

임피던스 혈량측정법을 이용한 손가락 혈류량의 측정

김 덕원* · 송 철규* · 김 원기* · 이 명호**
* 연세대학교 의과대학 의용공학과
** 연세대학교 공과대학 전기공학과

Development of Impedance Plethysmography and Measurement of Digital blood Flow

Deok Won Kim* . Chul Gyu Song* . Won Ky Kim* . Myong Ho Lee**
* Dept. of Medical Eng., College of Medicine, Yonsei Univ.
** Dept. of Electrical Eng., Yonsei Univ.

- Abstract -

In this study electrical impedance plethysmograph was developed and each ten digital blood flow was measured for eight normal males and a patient with digital arterial reconstruction surgery. Blood flow of the digit with surgery was approximately forty percent compared to that of the other normal digit. For the normal subjects, right-handed subjects generally have larger blood flow in right fingers than that in left fingers while it was reverse for the left-handed subjects. The relative average magnitude of the digital blood flow is the third, first, second, fourth, and fifth digit in descending order for the left and right hand, respectively. Blood flow of the fifth digit for all subjects except one was the smallest among the five digits.

2. 임피던스 혈량 측정법

본 연구에서 손가락 혈류량 측정을 위해 개발한 임피던스 혈량 측정기(impedance plethysmograph)는 임피던스 심장기록기의 원리와 동일하나 손가락 혈류량은 심박동량에 비해 매우 작은 양이므로 매우 높은 이득이 필요하다.

자극 정전류원으로는 100 kHz, 1 mA의 정현파를 사용하여 그림 1에서와 같이 전극 1번과 4번을 통하여 흘려주고 감지전극 2번과 3번 사이에서 혈류량의 변화에 의한 전압변화를 측정하는데 이것을 정전류로 나눈 값이 임피던스의 변화(ΔZ)가 되는 것이다. 본 측정시스템은 그림 2에서와 같이 정현파 발전부, 발전된 정현파의 전류를 증폭하는 정전류원 발생부, 임피던스 변화를 검출하여 복조시키는 복조부, 저역통과 필터를 거쳐 전극 2와 3 사이의 평균 임피던스(Z), 고역통과 필터를 거쳐 혈류량의 변화에 해당하는 ΔZ 를 추출한 후 증폭과 저역통과 필터 및 60 Hz notch 필터를 통해 잡음을 제거시켜 ΔZ 를 출력시키고, 이 ΔZ 를 미분기 및 저역통과 필터를 통과시켜 혈류에 해당하는 dZ/dt 를 출력시킨다.

측정된 Z , $dZ/dt(\max)$, 좌심실 구혈기간(T), 전극 2와 3 사이의 거리(L)와 혈액의 고유저항($\rho=150 \Omega \cdot \text{cm}$)을 다음 식에 대입하여 손가락 혈류량을 구하였다.

혈류량(ml) = $\rho (L/Z)^2 \cdot dZ/dt(\max) \cdot T$ (1)
그림 3은 피검자로부터 측정된 ΔZ , dZ/dt , 그리고 Z 의 파형으로서 T 와 $dZ/dt(\max)$ 가 (a)와 (b)에 각각 표시되어 있으며 측정된 값은 다음과 같다.

$Z = 170 \Omega$, $dZ/dt(\max) = 1.87 \Omega/S$, $T = 0.31 S$
또한 전극 2와 3 사이의 거리 $L = 2.2 \text{ cm}$, 혈액의 고유저항(ρ)은 $150 \Omega \cdot \text{cm}$ 이므로 이 값들을 식(1)에 대입하면
혈류량 = $150 \times (2.2/170)^2 \times 1.87 \times 0.31 = 0.0146 \text{ ml}$ 이 된다.

1. 서론

동맥재건술의 여부를 예측하는데 가장 좋은 파라미터로서는 수술한 손가락의 혈류량으로서 임피던스 측정법을 이용하면 절대혈류량 및 시간에 따른 혈류량의 변화를 간단히 측정할 수 있으므로 그 환자의 정상 손가락의 혈류량 및 정상인의 기준치와 비교하여 재수술 시기를 신속히 알 수 있다. 동맥재건술의 경우 예후 판단은 매우 중요한 것으로서 현재의 피부색깔로 판단하는 방법은 의사의 개인차가 크고 오랜 경험이 필요할 뿐만 아니라 초기에 수술 여부를 알아내는데 부적합하다. 따라서 본 연구에서는 정상인의 손가락 혈류량에 대한 표준을 마련함으로써 이를 바탕으로 앞으로의 수술환자에 대한 성공여부를 예측하는 자료로 이용하고자 한다.

본 연구에서 개발한 임피던스 혈량측정기의 원리 및 회로는 김동[1]이 개발한 임피던스 심장기록기와 유사하고, 임피던스 방법은 간편한 장점으로 함께 정확도도 높은 것으로 밝혀졌다[2,3].

임피던스 방법의 정확도 규명을 위하여 Allison[2] 등이 1965년에 기계적인 방법과 임피던스 방법을 동시에 적용하여 평균 3% (0 - 10%)의 차이가 있음을 밝혔고 Nybore[3]는 공기(pneumatic)와 임피던스 혈량 측정기를 이용하여 동시에 손가락의 혈류량을 측정하여 임피던스 방법의 정확성을 증명하였다.

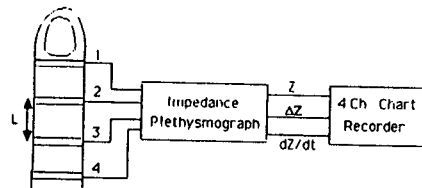


그림 1 실험장치의 구성도
Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

피검자에 따라 잡음의 정도가 상이하나 팔이나 다리에 접지한 결과 매우 깨끗한 파형을 얻을 수 있었다. 그림 4는 인체에 접지가 없다가 접지를 다리에 했을 때의 ΔZ , dZ/dt , Z 파형을 보여주고 있다.

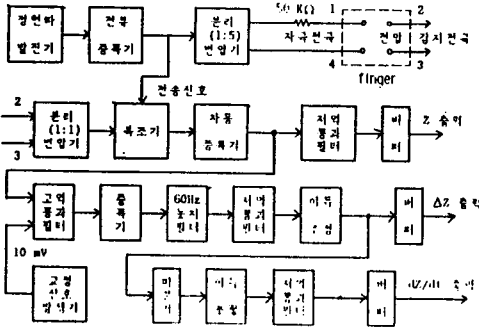


그림 2 임피던스 혈류량 측정기의 블록선도
Fig. 2 Block diagram of Impedance plethysmograph

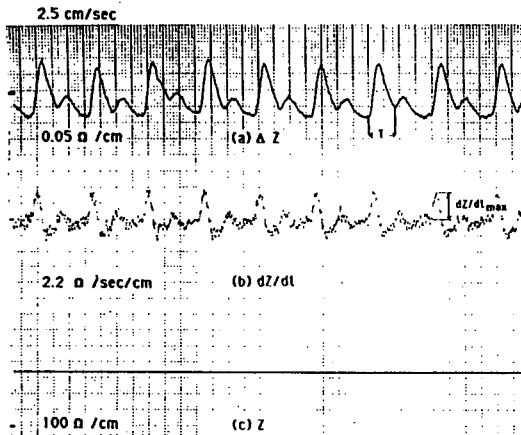


그림 3 한 피검자로부터 측정한 ΔZ , dZ/dt , Z 의 파형
Fig. 3 Waveforms of ΔZ , dZ/dt , and Z measured from a subject

3. 실험 방법

실험대상은 정상인 남자 8명과 손가락 봉합환자 1명을 대상으로 피검자의 열 손가락의 혈류량을 측정하기 위해 두개의 자극전극과 두개의 전압감지 전극을 이용하였다. 전극은 알루미늄박에 접착 테이프를 입힌 일회용 전극(Label Tech., MR001, Type C)을 사용하였다.

또한 심장에 대한 손가락의 상대위치에 따라 혈류량이 변화하기 때문에 손을 테이블에 올려놓고 편안한 자세에서 측정을 하였다. 손가락을 포함한 사지의 혈류량은 절대량(ml/min/100 ml tissue)으로 표시하기 때문에 식(2)를 이용하여 환산하였다.

$$\text{ml/min/100 ml tissue} = (\text{ml/beat}) \times \text{HR} \times 100/\text{vol}(2-3) \quad (2)$$

여기서 $\text{vol}(2-3)$ 은 전극 2와 3사이의 손가락의 용적으로서 전극 2와 3사이의 각각의 둘레를 측정하여 평균을 내고 식(3)과 (4)를 이용하여 $\text{vol}(2-3)$ 을 계산하였다.

$$P(\text{둘레}) = 2\pi r, \quad r = P/2\pi \quad (3)$$

$$\text{vol}(2-3) = \pi r^2 \times L = \pi (P^2 / 4\pi^2) \times L = P^2 \times L / 4\pi \quad (4)$$

여기서 L 은 전극 2와 3사이의 거리이다.

4 채널 종이 기록기(Sanel, 8K-21)를 이용하여 Z , ΔZ , dZ/dt 를 각 손가락 당 약 10초간 파형을 기록하고 적어도 4개의 혈류량을 계산하여 평균을 구했다.

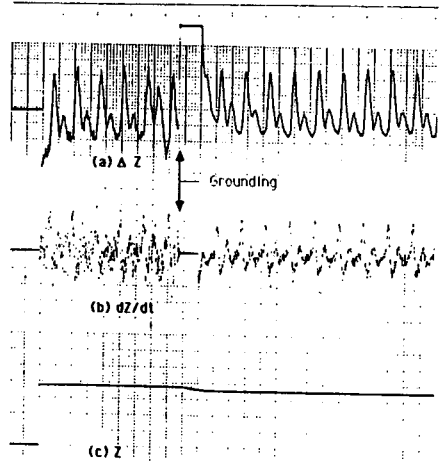


그림 4 피검자에 접지를 안하였을 때와 했을 때의 ΔZ , dZ/dt , Z 파형의 변화

Fig. 4 Change of ΔZ , dZ/dt , and Z waveforms from non-grounding to grounding

4. 실험 결과

표 1은 손가락을 봉합수술한 환자(P)와 정상인 남자 8명의 열 손가락의 1분당 손가락 부피 100 ml의 혈류량과 평균(AVG) 및 표준편차(SD)를 보여주고 있다. 이 표에서 No 1과 No 2 피검자는 왼손잡이(L)이며 L1은 피검자 왼손의 엄지 손가락이며 R5는 오른손의 새끼 손가락이다. AVG(L)과 AVG(R)은 각각 피검자의 왼손 손가락 5개 및 오른손 손가락 5개의 평균 혈류량이며 AVG는 피검자의 열 손가락의 평균 혈류량이다.

환자(P)는 왼손 네째 손가락(L4)의 봉합수술을 받은 환자로서 정상인 오른손 네째 손가락의 혈류량인 5.4 ml/min/100 ml of digit에 비하여 절반도 안되는 2.3으로서 수술 받은 손가락의 혈류량이 상당히 작음을 알 수 있으며 또한 왼손 5개 손가락의 평균 혈류량인 6.1과 비교하여도 비정상임을 알 수 있다. 환자 데이터가 하나밖에 없어 신뢰도에는 문제가 있지만 환자의 수술 받은 손가락과 나머지 정상 손가락의 혈류량이 차이가 많음을 미루어 보아 봉합수술한 손가락의 예후를 판단하는데 임피던스 혈류량 측정법의 유효성을 확인할 수 있을 것이다.

정상인은 왼손잡이 두명(No 1, 2)과 오른손잡이 6명(No 3-8)을 대상으로 하였는데, 왼손잡이 두명의 경우 각각 왼손 다섯 손가락의 평균(14.5, 12.2)이 오른손 다섯 손가락의 평균(11.7, 12.0)보다 커 왼손잡이의 왼손 손가락의 혈류량이 오른손 보다 크다는 사실을 발견하였는데 이것은 예상했던 결과이다. 또한 오른손잡이의 경우, 피검자 No 3만 제외하고 나머지 다섯명(No 4-8)의 오른손 다섯 손가락의 평균 혈류량이 왼손의 평균 혈류량보다 큰 것을 알 수 있었다. 모든 정상인의 각 손가락의 평균(AVG±SD)을 보면 왼손과 오른손 모두 혈류량 크기의 순서가 세째, 첫째, 둘째, 네째, 다섯째 순이며 두손 모두 혈류량이 제일 작은 다섯째는 제일 큰 세째의 각각 2/3이다. 현재까지 열손가락의 혈류량에 대한 연구가 없어서 이러한 결과를 비교할 수는 없지만 본 연구에서 측정된

정상인 8명의 오른손 가운데 손가락의 혈류량인 9.7-19.1(ml/min/100 ml of digit)은 Nyboer[4]가 측정 한 가운데 손가락의 혈류량인 13.8-19.9와 상당히 근사하므로 측정된 혈류량의 절대값의 정확도를 간접적으로 확인하였다.

손가락을 포함한 사지의 혈류량은 측정시의 실내 온도, 심장에 대한 상대적 위치, 운동여부 등에 따라 변화하는데 Nyboer[4]는 손가락 운동을 하기 전과 한 직후의 혈류량을 측정하였는데 약 35% 정도의 증가를 확인하였다. 본 실험은 실내온도가 21℃ 정도에서 수행되었는데 실내온도가 높은 여름철에는 체온 조절을 위하여 혈관이 확장함으로 손가락의 혈류량이 증가할 것으로 예측된다.

2. R. D. Allison, and J. Nyboer, The electrical impedance plethysmograph determination of pulse volume and flow in ionic circulatory systems. New Istanbul Contr. Clin. Sci., 7:281-306, 1965.
3. J. Nyboer, Electrical Impedance Plethysmography, 2nd ed., Charles C. Thomas, Ill, 1970.
4. J. N. Nyboer, Electrical impedance plethysmography: A physical and physiologic approach to peripheral vascular study, Circulation, Vol. 11, 811-821, 1959.

표 1 한명의 환자(P)와 8명 정상인(No 1-8)으로 부터 측정 한 열 손가락 혈류량

ml/min/100 ml of digit										
P	No1	No2	No3	No4	No5	No6	No7	No8	Avg±SD	
L1	6.7	12.5	13.3	14.0	8.5	11.7	9.6	9.5	10.4	11.1±2.0
L2	7.9	14.6	12.3	11.6	10.5	11.0	8.7	7.4	8.2	10.5±2.4
L3	9.1	18.0	14.4	13.0	11.0	12.6	9.3	10.2	10.3	12.4±2.8
L4	*2.3	16.6	11.7	11.0	7.5	12.3	8.8	7.8	8.1	10.5±3.1
L5	4.4	10.7	9.4	9.7	6.9	7.4	7.4	7.3	7.1	8.2±1.5
R1	6.5	12.1	14.3	16.3	12.2	14.9	11.9	8.1	11.5	12.7±2.5
R2	5.5	11.2	12.6	7.9	13.0	15.1	9.7	8.3	9.9	11.0±2.5
R3	7.9	15.4	12.1	10.8	16.2	19.1	13.1	9.7	14.9	13.9±3.1
R4	5.4	10.5	11.4	8.1	13.4	10.1	12.6	7.9	10.3	10.5±1.9
R5	5.0	9.4	9.4	7.2	9.6	9.4	11.6	7.7	9.3	9.2±1.3
Avg(L)	6.1	14.5	12.2	11.9	8.8	11.0	8.8	8.4	8.8	10.6±2.7
±SD	±2.7	±3.0	±1.9	±1.7	±1.8	±2.1	±0.8	±1.3	±1.5	
Avg(R)	6.1	11.7	12.0	10.1	12.9	13.7	11.8	8.4	11.2	11.5±2.8
±SD	±1.7	±2.3	±1.8	±3.7	±2.4	±4.0	±1.3	±0.8	±2.2	
AVO	6.1	13.1	12.1	11.0	10.9	12.4	10.3	8.4	10.0	11.0±2.7
±SD	±2.0	±2.9	±1.7	±2.9	±2.9	±3.3	±1.9	±1.0	±2.2	

5. 결론

본 연구에서는 측정이 간편하고 정확한 임피던스 혈류측정기를 개발하여 측정이 복잡한 기존의 유체 또는 기체를 이용한 기계적 혈류측정기를 대체할 수 있었다. 개발된 측정기를 이용하여 손가락이 절단되어 봉합수술을 받은 환자의 손가락 혈류량이 정상 손가락의 약 40% 정도밖에 안됨을 확인하였다. 그리하여 손가락 절단 후 봉합수술을 받은 환자의 수술 후 혈류량을 모니터링하여 수술 경과를 판단하는데 중요한 지표로 삼을 수 있을 것으로 기대된다.

또한 정상인 남자 8명의 열 손가락의 혈류량을 측정하여 한국인의 표준 혈류량에 대한 기준을 마련하였으며 오른손잡이는 오른손 손가락, 왼손잡이는 왼손 손가락의 평균 혈류량이 각각 왼손, 오른손 보다 크다는 사실을 확인하였으며 왼손과 오른손 모두 새끼 손가락의 혈류량이 제일 작았다.

앞으로의 과제는 봉합수술을 받은 환자의 경우 수술이 성공하려면 정상 혈류량의 몇 % 정도가 되어야 하는가를 결정하는 것이다.

참 고 문 헌

1. 김덕원, 김정열, 김원기, 박상희, 임피던스 심장기류기의 개발과 응용, 전자공학회는문지, 제 27권, 제 3호, 382-390, 1990.