

뇌졸중 고령자와 정상인의 보행 시 족압 변화 및 비교 분석

¹정남교, ²박세진, ³권순현, ⁴전종암, ^{5*}유재학

Comparison Analysis of Foot Pressure Characteristics during Walking in Stroke and Normal Elderly

¹NamKyo Jung, ²Se Jin Park, ³Soon-Hyun Kwon and ⁴Jongarm Jun, ^{5*}Jaehak Yu

요약

뇌졸중 질환은 전세계적으로 가장 중요한 사망원인 중 하나이며, 특히 고령자에게 장애의 원인이 되는 가장 중요한 질환이다. 뇌졸중 질환이 발생하면 사망 또는 심각한 장애를 유발하기 때문에, 적극적인 일차 예방과 전조증상의 빠른 발견이 매우 중요하다. 특히, 일상생활에서의 뇌졸중 전조증상 발병을 감지 및 정확히 예측하여 전문가의 신속한 진단을 유도할 수 있어야 한다. 최근까지의 연구에서는 뇌졸중 환자의 전조증상을 예측하는 방법론으로 CT(Computed Tomography)나 MRI(Magnetic Resonance Imaging)와 같은 영상 분석이 대부분이었으나, 이러한 접근에는 오랜 검사 시간과 높은 검사 비용 등에 대한 한계점을 가지고 있다. 본 논문에서는 고령자의 뇌졸중 질환 발병이 보행 시 족압(Foot Pressure)에 어떤 영향을 미치는지 임상 데이터를 이용해 실험하였다. 실험 결과, 보행 중에 뇌졸중 고령자와 일반 고령자 간에 12개의 셀에서 $*p < .05$ 인 유의미한 차가 있음을 분석 및 검증하였다. 결과적으로 고령의 뇌졸중 환자와 일반 고령자의 일상생활의 보행 패턴에 유의미한 차이를 발견했다는 것에 그 의미가 크다고 할 수 있다.

Abstract

Stroke disease is one of the leading causes of death worldwide, and in particular, it is the most important causative disease that causes disability in the elderly. Since stroke disease often causes death or serious disability, active primary prevention and early detection of prognostic symptoms are very important. In particular, it is necessary to detect and accurately predict stroke prognostic symptoms in daily life and prompt diagnosis and treatment by medical staff. In recent studies, image analysis such as computed tomography (CT) or magnetic resonance imaging (MRI) is mostly used as a methodology for predicting prognostic symptoms in stroke patients. However, this approach has limitations in terms of long test time and high cost. In this paper, we experimented with clinical data on how stroke disease affects foot pressure in elderly in walking. Experiments have shown that there is a significant difference in $*p < .05$ in 12 cells between the stroke elderly and the normal elderly during walking. As a result, it is significant that we found a significant difference in the gait patterns in daily life of the stroke elderly and the normal elderly.

Keywords: Stroke Disease Analysis, Foot Pressure, Relative Load of Foot, Health Monitoring, Walking Analysis

¹ 고려대학교 전기전자공학부 (2017171009@korea.ac.kr)

² 한국표준과학연구원 안전융합사업팀 책임연구원 (sjpark@kriss.re.kr)

³ 한국전자통신연구원 KSB 융합시스템연구실 선임연구원 (kwonshzzang@etri.re.kr)

⁴ 한국전자통신연구원 KSB 융합시스템연구실 책임연구원 (jajun@etri.re.kr)

⁵ 한국전자통신연구원 KSB 융합시스템연구실 선임연구원, 교신저자 (dbzzang@etri.re.kr)

Received: Sept. 02, 2021, Revised: Sept. 27, 2021, Accepted: Sept. 27, 2021

I. 서론

뇌졸중은 뇌혈관이 막히거나 터져서 갑작스럽게 운동이나 감각 장애, 발음 장애, 의식장애나 사지 마비와 같은 뇌 기능 이상이 발생하는 질환으로, 해당 부분의 뇌가 손상되어 나타나는 신경학적 질환이다 [1-2]. 이러한 뇌졸중은 크게 혈관이 막혀서 발생하는 뇌경색(허혈성, Cerebral Infarction)과 혈관이 터져서 발생하는 뇌출혈(출혈성, Cerebral Hemorrhage)로 구분된다 [1]. 뇌경색은 심방세동과 같은 심장질환이 있는 경우 심장에서 혈전이 만들어진 후, 혈액을 타고 뇌혈관을 막아 생기는 뇌색전증 등으로 구분된다 [1-2]. 그 밖에도 혈관이 찢어지는 동맥박리나 염증으로 혈관이 막히는 뇌혈관염, 혈액응고질환인 전성적혈구증가증 등이 뇌경색의 원인으로 보고되었다. 뇌출혈은 크게 뇌내출혈과 지주막하출혈로 구분된다. 먼저 뇌내출혈은 축경화증에 위치한 혈관벽의 신축성이 떨어진 상태에서 갑자기 혈압이 오르면 약한 부위가 터지게 된다. 이때 터진 동맥에 의해 산소와 영양소를 공급받던 뇌의 신경세포들은 손상을 받고, 주변 세포들은 터져나온 혈액에 눌러 기능을 상실하게 된다.

세계보건기구(WHO)의 사망원인 통계에 의하면, 2016년 암과 심장질환 다음으로 뇌졸중에 의한 사망자가 570 만명으로 보고되었다 [3]. 이는 사망원인의 11%에 해당하는 수치이며, 단일 질환으로는 10대 사망원인 중 2위에 해당한다고 보고되었다 [3]. 따라서 전세계의 고령화 추세에 따른 뇌졸중 질환의 증가에 대비한 국가 차원의 대책 마련이 시급하다. 또한, 고령자의 일상생활 중 모니터링을 통한 질환의 전조증상 탐지와 위급상황 알람으로 의료기관 방문과 의료진에게 정밀진단 및 치료를 받을 수 있도록 지원할 수 있는 기술이 절실히 요구된다.

최근 연구문헌[4-8] 조사에 의하면, 장종성 [4] 등은 뇌졸중 환자 보행의 특성 및 분석을 목적으로, 뇌졸중 환자의 보행속도와 근(근육) 활성화도 및 족저압의 상관관계를 분석하였다. 보행 속도에 따른 근활성도는 슬픽근에서 유의미한($p < .05$) 상관관계를 보였고, 족압의 경우 환측과 건측에서 유의미한 결과를 얻어냈다. 정주현 [5] 등은 근 활성화도를 통해 뇌졸중 환자와 정상적인 근육 활성화 패턴과의 차이를 분석하였다. 이를 통해 뇌졸중 환자들은 근 동원 순서가 부적절하며 근 활성화 강도조절이 어려워 보행능력이 감소됨을 보고하였다. 김유신 [6] 은 뇌졸중 편마비 환자 대상으로 오르막, 내리막 계단 보행 시 하지 근육의 근 활동 변화에 따른 특성을 규명하고자 했다. 결과적으로 뇌졸중 환자들은 건측 하지 보다 환측 하지에서 근활성도가 높음을 확인할 수 있었다. 이렇듯 뇌졸중 환자의 보행에 관한 분석은 많은 연구들을 통해 선행되었다. 하지만 주로 보행시에 근 활성화도의 변화와 차이에 주목하였으며, 보행시에 족압 분포나 차이에 대한 연구는 아직 미흡하다고 할 수 있다.

또 다른 연구방법으로는, 인공신경망(Artificial Neural Network)이나 SVM(Support Vector Machine) 및 NIHSS(National Institutes of Health Stroke Scale) 기반의 뇌졸중 중증도 분류 및 질환 예측에 대한 정확도와 의미적 해석 결과를 보고 하였다 [1-2, 9]. Yu [1] 등은 일생생활의 보행 중 좌측과 우측의 허벅지와 종아리, 총 4 곳에서 근전도(Electromyography, EMG) 생체신호를 기반으로 기계학습의 RandomForest 알고리즘과 딥러닝의 LSTM(Long Short-Term Memory)에 기반한 뇌졸중 질환 예측 시스템을 제안하였다. 보행 중에 측정 및 수집한 근전도 생체신호는 초당 1,500Hz의 sampling rate 를 가지며, 뇌졸중의 전조증상을 감지 및 예측하도록 실험 및 검증하였다. Yu [2] 등은 국립보건원(NIH) 뇌졸중 척도를 기반으로 65 세 이상 한국인의 뇌졸중 조기 평가 및 뇌졸중 중증도에 대한 심층 분석 및 해석을 시도하였다. 본 연구에서는 머신 러닝 기법의 분석 알고리즘으로 대표되는 결정 트리 시리즈의 C4.5 를 사용하여 C4.5 에서 추가로 제공하는 실행 메커니즘의 심층 규칙을 분석하고, 규칙 기반의 결과를 제시하였다. 이러한 방법론과 연구 시도를 통해 NIHSS 기반의 뇌졸중 중증도를 정확히 분류하고 해석, 18 개의 중요 특성 중 13 개만을 사용하여 보다 빠르고 정확한 뇌졸중으로 인한 건강 모니터링 서비스를 지원할 수 있다고 보고하였다. Choi [9] 등은 한국인 고령자를 대상으로 뇌파(Electroencephalography, EEG)를 기반으로 뇌졸중 질환을 예측하는 시스템을 제안하였다. 측정 및 수집한 뇌파는 주파수 영역의 분리된 6 개의 채널(Fz, T7, C1, C2, T8, Oz)의 값을 이용하였으며, 각각 Fast Fourier Transform(FFT)을 적용하여 특정 주파수 영역으로 추출하였으며, 총 66 개의 속성 값을 실험에 사용하였다. 딥러닝의 LSTM 을 비롯한 Bidirectional LSTM 모델 등으로 실험하였으며, 94.0%의

뇌졸중 예측 정확도를 보고하였다. 하지만, 이러한 선행 연구들은 예측 정확도만을 강조한 시스템으로 통계적 분석과 유의미한 해석까지는 수행하지 않았다.

본 논문에서는 고령자에 발생한 뇌졸중 질환이 보행 시, 족압 분포와 균형 능력에 어떤 영향을 미치는지 새로운 실험 결과를 제시하였다. 실험 결과를 종합해보면, 뇌졸중 고령자와 일반 고령자 간에 12개 셀에서 $*p < .05$ 인 유의미한 실험결과를 확인하였다. 또한, box plot 분석으로 입각기와 유각기에서의 압력 분포와 보행 성향에서도 유의미한 차이가 있음을 실험을 통해 검증하였다. 결과적으로 고령의 뇌졸중 환자와 일반 고령자의 일상생활 중 보행 패턴에 유의미한 차이가 있음을 발견했다는 것에 그 의미가 크다고 할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 연구대상과 방법론을 소개하고, 3 장에서는 뇌졸중 고령자와 일반 고령자와의 통계적 분석결과를 기술한다. 마지막으로, 4 장에서는 결론 및 향후 연구과제 내용을 서술한다.

II. 연구방법

2.1 연구의 대상

보행 및 족압 데이터 측정 및 수집은 충남대학교병원 응급의료센터와 재활의학과에서 2017년의 환자를 대상으로 하였다 [1-2]. 만 65세 이상의 고령자 중, 1개월 이내의 뇌졸중 진단을 받은 환자와 일반인 고령자 중 재활 치료중인 156명을 대상으로 수집하였다. 모든 피실험자들의 실험 객관성을 확보하고자 족압을 포함한 뇌파(EEG), 심전도(ECG), 근전도(EMG), 모션(Motion) 등의 다양한 생체신호 수집 센서를 부착하였다. 그런 후에 보행을 포함한 서 있기, 팔 들기, 수면, 의자에 앉기와 서기 등 실험 시나리오별로 총 5회를 측정 실시하였다. 또한, 실험 시나리오에 따라 측정하기 전에 1회의 연습을 거치도록 실험을 설계하였다. 이러한 사전 연습에도 불구하고 피실험자의 긴장상태와 센서 부착의 불편함, 5번의 반복적 실험으로 인한 피곤함 등이 데이터에 반영될 가능성이 크므로, 첫 번째와 마지막의 실험 데이터는 반영하지 않았다.

2.2 측정도구 및 방법

보행 및 족압 데이터 수집을 위한 센서로는 Dynafit [10]을 사용하였다. 인솔의 두께는 2mm이며, 무게는 50g, 압력 범위는 $100\text{g}/\text{cm}^2 \sim 50,000\text{g}/\text{cm}^2$, sampling rate 은 초당 100Hz 로 족압 정보를 수집하였다. 아래의 그림 1에 Dynafit의 소프트웨어를 이용한 좌측 발의 입각기와 유각기의 족압 값을 도식화하였다.

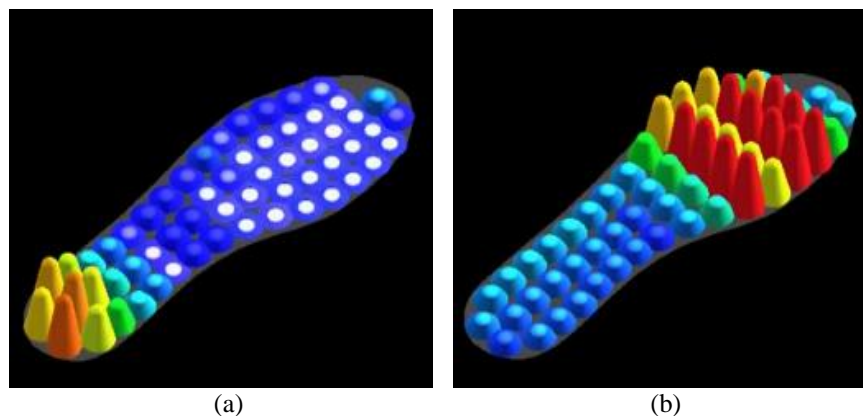


Figure 1. Pressure in stance phase (a) and swing phase (b) of the left foot during walking examples
 그림 1. 보행 시 좌측 발의 입각기 (a)와 유각기 (b)의 압력 값 예시

본 논문의 실험 및 검증을 위해 수집한 족압 데이터는, 좌측과 우측 발의 인솔에 부착한 58 개 셀별로 Relative Load(RL)을 계산하여 분석하였다. RL 은 보행 시 발 전체에서 해당 셀의 상대적인 압력 값을 의미한다. 우선 RL 을 구하기 위해 Novel GmbH Inc.[11] (Novel GmbH Inc., Munich, Germany)의 Pressure Time Integral (PTI_N)을 수식 (1)과 같이 구한다. 여기서 Δt 는 임의의 시간 간격을 의미하며 본 논문에서는 0.1 초로 설정하였다. PP_i 는 i 번째 구간에서의 최대 Peak Pressure 값을 의미한다.

$$PTI_N = \sum PP_i \times \Delta t \tag{1}$$

본 논문에서 최종적으로 얻고자 하는 RL 값은 PTI_N 을 이용하여 아래의 수식 (2)에서와 같이 얻을 수 있다.

$$RL = \frac{\text{anatomical area } PTI_N}{\text{total } PTI_N} \times 100(\%) \tag{2}$$

III. 실험 및 분석

본 논문의 실험을 위해, 2.1 절에서 설명한 피실험자를 대상으로 좌측과 우측의 족압 데이터를 측정 및 수집하였다. 수집을 위한 인솔 센서는 Dynafoot [10]을 통해 초당 100Hz 의 압력 데이터를 수집하였다. 좌측과 우측의 인솔 센서는, 아래의 그림 2 와 같이 각각 58 개의 셀(Cell)로 구분하여 측정하였다.

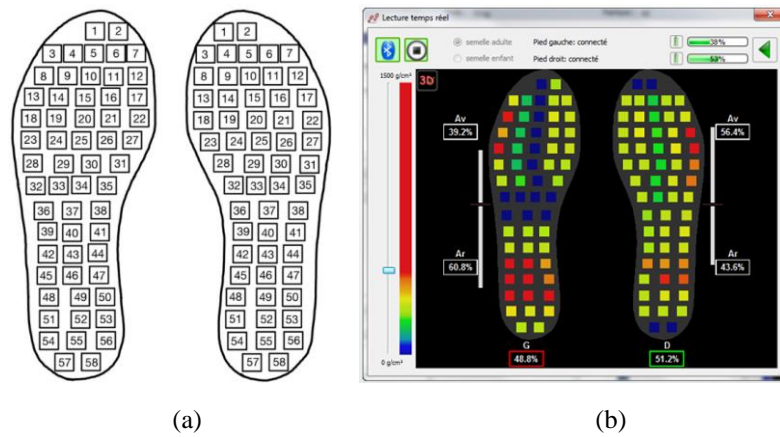


Figure 2. 58 cell locations on the insoles of the left and right foot (a), Dynafoot's SW examples (b)

그림 2. 좌측과 우측 발의 인솔에 위치한 58 개 셀 위치 정보 (a), Dynafoot 의 SW 예시(b)

실험 결과, 116 개의 셀 중에서 12 개의 셀에서 $* p < .05$ 의 유의미한 결과를 보임을 실험을 통해 확인하였다(표 1 참조).

Table 1. Relative Loads Values of 12 Cells [Mean; (Max)]
 표 1. 12 개의 셀의 Relative Load 값 [Mean; (Max)]

Cell Area (n=156)	p-value	Relative Loads (%)	
		Normal	Stroke
Cell10L*	0.02279	2.00(3.40)	1.30(2.57)
Cell14L*	0.03511	2.06(5.51)	1.59(3.46)
Cell15L**	0.007571	2.09(3.75)	1.43(2.77)
Cell16L*	0.04733	2.21(3.72)	1.63(3.26)
Cell20L*	0.02097	1.54(2.87)	1.32(3.16)
Cell42L*	0.02858	1.81(3.92)	1.94(5.12)
Cell14R**	0.008034	1.85(3.71)	1.39(3.32)
Cell24R*	0.01473	1.16(3.00)	1.07(2.06)
Cell27R*	0.04962	2.35(4.19)	2.34(4.14)
Cell28R*	0.01177	0.87(2.25)	0.90(3.19)
Cell48R*	0.02265	3.26(7.43)	3.46(7.57)
Cell50R*	0.03624	2.54(4.78)	2.89(7.36)

*(p < 0.05), ** (p < 0.01)

본 실험에서는 앞에서 정의한 수식(2)의 RL 값을 기반으로 box plot 분석을 통해 뇌졸중 고령자와 일반 고령자의 각 셀 별로 비교 실험하였다. 다음의 그림 3~5에서는 좌측발의 앞꿈치, 우측발의 앞꿈치, 우측발의 뒤꿈치 6 개 셀에서 뇌졸중 고령자와 정상 고령자 간의 box plot 에서 압력 값 범위와 중앙 값, 이상치(Outlier)을 종합적으로 분석하고 가시화하였다.

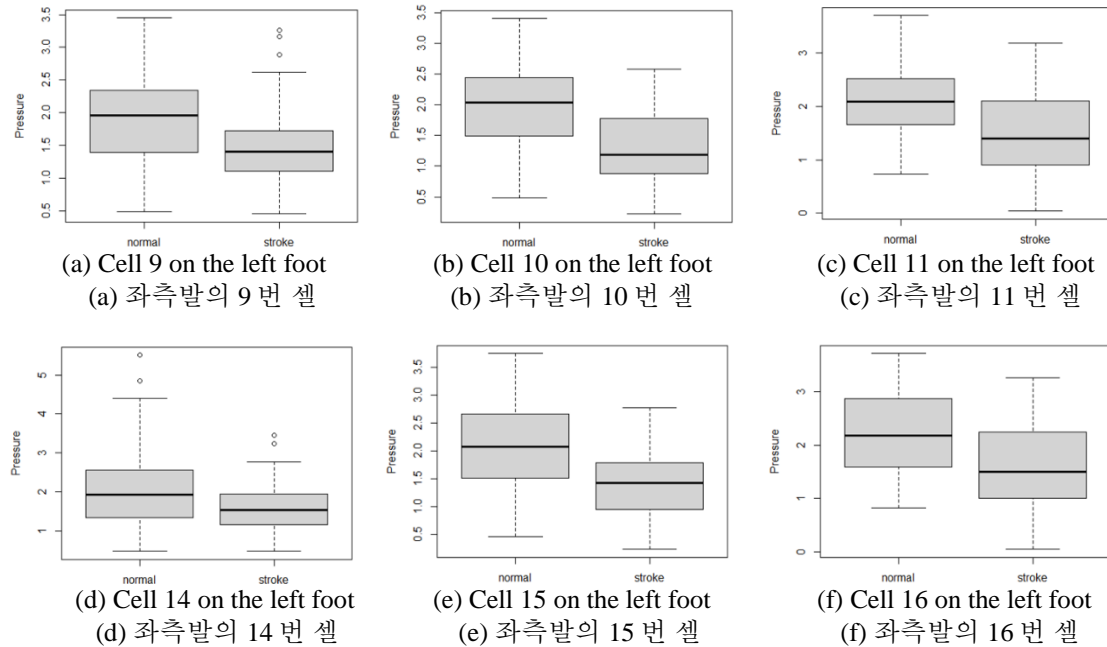


Figure 3. The box plot analysis of 6 cells in swing phase (toe region) of the left foot
 그림 3. 좌측발의 유각기(앞꿈치 영역)에서 6 개 셀의 box plot 분석

그림 3 에서의 분석 결과에 의하면, 좌측발의 앞꿈치 영역에서 뇌졸중 고령자가 정상인 고령자에 비해 전반적으로 낮은 압력 값과 중앙 값을 갖는 경향을 보였다.

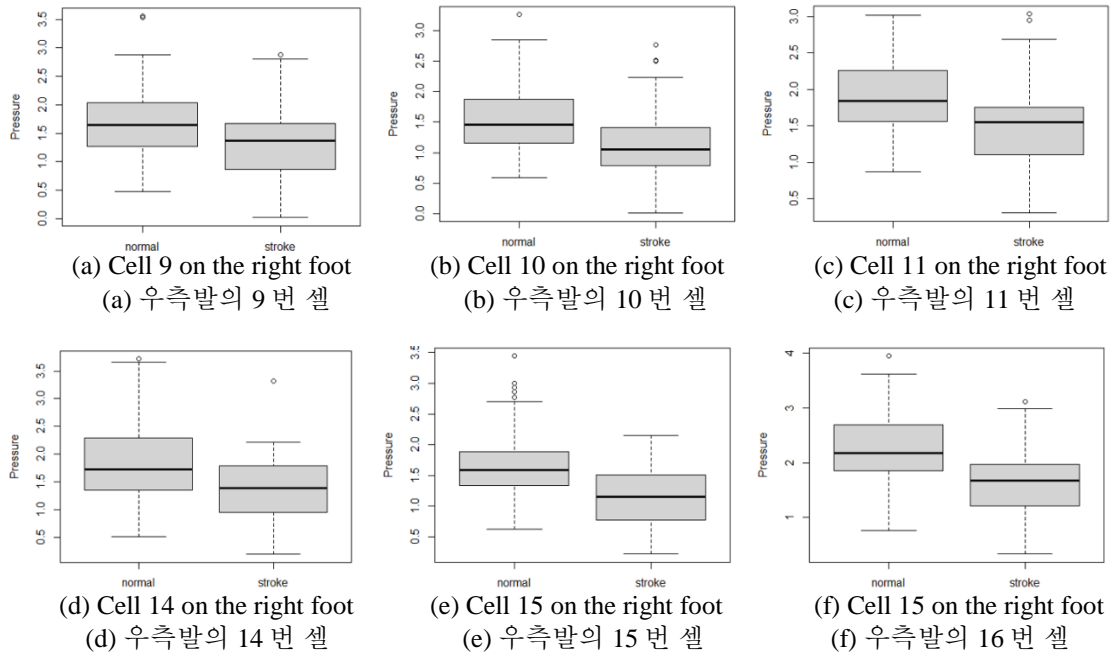


Figure 4. The box plot analysis of 6 cells in swing phase (toe region) of the right foot

그림 4. 우측발의 유각기(앞꿈치 영역)에서 6 개 셀의 box plot 분석

그림 4의 실험결과를 종합해보면, 그림 3에서와 마찬가지로 우측발의 앞꿈치 영역에서 뇌졸중 고령자가 정상인 고령자에 비해 전반적으로 낮은 압력 값과 중앙 값을 갖는 경향을 보였다.

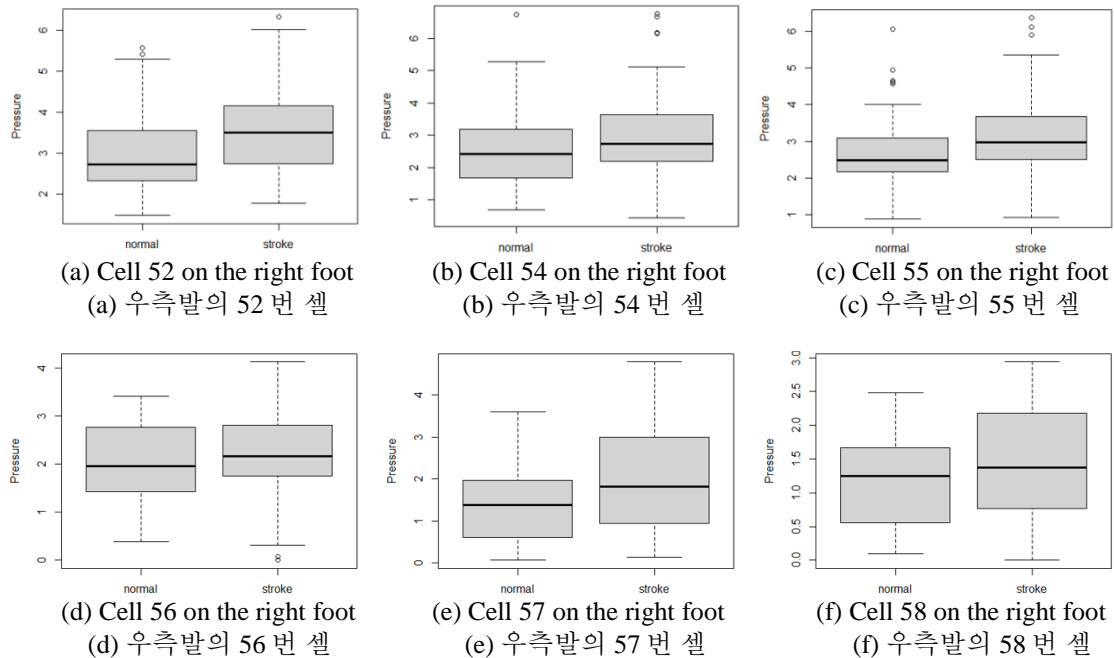


Figure 5. The box plot analysis of 6 cells in stance phase (heel region) of the right foot

그림 5. 우측발의 입각기(뒤꿈치 영역)에서 6 개 셀의 box plot 분석

본 실험에 의하면, 뇌졸중 고령자와 정상인 고령자 간에 좌측발 뒷꿈치 영역에서의 box plot 분석에 의한 압력 값과 중앙 값 등에서 유의미한 차이를 보이지 않았다. 하지만, 그림 5 에서와 같이 우측발의 입각기에서 뇌졸중 고령자가 정상인 고령자에 비해 높은 압력 값과 중앙 값을 갖는 경향을 보이고 있다.

그림 3 에서부터 5 까지의 box plot 실험을 종합해보면, 보행에서의 뇌졸중 환자들은 정상인 고령자에 비해 유각기에서의 압력 값이 작게 나타났다. 또한, 우측발의 입각기에서 뒤꿈치 영역의 압력 값과 중앙 값이 큰 경향을 보이는 것을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 결과적으로, 뇌졸중 환자는 보행 시에 오랜 시간동안 우측발의 뒤꿈치 영역에 더 많은 체중이 실고 걷는 경향을 보이며, 정상인 고령자에 비해 균형 있는 보행에 어려움이 있음을 실험을 통해 검증 및 확인하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 보행 중에 수집한 족압 데이터가 고령자의 뇌졸중 질환과 어떤 연관이 있는지 실험 및 유의미한 분석결과를 제시하였다. 뇌졸중 고령자와 일반인 간 보행 시 RL 값이 12 개 셀에서 $*p < .05$ 인 유의미한 결과를 보임을 실험을 통해 확인하였다. 또한, 뇌졸중 고령자와 일반 고령자의 box plot 분석을 통해 입각기와 유각기에서의 압력 분포와 보행 성향에서도 유의미한 차이가 있음을 실험을 통해 검증하였다. 본 논문의 실험결과를 통해, 뇌졸중 고령자와 일반 고령자의 일생생활에서의 보행 패턴에서 유의미한 차이가 있음을 발견했다는 것에 그 의미가 크다고 사료된다.

향후 연구과제로는, 보행 시 압력 데이터에서 중요 특징을 추출하고 기계학습 또는 시계열 족압 데이터 기반의 딥러닝 기반의 뇌졸중 전조증상 및 예측에 관한 연구를 진행할 예정이다.

V. 감사의 글

이 논문은 2015 년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 국가과학기술연구회 융합연구단 사업(No. CRC-15-05-ETRI)의 지원을 받아 수행된 연구임.

VI. 참고문헌

- [1] J. Yu, S. Park, S.H. Kwon, C.M.B. Ho, C.S. Pyo, H. Lee, "AI-based stroke disease prediction system using real-time electromyography signals," *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 19, pp. 1-19, 2020.
- [2] J. Yu, S. Park, H. Lee, C.S. Pyo, Y.S. Lee, "An elderly health monitoring system using machine learning and In-depth analysis techniques on the NIH stroke scale," *Mathematics*, Vol. 8, No. 7, pp. 1-16, 2020.
- [3] World Health Organization. The top 10 causes of death. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>
- [4] J.S. Chang, S.Y. Lee, M.H. Lee, Y.W. Choi, H.M. Lee, H.J. Oh, "The Correlations between gait speed and muscle activation or foot pressure in stroke patients," *The Journal Korean Society of Physical Therapy*, Vol. 21, No. 3, pp. 47-52, 2009.
- [5] J.H. Jeong, Y.D. Kim, E.J. Kim, S.H. Lee, "The effects of treadmill according to walking direction on the affected side lower limb muscle activity and walking characteristic in stroke patients," *Journal of Korean Society for Neurotherapy*, Vol. 20, No. 2, pp. 7-15, 2016.
- [6] Y.S. Kim, "Muscle activation patterns of stair gait in hemiparetic patients using surface electromyography," *Journal of Adapted Physical Activity & Exercise*, Vol. 14, No. 1, pp. 1-15, 2006.
- [7] T. Melai, T.H. IJzerman, N.C. Schaper, T.L.H. de Lange, P.J.B. Willemsb, K. Meijerb, A.G. Lieversd, H.H.C.M. Savelbergb, "Calculation of plantar pressure time integral, an alternative approach," *Gait & Posture*, Vol. 34, pp. 379-383, 2011.

- [8] K.J. Nolan, M. Yarossi, P. McLaughlin, "Changes in center of pressure displacement with the use of a foot drop stimulator in individuals with stroke," *Clinical Biomechanics*, Vol. 30, No. 7, pp. 755-761, 2015.
- [9] Y. Choi, S.J. Park, J.J. Jun, C.S. Pyo, K.H. Cho, H.S. Lee, J. Yu, "Deep learning-based stroke disease prediction system using real-time bio signals," *Sensors*, Vol. 21, No. 13, pp. 1-17, 2021.
- [10] Dynafoot, Techno Concept, <https://technoconcept.com/>
- [11] S. Kimmekamp, E.M. Hennig, "Heel to toe motion characteristics in Parkinson patients during free walking," *Clinical Biomechanics*, Vol. 16, No. 9, pp. 806-812, 2001.

저자 소개



정남교(NamKyo Jung)

2017년 2월 ~ 현재 고려대학교 전기전자공학부 3학년 재학

관심분야 : 헬스케어 서비스, 인공지능, 데이터 분석



박세진(Se Jin Park)

1985년 : 고려대학교 (공학석사-산업공학)

1994년 : 고려대학교 (공학박사-산업공학)

관심분야 : 헬스 관련 빅데이터 수집 및 분석, 지능형 건강 모니터링 시스템, 감성공학, HCI



권순현(Soon-Hyun Kwon)

2003년 2월 숭실대학교 (이학석사-컴퓨터학)

2008년 2월 숭실대학교 (이학박사 수료-컴퓨터학)

관심분야 : 온톨로지, 온톨로지 추론, 시맨틱웹, 지식임베딩, 시맨틱 IoT/IoE 플랫폼, 지능형 데이터베이스



전중암(Jongarm Jun)

1987년 : 경북대학교 (공학사-전자공학)

1989년 : 연세대학교 (공학석사-전자공학)

관심분야 : IoT, 빅데이터 분석, 헬스케어, 실시간 AI 서비스 플랫폼



유재학(Jaehak Yu)

2003년 2월 고려대학교 (이학석사-전산학)

2010년 2월 고려대학교 (이학박사-전산학)

관심분야 : 데이터마이닝, 기계학습, 딥러닝, 헬스케어분석, 침입탐지, 지능형 데이터베이스