

생체임피던스에 의한 상지운동 감지를 위한 최적 전극 위치의 평가 및 검증

*,**안선희, *,**김수찬, *,**남기창, **김덕원
*연세대학교 대학원 생체공학협동과정
**연세대학교 의과대학 의학공학교실
전화 : (02) 361-5404 / 팩스 : (02) 363-9923

Evaluation and Verification of Optimal Electrode Configurations for Detection of Arm Movement Using Bio-Impedance

*,**Seon Hui Ahn, *,**Soo Chan Kim, *,**Ki Chang Nam, **Deok Won Kim
*Graduate Program in Biomedical Engineering, Yonsei University
**Department of Medical Engineering Yonsei University College of Medicine
E-mail : sunny0105@yumc.yonsei.ac.kr

Abstract

In this study, we constructed a four-channel impedance measurement system including a two-channel goniometer to analyze human arm movement. Impedances and joint angles were simultaneously measured for wrist and elbow movements. As the impedance changes resulting from wrist and elbow movements depended heavily on electrode placement, we determined the optimal electrode configurations for those movements by searching for high correlation coefficients, large impedance changes, and minimum interferences in ten subjects (age: 29+6). Our optimal electrode configurations showed very strong relationships between the wrist joint angle and forearm impedance (correlation coefficient = $0.95+0.04$), and between the elbow joint angle and upper arm impedance (correlation coefficient = $-0.98+0.02$). Although the measured impedances changes of the wrist ($1.1+1.5$ ohm) and elbow ($-5.0+2.9$ ohm) varied among individuals, the reproducibilities of wrist and elbow impedance changes of five subjects were $5.8+1.8$ % and $4.6+1.4$ % for the optimal electrode pairs, respectively. We propose that this optimal electrode configuration would be useful for future studies in-

volving the measurement of accurate arm movements by impedance method.

I. 서론

인간의 상지운동을 분석할 때 임피던스 방법을 이용하면 근전도(EMG, electromyogram)에 비교해 간단한 계산으로 측정된 데이터로부터 관절의 각도를 쉽게 얻을 수 있으며, 각도계에 비해 운동의 제약을 덜 받는다[1,2]. 또한, 영상분석기와 비교해 값이 저렴하고, 넓은 공간을 요구하지 않는 등의 장점을 가지고 있다[2]. 그러나 임피던스 방법은 임피던스 측정을 위해 부착한 전극 위치에 따라 각 관절 운동의 변화에 대한 상관성이 달라지고 개인마다의 차이도 발생한다[3]. 따라서 측정하고자 하는 운동에 대한 정확한 정보를 얻기 위해서는 관절의 변화를 잘 나타내는 최적의 전극 위치를 찾는 것이 중요하다.

본 연구에서는 최적의 전극 위치를 찾기 위해 10명의 피실험자를 대상으로 각각의 다양한 전극 위치에서 상지운동실험을 하였다. 실험결과를 통하여 상지의 손목과 팔꿈치 관절 각도와 임피던스의 변화와의 관계를 정량적으로 분석하여 최적의 전극 위치를 선정하였다.

II. 연구 내용 및 방법

임피던스 측정법은 Nyboer (1970)가 혈류량 측정에

적용시킨 공식이 이용되어온 이후로, 이를 수학적으로 간략화 시킨 Swanson (1976)의 공식이 많이 사용되고 있다[4-6]. 본 연구에서는 임피던스 변화 요인을 근육과 혈관의 단면적 변화로 가정하였다[7]. 식 (1)과 같이 전압 감지 전극의 거리가 일정할 경우, 정전류원에 의해 측정된 전압은 비저항과 측정 부위의 거리에 비례하고, 근육과 혈관의 단면적에 반비례한다. 따라서 근육이 수축 혹은 이완하게 될 경우 근육의 단면적과 혈관의 단면적 변화로 인해 임피던스가 변화한다[1].

$$V = I \cdot (Z_m // Z_b) = I \cdot (\rho_m \frac{L}{A_m} // \rho_b \frac{L}{A_b}) \quad (1)$$

- V : 전압감지 전극간의전위 [V]
- I : 정전류 [mA]
- L : 전압감지 전극간의 거리 [cm]
- A_m : 전압감지 전극간 근육의 단면적 [cm²]
- A_b : 전압감지 전극간 혈관의 단면적 [cm²]
- ρ_m : 근육의 비저항 [Ω·cm]
- ρ_b : 혈액의 비저항 [Ω·cm]

그림 1과 같이 손목 운동(wrist movement)은 요골(radius)과 척골(ulna)에 부착된 근육인 손목 펴기 근육(extensor carpi muscles)과 그림 2와 같은 손목 굽힘근(flexor carpi muscles)에 의해 손목의 굽힘과 펴기 동작이 결정된다[9,10,11]. 팔꿈치 운동 (elbow movement)은 그림 3과 같이 팔꿈치 관절의 주된 펴기 근인 삼두박근(triceps)에 의해 팔의 펴기 동작이 이루어지고, 그림 4와 같이 팔꿈치 관절의 주된 굽힘 근인 상완근(brachialis), 상완노근(brachioradialis), 이두박근(biceps)에 의해 팔꿈치의 굽힘 동작이 이뤄진다[9,10,11]. 각각의 운동에 관여하는 근육들이 이완과 수축할 때 나타나는 근육의 단면적 변화로 인한 생체 임피던스 변화로써 상지운동을 분석할 수 있다.

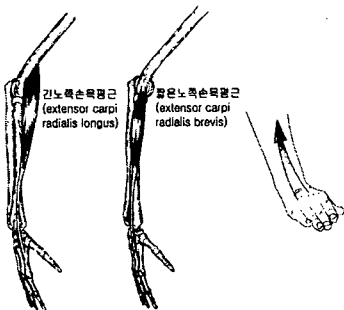


그림 1. 손목의 펴기 운동과 관계 있는 근육

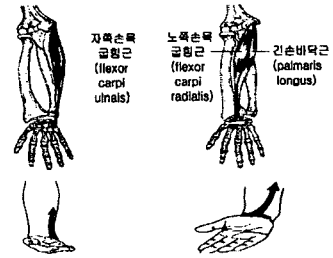


그림 2. 손목의 굽힘 운동과 관계있는 근육

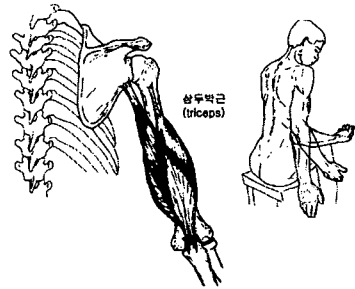


그림 3. 팔꿈치의 펴기 운동과 관계있는 근육

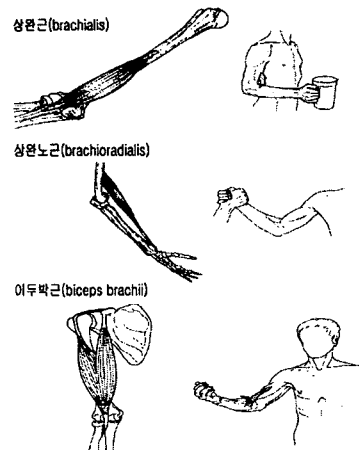


그림 4. 팔꿈치의 굽힘 운동과 관계있는 근육

다양한 상지 운동이 있으나 실험에 사용한 동작은 상지 운동의 대표적인 동작인 손가락을 편 상태에서의 손목의 굽힘(flexion)과 펴기(extension), 손가락과 손목을 편 상태에서의 팔꿈치의 굽힘(flexion)과 펴기(extension)이다.

그림 5 에서 보는 바와 같이, 6개와 8개의 전압전극을 각각 상완(upper arm)과 전완(forearm)에 부착하였다. 손목운동 감지를 위한 6개의 전극(1번부터 6번) 중 두 전극 사이에서 임피던스 변화를 측정하였고, 팔꿈치 운동의 감지를 위해 8개의 전극(7번부터 14번) 중 두 전극 사이에서 임피던스 변화를 측정하였다.

손목운동을 측정하는데 6개의 전극 중에서 2개의 전극을 선택하여 쌍을 이루는 경우의 수는 $15(6 \times 5 / 2)$ 이다. 그러나 (1-2), (3-4), 그리고(5-6)과 같이 전극 쌍과 전류가 흐르는 방향이 직각이면 임피던스가 측정되지 않아 결국 쓸 수 있는 전극의 쌍은 12쌍이 된다. 이 12쌍 중에서 손목운동을 하는데 있어 최적의 전극 쌍이 선정되었다. 같은 방법으로 팔꿈치 운동을 측정하는데 8개의 전극 중에서 2개의 전극을 선택하여 쌍을 이루는 경우의 수는 $28(8 \times 7 / 2)$ 이고 전극 쌍이 전류의 흐름과 직각인 이유로 12쌍을 제외한 나머지 16쌍의 전극만이 임피던스 측정이 가능하다. 마지막으로 각도계는 그림 6과 같이 손목과 팔꿈치에 부착하였다.

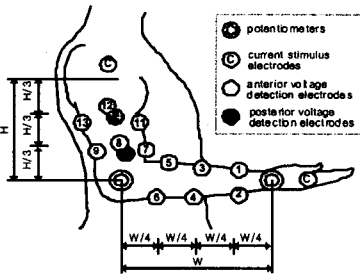


그림 5. 손목과 팔꿈치 운동을 할 때, 최적의 전극 선정을 위한 전극과 각도계의 위치

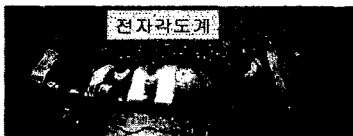


그림 6. 전극과 전자각도계를 부착한 모습

임피던스 측정을 위해 제작된 4채널 임피던스 측정 시스템은 전기적 안전을 고려하여 50kHz, 300 μ A의 정전류를 선택하였다. 전극은 직경 10mm의 일회용 Ag-AgCl(REDOT, 3M, USA)을 사용하였다.

상지운동에 의한 임피던스 변화는 각도의 변화와 비교, 분석하였다. 실험에서 최적의 전극 쌍을 선정하기 위해 측정하는 것은 (1)움직임에 의한 임피던스 변화량, (2)임피던스 변화와 관절각도 변화간의 상관계수,

(3)각 운동에 대한 SNR I 또는 SNR II이다. "임피던스 변화량"은 손목 또는 팔꿈치를 펴고(extension) 굽히는(flexion) 동작을 할 때 임피던스의 파형에서 최대값과 최소값의 차이이다. "SNR I"은 손목운동 측정 시 손목운동에 의한 임피던스 변화에 대한 팔꿈치운동에 의한 임피던스 변화의 비율이고, "SNR II"는 팔꿈치 운동 측정 시 팔꿈치 운동에 의한 임피던스 변화에 대한 손목운동에 의한 임피던스 변화의 비율로 정의하였다. 표 1과 표 2에서 "임피던스 변화량", "상관계수", "SNR I" 그리고 "SNR II"는 내림차순으로 등수를 매겼다. "총점"은 각 등수의 합으로, 총점이 가장 낮은 전극 쌍이 최적의 전극이 된다.

III. 실험결과 및 고찰

표 1은 "임피던스 변화량", "상관계수", "SNR I", 그리고 손목운동 감지를 위한 최적의 전극을 선정하기 위한 세 기준의 각 등수를 합한 "총점"을 보여주고 있다. [1-3]전극의 쌍이 가장 낮은 "총점" 5로 손목운동 감지를 위한 최적의 위치로 선정되었다. 이 쌍은 "상관계수", "SNR I" 부분에서 가장 좋았다. 두 번째로 낮은 "총점" 7을 얻은 [2-4]전극의 쌍은 "상관계수"는 좋았지만 "임피던스 변화량"과 "SNR I"이 두 번째로 좋았다. 손목운동 감지를 위한 최적의 전극 쌍[1-3]에서 한 피실험자가 손가락을 펴고 손목의 폼과(extension) 굽힘을(flexion) 16회 반복하여 손목 관절의 각도와 전완의 임피던스와의 상관관계를 측정된 결과 상관계수가 0.98로 측정되었다.

표 1. 손가락을 편 상태에서 손목운동을 할 때 12쌍의 전극에서 측정되는 3가지 기준의 값과 총점. []:전극의 쌍, ():등수

전극의 쌍	임피던스 변화량(Ω)	상관계수	SNR I	총점
[1-3]	1.6 ± 1.1 (3)	0.95 ± 0.04 (1)	1.2 ± 1.0 (1)	5 (1)
[2-4]	1.5 ± 0.9 (4)	0.95 ± 0.02 (1)	1.0 ± 0.6 (2)	7 (2)
[1-4]	1.9 ± 1.7 (2)	0.78 ± 0.59 (4)	1.0 ± 0.8 (2)	8 (3)
[1-5]	2.3 ± 3.8 (1)	0.84 ± 0.16 (3)	0.4 ± 0.6 (6)	9 (4)
[2-6]	1.5 ± 3.8 (4)	0.33 ± 0.85 (10)	0.8 ± 2.0 (4)	18 (5)
[4-5]	0.9 ± 1.4 (7)	0.60 ± 0.67 (5)	0.3 ± 0.3 (7)	19 (6)
[2-3]	0.8 ± 1.1 (8)	0.53 ± 0.76 (7)	0.5 ± 0.6 (5)	20 (7)
[1-6]	1.0 ± 1.1 (6)	0.71 ± 0.60 (8)	0.3 ± 0.4 (7)	21 (8)
[2-5]	0.8 ± 1.1 (8)	0.46 ± 0.72 (9)	0.3 ± 0.5 (7)	24 (9)
[4-6]	0.5 ± 0.5 (10)	0.62 ± 0.55 (6)	0.2 ± 0.1 (10)	26 (10)
[3-5]	0.5 ± 1.1 (10)	0.04 ± 0.73 (11)	0.1 ± 0.1 (11)	32 (11)
[3-6]	0.1 ± 0.6 (12)	0.01 ± 0.81 (12)	0.1 ± 0.1 (11)	35 (12)

표 2는 “임피던스 변화량”, “상관계수”, “SNR II”, 그리고 손목을 편 상태에서 팔꿈치 운동을 하는 동안 16개의 전극 쌍 중에서 최적의 전극 쌍을 찾기 위한 세 기준에 대한 등수의 합인 “총점”을 보여주고 있다. 상완의 [10-12]전극 쌍이 가장 낮은 “총점” 6으로 팔꿈치 운동 감지를 위한 최적의 전극 위치로 선정되었다. 이 전극 쌍은 “상관계수”와 “SNR II”부분에서 가장 좋았고, “임피던스 변화량”은 네 번째로 컸다. 팔꿈치운동 감지를 위한 최적의 전극 쌍[10-12]에서 피실험자의 팔꿈치를 펴고(extension) 굽힘을(flexion) 16회 반복하여 팔꿈치 관절의 각도와 상완의 임피던스와의 상관관계를 실험한 결과 상관계수가 -0.99로 측정되었다.

표 2. 손가락과 손목을 편 상태에서 팔꿈치 운동을 할 때 16쌍의 전극에서 측정되는 3가지 기준의 값과 총점. []:전극의 쌍, ():등수

전극의 쌍	임피던스 변화량(Q)	상관계수	SNR II	총점
[10-12]	-8.0±2.6 (4)	-0.98±0.02 (1)	18.0±8.7 (1)	6 (1)
[7-13]	-9.7±3.2 (1)	-0.97±0.01 (2)	16.6±14.3 (3)	6 (1)
[9-13]	-6.7±2.9 (5)	-0.98±0.02 (1)	17.8±9.2 (2)	8 (3)
[7-12]	-9.3±3.2 (2)	-0.97±0.01 (2)	15.0±7.2 (4)	8 (3)
[10-13]	-8.4±3.4 (3)	-0.97±0.03 (2)	12.9±7.4 (5)	10 (5)
[9-12]	5.8±2.7 (6)	-0.97±0.03 (2)	11.6±6.9 (7)	15 (6)
[10-14]	-5.0±2.0 (7)	-0.96±0.03 (7)	11.4±5.9 (8)	22 (7)
[7-11]	-4.6±3.2 (9)	-0.93±0.10 (9)	12.3±8.9 (6)	24 (8)
[8-13]	-4.2±3.5 (10)	-0.95±0.04 (8)	7.5±4.1 (11)	29 (9)
[10-11]	-4.1±2.3 (11)	-0.92±0.08 (10)	11.2±6.4 (9)	30 (10)
[7-14]	-4.9±3.4 (8)	-0.90±0.07 (11)	7.3±3.8 (12)	31 (11)
[9-14]	-3.4±3.5 (13)	-0.89±0.17 (12)	10.6±15.2 (10)	35 (12)
[8-12]	-3.7±2.9 (12)	-0.89±0.16 (12)	6.9±4.8 (13)	37 (13)
[9-11]	-2.3±2.1 (14)	-0.64±0.57 (14)	6.8±5.9 (14)	42 (14)
[8-11]	-0.2±2.6 (15)	-0.37±0.73 (16)	6.0±5.5 (15)	46 (15)
[8-14]	-0.0±2.7 (16)	-0.39±0.59 (15)	3.3±3.3 (16)	47 (16)

VI. 결론

본 논문에서는 생체임피던스를 이용하여 상지운동의 감지를 위한 각각의 전극 위치를 10명의 피실험자를 대상으로 정량적으로 평가함으로써 최적의 전극 위치를 연구하였다. 연구결과 각각의 전극은 전극이 위치하는 근육의 해부학적인 구조와 운동에 따른 근육 형태의 변화성격에 따라 운동을 감지하는 정도의 차이를 보였고, 피실험자의 상지의 길이와 근육의 부피 특성에 따른 임피던스의 변화량과 변화범위의 차이도 나타났다.

본 연구의 결과로 임피던스 방법을 이용한 운동분석 시 최적의 전극을 고려하여 연구해야 할 필요가 있다

고 사료되며, 추후 생체 임피던스를 이용한 자세분석, 동작분석, 등 생체역학 분야와 재활, 로봇의 원격 제어에 영향을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 김종찬, 김수찬, 남기창, 박민용, 김경환, 김덕원, “생체 임피던스 측정에 의한 상지 운동 감지 시스템,” *대한전기학회*, 제51권, 제 8호, 374-379쪽, 2002
- [2] T. Nakamura, Y. Yamamoto, and H. Tsuji, “Fundamental characteristics of human limb electrical impedance for biodynamic analysis,” *Med. Biol. Eng. Comput.*, 30, pp. 465-472, 1992.
- [3] S. C. Kim, K. C.g Nam, D. W. Kim, C. Y. Ryu, J. C. Kim, “Optimal Electrode Configuration For Detection of Arm Movement Using Bio-Impedance,” *2nd European Medical & Biological Engineering Conference*, Vienna, Austria, December 4-8, 2002
- [4] L. E. Baker, “Principles of the impedance techniques,” *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, vol. 8, no. 1, pp. 11- 15, 1989.
- [5] J. Nyboer, “Non-invasive sensing of cardiac, vascular and pulmonary volume dynamics,” *Bibliotheca Cardiologica*, vol. 31, pp. 42-51, 1973.
- [6] D. W. Kim, “Detection of physiological events by impedance,” *Yonsei Medical Journal*, vol. 30, no. 1, pp.1-11, 1989.
- [7] 山本 尚武, 山本 辰馬, 岡本 草雨, 軸屋 和明, 平上 二九三, 明石 謙, “步行分析のための下腿部 電気インピーダンスの 検討,” *用電子と生体工学*, vol. 22, no. 6, pp. 433-438, 1984.
- [8] B. H. Cornish, A Jacobs, B. J. Thomas, and L. C. Ward, “Optimizing electrode site for segmental bioimpedance measurements,” *Physiol. Meas.* 20, pp. 241-250, 1999
- [9] H. Gray, L. H. Bannister, M. M. Berry, and P. L. Williams, “Gray’s Anatomy,” *the Anatomical Basis of Medicine & Surgery*, 38th edn. Churchill Livingstone, 1995.
- [10] 조상현, *움직이는 해부학*, 영문출판사, 1999
- [11] S. J. HALL, *Basic biomechanics*, 2nd edn., Mosey, St. Louis, 1995