

## 되먹임 효과를 이용한 회전체의 속도측정

이병욱

경희대학교 전자·정보학부

황대석

목원대학교 전자공학과

최종운

호남대학교 정보통신공학부

김용평

경희대학교 전자·정보학부

(2000년 5월 2일 받음, 2000년 8월 5일 수정본 받음)

반도체 레이저 광원의 되먹임 효과를 이용하여 레이저 도플러 속도계를 구현하였다. 움직이는 물체의 표면에 조사된 레이저 광이 산란될 때 산란광은 물체의 속도에 비례한 도플러 변이를 일으킨다. 산란광의 일부를 레이저 공진기 내부로 입사시키면 공진기 안에서는 발진광과 입사된 산란광이 혼합되어 두 개 광 사이의 차주파수로 레이저 전류가 변조되는 원리를 이용한 것이다. 본 실험에서는 원형 회전체에 레이저를 조사할 때 발생하는 산란광을 사용하여 회전 속도와 도플러 편이 주파수와와의 관계를 비교하였다. 또한 회전면에 대한 레이저 입사 각도에 따른 도플러 주파수의 변화를 관찰하였다. 이로부터 도플러 주파수와 회전체 각속도 사이의 비례 관계 및 측정광의 입사 각도와의 선형성을 확인하였다.

OCIS codes : 120.7250, 170.3340.

### I. 머리말

레이저광을 운동하는 물체나 매질 중의 입자에 조사할 때 발생하는 산란광의 주파수가 조사광의 주파수로부터 이동하는 현상을 도플러효과라 부른다. 이러한 현상을 이용한 레이저 도플러 속도계(Laser Doppler Velocimeter, LDV)<sup>[1]</sup>는 비접촉 방법일 뿐만 아니라 시간적 공간적 분해능이 매우 우수하다. LDV에는 크게 나뉘서 두 가지 방법이 개발되어 있다. 하나는 마이켈슨 간섭계 방식이며, 다른 하나는 되먹임(Self-Mixing)<sup>[2]</sup> 방식이다. 마이켈슨 간섭계 방식은 되먹임 방식에 비하여 많은 광학부품이 필요하고, 정밀한 광학 정렬 장치들을 필요로 한다. 반면 되먹임 방식은 레이저 공진기의 고유 주파수와 도플러 이동된 산란광을 공진기 속에서 자체 혼합하여 발생한 차주파수를 레이저 공진기 뒤쪽에 설치한 광검출기로 측정하므로 마이켈슨 간섭계 방식에 비하여 간단한 장치로 속도계를 구성할 수 있다.

운동하는 물체의 표면에서 산란된 광은 도플러효과에 따른 주파수 변이가 발생하게 되므로, 주파수 변이된 산란광의 일부를 레이저 공진기 속으로 되먹임시키면, 레이저 공진기 속에서는 되먹임된 산란광과 레이저 고유의 발진 주파수 사이의 간섭이 발생하게 되며, 두 개 광주파수 사이의 차주파수와 같은 주파수로 레이저 출력이 변조된다. 이와 같이 되먹임 방식 도플러 속도계는 마이켈슨 간섭계 방식에 비하여 장치가 간단하므로 쉽게 도플러 속도계를 구성할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 레이저광의 주파수가 움직이는 물체에 의해 도플러 주파수 변이 되었을 때, 그 변이량을 레이저의 광전류 효과를 이용하여 검출하는 방법으로 회전체 속도를 측정하였다. 움직이는 물체에 의해 주파수 변이된 산란광의 일부를 레이저 다이오드(Laser Diode, LD) 공진기에 되먹임시키면, 공진기 속에서는 산란광과 레이저 고유의 발진 광이 혼합된다. 이때 공진기 속에서는 두 주파수간의 차주파수로 레이저광의 세기가 변조되고, 광전류 효과에 의해서 광의 세기에 따른 임피던스 변화<sup>[3]</sup>가 발생한다. 따라서 임피던스 변화에 따른 레이저 공진기에 흐르는 전류 변화를 측정하면 도플러효과에 의해 변이된 주파수 값을 측정할 수 있다.

### II. 측정 원리 및 해석

그림 1에 도플러효과 개념 도를 보인다. 움직이는 물체에 부딪혀 산란되는 레이저광의 주파수는 도플러효과에 의해서 물체의 속도에 비례하는 주파수 변이를 발생시킨다.<sup>[4]</sup> 속도  $\vec{v}$ 로 움직이는 물체의 위치를  $\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \vec{v}t$ 와 같이 표시할 때, 점  $\vec{r}$ 에서의 전기장의 크기가  $E_0(r)$ , 각주파수가  $\omega_0$ , 주파수 벡터가  $k_i$ 인 단색 레이저광

$$\vec{E}_i = \vec{E}_0(\vec{r}) \exp[i(k_i \cdot \vec{r} - \omega_0 t)] \quad (1)$$

을 조사하면, 물체에서 산란된 레이저광의 전기장은 다음과 같이 주어진다.

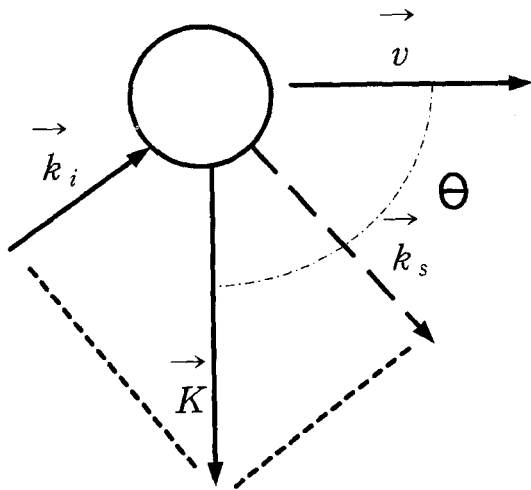


그림 1. 움직이는 입자의 속도 벡터에 대한 입사광과 산란광의 도식 표현.

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

여기에서 A는 산란된 레이저광의 크기를 나타내는 상수이고, f(r)는 산란체를 통과하면서 발생한 후방산란의 다중 산란과 흡수에 따른 크기의 감쇠를 나타내며,  $\vec{k}_s$ 는 산란된 레이저광의 주파수 벡터이다.

계산의 편의를 위해서 산란벡터를  $\vec{K} = \vec{k}_s - \vec{k}_i$ 와 같이 정의하여 식 (2)에 적용하면

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

와 같이 된다. 여기에서

$$\omega = \omega_0 + \omega_d$$

$$\omega_d = \vec{K} \cdot \vec{v} = |\vec{K}| |\vec{v}| \cos \theta \quad (4)$$

이다.  $\theta$ 는 그림 1에서 산란벡터  $\vec{K}$ 와 물체의 속도벡터  $\vec{v}$  사이의 각도이다. 식 (3)과 식 (4)에서 f(r)는 레이저로 되먹임 되는 산란광의 일부를 나타낸다. 따라서  $|\vec{K}|$ 와  $\theta$ 를 알고 있기 때문에 도플러 변이  $\omega_d$ 를 측정하면 속도  $|\vec{v}|$ 를 구할 수 있다. 이때 검출기가 광원 쪽에 있는 후방 산란의 경우에는 레이저 광과 산란광이 반대방향이므로  $\vec{k}_i = -\vec{k}_s$ 이다. 따라서 식 (4)는 다음과 같이 간단하게 표시 할 수 있다.

$$\omega_d = 4\pi |\vec{v}| \cos(\theta) / \lambda \quad (5a)$$

$$|\vec{v}| = f_d \lambda / (2 \cos(\theta)) \quad (5b)$$

여기에서  $\lambda$ 는 레이저광의 파장이며  $\theta$ 는 물체의 속도와 입사 레이저광 방향 사이의 각도이다. 따라서 레이저광의 파장  $\lambda$ 와 입사각  $\theta$ 는 알고있는 값이므로, 도플러 주파수  $f_d$ 를 측정하면 물체의 속도  $\vec{v}$ 를 측정 할 수 있다.

그러나 도플러 주파수  $f_d$ 의 측정은 그리 간단하지만은 않다. 물체가 아무리 고속으로 움직이더라도 발생하는 도플러 변이 주파수는 입사광의 주파수에 비하면 대단히 작기 때문에 현재 가능한 광 검출기를 사용하여 도플러 변이 주파수를 직접 측

정하는 것은 불가능하다. 따라서 다른 간접적인 방법이 사용 되어야 한다. 간접적인 방법으로 전자회로에서 많이 사용하는 두 개 주파수간의 합과 차를 구하는 혼합기술을 광에서도 똑 같이 적용할 수 있다. 즉, 미소한 주파수차를 갖는 두 개의 코히런트 평면광이 광 검출기에 입사되면 주파수 혼합이 일어난다. 이때 합주파수는 검출기가 검출할 수 있는 주파수 범위를 벗어나므로 차주파수만 검출기에 검출된다. 차주파수를 측정하는 방법으로 레이저 공진기 속에 자체혼합을 하여 차주파수를 측정할 수 있다. 즉, 공진기 자체의 광전류 효과를 이용하여 차주파수를 검출 할 수 있다. 공진기 내부의 출력변화는 임피던스의 변화로 인해 전류의 변화가 생기므로 이 전류를 측정함으로써 도플러 이동된 주파수를 측정할 수 있다.

광전류 효과에 따른 전류의 변화에 대한 설명은 다음과 같다. 레이저 공진기 속의 전기장 세기  $\vec{E}_L$ 을 다음과 같은 근사식

$$\vec{E}_L = \vec{E}_i \exp[i\omega_0 t] \quad (6)$$

이라고 할 때, 도플러 이동된 주파수를 갖는 산란광  $\vec{E}_s$ 가 공진기 속으로 입사되어 레이저 고유의 발진광과 자체 혼합되면 다음과 같은 전류 I(t)<sup>[5]</sup>가 흐르게 된다.

$$I(t) = B_0 |\vec{E}_L + \vec{E}_s|^2 = B_0 [|\vec{E}_L|^2 + 2\vec{E}_L \cdot \vec{E}_s + |\vec{E}_s|^2] \quad (7)$$

여기서  $B_0$ 는 임의의 상수이다. 공진기 속의 전기장의 세기가 산란광의 전기장 세기보다 훨씬 크므로 ( $E_L \gg E_s$ ) 식 (7)에서 마지막 항은 무시할 수 있다. 이를 이용하여 식 (7)의 근사식을 다시 써보면

$$I(t) = B_0 [|\vec{E}_L|^2 + 2\vec{E}_L \cdot \vec{E}_s] = I_0 + \delta I(t) \quad (8)$$

와 같다. 여기에서  $\delta I(t)$ 는 호모다인 비트(Homodyne Beat)로 발생한 광전류이다. 다시 정리하면,

$$\delta I(t) = 2B_0 \vec{E}_L \cdot \vec{E}_s = 2B_0 \vec{E}_L \cdot \vec{E}_o f(r) \cos[4\pi(\cos \theta)t/\lambda] \quad (9)$$

와 같다. 따라서 공진기 속에는 식 (5a)와 같은 주파수의 광전류 효과에 의한 전류가 흐르게 되므로 도플러 이동된 만큼의 차주파수를 검출 할 수 있다.

### III. 실험 및 결과

본 실험의 측정 방법을 검증하기 위하여 회전판의 속도변화에 따른 도플러 주파수의 변화를 관찰하였다. 회전판에 대한 레이저의 입사각  $\theta$ 를 임의의 각도 60°로 고정한 상태에서 회전판의 회전속도를 변화시켰다.

산란광의 되먹임을 이용한 LDV의 구성 및 실험 장치는 그림 2와 같다. 본 실험에 사용한 Laser Diode는 SHARP사의 LT025PD0이다. 문턱 전류는  $I_{th} \cong 54.1$  mA 이며  $I_{op} \cong 102.2$  mA이다.

파장은 785 nm이며 출력은 30 mW이고 단일모드로 동작하

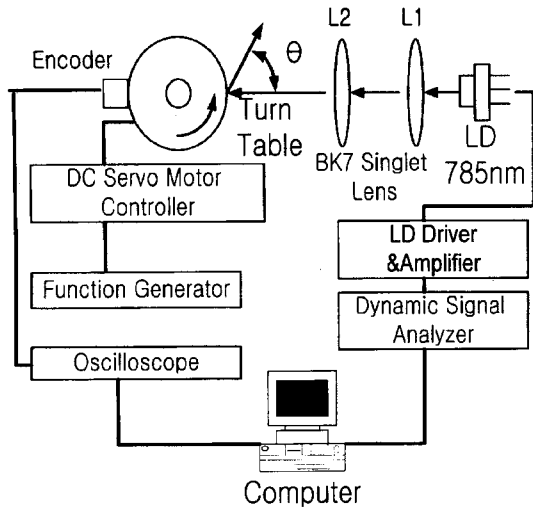


그림 2. 자기 혼합 방식의 LDV 시스템 구성도.

는 특성을 갖는다. 실험에서는 문턱 전류 54.1 mA 보다 1.11 배 많은 전류를 흘려서 반도체 레이저를 발진 시켰다. 여기에서 반도체 레이저의 광출력은 3.02 mW이고, 이를 집속한 뒤의 광 세기는 2.08 mW이다. 집속 렌즈를 통하여 나온 광의 세기는 앞단에서 측정된 출력과 같은 손실 없는 출력을 가졌다. 렌즈는 각각 초점 거리 100 mm와 10 mm의 특성을 갖는 평면-볼록렌즈 2개와 볼록렌즈 1개를 사용하였다. 회전체 앞에 설치한 렌즈는 회전체 면에 광을 집속하면서 회전체 면에서 산란된 광을 모으기 위해서 평면-볼록렌즈 두 개를 겹쳐서 볼록렌즈로 만들었으며 100 mm의 초점 거리를 50 mm로 줄였다. LD와 집속렌즈와의 간격은 10 mm로 하였으며 렌즈와 렌즈 간격은 900 mm 거리를 유지했다. 그리고 집속렌즈와 원형 회전체와의 간격은 35 mm에서 초점이 모였다. 회전판은 직경이 7 cm이고 폭이 10 mm인 알루미늄 회전판을 직류 모터에 부착하여 회전시켰다. 반사율을 높이기 위하여 회전판의 측정면에 흰색 종이를 부착하였다. 회전판의 속도는 신호발생기(Function Generator)와 연결된 직류 서보 모터 제어기(DC Servo Motor Controller)를 사용하여 모터의 속도를 제어하였다. 모터에 장착된 엔코더(Encoder)를 이용하여 여기에서 발생하는 펄스의 주기를 오실로스코프로 관찰하였으며 회전판의 회전 속도를 계산하였다. 도플러 변이 주파수로 변화하는 레이저 다이오드의 전류 변화는 스펙트럼 분석기(Spectrum Analyzer: HP8558B)로 관찰하였고, 측정된 주파수와 엔코더를 통해 얻은 회전판의 속도를 서로 비교하였다.

그림 3은 회전판에 대한 레이저광의 입사각  $\theta$ 를 60°로 고정시킨 뒤, 회전판의 회전속도 10 mm/s에서 측정된 도플러 변이 주파수의 스펙트럼이다. 여기서 주목 할 것은 단 하나의 도플러 주파수뿐만 아니라 이 주파수의 정수 배에 해당하는 주파수에서 같은 도플러 주파수가 발생하는 현상이다. 이와 같이 주기적으로 반복되는 도플러 주파수는 레이저에 주입되는 전류의 크기와 레이저와 회전체간의 거리와 상관관계를 갖기 때문이다.<sup>16)</sup> 도플러 주파수의 조화파에 대한 이론적인 설명은 후방 산란된 전기장에 따른 레이저 강도의 비선형 의존성에서

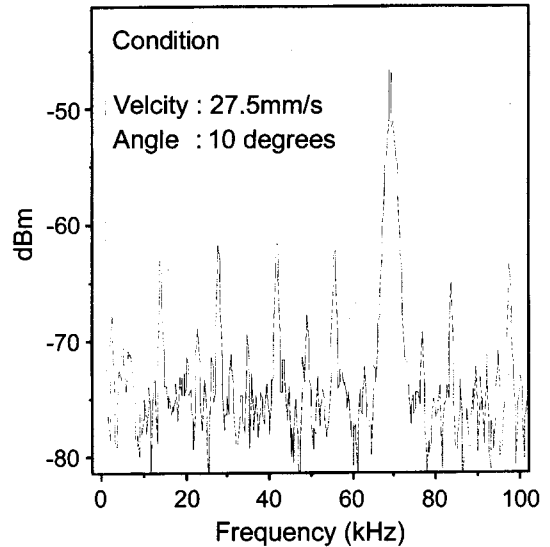


그림 3. 레이저 다이오드의 자기혼합효과에 의한 도플러 신호의 전형적인 예(레이저 출력 :  $P = 3$  m, 레이저광의 입사각도 :  $\theta = 10^\circ$ , 선 속도 :  $v = 27.5$  mm/s).

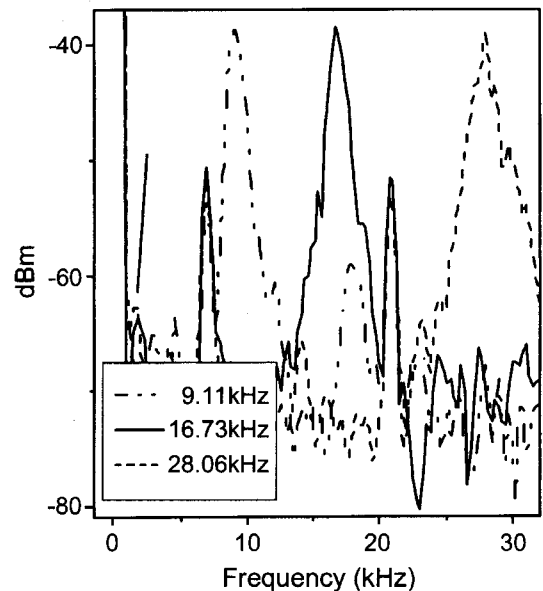


그림 4. 도플러 신호의 변화 예제.

발견할 수 있다.

그림 4는 3개의 각각 다른 도플러 주파수를 연속적으로 보여줌으로써 물체의 속도에 따른 도플러 주파수의 움직임을 보여주고 있다.

그림 5는 각도를 60°로 고정한 후, 회전체의 속도를 변화시키기 위해 신호 발생기의 주파수 간격을 50 Hz 단위로 15 Hz에서 1400 Hz까지 변화시킬 때 발생한 도플러 신호의 주파수를 측정된 그림이다. 회전체의 낮은 속도로 인한 기계적인 불안정성을 고려하여 30회씩 측정된 값을 평균하였다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 도플러 신호의 주파수는 식 (5)와 같이 회전체의 회전 속도와 비례관계를 알 수 있으며, 본 실험 장치에서 발생한 실험 값과 계산 값 사이의 상대오차는 최고

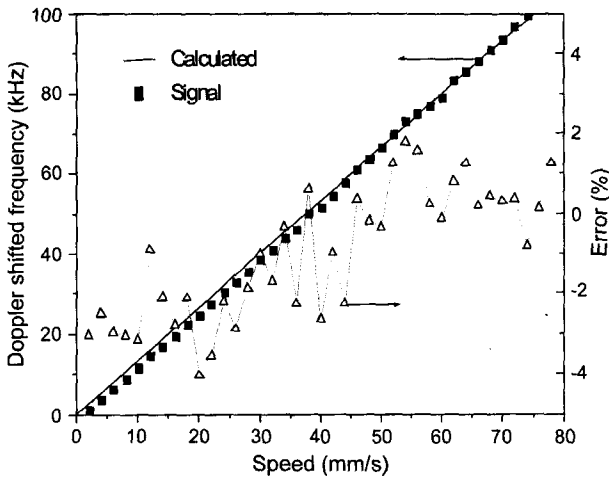


그림 5. 회전체의 속도변화에 따른 도플러 신호의 측정값과 계산값 (입사각  $\theta = 60^\circ$ ), (실선: 식 (5)를 사용하여 계산한 값, 사각형: 스펙트럼 분석기를 사용하여 측정한 값, Speed: 회전체면의 속도를 전기적인 방법으로 측정한 속도).

$\pm 4\%$  오차율을 보여준다. 이와 같은 오차는 회전체가 저속으로 회전할 때 발생하는 기계적인 불안정성으로 인하여 발생하는 것으로 추측된다. 이는 그림 5에서 회전체의 속도가 45 mm/s 이상이 되면 오차가  $\pm 2\%$  정도로 감소함을 보면 확인할 수 있다. 그러나 최근 상용으로 판매되고 있는 Dual Beam LDV의 오차율이  $\pm 0.5\%$  전후임을 감안하면 비교적 큰 오차값을 갖는 것을 알 수 있다. 이와 같은 오차는 앞으로 정밀한 신호처리 연구를 통하여 개량할 수 있을 것으로 생각된다.

그림 6은 회전체의 속도를 32 mm/s로 고정을 시킨 뒤, 회전체의 산란되는 면에서의 운동벡터와 입사되는 레이저 사이의 각도 변화를 주면서 도플러 주파수의 변이를 측정 한 것이다. 식 (5)에 나타난 것과 같이 각도에 따른 도플러 주파수의 변화도 선형적인 관계임을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 반도체 레이저를 사용하여 자체혼합 방식의 LDV를 구성하고 회전체의 회전 속도를 측정하였다. 반도체 레이저에서 발생된 레이저광을 회전체에 조사시킬 때 회전체 표면에서 발생하는 도플러 주파수 변이된 산란광의 일부를 발진광과 똑같은 경로로 반도체 레이저에 되먹임 시켰다. 되먹임

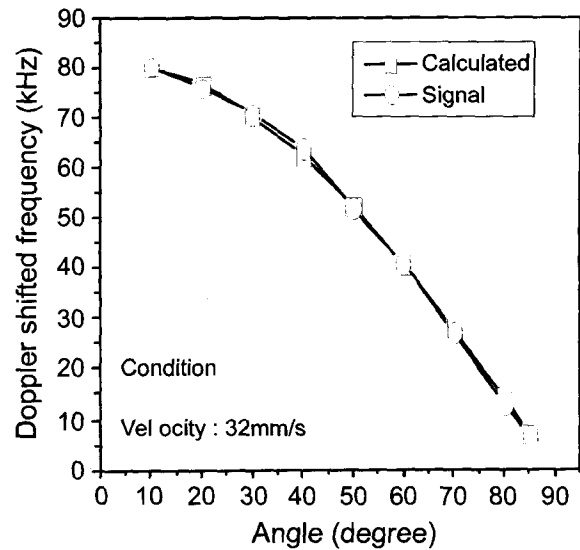


그림 6. 입사 광의 각도에 따른 도플러 신호의 측정값과 계산값 (선 속도  $v = 32 \text{ mm/s}$ ), (Calculated: 식 (5)를 사용하여 계산한 값, Signal: 스펙트럼 분석기를 사용하여 측정한 값).

된 산란광은 공진기 내부에서 레이저 고유의 광주파수와 자체혼합되었다. 자체 혼합에 의해서 레이저 공진기 속에서 발생하는 광세기의 변화 주파수는 도플러 변이된 주파수와 같았고, 도플러 변이 주파수는 물체의 회전속도에 비례함을 확인하였다. 또한 회전체에 입사되는 광의 입사각도를 변화시킬 때 발생하는 도플러 변이 주파수도 계산한 값과 일치함을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

- [1] S. Shinohara, A. Mochizuki, H. Yoshida, and M. Sumi, Appl. Opt. **25**, 1417 (1986).
- [2] R. Lang and K. Kobayashi, IEEE J. Quantum Electron. **QE-17**, 44 (1981).
- [3] Jong-Woon Choi, Young-Pyung Kim, and Youn-Myung Kim, US PATENT, 08.689, 269 (1996).
- [4] T. Tanaka, G. B. Benedek, Appl. Opt. **14**, 1 (1975).
- [5] A. L. S. Smith and S. Moffatt, Opt. Comm. **30**, 2 (1979).
- [6] H. W. Jentink, F. F. M. de Mul, H. E. Suiches, J. G. Aarnoudse, and J. Greve, Appl. Opt. **27**, 383 (1988).

## Measurement of angular velocity using the self-mixing effect of semiconductor laser

Byung-Wook Lee

*School of Electronics and Information, Kyunghee University, Yongin 449-701, Korea*

Dae-Suck Hwang

*Department of Electronic Engineering, College of Engineering, Mokwon University, Taejeon 302-729, Korea*

Jong-Woon Choi

*Department of Information & Communications Engineering, Honam University, Kwangju 506-714, Korea*

Yong-Pyung Kim

*School of Electronics and Information, Kyunghee University, Yongin 449-701, Korea*

(Received May 2, 2000, Revised manuscript received August 5, 2000)

We have constructed laser Doppler velocimetry system using self-mixing effect with a semiconductor laser. This technology is based on the frequency mixing phenomena which occurs when light scattered back from the moving object into the laser cavity interferes with light inside the laser. We have compared the value of Doppler shifted frequency with the velocity variation of the wheel. Frequency dependence on the angle between the moving direction of rotating aluminum wheel and the incident beam also have been proved. As an illustration of the performance of the velocimeter, velocity measurements of a rotating disk are described. Doppler signal shows a good linear relationship with velocity of rotating disk.

*OCIS codes* : 120.7250, 170.3340.