

광전류 효과를 이용한 CO₂ 레이저 도플러 속도 측정기

최 종 운

한국표준과학연구원

김 용 평

경희대학교 전자공학과

김 윤 명

단국대학교 전자공학과

(1997년 8월 29일 받음)

CO₂ 레이저의 광전류 효과를 이용한 간단한 구조의 레이저 도플러 속도계를 제작하였다. 단일파장의 레이저 광을 움직이는 물체에 조사하여 발생한 도플러 이동된 산란광의 일부를 CO₂ 레이저 공진기 속으로 되먹임시켜 레이저 고유주파수와 자체혼합 시켰다. 자체혼합에 의해서 도플러 주파수로 변조된 공진기 속의 광전류 변화를 측정하였다. 광전류의 변화 주파수는 최고 60 kHz 까지 발생하였고, 외부 산란물체의 속도벡터와 레이저 빔과 광축 사이의 코사인에 선형적으로 변화함을 확인하였다.

I. 서 론

광영역에서 도플러효과를 이용한 속도계는 레이저 출현이후 많이 연구되어 왔고 많은 분야에서 응용되고 있다. 레이저 도플러 속도계(Laser Doppler Velocimeters: LDV)는 광의 높은 공간분해능과 빠른 응답속도를 이용한 것으로 용도에 따라서 여러 가지 방법으로 구성할 수 있으나 대부분 기본 원리는 호모다인(homodyne) 방법을 사용한다. 호모다인 방법 중에서 많이 사용되는 방법으로는 마이켈슨 간섭계식과 되먹임식(self-mix type)이 있다. 마이켈슨 간섭계식은 구성하는데는 많은 광학부품이 필요하고, 정밀한 정렬장치들을 필요로 한다. 이에 반하여 되먹임식은 레이저 공진기의 고유주파수와 도플러 이동된 산란광을 공진기 속에서 자체 혼합하여 발생한 차주파수를 레이저 뒤쪽에 설치한 광검출기로 측정하므로 마이켈슨 간섭계에 비하여 간단한 장치로 속도계를 구성할 수 있다.

운동하는 물체의 표면에서 산란된 광은 도플러 효과에 따른 주파수변이가 발생하게되므로, 주파수 변이된 산란광의 일부를 렌즈를 통하여 레이저로 다시 되먹임시키면, 레이저 공진기 속에서는 되먹임된 산란광과 레이저 고유의 발진주파수 사이의 간섭이 발생하게 된다. 결국 공진기 속에서는 두 개 광주파수 사이의 차주파수와 같은 주파수로 레이저 출력이 변조된다. 이와같이 되먹임식 도플러 속도계는 국부발진기 신호 사이의 모드를 조심스럽게 맞추어야 하는 마이켈슨 간섭계 방식에 비하여 장치가 간단하므로 쉽게 도플러 속도계를 구성할 수 있는 장점이 있다. 초기에는 He-Ne 레이저를 사용하여 시도되었는데^[1], 최근에는 다이오드 레이저^[2]와 CO₂ 레이저^[3,4]에도 많이 응용되고 있다. 그러나 이 방법을 CO₂ 레이저에 적용할 때는 변조된 레이저 광을 검출하기 위해서 액체질소로 냉각되는 MCT (HgCdTe) 검출기를 사용하여야 하는 어려움이 있었다.

본 연구에서는 액체 질소로 냉각되는 MCT 검출기를 사용하지 않고, CO₂ 레이저의 공진기 자체에서 발생하는 광전류 효과를 이용하여 도플러 효과에 의해 주파수 변이된 신호를 검출하였다.^[5] 즉 도플러 효과에 의해서 주파수 변이된 산란광을 공진기에 되먹임시키면 공진기 내의 레이저광의 세기는 레이저 고유주파수와 산란광의 변이주파수 사이의 차 주파수로 변조되므로, 레이저 공진기 속에는 광전류(optogalvanic) 효과에 의해서 광의 세기에 따른 임피던스 변화가 발생한다.^[6] 임피던스 변화에 따른 레이저 공진기에 흐르는 전류변화를 측정하면 차주파수 즉 도플러 효과에 의해 변이된 주파수 값을 측정할 수 있다.

II. 측정원리

모든 파장의 영역에서 전자파가 전파될 때 그 파장의 광원, 수신기 그리고 전파매질 등의 상대적인 운동에 의하여 본래의 주파수에 대하여 변화를 갖게 되는데, 이와 같은 주파수 변화를 도플러 변이라 한다. 움직이는 물체에 부딪혀 산란되는 광파는 도플러 효과에 의해서 물체의 속도에 비례하는 주파수변화를 갖는다. 주파수 변화를 해석하는 방법에는 고전적인 방법과 상대론적 방법이 있으나 본 논문에서는 고전적인 방법으로 해석해본다.^[7]

물체가 속도 \vec{v} 로 움직이고 있다고 가정하면 물체의 위치는 다음과 같이 표시된다.

$$\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \vec{v}t \quad (1)$$

물체에 다음 식과 같은 전기장을 가진 단색광을 조사하면,

$$\vec{E}_i = E_0(\vec{r}) \exp[i\vec{k}_i \cdot \vec{r} - i\omega_0 t] \quad (2)$$

여기에서 $E_0(\vec{r})$ 는 점 \vec{r} 에서 입사된 전기장의 크기이다. ω_0 는 각

주파수 이고, \vec{k}_i 는 레이저광의 파수 벡터이다. $|\vec{k}_i|=2\pi/\lambda$ 에서 λ 는 광의 파장이다. 물체에서 산란된 광의 전기장은 다음과 같다.

$$\vec{E}_s = Af(\vec{r})\vec{E}_0(\vec{r})\exp[i(\vec{k}_s - \vec{k}_i) \cdot \vec{r}(t) - i\omega_0 t] \quad (3)$$

여기에서 A 는 산란된 광의 크기를 나타내는 상수이다. $f(\vec{r})$ 는 산란체를 통과하면서 발생한 후방산란의 다중산란과 흡수에 따른 크기의 감쇄를 나타낸다. 계산의 편리를 위해서 산란벡터 K 를 정의하면

$$\vec{K} = \vec{k}_s - \vec{k}_i$$

식 (3)에 적용하면

$$\vec{E}_s = Af(\vec{r})\vec{E}_0(\vec{r})\exp(i\vec{K} \cdot \vec{r}_0 - i\omega t) \quad (4)$$

여기에서

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega,$$

$$\Delta\omega = \vec{K} \cdot \vec{v} = |\vec{K}| |\vec{v}| \cos\theta \quad (5)$$

θ 는 그림 1에서 산란벡터 K 와 물체의 속도벡터 v 사이의 각도이다. 식 (3)과 (4)에서 $f(\vec{r})$ 는 레이저로 되먹임되는 산란광의 일부를 나타낸다. 따라서 $|\vec{K}|$ 와 θ 를 알고 있기 때문에 도플러 변이 $\Delta\omega$ 를 측정하면 속도 $|\vec{v}|$ 를 구할 수 있다. 이때 검출기가 광원 쪽에 있는 후방산란의 경우에는 레이저빔과 산란광이 반대방향이므로 $k_i = -k_s$ 이다. 따라서 식 (5)는 다음과 같이 간단하게 표시할 수 있다.

$$\Delta\omega = 4\pi v \cos\theta/\lambda \quad (6a)$$

$$v = f_D \lambda / (2 \cos\theta) \quad (6b)$$

여기에서 λ 는 레이저광의 파장이다. ϕ 는 물체의 속도와 입사광 방향사이의 각도이다. 따라서 레이저의 파장 λ 와 입사각 θ 를 알고 있는 값이므로, 차주파수 f 를 측정하면 물체의 속도 v 를 측정할 수 있다.

물체가 아무리 고속으로 움직이더라도 발생하는 도플러주파수는 입사광의 주파수에 비하면 대단히 작다. 현재 가용한 광검출기로는 광주파수를 직접 측정하는 것은 불가능하다. 따라서 다른 간접적인 방법이 사용되어야 한다. 전자회로에서 많이 사용하는 두 개 주파수간의 합과 차를 구하는 혼합

(mixing)기술을 광에서도 똑같이 적용할 수 있다. 즉 미소한 주파수차를 갖는 두 개의 코히어런트한 평면광이 광검출기에 입사되면 혼합이 일어난다. 이때 합주파수는 검출기가 검출할 수 있는 주파수 범위를 벗어나므로 차주파수만 검출기에 검출된다. 차주파수를 측정하는 방법으로 레이저 공진기의 전반사경을 99% 정도의 반사율을 갖는 부분반사경으로 교환한 다음 검출기를 설치하면 차주파수를 측정할 수 있다.^[3,4] 그러나 10 μm 대역에서 동작하는 검출기는 액체질소로 냉각해야 하는 어려움이 있으므로 본 논문에서는 공진기 자체의 광전류 효과를 이용하여 차주파수를 검출하였다.

연속발전 CO₂ 레이저는 높은 효율을 가지고 있고 레이저 복사선의 강도가 크므로 복사선의 세기를 변화시키면 거시적 매개 변수들에 변화를 줄 수 있다.^[6] 즉 방전상태의 기체 cell에 원자나 분자 천이에 해당하는 특정주파수를 가진 광을 입사시키므로써 발생하는 방전회로의 임피던스의 변화에 의한 방전전류의 변화를 광전류(optogalvanic) 효과라 한다. 만약 공진기 내부에 설치된 변조기를 사용하거나 공진기의 정열을 바꾸는 방법 등을 이용하여 광의 세기를 1% 정도만 변화하여도 방전 임피던스도 상당한 변화(~0.1%)를 일으키게 된다. 이와 같은 임피던스 변화는 전류의 변화(opto-galvanic) 또는 전압의 변화(opto-voltaic)로써 검출할 수 있다.^[8]

레이저 공진기 속의 전기장 세기를 $\vec{E}_L \equiv \vec{E}_L \exp(i\omega_0 t)$ 이라고 할 때, 도플러 이동된 주파수를 갖는 산란광이 공진기 속으로 입사되어 레이저 고유의 발전광과 자체혼합되면 다음과 같은 전류 $I(t)$ 가 흐르게된다.^[7]

$$\begin{aligned} I(t) &= C_o |\vec{E}_L + \vec{E}_s|^2 \\ &= C_o [|\vec{E}_L|^2 + 2\vec{E}_L \cdot \vec{E}_s + |\vec{E}_s|^2] \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, C_o 는 임의의 상수이다.

공진기 속의 전기장의 세기가 산란광의 전기장 세기 보다 훨씬 크므로($E_L \gg E_s$), 식 (7)에서 마지막 항은 무시할 수 있다.

$$\begin{aligned} I(t) &= C_o [|\vec{E}_L|^2 + 2\vec{E}_L \cdot \vec{E}_s] \\ &= I_0 + \delta I(t) \end{aligned} \quad (8)$$

여기에서 $\delta I(t)$ 는 호모다인 비트로 발생한 광전류이다. 다시 정리하면,

$$\begin{aligned} \delta I(t) &= 2C_o \vec{E}_L \cdot \vec{E}_s \\ &= 2C_o \vec{E}_L \cdot \vec{E}_0 f(\vec{r}) \cos[4\pi v (\cos\theta)t/\lambda] \end{aligned}$$

여기서 C 는 $C_o A$ 를 의미한다.

따라서 공진기 속에는 식 (6a)와 같은 주파수의 광전류효과에 의한 전류가 흐르게 되므로 도플러 이동된 만큼의 차주파수를 검출할 수 있다.

III. 실험 및 결과

산란광의 되먹임을 이용한 LDV의 구성 및 실험장치는 그림 2와 같다. 본 실험에 사용한 CO₂ 레이저는 수냉식으로 가

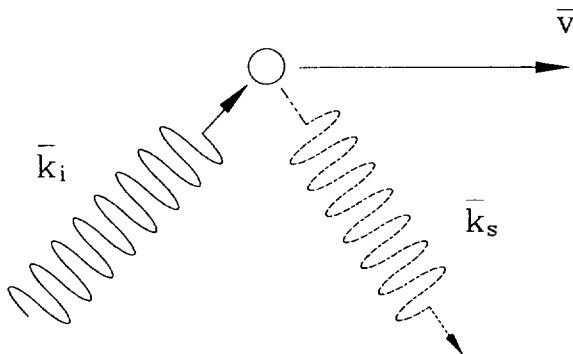


Fig. 1. Diagrammatic representation of incident and scattered waves in relation to the velocity vector of a moving particle.

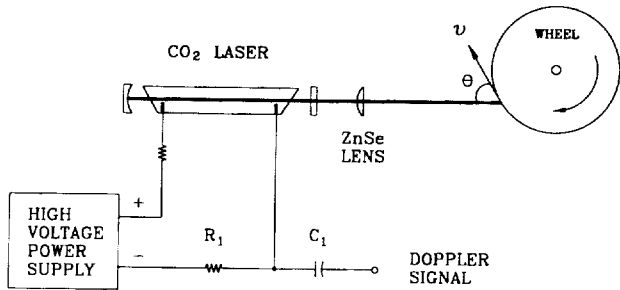


Fig. 2. Experimental setup for the self-mixing type laser Doppler velocimeter using optogalvanic effect.

스순환형으로 제작한 것이다. 전장 72 cm의 공진기는 출력경 (M_2)으로 반사율이 70%인 ZnSe 재질의 평면 반사경을 사용하였고, 전반사경(M_1)으로는 금코팅된 곡률이 10 m인 Si 재질의 오목거울을 사용하였다. 방전관에는 매질용 가스인 $CO_2:N_2:He$ 를 1.5:5:24.5 비율로 약 30 torr 압력을 유지하도록 연속적으로 공급하였다. 직류 고전압 전원공급기를 사용하여 30 cm 길이의 방전관 양쪽에 고전압을 가하여 방전여기를 하였다. 방전용 전극은 스퍼터링을 방지하기 위해서 텅스텐 봉을 양극으로 사용하였고, 음극은 텅스텐 봉에 니켈 판을 원통형으로 만들어 부착하였다. 출력광에서 선형편광을 얻고, 반사경을 방전관과 분리하기 위하여 방전관 양쪽에 ZnSe 재질의 브류스터 창을 부착하였다.

레이저 여기용 전원으로 스위칭형 전원공급기(BURTAN: 105-20R)를 사용하였다. 선형정류기를 사용한 고전압전원 장치 경우에는 상용주파수인 60 Hz의 고조파 성분을 많이 발생시키므로 인하여 S/N비가 극도로 낮아지므로 광전류 신호를 검출할 수 없었다. 600 kΩ의 밸러스트 저항을 방전관과 직렬로 연결한 뒤, 10 mA의 전류를 공급할 때 레이저광의 최대출력은 5 W를 얻었고, 기본적인 횡 모드와 10.59 μm P(20) 선에서 단일 종모드로 동작하였다. 레이저의 전면에 설치된 부분 반사경에서 나오는 레이저 출력을 표적에 집중시키기 위해서 직경이 25 mm이고, 초점길이가 25 cm인 ZnSe 재질의 볼록렌즈를 사용하여 회전원판의 표면에 초점이 맺히도록 하였다.

회전원판은 직경이 15 cm 이고 폭이 5 mm인 알루미늄 원판을 직류모터에 부착하여 회전시켰다. 이때 저속회전에서는 모터의 마찰로 인하여 모터의 회전속도가 일정하지 못하였기 때문에 회전관과 직류모터 사이에 100:1 감속기어를 사용하여 회전속도가 일정하게 되도록 하였다. 회전원판의 속도는 모터의 구동 전압을 변화시켜 조절할 수 있도록 하였다. 모터의 축에 포토인터럽터(photo interrupter)를 부착하여 여기에서 발생하는 펄스를 오실로스코프로 관찰하여 원판의 회전속도를 측정하였고, 본 장치를 이용하여 측정된 속도와 비교를 하였다. 원판표면은 특별한 처리 없이 공작기계를 사용하여 전체적으로 균일한 표면이 되도록 한 뒤 사용하였다.

회전원판에 부딪힌 레이저광은 원판표면에서 산란되어 도플러 이동된 광의 일부가 레이저공진기로 재입사되어 레이저 고유의 광주파수와 혼합이 일어난다. 두 개의 다른 광주파수의 혼합은 레이저 공진기 속의 광을 차주파수로 변조시킨다.

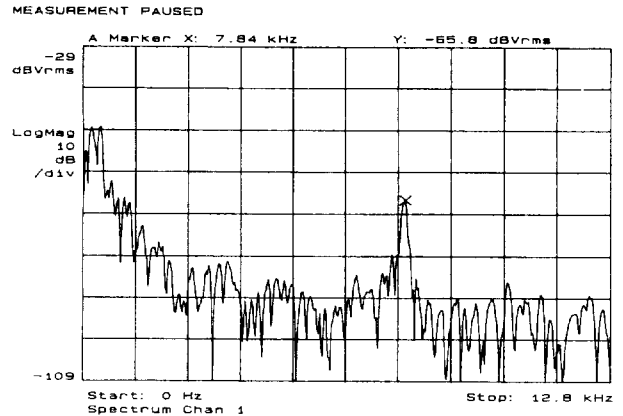


Fig. 3. Typical example of Doppler signal obtained by optogalvanic detection method.

변조된 광은 광전류효과에 의해서 전류변화로 나타나므로 그림 2의 R1의 양단에 전위차로 나타나게 되고, 여기에서 직류값을 C1을 사용하여 제거한 뒤 스펙트럼 분석기(HP-3566A)를 사용하여 도플러 주파수의 변화를 측정하였다. 그림 3은 본 실험 장치로 측정된 대표적인 도플러 신호의 예이다.

회전원판의 속도 변화에 따른 도플러 주파수의 변화를 관찰하기 위하여, 원판에 대한 레이저의 입사각 θ 를 임의의 각 78°로 고정한 상태에서 원판의 회전속도를 변화시켰다. 원판의 속도에 따른 도플러 주파수의 변화는 그림 4와 같다. 원판의 마찰에 의한 회전속도의 불균일을 보완하기 위해서 각 지점의 측정값은 스펙트럼 분석기의 평균화 기능을 사용하여 10회 평균값을 기록하였다. 그림 4에서 점선은 식 (6b)에 의한 계산값이고, 원형은 측정값이다. 레이저의 파장이 10.59 μm 일 때 식 (6b)에 따른 도플러주파수와 측정값 사이에는 최고 4.5%의 오차가 발생하였다.

그림 5는 원판의 회전속도 v 는 임의의 값으로 고정한 뒤, 레이저광의 원판에 대한 입사각 θ 를 변화시키면서 도플러 이동

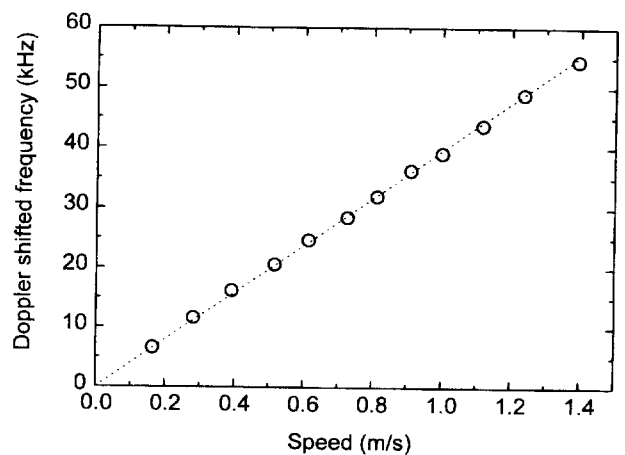


Fig. 4. Measured Doppler frequency as a function of the object velocity component. The light beam angle is $\theta=78^\circ$. The dot line in the figure shows the expected relation of Eq. (6b).

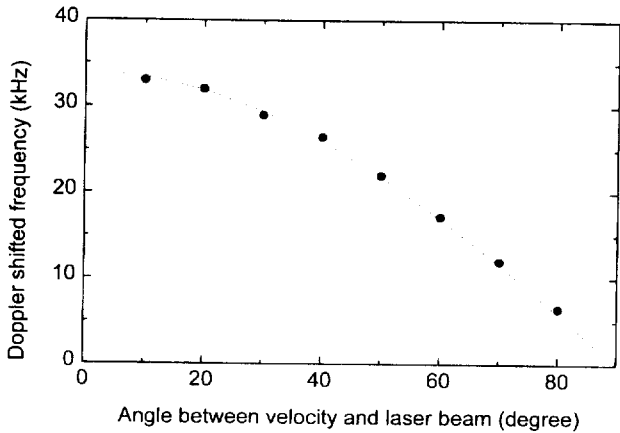


Fig. 5. Measured Doppler frequency as a function of the angle between the light beam direction and the velocity of the object. The dot line was calculated from Eq. (6b).

된 주파수 f_D 를 측정하였다. 임의의 회전속도를 선정하여 측정 한 결과는 식 (6b)와 (그림5에서 점선) 일치함을 보여준다.

본 광전류효과를 이용한 차주파수 검출 방법으로는 최고 60 kHz까지의 차주파수를 측정할 수 있었다. 본 방법에서 최고 측정 가능주파수를 더 높이기 위해서는 전원공급기에서 발생하는 고조파, 방전의 불균일에서 발생하는 잡음, 전극에서 발생하는 잡음 등을 극복하는 방법에 관한 연구가 필요하다.

IV. 결 론

본 논문에서는 이산화탄소 레이저를 사용하여 회전체의 회전속도를 측정하기 위하여 산란광의 되먹임을 이용한 간단한 구조의 LDV를 구성 및 평가하였다. 레이저광을 운동하는 물

체에 조사할 때 발생한 산란광의 일부를 레이저 공진기에 입사시켜 본래의 광주파수와 자체혼합 하였다. 광의 자체혼합은 광전류효과에 의해서 공진기 속에 흐르는 전류를 도플러 변이 주파수로 변조시켰다. 변조된 주파수는 회전체의 회전 속도에 비례하므로 레이저 공진기 속에 흐르는 방전 전류 변화를 관찰함으로써 물체의 속도를 측정하였다. 또한 물체의 속도와 물체에 대한 레이저광의 입사각을 가변 하면서 측정 한 도플러 주파수 변이 값이 설정한 이론과 잘 일치함을 확인 하였다. 레이저의 파장이 10.59 μm 일 때 설정한 이론값과 측정값 사이에는 최고 4.5%의 오차가 있었다. 본 방법을 적용하여 지금까지의 번잡한 액체질소냉각형 MCT 검출기를 사용하지 않고, 간단한 구조로 적외선 영역에서의 차주파수 검출이 가능하였고, 최고 60 kHz의 차주파수를 측정할 수 있었다. 앞으로 신호처리 부분을 개량하면 최고 측정가능한 차주파수를 높일 수 있을것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] M. J. Rudd, J. Phys. E **1**, 723(1968).
- [2] S. Shimohara, A. Mochizuki, H. Yoshida, and Masao Sumi, Appl. Opt., **25**, 9, 1417 (1986).
- [3] James H. Churnside, Appl. Opt., **23**, 1, 61 (1984).
- [4] 최중운, 김용평, 김윤명, 한국광학회지, **7**, 2, 157 (1996).
- [5] Jong-Woon Choi, Young-Pyung Kim, and Youn-Myung Kim, US PATENT, 08.689,269 (1996).
- [6] R. B. Green, R. A. Keller, G. G. Luther P. K. Schenck, and J. C. Travis, Appl. Phys. Lett., **29**, 747 (1976).
- [7] Toyochi Tanaka, George B. Benedek, Appl. Opt., **14**, 1 (1975).
- [8] A. L. S. Smith and S. Moffatt, Opt. Comm., **30**, 2 (1979).

Laser Doppler Velocimetry using the optogalvanic effect of CO₂ laser

Jong-Woon Choi

Korea Research Institute of Standards and Science
P.O.Box-102, Yusong, Taejeon 305-600, Korea

Young-Pyung Kim

Department of Electronics Engineering
Kyunghee University, Youngin 449-701, Korea

Youn-Myung Kim

Department of Electronics Engineering
Dankook University, Seoul 140-714, Korea

(Received : August 29, 1997)

A new laser Doppler velocimeter employing a CO₂ laser has been developed by using its optogalvanic effect. A change in the electric impedance of a discharge, induced by mixing of a returned wave with an originally existing wave inside the cavity, was employed to detect the Doppler frequency shift. A Doppler frequency shift as much as 60 KHz was detected, and also a good linear relationship between the velocity and the Doppler frequency shift was obtained.