

전기자극의 강도와 측정전극의 간격이 감각신경신호의 파라미터에 미치는 영향 연구

임경민 · 송동진

중원대학교 의료공학과

The Effects of the Stimulation Intensity and Inter-Electrode Distance on the Parameters of the Measured Sensory Nerve Signal

Kyeong Min Lim and Tongjin Song

Department of Biomedical Engineering, Jungwon University

(Manuscript received 9 December 2014; revised 12 December 2014; accepted 12 December 2014)

Abstract: This study was designed to investigate the effects of stimulation intensity and inter-electrode distance on the parameters of the measured sensory nerve signal. 30 healthy subjects participated in this study. Sensory nerve signals were elicited by four different pulse amplitudes, i.e., 3, 6, 9, 12 mA, with the pulse width fixed at 500 μ s. The sensory nerve signals elicited by the four different pulse amplitudes were measured by four different inter-electrode distances (20, 30, 40, and 50 mm). We extracted four parameters (pulse amplitude, pulse width, pulse area, and latency time from stimulation) from the sensory nerve signals. The measured pulse amplitude and pulse width were increased when the measuring inter-electrode distance was increased while the stimulating pulse amplitude was fixed. The measured pulse amplitude was saturated with the stimulating pulse amplitudes of over 6 mA while measuring inter-electrode distance. Under the same condition, measured pulse width was increased, and sensory nerve signal was initiated early. Sensory nerve signals, specially those of pulse amplitude, were distorted by a differential amplification method that commonly measures the human body signal. The experimental results indicate that the differential amplification method is required to be replaced when measuring nerve signals. Our observations suggested that the hyperpolarization of the action potential of the sensory nerve signal for preventing distortion could be used to clarify the correlation between the parameters of the sensory nerve signals and quantification of sensations.

Key words: Sensory nerve signal, Stimulation intensity, Inter-electrode distance, Parameter

1. 서 론

환자의 말초신경을 전기로 자극하면 뇌전도(electroencephalogram)에서 전기자극의 반응이 측정된다는 1947년

도의 Dawson[1]의 연구 결과 이후로, 말초신경을 자극하고 감각신경에서 신호를 직접 측정하는 연구가 1949년도에 Dawson과 Scott[2]에 의해서 진행되었다. 말초신경에서 감각신호 측정이 가능하다는 연구들을 시작으로 1958년도에는 Gilliatt와 Sears[3]는 67명의 비장애인과 41명의 환자들을 대상으로, 환자들이 비장애인에 비하여 측정되는 감각신경신호의 높이가 낮고, 전기자극 시점부터 신경신호가 발생하는 시점까지의 잠복시간은 길다는 결과를 얻음으로써 감각신경신호의 측정이 말초신경계 질환 진단에 사용될 수 있음을 시사하였다.

말초신경계의 질환을 가지고 있는 환자의 신경신호 파라

Corresponding Author : Tongjin Song
85, Munmu-ro, Goesan-eup, Goesan-gun, Chungcheongbuk-do 367-700, Korea
TEL: +82-43-830-8601, 010-6715-5103
E-mail: tongjinsong@hanmail.net

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. NRF-2013R1A1A2011033) 과제의 지원을 받아 수행하였음.

미터는 비장애인의 신경신호 파라미터와 다르다는 것이 밝혀지자, 자극 또는 측정조건이 측정되는 신경신호의 파라미터에 미치는 영향을 연구하기 시작하였다. 신경을 자극하는 자극의 강도와 측정되는 신경신호의 파라미터와의 관계도 연구되었다. Wiederholt[4]는 감각신경을 자극하는 전압의 크기를 증가시키면, 측정되는 감각신경신호의 크기는 커지지만, 신경전도속도(conduction velocity)는 변화하지 않는다는 연구결과를 발표하였다.

신경신호를 측정하는 방법에 대한 연구도 진행된 바 있다. Eduardo와 Burke[5]는 1988년도에 접지전극의 영향을 제거하는 방법을 제시하였다. 접지전극의 영향을 제거하면 측정되는 신경신호의 모양 자체가 달라지므로 이전 연구와 다른 결과를 도출하였다. 그들은 측정전극의 간격이 클수록 측정신호의 왜곡이 작아지지만 잡음은 커진다는 결과를 얻었다.

측정전극의 간격이 측정되는 신경신호의 파라미터에 미치는 영향이 연구되었다. Evanoff Jr.와 Buschbacher[6]는 2004년에 측정전극의 간격이 4 cm일 때가 3 cm일 때보다 신호측정 지연시간, 신호가 최대에 도달하는데 걸리는 기간, 그리고 감각신경신호의 높이가 높다는 결과를 얻었으나 통계적으로 유의한 결과는 아니었다. 또한 그들은 감각신경신호의 높이의 평균이 임상적으로 큰 의미를 가지지는 않다고 평가했다. 이 결과와 다른 결과를 얻은 연구도 있다. Plastaras 등[7]은 2008년도에 측정전극 사이의 거리가 3 cm와 4 cm로 달라질 때, 감각신경신호의 높이, 지연시간, 펄스 너비, 그리고 신경전도속도를 비교하였다. 감각신경신호의 높이에 대한 그들의 결과에서는 유의미한 통계적 차이가 없었으며, 지연시간, 펄스의 너비, 그리고 전파속도는 통계적으로 유의한 결과를 얻었지만 임상적으로 큰 의미를 가지지 않는다고 평가했다.

많은 연구가 선행되었으나, 측정전극의 크기나 형태를 바꾸기는 쉽지 않아서 2008년에 와서 처음으로 연구되기 시작하였다. Ven 등[8]은 측정전극의 면적과 신경신호 측정시 측정전극을 누르는 압력 차이에 대한 연구를 하였다. 그들은 측정전극을 5×5, 5×20, 그리고 5×40 mm로 만들어 사용했으며, 그들의 결과에 의하면, 측정전극의 크기는 작을수록 측정되는 신경신호의 높이가 높아졌고, 측정전극을 누르는 압력이 클수록 측정되는 신경신호의 높이가 높아졌다.

감각신경신호의 파라미터에 대한 연구들에 힘입어서 현재는 감각신경신호를 측정하여 신경계와 관련된 여러 종류의 질병을 진단하고 하고 있다. 감각신경신호의 전도속도는 당뇨병 환자의 말초신경 장애 평가[9] 도구로 사용될 뿐만 아니라 신경과 근육의 이상 유무 진단 및 평가에도 사용되고 있다[10]. 감각신경신호는 근육과 신경의 병변을 진단하고 평가하는데 사용되는 것을 넘어서서, 신체 일부의 움직임 여

부를 정확히 파악하는데 사용되는 등의 의료관련 공학분야에 적용되기도 한다[11].

본 연구에서는 개인마다 신체의 크기가 다르고, 신경이 분포해 있는 위치가 동일하지 않으므로 정중신경(median nerve)의 위치를 정확하게 찾는 방법을 제시하고, 측정전극의 간격과 자극하는 전기자극 펄스의 높이(강도)가 감각신경신호의 파라미터에 미치는 영향을 고찰하고, 측정전극 사이의 거리가 측정되는 신경신호의 파라미터인 크기, 폭, 면적, 그리고 전기자극 시점부터 신경신호가 유발되는 시점까지의 지연시간에 미치는 영향을 고찰하였다.

II. 방 법

1. 대상자 및 실험

감각신경에 병변이 없는 20세 이상의 남녀 각 15명씩 30명이 실험에 참여하였고, 대상자들은 모두 실험과정과 실험도중에 발생할 수 있는 위험 상황 등에 대하여 자세히 설명을 들은 후에 실험참여 동의서(participant consent form)에 서명하고 실험에 참여하였다.

본 연구에서는 표면전극을 사용하는 비관혈적 방법으로 감각신경신호를 측정할 때, 측정전극 사이의 거리변화가 측정되는 감각신경신호의 파라미터에 미치는 영향과 전기자극 강도의 변화가 감각신경신호의 파라미터에 미치는 영향을 고찰하였다. 즉, 감각신경의 신호를 유발시키는 전기자극은 동일한 펄스와 동일한 부위로 고정하고, 측정하는 전극 사이의 거리만을 변화시키면서 감각신경신호를 측정하였다. 또한 위 실험과 동일한 실험과정을 전기자극 펄스의 크기만 증가시키면서 반복하여 감각신경신호의 데이터를 얻었다. 측정된 감각신경신호들에서 추출한 파라미터들은 측정전극 사이의 거리 및 전기자극의 강도 별로 비교·분석하였다.

2. 전기자극

전기 펄스로 인체의 말단부위를 자극하여 감각신경신호를 유발하였다. 감각신경의 신호를 유발시키기 위한 전기자극의 펄스는 단상(monophasic)을 사용하였고, 전기 자극의 강도를 증가시키는 방법으로는 펄스의 높이를 고정하고 펄스의 폭을 증가시키는 펄스 폭 변조방식(pulse width modulation)보다 상대적으로 통증을 적게 유발시키는 펄스 높이 변조(pulse amplitude modulation) 방식을 적용하였다. 즉, 펄스의 폭(pulse width)은 500 μ s로 고정하고 펄스의 높이를 3, 6, 9, 12 mA로 변화시키면서 자극하였다. 또한 이전 자극에 의한 영향을 최소화하기 위하여 펄스 높이의 순서는 랜덤(random)하게 적용하였다. 전기자극 기기는 Medelec Synergy (Oxford Instruments, Abingdon, Oxfordshire, UK)를 사용하였다.

전기자극을 위한 전극은 전극 사이의 거리가 1.7 cm로 고정되어 있는 침 타입의 건식 표면전극이 사용되었다. 전기자극용 전극의 위치는 상지의 정중신경(median nerve)에서 감각신경신호를 유발시키기 위하여 자극용 전극의 한쪽을 검지 손가락 끝 마디의 중앙 부위에 위치시키고, 다른 한쪽 전극은 검지 손가락 끝 마디에서 근위(proximal) 방향 중앙에 위치시킨 후에 자극하였다.

3. 감각신경신호의 측정 및 파라미터

전기자극으로 생성된 감각신경신호는 표면전극을 사용하는 비관혈적(non-invasive) 방법으로 측정하였다. 감각신경신호는 전기자극에 사용된 Medelec Synergy 기기의 신경신호 측정 기능을 사용하여 전기자극과 동시에 측정하였으며, 측정용 전극은 지름이 20 mm인 원형의 은-염화은(Ag-AgCl) 표면전극(CareFusion, Middleton, WI, USA)을 사용하였다. 표면전극으로 생체신호를 측정할 때 높은 임피던스를 포함하여 신호의 크기를 줄이는 각질층(stratum corneum)은 전처리 과정을 통하여 가능한 한 제거한 후에 신호를 측정하였다. 각질층을 제거하는 방법으로는 손바닥을 제외한 부위는 전극을 부착하기 이전에 면도를 하였고, 또한 손바닥을 포함한 모든 부위는 전해액(electrolyte gel)으로 닦아내어는 방법을 사용하였다.

감각신경신호 측정용 표면전극은 정중신경의 위치를 찾은 후에 전극의 중앙부분을 정중신경이 지나가는 부위에 부착하였다. 우선, 대상자마다 정중신경의 해부학적 위치가 다르므로, 대상자마다 정중신경의 정확한 위치를 찾는 실험을 하였다. 운동신경과 감각신경은 하나의 신경다발에 위치하므로, 역으로 정중신경이 지나가는 부위인 중지 손가락과 접하는 검지 손가락 옆 부분에 측정전극을 부착하고, 아래팔(forearm)에서 정중신경이 위치하는 것으로 추정되는 부위 주변을 전기로 자극하면서 운동신경 신호(motor nerve signal)가 가장 크게 측정되는 부위들을 찾았다. 동일한 강도의 자극으로 운동신경의 신호가 가장 크게 측정되는 부위가 운동신경이 위치한 부분이라 할 수 있고, 운동신경과 감각신경이 하나의 신경다발에 위치해 있으므로 찾아진 운동신경의 위치들이 정중신경이 지나가는 위치라고 추정하였다. 손바닥의 정중신경이 지나가는 부위에 부착한 측정용 전극은 손바닥 중앙의 한 점을 기준으로 전극의 중심에서 중심 사이의 거리를 변경하였고, 아래팔 부위에 부착한 측정용 전극은 손목에서 근위방향으로 7 cm인 점을 기준으로 전극의 중심에서 중심 사이의 거리를 다르게 하여 측정하였다.

측정전극 사이의 간격이 측정되는 신경신호의 파라미터에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 정중신경의 원위부(distal)인 검지손가락의 끝 마디를 동일한 강도의 전기로 자극하고, 측정전극 사이의 간격은 전극 중앙에서 중앙까지의 거리를

두 전극이 맞닿아 합선(short-circuit)만 되지 않는 최소거리인 20 mm, 그리고 30, 40, 50 mm로 변경하여 부착하면서 감각신경의 신호를 측정하였다. 전기자극 강도의 변화가 측정되는 신경신호의 파라미터에 미치는 영향도 분석하기 위하여 측정전극 사이의 거리를 20 mm로 고정하고, 전기자극의 강도를 3, 6, 9, 12 mA로 각각 변경하여 자극하면서 감각신경신호를 측정하였다. 또한 감각신경 측정 전극의 간격을 30, 40, 50 mm로 각각 변경하고 각각의 경우에 대하여 전기자극 강도를 3, 6, 9, 12 mA로 각각 변경하면서 감각신경의 신호를 측정하였다. 본 실험에서 공통된 접지 전극의 부착 위치는 전기자극 신호의 영향을 줄이고 근전도(electromyogram)의 영향이 적은 바깥쪽 손목 부위를 선택하였다.

측정된 감각신경신호들에서 추출한 파라미터들은 펄스의 높이(amplitude), 폭(pulse width), 면적(area) 그리고 전기로 감각신경을 자극하는 시점부터 신경신호가 유발되기 시작하는 시점까지의 잠복시간(T_d)이고, 측정된 감각신경신호들은 측정전극 사이의 거리 및 전기자극의 강도 별로 비교·분석하였다.

III. 결 과

그림 1(a)는 측정전극의 전극간 거리 차이가 신경신호의 측정되는 높이에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 측정전극의 중심 사이의 거리를 독립변수, 측정된 감각신경신호의 높이를 종속변수로 나타내었고, 감각신경을 자극하는 펄스의 높이에 의한 영향도 비교하기 위하여 3, 6, 9, 12 mA의 각 그래프를 하나로 모아서 나타내었다. 30명의 대상자 데이터에서 감각신경을 자극하는 펄스의 높이가 3 mA이고 측정전극의 중심 사이의 거리가 20, 30, 40, 50 mm일 때 추출한 감각신경신호의 높이 데이터 30개씩을 각각 평균하여 4개의 데이터들을 얻었다. 다음에는 얻어진 4개 데이터를 측정전극의 중심 사이의 거리가 20 mm인 데이터로 표준화(normalization)하였다. 동일한 과정을 반복하여 자극하는 전기자극 펄스의 높이 6, 9, 12 mA 별로 총 16개의 데이터를 얻었다.

그림 1(a)에서 3 mA의 전기 펄스로 자극하여 감각신경신호의 높이를 얻은 그래프를 보면, 감각신경신호를 유발시키는 자극의 세기는 동일하지만 측정전극의 중심 사이의 거리가 10 mm에서 50 mm까지 10 mm씩 멀어질수록 측정되는 감각신경신호의 높이는 22, 28, 11%씩 커졌다. 측정전극 사이의 거리가 멀어질수록 측정되는 감각신경신호의 높이가 크게 측정되는 결과는 신경을 자극하는 펄스의 높이가 3 mA 일 때뿐만 아니라 6, 9, 12 mA에서도 동일하게 관찰되었다. 즉, 그림 1(a)에 표시된 측정전극의 중심 사이의 거리가 20

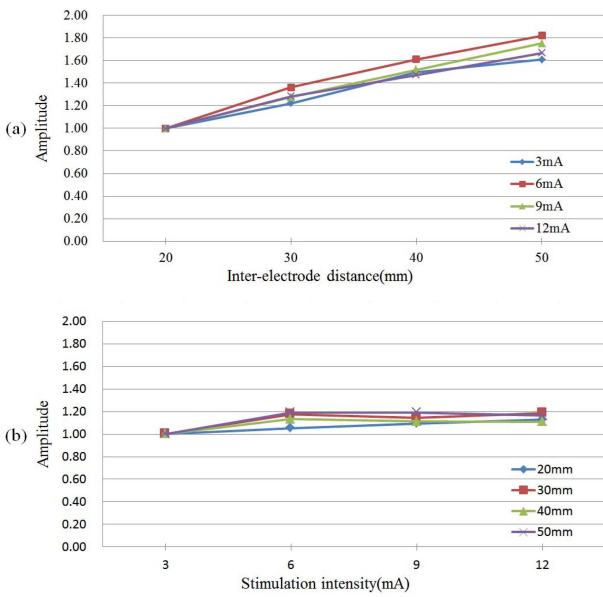


그림 1. 표준화된 감각신경신호의 높이. (a) 독립변수: 측정전극의 간격, (b) 독립변수: 자극펄스의 높이.
 Fig. 1. The normalized pulse amplitude of the measured sensory nerve signal. (a) Independent variable: inter-electrode distance, (b) Independent variable: pulse amplitude.

mm인 4개의 값을 평균하면 1.00 ± 0.00 이고 30, 40, 50 mm에서의 4개 데이터 값들의 평균값과 표준편차는 각각 1.28 ± 0.05 , 1.52 ± 0.05 , 1.71 ± 0.08 로, 측정전극의 중심 사이의 거리가 10 mm씩 멀어질 때마다 평균 28, 24, 19%씩 커졌다.

그림 1(b)는 전기자극의 강도가 감각신경신호의 측정되는 높이에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 측정전극의 중심 사이의 거리를 독립변수, 측정된 감각신경신호의 높이를 종속변수로 나타내었고, 측정전극의 중심 사이의 거리에 의한 영향도 비교하기 위하여 20, 30, 40, 50 mm의 각 그래프를 하나로 모아서 나타내었다. 30명의 대상자 데이터에서 측정전극의 중심 사이의 거리가 20 mm이고 감각신경을 자극하는 펄스의 높이가 3, 6, 9, 12 mA일 때 추출한 감각신경신호의 높이 데이터 30개씩을 각각 평균하여 4개의 데이터들을 얻었다. 다음에는 얻어진 4개 데이터를 감각신경을 자극하는 펄스의 높이가 3 mA인 데이터로 표준화하였다. 동일한 과정을 측정전극 중심 사이의 거리가 30, 40, 50 mm인 데이터들에서도 반복하여 총 16개의 데이터를 얻었다.

그림 1(b)의 4개 그래프 결과를 보면, 감각신경을 자극하는 전기자극의 펄스 높이를 3 mA에서 12 mA까지 3 mA 단계로 증가시킬 때, 9 mA부터는 측정되는 감각신경신호의 크기가 크게 증가하지 않았다. 그림 1(b)에 표시된 감각신경을 자극하는 펄스의 높이가 3 mA일 때의 4개 데이터의 평균값은 1.00 ± 0.00 이고 6, 9, 12 mA에서의 4개 데이터 값

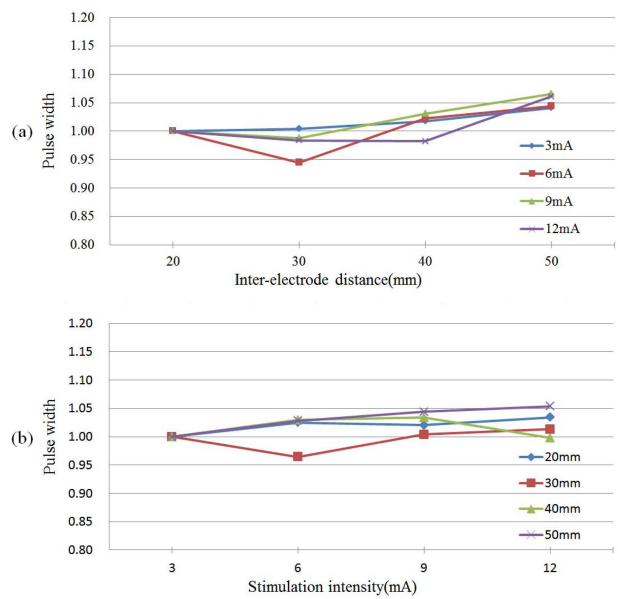


그림 2. 표준화된 감각신경신호의 너비. (a) 독립변수: 측정전극의 간격, (b) 독립변수: 자극펄스의 높이.
 Fig. 2. The normalized pulse width of the measured sensory nerve signal. (a) Independent variable: inter-electrode distance, (b) Independent variable: pulse amplitude.

들의 평균값과 표준편차는 각각 1.14 ± 0.05 , 1.14 ± 0.04 , 1.15 ± 0.03 로, 3 mA에서 12 mA까지 3 mA씩 감각신경을 자극하는 펄스의 높이가 증가할 때마다 14, 0, 1%씩 커졌다.

그림 2(a)는 측정전극의 전극간 거리 차이가 신경신호의 측정되는 너비에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 그림 1(a)를 얻었을 때와 동일한 과정을 반복하여 얻었으며, 그림 2(a)를 얻는 과정이 그림 1(a)를 얻은 과정과 유일하게 다른 점은 측정된 감각신경신호에서 추출한 파라미터가 펄스의 너비인 점이다. 그림 2(a)를 보면, 측정전극의 중심 사이의 거리가 멀어지면 측정되는 감각신경신호의 너비는 크게 증가하지는 않지만 증가하는 추세를 나타내었다. 측정전극의 중심간 거리가 20 mm부터 10 mm씩 50 mm까지의 각 4개 데이터 값들의 평균값과 표준편차는 1.00 ± 0.00 , 0.98 ± 0.02 , 1.01 ± 0.02 , 1.05 ± 0.01 로, 측정전극의 중심 사이의 거리가 20 mm에서 10 mm씩 멀어질 때 감각신경신호의 너비는 -2, 1, 5%씩 길어졌다.

그림 2(b)는 전기자극의 강도가 신경신호의 측정되는 너비에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 그림 1(b)를 얻었을 때와 동일한 과정을 반복하여 얻었으며, 그림 2(b)를 얻는 과정이 그림 1(b)를 얻은 과정과 유일하게 다른 점은 측정된 감각신경신호에서 추출한 파라미터가 펄스의 높이 대신 너비인 점이다. 그림 2(a)를 보면, 감각신경을 자극하는 전기자극의 펄스 높이가 증가하면 측정되는 감각신경신호의 펄스 너비는 크게 증가하지는 않지만 증가하는 추세를 보인다. 감

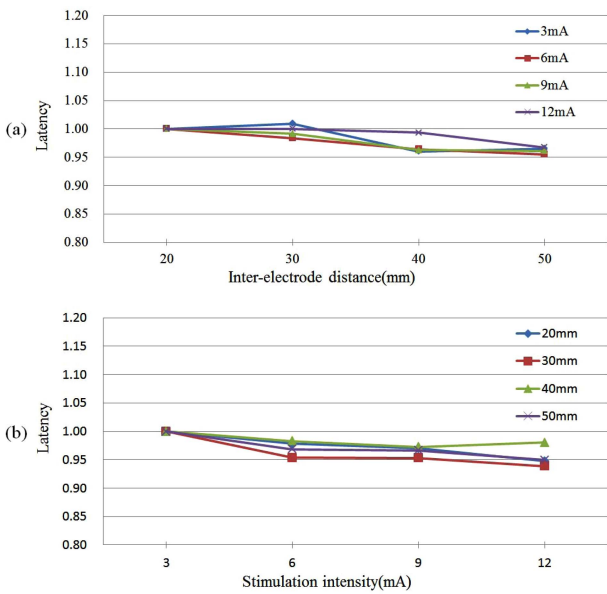


그림 3. 표준화된 감각신경신호의 잠복시간. (a) 독립변수: 측정전극의 간격, (b) 독립변수: 자극펄스의 높이.
 Fig. 3. The normalized latency time from stimulation of the measured sensory nerve signal. (a) Independent variable: inter-electrode distance, (b) Independent variable: pulse amplitude.

238

각신경을 자극하는 펄스의 높이가 3, 6, 9, 12 mA일 때의 각 4개 데이터 값들의 평균값과 표준편차는 1.00 ± 0.00 , 1.01 ± 0.03 , 1.03 ± 0.02 , 1.02 ± 0.02 다.

측정전극의 중심 사이의 거리가 20 mm부터 50 mm까지 멀어질수록 신경신호의 측정되는 면적은 증가한다. 그림 1(a)와 그림 2(a)에서 얻은 결과값과 동일한 방법으로 측정전극의 중심 사이의 거리 별로 측정된 감각신경신호의 면적을 계산하면, 측정전극의 중심 사이의 거리가 20 mm인 4개 데이터의 평균값과 표준편차는 1.00 ± 0.00 이고 30, 40, 50 mm에서의 4개 데이터 값들의 평균값과 표준편차는 각각 1.27 ± 0.10 , 1.46 ± 0.14 , 1.73 ± 0.16 로, 측정전극의 중심 사이의 거리가 10 mm씩 멀어질 때마다 평균 27, 19, 27%씩 커졌다.

감각신경을 자극하는 전기자극의 펄스 높이가 커지더라도 측정되는 신경신호의 면적은 크게 변동이 없었다. 그림 1(b)와 그림 2(b)에서 얻은 결과값과 동일한 방법으로 감각신경을 자극하는 펄스의 높이 별로 측정된 감각신경신호의 면적을 계산하면, 감각신경을 자극하는 펄스의 높이가 3, 6, 9, 12 mA일 때의 각 4개 데이터 값들의 평균값과 표준편차는 1.00 ± 0.00 , 0.96 ± 0.14 , 1.04 ± 0.14 , 0.99 ± 0.09 다.

그림 3(a)는 측정전극의 전극간 거리 차이가 전기로 감각신경을 자극하는 시점부터 신경신호가 유발되기 시작하는 시점까지의 시간(T_d), 즉 T_d 에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 그림 1(a)를 얻었을 때와 동일한 과정을 반복하여 얻

었으며, 그림 3(a)를 얻는 과정이 그림 1(a)를 얻은 과정과 유일하게 다른 점은 측정된 감각신경신호에서 추출한 파라미터가 감각신경신호의 높이 대신 T_d 라는 점이다.

앞쪽 팔의 한 점을 중심으로 두 측정전극의 중심 사이의 거리를 넓히는 방식으로 측정전극 사이의 거리를 멀어지게 하고 T_d 를 측정하면, 측정전극 사이의 거리가 멀어질수록 T_d 는 짧아진다. 그림 3(a)에서 측정전극의 중심 사이 거리가 20 mm이고 자극하는 펄스의 높이가 3, 6, 9, 12 mA인 데이터, 즉 표준화된 데이터의 평균값과 표준편차는 1.00 ± 0.00 , 1.00 ± 0.01 , 0.97 ± 0.01 , 0.96 ± 0.01 이고, 절대값의 평균과 표준편차는 3.55 ± 0.07 , 3.53 ± 0.08 , 3.44 ± 0.03 , 3.41 ± 0.06 ms다.

그림 3(b)는 감각신경을 자극하는 전기자극 펄스의 높이가 T_d 에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 그림 1(b)를 얻었을 때와 동일한 과정을 반복하여 얻었으며, 그림 3(b)를 얻는 과정이 그림 1(b)를 얻은 과정과 유일하게 다른 점은 측정된 감각신경신호에서 추출한 파라미터가 감각신경신호의 높이 대신 T_d 라는 점이다. 감각신경을 자극하는 펄스의 높이가 커지면 측정전극의 중심 사이의 거리와는 관계없이 T_d 가 짧아졌다. 그림 3(b)에서 측정전극의 중심 사이 거리가 20 mm이고 자극하는 펄스의 높이가 3, 6, 9, 12 mA인 데이터, 즉 표준화된 데이터의 평균값과 표준편차는 1.00 ± 0.00 , 0.97 ± 0.01 , 0.97 ± 0.01 , 0.95 ± 0.02 이고, 절대값의 평균과 표준편차는 3.58 ± 0.08 , 3.48 ± 0.06 , 3.46 ± 0.06 , 3.42 ± 0.05 ms다.

IV. 토 의

신경신호 자체의 크기는 μV 단위로 매우 작기 때문에 신경신호를 측정할 경우에는 표면전극보다는 상대적으로 신경신호를 크게 측정할 수 있는 매식전극을 선호하지만, 본 실험에서는 전극의 부착위치를 바꾸어야 하는 실험 자체의 특성 등을 고려하여 표면전극을 사용하여 신경신호를 측정하였다. 피부를 제외한 인체 내부의 임피던스는 약 500Ω 이고 피부의 임피던스는 약 $18 k\Omega$ 으로 인체 대부분의 임피던스는 피부에 있다고 할 수 있다. 신호원과 측정기기 사이에 전류의 흐름을 방해하는 임피던스가 크면 클수록 측정기기에서 측정되는 신호의 크기가 작아지는 단점이 있고, 또한 신경신호는 자체의 크기가 μV 단위로 매우 작으므로 표면전극은 감각신경신호를 검출하는 자체도 쉽지 않다. 반면에 피부를 통과하거나 피부 밑 신경주변 또는 신경 둘레를 감싸는 매식전극은 피부의 큰 임피던스의 영향을 전혀 받지 않으므로 신경신호 자체를 크게 검출할 수 있는 장점이 있으나, 인체의 움직임에 의해서 매식 전극의 삽입된 위치가 달라지게 되면 매식 전극의 삽입된 위치를 바로잡기 위해서

매식전극을 다시 삽입해야 하고, 삽입전극의 종류에 따라서는 수술을 해야 하는 단점이 있다. 측정전극 사이의 거리가 감각신경신호의 측정되는 파라미터에 미치는 영향을 고찰하기 위해서는 측정전극 사이의 거리를 여러 번 바꾸어야 하므로 매식전극을 사용하면 측정전극 사이의 거리를 다르게 측정할 때마다 매식전극을 다시 삽입해야 한다. 그러므로 이 실험 자체의 성격상 표면전극을 사용해야만 했고, 또한 가까운 미래에 신경신호를 측정하는 기기 및 신경신호 검출에 필요한 기반 기술이 발전하여 표면전극으로도 손쉽게 신경신호를 측정할 수 있게 되면 상대적으로 심리적 저항이 적은 표면전극의 사용이 보편화 될 것이므로 이 사항 또한 고려하여 표면전극을 사용하였다.

실험 자체의 특성으로 측정전극의 부착위치를 변경하더라도 측정전극의 부착 위치들과 감각신경과의 정렬을 가능한 동일하게 하기 위하여 감각신경의 위치를 찾는 기술을 개발하여 적용하였다. 대상자마다 신경이 지나가는 해부학적 위치가 동일하지 않고, 인체에서 신호원과 측정전극의 거리가 달라지게 되면 신호원과 측정전극 사이의 전기적 부하로 작용하는 임피던스가 달라지므로, 측정되는 신호가 달라지게 된다. 본 실험 과정의 일부는 측정전극의 중심 사이의 거리를 변경시키기 위하여 측정전극의 부착위치를 변경해야만 한다. 각기 다른 전극 위치에서 측정한 감각신경신호들로부터 추출한 파라미터들을 비교, 분석하기 위해서는 측정전극의 부착위치는 달라지더라도 측정전극과 감각신경의 정렬을 같게 해야 임피던스의 차이에 의한 신호의 왜곡을 최소화할 수 있다. 그러므로 실험방법에서 기술한 방법으로 감각신경의 위치를 찾고, 부착하는 모든 측정전극의 중심과 감각신경이 지나가는 선을 일직선으로 정렬시키고 실험을 하였다. 또한 측정전극의 중심과 감각신경이 지나가는 선을 일치시키고 측정할 때 신경신호가 가장 크게 측정된다.

본 실험에서는 생체신호를 증폭하기 위하여 사용한 차동증폭의 원리는 측정전극 2개 사이의 전위차를 측정하는 것이므로 이 실험과 같이 측정전극을 측정하고자 하는 신경과 나란한 방향으로 부착할 경우에는, 감각신경신호가 유발되기 시작하여 최대 높이에 이르는 시점 즉, 감각신경의 활동전위(action potential, AP)가 지속적으로 증가하여 최대로 탈분극(depolarization)되는데 걸리는 시간(T_{ap})이 감각신경신호가 두 측정전극 사이를 지나가는 시간(T_a)보다 짧아야만 신경신호를 측정할 때 왜곡이 생기지 않는다. 이 실험에서는 2개의 측정전극을 감각신경신호가 전도되는 방향과 같은 방향으로 부착했고 감각신경신호는 원위부에서 근위부로 전달되므로, 측정전극 2개 중에서 원위부에 부착된 측정전극에서 감각신경신호가 먼저 측정되고, 근위부에 부착한 다른 하나의 전극에서는 감각신경신호가 원위부에 부착된 측정전극을 통과하여 두 번째 측정전극에 도달하게 되는 시

점부터 감각신경신호가 측정되기 시작한다. 그런데 T_{ap} 가 T_a 보다 길다면, 원위부 측정전극에 실제 감각신경신호가 최대값에 도달하기 이전에 근위부 측정전극도 이미 신경신호가 측정되기 시작하며, 차동증폭으로 측정되는 신경신호는 두 전극 사이의 전위차를 측정하게 되므로, 측정되는 감각신경신호의 최대값은 실제 감각신경의 최대 높이 값보다 작게 측정된다. 예를 들어, 실제 감각신경신호가 10 ms되는 시점에서 $2 \mu V$, 30 ms가 되는 지점에서 최대 높이인 $10 \mu V$ 에 도달하고, 두 측정전극 사이의 감각신경 전도 기간이 20 ms라고 가정하면, 20 ms까지는 원위부 측정전극에서 실제 감각신경신호가 측정되고 근위부 측정전극의 전위는 0 V가 측정되므로 실제 감각신경신호가 실제 신호와 동일하게 측정될 것이다. 그러나 20 ms 이후에는 근위부에 감각신경신호가 측정되기 시작하므로, 측정되는 감각신경신호는 원위부 측정전극에서 측정되는 전위에서 근위부 측정전극에서 측정되는 전위를 뺀 값이 측정된다. 즉, 실제 감각신경신호가 최대 높이에 이르는 30 ms일 때에는 원위부 측정전극에서 $10 \mu V$ 가 측정되고, 근위부 측정전극에서 $2 \mu V$ 가 측정되므로, 측정되는 감각신경신호의 최대값은 실제 감각신경신호보다 $2 \mu V$ 작은 $8 \mu V$ 가 될 것이다.

T_{ap} 가 T_a 보다 길어서 발생하는 신경신호의 측정 왜곡을 방지하는 방안으로는 T_a 가 T_{ap} 보다 길어지도록 두 전극 사이의 거리를 멀게 하는 방법과, 하나의 측정전극은 신경신호 위에 부착하고 다른 하나의 측정전극은 신경을 벗어나서 신경이 지나가는 방향과 90도를 이루도록 부착하는 방법이 있지만 두 방안 역시 단점이 있다. 기존에 알려져 있는 상지의 감각신경신호의 전도속도는 작게 추정하여도 40 m/s 이상인데, T_{ap} 가 5 ms라고 가정하면 감각신경신호가 5 ms 동안 20 cm 전도되므로, 두 측정전극 사이의 거리가 20 cm 이상 되어야 한다. 그러나 상지에서 측정전극을 20 cm 이상 떨어뜨리고 측정하기에는 어려움이 따른다. 원위부 측정전극은 팔목에 부착하고 근위부 측정전극은 팔목에서 20 cm 떨어진 곳에 부착하면 근위부에는 근육이 많고 신경이 근육 아래쪽에 위치해 있기 때문에 신경신호의 측정 자체가 어렵다. T_{ap} 가 T_a 보다 길어서 발생하는 신경신호의 측정 왜곡을 방지하는 또 다른 방법으로, 하나의 측정전극은 신경위에 부착하고 다른 하나의 전극은 신경이 지나가는 방향과 90도로 부착하는 방법은 이 실험에서 측정전극을 부착하는 방법과 비교하면 측정되는 신경신호의 감도와 크기가 작아지며 다른 신경 위에 측정전극이 부착되어 다른 신경신호에 의한 간섭이 발생할 수 있다.

T_{ap} 가 T_a 보다 길어서, 측정전극의 중심 사이의 거리가 20 mm부터 50 mm까지 10 mm씩 멀어질 때마다 측정되는 신경신호의 높이가 커지는 현상이 그림 1(a)에서 나타났다. 감각신경을 자극하는 전기자극의 펄스 높이가 3 mA부터 12

mA까지 3 mA씩 커지면 측정전극 사이의 측정되는 감각신경신호의 높이는 28, 24, 19%씩 커졌다. 이 현상은 위에서 설명한 것과 같이, 측정된 감각신경신호의 높이보다 실제 유발되는 감각신경신호의 높이가 더 높기 때문에, 측정전극 사이의 거리가 멀어져서 T_a 가 커질수록 측정되는 신경신호의 높이가 높게 측정되는 것으로 설명할 수 있다.

그림 1(b)의 결과를 종합하면, 측정전극의 거리는 일정하게 유지하고 전기로 자극하는 펄스의 높이를 3 mA부터 12 mA까지 증가시키면 측정되는 감각신경신호의 크기는 증가하는 추세를 보이지만, 6 mA 이상의 자극강도부터는 자극의 세기를 높이더라도 측정되는 신경신호의 크기는 지속적으로 커지지 않는 현상이 관찰되었다. 감각신경신호를 3 mA로 자극할 때는 T_{dp} 가 T_a 보다 짧고, T_{dp} 가 T_a 가 같거나 커지는 자극의 강도는 3 mA 이상 6 mA로 가정하면, 그림 1(b)에 나타난 현상이 차동증폭의 왜곡현상으로 설명될 수 있다. 감각신경을 자극하는 전기자극 펄스의 높이가 6 mA 이하에서 펄스의 높이가 커질 때에는 T_{dp} 가 T_a 보다 짧기 때문에 측정되는 감각신경신호의 높이가 높아지지만, 감각신경을 자극하는 전기자극 펄스의 높이가 6 mA 이상에서는 T_{dp} 가 T_a 보다 길기 때문에 감각신경신호의 높이가 더 이상 크게 높아지지는 않는다.

240

그림 2(a)에 나타난 감각신경신호의 측정된 너비 결과를 보면, 측정전극의 중심 사이 거리가 멀어지면 측정되는 감각신경신호의 너비는 크게 증가하지는 않지만 증가 추세를 보인다. 그림 1(a)와 그림 2(a)의 결과를 통하여 감각신경을 자극하는 자극 펄스의 높이가 일정하고 측정전극의 중심 사이의 거리만 멀어질 때 측정되는 감각신경신호의 높이와 너비는 증가하였다. 동일한 자극에 의해서 동일한 크기의 감각신경신호가 유발되었고 T_{dp} 가 T_a 보다 길다고 가정하면, T_a 가 커질수록 위에서 설명한 것처럼 측정되는 신경신호의 크기가 커지면서 최대값에 도달하는 시점은 늦어질 것이다. 그러므로, 측정전극 사이의 간격이 멀어질수록 T_a 가 커지고, 이에 따라 최대값에 도달하는 시점이 늦어져서 측정되는 펄스의 너비는 늘어난다.

측정전극의 중심 사이의 거리가 일정하게 유지되고 감각신경을 자극하는 펄스의 높이를 크게 할 때의 측정되는 신경신호의 너비 결과인 그림 2(b)를 보면 자극 펄스의 높이가 커질수록 측정되는 펄스의 너비 또한 커졌다. T_{dp} 가 T_a 보다 길기 때문에 실제 유발되는 감각신경신호의 크기가 크더라도 6 mA 이상부터는 더 이상 측정되는 신경신호의 높이가 커지지 않은 그림 1(b)의 결과를 참조하면, 감각신경을 유발하는 자극의 펄스 높이가 커지면 실제로 유발되는 신경신호의 크기가 커진다고 가정할 수 있으므로, 측정되는 펄스의 높이 값은 포화되어 일정할지라도 너비는 크게 측정되는 것이 설명된다.

이 실험에서는 자극부위는 일정하게 고정하고 측정전극의 부착위치를 손목 위 7 cm를 중심으로 측정전극의 중심 사이의 거리를 변화시키면서 데이터를 측정하였으므로, 측정전극의 중심 사이의 거리가 멀어질수록 자극하는 지점과 원위부 측정전극과의 거리는 짧아진다. 그러므로 감각신경을 자극하는 강도를 일정하게 하고 측정하는 전극의 거리를 멀게 하였을 때의 결과인 그림 3(a)로 측정전극의 중심 사이의 거리를 크게 하면 T_a 가 짧아진다고 단정할 수 없다. 그림 3(b)에 나타난 결과처럼 측정전극의 중심 사이의 거리를 일정하게 유지하고 감각신경을 자극하는 펄스의 높이를 높였을 때는 T_a 가 짧아졌다. 위 결과로써 강한 자극이 가해지면 감각신경이 반응하는 속도도 빨라진다고 판단할 수 있다.

의사인 Evanoff Jr.와 Buschbacher[6]가 그들의 논문에서 밝힌 것과 같이 동일한 강도로 감각신경을 자극하더라도 측정전극의 간격이 커지면 측정되는 감각신경의 크기가 커진다고 임상적으로 큰 의미가 있지는 않을 수 있다. 그러나 현재까지 임상에 적용한 데이터들은 이 논문에서 밝힌 것과 같이 T_{dp} 가 T_a 보다 긴 상태에서 측정하여 왜곡된 데이터를 바탕으로 판단한 것이다. 차동증폭에 의한 신경신호 증폭방법을 바꾸어 왜곡현상이 없어진 데이터로 임상결과를 재분석하면, 감각신경의 크기가 임상에서 정량적인 지표로 사용될 수 있는 가능성을 완전히 배제할 수는 없다고 판단된다.

V. 결 론

감각신경을 자극하는 전기자극 펄스의 높이가 일정하더라도 측정전극 사이의 거리가 멀어지면 측정되는 신호의 높이가 커지고 너비가 늘어났고, 측정전극 사이의 거리를 일정하게 하고 감각신경을 자극하는 전기자극 펄스의 높이를 높이면 측정되는 감각신경신호의 높이는 일정강도 이상에서는 포화되는 현상을 보였으며, 너비는 크게 증가하지는 않았으나 증가하는 추세를 보였고, 감각신경은 빨리 유발되는 현상을 보였다. 그러나 인체신호를 측정할 때 널리 쓰이는 차동증폭 방법으로 신경신호를 측정하면 측정되는 감각신경신호에서 왜곡현상이 발생하며, 특히 측정되는 감각신경신호의 높이가 포화되는 현상을 발견하였다.

신경신호를 측정할 때 증폭하는 방법을 개선하거나, 차동증폭 방법에 의한 왜곡현상들을 상쇄하는데 도움이 되는 감각신경신호의 과분극 현상에 대한 연구를 앞으로 진행하면, 신경신호의 파라미터와 감각 크기와와의 상관관계 연구에 도움이 될 것이다.

Reference

[1] Dawson GD, "Investigations on a Patient Subject to Myo-

- clonic Seizures after Sensory Stimulation,” *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, vol. 10, no. 4, pp. 141-162, 1947.
- [2] Dawson GD and Scott JW, “The Recording of Nerve Action Potentials Through Skin in Man,” *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, vol. 12, no. 4, pp. 295-267, 1949.
- [3] Gilliatt RW and Sears TA, “Sensory Nerve Action Potentials in Patients with Peripheral Nerve Lesions,” *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, vol. 21, no. 2, pp. 295-267, 1949.
- [4] Wiederholt WC, “Stimulus Intensity and site of Excitation in Human Median Nerve Sensory Fibers,” *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, vol. 33, no. 4, pp. 438-441, 1970.
- [5] Eduardo E and Burke D, “The Optimal Recording Electrode Configuration for Compound Sensory Action Potentials,” *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, vol. 51, no. 5, pp. 684-687, 1988.
- [6] Evanoff V Jr. and Buschbacher RM, “Optimal Interelectrode Distance in Sensory and Mixed Compound Nerve Action Potentials: 3-Versus 4-Centimeter Bar Electrodes,” *Arch Phys Med Rehabil*, vol. 85, no. 3, pp. 405-408, 2004.
- [7] Plastaras CT, Marciniak CM, Sipple DP, D'Amore KG, Garvan C and Zaman SM, “Effect of interelectrode distance on sural nerve action potential parameters,” *Am J Phys Med Rehabil*, vol. 87, no. 3, pp. 183-188, 2008.
- [8] Ven AA, Van Hees JG and Stappaerts KH, “Effect of size and pressure of surface recording electrodes on amplitude of sensory nerve action potentials,” *Muscle Nerve*, vol. 30, no. 2, pp. 234-238, 2004.
- [9] Yoo JK, Kim SA and Lee JY, “Comparison of Weighted Needle Pinprick Sensory Thresholds and Sensory Nerve Conduction Studies in Diabetic Patients,” *Korean J Preventive Med*, vol. 28, pp. 899-910, 1995.
- [10] Nashed J, Calder K, Trachter R and McLean L, “The Consequences of Stimulus Intensity on Sensory Nerve Action Potentials,” *J Neurosci Methods*, vol. 1, no. 1, pp. 108-115, 2009.
- [11] Strange KD and Hoffer JA, “Restoration of Use of Paralyzed Limb Muscles Using Sensory Nerve Signals for State Control of FES-Assisted Walking,” *IEEE Trans Rehabil Eng*, vol. 7, no. 3, pp. 289-300, 1999.