

암모니아 매질에서 일어나는 TEA CO₂ 레이저 광속의 SELF-FOCUSING/DEFOCUSING 특성

오 차환, 김 기호, 이 상수

한국과학기술원 물리학과

초 록

아홉 개의 TEA CO 레이저선에 대한 암모니아 매질의 비선형 굴절계수 (n_2)를, 매질을 통과한 광속이 self-focusing 또는 self-defocusing 에 의해 겪게되는 공간적 광속 변화를 측정함으로써 결정하였다. 암모니아 매질을 통과하여 변형된 광속의 전장은 가우스 함수의 급수로 주어지는 스미스의 표현 (5)으로 근사할수 있었으며, 실험치와 비교하여 보았다. 아홉개의 레이저선 중 여덟개의 레이저선은 self-focusing 현상을 나타내었으며 9R(16) line 은 self-defocusing 현상을 나타내었다.

1. 서 론

1965년 이후 많은 사람들이 여러 기체, 액체 및 고체 매질에서 레이저 광속이 self-focusing 또는 defocusing 됨을 발표하였다. (1~9) 이러한 현상으로 부터 우리는 매질의 비선형 굴절계수를 구할수 있으며, 이는 매질의 3차 감수율($\chi^{(3)}$)과 직접 관계하므로 사광파혼합, 광쌍안정성 등 비선형연구에 중요한 정보를 가진다. 1966년 Javan 등 (11)에 의해 흡수 매질에서의 self-focusing/defocusing 현상이 예견된 이래, 흡수 매질에서 self-focusing/defocusing 현상의 발견은 매우 드물었으나, 1970년 후반 이후 일부 광펌핑 레이저 매질에서 이러한 현상이 주목되면서 부터, 특히 긴 이득길이를필요로 하는 광펌핑 레이저 증폭기 설계시 반드시 고려해야할 요인이 되었다. 현재 까지 CO₂ 레이저 파장에 대해 self-focusing/defocusing 을 보이는 것으로 밝혀진 매질과 레이저선은 표1 과 같다.

Table1. The previously reported self-focusing/defocusing media for CO₂ laser lines.(* : new line)

medium	CO ₂ laser line	S.F.	S.D.	Ref.
SF ₆	10P(8) ~ 10P(16)	o		[6]
	10P(18) ~ 10P(24)	o	o	
	10P(26) ~ 10P(30)		o	
NH ₃	10R(14), 10R(8), 10R(10), 10R(16) 9P(20), 9P(30), 9P(40)	o		[8]
	9R(30)	o		[9]
	9R(16)		o	
CS ₂	10P(20)	o		[4]
SiF ₄	9P(10) ~ 9P(28)	o		[6]
CDF ₃	10R(6), 10R(8)		o	[12]
	10R(10), 10R(12)	o		
	10R(14)	o	o	
CH ₃ F	9P(20), 9P(22)		o	[13]
	9P(18)	o		*

의에서 언급된 바와 같이 많은 매질에서 self-focusing/defocusing 현상이 보고되었으나, 아직 많은 흡수매질에서의 비선형굴절계수 값이 보고되어 있지 않다. 암모니아 매질의 경우, Al-Saidi 등과 Deka 등 (8,9) 이 TEA CO₂ 레이저에 대한 self-focusing/defocusing 현상을 발견하였다. Al-Saidi 등은 10R(14) line에 대한 암모니아 흡수선을 두준위 모델로 가정하여 10R(14) Line 에서의 비선형 굴절계수를 구해내었다. 그러나 9R(30), 10R(8) Line 등은 여러개의 암모니아 흡수선에 접근하므로 두준위 모델로 취급하기 어렵다. 스미스 등 (5) 은 InSb 매질에서 self-focusing/defocusing된 광속의 공간분포를 가우스 함수의 급수로 표현하였고 이로부터 비선형 굴절계수를 얻어내었다.

본 논문에서는 고체매질에 응용된 스미스의 표현식을 암모니아 매질에서의 self-focusing/defocusing 에 적용하여, 아홉개 레이저선에 대한 비선형 굴절계수를 구하였다. 여덟개의 레이저선, 10R(8),10R(10),10R(14),10R(16), 9P(20),9P(30),9P(40),9R(30),은 self-focusing 을 나타내었으며, 9R(16) line 은 self-defocusing 을 나타내었다.

2. 실험

실험장치는 그림 1 에 나타낸 바와 같다. TEA CO₂ 레이저 공진기는 곡률반경 10 m 의 ZnSe 출력경과 평면 회절격자로 이루어져 있다. 암모니아 셀은 회절격자로 부터 150 cm 에 위치하고 있으며, 9R(30) line 에 대해 셀에 입사하는 광속의 반경(e^{-1})은 6.6 mm 이다.

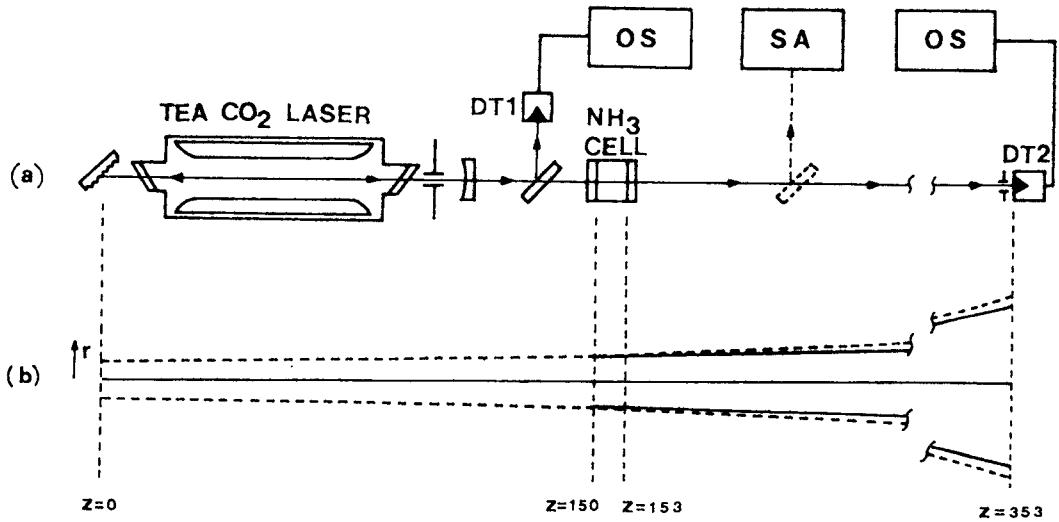


Fig.1. Schematic diagram for experiment (a), and beam propagation (b).

Dotted line represents the ordinary beam propagation, and solid line represents the self-focusing beam propagation. DT1 : photon drag detector, DT2 : pyro-electric detector, OS : oscilloscope, SA : spectrum analyzer.

스미스 표현에 따라, $z = 0$ 에 beam waist 가 위치할 때 임의 z 에서의

광속 강도는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{|E(r,z)|^2}{|E(0,0)|^2} = \left| \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\{iX(z)\}^m}{m!} \left\{ 1 + \frac{z^2}{d_m^2} \right\}^{-1/2} \exp \left[-\frac{r^2}{W_m^2(z)} - \frac{ikr^2}{2R_m(z)} - iP_m(z) \right] \right|^2, \quad (1)$$

$$\text{where, } d_m = kW_m^2(0)/2, \quad W_m^2(z) = W_m^2(0) \{ 1 + z^2/d_m^2 \},$$

$$R_m(z) = z \{ 1 + d_m^2/z^2 \}, \quad P_m(z) = -\tan^{-1}(z/d_m).$$

여기에서 X 는 광속이 매질 내에서 겪게되는 phase shift 를 나타내며 phase shift parameter 라 한다. 스미스는 비선형매질을 렌즈로 집속된 새로운 beam waist 에 위치 시켰으나, 본 실험의 경우 암모니아 셀은 레이저 beam waist 로 부터 $z_1 = 150\text{cm}$ 에 있으므로 X 는 다음과 같이 주어진다.

$$X(z) = \begin{cases} (-\omega/c) \gamma L_p(z_1) \left\{ \frac{1-e^{-\alpha L}}{\alpha} \right\} \equiv \text{const.} & ; z > z_1 + L, L=3\text{cm} \\ 0 & ; z \leq z_1. \end{cases} \quad (2)$$

셀의 길이는 3 cm 이고, 양쪽은 AR 코팅된 NaCl window 로 되어있다. 레이저의 펄스폭은 TEM₀₀ mode 발진시 100 ns 이었고, 입사되는 레이저 출력의 (0.7~1.8 MW/cm) fluctuation 은 photon drag detector (DT1) 으로 관측하였다. 또 1mm 의 aperture를 갖는 pyro-electric detector (DT2) 는 셀로부터 200cm 의 거리에 두었다. translator 로써 DT2 를 광속의 횡방향(r-direction) 으로 scanning 하여 광속의 공간적 변화를 측정하였다. 매질 압력 변화에 따른 각 레이저선에 대한 광속의 공간분포변화는 각각 고정된 입사 출력에 대해 비교하였다. 실험 결과를 Eq.(1)과 비교함으로써 적정한 X 값을 찾아내었으며, Eq.(2) 로 부터 γ 를 결정하였다. esu 단위 로써의 n_2 는 $n_2(\text{esu}) = 239 \gamma (\text{cm}^2/\text{W})$ 로 구해진다. 식(2) 에서 흡수계수(d)는 2mm 의 uniform beam (10) 을 사용하여 압력변화에따른 투과도를 측정하여 얻을수 있었다. 이때는 흡수효과를 측정하기에 용이하도록 45 cm 의 셀을 사용하였다. 측정된 흡수계수는 Table 2 과 같다.

Table.2. Absorption coefficients(α) for NH_3 gas at the CO_2 laser lines (gas pressure : 5torr).

laser line	α (cm^{-1})
9R(30)	0.0163
9R(16)	0.0070
9P(40)	0.0023
9P(30)	0.0016
9P(20)	0.0014
10R(16)	0.0019
10R(14)	0.0070
10R(10)	0.0014
10R(8)	0.0291

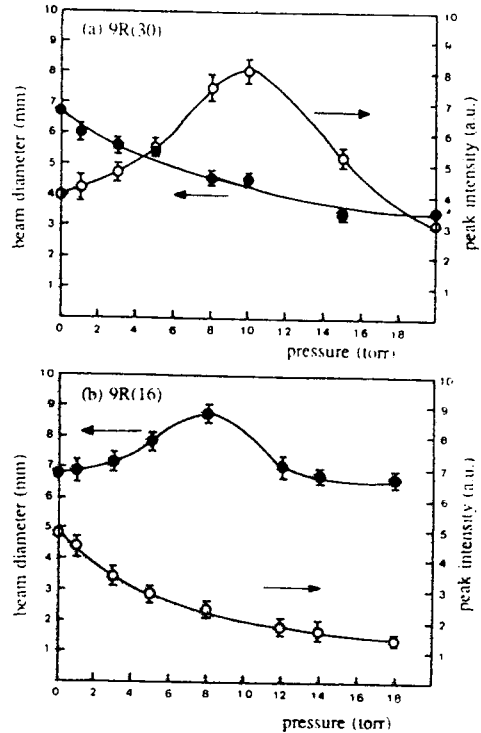


Fig.2. Beam diameter (full width of e^{-1} peak intensity) and peak intensity of 9R(30) line (a) and 9R(16) line (b) measured at $z=353$ cm as a function of NH_3 gas pressure.

3. 결과 및 결론

암모니아 매질의 압력에 따른 광속직경 (full width of e^{-1} peak intensity) 과 최대강도 (peak intensity) 의 변화가 그림 2에 나타나 있다. 각 점은 10 개의 펄스에 대한 평균치 이다. 9R(30) line 에서는 압력이 증가함에 따라 펄스폭이 감소하면서 최대강도가 커지므로 self-focusing 됨을 알 수 있다. 반면 9R(16) line 에서는 펄스폭이 커지면서 최대강도는 감소하는 self-defocusing 현상을 나타낸다. 이러한 특성은 Al-Saidi 등 과 Deka 의 결과와 유사하다. 다만 스미스의 이론에 적용 가능하도록 낮은 출력을 사용하였으므로, 최소광속 반경이 되는 적정 압력이 그들의 결과 보다 높음을 알 수 있다. 또, 최소 광속 반경이 되는 압력과 최대 강도가

되는 압력이 일치하지 않음을 알 수 있는데, 이는 Deka의 결과 보다는 Al-Saidi의 결과와 잘 부합된다. 두 레이저선에 대해 각각 10torr와 8torr 이후의 압력에서는 압력이 증가함에 따라 선형흡수가 증가 하므로 self-focusing/defocusing 효과가 감소함을 알 수 있다. 그림 3은 진공일 때와 5torr의 암모니아를 넣었을 때, 광속의 공간 분포 변화를 나타낸다. 그림에서와 같이 self-focusing과 self-defocusing은 스미스의 결과와는 달리 명확히 구분됨을 알 수 있다. 이러한 실험결과를 Eq.(1)에 의해 주어지는

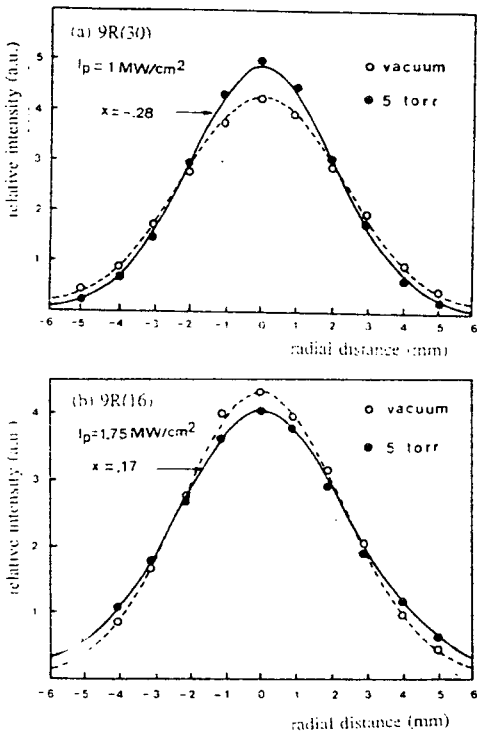


Fig.3. Beam profiles of the 9R(30) line (a) and 9R(16) line (b) measured at a distance 200 cm from the exit window of NH_3 gas cell.

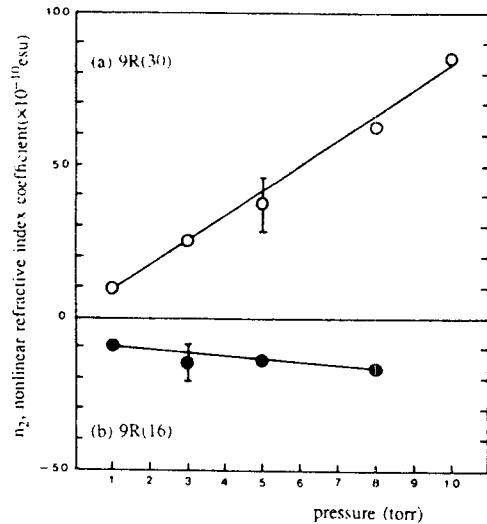


Fig.4. Pressure dependence of nonlinear refractive index coefficient, n_2 , of NH_3 gas for 9R(30) line (a) and 9R(16) line (b).

이론에 least square fitting 함으로써 X 값을 결정하였다. 또 구해진 X 와 흡수계수를 Eq.(2)에 적용하여 비선형 굴절계수를 구하였다. 그림 4에 암모니아 매질 압력에 따른 비선형굴절계수 값이 나타나 있다. 압력이 증가함에 따라 비선형굴절계수도 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이외에,

Table.3. Nonlinear refractive index coefficients of NH₃ gas pressure of 5torr at the nine CO₂ laser lines.

laser line	$\gamma(\text{cm}^2\text{W}^{-1})$	$n_2(\text{esu})$
9R(30)	1.4×10^{-11}	3.3×10^{-9}
9R(16)	-4.9×10^{-12}	-1.2×10^{-9}
9P(40)	7.7×10^{-12}	1.8×10^{-9}
9P(30)	8.0×10^{-12}	1.9×10^{-9}
9P(20)	4.3×10^{-12}	1.0×10^{-9}
10R(16)	7.1×10^{-13}	1.7×10^{-10}
10R(14)	9.0×10^{-12}	2.2×10^{-9}
10R(10)	5.1×10^{-12}	1.2×10^{-9}
10R(8)	7.2×10^{-12}	1.7×10^{-9}

다른 아홉개의 레이저선에 대하여, 매질압력 5torr 일 때의 비선형굴절계수 값을 같은 방법으로 구하였다. 그 값은 표3에 나타난 바와 같다.

결론으로써, 본 실험에서는 암모니아 기체매질에서의 self-focusing/defocusing 효과를 고체매질에 적용되는 스미스의 표현으로 나타낼 수 있었으며, 비선형 굴절계수를 구할 수 있었다. 아홉 개의 레이저선 중 9R(30) line 이 가장 큰 self-focusing 효과를 나타내었으며, 9R(16) line 은 self-defocusing 을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. T.Y.Chang, Opt. Engineering 20(2),220(1981).
2. K.J.Witte, M.Galanti and R.Volk, Opt. Commun. 34(2),278(1980).
3. A.B.Villaverde, J.Phys.B 13,1817(1980).
4. M.Mohebi, P.F.Aiello, G.Reali, M.J.Soileau, and E.W.Van Stryland, Opt. Lett. 10(8), 396(1985).
5. D.Weaire, B.S.Wherrett, D.A.B.Miller, and S.D.Smith, Opt. Lett. 4(10), 331(1979).
6. V.V.Bertsev, M.O.Bulanin, and I.A.Popov, Opt. Spectrosc.(USSR) 51(2), 178(1981).
7. Y.Beaudoin, I.Golub, and S.L.Chin, Opt. Commun. 63(5), 325(1987).
8. I.A.Al-Saidi, D.J.Biswas, C.A.Emshary and R.G.Harrison, Opt. Commun. 52(5), 336(1985).
9. B.K.Deka, R.S.Joshi, and M.A.Rob, Appl.Phys. B44, 1(1987).
10. P.Bernard, P.Galarneau, and S.L.Chin, Opt. Lett. 6(3), 139(1981).
11. A.Javan and P.L.Kelly. IEEE J. of Quantum Electron. QE-2(9), 470(1966).
12. Y.Beaudoin, P.Galarneau, A.Normandin, and S.L.Chin, Appl. Phys. B42, 225 (1987).
13. M.R.Siegrist, P.D.Morgan, and M.R.Green, J. of Appl. Phys. 49(7), 3699 (1978).