

산란광의 되먹임을 이용한 CO₂ 레이저 도플러 속도 측정

최중운 · 김용평

한국표준과학연구원

김 윤 명

단국대학교 전자공학과

(1996년 3월 11일 받음)

산란광의 되먹임을 이용한 간단한 구조의 레이저 도플러 속도계를 제작하였다. 단일파장의 레이저 광을 움직이는 물체에 조사할 때 발생하는 산란광의 일부를 레이저 공진기에 되먹임하여 도플러 주파수로 변조된 레이저 출력을 측정하였다. 도플러 주파수는 원관의 회전속도에 비례하였고, 속도벡터와 레이저 빔 광축 사이의 각도의 코사인에 선형적으로 변화하였다. 본 방법으로 0~17 m/s의 회전속도를 최고 2.9%의 오차로 측정하였다.

I. 서 론

광 영역에서 도플러 효과를 이용한 속도계는 레이저 출현 이후 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 기본 원리는 호모다인(homodyne) 방법을 이용한 미켈슨 간섭계를 변형한 것이다.^[1] LDV에 많이 사용되는 미켈슨 간섭계형은 레이저에서 나오는 광을 두 개로 나눈 뒤, 한 개는 검출용 광으로 사용하고 또 한 개는 참조용 광으로 사용한다. 나중에 두 개의 광은 호모다인 검출을 위해서 검출기에 입사된다. 따라서 미켈슨 간섭계형 LDV를 구성하기 위해서는 레이저 광원과 검출기와 함께 빔 스플리터, 반사경 등이 필요로 하고, 검출광과 참조광을 검출기 면의 한 점에 집속하기 위해서 정밀한 정렬장치를 필요로 한다. 이와는 달리 공진기의 고유주파수와 도플러 이동된 산란광을 레이저 공진기 내에서 자체 혼합하여 발생한 차주파수를 레이저 뒤쪽에 설치한 광검출기로 측정하는 방법이 있다.^[2] 움직이는 물체의 표면에서 산란된 광은 도플러 효과에 따른 주파수 변화를 갖게되므로, 산란광의 일부를 렌즈를 통하여 레이저로 다시 입사시키면 레이저 공진기 속에서는 되먹임된 산란광과 본래 발진주파수 사이의 간섭이 발생하게 된다. 결국 두 개 광주파수 사이의 차주파수와 같은 주

파수로 레이저 출력이 변조된다.

산란광의 되먹임을 이용한 LDV는 미켈슨 간섭계 방식에 비하여 장치가 간단하므로 쉽게 도플러 속도계를 구성할 수 있는 장점이 있다. 이 방법은 처음에 He-Ne레이저를 사용하여 시도되었는데, 최근에는 CO₂ 및 다이오드 레이저에서도 응용되고 있다.^[3,4]

본 논문에서는 회전하고 있는 물체에 CO₂ 레이저광을 조사할 때 발생하는 산란광의 일부를 레이저에 되먹임한 뒤, 레이저 자체혼합 현상을 이용하여 도플러 신호를 검출하였다. 또한 외부 산란물체의 운동에 따른 CO₂ 레이저 출력의 주파수 변화를 관찰하였다.

II. 측정원리

모든 파장의 영역에서 전자파가 전파될 때 광원, 수신기의 상대적인 운동에 의하여 본래의 주파수에 대하여 변화를 갖게되는데, 이때의 주파수 변화를 도플러 이동이라 한다. 즉 움직이는 물체에 부딪혀 산란되는 광파는 도플러 효과에 의해서 물체의 속도에 비례하는 주파수 변화를 갖는다. 그림 1에서 단일파장에 가진 파수 k , 인 레이저 광이 속도 v 로 움직이고 있는 물체에 입사했을 때 광검출기에는 파수 k_s 인 산란광이 관찰된다. 이때 도플러 효과에 의한 입사광과 산란광의 주파수 관계는 다음 식으로 표시할 수 있다.^[5]

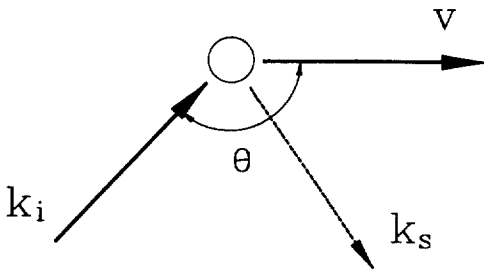


그림 1. Diagrammatic representation of incident and scattered waves in relation to the velocity vector of a moving particle.

$$\omega_s = \omega_i - \omega = v \cdot (k_s - k_i) \tag{1}$$

만약 광검출기를 레이저 뒤쪽에 위치시키면 레이저 광과 산란광은 방향이 서로 반대이므로 $k_i = -k_s$, $|k_i| = 2\pi/\lambda$ 이므로 식 (1)은 다음과 같이 된다.

$$\omega_s = 4\pi v \cos(\theta) / \lambda \tag{2a}$$

$$f_d = 2v \cos(\theta) / \lambda \tag{2b}$$

여기에서 λ 는 입사광의 파장, θ 는 광축과 산란면의 속도 사이의 각도이다. 따라서 식 (2a,2b)에 상수 값인 측정광의 입사각과 파장을 대입하고, 도플러 주파수를 측정하면 물체의 속도를 알 수 있다.

도플러 이동된 산란광이 레이저에 되먹임 되었을 때 레이저의 출력변화를 살펴본다. 측정광으로 사용하는 레이저에서 출력되는 광의 전기장 성분을 평면파로 가정하여 다음과 같이 표시할 수 있다.^[6]

$$E(z, t) = E_{in} \exp[ik_s z - \omega_s t + \phi(t - z/c)] + C. \tag{3}$$

$k_s = \omega_s/c$ 는 광의 파수를 나타내고, z 는 물체 쪽에 있는 반사경을 $z=0$ 으로 하고, 산란체쪽을 양의 방향으로 하는 좌표이다. $\phi(t)$ 는 레이저의 스펙트럼 폭에 따라서 변화하는 랜덤한 위상변화이고, C 는 앞 함수의 공액 복소수이다. 레이저 공진기 내부의 광은 같은 주파수와 위상을 가지면서 진행방향은 서로 반대인 두 개의 진행파로 된 정재파로 기술할 수 있다.

공진기의 출력 거울은 부분 투명하고, 그 투과율을 T 라 할때, 레이저 공진기 내부의 광은 출력광보다 $1/T$ 만큼 크다. 따라서 출력광의 반대방향으로 전파하는 진행파는 다음과 같다.

$$E_L(z, t) = (1/T) E_{in} \exp[-k_s z - \omega_s t + \phi(t + z/c) + \pi] + C. \tag{4}$$

여기에서 위상변화 π 는 완전도체로 가정된 반사경으로 인하여 발생한 것이다.

식 (3)과 같은 레이저광이 움직이는 물체에 부딪쳐 산란되면 산란광의 광주파수는 식 (2b)와 같은 도플러 이동이 발생하고, 스펙클 현상에 따라서 위상과 크기가 변화한다.^[7] 따라서 산란광은 다음과 같이 표시된다.

$$E_s(z, t) = E_{os} \exp\{i(k_o + k_d)(l - z) + k_o l - (\omega_o + \omega_d)t + \phi[t - (2l - z)/c]\} S[t - (l - z)/c] \times \exp\{i[\phi_s t - (l - z)/c]\} + C. \tag{5}$$

l 은 레이저와 물체사이의 간격이고, $k_d = \omega_d/c$ 는 산란광의 도플러 이동에 상응하는 파수이다. S 이하 항은 물체의 산란에 의해서 발생하는 스펙클 신호의 크기와 위상의 교란을 나타낸다. 식 (5)와 같은 산란광이 레이저에 입사되면 레이저 내부의 광은 영향을 받게된다. 이때 레이저광의 세기를 구하면 다음과 같다.

$$I(z, t) = \epsilon c \langle [E_L(z, t) + TE_s(z, t)]^* [E_L(z, t) + TE_s(z, t)] \rangle = \epsilon c [E_{in}^2/T^2 + \epsilon |E_{os} S[t - (l - z)/c] T|^2 + \epsilon c E_{in} E_{os} \exp\{2k_o l + k_d(l - z) - \omega_d t + \phi(t + z/c - 2l/c) - \phi(t + z/c) - \pi\} \times S[t - (l - z)/c] \exp\{i[\phi_s t - (l - z)/c]\} + C. \tag{6}$$

여기에서 $\langle E^* E \rangle$ 는 $E^* E$ 의 주기평균을 의미하고, c 는 진공에서 광속도, ϵ 은 공기의 유전율이다. $\epsilon |E_{os} S(t) T|^2$ 항은 레이저 세기의 dc값 증가를 결정하고, $\epsilon E_{in} E_{os} S(t)$ 항은 레이저 세기의 변화량을 결정한다. 레이저 공진기 내에서 세기의 위상차는 미소하므로, 광의 세기는 양쪽 레이저 반사경을 투과한 세기와 관련된다. 따라서 레이저 세기는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I_s(t) = I_o + I_1 \exp\{2k_o l + k_d l - \omega_d t + \phi(t - 2l/c) - \phi(t) - \pi\} S(t - l/c) \exp\{i[\phi_s(t - l/c)]\} + C. \tag{7}$$

이 식에서 $\phi(t - 2l/c) - \phi(t)$ 항의 시간평균은 2π 보다 훨씬 작아서 지수식에서 제외할 수 있다. 후방산란광이 레이저광과 코히어런트한 경우, 즉 $2l/c$ 기간동안 위상의 흔들림이 작은 경우이다. 만약 광이 물체에 투사된 뒤 레이저로 되돌아오는 시간이 충분히 작다면, 신호에서 레이저 광의 순간적인 코히어런트한 성질은 중요하지 않다는 사실을 이 식을 통해 알 수 있다.

식 (7)에서 스펙클에 의한 변화를 제외한 세기의 시간 종속성은 도플러 주파수와 주기가 일치한다. 따라서 레이저 세기는 움직이는 물체의 속도를 나타내는 식 1의 주파수로 변화하므로 레이저광의 세기 변화를 측정하면

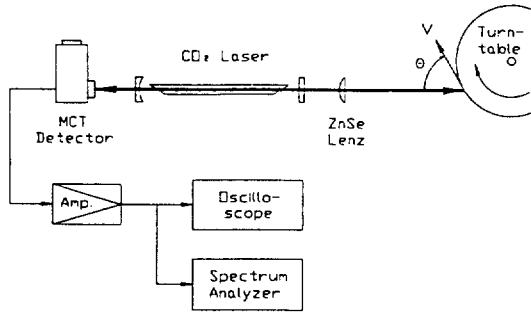


그림 2. Experimental setup for the self-mixing type laser Doppler velocimeter.

속도를 측정할 수 있다.

III. 실험 및 결과

산란광의 되먹임을 이용한 LDV의 구성 및 실험장치는 그림 2와 같다. 회전원판에서 산란되어 도플러 이동된 광의 일부가 레이저 공진기로 되먹임 되어 내부 광과 혼합이 일어난다. 혼합에 따른 세기의 변화는 레이저 뒤쪽에 설치한 광검출기를 사용하여 검출한 뒤, 저잡음 증폭기로 증폭하여 오실로스코프와 스펙트럼 분석기로 관찰하도록 하였다.

본 실험에는 수냉식이면서 가스 순환형 CO₂ 레이저를 사용하였다. 가스 혼합비율은 He-N₂-CO₂를 19.5-5-1의 비율로 총 25.5 torr를 공급하였다. 매질가스 여기를 위해서 41 cm 길이의 방전관에 600 k Ω 의 밸러스트 저항을 직렬로 연결한 뒤, 10 mA의 전류를 공급하여 고전압 방전을 시켰다. 출력광에서 선편광을 얻기 위해서 방전관 양단에 ZnSe창을 브루스터각으로 부착하였다.

레이저 공진기 구성을 위하여 방전관 한쪽에는 99% 반사율을 갖는 반경 10 m 곡률의 ZnSe 반사경을 부착하고, 다른 한쪽에는 70% 반사율을 갖는 평면 반사경 설치하였다. 이와 같이 구성된 레이저 공진기의 총길이는 71 cm이다. 레이저광의 최대출력은 레이저 앞쪽과 뒤쪽에서 각각 4.5 W와 450 mW를 얻었고, 기본적인 횡 모드와 10.59 μ m P(20) 선에서 단일 종모드로 동작하였다.

레이저의 전면에서 설치된 부분반사경에서 나오는 광은 레이저 출력을 표적에 집중시키기 위해서 직경이 25 mm이고 초점거리가 25 cm인 ZnSe 볼록렌즈를 사용하여 회전물체의 표면에 초점이 맺히도록 하였다. 뒤쪽의 부분반사경에서 나오는 광은 액체질소로 냉각되는 MCT (HgCdTe) 검출기(EG & G Judson: J15D)에 입사되도록 하였다. 검출기에서 발생하는 광전류 중에서 도플러 신

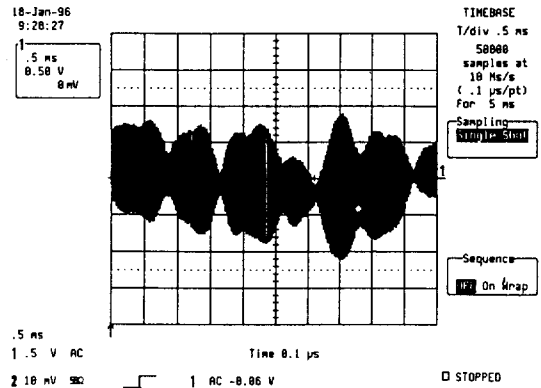


그림 3. Typical sample of ac Doppler signal recorded on an oscilloscope.

호와 평균 광전류는 결합 커패시터를 사용하여 분리하였다.

표적은 직경이 15 cm이고 폭이 5 mm인 알루미늄 원판을 직류모터에 부착하여 회전시켰고, 모터의 구동 전압을 변화시켜 원판의 회전 속도를 가변할 수 있도록 제작하였다. 원판표면은 특별한 처리 없이 공작기계를 사용하여 전체적으로 균일한 표면이 되도록 하였다. 본 실험을 통하여 측정된 속도 값과 비교하기 위해서 포토 인터럽터(Photo interrupter)와 오실로스코프를 사용하여 원판의 회전속도를 측정하였다.

그림 3은 회전원판을 48 RPM으로 회전시켰을 때 발생하는 레이저 세기의 변화를 MCT검출기를 사용하여 검출하고, 대역폭이 1 MHz인 증폭기(EG & G Judson, PA-100)를 사용하여 증폭한 뒤 오실로스코프(LeCroy 9310)를 사용하여 관찰한 것이다. 그림 3에서 보이는 랜덤한 출력변화는 레이저의 스펙클현상 (식 (5)의 $S(t) \exp[i\psi_s(t)]$ 항)에 의해서 발생한 것으로 도플러 주파수보다 훨씬 낮은 주파수로 변화하였다. 그림 4는 같은 신호를 스펙트럼 분석기(HP3566A, HP8558B)를 사용하여 관찰한 것으로 회전 속도에 비례하는 도플러 신호는 스펙클 신호와 명확하게 구분하여 관찰할 수 있다.

원판의 회전속도 및 방향에 따른 도플러 주파수 변화를 관찰하기 위해서, 원판의 회전속도 v 와 레이저광의 원판에 대한 입사각 θ 를 각각 변화시키면서 도플러 이동된 주파수 f_D 를 측정하였다. 먼저 입사각 θ 를 45°로 고정된 상태에서 원판의 회전속도를 변화시켰을 때 발생하는 도플러 주파수의 변화는 그림 5와 같다. 도플러 신호의 주파수는 식 (2b)에서와 같이 회전체의 회전속도와 정비례함을 알 수있다. 그림 5에서 삼각형은 식 (2b)에 따른 계산값과 측정값의 차이를 표시한 것이다. 레이저의 파

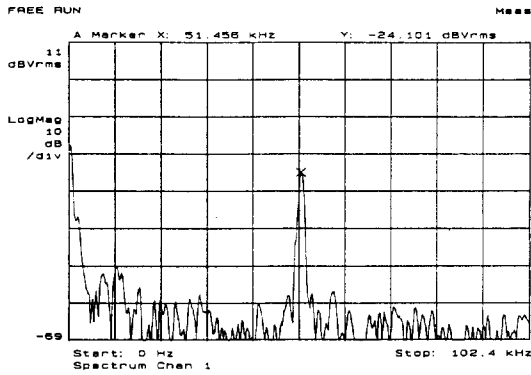


그림 4. Typical sample of Doppler spectra recorded on a spectrum analyzer.

장이 10.59 μm 일 때 식 3에 따른 도플러주파수와 측정값 사이에는 편차 1.9%를 중심으로 최고 2.9%의 오차가 발생하였으나, 이는 레이저 빔 광축과 속도벡터 사이각 θ 의 부정확한 측정으로 추정된다. 또한 낮은 속도에서 발생한 큰 오차는 회전체의 마찰로 인한 회전속도의 불균일 때문에 발생한 것으로 생각된다.

그림 6은 레이저 광축과 산란면의 속도 벡터 사이의 각도를 변화시키면서 도플러 주파수의 변화를 측정하는 것이다. 임의의 회전속도 세 가지를 선정하여 측정된 결과, 식 (2b) (그림6에서 점선)와 잘 일치함을 알 수 있다. 즉 운동방향과 레이저 빔사이의 코사인 각도에 도플러 주파수가 선형적으로 변화함을 알 수 있다. 본 실험에서는 MCT 검출기용 앰프의 대역폭이 1 MHz인 것을 사용한 관계로 최고 2 MHz 까지의 주파수 변화를 측정할 수 있었다. 이를 이용하여 0~17 m/s에 해당하는 속도변화를 측정하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 물체의 속도를 측정하기 위하여 산란 광의 되먹임을 이용한 간단한 구조의 LDV를 구성하였다. 광주파수의 도플러 이동을 측정하기 위해서 레이저광이 운동하는 물체에 부딪쳐 발생한 산란광의 일부를 레이저 공진기에 입사시켜 본래의 광주파수와 자체혼합 하였다. 광의 자체혼합은 산란광의 도플러편이 주파수로 변조된 출력력을 발생하였다. 이때 발생한 도플러 편이 주파수는 회전체의 회전속도에 비례하므로 레이저의 출력 변화를 관찰함으로써 물체의 속도를 측정하였다. 또한 물체의 운동방향과 레이저 빔사이의 코사인 각도에 도플러 주파수가 선형적으로 변화함을 알 수 있다. 레이저의 파

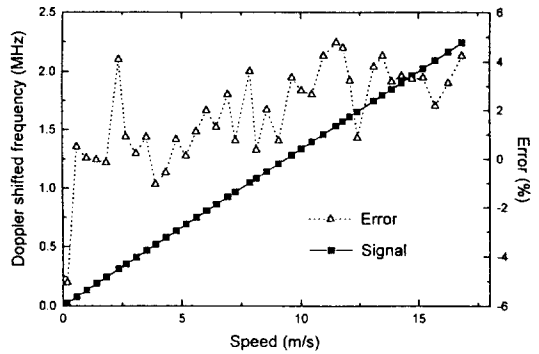


그림 5. Measured Doppler frequency as a function of the object velocity component in the light beam direction with $\theta=45^\circ$. The line in the figure shows the expected relation Equ. (2b).

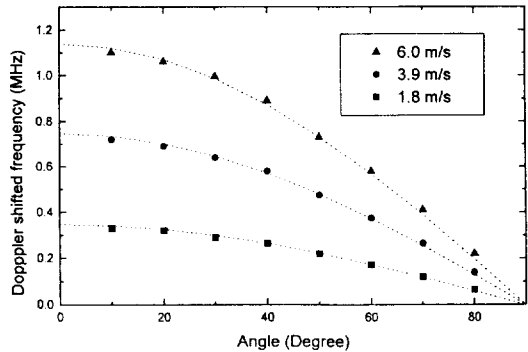


그림 6. Measured Doppler frequency as a function of the angle between the light beam direction and the object velocity. The line was calculated from Equ. (2b)

장이 10.59 μm 일 때 설정한 계산값과 측정값 사이에는 도플러주파수와 측정값 사이에는 편차 1.9%를 기준으로 최고 2.9%의 오차가 있었다.

본 방법은 지금까지의 변잡한 광 헤테로다인법을 사용하지 않고 간단한 구조로 코히어런트한 광검출을 가능하게 해주었고, 0~17 m/s의 회전속도를 비접촉으로 측정할 수 있게 하였다.

참 고 문 헌

[1] Edson T. Shimizu, Vol. 26, No. 21, 4541, Applied Optics, (1987).
 [2] James H. Churnside, Vol. 23, No. 1, 64, Applied Optics, (1984).

- [3] S. Shimohara, A. Mochizuki, H. Yoshida, and Masao Sumi, Vol. 25, No. 9, 1417, *Applied Optics*, (1986).
- [4] M. H. Koelink, M. Slot, F. F. M. de Mul, J. Greve, R. Graaff, A. C. M. Dassel and J. G. Aarnoudse, *Meas. Sci. Technol.* 3, 33, (1992).
- [5] B. M. Watrasiewicz and M. J. Rudd, *Laser Doppler Measurements*, BUTTERWORTHS, London-Boston, (1976), 20-27.
- [6] H. W. Jentink, F. F. M. de Mul, H. E. Suichies, J. G. Aarnoudse, and J. Greve, *Applied Optics*, Vol. 27, No. 2, 379, (1988).
- [7] J. H. Churnside, *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 72, No. 11, 1464, (1982).

Laser Doppler Velocimeter Using the Self-mixing Effect of a CO₂ Laser

Jong-Woon Choi, Young-Pyung Kim

Laser Group, Korea Research Institute of Standards and Science, Taejeon 305-600, Korea

Youn-Myung Kim

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

(Received: March 11, 1996)

A simple laser Doppler velocimeter(LDV) using a CO₂ laser with its self-mixing effect has been developed. We measured the laser power which was modulated by Doppler frequency, when monochromatic laser light was focused to a moving target. The Doppler-shifted frequency was controlled by changing rotating speed of the turntable or the cosine of the angle between the direction of the laser beam and that of the rotating velocity.