

# 휴대용 소형임피던스 측정시스템을 이용한 다중주파수의 생체임피던스 해석

김민수<sup>1</sup>, 조영창<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>경운대학교 항공정보통신공학과, <sup>2</sup>경운대학교 항공정보통신공학과

## Bioelectrical Impedance Analysis of Multi-frequency using Portable Small Impedance Measuring System

Min Soo Kim<sup>1</sup>, Young Chang Cho<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Aviation Information and Communications, Kyungwoon University

<sup>2</sup>Dept. of Aviation Information and Communications, Kyungwoon University

**요약** 본 연구에서는 피부 등가모형을 통한 세포 내액과 세포 외액 성분의 생체임피던스 특성을 파악하기 위해 개발한 휴대용 소형 임피던스 측정시스템을 이용하여 4 전극법에 의한 비 침습 방식으로 다양한 주파수 대역에서 전신의 생체전기 임피던스를 측정실험을 수행하였다. 측정은 10명의 남성 피 실험자(평균 나이 24±3.0세, (BMI) 20.3 kg/m<sup>2</sup>)를 대상으로 4주간 실시하였으며, 생체임피던스 다중주파수(1 kHz, 5 kHz, 50 kHz, 70 kHz, 100 kHz, 500 kHz)대역에서 측정하였다. 실험결과, 저주파 대역인 1 kHz 대역에서 임피던스가 가장 높게 측정되었고, 고주파 대역인 500 MHz에서 임피던스가 가장 낮게 측정되었다. 특히 50 kHz 대역이상에서 임피던스가 급속히 낮아짐을 실험을 통해서 확인하였다. 또한, 피부 등가회로모형을 통한 세포 내액과 세포 외액의 임피던스 특성을 파악하는 모의실험에서도 본 연구의 생체임피던스 측정시스템의 측정값과 유사한 특성이 얻어짐을 확인할 수 있었다.

• **주제어** : 생체임피던스분석법, 4 전극법, RF통신, 다중주파수, 등가회로모델

**Abstract** In this study, we measured the bioelectrical impedance of whole body in various frequency bands by non-invasive method by four electrode method using a portable small impedance measurement system developed to understand the bioimpedance characteristics of intracellular fluid and extracellular fluid components through a skin equivalent model. The measurements were performed on 10 male subjects (mean age 24 ± 3.0, body mass index(BMI) 20.3 kg/m<sup>2</sup>) for four weeks and the bioimpedances were measured at multi-frequencies (1 kHz, 5 kHz, 50 kHz, 70 kHz, 100 kHz and 500 kHz). Experimental results show that the impedance is the highest in the low frequency range of 1 kHz and the lowest in the high frequency range of 500 MHz. Especially, it was confirmed through experiments that the impedance is rapidly lowered above 50 kHz band. In addition, it was confirmed that similar characteristics to the measured values of the bioimpedance measuring system were obtained in the simulations for understanding the impedance characteristics of the intracellular fluid and the extracellular fluid through the skin equivalent circuit model.

• **Key Words** : Bio-electric impedance analysis, Four electrode, Radio frequency communication, Multi-frequency, Skin equivalent circuit model

\*Corresponding Author : 조영창(yccho@ikw.ac.kr)

Received January 8, 2017

Revised February 3, 2017

Accepted February 20, 2017

Published February 28, 2017

### 1. 서론

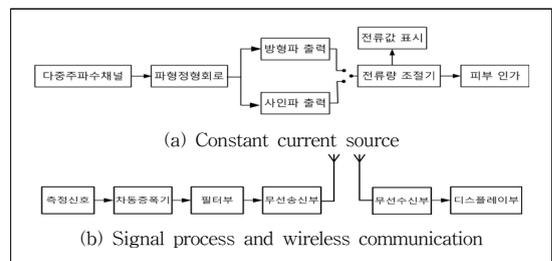
최근 생체전기임피던스 해석(Bio-electric Impedance Analysis :BIA)방법[1,2]을 이용하여 체내 진단 정보를 효과적으로 획득하기 위한 여러 가지 연구가 이루어지고 있다. 대표적인 연구로는 임피던스 단층영상장치(impedance tomography), BHI(체지방성분 분석)[3,4], 체액 성분 분석을 위한 연구[5] 등이 있다. 임피던스 분석 방법 등에서는 생체 신호 측정을 통한 진단이나 X선, 초음파 혹은 자기공명을 이용한 영상 진단[6]에서 얻을 수 없는 정보 획득이 가능할 뿐만 아니라, 작은 규모의 간단한 장치를 통해서도 비 침습적이며[7], 안정적으로 장시간 연속적인 진단이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 생체전기 임피던스분석기 연구는 피부의 노화 및 체지방 측정 등 병원과 가정 등에서도 사용이 편리하기 때문에 많은 연구가 이루어지고 있는 분야[8,9]이다. 기존의 생체전기임피던스 측정 장비는 인체성분 측정에서 높은 정밀도를 얻을 수 있으나 휴대가 힘들고, 공간적 제약과 고가 장비로서의 경제적 부담이 큰 이유로 주로 전문가에 의해서만 사용되어 왔다. 또한, 기존의 인체 전기임피던스 연구에서 사용되고 있는 대다수의 측정 장치는 주로 단일 주파수를 사용하거나 측정된 값들을 무선으로 전송하는 기능을 가지고 있지 않다. 단일 주파수의 사용에서는 측정시간이 빠른 반면, 세포 내액과 세포 외액성분을 측정하기는 어려운 문제점이 있다[10,11]. 이에 비해 다중주파수 측정법[12,13,14]은 주파수 성분을 다양하게 분석할 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 연구의 인체 전기임피던스 분석기는 다양한 인체성분의 평가를 위해서 비 침습적이며, 정밀성과 실용성 있는 장비로 개발함으로써 누구나 쉽게 측정 및 분석이 가능하도록 하였다. 다중 주파수를 사용하여 주파수에 따른 세포의 내액과 외액성분의 생체임피던스를 측정을 위해서 소형의 휴대용 임피던스측정기는 정전류원과 신호측정부 2개 장치로 구성되었다. 임피던스 측정부는 측정할 값을 실시간으로 무선으로 전송 가능하여 장소에 구애 받지 않고 측정이 가능한 시스템이다. 또한 임피던스 전기 등가회로모형을 통해서 세포 내액과 세포 외액의 전기적 특성을 시뮬레이션을 분석 가능하였다. 앞으로 본 개발품은 휴대용 생체임피던스 측정기[15]로 활용 가능하여 간편하게 체지방 측정이 가능하고 인체내부의 수분량을 측정할 수 의료기기로 활용 가능할 것이다.

### 2. 방법 및 재료

#### 2.1 실험장치

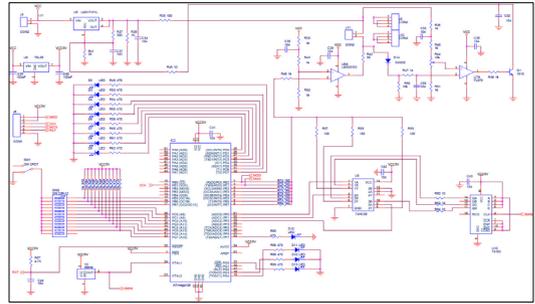
본 연구에서 개발한 휴대용 무선 다중주파수용 임피던스 측정기는 다양한 대역의 주파수의 임피던스를 측정하기 위해서는 다중주파수 발생용 모듈, 정전류 발생부, 생체신호측정부, MCU부, 무선 송·수신 장치부, 디스플레이 이부로 구성되었다. 다중주파수는 1 kHz ~ 500 kHz 까지 가변이 가능하며, 정전류원 발생부를 통해서 사인파로 주파수를 공급하며, 전류량을 조절가능하고 디스플레이 부를 통해서 전류 값을 표시하고 피 실험자의 피부로 흘러주게 된다. 생체신호측정부는 전극을 통해서 측정되고 정확한 생체신호를 측정하기 위해서 회로부는 미세신호 증폭부인 차동증폭기, 신호처리용 필터부는 노치필터, HPF(high pass filter), LPF(low pass filter)부로 구성되었다. 측정부의 전극 시스템은 4 전극법으로 생체의 체적 임피던스를 측정하는 방법으로 측정하고자 하는 체적 단에 측정 전극을 두고, 그 측정 영역 바깥쪽에 전류 인가 전극을 부착함으로써 팔과 다리 부위 임피던스를 측정하였다. MCU 부는 ATmega 128을 사용하여 ADC(analog to digital converter)를 300 sampling rate, 기준전압은 DC 3 V로 sampling된 ADC 전압을 on/off 이진 binary 상태로 MAX7044를 통해 전송되고 수신된 값을 16비트만큼 받아서 수신 값을 1 바이트 값으로 변환 처리 하도록 하였다. 무선송신용 RF 주파수는 402.94 MHz이며, 측정된 생체신호를 OOK/ASK 방식 데이터 전송으로 컴퓨터에 부착되어 있는 USB용 수신기는 RF 주파수는 392.29 MHz로 컴퓨터를 통해서 모니터링 가능하도록 구현되었다. 그림 1은 본 연구의 휴대용 무선 다중주파수용 생체임피던스 측정 장치는 정전류원(Fig 1(a), 신호처리부 및 무선 송·수신부(Fig 1(b))로 구성되어 있다. [Fig 2]는 정전류 발생장치와 생체임피던스 측정 장치부를 사진으로 나타내었다.



[Fig. 1] Compose of portable wireless multi-frequency measuring system



[Fig. 2] Portable small impedance measuring system



[Fig. 4] Circuit design of multi-frequency generator

## 2.2 연구방법

실험에 참가한 피 실험자들은 임상적으로 정상인이라고 판단되는 성인 (평균  $24.3.0 \pm 0.45$ , (BMI)  $20.3 \text{ kg/m}^2$ ) 를 대상으로 10명에 대해서 실험을 실시하였다. 측정전극시스템은 4개의 전극을 이용하여 생체의 임피던스를 측정할 수 있고, 피부에 부착된 전극의 개수에 따라서 4가지 전극법(2전극, 3전극, 4전극)으로 나눌 수 있다.

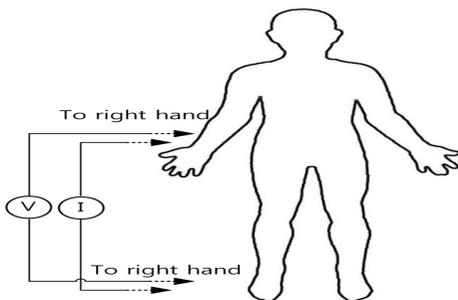
본 연구에서는 4 전극법으로 오른 손목 2곳과 오른 발목 2곳에 전류인가 전극과 측정전극을 각각 부착하여 생체의 체적임피던스 측정할 목적으로 (주) Biopac Bioimpedance Strip Electrode(EL 506)의 8 mm 전극을 사용하였다. 주변온도를 ( $23-25^\circ\text{C}$ ) 범위를 일정하게 유지한 상태에서 피 실험자 측정을 실시하였다. 생체임피던스를 측정하기 위한 주파수는 1 kHz, 5 kHz, 50 kHz, 70 kHz, 100 kHz, 500 kHz 주파수 범위에서 전기적으로 안전이 검증된 800  $\mu\text{A}$  이하로 인가했으며 측정 주파수를 6개 영역에 대하여 생체임피던스를 측정하였다. 그림 3은 생체임피던스 측정 피 실험자를 대상으로 측정을 위한 전극의 부착위치를 나타내고 있다. [Fig 4]와 [Fig 5]는 다중주파수 발생장치의 회로도면과 생체임피던스 측정 장치의 PCB(printed circuit board)를 나타내고 있다. [Fig 6]은 피 실험자가 반드시 누운 상태에서 생체임피던스를 측정하는 장면을 사진을 통해서 나타내고 있다.



[Fig. 5] PCB of impedance measuring system



[Fig. 6] Measurement of subject

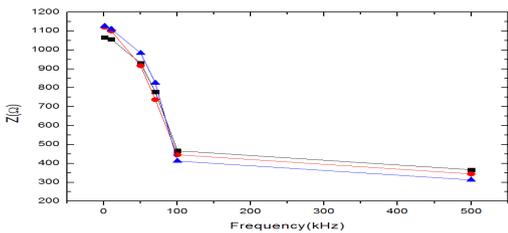


[Fig. 3] Position of electrode with four electrode method

## 3. 연구결과 및 고찰

본 연구에서는 소형으로 제작된 다중주파수 측정기로 생체임피던스 측정을 실시하였다. 생체임피던스 측정기는 체지방성분을 알기위해서 주파수에 따른 임피던스 측정값을 비교할 수 있다. 피 실험자에게서 측정된 생체임피던스 값들은 각 주파수당 10번 반복하여 실험을 실시하였다. [Fig 7]에서는 휴대용 소형 임피던스 측정기를 통해서 측정된 값의 평균값을 다중주파수(1 kHz, 5 kHz, 50 kHz, 70 kHz, 100 kHz, 500 kHz)에 따른 임피던스를 측정할 결과 저주파 대역인 1 kHz에서 가장 높은 임피던스( $1104.25 \pm 32.9 \Omega$ )가 측정되었고, 5 kHz대역 임피던스( $1089.36 \pm 28.4 \Omega$ ), 50 kHz 대역 임피던스( $943.20 \pm 35.29$

Ω), 70 kHz대역에서 임피던스(80.60±44.29 Ω), 100 kHz 대역 임피던스(441.61 ±27.3 Ω), 고 주파 대역인 500 kHz 에서 가장 낮은 임피던스(341.29 ±27.0 Ω)가 측정되었다. 이 결과는 저주파 대역인 1 kHz와 10 kHz대역 에서는 세포 외액의 임피던스를 측정할 수 있었으며, 10 kHz 이상 대역인 50 kHz, 70 kHz, 100 kHz와 500 kHz 사이에서는 비교적 높은 주파수에서는 세포 외액 뿐만 아니라 세포 내액까지 임피던스를 측정할 수 있어서 생체임피던스 저항 값이 낮게 측정됨을 확인 할 수 있었다. 측정값의 비교 및 분석을 위해서 평균값과 표준편차를 <Table 1>에서 나타내었다.



[Fig. 7] Result of measurement using portable small impedance measuring system

<Table 1> Result of bio-impedance in according with frequency

Frequency(kHz), Ω					
1 (kHz)	5 (kHz)	50 (kHz)	70 (kHz)	100 (kHz)	500 (kHz)
1104.25 ±32.9Ω	1089.36 ±28.4Ω	943.20 ±35.29Ω	780.60 ±44.29Ω	441.61 ±27.3Ω	341.29 ±27.0Ω

생체임피던스 전기등가회로는 생체임피던스 측정값의 객관적인 값을 증명하기 모델을 통해서 시뮬레이션을 실시하였다. 등가회로 모델은 생체 조직의 전기적 특성을 연구하는 모델로 널리 활용되는 기술이다. [Fig 8] 회로의 저항  $R_E$  (세포 외액의 저항)는  $R_I$  저항(세포 내액의 저항)과 병렬로 연결되었으며, 전류는 커패시터 C(세포막의 커패시턴스)에서  $R_I$ 로 흐른다. 저주파 대역에서는 전류는 C를 통해서 흐를 수 없고, 세포 주변만을 흐른다. 이유는 0 주파수 일 때 저항은 세포 외액 저항과 같다.

$$R_0 = R_E \quad (1)$$

높은 주파수대역의 전류는 세포막의 커패시턴스로 흐르며, 전류는 세포벽을 통과해서 가로질러 흐를 수 있다. 무한대 저항  $R_\infty$ 은 식 (2)과 함께  $R_E$ 와  $R_I$ 를 계산할 수 있다.

$$\frac{1}{R_\infty} = \frac{1}{R_E} + \frac{1}{R_I} \quad (2)$$

$$R_\infty = \frac{R_E \cdot R_I}{R_E + R_I}$$

회로의 주파수는 공진주파수( $f_c$ )는 kHz 대역을 가지며 여기서 C의 효과는 원호(circle arc)의 최대치에 대응하고, 식(3)에 의해서 계산할 수 있다.

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot C \cdot (R_E + R_I)} \quad (3)$$

$R_\infty$ 과  $R_E$ 가  $R_0$ 와 같이 측정될 때  $R_I$ 는 식 (4)와 같이 계산될 수 있다.

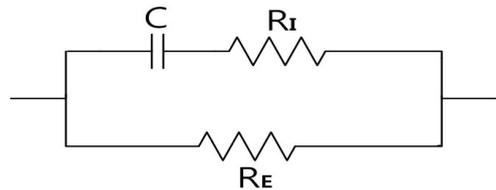
$$R_I = \frac{R_E \cdot R_\infty}{R_E - R_\infty} \quad (4)$$

식(4)에서 인체 체적에 의해 적은 세포 내액은 높은  $R_I$  값을 나타낸다.

임피던스(Z)는 식(5)의 복소수 수식으로 나타낼 수 있다.

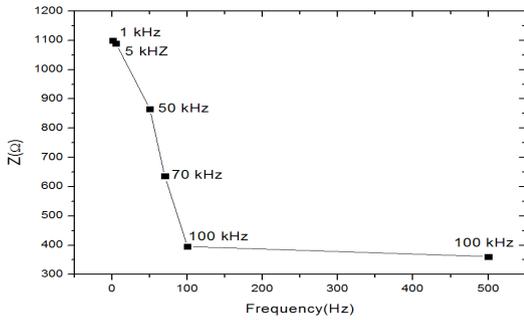
$$Z = \frac{R_E}{R_E + R_I} \cdot \left( R_I + \frac{R_E}{[j \cdot \omega \cdot C \cdot (R_E + R_I)]^\alpha} \right) \quad (5)$$

여기서  $\alpha$ 는 원의 중심 위치에 영향을 미치고  $\alpha=1$ 값은 수평축의 중심에 위치한다.  $\alpha$ 가 1보다 적을 때 원의 중심은 수평축의 아래에 위치한다. 인체의 측정은 보통  $0.6 < \alpha < 0.7$  범위를 가진다.



[Fig. 8] Skin equivalent circuit model of intracellular fluid and extracellular fluid

[Fig 9]의 생체모델을 이용한 시뮬레이션 결과 50 kHz 대역이상에서 임피던스가 급격하게 낮아짐을 확인할 수 있으며 50 kHz이상의 대역은 세포 내액을 통과하는 주파수 대역으로써 임피던스저항의 변화를 통해서 세포 외액의 임피던스와 세포 내액의 임피던스 값을 분석하는데 중요한 근거로 활용 가능할 것이다.



[Fig. 9] Result of impedance simulation of equivalent circuit model

본 연구의 임피던스 측정기는 저주파수영역과 고주파수영역으로 전류를 흘려서 인체의 세포 내액 성분과 세포 외액 성분을 통과하여 인체의 체성분 분석을 위한 연구를 실시하였다. 이를 증명하기 생체임피던스 등가회로모델을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 임피던스 측정기에서 측정된 값과 등가회로모델의 비교를 해본 결과 세포 내액을 통과하는 주파수 대역인 50 kHz에서 임피던스가 급격히 낮아지는 결과를 나타냄으로써 유사한 결과를 나타내었다. 또한 10 kHz 미만의 주파수 대역에서는 높은 임피던스를 기록함으로써 세포 외액 성분임을 알 수 있었다. 따라서 임피던스 측정을 위한 주파수 성분진체를 분석하지 않아도 주요 주파수대역을 이용하여 인체 내의 세포 내액과 세포 외액의 임피던스 저항 성분을 효율적으로 분석가능한 장비로서 활용가치가 높을 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서 개발한 소형 임피던스 측정기는 다중주파수를 이용하여 주파수에 따른 생체의 체지방성분을 분석할 수 있다. 기존의 생체임피던스는 주파수 제어 및 신호측정을 위한 Lock in Amplifier(SR 830)을 이용하여 측정을 실시하는데 정전류원 간의 인터페이스 기술이 복잡하게 구성된 시스템이다. 기존 제품과 비교 시 주요한 주파수 대역을 쉽게 조절이 가능하고 측정시간 단축 및 정확성을 가지고 있음을 확인하였다. 휴대용 소형임피던스 측정기는 기존의 문제점을 개선하여 휴대 및 이동이 편리해서 장소에 제약을 받지 않고 측정가능한 장치이다. 휴대용 측정기에서 측정된 신호를 무선통신으로 전송이 가능하여 데이터를 컴퓨터에 자동으로 저장 가능하여 분석 가능한 기기 활용할 수 있다.

앞으로 가정에서 일반인들을 대상으로 체지방 정도, 인체 내 수분량, 피부수분상태 정도를 손쉽게 측정할 수 있어서 개인건강용 헬스케어장비로 활용가능하다. 또한 병원 의료장비로 활용도를 넓혀서 임상기기로도 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

#### REFERENCES

- [1] U. Birgersson, E. Birgersson, I. Nicander, S. Ollmar, "A methodology for extracting the electrical properties of human skin" *Physiol. Meas.*, Vol. 34, pp. 723-736, 2013.
- [2] M Chen, J. Sun, H. Bai, Y. Wang, D. Xu, X. Zhu, J. Chen, Z. Bao, "Muscle mass reference standard for sarcopenia using bioelectrical impedance analysis " *Asian J Gerontol Geriatr*, Vol. 10, pp. 16-21, 2015.
- [3] A. S. Jackson, P.R. Stanforth, J. Gagnon, T. Rankinen, A.S. Leon, D.C. Rao, et al. "The effect of sex, age and race on estimating percentage body fat from body mass index: the Heritage Family Study", *Int J Obes Relat Metab Disord*, Vol. 26, pp. 789-796, 2002.
- [4] D. Gallagher, M. Visser, D. Sepulveda, R.N. Pierson, T. Harris, S. B. Heymsfield, "How useful is body mass index for comparison of body fatness across age, sex, and ethnic groups?", *Am J Epidemiol*, Vol. 143, pp. 228-239, 1996.
- [5] T. J. Faes, C. van der Meij, H. A et al. "The electric resistivity of human tissues(100Hz-10MHz): a meta-analysis of review studies", *Physiological measurement*, Vol. 20, pp. R1-10, 1999.
- [6] J. K. Seo, O. Kwon and E. J. Woo, "Magnetic resonance electrical impedance tomography (MREIT): conductivity and current density imaging", *Journal of Physics*, 12, pp. 140-155, 2005.
- [7] Y. Mandel, S. Laufer, B. Rubinsky, "Measurement of corneal endothelial impedance with non-invasive external electrodes," *Medical Eng. & Physics*, Vol.34, pp.195-201, 2012
- [8] F. Villa, A. Magnani, A. Martin, M. Alexander Stahn, "Wearable Multi-Frequency and Multi-Segment Bioelectrical Impedance Spectroscopy for Unobtrusively

- Tracking Body Fluid Shifts during Physical Activity in Real-Field Applications: A Preliminary Study", Sensors, Vol. 16, p. 673, 2016.
- [9] B. Nordbotten, C. Tronstad, G. Martinsen, S. Grimnees, "Estimation of skin conductance at low frequencies using measurements at higher frequencies for EDA applications", Physio. Meas., Vol. 35, pp. 1011 - 1018, 2014.
- [10] S. C. Kim, "Implementation of Multiple Frequency Bioelectrical Impedance Analysis System for Body Composition Analysis", J. of the Korea Academia industrial cooperation Society, Vol. 13, pp. 5403-5408, 2012.
- [11] S. B. Kim, N. R. Lee, S. W Lee, J. Y. Choi and Y. H. Lee, "Development of Multi Frequency Impedance Measurement System for Acupuncture Points and Preliminary Report of Measurement", Korea J. of Acupuncture, Vol. 29, pp. 71-81, 2012.
- [12] Cho Y.C, Kim M.S, "Analysis of Bioimpedance Change and the Characteristics of Blood Pressure according to Posture", Journal. of Korea. Industrial. Information. System. Research, Vol. 19, pp. 25-31, 2014.
- [13] B. K. Van Kreel, "Multi-frequency bioimpedance measurements of children in intensive care", Med. Biol. Eng. Comput., Vol. 39, pp. 551-557, 2001.
- [14] S. B. Kim, et al., Development of a Multi-frequency Impedance Measurement System for Acupuncture Points and Preliminary Report of Measurement Results," J. Acupuncture. and Meridian Studies, Vol. 29,pp.71-81, 2012.
- [15] C. Song, K. Lee, "Design of Authentication System using Biometrics for U-Healthcare Environment in M2M", J. of the Korea Conver. Soc., Vol. 2, pp. 13-17, 2012.

저자소개

김민수(Min Soo Kim)

[정회원]



- 1996년 2월 : 영남대학교 일반대학원 전기공학과 (공학석사)
  - 2004년 2월 : 영남대학교 일반대학원 전자공학과 (공학박사)
  - 2004년 8월 ~ 2007년 8월 : POSTECH 박사후연구원
  - 2014년 3월 ~ 현재 : 경운대학교 항공정보통신공학과 교수
- <관심분야> : 생체임피던스, 생체신호처리, 원격 및 의료기기

조영창(Young Chang Cho)

[정회원]



- 1996년 8월 : 영남대학교 일반대학원 전자공학과(공학석사)
  - 2001년 8월 : 영남대학교 일반대학원 전자공학과 (공학박사)
  - 1999년 3월 ~ 현재 : 경운대학교 항공정보통신공학과 교수
- <관심분야> : DSP, 영상신호처리, 생체신호처리