정한 스펙트럼의 상대적 크기를 측정한 결과이다. 그림 (a)와 마찬가지로 최대발진선은 5.42 μm 에 나타나 있지만 전체적인 스펙트럼은 상대적으로 장파장쪽에서 강한 발진을 하고 있는 것을 보여주고 있다.

VI. 맺음말

일산화탄소 레이저는 이산화탄소 레이저와 같은해 출현했으면서도 냉각상의 기술적 문제점으로 상대적으로 지지부진한 개발상태를 지속해왔다. 그러나 앞서도 기술한대로 파장이 짧고, 양자효율이 극히 높으며 또 광대역 동작특성등 많은 장점을 갖고 있어 최근 몇몇 나라에서는 새롭게 연구가 활성화되고 있다. 본고에서는 한국표준연구소 레이저연구소에서 진행중인 레이저 자기공명 분광기 시스템 개발의 광원으로 이용하기 위해 제작한 액체질소 냉각형 cw CO 레이저를 중심으로 그개략적 동작원리와 동작특성에 대해 살펴 보았다.

<Reference>

1. C.K. N. Patel, Appl. Phys. Lett. 7, 246 (1965).
2. K.M. Evenson, et al., Phys. Rev. Lett. 21, 1038 (1968).
3. 조성호, 자기공명방법, 대우학술총서자연과학, 제 26권, 민음사, 서울 (1985).
4. K.M. Evenson, Faraday Dissuss. Chem. Soc. 71, 7 (1981).
5. J.M. Brown, et al., Mal. Phys. 33, 589 (1977).
6. S.W.C. John, et al., J. Chem. Phys. 67, 2427 (1977).
7. K. Onoda, et al., Cir. of Electrotechnical Lab. 190, 59 (1976).
8. R.M. Osgood, et al., Appl. Phys. Lett. 13, 409 (1968).
9. J.T. Yardley, J. Mol. Spec. 35, 314 (1970).
10. D.K. Rice, Appl. Opt. 13, 2812 (1974).
11. H. Keren, P. Avivi, and F. Dothan, IEEE J. Quantum Electron. QE-11, 590 (1975).

12. W.L. Morgan, and E.R. Fisher, Phys. Rev. **A16**, 1186 (1977).
13. G.A. Murray, and A.L.S. Smith, S. Phys. **D14**, 1745 (1982).
14. C. Freed, Appl. Phys. Lett. **18**, 458 (1971).
15. G.A. Murry, and A.L.S. Smith, J. Phys. **D11**, 2477 (1978).
16. S. Sato, A study on the subsonic discharge-pumped CO laser, Ph. D Thesis (1986, Keio University).

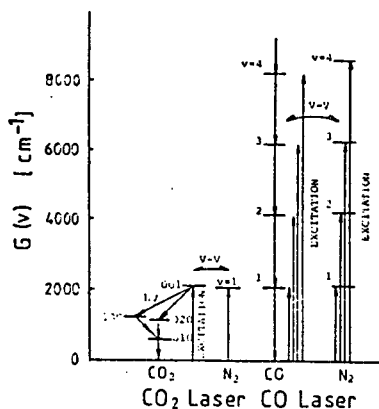


Fig. 1. Vibrational energy level diagram for CO₂, N₂ and CO molecules.

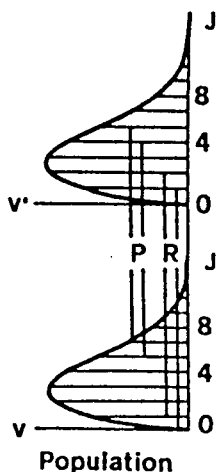


Fig. 2. Partial inversion between two vibrational transitions(V and V') having the same total population.

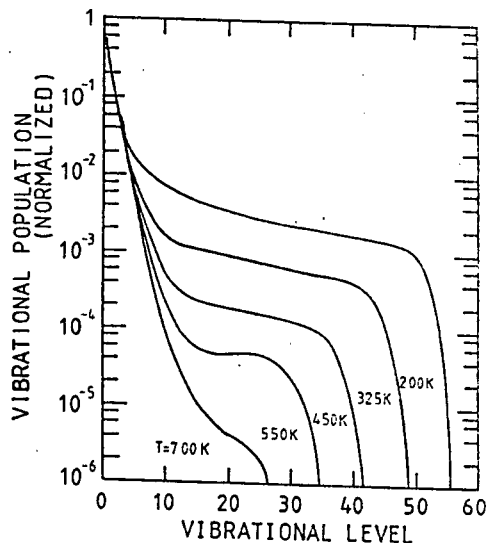


Fig. 3. Calculated vibrational population for values of gas temperature.

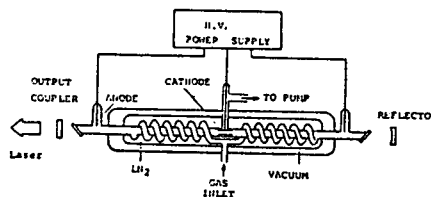


Fig. 4. Schematic diagram of the LN₂-cooled cw CO laser.

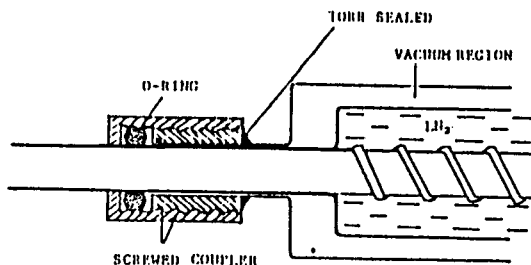


Fig. 5. Details of LN₂ dewar connection part.

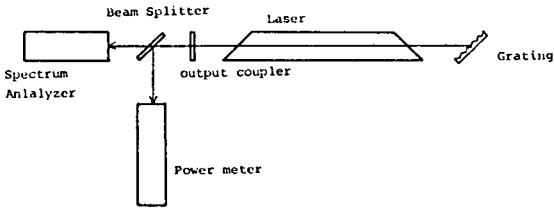


Fig. 6. Dependence of the laser output power and electrical conversion efficiency on the N_2 partial pressure.

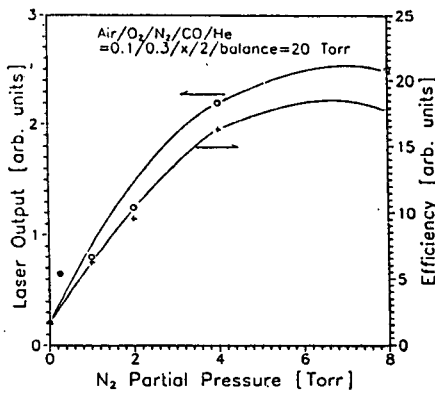


Fig. 7. Dependence of laser output power and electrical conversion efficiency on the CO partial pressure.

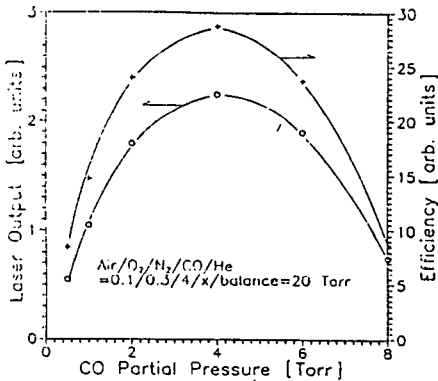


Fig. 8. Dependence of the laser output power and electrical conversion efficiency on the O_2 partial pressure.

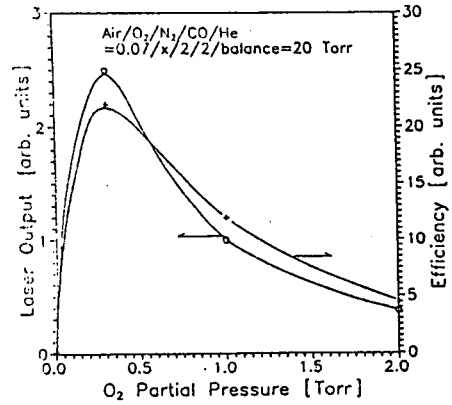


Fig. 9. Dependence of the laser output power and electrical conversion efficiency on the total pressure.

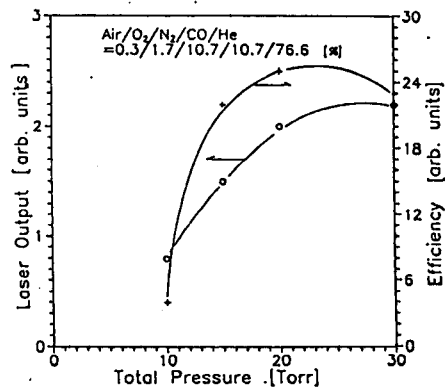


Fig. 10. Experimental apparatus for measuring the CO laser spectrum.

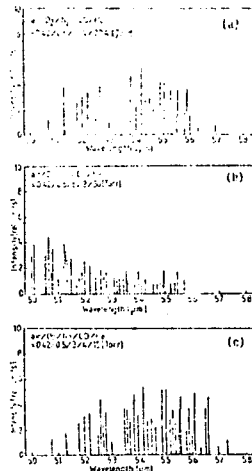


Fig. 11. Dependence of the CO laser spectrum on the gas constituent.