

임피던스를 이용한 상지 운동 분석

^{1,2}김수찬, ^{1,2}남기창, ²김덕원
¹연세대학교 대학원 생체공학협동과정
²연세의대 의학공학교실

Analysis of Upper Limb Movement Using Bio-Impedance

^{1,2}Kim, Soo-Chan, ^{1,2}Nam, Ki-Chang, and ²Kim, Deok-Won

¹Graduate Program in Biomedical Engineering, Yonsei University

²Department of Medical Engineering, Yonsei University College of Medicine

Abstract - 본 연구에서는 생체 임피던스를 이용하여 3채널 상지(upper arm) 운동 분석 시스템을 제작하였다. 각 채널은 상지의 외전(supination)과 내전(pronation), 팔꿈치(elbow)의 펴고 굽힘, 손목(wrist)의 펴고 굽힘에 따른 각 관절의 임피던스 변화를 얻을 수 있도록 설계되었다. 생체 임피던스는 전극의 부착위치에 의존하므로 정밀한 감지를 위해 상지 운동에 대한 임피던스의 변화와 각도계(goniometer)의 각도 변화와의 상관관계를 통하여 상관 관계가 높고, 변화량이 가장 크고, 다른 관절의 움직임에 다른 영향이 최소인 곳을 찾아 이를 최적의 전극 위치로 정하였다. 그리고, 선정된 최적의 전극 위치에서 임피던스 변화를 얻어 상지 운동을 분석해 보았다. 최적의 전극 위치에서 손목과 팔꿈치의 각도 변화와 임피던스 변화의 상관 계수는 각각 0.94, -0.97로 아주 높은 상관 관계를 보였다. 또한 이전의 다른 연구에서 임피던스 방법으로 구현해 본 적이 없는 팔의 회전(rotation)도 분석이 가능하였다. 이 시스템은 피검자의 동작에 거의 제한을 주지 않고, 가벼우며, 장시간 측정이 용이할 뿐만 아니라 시스템 구성이 영상 분석기에 비해서 단순하다는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서 제안하는 방법은 재활과 생체역학, 로봇의 원격 제어, 그리고 가상 현실에서의 동작 구현 등에 활용 할 수 있을 것으로 사료된다.

1. 서 론

지난 수십 년 전부터 임피던스 기술은 비관혈적인 방법으로 생체정보를 얻는데 유용하여 현재까지 이용되어지고 있다. 주요 연구들은 심박출량과 같은 혈류량의 측정과 생체내부의 조직의 성분 분석이나 이를 이용한 3차원 영상 획득 등으로 주로 외부에서 관찰하기 어려운 생체 내부 환경이나 그 변화를 생체 내의 임피던스를 이용하여 간접적으로 정보를 얻었다[1-3]. 그러나 이러한 분야 외에도 임피던스를 이용하여 유용한 정보를 얻을 수 있는 것 중에 하나가 바로 생체의 움직임에 관한 정보이다. 성대의 움직임을 외부에서 임피던스 변화로 얻어내는 EGG(Electroglottograph)나 호흡으로 인한 흉부 내부의 임피던스 변화를 이용한 RIP(Respiratory impedance plethysmograph) 등이 임상에서 유용하게 활용되고 있다[4-5]. 그러나, 이러한 임피던스 변화는 특정 부위의 움직임에 대한 비교적 단순한 운동 측정이다. 이에 비하여 관절운동과 같은 복잡한 움직임이 있는 부위에서도 근의 단면적 변화로 나타나는 임피던스 변화를 이용하여 관절의 상태를 생체역학(biodynamics) 분야에서 활용하려는 연구도 있었다[6-10]. 인체의 움직임은 근의 활동으로 인해 이루어지며 이러한 활동성을 평가해 보고자 할 때, 주로 사용되

는 방법은 근전도이다. 그러나 재활, 스포츠 훈련, 생체역학이나 동작분석에서는 근의 이완 혹은 수축의 상태가 근력보다 더 중요할 때가 있다. 근전도의 경우 위치 정보를 계속 유지하기 위해서는 근에 계속적인 힘을 유지해야 되어야 하므로 근전도만을 이용하여 장시간 관절의 움직임에 대한 정확한 정보를 얻어내는 것은 힘들다. 또한 근전도를 이용할 경우 신호의 정류와 분석을 위한 추가적인 프로세서가 많이 요구된다. 근전도 신호는 근력과 관련된 신호로써 근의 수축, 이완과는 정비례하지는 않으므로 동역학적(kinetic), 운동학적(kinematic) 요소를 추출하기 어렵다[8]. 기존의 운동 분석 장비로는 각도계(goniometer)가 정확성과 간편성이 뛰어나 많이 활용되고 있으나 빠른 동작이나 기계적 구조(mechanic structure) 때문에 복잡한 동작과 장소의 제한성 등의 단점이 있다.

이러한 단점을 극복하고자 Nakamura (1992) 등은 표면 전극을 부착하여 사지의 움직임에 대한 임피던스 변화를 측정하고, 그 결과를 근전도와 비교해 보고, 테니스 선수의 서브 모션의 분석에 활용하였다[8]. 그러나 이 연구에서는 손목의 동작과 손의 회전에 대한 움직임이 분석되지 않았다. 임피던스 방법은 각 관절이 동시에 움직일 때 임피던스가 채널간에 서로 영향을 받고, 손의 회전에 대한 정보를 정확히 얻어내는 것이 쉽지 않다는 등의 문제점이 있다.

본 연구에서는 다양한 관절 운동이 가능한 상지(upper limb)를 대상으로 여러 동작에 대하여 임피던스 변화를 관찰하여 관절의 움직임을 분석해 보고자 하였다. 이를 위해 여러 채널로 확장이 용이한 임피던스 측정기를 제작하였다. 손목(wrist)과 팔꿈치(elbow)의 해부학적인 관절의 움직임은 근의 움직임에 의한 결과이며 근의 변화는 임피던스 측정으로 얻는다. 그러므로 실제 임피던스 변화와 관절 변화와의 관계가 완전히 일치한다고 볼 수 없기 때문에, 실험을 통하여 각 관절의 동작에 따른 임피던스 변화 값과 관절의 각도와의 상관관계를 비교하여 최적의 전극 위치를 찾았다. 최적의 전극 위치에서 얻어진 임피던스 변화로부터 상지 동작을 해석해 보았다.

2. 본 론

2.1 시스템 구성

그림 1은 4채널 임피던스 측정 시스템을 보여주고 있다. 전압 감지 모듈과 자극 전류 모듈을 구분하여 추후 확장성을 용이하도록 설계하였다. 정전류원(300uA @50kHz)은 피검자의 한쪽 손에서 전압 감지 전극 6개를 모두 거쳐 어깨의 상위에 부착하였다. 사용전극은 Ag-AgCl(RedDot, 3M)을 사용하였다. 환자의 안전을

위하여 전원과 신호는 DC-DC converter와 분리 증폭기를 사용하여 각각 절연하였다.

본 연구에서 말하는 임피던스는 저항성분과 리액턴스(reactance) 성분 중에서 저항 성분만을 측정된 결과이다. 왜냐하면 인체의 50kHz대에 대한 임피던스는 리액턴스 성분이 적고 대부분 저항성분을 가지기 때문이다 [13]. 그러나 혼란을 피하기 위해 용어는 임피던스라고 통일하였다.

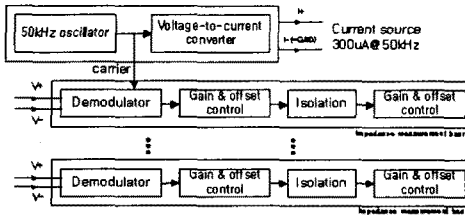


그림 1. 임피던스 측정 시스템도

2.2 상지 운동의 정의

인체에서 다양한 움직임이 보이는 곳이 사지이며 이중 상지 동작을 분석해 보면 크게 손목의 펴(extension), 굽힘(flexion), 젓힘(hyperextension), 회전(circulation), 손의 외전(supination)과 내전(pronation), 주먹을 쥐고, 폼, 손가락의 움직임 등으로 볼 수 있다[14]. 그러나 본 연구에서는 상지 운동을 단순화시켜 손목의 회전과 손가락의 운동을 제외한 손목(그림 2), 팔꿈치 운동(그림 3)만으로 구분하였다.

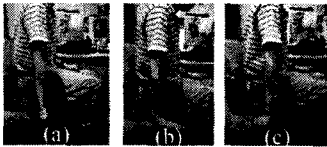


그림 2. 손목 동작 분석 (a) 펴, (b) 굽힘, (c) 젓힘

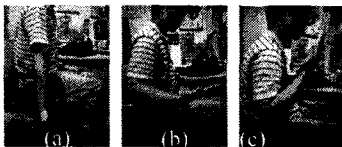


그림 3. 팔꿈치 동작 분석 (a) 펴, (b) 90도 굽힘 (c) 135도 굽힘

2.3 최적 전극 위치의 선택

단지 해부학적인 정보만으로 외부에서 임피던스가 변화되는 최적의 위치를 결정할 수 없으므로 실험을 통하여 최적 위치를 찾았다. 이를 위해 그림 4와 같이 전압 감지 전극의 부착 가능 위치 16 곳을 선택하여 상지 운동 시 발생하는 임피던스 변화를 관찰하였다.

손목의 운동은 요골과 척골에 부착된 근육인 손목펴근(extensor carpi muscles)와 손목굽힘근(flexor carpi muscles)에 의해 결정되므로 이 근들의 체적 변화를 얻고자 1~3, 6~8, 11, 12 총 8 곳의 전극 간의 임피던스 변화를 그림 2와 같은 손목 운동과 그림 3과 같은 팔꿈치 동작을 하면서 측정하였다. 손목 동작에 대한 최적의 위치를 찾는데 팔꿈치 동작을 함께 관찰한 이유는 서로 간의 간섭(cross talk)도 함께 관찰하기 위함이었다. 이와 같이 얻어진 데이터에서 상관 계수는 관절의 임피던스 변화와 각도의 관계에서 구하였다. 또한 각각의 운동 측정마다 선택된 여러 채널에서 동일한 각도 변화에

대하여 임피던스 변화량의 차이를 관찰하였다.

팔꿈치 동작은 이두박근과 삼두박근에 의해 지배를 받으므로 4, 5, 9, 10, 13~16으로 총 8곳에서 전극간의 임피던스를 위와 동일한 방법으로 상지를 움직이면서 측정하고 분석하였다. 최적의 전극 위치를 선택한 다음 상지 동작 분류는 휴리스틱 방법(heuristic method)으로 분류하였다.

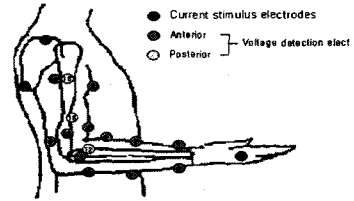


그림 4. 최적의 전극 위치를 찾기 위해 부착한 전극 위치

3. 결 과

3.1 최적의 전극 위치

그림 5에서 채널 1은 1번과 2번 전극간의 임피던스(이하, (1-2)의 임피던스), 채널 2는 (6-7)의 임피던스, 3번 채널은 (4-5)의 임피던스를 나타낸 것이다. 손목을 편 상태를 기준으로 손목을 굽히게 되면 임피던스는 증가하였다. 그리고 손목 동작에 의해서는 팔꿈치와 관련된 부위의 임피던스 변화는 거의 없음을 알 수 있었다.

이와 같은 방법으로 (1-2), (6-7), (1-7), (6-2), (2-3), (7-8), (6-3), (1-8), (7-3), (2-8), (11-12)의 임피던스 변화를 측정하여 손목의 각도의 상관 관계를 계산 해 본 결과 (6-7)의 임피던스 변화가 0.94로 가장 높았고, 임피던스 변화 폭 또한 가장 크게 나타나 이곳이 손목 동작을 가장 잘 반영하는 곳으로 결정하였다.

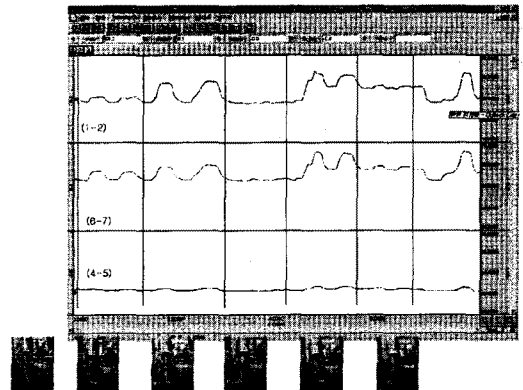


그림 5. 팔꿈치를 편 상태에서 손의 모양을 변화시킬 때 얻어진 (1-2), (6-7), (4-5)의 임피던스 변화

그림 6은 팔꿈치 동작을 일으키는 최적의 전극 위치를 찾기 위한 실험 결과 중의 하나로써 채널 1은 팔꿈치의 각도, 채널 2는 (13-16)의 임피던스, 채널 3은 (15-14)의 임피던스를 나타낸 것이다. 팔꿈치가 펴지게 되면 임피던스는 감소하였다. 이와 같은 방법으로 전극 배치 가능한 16가지 방법으로 임피던스 변화를 측정하고, 팔꿈치 각도와 상관 계수를 구해본 결과 (15-14)의 임피던스 변화가 -0.97로 가장 높았고 임피던스 변화 폭 또한 가장 크게 나타나 이것을 팔꿈치의 동작을 가장 잘 반영하

는 곳으로 결정하였다.

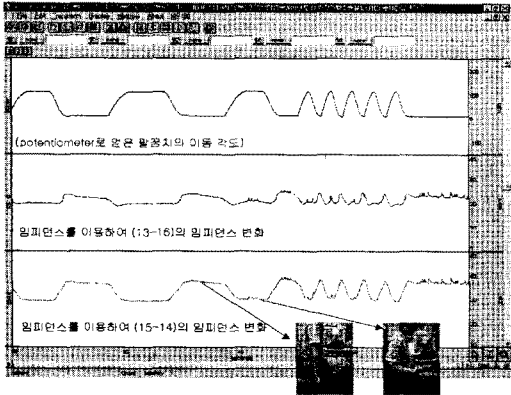


그림 6. 팔꿈치의 변화에 대한 최적의 전극 위치를 찾기 위해 손의 상태를 변경해 가며 (1-2), (13-16), (15-14) 전극간의 임피던스 변화를 관찰한 결과

다양한 전극 위치에 따른 임피던스 변화를 측정하는 과정에서 부수적으로 임피던스로 측정하기 힘들 것으로 생각되는 손의 회전 역시 적절한 전극 위치의 선택으로 가능함을 보여주는 결과를 얻었다. 그림 7은 손을 펴고 손을 회전하고, 주먹을 쥐고 손을 회전하면서 (1-2), (7-3), (9-10)의 임피던스 변화를 관찰한 것으로 (7-3)번 전극 위치에서 손의 회전 정보를 얻을 수 있었다.

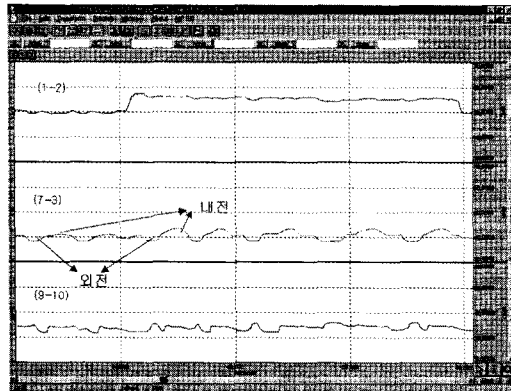


그림 7. 손의 회전에 대한 정보를 (7-3)의 임피던스 변화로 얻은 결과

3.2 상지 운동의 분석

최적의 전극 위치에서도 손의 움직임에 대하여 팔꿈치의 임피던스도 영향을 받고, 팔꿈치의 움직임에 의해서도 손 동작에 영향을 준다. 그러나 각 이러한 영향은 상호 배타적인 결과라는 것을 알 수 있다. 즉 손목은 편 상태에서 굽히게 되면 (1-2) 혹은 (6-7)의 임피던스는 증가하고, 팔꿈치는 편 상태에서 굽히게 되면 (15-14)의 임피던스는 감소한다. 따라서 각 관절의 복합적인 움직임도 분류가 가능하다.

그림 8은 채널 1은 (6-7), 채널 2는 (15-14), 채널 3은 (7-3) 간의 임피던스 변화를 이용하여 상지 동작을 구분한 결과이다. 채널 1을 이용한 손목의 상태를 얻을 수 있으며, 채널 2를 이용하면 팔꿈치의 상태, 그리고 채널 3을 이용하면 손의 회전에 대한 정보도 얻을 수 있다.

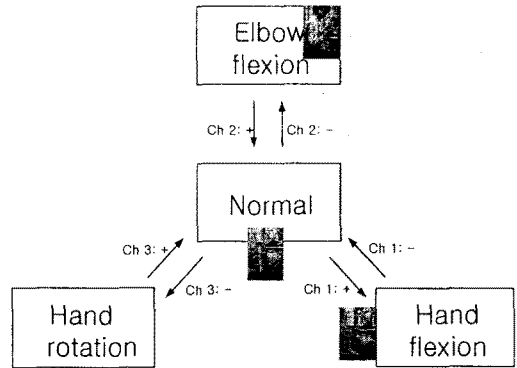


그림 8. 임피던스를 이용한 상지 동작 분석

4. 토의 및 결론

손목의 움직임은 팔뚝의 임피던스에 의존하고, 팔꿈치의 움직임은 이두박근과 삼두박근의 변화에 의존한다. 따라서 근의 변화에 대한 임피던스 측정 시 상지의 움직임을 대표할 수 있는 최적의 전극 위치를 찾아서 그곳에서 임피던스 변화를 이용하여 상지 동작에 대한 정보를 추출할 수 있었다. 더욱이 임피던스 방법으로 어렵다고 알려진 손의 회전과 손 모양의 감지까지 가능하였다. 이 방법은 근전도와 같은 다른 생체 신호하는 것에 비해 많은 계산량이 요구되지 않고, 신호대 잡음비(SNR, signal to noise ratio)이 높다는 장점이 있다.

임피던스 측정 시스템은 기존의 각도계나 공간적 제한과 움직임에 제한을 주는 영상 처리 방법 혹은 기계적인 방법 대신 재활과 생체 동역학 동작 분석에 활용할 수 있을 것이다. 그러나 임피던스 값이 개인마다 조금씩 차이를 보이기 때문에 임피던스 값만 가지고 각도계와 같이 절대적인 관절의 각도를 얻는 것이 어렵다. 따라서 현재로서는 관절의 각도를 0도로 편 기본 자세의 임피던스 값과 손과 팔꿈치를 90도로 굽힌 상태에서 얻은 임피던스 값을 이용하여 정규화(normalization)한 후 이를 이용하여 절대적인 각도로 보정을 해야 하는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점이 해결된다면, 피검자에게 적은 부담을 주면서 높은 정밀도와 빠른 시간 응답이 가능한 시스템으로 활용할 수 있을 것이다.

[참고 문헌]

- [1] Kubicek WG, Kottke J, Ramos MU, Patterson RP, Witsoe DA, Labree JW, Remole W, Layman TE, Schoening H, Garamela JT., "The Minnesota impedance cardiograph- theory and applications.", Biomed Eng, 9(9), 410-6, 1974
- [2] M.E. Valentinuzzi et al., "Bioelectrical Impedance Techniques in Medicine", Critical Reviews in Biomedical Engineering, 24, 353-466, 1996
- [3] Baker, L.E., "Principles of the impedance technique", IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, 8(1), 11 -15, 1989
- [4] Childers DG, Krishnamurthy AK, "A critical review of electroglottography. (Review)", Critical Reviews in Biomedical Engineering., 12(2), 131-61, 1985.
- [5] Baker, L.E., "Applications of the impedance technique to the respiratory system", IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine , 8(1), 50-52, 1989
- [6] Jeong YK, Lee DJ, Kim KH and Park JO, "A Wearable Robotic Arm with High Force-Reflection Capability", Proceedings of 2000 IEEE

- International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 411-416, 2000
- [7] Yamamoto Y., Yamamoto T., "Measurement of electrical bio-impedance and its applications.", Medical Progress through Technology., 12(3-4), 171-83, 1987.
- [8] Nakamura T, Yamamoto and Tsuji H. "Fundamental characteristics of human limb electrical impedance for biodynamic analysis", Med. Biol. Eng. & Comput., 30, 465-473, 1992
- [9] Nakamura T, Isshiki H, Yamamoto Y. "Development of device measuring human motion and psychological activity based on bioimpedance". Instrumentation and Measurement Technology Conference 1994, IMTC/94. Conference Proceedings. 10th Anniversary. Advanced Technologies in I & M., 2, 955-958, 1994
- [10] 김수찬, 남기창, 김덕원, "임피던스를 이용한 상지 운동 측정", 대한의용생체공학회 춘계학술대회, 21(1), 258-259, 1999
- [11] Koike Y and Kawato M. "Human Interface Using Surface EMG Signals", Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication, 2, 363-370, 1996
- [12] Kim SC, Nam KC, Kim DW, Jeong YK, Kim KY, and Kim KH. "Human arm motion detection system for robot teleoperation using electrical Bio-Impedance method", XI International Conference on Electrical Bio-Impedance, 615-8, 2001
- [13] 김수찬, "실시간 디지털 임피던스 사지 혈류량 측정기의 개발", 석사논문, 연세대학교, 1998
- [14] 이영선, 이석기, 김철중, 박세진, "한국인 20대 청년의 팔 관절 동작범위 측정연구", 대한인간공학회, 15(1), 39-52, 1996