

논문 2004-41SC-5-9

용적맥파 해석에 의한 동맥 혈관 특성화 연구

(A Study on Arterial Characterization by Photoplethysmography Analysis)

한 상 휘**, 변 미 경**, 김 정 국*, 허 응*

(Sang-Whi Han, Mi-Kyeong Byeon, Jung-Kuk Kim, and Woong Huh)

요 약

본 논문에서는 4채널 용적맥파 신호를 이용하여 혈관의 노화 정도 및 경화 정도와 관련있는 동맥 혈관의 특성을 분석하는 새로운 방법을 개발하고 그 효용성을 평가하였다. 이를 위하여 지점과 족지점에서 계측한 맥파 신호를 이용하여 맥파 전달 시간차를 분석 파라미터로 선정하였다. 개발한 시스템의 효용성을 확인하기 위해, 9세에서 83세까지 총 51명의 피검자(남성 26명, 여성 25명)를 대상으로 용적맥파 신호를 4지점에서 동시에 측정된 다음, 선형 회귀 분석법을 사용하여 연령과 분석 파라미터 사이의 상관성을 평가하였다. 연령에 따른 파라미터의 선형 회귀 분석 결과는 연령에 따라 감소하는 경향을 보였다. 51명의 데이터에서 얻어진 상관 계수는 좌측에서 -0.79770 을 보였으며, 우측에서는 -0.80599 를 보여 높은 상관 관계를 보였다. 또한 피검자의 신장으로 정규화하여 얻어진 상관 계수는 좌측에서 -0.81345 , 우측에서 -0.81605 로 약간 향상된 상관 계수를 보였다.

Abstract

In this paper, we present a new methodology to analyze the characteristic of artery by using 4 channels photoplethysmography. The proposed parameter is a time difference of pulse transit time(PTT) between pulse waves at finger site and at toe site. To verify the usefulness of the developed system, volume pulse waves on 4 sites were measured simultaneously for total 51 normal subjects(male 26 and female 25) aged from 9 to 83 years old. And then correlations between the analysis parameters and age were evaluated by using linear regression analysis method. As the result of experiments, the change of parameter was found according to ages. The result of regression analysis about relationships between the parameter and ages for $n=51$, the coefficient of correlation of non-normalized data has 0.79770 in left side and 0.80599 in right side and the coefficient of correlation of normalized data by height has 0.81345 in left side and 0.81605 in right side.

Keywords : Photoplethysmography(PPG), Arterial Characteristic, Pulse Transit Time(PTT), Correlation

I. 서 론

혈관의 노화와 동맥경화의 정도를 판단하는 이상적인 방법은 동맥의 탄력성과 말초부위의 순환상태를 측정하는 것이다. 그러나 간편하면서도 신뢰할 수 있는 측정방법에 대한 연구가 아직 부족한 실정이다. 현재 임상에서는 심전도, 혈액검사, 혈압 등을 종합적으로 참고하여 판단하거나, 혈관 초음파나 조영제를 혈관에 투

입해 검사하는 MRI, CT, 그리고 PET 등을 통하여 판단하기도 한다. 이 검사들은 모두 혈관의 노화나 동맥경화와 관련은 있으나, 직접적으로 경화정도를 나타내지는 못한다. 따라서 지금까지 동맥경화의 조기발견이 어렵고, 혈관 노화 정도를 정량적으로 파악하기도 어려웠다.

기존에 사용되는 검사법은 약물 등을 혈관에 투여함으로써 환자에게 고통을 느끼게 하거나, 단지 혈관의 폐쇄정도만을 파악하는 수준에 머물러 있다. 또한 혈액 검사를 통하여 판단하는 방법도 있지만, 동맥경화 발생의 위험 정도를 예측할 뿐, 동맥의 탄성 정도를 구체적으로 판단하는데 한계가 있었다^{[1][5]}.

본 논문에서는 용적맥파 신호를 이용하여 혈관의 노화

* 정회원, 명지대학교 전자공학과
(Dept. of Electronic Engineering, Myongji Univ.)
** 학생회원, 명지대학교 대학원 전자공학과
(Dept. of Electronic Engineering, Myongji Graduate School)
접수일자: 2004년4월6일, 수정완료일: 2004년9월1일

정도 및 경화 정도와 관련이 있는 동맥 혈관의 특성을 분석하는 새로운 방법을 개발하고 그 효용성을 평가하기 위한 파라미터로 심장박동에 의해 대동맥 기시부에서 생긴 맥파가 좌우측 지점과 족지점에 도달되는 맥파 전달 시간(Pulse transit time: PTT)의 차를 제안하였다. 따라서 4지점에서 맥파를 동시에 검출할 수 있는 4채널 용적맥파 변환기와 신호처리부 그리고 맥파의 전달 시간차를 구하는 알고리즘을 구현하여 연령에 따른 혈관 탄성도의 변화를 분석하는 새로운 방법에 대해 고찰하였다.

개발한 시스템의 타당성을 확인하기 위하여 9세부터 83세까지 51명(남성 26명, 여성 25명)의 정상인 피검자들을 대상으로 용적맥파를 측정하여 맥파 전달 시간차를 검출하고 연령에 따른 상관관계를 선형 회귀 분석방법에 의하여 평가하였다.

II. 본 론

1. 맥파 전달 속도

가. 맥파 전달 속도

동맥의 탄력성과 직접적인 연관이 있는 정보를 이용하여 혈관의 노화 정도와 동맥 경화 정도를 판단하는 방법은 맥파 전달 시간과 맥파 전달 속도를 이용하는 것이다.

식 1로 표현되는 원통 탄성 관(cylindrical thin-walled elastic tube)을 흐르는 유체에 대한 파동방정식에서 파동의 전파 속도는 식 2로서 얻어진다. 식 2는 Moen-Korteweg 방정식으로 불리며 동맥의 맥파 전달 속도를 나타내는데 이용된다^{[7]9}.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{(hE/2a\rho)} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{1}{C_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$C_0 = \sqrt{\frac{hE}{2r_1\rho}} \quad (2)$$

여기서 C_0 : 맥파 전달 속도, h : 동맥벽의 두께, E : 탄성 계수(Elastic modulus), r_1 : 내부 반지름, 그리고: 혈액의 밀도이다.

탄성 계수(E)는 내부 압력의 변화에 따른 외부 반지름의 변화의 비로서 나타내어지며 아래의 식 3과 같이 표현되어진다.

$$E = \Delta P \left(\frac{r_2}{\Delta r_2} \right) \quad (3)$$

여기서 P : 내부 압력의 변화, r_2 : 외부 반지름, 그리고

r_2 : 외부 반지름의 변화량이다.

따라서 맥파 전달속도는 혈관의 탄성계수와 내부반지름과 동맥벽의 두께의 비에 비례함을 알 수 있다^{[6]7}.

위 수식들에 나타난 바와 같이 맥파의 전달 속도는 혈관의 신전성과 혈관벽 두께, 내부 지름 등에 의해서 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다.

맥파가 어느 한 점에서 다른 한 점까지 전달되는데 걸리는 시간을 맥파 전달 시간이라고 하며 맥파의 전달 시간을 측정하는 방법은 동맥의 탄력성과 관련된 직접적인 정보를 얻는 방법이 된다^{[8]10}.

따라서 맥파 전달 시간법은 맥파 전달 속도법과 함께 혈관의 노화 정도와 경화 정도를 측정하는 이상적인 방법인 동맥의 탄력성과 직접적인 관련이 있는 정보를 얻을 수 있는 방법이라고 할 수 있다.

나. 맥파 전달 속도와 신전성

맥파의 전파 속도는 혈관에 따라 차이가 있는데, 혈관의 신전성과 혈관벽 두께등에 의해 크게 영향을 받는다. 즉 맥파 속도는 혈관이 딱딱하든가 혈관벽이 두터우면 증가하며 혈관의 반경이 작을수록 신속하다. 따라서 대동맥에서의 속도가 4~6[m/s]인데 비하여 신전성이 작은 근육형 동맥에서의 속도는 8~12[m/s]에 이른다. 혈관의 신전성은 노년이 될수록 감소하므로 맥파 속도는 노인에서 높다. 고혈압 환자에서는 혈관벽이 딱딱하기 때문에 혈관을 더 이상 신장시키기가 어려우므로 전파속도가 신속하다. 반대로 정맥은 신전성이 아주 크므로, 맥파 속도는 심히 느리며, 대정맥에서의 속도는 1[m/s]에 불과하다. 그러므로 맥파 속도는 혈관계의 신전성을 잘 반영한다고 볼 수 있다. 혈관의 신전성은 노년이 될수록 감소하므로 맥파 전파속도는 노인에서 높다. 고혈압 환자에서는 혈관벽이 딱딱해져 있기 때문에 혈관을 더 이상 신전시키기가 어려우므로 전파속도는 신속하다. 반대로 정맥은 신전성이 아주 크므로 맥파 전파속도는 느려서 대정맥에서의 속도는 1[m/s]에 불과하다^{[11]3}.

2. 시스템 구성

그림 1은 본 논문에서 구현한 전체 시스템의 구성도를 나타낸 것이다.

4채널의 용적맥파 변환기와 신호처리부, 12Bit A/D 변환기 그리고 소프트웨어부로 구성된다. 12Bit A/D 변환기는 NI사 DAQCard-1200을 사용하였으며, 소프트웨어부는 윈도우XP 환경에서 구현하였다.

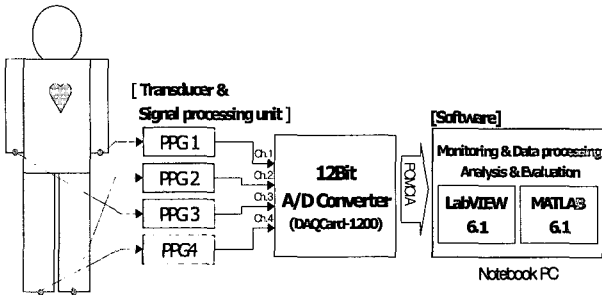


그림 1. 전체 시스템 구성도
Fig. 1. Configuration of the complete system.

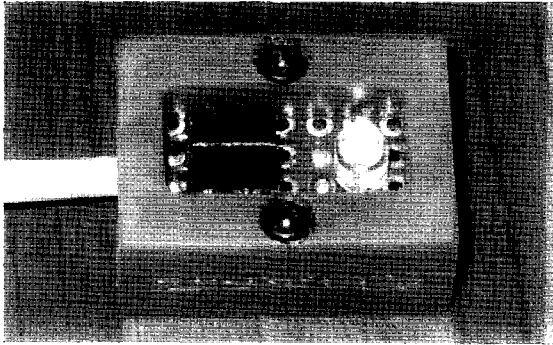


그림 2. 변환기 외형도
Fig. 2. Appearance of pulse wave transducer.

가. 용적맥파 변환기 구성

본 논문에서 구현한 맥파 변환기는 헤모글로빈의 흡광량 변화를 파형으로 기록하는 반사실 광전식 용적맥파 변환기이다. 이는 혈관이 용적변화를 일으킬 때에 혈관 세그먼트 내의 헤모글로빈의 양도 함께 변동되므로 헤모글로빈의 변동량으로부터 용적 변동량을 측정하는 원리이다.

변환기는 그림 2와 같이 PCB위에 10mm 간격을 두고 IR LED와 PD가 놓이는 전자물과 제작한 케이스로 조립되도록 설계하였다. 변환기의 크기는 16.7 x 22.4 x 11.2 mm이다.

그림 3은 용적맥파 변환기 신호처리부를 나타낸 것으로서 회로부는 송신부와 수신부로 구성되어진다. 송신부는 적외광 다이오드에 순방향 전류 최대 정격과 순방향 전류 특성을 근거로 수신부에서 요구되는 신호의 세기를 고려하여 실험적으로 얻어진 약 10 [mA]의 순방향 전류를 제공하는 전류원으로 구성되어지고, 수신부는 포토 다이오드의 전류를 증폭하고 전압으로 변환하는 증폭기, DC성분을 제거하는 고역통과여파기(HPF), 60Hz 전원 노이즈 제거를 위한 대역제거여파기(Notch filter) 그리고 고주파 신호 성분을 제거하기 위한 저역통과여파기(LPF)로 구성된다.

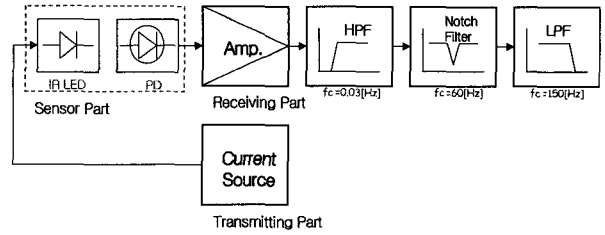


그림 3. 용적맥파 변환기 신호처리부
Fig. 3. Signal processing part of pulse wave transducer.

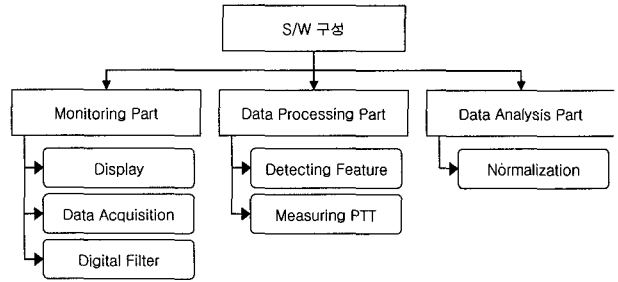


그림 4. 소프트웨어 구성
Fig. 4. Configuration of the software.

나. 소프트웨어 구성

본 논문에서 구현한 장치의 소프트웨어 구성은 윈도우XP 환경에서 LabVIEW 6.1과 MatLAB 6.1을 이용하여 구현하였으며 구성은 아래 그림 4와 같다.

모니터링부는 LabVIEW에서 제공하는 VI를 이용하여 4채널 입력 데이터를 A/D 변환하고 변환된 값들을 PC 모니터상에 실시간 디스플레이하며, 데이터 저장 선택 여부에 따라 디스플레이 기능과 동시에 데이터를 취득하는 기능을 수행하며, 샘플링 율은 500Hz이다.

그림 5는 맥파 전달 시간차의 분석 흐름도를 나타낸 것으로서, 전처리 과정을 통해 맥파의 특징점을 검출하고, 검출된 특징점들 간의 간격을 구하여 샘플링 율로 나눠줌으로써 맥파 전달 시간을 구하였다.

데이터 분석부는 피검자들의 신장으로 정규화 하여 정규화 전,후의 데이터를 연령에 따른 맥파 전달 시간의 상관관계를 분석하였다.

다. 분석 파라미터

동맥 관로에서 맥파가 전달되는 속도는 동맥벽의 탄성에 의해 결정된다. 즉, 혈관 벽의 탄성이 감소할수록 맥파의 전달 속도는 증가하므로 노년이 될수록 맥파의 전달 속도는 높아진다. 따라서 맥파의 전달 시간을 구하면 동맥의 탄력성과 직접 관련이 있는 정보를 얻을 수 있다.

본 논문에서 제안한 방법은 기존의 맥파 전달 시간법에서 기준 신호로서 심전도나 심음, 기준 맥파를 사용하

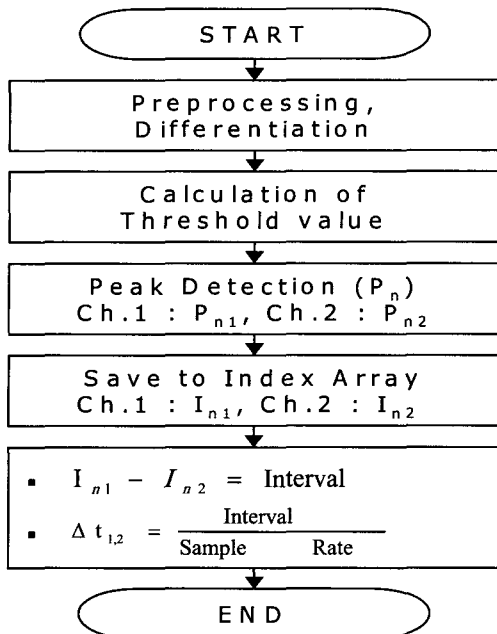


그림 5. 맥파 전달 시간차 분석 흐름도
Fig. 5. Flowchart to analyze the difference of PTT.

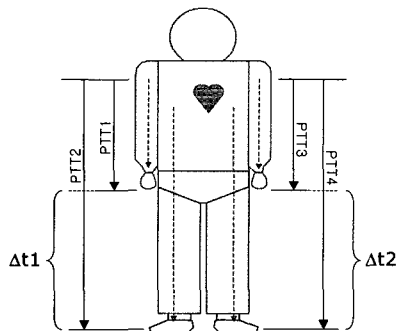


그림 6. 분석 파라미터
Fig. 6. Analysis parameter.

는 방법을 제시하고, 단순히 두 관로의 맥파가 말초에 도달하는 전달 시간의 차만을 이용하여 동맥 혈관의 특성을 분석하고자 하였다.

그림 6은 심장박동에 의하여 대동맥 기시부에서 생긴 맥파가 좌, 우측 지첨과 족지첨까지 전달되는 맥파 전달 시간(PTT1, PTT2, PTT3, 그리고 PTT4)과 두 관로의 맥파 전달 시간차(t_1, t_2)를 나타낸 것으로서 본 논문에서 제안한 분석 파라미터이다.

그림 6에서와 같이 심장박동에 의하여 대동맥 기시부에서 생긴 맥파가 지첨까지 전달되는 맥파 전달 시간과 족지첨까지 전달되는 맥파 전달 시간의 차는 아래의 식과 같이 표현된다.

$$t_1[\text{sec}] = \text{PTT1} - \text{PTT2}$$

$$t_2[\text{sec}] = \text{PTT3} - \text{PTT4}$$

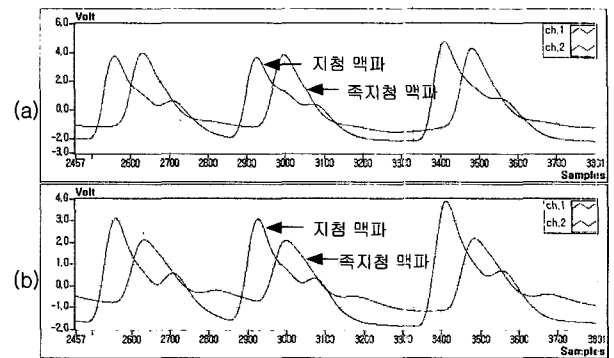


그림 7. 14세 피검자 지첨, 족지첨 맥파 파형 (a)좌, (b)우
Fig. 7. Pulse wave in toe and tip of the finger for subject aged 14 years (a) right, (b) left.

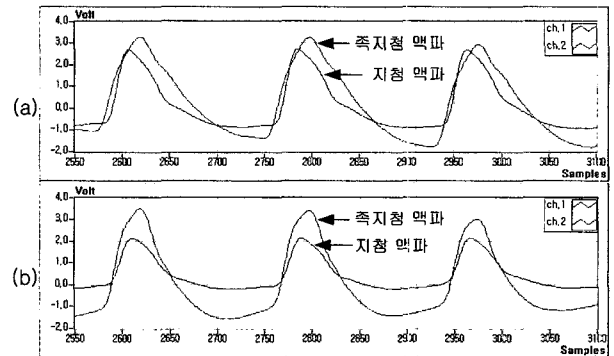


그림 8. 72세 피검자 지첨, 족지첨 맥파 파형 (a)좌, (b)우
Fig. 8. Pulse wave in toe and tip of the finger for subject aged 72 years (a) right, (b) left.

III. 실험 및 고찰

1. 데이터 취득

데이터 취득은 51명의 피검자를 대상으로 피검자가 누워있는 상태에서 5분간 안정을 취한 후, 2분간 2회씩 데이터를 취득하였다.

그림 7과 그림 8은 각각 14세와 72세의 좌, 우측 지첨과 족지첨에서 얻은 맥파를 보인 것으로서 12세에 비해 74세 피검자의 경우 지첨과 족지첨의 파형이 매우 근접하고 파형의 형태도 많이 왜곡되어 있음을 알 수 있다.

2. 맥파 전달 시간(PTT) 계측

그림 9는 좌측의 지첨과 족지첨에서 측정된 맥파 신호의 시간차를 구하는 과정을 나타낸 것이다.

두 지점에서 측정된 맥파 신호는 전처리 과정을 통하여 특징점을 검출하고, 검출된 특징점의 위치정보를 인덱스 어레이에 저장한 다음 두 신호간 위치정보 값의 차를 구하여 샘플링 율로 나누어줌으로써 맥파 전달 시간차를 계측한다.

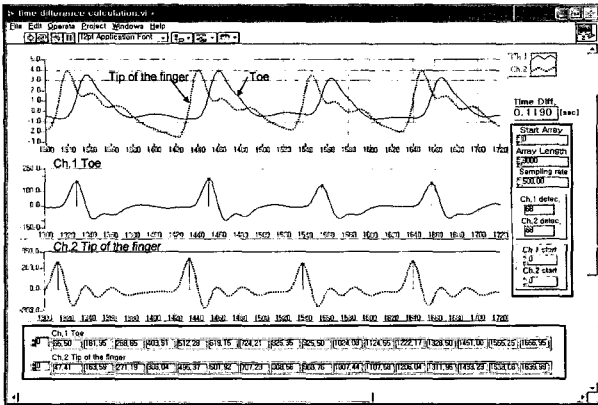


그림 9. 맥파 전달 시간(PTT) 측정
Fig. 9. Measuring the difference of PTT.

3. 상관관계 분석

그림 10은 전체 피검자 51명의 좌, 우측 맥파 전달 시간 측정 결과를 도식화 한 것이다. 측정 결과 연령에 따른 맥파 전달 시간이 선형적인 변화를 보이는 것을 알 수 있다. 1차 회귀분석 결과 좌측 0.798, 우측 0.806의 상관관계를 보였다.

그림 11은 피검자의 신장으로 맥파 전달 시간을 정규화한 데이터를 도식화한 것으로서 1차 회귀분석 결과 좌측은 0.813 우측은 0.816으로 정규화 하기 전보다 높은 상관관계를 보였다.

표 1은 피검자 51명에 대한 맥파 전달 시간차 분석 결과를 피검자의 신장으로 정규화하기 전, 후로 구분하여 나타낸 것으로서 상관계수, 표준편차, 그리고 1차 선형 회귀식을 나타냈다.

IV. 결 론

본 논문의 목적은 용적맥파 신호만을 이용하여 혈관의 노화 정도 및 경화 정도와 관련이 있는 동맥 혈관 특성을 보다 종합적으로 분석하는 새로운 방법을 제안하고 고찰하는 것이다.

이를 위하여 혈관의 노화 정도와 경화 정도를 측정하는 이상적인 정보인 혈관의 탄력성과 직접적인 관련이 있는 분석 파라미터를 제안하는 것과 좌, 우측 지침과 족지침에 이르는 4개 동맥 관로의 말초에서 측정할 수 있는 4채널 용적맥파 시스템을 구현하였다.

따라서 본 논문의 결론은 다음과 같다.

본 논문에서 구현한 4채널 용적맥파 시스템은 반사식 변환기를 적용하여, 4채널 모두 동일한 구조로 변환기를 설계하여 10대에서 80대에 이르는 연령의 51명의 피검자

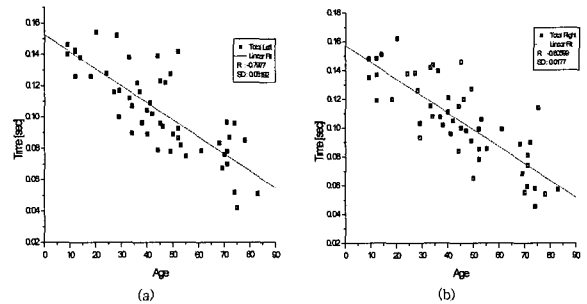


그림 10. 맥파 전달 시간차 분석 결과 (a) 좌, (b) 우
Fig. 10. Analysis results for difference of pulse wave transit time (a) right, (b) left.

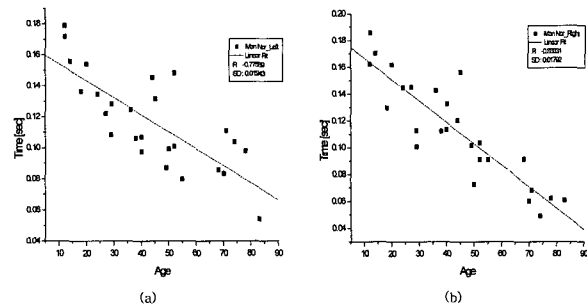


그림 11. 정규화된 맥파 전달 시간차 분석 결과 (a) 좌, (b) 우
Fig. 11. Analysis results for normalized difference of pulse wave transit time (a) right, (b) left.

표 1. 정규화 전, 후 맥파 전달 시간차 비교
Table 1. Compare before with after normalized for difference of pulse wave transit time.

정규화 전	Δt_1	Δt_2
상관계수 (R)	-0.79770	-0.80599
표준편차 (SD)	0.06192	0.01770
선형회귀식	$Y = -0.00109X + 0.15236$	$Y = -0.00117X + 0.1571$
정규화 후	Δt_1	Δt_2
상관계수 (R)	-0.81345	-0.81605
표준편차 (SD)	0.02014	0.02104
선형회귀식	$Y = -0.00137X + 0.17928$	$Y = -0.00144X + 0.18385$

를 대상으로 안정적으로 사용할 수 있었다. 따라서 기능과 재현성에서 연구 목적에 부합하였으며 실용성이 있음을 확인할 수 있었다.

제안된 분석 파라미터는 선형 회귀 분석법을 이용한 평가에서 연령에 따른 변화를 보였으며, 전체 피검자 (n=51)를 대상으로 한 분석에서 얻어진 상관관계 분석 결과 좌측에서 0.79770, 우측에서 0.80599를 나타냈으며, 또한 피검자의 신장으로 정규화된 데이터에서 얻어진 상관계수는 좌측에서 0.81345, 우측에서 0.81605로 정규화하기 전보다 다소 높은 결과를 보였다.

따라서 본 논문에서 제안한 파라미터는 동맥 혈관 특성을 분석하는 지표로 이용되는 것이 가능하리라 판단되어진다.

또한 향후 임상연구, 상품화 연구 과정을 수행하면 신체 전반에 걸친 병리적인 면과 질병 예후에 대한 판단 자료를 제공하는 것이 가능하리라 기대된다.

참고 문헌

[1] 이봉교, 박영배, 금태희, "한방진단학", 정보사, 1997.

[2] 이봉교, 진맥 현대화의 이론과 실제, 정보사, 2003

[3] Haruko Takada, Kaei Washino, Joanne S. Harrell, Hirotoishi Iwata, "Acceleration plethysmography to evaluate aging effect in cardiovascular system", Medical Progress through Technology, Vol. 21, pp. 205-210, 1997.

[4] Itsugi Nagatomo and Morikuni Takigawa, "Relationship between Carotid Arterial Blood Flow and Accelerated Plethysmogram in the aged, International Medical Journal, Vol. 5, pp. 269-272, 1998.

[5] Luiz A. Bortolotto, Jacques Blacher, Takeshi Kondo, Kenji Takazawa and Michel E. Safar, "Assessment of vascular aging and atherosclerosis

in hypertensive subjects, Second derivative of photoplethysmogram versus pulse wave velocity", American journal of hypertension, Vol. 13, pp. 165-171, 2000.

[6] F. J. Callaghan, L. A. Geddes, C. F. Babbs, J. D. Bourland, "Relationship pulse-wave velocity and arterial elasticity", Med. & Biol. Eng. & Comput., Vol. 24, pp.248-254, 1986.

[7] W. Chen, T. Kobayashi, S. Lchikawa, Y. Takeuchi, "Continuous estimation of systolic blood pressure using the pulse arrival time and intermittent calibration", Med. & Biol. Eng. & Comput., Vol. 38, pp.569-574, 2000.

[8] Michael O. Rourke, "Arterial Stiffness, Systolic Blood Pressure, and Logical Treatment of Arterial Hypertension", Hypertension, Vol. 15, No. 4, pp.339-347, April 1990.

[9] M. W. Ramsey, W. R. Stewart, C. J. H. Jones, "Real-time measurement of pulse wave velocity from arterial pressure waveforms", Med. & Biol. Eng. & Comput., Vol. 33, pp.636-642, 1995.

[10] K. B. Chandran, D. Sc., "CARDIOVASCULAR BIOMECHANICS", New York University Press, 1992.

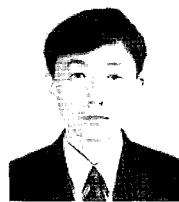
저자 소개



변 미 경(학생회원)
 2001년 2월 한라대학교
 전자공학과(공학사)
 2003년 2월 명지대학교
 전자공학과(공학석사)
 2003년 3월 ~ 현재 명지대학교
 전자공학과(박사과정)

<주관심분야: 생체신호처리, 혈관특성 분석, 패턴 인식 >

김 정 국(정회원)
 제41권 SC편 4호 논문 참조
 현재 명지대학교 전자공학과 교수



한 상 휘(정회원)
 2000년 2월 명지대학교
 전자공학과(공학석사)
 2004년 2월 명지대학교
 전자공학과(공학박사)
 1992년 ~ 현재 (주)만도
 중앙연구소 선임연구원

<주관심분야: Millimeter wave 응용, 센서 신호처리, 자동차 전자장치>

허 응(정회원)
 제41권 SC편 4호 논문 참조
 현재 명지대학교 전자공학과 교수