

논문 2006-43SC-3-8

# PPG를 이용한 당뇨병 환자의 족부질환의 조기진단 시스템 개발

(Development of early diagnosis system for the detection of diabetic foot using photoplethysmograph)

김진태\*, 김성우\*, 홍현기\*, 임재중\*\*, 김덕원\*\*\*

(Jin Tae Kim, Sung Woo Kim, Hyun Ki Hong, Jae Joong Im, and Deok Won Kim)

## 요약

본 논문은 photoplethysmography(PPG)와 Laser doppler(LD)를 이용하여 당뇨병 환자의 신경병증을 조기 진단하기 위한 시스템을 구성하여 손가락과 발가락의 혈류량을 측정하고 그 비율을 이용하는 방법을 제안하였다. 당뇨병 환자의 신경병증 진단을 위해 임상에서는 신경전도검사(NCV)가 사용되고 있으나 이 검사는 피부에 전기자극을 가하므로 환자에게 스트레스와 고통을 준다. 이에 본 논문에서는 고통이 전혀 없으며, 비관혈적이고 측정방법이 간단한 PPG와 LD를 이용하여 신경병증 진단법을 제안하였다. PPG가 LD에 비해 손가락 및 발가락의 혈류량 및 온도와의 상관관계, 민감도 및 특이도에서 더 우수하였다. 분석결과 50명의 신경병성 당뇨병환자의 혈류비(0.96±0.20)가 64명의 정상인의 혈류비(0.46±0.15)에 비해 유의하게 높았다 ( $p<0.000$ ). 또한 신경병성 당뇨병환자의 발가락 온도(30.5±1.4℃)가 정상인의 발가락 온도(29.3±2.0℃)에 비해 유의하게 높았다 ( $p<0.000$ ). 본 연구로부터 도출된 최적 혈류비(0.678)에 대한 측정 방법의 높은 민감도(95.3%)와 특이도(95.3%)를 확인하였다. 마지막으로 신경병성 당뇨병환자 그룹의 경우 모두 손가락과 발가락의 온도차가 4.5℃ 미만이었다.

## Abstract

The purpose of this study was to suggest a new detection method for early diagnosing diabetic neuropathic foot by obtaining a ratio of toe to finger blood flow using photoplethysmography(PPG) and Laser Doppler(LD). Nerve conduction velocity (NCV) has been routinely used for diagnosing neuropathic foot, but it applies strong electric stimulus to peripheries resulting in stress and pain. The blood flow ratio of 50 neuropathic diabetes(0.96±0.20) was significantly higher than that of 64 normal person(0.46±0.15)( $p<0.000$ ). It also showed that toe temperature of neuropathic diabetes(30.5±1.4℃) was significantly higher than that of normal group(29.3±2.0℃)( $p<0.000$ ). The optimal boundary value of the blood flow ratio was found to be 0.678 and the sensitivity and specificity of this proposed method resulted in 95.3% and 95.3% respectively. Lastly, there were no neuropathic diabetes whose temperature difference between finger and toe was higher than 4.5 °C.

**Keywords :** PPG, NCV, neuropathy, ratio, Laser Doppler

\* 정희원, 연세대학교 생체공학협동과정

(Graduate Program in Biomedical Engineering, Yonsei University)

\*\* 정희원, 전북대학교 전자정보공학부

(Division of Electronics and Information Engineering, Chonbuk National University)

\*\*\* 평생희원, 연세대학교 의과대학 의학공학교실, -교신저자

(Dept. of Medical Engineering, College of Medicine, Yonsei University)

※ 이 논문은 2004년도 산업자원부 산업기술개발사업 신기술실용화개발사업(10017058)에 의하여 연구되었음.

접수일자 : 2005년2월14일, 수정완료일 : 2006년5월8일

## I. 서 론

경제발전과 생활양식의 변화로 우리나라에서도 당뇨병환자의 수가 매우 빠른 속도로 증가하고 있다. 대한당뇨학회에서 조사한 결과에 따르면 1970년에 인구의 약 1% 미만으로 추정 되던 우리나라 성인의 당뇨병 유병률이 2001년에는 10%선으로 추정됐다<sup>[1]</sup>. 당뇨병의 합병증 중의 하나가 족부 합병증으로서 이 합병증이 강조되는 이유는 인간에게 매우 치명적인 발의 절단과 연관되어 있기 때문이다. 미국에서는 해마다 약 3만 명의 당뇨병 환자가 다리의 일부를 절단하는 수술을 받고 있다<sup>[2]</sup>. 우리나라에서도 당뇨병성 족부병변(diabetic foot)으로 불구가 되는 환자들이 점차 증가하고있다.

당뇨병성 족부병변의 병인은 신경병성(neuropathic), 신경-허혈성(neuro-ischemic), 허혈성(ischemic)의 3가지로 구분된다. 원인별 빈도는 각각 50~60%, 20~30%, 10~20% 정도로, 80~90%의 신경병성 당뇨병(neuropathic diabetes)이 당뇨병성 족부병변환자의 거의 대부분을 차지할 만큼 족부병변의 발생에 가장 중요한 원인이라고 볼 수 있다<sup>[4]</sup>. 신경병성 당뇨병은 신경에 영양을 공급하는 작은 혈관이 좁아지거나 막혀서 말초신경에서의 신경 전달 과정이 장애를 받거나 괴사하여 감각이상을 느끼거나 감각의 소실이 초래되는 질환이다<sup>[2]</sup>.

현재 신경병성 당뇨를 진단하기 위해서는 신경전도검사(nerve conduction velocity: NCV)를 실시하여 신경병성의 유무를 진단하고 있다. 그러나 신경전도검사는 강한 전기 자극을 환자의 사지에 가하므로 심한 스트레스와 자극을 유발하여 환자들이 고통을 호소하는 경우가 많다<sup>[3]</sup>. 따라서 환자들의 고통을 최소화하면서 신경병성 당뇨를 판별할 수 있는 검사방법에 대한 요구가 있어왔다.

허혈성으로 인한 사지의 이상을 측정하기 위해 사지의 혈류량을 측정하는 많은 연구가 수행되었으며 신경병성이 있는 경우 발가락의 혈류량이 증가된다는 사실이 보고되었다<sup>[5-10]</sup>.

그 이유는 발바닥의 동정맥단락(arteriovenous shunt: AVS)이 교감신경긴장(sympathetic tone)에 의해 수축된 상태로 유지가 되어야 하나 교감신경 신경병성에 의해 교감신경 긴장이 소실되고 동정맥단락이 열리게 되어 정상인보다 혈류가 증가하기 때문이다<sup>[5]</sup>. 그러나 신경병성 당뇨병환자의 손가락 혈류는 별 영향이 없다는 보고에 근거하여<sup>[5]</sup> 손가락 혈류에 대한 발가락 혈

류를 새로운 지표로서 제안하였다. 본 연구에서는 PPG (photoplethysmography)와 LD(Laser Doppler)를 이용하여 비관혈적으로 간편하게 발가락과 손가락의 혈류비를 측정하여 정상인과 신경병성 당뇨병환자를 구분하는 최적의 혈류비를 도출하여 민감도와 특이도를 구하여 두 방법의 정확도를 확인하였다.

## II. 본 론

### 1. PPG 혈류량 측정 시스템의 하드웨어

PPG 혈류량 측정 시스템은 그림 1과 같이 크게 다섯 부분으로 나누어진다. PPG 센서는 Nellcor DS-100A Durasensor(U.S.A)를 사용하였으며 PPG 센서의 적색광 및 적외선광의 파장은 각각 660, 940nm이다. 본 연구에서는 좌우 양손가락과 양발가락을 동시에 측정할 수 있도록 4채널 PPG 혈류량 측정 시스템을 구성하였다. PPG 센서구동 및 제어부에서는 적색광LED를 125  $\mu$ s 동안 on 하고 375  $\mu$ s 동안 투과한 빛의 세기를 얻는다. 그 다음 500  $\mu$ s 동안 적색광LED를 off 하고 적외선광LED를 125  $\mu$ s 동안 on 하고 375  $\mu$ s 동안 투과한 빛을 얻은 후 500  $\mu$ s 동안 off한다. 얻어진 데이터는 신호증폭 및 필터링부인 OP-amp와 PIC 마이크로프로세서를 통하여 증폭 및 정규화 과정을 거친 후 A/D부에서 DAQ-pad(PCI-6020E, National Instruments, U.S.A)를 통해 PC로 전송 된다.

PPG 혈류량 측정 시스템은 4개의 채널 모두에서 같은 크기의 신호가 얻어지는 것을 확인하기 위해서 SpO2 simulator(Index2FE, FLUKE, U.S.A)를 사용하여 같은 신호를 각각의 채널에 입력 후, 최종 출력단의 신호를 측정하여 각 4채널의 진폭이 같도록 보정하였다.

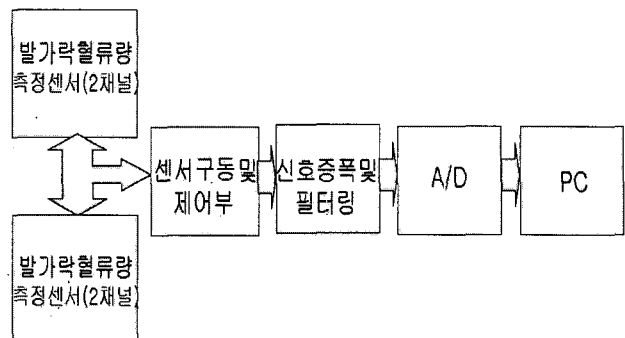


그림 1. PPG 혈류량 측정 시스템의 블록다이어그램  
Fig. 1. Block diagram of PPG blood flow measurement system.

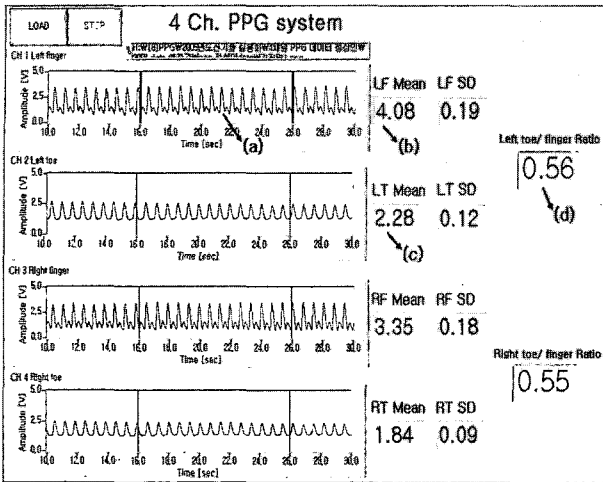


그림 2. PPG 혈류량 분석 프로그램  
(a) 분석 구간 설정  
(b) 손가락의 평균 혈류량  
(c) 발가락의 평균 혈류량  
(d) 계산된 혈류비

Fig. 2. PPG blood flow analysis program.  
(a) Set up of analysis window  
(b) Mean finger blood flow  
(c) Mean toe blood flow  
(d) Calculated blood flow ratio

2. PPG 혈류량 측정 시스템의 소프트웨어

소프트웨어는 LabVIEW(National Instruments, U.S.A)로 개발하였으며 크게 두 화면으로 구성되었다. 하나는 데이터를 실시간으로 보여주는 화면이고, 두 번째는 저장된 파일을 분석하는 화면으로서 그림 2는 분석 화면의 예이다. 혈류량 계산은 (a)와 같은 구간 안에 있는 각 적색광 파형의 최대 값과 최소 값을 찾아내어서 그 차로 진폭을 구한 다음, 그 진폭들을 모두 더하여 평균한 진폭을 평균 혈류량으로 하였다. 이렇게 얻은 왼손가락, 왼발가락, 오른손가락, 오른발가락의 혈류량을 이용하여 혈류비를 구하였다. 이렇게 혈류비를 구함으로써 피검자간의 절대 혈류량 차이 및 온도에 의한 변화를 최소화하였다.

III. 실험 방법

64명의 정상인(71.9±10.9세)과 세브란스 당뇨병센터에서 신경전도검사로 확진된 신경병성 당뇨병환자 50명(65.1±8.9세)을 대상으로 하였다. 측정을 하기 전 10분간 누워 안정을 취하게 하였으며 본 연구에서 개발된 PPG 혈류량 측정기와 LD(PF5010, Perimed, Sweden) 관류(perfusion)량 측정기를 이용하여 30초 동안 3회 반복

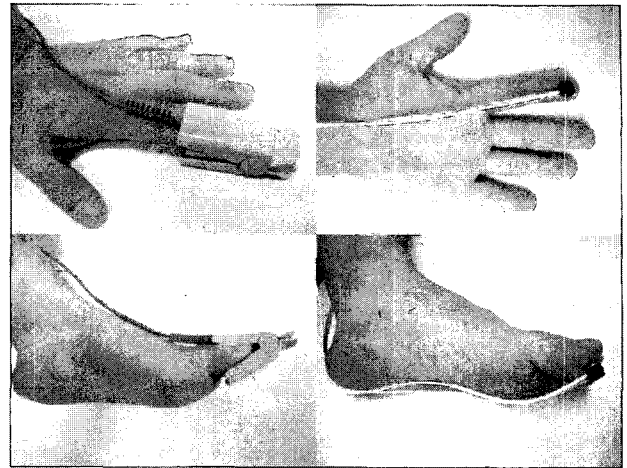


그림 3. 손가락과 발가락에 PPG 센서(왼쪽) 및 LD의 관류측정 센서와 온도측정 센서를 부착한 모습 (오른쪽)  
Fig. 3. Photos of PPG(left) and LD(right)'s perfusion and temperature sensors attached to fingers and toes.

측정하여 각 방법의 재현성을 확인하였다. 또한 혈류량과 온도와의 상관관계를 알기위해 Perimed의 PF5020 Temperature Unit을 이용하여 동시에 손가락과 발가락의 온도를 측정하였으며 측정 시 평균 실내온도는 25.8±1.5℃이었다. 통계분석은 SPSS 8.0 for Windows를 이용하여 독립표본 t 검정과 상관관계를 사용하였다. 그림 3은 손가락과 발가락에 PPG 센서(왼쪽)와 LD의 센서(오른쪽)를 부착한 모습이다. LD의 센서는 관류와 온도를 동시에 측정한다.

IV. 결과 및 고찰

1. 정상인의 혈류량

그림 4는 60대 정상인의 PPG 혈류량 그래프이다. 30초의 측정 구간 중 안정된 10초를 선택하여 분석하였으며 그래프 바로 옆에는 적색광의 평균값과 표준편차를 보여준다. 그림 4에서 정상인의 손가락 혈류량이 발가락 혈류량보다 큰 것을 볼 수 있다. 이것은 Midttun에 의하면 손가락, 발가락의 두 영역에서 동정맥단락의 수와 직경의 차이가 다르기 때문인 것으로 사료된다<sup>[11]</sup>. 정상인 64명(n=128)의 경우 발가락/손가락의 혈류량비는 PPG로 측정된 경우 평균 0.46±0.15(왼쪽: 0.45±0.14 오른쪽:0.47±0.16), LD로 측정된 경우 평균 0.40±0.19(왼쪽:0.40±0.19, 오른쪽:0.41±0.19)였다. 또한 정상인 64명을 각각 3회 측정에 대한 재현성은 PPG일 경우 7.6±5.7%(왼쪽), 6.9±5.0%(오른쪽), LD일 경우

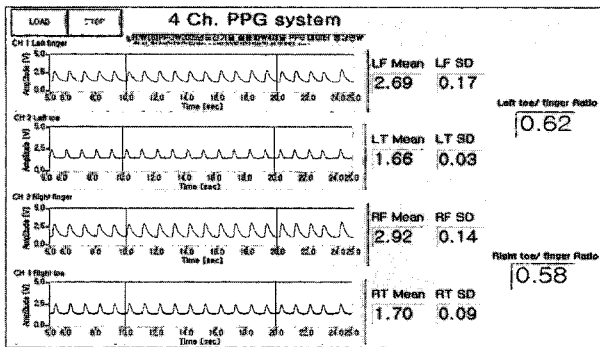


그림 4. 60대 정상인의 PPG 혈류량의 그래프  
 Fig. 4. PPG blood flow graph of normal sixty's LF (left finger), LT (left toe), RF (right finger), RT (right toe).

15.4±10.3%(왼쪽), 15.2±9.6%(오른쪽)로 PPG가 LD 보다 약 두 배 이상 재현성이 우수한 것을 확인할 수 있다. PPG와 LD 모두 좌우측 모두 통계적으로 유의한 차이가 없었다(PPG: p=0.371, LD: p=0.993).

2. 신경병성 당뇨병 환자의 혈류량

그림 5는 전형적인 60대 신경병성 당뇨병 환자의 PPG 혈류량 그래프로서 발가락/손가락 혈류비(왼쪽: 1.19, 오른쪽: 0.92)가 정상인 64명의 평균값(0.46±0.15)보다 큰 것을 확인할 수 있었다. 신경병성 당뇨병 환자 50명(n=100)에 대해 PPG와 LD에 의한 발가락/손가락 혈류비는 PPG일 경우 평균 0.96±0.22(왼쪽:0.94±0.20, 오른쪽:0.98±0.24) LD일 경우 평균 0.94±0.24(왼쪽:0.94±0.25, 오른쪽:0.94±0.23)였다. 또한 환자 50명을 각각 3회 측정에 대한 재현성은 PPG는 왼쪽 5.5±5.3%, 오른쪽 5.2±4.5%, LD일 경우 왼쪽 8.2±5.6%, 오른쪽 9.8±6.6%로 PPG가 LD보다 재현성이 우수한 것을 확인할 수 있다. 그리고 PPG와 LD 모두 좌우측 모두 통계적으로 유

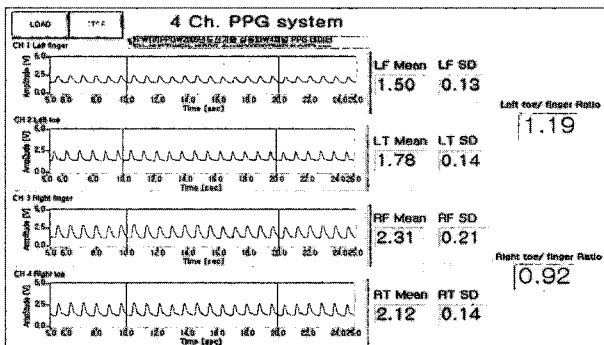


그림 5. 전형적인 60대의 신경병성 당뇨병 환자의 PPG 혈류량의 그래프  
 Fig. 5. PPG blood flow graph of a typical sixty's diabetic neuropathy.

의한 차이가 없었다(PPG: p=0.429, LD: p=0.937). 정상인과 신경병성 당뇨병 환자의 좌측과 우측이 통계적으로 유의한 차이가 없으므로 차후 분석은 PPG와 LD 각각 좌측과 우측을 통합하여 분석하였다.

3. 온도와와의 상관관계

피부온도와 혈류량 간에 높은 상관관계가 있고, 피부온도가 피부의 혈류량에 큰 영향을 준다는 보고<sup>[12]</sup>에 의해 본 연구에서는 혈류량과 온도를 동시에 측정하여 온도와 좌우 손가락과 발가락 혈류량의 상관관계를 분석하였다. 표 1은 정상인과 신경병성 당뇨병 환자의 경우 손가락, 발가락의 온도와 혈류량의 상관관계를 PPG와 LD방법에 따라 나타낸 것이다. 표 1에서 정상인 그룹이 신경병성 당뇨병 환자 그룹보다 온도와 혈류량이 높은 상관관계를 갖고, PPG가 LD보다 더 높은 상관관계를 보였다. 그 이유는 신경병성 당뇨병 환자들이 교감신경긴장이 소실되어 동정맥단락이 열려 있어 정상인보다 혈류조절이 잘 안되기 때문으로 사료된다<sup>[5]</sup>. 또 정상인 그룹과 신경병성 당뇨병 환자의 그룹간에 발가락의 평균 온도가 정상인(n=128)은 29.30±2.08℃, 신경병성 당뇨병 환자(n=100)는 30.48±1.41℃이었고, 정상인과 신경병성 당뇨병 환자 그룹 간에 통계학적으로 유의한 차이가 있었다(p<0.000). 이는 신경병성 족부의 축진 시 따뜻하고, 맥박이 잘 축진되는 현상을 잘 대변한다<sup>[5]</sup>. 반면 정상인 그룹의 손가락 온도(32.10±1.47℃)와 신경병성 당뇨병 환자의 손가락 온도(32.39±1.54℃)는 통계적으로 유의한 차이가 없었고(p=0.142), 손가락 혈류량도 정상인과 신경병성 당뇨병 환자에서 통계적으로 유의한 차이가 없었다(p=0.051). 이를 통해서 당뇨병성 신경병증 환자의 손가락 혈류는 정상인의 손가락혈류와 크게 다르지 않다는 보고<sup>[5]</sup>와 피부 온도가 피부의 혈류량과 높은 상관관계가 있다는 보고<sup>[12]</sup>가 본 연구의 내용과 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

그림 6은 PPG(왼쪽)와 LD(오른쪽)를 이용하여 측정 한 정상인과 신경병증 환자의 혈류비와 손가락과 발가락 온도의 차를 그래프로 나타낸 것이다. 그림 6의 수직선은 그림 7에서 민감도와 특이도가 만나는 최적의 혈류비인 0.678이다. 그림 6에서 PPG(왼쪽)로 측정 한 정상인의 경우 손가락과 발가락의 온도차이가 -0.5도에서 8도로 널리 분포되어있는 반면, 신경병성 당뇨병 환자는 -0.1도부터 4.5도에 걸쳐 분포되어있다. 이러한 결과를 이용하면 손가락과 발가락의 온도차이가 4.5도 이상이면 신경병증이 아니라는 것을 임상에 적용할 수 있

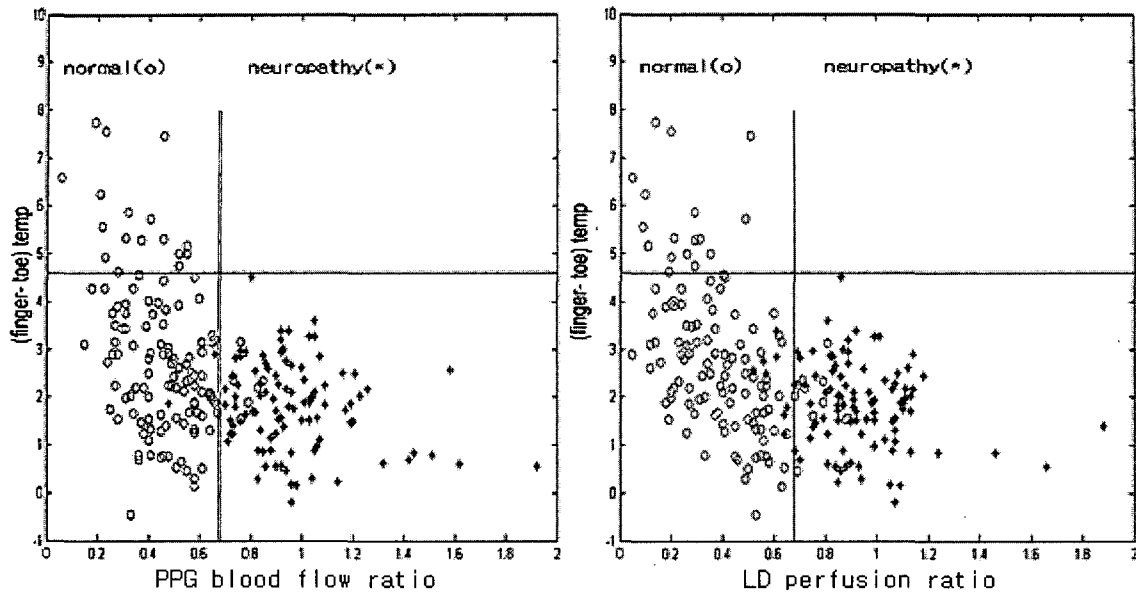


그림 6. PPG(왼쪽)와 LD(오른쪽)의 혈류비와 발가락 온도와의 분포  
 Fig. 6. Distribution of PPG(left) and LD(right)'s blood flow and perfusion ratios and difference of finger and toe temperatures.

표 1. PPG 와 LD로 측정한 정상인과 당뇨병환자의 손가락, 발가락 혈류량과 손가락, 발가락 온도와의 상관관계 계수

Table 1. Correlations coefficients of normal and diabetic patient's blood flow and temperature of fingers and toes.

방법	측정대상	혈류량	상관관계계수 -	
			손가락온도	발가락온도
PPG	정상인	손가락	0.497 (p<0.000)	
		발가락		0.561 (p<0.000)
	신경병성 당뇨병환자	손가락	0.394 (p<0.000)	
		발가락		0.460 (p<0.000)
LD	정상인	손가락	0.286 (p=0.003)	
		발가락		0.526 (p<0.000)
	신경병성 당뇨병환자	손가락	0.340 (p=0.001)	
		발가락		0.304 (p=0.002)

을 것이다.

4. 정상인과 신경병성 당뇨병환자 판별을 위한 혈류비 결정

그림 7은 PPG를 이용하여 정상인(n=128)과 신경병성 당뇨병환자(n=100)의 혈류비에 따른 민감도와 특이도를 나타낸 그래프로서 \* 는 민감도, o 는 특이도를 의미한다. 신경병성 당뇨병환자 그룹의 혈류비가 정상인 그룹보다 높기 때문에 혈류비의 경계값이 증가할수록 민감도는 감소하고 특이도는 증가하는 것을 볼 수 있다. 표 2

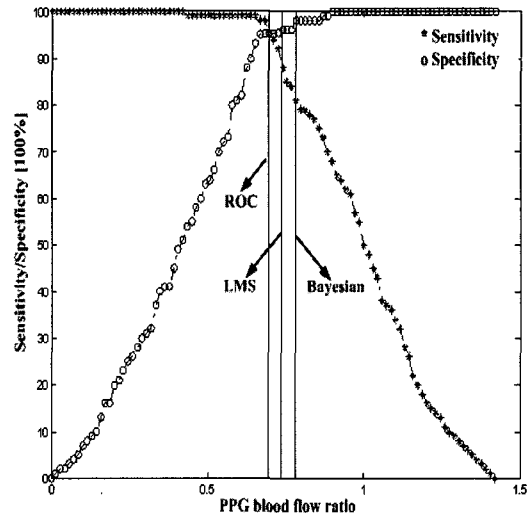


그림 7. PPG를 이용하여 얻은 혈류비에 따른 민감도와 특이도 그래프

Fig. 7. Sensitivity and specificity curves with blood flow ratio obtained by PPG.

는 PPG와 LD를 이용했을 때의 Bayesian, LMS(least mean square) 및 ROC 곡선의 교차점을 경계값으로 하였을 때의 각각의 민감도와 특이도를 나타낸 것이다. 이 표에서 PPG를 이용하여 ROC 곡선의 교차점을 경계값으로 하였을 때, 민감도는 95.3%, 특이도는 95.3%로서 가장 최적이었다.

표 2. PPG 와 LD의 세 방법의 민감도와 특이도 비교

Table 2. PPG and LD's sensitivity and specificity for three methods.

분석방법	PPG 방법			LD 방법		
	경계값	민감도	특이도	경계값	민감도	특이도
Bayesian	0.779	82.0%	97.7%	0.741	84.0%	95.3%
LMS	0.738	88.0%	96.1%	0.692	89.0%	93.8%
ROC	0.678	95.3%	95.3%	0.676	92.0%	91.4%

### V. 결 론

본 연구에서는 정상인(N=64)과 신경병성 당뇨병환자(N=50)를 대상으로 PPG를 이용하여 손가락에 대한 발가락의 혈류비를 측정하였다. 그 결과 신경병성 당뇨병환자의 혈류비(0.96±0.20)가 정상인의 혈류비(0.46±0.15)보다 2배정도 높게 측정되었으며, 유의한 차이가 있었다(p<0.000). 그러나 두 그룹 간의 나이 차는 유의하지 않았다(p=0.051). 본 연구에서 개발한 방법(PPG)의 민감도 및 특이도가 각각 95.3%와 95.3%로서 신뢰도가 매우 높은 것으로 확인되었다. 그리고 손가락과 발가락의 온도차이가 4.5도 이상이라면 신경병증이 아니라는 것을 확인하였다. 이를 이용하여 임상에서 혈류량을 측정할 수 없는 상황이라면, 손가락과 발가락의 온도차이 만으로도 신경병증의 유무를 알 수 있을 것이다.

신경전도검사는 피부에 직접적으로 최대 100mA의 전기자극을 가하므로 피검자가 놀라거나 고통을 호소하는 경우가 많다. 또한 검사시간도 20~30분이 소요되며, 검사비도 결코 적은 비용이 아니다. 본 연구에서 개발한 PPG방법을 이용한 혈류량 검사를 사용하면 광을 이용하기 때문에 비관혈적이어서 피검자에게 전혀 고통이 없을 뿐 아니라 검사시간이 5분 정도 밖에 소요되지 않고 측정법이 간단한 장점이 있다. PPG 방법으로 사전 검사를 하고 이상이 있는 경우에만 신경전도검사를 실시한다면 비용절감 및 시간절약을 할 수 있다. 또한 주기적인 PPG 혈류량 검사를 통해 신경병증을 조기에 진단할 수 있어 당뇨병으로 인한 신경병증을 예방할 수 있는 계기를 마련 할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 본 방법을 이용하여 봉합술을 받은 손가락과 봉합술을 받지않은 반대편 손가락의 상대적 혈류량을 측정하여 수지봉합술의 예후를 판단하는데 이용할 수 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] 보건복지부, 한국보건사회연구원, 1998년도 국민건강 영양조사-건강면접조사부문, 1999.
- [2] Boulton AJ and Connor H, The diabetic foot 1988, *Diabetic Med*, 5, 796-798, 1988.
- [3] Service FJ, Rizza RA, Daube JR, O'Brien PC and Dyck P Near normoglycaemia improved nerve conduction and vibration sensation in diabetic neuropathy, *Diabetologia*, 28,722-727, 1985.
- [4] Strauss MB, Aksenov IV, Evaluation of diabetic wound classifications and a new wound score, *Clinical Orthopaedics Related Research*, 439, p.79-86, 2005.
- [5] Edited by John H. Bowker and Micheal A. Pfeifer, Neuropathic problems of the lower extremities in diabetic patients, *Levin and O'neal's The diabetic foot*, ch 3, Mosby, Inc, St. Louis, p.35-38, 2001.
- [6] Stefan Zimny, Martic Pfohl, Frauke Dessel, Helmut Schatz, and Marianne Ehren, Early detection of microcirculatory impairment in diabetic patients with foot at risk, *Diabetes Care*, 24, 10, p.1810-1814, 2001.
- [7] Flynn MD and Tooke , Diabetic neuropathy and the microcirculation, *Diabetic medicine*, 12, p.298-301, 1995.
- [8] Edmonds ME., Roberts VC. and Watkins PJ., Blood flow in the Diabetic Neuropathic Foot, *Diabetologia*, 22, p.9-15, 1982.
- [9] Rayman G., Hassan A., Tooke JE., Blood flow in the skin of the foot related to posture in diabetes mellitus, *BMJ*, 292, p.87-90, 1986.
- [10] Flynn MD., Edmonds ME., Tooke JE. and Watkins PJ., Direct measurement of capillary blood flow in the diabetic neuropathic foot, *Diabetologia*, 31, p.652-656, 1988.
- [11] Midttun M., Blood flow rate in arteriovenous anastomoses: from the candle to the grave, *Clinical Physiology*, 20, 5, p.360-365, 2000.
- [12] Pergola PE, Kellogg DL Jr, Johnson JM, Kosiba WA, Reflex control of active cutaneous vasodilation by skin temperature in humans, *Am J Physiol*, 266, H1979-H1984, 1994.

## 저 자 소 개



김진태(정회원)  
2005년 연세대학교 의용전자  
공학과 (공학사)  
2005년~현재 연세대학원 생체공  
학협동과정 석사과정  
<주관심분야: 생체 신호 계측등>



김성우(정회원)  
2004년 연세대학교 의용전자  
공학과 (공학사)  
2004년 9월~현재 연세대학원  
생체공학협동과정  
석사과정  
<주관심분야: 생체 신호 계측등>



홍현기(정회원)  
2005년 연세대학교 의용전자  
공학과 (공학사)  
2005년 9월~현재 연세대학원  
생체공학협동과정  
석사과정  
<주관심분야: 생체 신호 계측등>



임재중(정회원)  
1983년 건국대학교  
의용공학과(공학사)  
1988년 Texas A&M Univ.  
의용공학과 (공학석사)  
1991년 Texas A&M Univ.  
의용공학과 (공학박사)  
1992년~1998년 인제대학교 의용공학과 조교수  
1998년~현재 전북대학교 전자정보공학부 부교수  
2001년~현재 (주)한별메디텍 대표이사  
<주관심분야: 의용공학, 생체계측, 의료기기>



김덕원(평생회원)-교신저자  
1976년 서울대학교  
공과대학 (공학사)  
1980년 미국 Northwestern  
University 전자공학과  
(M.S.)  
1986년 미국 Univ. of Texas at  
Austin 의공학과정 (Ph.D.)  
1999년~2005년 연세의대 의학공학교실 주임교수  
1987년~현재 연세대학교 의과대학 의학공학교실  
교수  
2003년~현재 연세대학교 대학원  
생체공학협동과정 주임교수  
<주관심분야: 비관혈적 생체계측, 의료기기, 전자  
파 유해성 등>