

논문 94-3-2-08

## 레이저 다이오드의 자기혼합 효과를 이용한 조직혈류 측정에 관한 연구.

高漢雨\*

### A Study on the Measurement of Tissue Blood Flow by the Self-Mixing Effect of Laser Diode.

Han-Woo Ko\*

#### 요 약

레이저 다이오드의 자기혼합 효과를 이용한 조직혈류측정을 위한 기초연구를 하였다. 이동물체로 인한 레이저 도플러 신호를 자기혼합 효과에 의해 검출하였으며, 피검자의 인지로부터 비관혈적으로 조직의 혈류 변화를 측정할 수 있었다. 이동 물체의 이동속도가 변함에 따라 자기혼합 효과에 의한 도플러 편이 주파수는 선형적으로 변하였으며, in-vivo 실험의 인지에서 측정된 도플러신호는 운동후의 주파수가 운동전의 주파수 보다 높았으며, 이는 운동생리학적인 결과와도 일치하였다.

#### Abstract

This paper describes the measurement of tissue blood flow by the the self-mixing effect of laser diode. A Laser doppler signals due to the moving object and the tissue blood flow were detected by the self-mixing effect of laser diode. The Doppler shifted frequency was changed linearly with the driving frequency of moving object and was increase after the exercise. The results of in-vivo experiment were consistent with the result of exercise physiology.

#### 1. 서 론

Laser doppler 기법에 의한 인체 피부혈류 계측은 1975년 Stern에 의해 실용적 가능성이 제시된 이후 활발히 연구가 진행 되어왔으며, 최근에는 마취과, 성형외과, 피부과를 비롯한 수개과에 응용되고 있으며, 새로운 응용 분야 및 측정법에 관한 연구가 이루어지고

있다.<sup>[1-7]</sup>

Nilsson은 Doppler shift된 신호의 power spectral density의 1차 moment가 이동 적혈구의 농도와 선형적인 관계를 갖는다는 가정 하에 조직의 혈액 관류는 이동 혈세포의 농도와 평균 혈세포 속도의 곱에 비례한다고 가정하고 differential detection 기법을 이용한 Laser Doppler 혈류계 (Laser Doppler Blood Flowmeter : LDF)를 발표하였다.<sup>[5]</sup>

한편 Mul 등은 지금까지의 연구자들과 달리 광원으로 He-Ne laser 대신 반도체 레이저 (파장 840 nm)와, 센서를 하나의 probe에 내장시킨 형태의 혈류계를 발표하였으며, Jentink 등은 Monte Carlo simulation을 이용하여 LDF 출력의 optical probe의 구조와 피부 조직 내의 이동 입자에 의한 다중 산란에 대한 의존

\*正會員 : 韓國標準科學 研究院 계측시스템 Gr.  
(Korea Research Institute of Standards and Science  
Instrumentation & System Gr.)

<접수일자 : 1994년 1월 18일>

※이 연구는 과학기술처의 특정연구개발 연구비의 지원에 의해 이루어졌음.

성, 조사 beam과 detector간의 거리에 따른 측정 깊이의 차이, 다중산란의 정도와 LDF 출력과의 관계와 퍼부조직내의 광의 세기 분포를 밝히고 기존의 LDF의 문제점을 지적하였으며, 이를 근거로 더욱 정확한 조직혈류 측정의 가능성을 제시하였다.<sup>[8]</sup>

최근 S. Shinohhara 등은 지금까지와는 달리 레이저 다이오드 자체 내에 광출력을 모니터링하기 위해 내장된 광 검출기에서의 자기혼합효과를 이용하여 물체의 이동 속도를 측정하는 방법을 발표하였다.<sup>[8-9]</sup> 이것은 이동 물체의 속도 뿐만 아니라 방향까지 알 수 있으며, 종래의 측정법에 비하여 광축의 배열이나 별도의 센서가 불필요한것 등의 시스템의 구성이 대단히 간단한 장점을 가지고 있으므로 다양한 분야의 응용이 기대되고 있다. Koelink 등은 광섬유를 이용하여 조직의 혈류속도를 측정하기 위한 기초적인 연구 결과를 발표하였다.<sup>[10]</sup> 그러나 그들은 빛을 이동물체에 조사하기 위하여 광파이버와 광 집속을 위한 소형 렌즈 등을 사용하였으므로, 광축의 조정이 필요로 하는 등 측정 시스템의 구성이 복잡하였다.

본 연구에서는 레이저 다이오드의 자기혼합 효과(self-mixing)를 이용하여 조직의 혈류속도 뿐만 아니라 혈류량도 동시에 측정할 수 있는 측정법을 연구하기 위한 기초 연구로서 광섬유와 렌즈 등을 사용하지 않고 single mode 반도체 레이저 자체를 광원과 반사광 검출용 센서로 이용한 시스템을 구성하고 이를 이용하여 이동 물체의 속도에 따른 도플러 주파수의 변화를 측정 및 비교하여 측정 상의 문제점을 검토하고, 운동 전후의 인체 조직의 혈류변화로 인한 도플러 스펙트럼 변화의 측정 가능성을 연구하였다.

## 2. 레이저 다이오드의 자기혼합효과.

레이저 다이오드(laser diode : LD)의 자기혼합효과는 주로 레이저 발진의 안정도와 발진 주파수 대역의 협대역화를 조사하기 위해 연구되어 왔으며, 자기혼합효과란 조사된 광이 이동 물체로부터 반사되어 광의 일부가 레이저 공진기내로 되돌아 와서 레이저 내의 원래의 발진 파형과 혼합되어 레이저의 출력이 변조되는 현상을 말한다.

이러한 LD의 자기혼합효과는 그림 1과 같은 외부 광학적 계환을 갖는 LD의 공진기에서 발생될 수 있다.

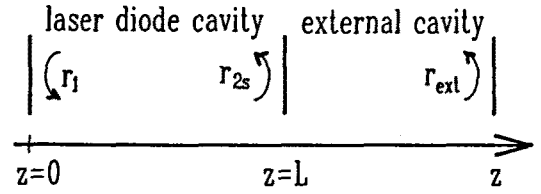


그림 1. 외부 광 계환을 갖는 레이저 다이오드 공진기의 구조.

Fig. 1. Schematic arrangement of laser diode cavity with external optical feedback.

그림 1에서  $r_1$ 과  $r_{2s}$ 는  $z=0$  및  $z=L$ 에 있는 LD facet의 반사계수이며,  $r_{2ext}$ 는 외부 공진기의 반사계수이다. 만약  $z=L$ 에서의 실효 반사계수를  $r_2$ , 광주파수를  $\nu$ , 길이가  $L_{ext}$ 인 외부공진기 까지의 왕복지연시간을  $\tau_{ext}$ 라 하면  $r_2(\nu)$ 는 식(1)과 같이 된다.<sup>[11]</sup>

$$r_2(\nu) = r_{2s} + (1 - |r_{2s}|^2) r_{2ext} \exp(-j2\pi\nu\tau_{ext}) \quad (1)$$

$|r_{2ext}| \ll |r_{2s}|$  이므로 식(1)에서 외부공진기로 부터의 다중반사는 무시할 수 있다. 식(1)은 복소수 이므로 위상과 진폭의 항으로 다시 나타내면 식(2)와 같이 된다.

$$r_2(\nu) = |r_2| \exp(-j\phi_r) \quad (2)$$

레이저가 공진기 내에서 정제파 일때, 레이저는 위상 및 진폭기준을 만족하여야 하며, 위상조건에 대해서는 레이저 공진기 내의 왕복위상은 식(3)과 같이  $2\pi$ 의 정수배이어야 하며, 식(3)에서  $m$ 은 정수이며,  $\beta = 2\pi\nu\mu_e/c$ 로 정의되는 광파의 위상상수이다.

$$2\beta L + \phi_r = 2\pi m \quad (3)$$

$\beta$ 를 식(3)에 대입하면 식 (4)와 같이 된다

$$4\pi\mu_e\nu \frac{L}{c} + \phi_r = 2\pi m \quad (4)$$

진폭조건을 만족하려면 식(5)와 같이 공진기내에서의 광의 증폭과 손실은 같아야 한다.

$$r_1 |r_2| \exp[(g_c - \alpha_s)L] = 1 \quad (5)$$

여기서  $g_c$ 는 필요한 이득의 문턱값이며,  $\alpha_s$ 는 공진기 내의 모든 손실이다. 외부공진기로 부터의 광의 계환이 작고, 반사계수  $r_2$ 와  $r_{2ext}$ 가 양의 실수라면 식(5)

는 식(6)과 같이 나타낼수 있으며, 외부공진기에 대한 결합계수  $k$ 와 위상은 식(7), (8)과 같다.

$$|r_2| = r_{2s}[1 + k \cos(2\pi\nu\tau_{ext})] \quad (6)$$

$$k = \frac{r_{2ext}}{r_{2s}}(1 - |r_{2s}|^2) \quad (0 < K < 1) \quad (7)$$

$$\phi_r = k \sin(2\pi\nu\tau_{ext}) \quad (8)$$

광의 궤환이 있는 경우 즉 자기혼합의 경우는  $k \ll 1$  일때 식(4)로 부터 문턱값 이득 변화에 대한 식과 레이저 주파수 변화에 대한 식은 다음 식(9) 및 (10)과 같이 된다.

$$g_c - g_{th} = -\frac{k}{L} \cos(2\pi\nu\tau_{ext}) \quad (9)$$

$$\Delta\phi_1 = 2\pi\tau_L(v - v_{th}) + k(1 + \alpha^2)^{1/2} \sin(2\pi\nu\tau_{ext} + \arctan \alpha) \quad (10)$$

여기서  $g_c$ 는 컴파운드 레이저(compound laser) 공진기의 문턱값 이득이며,  $g_{th}$ 는 광궤환이 없을 때의 문턱값 이득이다.  $\Delta\phi_1$ 은  $2\pi m$ 에 대한 왕복위상의 변화를 나타낸다. 위의 식(10)은 왕복 위상변화  $\Delta\phi_1$ 의 함수로서 레이저의 주파수를 나타낸다. 반도체 레이저의 이득곡선은 이득 문턱값 이상에서는 거의 선형적으로 변하므로 LD의 광출력은 LD의 문턱전류와 구동전류의 함수로서 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = Q(I - I_{th}) \quad (11)$$

식(11)에서  $I$ 는 구동전류,  $I_{th}$ 는 문턱전류를 나타내며,  $Q$ 는 LD의 광출력-전류 특성에 따른 비례상수이다.

지금까지는 외부 공진기의 반사거울이  $L_{ext}$ 의 고정된 경우, 즉 고정된  $\tau_{ext}$ 를 가정하였으나 외부 공진기의 반사거울이 속도  $v$ 로  $z$ 축의 양의 방향으로 움직일 때의  $\tau_{ext}$ 는 식(12)와 같이 된다.

$$\tau_{ext} = 2(L_o + vt)/c \quad (12)$$

식 (12)에서  $L_o$ 는 시간 0에서 외부공진기로부터 레이저까지의 거리이며,  $t$ 는 시간이다. 위의 식(12)를 식(9)에 대입하면 자기혼합 조건하의 LD의 광출력 변동은 식(13)으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta P = g_c - g_{th} = -\frac{k}{L} \cos(4\pi\nu \frac{vt}{c} + 4L_o \frac{\nu}{c}) \quad (13)$$

출력신호로 부터 도플러 주파수를 구하기 위해서는 식(14)가 성립하여야 하며, 식(14)에서  $\Delta t$ 는 데이터의 측정간격,  $f_d$ 는 도플러 주파수,  $\lambda$ 는 레이저의 파장이다.

$$\Delta t \ll \frac{1}{f_d} = \frac{\lambda}{2v} \quad (14)$$

식(13)의 세기변화는 LD 하우징 내의 광다이오드를 이용하여 측정 할 수 있다.

### 3. 실험 및 결과 고찰

자기혼합형 레이저 도플러 현상을 이용하여 이동 물체의 속도를 측정하는 방법은 두 가지가 있다. 즉 laser diode(LD)의 외부에 있는 검출기로 검출하는 방법과 그림2와 같이 자기혼합에 의해 발생하는 LD 자체의 구동전류 또는 LD의 단자 전압의 변화를 검출하는 것이다.

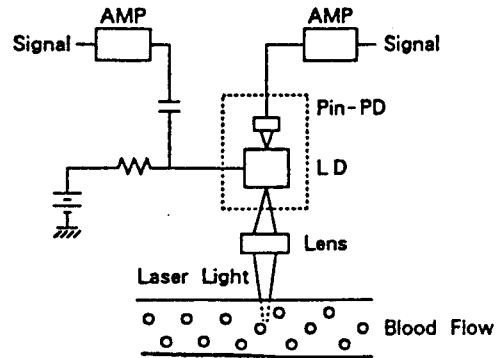


그림 2. 자기혼합효과를 이용한 LDF의 구성도.

Fig. 2. LDF with self-mixing effect.

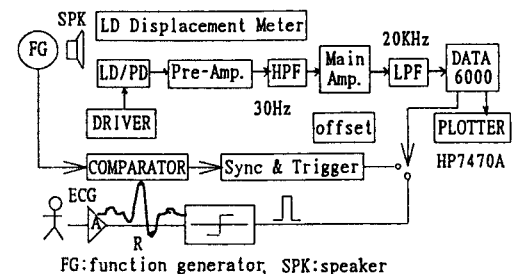


그림 3. 실험장치의 블록선도.

Fig. 3. Block diagram of experimental set-up.

본 연구에서는 그림 3과같이 레이저광을 직접 이동물체의 표면에 조사하고, 이로부터 반사된 광을 LD에 내장된 PIN PD(photo detector)를 이용하여 혼합된 신호를 검출하였다. 따라서 이 방법은 기존의 Michelson 간섭계형에 비하여 측정 시스템이 대단히 간단히 구성될 수 있다.

사진 1은 실험 시스템의 구성을 나타낸다.



사 진 1. 구성된 측정 시스템  
Photo 1. Experimental set-up.

광원으로는 출력 5mW, 파장 785nm인 Hitachi사의 HL7836G single-mode 레이저 다이오드를 사용하였으며, 구동전류는 45mA로 하였다. 자기혼합 신호는 LD에 내장된 PD로 모니터 하였다. 이동 물체로는 Roland사의 스피커(model Cube-40, 직경 10")를 사용하였으며, 스피커의 구동 신호는 함수 발생기를 이용하여 1, 1.5, 2, 2.5, 3 Hz의 정현파(진폭 4Vp-p)를 인가하였으며, LD와 스피커의 진동판간의 거리는 정지 상태에서 1mm로 하고 스피커의 진동판에 레이저가 조사되는 부분에는 흰색 종이를 부착하였다. 또한 스피커와 LD 부분을 재진대 위에 올려놓아서 건물이나 기타 주위의 진동으로 인한 영향을 제거할 수 있도록 하였다.

PD에서 검출된 신호는 그림3의 블록 다이어그램과 같이 설계된 회로를 이용하여 증폭 처리하였다. 스피커의 진동판에서 반사된 광은 LD package 내에 내장된 PD에서 LD 자체에서 발생된 빛과 자기혼합되어 광변환되며, 전치증폭기에서 33배로 증폭하여 차단 주파수가 30Hz인 고역통과 필터로 저주파 잡음을 제거시킨 후 주증폭기에서 다시 47배로 증폭한 후 다시

고주파 잡음 제거를 위하여 차단 주파수가 20KHz인 저역통과 필터로 필터링 하였다. 이와 같이 증폭 및 처리된 신호는 신호획득 및 처리기인 Data 6000(전치 증폭기 모델 611, 14 bits A/D, 샘플링 주파수 50KHz)을 이용하여 512점의 데이터를 입력신호의 영교차점으로 부터 10msec 지연후 부터 신호를 획득하도록 트리거 신호에 동기시켜서 신호를 획득한후 이의 진폭 스펙트럼을 분석하여 플로터(Hewlett Packard 7470A)로 데이터를 플로팅 하였으며, 도플러 편이 주파수는 Data 6000 상에서 측정하였다.

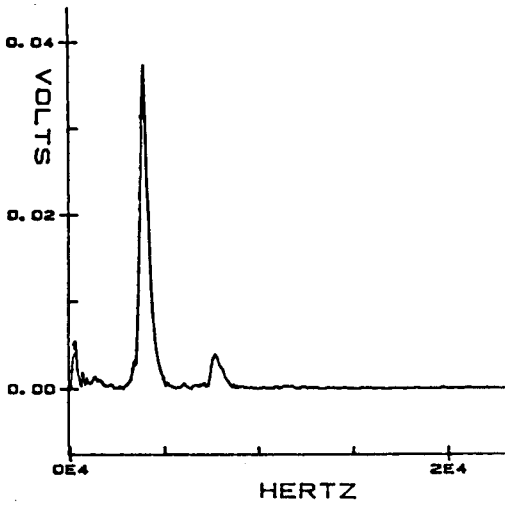
이동 물체에 의해 발생하는 도플러 편이 주파수  $f_D$ 는 이동 물체의 속도를  $v$ , 매질의 굴절률을  $n$ , 이동 물체의 속도벡터와 레이저 빔 간의 각도를  $\theta$ , 광원의 파장을  $\lambda$ 라 하면 식(15)와 같이 표시된다.

$$f_D = 2vn \frac{\cos\theta}{\lambda} \quad (15)$$

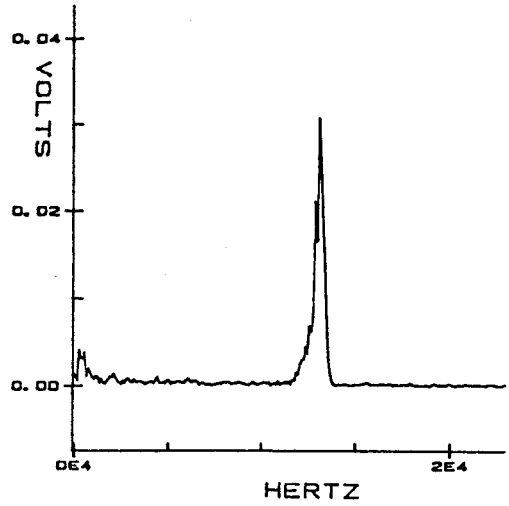
그림4는 입력신호에 동기 시켜 얻어진 신호에 대한 진폭 스펙트럼 및 도플러 편이 주파수이다.

그림 4의 (a), (b), (c), (d)는 각각 스피커의 입력신호 주파수가 2Hz 및 3Hz 일 때의 진폭 스펙트럼 및 도플러 편이 신호를 나타낸다. 그림4 (a) 및 (b)의 첫 번째 제일 큰 피크 주파수는 도플러 주파수와 같으며, 식(15)의  $f_D$ 로 표시되며, 이외의 피크는 도플러 주파수의 고조파이며, 식(13)으로 표시되는 비선형 톱니파로 인해서 나타난 것이다. 전체적으로 입력신호의 주파수가 증가함에 따라서 스피커의 진동판의 속도가 빨라 지므로 도플러 편이 주파수도 증가함을 알 수 있었다. 그림 5는 도플러 편이 주파수에 대한 입력 신호 주파수간의 관계를 나타낸다. 그림에서 비선형성이 있는 것은 입력신호의 주파수가 증가함에 따라서 스피커 자체의 주파수 특성이 다소 향상되기 때문인 것으로 생각된다.

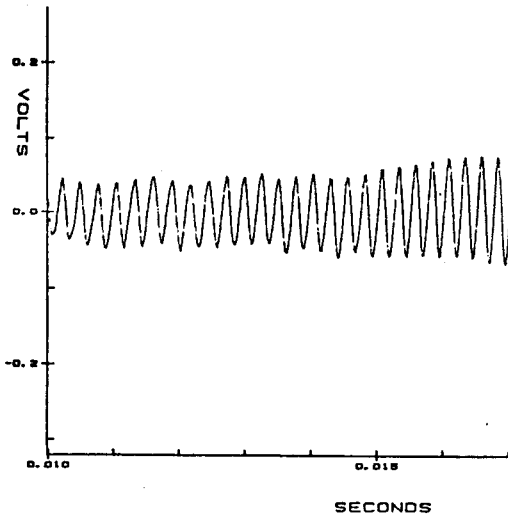
위의 스피커의 특성변화로 인한 영향을 확인하고 측정된 신호의 정확도를 측정하기 위하여 레이저 변위계(Keyence LB-02/LB62)를 이용하여 스피커 진동판의 이동속도가 0.5mm/s 간격으로 각각 1.0mm/s - 5.0mm/s 까지 되도록 함수발생기의 입력신호를 조정하여 이 때의 측정 값과 앞의 식(15)의 이론적인 계산 값과 비교하였다. 식(15)의 매질의 굴절률은 공기중이므로  $n=1$ 이며, 레이저빔과 스피커의 진동판의 속도벡터가 이루는 각은  $0^\circ$ 가 되도록 하였다. 그림 6은 그 결과를 나타낸다



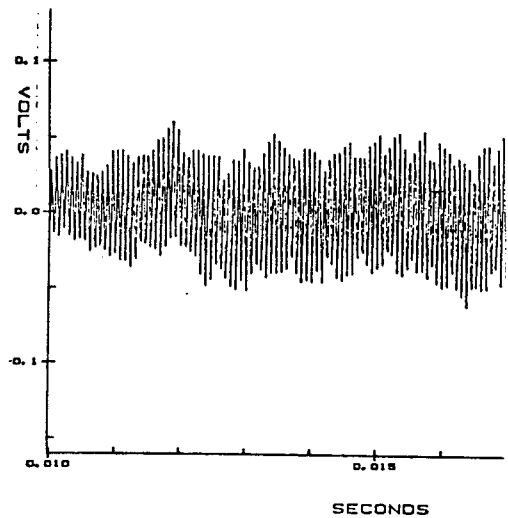
(a) Doppler shifted spectrum of 2Hz input signal



(b) Doppler shifted spectrum of 3Hz input signal



(c) Doppler shifted signal of 2Hz input signal



(d) Doppler shifted signal of 3Hz input signal

그림 4. 측정된 자기혼합 레이저 도플러 신호 및 주파수 스펙트럼.

Fig. 4. Doppler shifted signal and frequency spectra obtained with self-mixing effect.

그림 6의 측정치와 이론적인 계산 값과의 최대오차는 2.7% 이었으며, 평균오차는 약 1.88% 이었다.

그림 3과 같이 구성된 LD의 자기혼합효과를 이용한 측정시스템은 이동 물체의 Doppler 편이 주파수를 측정할 수 있음을 확인하였으며, 이를 이용하여 생체 조직의 혈류변화를 비침습적으로 측정할 수 있는지를 확인하기 위하여 운동으로 조직의 혈류 변화를 유

발시킨 후 운동전 및 후의 조직의 혈류를 측정하였다.

피검자의 인지로 부터 검출된 신호는 광전맥파계용 센서를 깃볼에 부착하여 심전도(ECG) 신호의 R파에 동기 시켜서 512점의 데이터를 DATA6000으로 획득하여 분석하였다.

자기혼합효과로 인한 LD의 발진은 반사된 빛의 세기가 강하면 LD는 multimode로 발진하고, 약할 때는

single-mode로 발진한다.

그러나 인체 조직에서 반사된 광은 입사된 광의 4-7% 이므로 LD의 single-mod 발진은 유지된다.<sup>[9]</sup>

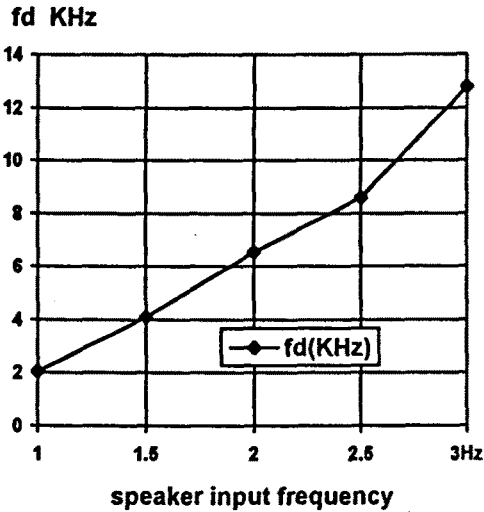


그림 5. 도플러 편이 주파수와 스피커의 입력신호.  
Fig. 5. Doppler shifted frequency vs. input frequency of speaker.

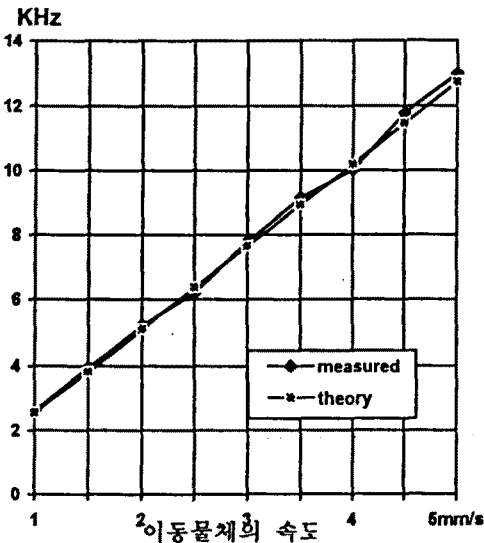


그림 6. 진동판의 속도에 따른 도플러 편이 주파수의 측정 값과 계산값.  
Fig. 6. Measured Doppler shifted frequency vs. calculated Doppler shifted frequency.

그림 7은 안정 및 운동(hand gripping)후의 손가락(인지)의 혈류변화로 인한 도플러 스펙트럼을 나타낸다. (a)의 운동전에 1.123KHz였던 도플러 주파수가 운동후 혈류속도 증가로 인하여 1.514KHz로 증가 하였음을 알 수 있으며, 이는 일반적인 운동 생리학의 결과와 일치한다.

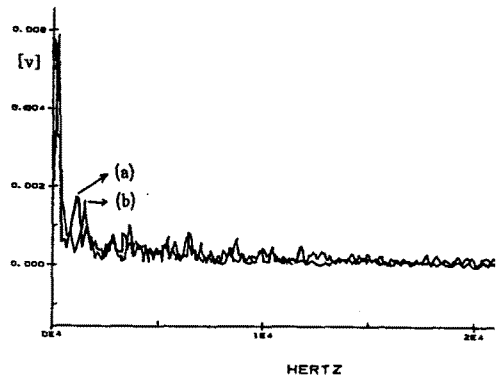


그림 7. 인지의 혈류변화로 인한 도플러신호 스펙트럼.  
(a) 운동 전, (b) 운동 후  
Fig. 7. Frequency spectra of signal measured at index finger.  
(a) before exercise, (b) after exercise

In-vivo 실험의 도플러 스펙트럼은 이동물체의 그것과 달리 특정 주파수에서 큰 피크치가 나타나지 않고 스펙트럼의 모양이 지수함수적으로 감소하며 말초 혈관의 혈류 속도에 해당하는 주파수에서 작은 피크가 나타난다. 이것은 혈류의 경우는 이동 혈구에 의해 광양자의 다중 산란이 발생하고 이동 혈구의 속도가 다양하기 때문이다. 따라서 혈류의 경우는 스펙트럼으로부터 혈류의 속도와 혈류량을 추정할 수 있으며 이는 앞으로 계속하여 연구되어야 할 부분이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 LD의 자기혼합효과를 이용한 인체 조직의 혈류측정법을 연구하기 위한 기초 연구로서, 집속렌즈나 광전송을 위한 광섬유 등을 사용하지 않고 레이저 광을 직접 이동물체의 표면에 조사하여 이동물체의 속도에 따른 LD의 자기혼합효과에 의한 도플러 편이 주파수를 검출하는 측정 시스템을 구성하고, 이를 이용하여 이동 물체 및 in-vivo 실험을 통하

여 도플러 편이 주파수를 검출 할 수 있음을 확인하였다.

이동 물체로는 스피커를 사용하였으며, 스피커의 입력 주파수를 1-3Hz 까지 변화시킨 결과 도플러 편이 주파수는 2-12KHz의 범위에서 거의 선형적으로 변화하였으며 측정된 결과는 재현성을 가지고 있었으며, 이동물체의 속도를 1.0mm/s - 5.0mm/s 까지 0.5mm/s 간격으로 변화 시키면서 편이 주파수를 측정 한 결과 계산 값과의 평균오차는 1.88% 이었다. 또한 운동 전후의 인지로 부터 도플러 신호를 측정 한 결과 운동 전에 비하여 후의 도플러 주파수가 증가하므로 운동 생리학의 결과와 잘 일치하였다.

실험시 주변 진동으로 인한 영향을 크게 받으므로 측정에 주의를 요하였으며, 이로 인해서 제진대가 필요하였다.

LD와 진동판간의 거리가 변함에 따라서 검출된 신호의 진폭에 차이가 있으므로 측정 범위 내에서 최적인 거리를 결정하기 위한 연구와 미소 입자를 주입한 유체를 이용한 절대속도 측정에 대한 연구가 필요하며, 광의 조직 내 투과깊이 및 sample volume의 결정을 통한 혈류량의 정량적 측정을 위해 앞으로 최적인 sensing probe 및 신호처리법에 대한 연구가 필요하다.

#### 참 고 문 헌

- [1]. Yeh Y. Cummins H. Z., "Localized fluid flow measurement with He-Ne laser spectrometer. Appl Phys Lett 4 : 176-179, 1964.
- [2] Stern, M. D., In vivo evaluation of microcirculation by coherent light scattering. Nature, 254, 56-58, 1975.
- [3] R. R. Anderson and J. A. Parrish, "Optical properties of human skin in the science of photomedicine. J. D. Regan and J. A. Parrish. Eds. (Plenum, New York, 1982).
- [4] Holloway, G. A. and Watkins, D. W., "Laser Doppler measurement of cutaneous blood flow, J. Invest. Dermatol., 69, 306-309, 1977.
- [5] Nilsson, G. E., Tenland, T. and Oberg, P. A., "A new instrument for continuous measurement of tissue blood flow by light beating spectroscopy." IEEE Trans, BME-27, 12-19, 1980(a).
- [6] F. F. M. de Mul, J. van Spiker, D. van der Plas, J. Greve, J. G., Arnoudse, and T. M. Smits, Mini Laser-Doppler (Blood) Flow Monitor with Diode Laser Source and Detection Integrated in the Probe," Appl. Opt. 23, 2970-2973 (1984).
- [7] R. J. Gush, T. A. King, MIV Jayson, "Aspect of laser light scattering from skin tissue with application to laser Doppler blood flow measurement," Phys. Med. Biol. Vol.29-12, pp.1463-1476, 1984.
- [8] H. W. Jentink, "Monte Carlo simulation of laser Doppler blood flow measurements in tissue," Applied Optics, Vol.29-16, pp.2371-2371-2381, 1991.
- [9] S. Shinohara, A. Mochizuki, H. Yoshida, M. Sumi, "Laser Doppler velocimeter using the self-mixing effect of a semiconductor laser diode," Applied Optics, Vol.25-9, pp.1417-1419, 1986.
- [10] M. H. Koelink, M. Slot, F. F. M. de Mul, J. Greve, R. Graaff, "Grass-fiber self-mixing diode-laser Doppler velocity, " Meas. Sci. Technol.No.3, pp. 33-37, 1992.
- [11] K. Petermann, Laser diode modulation and noise, Kluwer Academic Publication, 1989.
- [12] 고한우, 최덕희, "조직혈류 측정을 위한 자기혼합형 레이저 도플러 혈류계의 검토," 대한의공학회 추계학술대회 논문집 vol.15-2, pp. 67-70, 1993.

---

 著 者 紹 介
 

---


**고한우(高漢雨)**

1953년 5월 1일 생. 1981년 2월  
 전국대학교 공과대학 전기공학과  
 졸업. 1983년 8월 연세대학교 대  
 학원 전기공학과(공학석사). 1987  
 년 8월 연세대학교 대학원 전기  
 공학과(공학박사). 1983년 3월 -

1987년 2월 연세대학교 의과대학 의용공학과 연구조

교. 1987년 3월 - 1990년 2월 연세대학교 의과대학 의  
 용공학과 연구강사. 1990년 3월 - 현재 한국표준과학  
 연구원 계측시스템 연구실 선임연구원. 1991년 11월 -  
 1993년 5월 한국표준과학연구원 계측시스템 연구실장.  
 1992년 7월 - 1993년 7월 동경대학교 첨단과학연구센  
 터 생체계측연구실 협력연구원. 주관심 분야 : 광응용  
 생체계측 및 신호처리, 감성공학