

Laser Doppler Velocimetry Using the Photoacoustic Effect of CO₂ Laser

崔鐘云* · 劉燧鍾**
(Jong-Woon Choi · Moon-Jong Yu)

Abstract - A new laser Doppler velocimeter employing a CO₂ laser has been developed by using its photoacoustic effect. A change in the pressure of a discharge, induced by mixing of a returned wave with an originally existing wave inside the cavity, is employed to detect the Doppler frequency shift. We found that a Doppler frequency shift as much as 34 kHz was detected, and also a good linear relationship between the velocity and the Doppler frequency shift was obtained.

Key Words : photoacoustic, Doppler, CO₂, 레이저

1. 서론

광주파수 영역에서 도플러효과를 이용한 속도계는 레이저 출현 이후 많이 연구되어 왔고 많은 분야에서 응용되고 있다. 레이저 도플러 속도계(Laser Doppler Velocimeter: 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 구성하는 데는 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 발생하게 되므로, 주파수 변이된 산란광의 일부를 레이저로 다시 되먹임 시키면, 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. 이와 같이 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 레이저

를 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 단점이 있다. 광전류효과를 이용한 공진기 속의 차주파수 검출 방법이 연구되었으나,^[5] 이 방법은 장치가 간단하다는 장점을 갖는 반면에 레이저 공진기에서 발생하는 많은 전기적인 잡음을 동반하는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 액체 질소로 냉각되는 MCT 검출기를 사용하지 않고, CO₂ 레이저의 공진기 자체에서 발생하는 광음향 효과를 이용하여 도플러 효과에 의해 주파수 변이된 신호를 검출하였다. 즉 도플러 효과에 의해서 주파수 변이된 산란광을 공진기에 되먹임 시키면 공진기 속의 레이저광의 세기는 레이저 고유주파수와 산란광의 변이주파수 사이의 차 주파수로 변조된다. 레이저 공진기 속에는 광음향(photoacoustic) 효과에 의해서 광의 세기에 따른 미세한 압력 변화가 발생한다.^[6] 공진기 속에 설치한 콘덴서 마이크를 사용하여 압력변화의 주파수를 측정하면, 차주파수 즉 도플러 효과에 의해 변이된 주파수 값을 측정할 수 있다.

2. 측정 원리

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 해석하였다.^[7]

단일파장을 가진 평면파가 속도 v 로 움직이고 있는 물체

* 準 會 員 : 湖南大 工大 情報通信工學科 教授

** 正 會 員 : 湖南大 工大 光通信工學科 研究員

接受日字 : 2003年 8月 1日

最終完了 : 2003年 10月 1日

에 입사한다고 가정한다. 여기에서 물체의 속도 v 는 광속 c 보다 훨씬 작은 값이다.

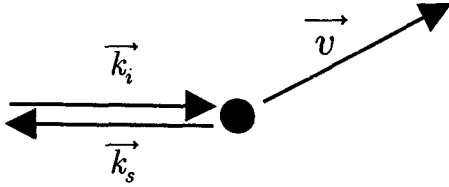


그림 1. 빛(\vec{k}_i)이 속도(v)를 가지고 운동하는 물체에 입사되었을 때 발생하는 산란광(\vec{k}_s)의 벡터표시.
 Fig. 1. Diagrammatic representation of incident and scattered waves(\vec{k}_i, \vec{k}_s) in relation to the velocity vector(v) of a moving object.

고정된 물체에 단위 시간당 입사되는 파면의 수는 $\nu = c/\lambda$ 로 표시할 수 있으므로, 움직이는 물체에 입사되었을 경우의 파면의 수는 다음식과 같다.

$$\nu_p = \frac{c - \vec{v} \cdot \vec{i}}{\lambda_i} \quad (1)$$

여기에서 ν_i 는 입사광의 주파수, λ_i 는 입사광의 파장, $(c - \vec{v} \cdot \vec{i})$ 는 물체와 입사광의 속도 차이, \vec{i} 는 입사광의 전파벡터 \vec{k}_i 와 평행한 단위벡터이다. 물체에서 보는 겹보기 파장 λ_p 는 식 1을 사용하여,

$$\lambda_p = \frac{c}{\nu_p} = \frac{\lambda_i c}{c - \vec{v} \cdot \vec{i}} \quad (2)$$

로 표시된다. \vec{k}_s 방향에서 움직이지 않는 관측자에게 보이는 산란광의 파장은 식 3과 같다.

$$\lambda_s = \frac{c - \vec{v} \cdot \vec{s}}{\nu_p} \quad (3)$$

여기에서 \vec{s} 는 산란광의 파동벡터 \vec{k}_s 와 평행한 단위벡터이다.

식 1에서 $\vec{v} \cdot \vec{i}$ 는 물체의 \vec{i} 방향 속도 벡터를 나타낸다. 따라서 $(c - \vec{v} \cdot \vec{i})$ 는 산란광과 움직이는 물체 사이의 속도차이다. 산란광의 주파수 ν_s 는 $\nu_s = c/\lambda_s$ 이므로, 여기에 식 2와 식 3을 대입하여 산란광의 주파수를 구하면,

$$\nu_s = \frac{c}{\lambda_i} \left(\frac{c - \vec{v} \cdot \vec{i}}{c - \vec{v} \cdot \vec{s}} \right) \quad (4)$$

도플러 변이 주파수는 $\nu_D = \nu_s - \nu_i$ 이므로,

$$\nu_D = \frac{c}{\lambda_i} \left(\frac{c - \vec{v} \cdot \vec{i}}{c - \vec{v} \cdot \vec{s}} - 1 \right) \quad (5)$$

로 된다. 이 식에서 광속은 물체의 속도보다 훨씬 크므로, 즉 $|v| \ll c$ 이므로,

$$\nu_D \approx \frac{\vec{v} \cdot (\vec{s} - \vec{i})}{\lambda_i} = \frac{n}{\lambda_0} \vec{v} \cdot (\vec{s} - \vec{i}) \quad (6)$$

여기에서 n 은 산란광이 발생하는 물체 주변 매질의 굴절률이고, λ_0 는 입사광의 진공속 파장, θ 는 입사광과 산란광 사이의 각도이다.

이 때 그림 2에서와 같이 관찰자인 광검출기가 광원인 레이저 쪽에 있는 후방산란의 경우에는 레이저빔과 산란광이 반대방향이므로 $\vec{k}_i = -\vec{k}_s$ 이다. 따라서 공기의 굴절률을 1로 가정하면, 식 6에서 움직이는 물체의 속도 v 는 측정된 도플러 주파수, 레이저 파장, 물체 표면에 대한 광원의 입사각 등을 사용하여 다음과 같이 간단하게 정리할 수 있다.

$$v = \frac{\nu_D \lambda_0}{2 \cos\theta} \quad (7)$$

여기에서 λ_0 는 레이저광의 파장이다. θ 는 물체의 속도와 입사광 방향사이의 각도이다. 따라서 CO₂ 레이저의 파장 λ_0 와 입사각 θ 는 알고 있는 값이므로, 물체의 속도 변화에 따른 차주파수 ν_D 를 측정하면 물체의 속도 v 를 측정할 수 있다.

물체가 고속으로 움직이더라도 발생하는 도플러주파수는 입사광의 주파수에 비하면 대단히 작다. 그러나 현재 가용한 광검출기로는 도플러 변이된 광의 주파수를 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 두 개의 광의 합주파수는 검출기가 검출할 수 있는 주파수 범위를 훨씬 벗어나 측정되지 않고, 차주파수인 도플러 변이 주파수만 검출기에 검출된다.

레이저 공진기 속의 전기장의 진폭을 E_1 이라고 하면 전기장의 세기는 $\vec{E}_L = E_1 \exp(i\omega_0 t)$ 으로 표시할 수 있다. 도플러 이동된 주파수를 갖는 산란광이 공진기 속으로 입사

되어 레이저 고유의 발전광과 자체혼합(homodyne)되면 다음과 같은 전류 $I(t)$ 가 흐르게 된다.^[7]

$$I(t) \propto |\vec{E}_L + \vec{E}_s|^2 \quad (8)$$

$$\propto |\vec{E}_L|^2 + |\vec{E}_L \cdot \vec{E}_s|^2 + |\vec{E}_s|^2$$

공진기 속의 전기장의 세기가 산란광의 전기장 세기보다 훨씬 크므로 $\vec{E}_L \gg \vec{E}_s$, 식 8에서 마지막 항은 무시할 수 있다.

$$I(t) \propto |\vec{E}_L|^2 + 2\vec{E}_L \cdot \vec{E}_s \quad (9)$$

$$\propto I_0 + \delta I(t)$$

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

$$\delta I(t) \propto 2E_s(t) \cdot E_L \cos[(\omega - \omega_L)t + \phi] \quad (10)$$

따라서 공진기 속에는 식 7과 같은 차주파수로 레이저광의 세기 변화가 발생하므로 도플러 이동된 만큼의 차주파수를 검출할 수 있다.

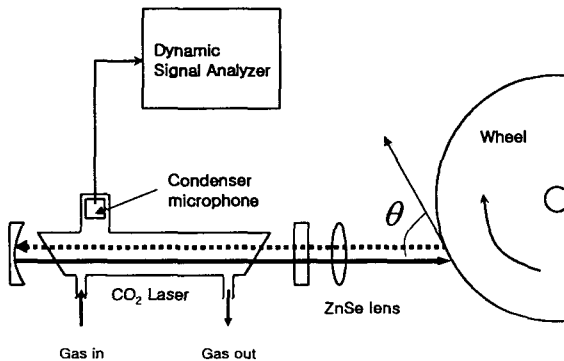


그림 2. 도플러 주파수 변위를 레이저 공진기의 자체혼합효과와 광음향효과를 이용하여 검출하기 위한 실험장치도. (실선: 레이저광 경로, 점선: 회전판 표면에서 발생된 산란광의 경로)

Fig. 2. Experimental setup for the self-mixing type laser Doppler velocimeter using photacoustic effect. (Solid line: output beam of laser, Dashed line: a part of scattered light from the surface of the wheel)

차주파수를 측정하는 방법으로 James H. Churnside^[3]와 같이 레이저 공진기의 전반사경을 99% 정도의 반사율을 갖는 부분반사경으로 교환한 다음, 그 뒤쪽에 검출기를 설치하여 공진기 속에서 변조된 광의 일부를 검출하는 방법으로 차주파수를 측정할 수 있다.^[3,4] 그러나 10 μm대역에서 동작하는 검출기는 액체질소와 같은 냉매로 냉각해야 하는 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 공진기 자체에서 발생하는 광음향효과를 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 쌍극자 능률

(dipole moment)를 가지고 있는 CO₂ 가스분자는 회전진동 천이 에너지와 같은 적외선 영역에서 다수의 흡수선을 가지고 있다. 따라서 레이저 공진기에 있는 레이저 가스에 흡수선과 동일한 에너지를 갖는 광을 조사하면 가스 분자는 회전 진동천이의 높은 에너지 상태로 여기 된다. 또한 여기된 가스분자들은 주위 분자들에게 자신의 에너지를 전달하여 전체 가스분자들의 천이 에너지를 증가시키게 되어 가스의 압력을 증가시키는 결과를 야기한다^[9]. 방전상태의 기체에 분자 천이에 해당하는 특정주파수를 가진 광을 입사시키므로써 발생하는 방전관 속의 압력 변화를 광음향(photoacoustic) 효과라 한다^[10,11]. 이와 같은 압력의 변화는 결국 변이주파수로 변조된 레이저광의 세기의 변화와 일치하게 되므로, 압력의 변화를 측정하면 도플러 변이주파수를 측정할 수 있게 된다. 광음향 효과에 의한 레이저 공진기 속의 미약한 압력변화는 콘덴서 마이크를 공진기 속에 설치하여 검출할 수 있다.

3. 실험 및 결과

산란광의 되먹임을 이용한 LDV의 구성 및 실험장치는 그림 2와 같이 레이저, 볼록렌즈, 콘덴서 마이크로폰, 회전판, 주파수 측정 장치로 구성되어 있다. 본 실험에 사용한 CO₂ 레이저는 수냉식 가스순환형이며 실험실에서 제작한 것이다. 그림에서 실선은 레이저에서 발생하는 광로이고, 점선은 회전판의 표면에서 발생한 산란광중에서 레이저 공진기로 재입사 되는 성분을 표시한다. 전체 길이가 약 72 cm의 레이저 공진기를 구성하기 위해서 출력경은 반사율이 70%인 ZnSe 재질의 평면 반사경을 사용하였고, 전반사경은 금코팅이 된 곡률이 10 m인 BK7 재질의 오목거울을 사용하였다. 레이저 방전관에는 매질용 가스로서 CO₂ : N₂ : He 을 1 : 1 : 8 비율로 혼합된 가스를 약 20 torr 압력을 유지하도록 연속적으로 공급하였다. 직류 고전압 전원공급기를 사용하여 30 cm 길이의 방전관 양쪽에 고전압을 가하여 방전여기를 하였다. 방전용 전극은 고전압 방전할 때 발생하는 스퍼터링(sputtering)을 감소시키기 위해서 텅스텐 봉을 양극으로 사용하였고, 음극은 텅스텐 봉에 니켈 판을 원통형으로 만들어 부착하였다. 출력광에서 선형편광을 얻고, 반사경을 방전관과 분리하기 위하여 방전관 양쪽에 ZnSe 재질의 브루스터 창(Brewster window)을 부착하였다.

레이저 여기용 전원으로 승압형 변압기를 사용한 고전압 전원 장치 경우에는 상용주파수인 60 Hz 및 그 고조파 성분으로 인하여 S/N비가 극도로 낮아지므로 광음향 신호를 검출할 수 없었다. 따라서 스위칭 주파수가 42 kHz인 스위칭형 전원공급기를 제작하여 사용하였다. 10 mA의 전류를 공급할 때 레이저광의 최대출력은 1.2 W를 얻었고, 기본적인 펄스 모드와 10.59 μm P(20) 선에서 단일 종모드로 동작함을 레이저 스펙트럼 분석기(Optical engineering: 16A)를 사용하여 확인하였다. 레이저의 전면에서 설치된 부분 반사경에서 나오는 레이저 출력을 표적에 집중시키기 위해서 직경이 25 mm이고, 초점길이가 2.5 cm인 ZnSe 재질의 볼록렌즈를 사용하여 회전원판의 표면에 초점이 맺히도록 하였다.

회전원판은 직경이 40 mm 이고 폭이 10 mm 인 알루미늄 원판을 광초퍼(SRS: SR540)에 부착하여 회전시켰다. 회

전원판의 속도는 광초퍼의 구동 전압을 변화시켜 조절할 수 있도록 하였다. 광초퍼에서 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.

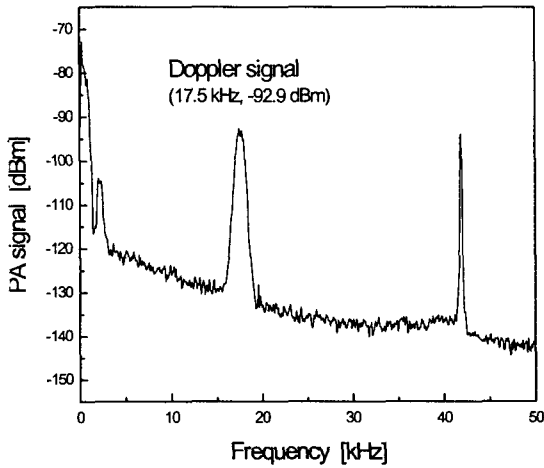


그림 3. 레이저 공진기 속에 설치한 콘덴서 마이크를 이용하여 얻은 광음향 신호.

Fig. 3. Typical example of a photoacoustic signal obtained from the condenser microphone in the laser resonator.

회전원판에 부딪힌 레이저광은 원판표면에서 산란되어 도플러 이동된 광의 일부가 레이저공진기로 재입사되어 레이저 그유의 광주파수와 혼합이 일어난다. 두 개의 다른 광주파수의 혼합은 레이저 공진기 속의 광을 차주파수로 변조시킨다. 변조된 광은 광음향효과에 의해서 미세한 압력변화로 나타나므로 그림 2의 콘덴서 마이크 양단에 전위차로 나타나게 되고, 여기에서 직류값을 커패시터를 사용하여 제거한 뒤 다이내믹 신호 분석기(SRS: SR785)를 사용하여 도플러 주파수의 변화를 측정하였다. 그림 3은 본 실험 장치로 측정된 대표적인 도플러 신호의 예이다. 그림에서 17.5 kHz의 도플러 주파수를 확인할 수 있고, 옆에 42 kHz의 고전압 발생기에서 발생하는 스위칭 주파수를 볼 수 있다. 고전압 발생기는 기본 스위칭 주파수 외에 연속적으로 고조파를 발생시키고 있음을 확인하였다. 도플러 신호의 선폭이 전원 공급기에서 발생하는 스위칭 주파수의 선폭보다 넓게 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 이 현상은 회전판의 불균일로 인한 표면의 떨림이 발생된다. 이는 산란광의 크기와 위상에 미세한 영향을 주게 되어^[12] 도플러 신호의 선폭이 확대된 것으로 추측된다. 도플러 신호 선폭의 확대는 측정 정밀도 및 반복도에 부정적 영향을 주는 반면에 물체 표면의 상태에 의해서 선폭이 변화되는 현상은 물체의 표면상태를 연구하는 용도로 적용이 가능할 것이다.

회전원판의 속도 변화에 따른 도플러 주파수의 변화를 관찰하기 위하여, 원판에 대한 레이저의 입사각 θ 를 임의의 각도로 고정한 상태에서 원판의 회전속도를 변화시켰다.

같은 실험을 레이저 입사각도를 5회 바꾸어 가면서 측정하였다. 원판의 속도에 따른 도플러 주파수의 변화는 그림 4와 같다. 원판의 마찰에 의한 회전속도의 불균일을 보완하기 위해서 각 지점의 측정값은 신호 분석기의 평균화 기능을 사용하여 12회 평균값을 사용하였다. 그림 4에서 실선은 식 7을 사용하여 계산한 값이고, 각 점들은 측정값이다. 레이저의 파장이 10.59 μm 일 때 식 7에 따른 도플러주파수와 측정값 사이에는 최고 5%의 오차가 발생하였다. 이는 레이저광이 원판에 입사되는 각을 측정할 때 발생한 오차와 회전체의 회전속도 불균일에 의한 것으로 추정된다.

그림 5는 원판의 회전속도 v 는 임의의 값으로 고정된 뒤, 레이저광의 원판에 대한 입사각 θ 를 변화시키면서 도플러 이동된 주파수 ν_D 를 측정하였다. 임의의 회전속도를 선정하여 측정된 결과는 식 7과(그림 5에서 실선) 일치함을 보여준다.

기체 내에서 발생하는 광음향효과에 의한 압력변화의 최대 및 최소값은 $\tau_{th} \gg 1/\nu \gg \tau_{rr}$ 로 보고 되었다^[11]. τ_{th} 는 열이완 시간으로 수초 정도의 시간이고, τ_{rr} 은 분자가 여기되었을 때 비방사 수명으로 $10^{-6} \sim 10^{-9}$ 초이다. 따라서 광음향효과로 측정 가능한 최고 주파수는 수 MHz로 예상된다.

본 실험에서는 상용으로 사용되는 대역폭이 약 20 kHz인 저가의 콘덴서마이크를 사용하였는데, 광음향효과에 의한 차주파수 검출 방법으로 최고 34 kHz까지의 차주파수를 측정할 수 있었다. 즉 사용된 콘덴서 마이크의 주파수 특성에 의해서 측정주파수의 한계가 결정되었다. 본 방법에서 최고 측정 가능주파수를 더 높이기 위해서는 넓은 대역폭을 가진 콘덴서 마이크 혹은 PZT로 제작된 음향센서를 사용하거나, 전원공급기에서 발생하는 고조파, 방전의 불균일에서 발생하는 잡음, 전극에서 발생하는 잡음 등을 극복하는 방법에 관한 연구가 필요하다.

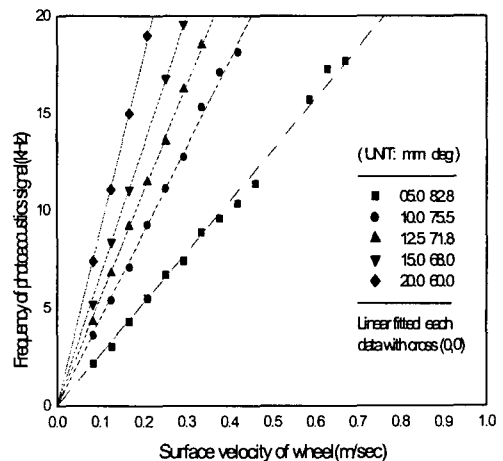


그림 4. 피측정 물체의 속도 변화에 따른 도플러 주파수 변화, 실선은 식 7을 사용하여 계산한 값.

Fig. 4. Measured Doppler frequency as a function of the object velocity component. The lines were calculated from Eq. (7).

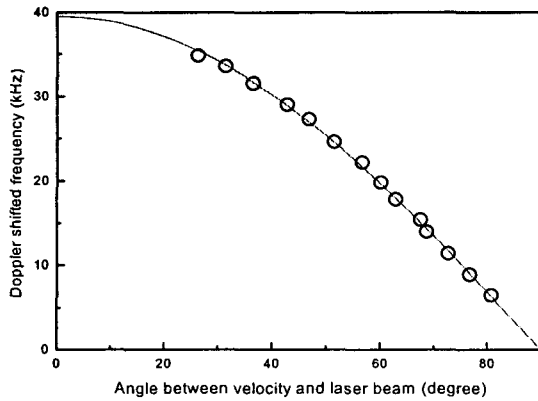


그림 5. 피측정 물체에 입사되는 측정광의 입사각 변화에 따른 도플러 주파수 변화. 실선은 식 7을 사용하여 계산한 값.

Fig. 5. Measured Doppler frequency as a function of the angle between the light beam direction and the velocity of the object. The line was calculated from Eq. (7).

4. 결 론

본 논문에서는 이산화탄소 레이저를 사용하여 회전체의 회전속도를 측정하기 위하여 산란광의 되먹임을 이용한 간단한 구조의 LDV를 구성하여 평가하였다. 레이저광을 운동하는 물체에 조사할 때 발생하는 산란광의 일부를 레이저 공진기에 입사시켜 본래의 광주파수와 자체혼합 하였다. 광의 자체혼합은 광음향효과에 의해서 공진기 속의 미세한 압력변화가 도플러 변이 주파수로 변조되었다. 변조된 주파수는 회전체의 회전속도에 비례하므로 레이저 공진기 속의 압력 변화의 주파수를 관찰함으로써 물체의 속도를 측정하였다. 또한 물체의 속도와 물체에 대한 레이저광의 입사각을 가변 하면서 측정한 도플러 주파수 변이 값이 설정한 이론과 잘 일치함을 확인하였다. 레이저의 파장이 10.59 μm 일 때 설정한 이론값과 측정값 사이에는 최고 5%의 오차가 있었다. 본 방법을 적용하여 지금까지의 번잡한 액체질소냉각형 MCT 검출기를 사용하지 않고, 간단한 구조로 적외선 영역에서의 차주파수 검출이 가능하였고, 최고 34 kHz의 차주파수를 측정할 수 있었다. 앞으로 압력 변화 검출기와 신호처리 부분을 개량하면 최고 측정가능한 차주파수를 높일 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 2002년도 과학기술부의 국제공동연구지원사업(M6-0142-00-0007)에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. M. J. Rudd, J. Phys. E 1, 723(1968)
2. S. Shimohara, A. Mochizuki, H. Yoshida, and Masao Sumi, Applied Optics, 25, 9, 1417(1986)
3. James H. Churnside, Applied Optics, 23, 1, 61(1984)
4. Jong-Woon Choi, Young-Pyung Kim, and Youn-Myung Kim, Vol. 68, No. 12, 4623-4624, Review of Scientific Instruments, Dec. (1997)
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, Applied Optics, 14, 1(1975)
8. A. L. S. Smith and S. Moffatt, Optics Comm., 30, 2(1979)
9. Jitendra P. Gupta and Rajendra N. Sachdev, Appl. Phys. Lett. 36(12), 960 (1980)
10. Kirk H. Michaelian, "Photoacoustic Infrared Spectroscopy," WileyInterscience, 168 (2003)
11. A. Thony and M. W. Sigrist, Infrared Phys. Technol. Vol. 36, No. 2, 585 (1995)
12. H. W. Jentink, F. F. M. de Mul, H. E. Suichies, J. G. Aarnoudse, and J. Greve, Vol. 27, No. 2, 379(1988)

저 자 소 개



최 종 운 (崔鐘云)

1959년 2월 16일생. 단국대학교 전자공학과 학사, 석사, 박사. 1985~1988: 해태 전자중앙연구소 연구원. 1988년~2000 한국표준과학연구원 레이저그룹, 연구원, 선임연구원, 책임연구원. 2000년~현재 호남대학교 정보통신공학과 교수
E-mail : oon@honam.ac.kr



유 문 종 (劉旻鍾)

1957년 10월 14일생. 1983년 전남대 물리학과 졸업. 2002년 호남대 대학원 졸업(공학). 현재 호남대 연구원.
E-mail : caobr@chol.net