

인체에 있어서 수동적 전기특성을 이용한 신호전달방향 계측법 개발

論 文

55D-8-5

A Development of the Method Measuring from Signal Propagation Direction using Passive Electrical Properties in Human Body

朴 炯 俊* · 尹 在 鉉*

(Hyung-Jun Park · Jae-Hyun Yoon)

Abstract - In this study, a method measuring signal propagation direction in human body was developed by using passive electrical properties of the body. The measured method of the signal propagation direction is to apply basic characteristic of electricity to the human body; when a voltage is set to a conducted medium, according to the polarity of the conducted voltage, the voltage rising or drop is generated. And using this concept, it is able to estimate the direction of electrical signal on the human body.

The passive electrical properties were measured and the direction of signal propagation was estimated on the followings; between the flexor carpi radialis, between arms, between legs, between an arm and a leg, between the cervical vertebra and the upper limb, between the sacral vertebra and the leg, between the cervical vertebra and the tendon of triceps brachii, and between the sacral vertebra and the calcaneal tendon.

As the result of experiments, the passive electrical properties were increased from 1[Hz] to 50[kHz] of the inputted frequencies and showed at saturating tendency after that. And also, the estimated signal propagation directions using the developed method in this study agreed with the expected directions exactly at each part of the human body.

Key Words : Signal Propagation Direction, Electrical Property, Conducted Voltage, Stimulation, Nerve System

1. 서 론

신경과 근육은 육체적 활동과 힘의 근원으로 인체의 기본 요소 중 하나이다. 최근에 의학, 생물학, 생체공학, 전자공학 등의 발전에 힘입어, 그 기전의 규명뿐만 아니라 그 기전을 규명하기 위한 방법론에 관한 연구 성과들도 많이 보고되고 있다[1-8]. 예를 들면, 근의 장력, 근전도, 신경전류 등의 인체에서 발생하는 능동적 신호로부터 Jarmo R.[3] 등의 근육의 수축상태 해석, Neil S.[4], C. C. McIntyre[5] 등의 신경의 활동정도를 판정할 수 있게 되었다. 또한, 과학 기술의 발달로 인체를 계측하고, 연구할 수 있는 범위가 보다 넓고 다양하게 되었다. 이와 같은 발전으로 일정한 전기적 외란을 인가하여 인체의 각 부위가 반응하여 나타내는 수동적 전기특성을 계측하여 Dorin P.[6] 등, Keneth R.[7] 등의 인체의 임피던스 해석, S. Martin[8] 등의 신경의 위치이동 추정, D. Farina[9] 등의 근섬유의 전도속도, Changfeng[10] 등의 축색(axon)의 전도 차단 등의 전기적 모델링[11-13]과 시뮬레이션[10,14]이 이루어지고 있다.

수동적 전기특성은 인체의 생리 상태가 변화함에 따라 그 특성이 변화한다는 관점에서 관련 분야에 널리 이용되고 있

다. 그러나 이들 대부분의 연구에서는 인체의 국부에 미치는 근육, 골격, 신경 등의 수동적 전기특성이 물성적 측면에서 해석되고 있다[7-14]. 이를 응용한 고위 중추기관에 있어서 수동적 전기특성을 이용해서 인체의 각 부위의 신호의 전달방향을 모색했다고 보기는 어렵다.

인체에 있어서 신경은 운동신경과 감각신경, 그리고 연합신경으로 대부분 정의된다[15-17]. 대체로 운동신경은 중추에서 말초, 감각신경은 말초에서 중추방향으로 신호가 전달된다[15-17]. 본 연구에서는 이와 같은 신호의 전달방향을 측정하기 위해 인체에 일정한 전기적 외란을 인가할 수 있는 자극기와 수동적 전기특성을 계측할 수 있는 계측기를 고안하였다.

인체에서의 신호전달방향은 고안된 시스템을 통해 계측된 수동적 전기특성으로부터 추정된다. 이와 같이 본 연구에서는 인체의 수동적 전기특성을 계측하고 해석하여, 신경의 신호전달방향을 계측하는 방법을 개발하는 것을 목적으로 한다.

2. 신호전달방향 계측법

2.1 계측법의 기본개념

그림 1은 운동신경(a)과 감각신경(b)의 신호전달방향을 나타낸 것이다. 운동신경은 중추신경계로부터 지령을 받아 신경 세포체를 경유하여 근육 등의 반응기관으로 신호가 전달된다. 감각신경에서는 수용기관에서 수용한 자극을 시냅

* 교신저자, 正會員 : 圓光大學 電氣工學科 副教授 · 工博

E-mail : pahumu@wonkwang.ac.kr

* 正會員 : 圓光大學 電氣工學科 博士課程

接受日字 : 2006年 5月 3日

最終完了 : 2006年 7月 18日

스를 경유하여 중추신경계로 신호가 전달된다. 이와 같이 신경의 신호전달방향은 신경의 종류에 따라 다르게 나타난다. 본 연구에서는 신경의 신호전달방향을 계측하기 위한 방법을 개발하였다. 일정한 방향의 전기신호가 전달되고 있는 어떤 매체에 외부로부터 전압을 인가하게 되면, 그 매체에서는 인가된 전압의 극성에 따라 전압강하 혹은 전압상승이 일어날 것이다. 본 연구에서의 신호전달방향 계측법의 기본 개념은 외부 전압 인가 시에 발생하는 전압강하와 전압상승의 차를 이용하여 매체의 신호전달방향을 추정하는 것이다.

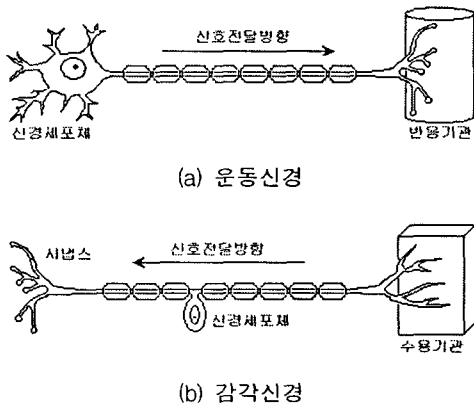
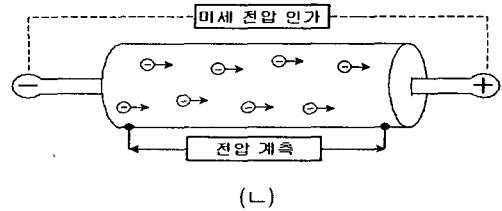
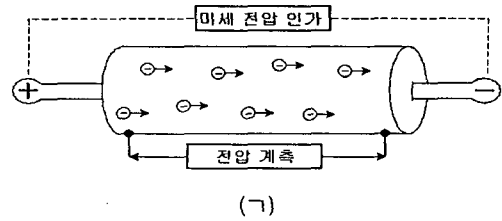


그림 1 운동신경과 감각신경의 신호전달방향
 Fig. 1 The signal propagation direction of the motor nerve and sensory nerve.

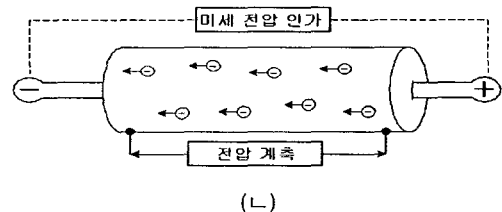
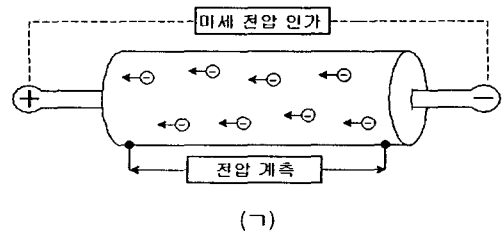
그림 2는 신호전달방향 계측법을 설명하기 위하여 신경의 신호전달방향을 모의하여 나타낸 그림이다. 그림 2의 (a)는 전자의 이동이 왼쪽에서 오른쪽으로, (b)는 그 반대 방향이고, (c)는 전자의 이동이 없거나 전자의 이동결과의 합성이 0인 경우를 각각 나타낸 것이다. 그리고 그림 2의 (a), (b), (c)에 나타낸 (ㄱ)은 매체의 왼쪽을 양의 극성, 오른쪽을 음의 극성으로 외부 전압을 인가한 경우이고, (ㄴ)은 그 반대의 극성으로 외부 전압을 인가한 경우이다.

그림 2의 (a)에서와 같이 매체의 전자가 왼쪽에서 오른쪽으로 이동하는 경우에, 각 그림의 (ㄱ)과 같이 왼쪽을 양, 오른쪽을 음의 극성으로 외부 전압을 인가하면, 매체에서는 전압강하가 일어날 것이며, 그 반대로 각 그림의 (ㄴ)과 같은 방향으로 외부 전압을 인가하면 매체에서는 전압상승이 일어날 것이다. 즉, (a)와 같은 방향으로 전자의 이동이 있는 매체에서는 (ㄴ)에서 계측된 전압과 (ㄱ)에서 계측된 전압의 차는 전압상승이 일어난 그림 (ㄴ)일 때가 더 큰 값이므로 양의 값이 될 것이다. 그러므로 전자는 왼쪽에서 오른쪽으로 이동하였다는 것으로 추정할 수 있다. 그림 2의 (b)는 매체의 전자이동이 (a)와 반대의 경우로서 (ㄴ)에서 계측된 전압과 (ㄱ)에서 계측된 전압의 차는 음의 값이 될 것이다. 그러므로 전자는 오른쪽에서 왼쪽으로 이동하였다는 것을 추정할 수 있다. 그리고 그림 2의 (c)와 같이 매체 속에 전자의 이동이 없는 경우에는 외부전압 인가에 의한 (ㄱ)에서 계측된 전압의 변화량과 (ㄴ)에서 계측된 전압의 변화량은 같게 될 것이므로 그 차는 영이 될 것이다. 그러므로 이때에는 전자의 이동이 없는 것으로 추정이 가능하다. 본 연구

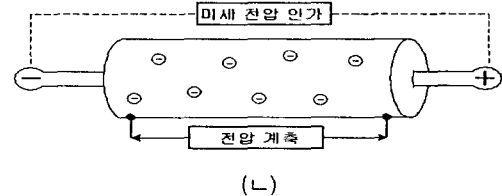
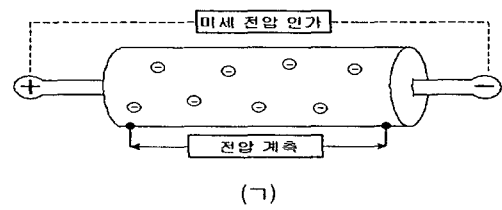
에서는 그림 2에서 설명한 신호전달방향 계측법을 인체 각 부위에 적용하여 신호전달방향을 추정하였다.



(a) 왼쪽에서 오른쪽으로 전자가 이동하는 경우



(b) 오른쪽에서 왼쪽으로 전자가 이동하는 경우



(c) 전자의 이동이 없는 경우

그림 2 신호전달방향 계측법의 기본 알고리즘
 ((ㄱ): 왼쪽부분을 양의 극성, 오른쪽부분을 음의 극성으로 미세전압을 인가, (ㄴ): 왼쪽부분을 음의 극성, 오른쪽부분을 양의 극성으로 미세전압을 인가)

Fig. 2 The basic algorithm of the signal propagation direction

2.2 실험 시스템 및 방법

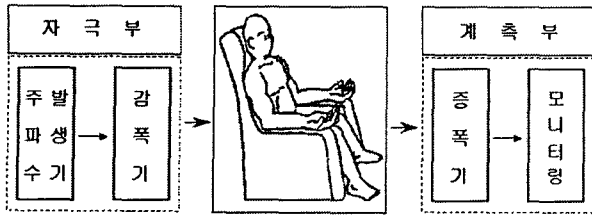


그림 3 실험 시스템
Fig. 3 Experiment system

실험은 정상인 남자 6명(20-29세)을 대상으로 하였다. 그림 3은 실험 시스템을 개략적으로 나타낸 것이며, 자극부와 계측부로 구성되어 있다. 자극부에서는 함수발생기(HC-9205C, Hungchang)로부터 발생시킨 약 2[V]의 전압신호(1[Hz]-100 [kHz])를 약 2[mV]로 감폭한 후, 표면전극(Ag-AgCl, 지름:10 [mm])을 통하여 인체를 자극하였다. 그리고 계측부에서는 자극된 신호가 인체에 미치는 영향을 계측하는 부분으로서, 표면전극으로부터 유도된 신호를 차동증폭(CMRR : 120[dB])한 후, 증폭기(증폭률: 20,000배)를 이용하여 증폭하고, 이를 오실로스코프(VC7504, HITACHI)로 모니터링 하였다.

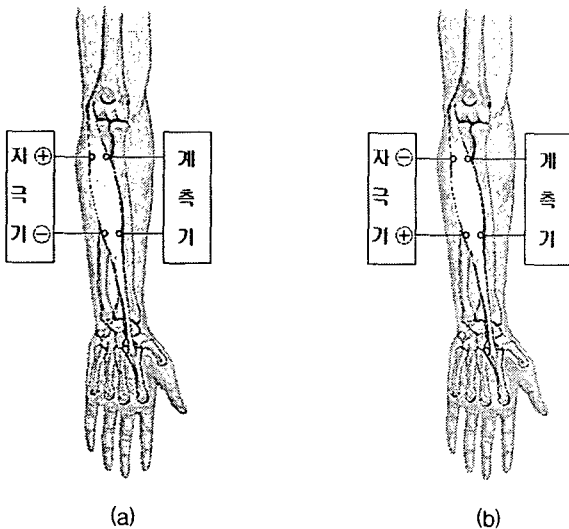


그림 4 요측수근굴근에서 자극기와 계측기의 전극 부착위치 ((a)와 (b)에 인체에 자극하는 전극의 극성을 반대로 인가)

Fig. 4 The position of surface electrode of the stimulation part and the measurement part in flexor carpi radialis

그림 4는 단일근육인 요측수근굴근(flexor carpi radialis)[18]의 수동적 전기 특성을 계측하기 위한 자극기와 계측기의 전극 부착 위치를 나타낸 것이다. 피험자에게는 의자에 앉아 전완을 수평면에 이완하여 외전한 상태로 위치하도록 하였다. 그림 4의 (a)에서와 같이 자극전극을 팔 관절(joint of arm)에서 원위(distal)쪽으로 약 7[cm] 떨어진 지점과 약 14[cm] 떨어진 지점의 요측수근굴근의 피부표면에 활성전극과 비활성전극을 각각 부착하였다. 그리고 계측전극은 자극

전극으로부터 수평으로 약 2[cm] 떨어진 지점에 활성전극과 비활성전극을 부착하였고, 이때 접지점으로 팔 관절의 슬개골(patella) 피부 표면을 이용하였다. 그림 4의 (b)는 (a)와 자극전극의 극성을 반대로 부착한 경우를 나타낸 것이다.

표 1 수동적 전기특성을 계측한 인체의 각 부위
Table 1 Each part in body measuring the passive electrical properties

실험부위		전극위치	
		자극전극	계측전극(접지)
단일 근육	요측 수근굴근	팔 관절에서 원위(distal)쪽으로 약 7[cm]와 약 14[cm] 떨어진 지점의 요측수근굴근 피부표면	자극전극의 위치에서 수평으로 약 2[cm] 떨어진 지점(팔 관절의 슬개골)
	양팔	오른팔과 왼팔의 손목관절에서 근위(proximal)쪽으로 약 2[cm] 떨어진 지점의 척골 피부표면	상동 (가슴의 흉골)
시상면 대칭	양다리	오른다리와 왼다리의 무릎관절에서 원위쪽으로 약 15[cm] 떨어진 지점의 비복근 피부표면	상동 (둔부)
	팔과 다리	손목관절에서 근위쪽으로 약 2 [cm] 떨어진 지점의 척골과 무릎관절에서 원위쪽으로 약 15[cm] 떨어진 지점의 비복근 피부표면	상동 (둔부)
척추와 근육	경추(C7)와 요측 수근굴근	척추의 C7지점과 상지에서 요측수근굴근의 중심의 피부표면	상동 (둔부)
	천추(S1)와 비복근	척추의 S1지점과 하지에서 비복근의 중심의 피부표면	상동 (둔부)
척추와 건	경추와 상완 삼두근건	척추의 C7지점과 상지에서 상완삼두근건의 피부표면	상동 (둔부)
	천추와 종골건	척추의 S1지점과 하지에서 종골건의 피부표면	상동 (둔부)

이때 자극신호의 진폭은 약 2[mV]이고 주파수는 1[Hz]에서 100[kHz]까지 변화시켜 자극하였다.

표 1은 전술한 실험시스템과 실험방법을 이용하여 본 연구에서 실험한 인체의 각 부위와 전극 부착위치를 나타낸 것이다. 단일근육으로 요측수근굴근의 양단 사이, 시상면 대칭으로 양팔 사이와 양다리 사이, 수평면 대칭으로 팔과 다리 사이, 척추와 근육으로 경추(C7)와 상지의 요측수근굴근 사이, 천추(S1)와 하지의 비복근(gastrocnemius) 사이, 척추와 건으로 경추와 상완삼두근건(tendon of triceps brachii) 사이, 천추와 하지의 종골건(calcaneal tendon) 사이에서 수동적 전기특성을 계측하였다. 이들 각 실험에서 전극의 부착위치는 표 1에 나타내었다.

3. 신호전달방향 추정

3.1 수동적 전기특성 계측

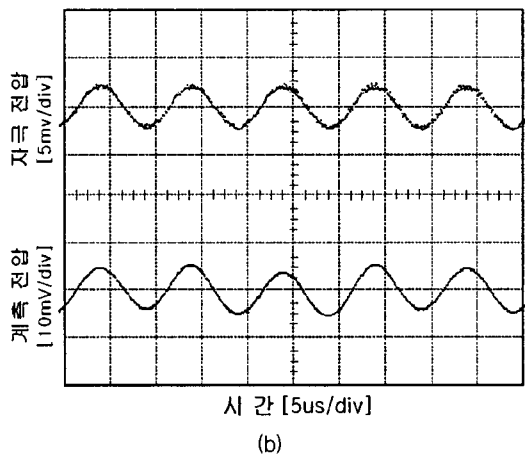
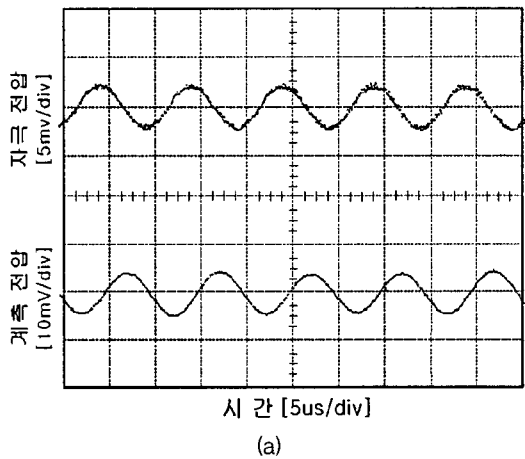
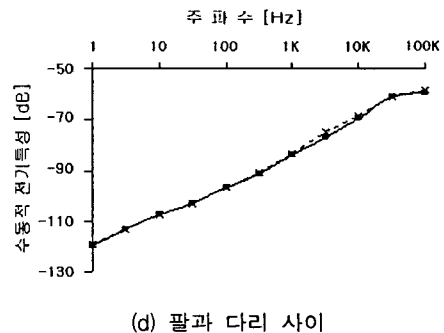
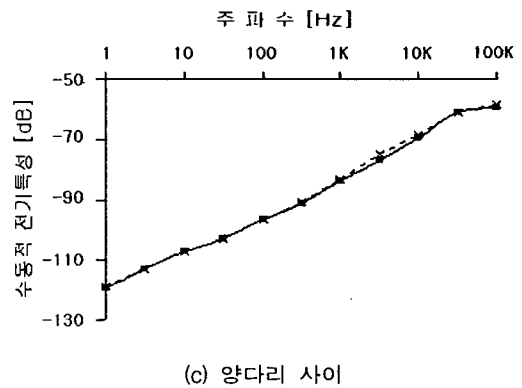
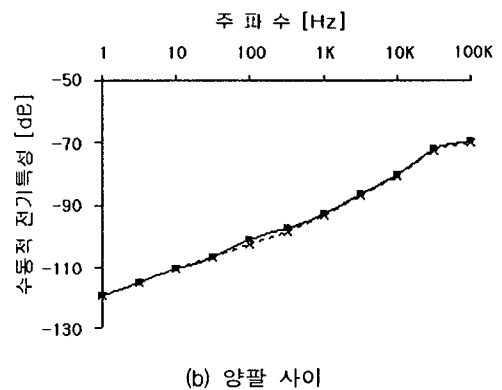
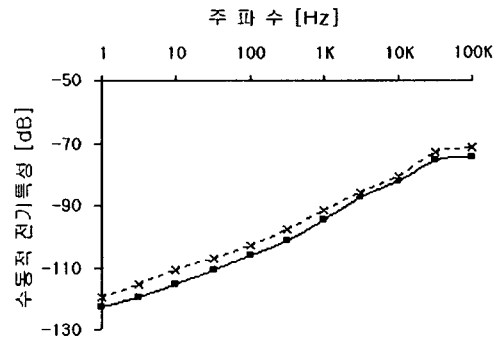
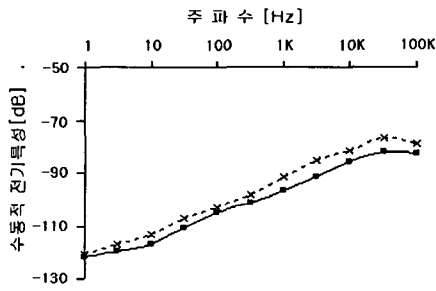


그림 5 수동적 전기특성을 계측한 한 예 (자극주파수가 100[kHz]인 경우에 (a)는 자극기의 극성이 요측수근굴근의 원위 쪽으로 약 14[cm] 떨어진 지점에 활성전극, 약 7[cm] 떨어진 지점에 비활성전극을 부착한 경우, (b)는 자극기의 극성이 (a)와 반대로 활성전극과 비활성전극의 부착한 경우)

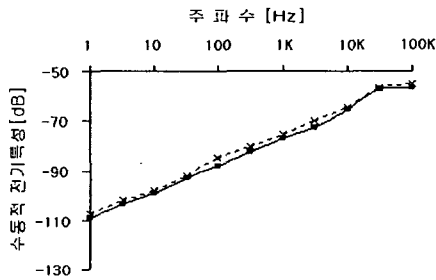
Fig. 5 An illustration of measuring the passive electrical properties

그림 5는 요측수근굴근에서 수동적 전기특성을 계측한 한 예를 나타낸 것이다. 그림 5의 (a)와 (b)는 자극전극의 극성을 서로 반대로 한 경우이며, 각 그림의 상단은 자극한 신호, 하단은 계측된 신호를 나타내었다. 각 그림에서 나타내듯이 자극신호에 비하여 계측된 신호의 진폭이 작게 나타나고 있으며, 이는 인체의 수동적 특성으로 인한 것으로 판단된다. 그리고 이런 현상은 본 연구에서 수행한 각 실험에서 거의 유사한 현상이 일어났다.

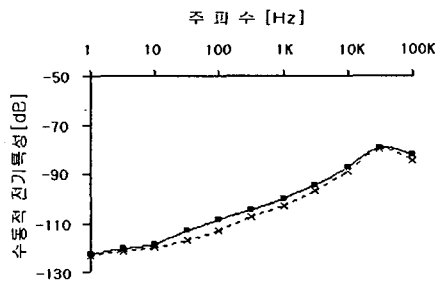




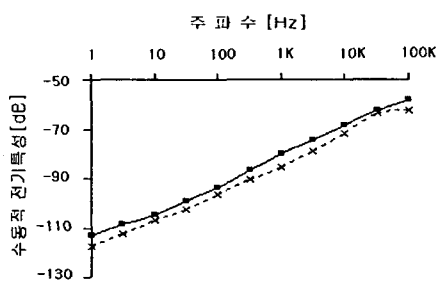
(e) 경추와 요측수근굴근 사이



(f) 천추와 비복근 사이



(g) 경추와 상완삼두근간 사이



(h) 천추와 종골건 사이

그림 6 인체의 각 부위에서 자극주파수에 따른 수동적 전기 특성 (실선과 점선은 자극전극의 활성화와 비활성의 방향을 바꾸어 인가한 경우)

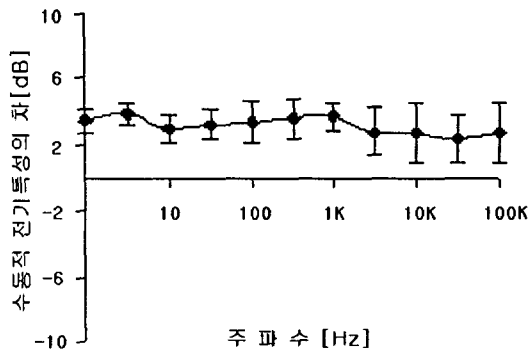
Fig. 6 The passive electrical properties according to the stimulated frequency in each part of body

그림 6에 한 피험자의 인체 각 부위에서 계측한 주파수에 따른 수동적 전기특성을 나타내었다. 그림 6의 (a)는 단일근육으로 요측수근굴근의 양단 사이, (b)와 (c)는 시상면 대칭으로 양팔 사이와 양다리 사이, (d)는 수평면 대칭으로 팔과 다리 사이, (e)와 (f)는 척추와 근육으로 경추와 요측수근굴근 사이와 천추와 비복근 사이, 그리고 (g)와 (h)는 척추와 건으로 경추신경과 상완삼두근간 사이와 천추와 종골건 사

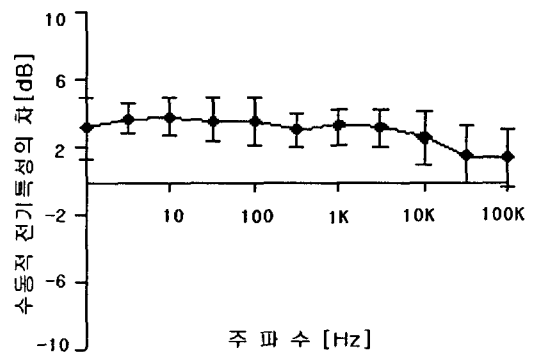
이에서 수동적 전기특성을 나타낸 것이다. 그림 6에서의 수동적 전기특성 값은 자극신호(진폭:2[mV])를 1[Hz]에서 100[kHz]까지의 주파수를 변화시켰을 때, 그림 5와 같이 계측하여, $20\log(\text{계측신호의 진폭}/\text{자극신호의 진폭})$ 로 산출된 값이다. 각 그림에서 실선과 점선은 자극전극의 활성전극과 비활성전극을 반대로 하여 계측한 경우이다. 인체 각 부위에서 계측되는 수동적 전기특성의 전체적인 변화는 50[kHz]까지 증가하고 그 이후는 포화하는 경향을 나타내고 있다. 그리고 자극전극의 극성을 반대로 한 경우인 실선과 점선에서는 점선이 크게 나타난 경우, 실선이 크게 나타난 경우, 그리고 점선과 실선이 비슷하게 나타난 경우로 나타났다. 이는 실험을 수행한 각 부위에 있어서 인체의 신호전달방향에 의한 것으로 추정된다.

3.2 인체 각 부위에 있어서 신호전달방향 추정

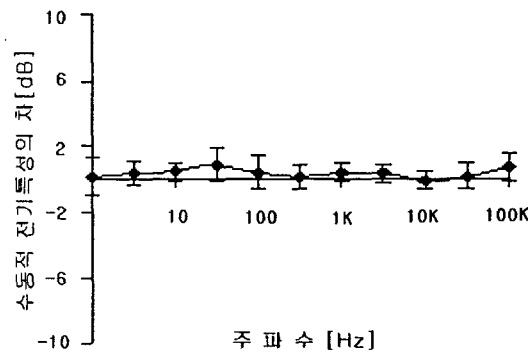
그림 7은 피험자 6명의 인체 각 부위에 있어서 자극신호의 극성을 반대로 하였을 때의 수동적 전기특성의 차를 구하고, 그 평균값과 표준편차를 나타낸 것이다. 그림 7에서 (a), (e), (f)는 수동적 전기특성의 차가 양의 값, (b), (c), (d)는 거의 영에 가까운 값 그리고 (g), (h)는 음의 값을 나타내고 있다. (a)는 단일근육인 요측수근굴근의 양단에 자극신호의 극성(활성전극과 비활성전극)을 반대로 하였을 때, 즉 요측수근굴근의 원위(distal) 쪽에 활성전극, 근위(proximal) 쪽에 비활성전극을 부착하여 계측한 수동적 전기특성과 그 반대로 전극을 부착하여 계측한 수동적 전기특성을, 전자에서 후자를 뺀 경우이다. (e)와 (f)는 척추와 근육 사이인 경추(C7)와 요측수근굴근 사이와 천추(S1)와 비복근 사이에 자극신호의 극성을 반대로 하였을 때, 즉 근육에 활성전극, 척추에 비활성전극을 부착하여 계측한 수동적 전기특성과 그 반대의 방향으로 전극을 부착하여 계측한 수동적 전기특성을, 전자에서 후자를 뺀 것이다. 그림 (a), (e), (f)가 양의 값을 갖는다는 것은 “2.1 계측법의 기본 개념”에서 설명하였듯이 근육에서는 근위 쪽에서 원위 쪽으로, 그리고 신경과 근육 사이에서는 신경에서 근육 쪽으로 신호가 전달되고 있다는 것을 의미한다. (b)와 (c)는 시상면대칭인 양팔 사이와 양다리 사이에서 자극신호의 극성을 반대로 하였을 때 즉, 시상면의 오른쪽에 활성전극, 왼쪽에 비활성전극을 부착하여 계측한 수동적 전기특성과 그 반대로 전극을 부착하여 계측한 수동적 전기특성을, 전자에서 후자를 뺀 것이다. (d)는 수평면대칭으로 팔과 다리 사이에 전극을 부착한 경우이다. 시상면대칭과 수평면 대칭에서 수동적 전기특성의 차는 거의 영에 가까운 값으로 나타난다는 것은 양팔 사이와 양다리 사이에서는 각 팔 혹은 각 다리에 같은 방향으로 신호가 전달되어 신호가 상쇄되어 나타난 것으로 사료된다. (g)와 (h)는 척추와 건 사이인 경추와 상완삼두근간 사이와 천추와 종골건 사이에서 건 쪽에 활성전극, 척추 쪽에 비활성전극을 부착하여 계측한 수동적 전기특성을, 전자에서 후자를 뺀 경우이다. 척추와 건에서 수동적 전기특성의 차는 음의 값으로 나타났다. 이것은 척추와 건에서 경추와 상완삼두근간 사이와 천추와 종골건 사이는 건의 방향에서 척추의 방향으로 신호가 전달되고 있다는 것을 의미한다.



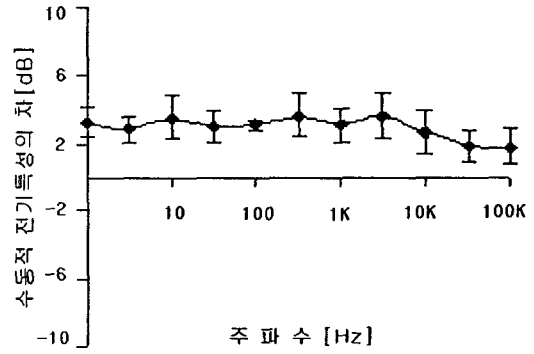
(a) 요측수근골근의 양단



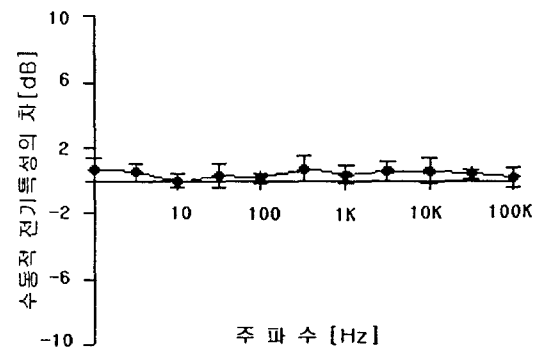
(e) 경추와 요측수근골근 사이



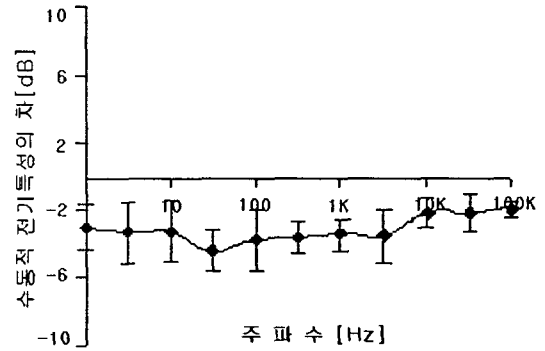
(b) 양팔 사이



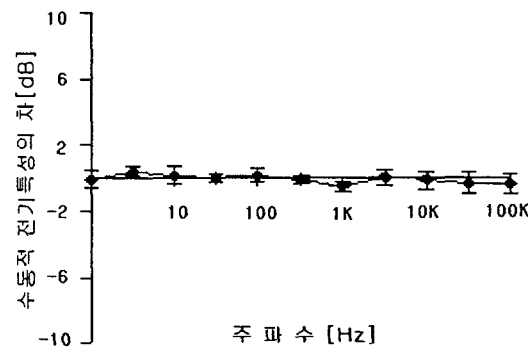
(f) 천추와 비복근 사이



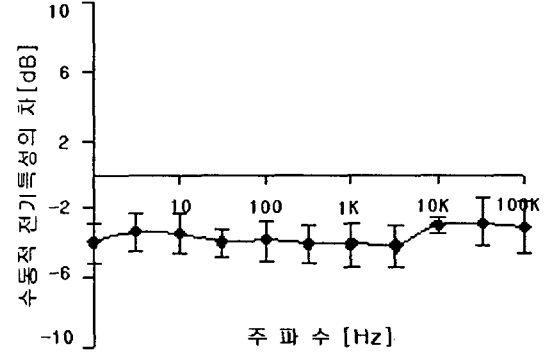
(c) 양다리 사이



(g) 경추와 상완삼두근간 사이



(d) 팔과 다리 사이



(h) 천추와 종골근 사이

그림 7 인체의 각 부위에 있어서 자극신호의 극성을 반대로 하였을 때의 수동적 전기특성의 차 (피험자 6명의 평균과 표준편차)

Fig. 7 Differences of the passive electrical properties when the stimulated signal was stimulated in opposite-polars at each part in body

4. 결 론

본 연구에서는, 전기적 신호전달이 있는 어떤 매질에 전압을 신호전달방향과 같은 방향의 극성으로 자극하였을 때와 반대 방향의 극성으로 자극하였을 때에 있어서 전달이 달리 계측된다는 단순한 전기적 특성을 이용하여, 인체의 신호전달방향 계측법을 개발하였다. 또한 개발된 계측법을 인체의 각 부위에 적용하여 그 신뢰성을 검토하였다.

운동신경은 중추신경계로부터 지령을 받아 신경 세포체를 경유하여 근육 등의 반응기관으로 신호가 전달되고, 감각신경은 수용기관에서 수용한 자극을 시냅스를 경유하여 중추신경계로 신호가 전달된다. 본 연구에서는 운동신경의 전달 방향을 실험하기 위하여 척추(경추와 천추)와 근육(요측수근굴근과 비복근) 사이 그리고 감각신경으로써는 척추(경추와 천추)와 건(상완삼두근건과 종골건) 사이에 수동적 전기특성을 계측하여 신호전달방향을 추정 한 결과는 척추에서 근육으로 그리고 건에서 척추로 그 방향이 확인되었다. 단일 근육(요측수근굴근)에서는 근위(proximal)에서 원위(distal) 쪽으로 신호가 전달되었다. 그리고 시상면대칭(양팔 사이와 양다리 사이)과 수평면대칭(팔과 다리 사이)에서는 서로 신호전달이 상쇄되어 나타났다.

이와 같이, 본 연구의 계측법을 통해 인체에 각 부위에 있어서 신경의 전달방향을 계측할 수 있으며, 이것은 정상인의 신경생리, 근육생리 등의 연구에 한 수법으로 이용될 수 있을 것으로 기대되며, 또한 소아마비, 뇌졸중, 교통사고 등과 같은 원인의 신경 장애 환자들에서 신호전달방향의 계측을 통해 환자의 회복상태를 모니터링 하거나, 신경의 연결검사 등의 진단에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 2005년도 원광대학교 교비 지원에 의해 작성되었습니다.

참 고 문 헌

[1] Alex F. Roche, Steven B. Heymsfield, Timothy G. Lohman, "Human body composition", Human Kinetics, pp. 79-102, 1996.
 [2] Darren J. Michael and R. Mark Wightman, "Electrochemical monitoring of biogenic amine neurotransmission in real time", Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, Vol.19, Issue 1-2, pp.33-46, 1999.
 [3] Jarmo Ruohonen, Paolo Ravazzani, JanNilsson, Marcela Panizza, Ferdinando Grandori, Gabriella Togola "A volume-conduction analysis of magnetic stimulation of peripheral nerves", IEEE Trans. Biomed. Eng, Vol. 43, Issue 7, pp.669-678, 1996.
 [4] Neil Schaul, "The fundamental neural mechanisms of

electroencephalography". Electroenceph. clin. Neurophysiol, Vol. 106, Issue 2, pp.101-107, 1998.
 [5] C. C. McIntyre, A. G. Richardson, W. M. Grill, "Modeling the excitability of mammalian nerve fibers : Influence of afterpotentials on the recovery cycle", Journal of Neurophysiology, vol. 87, pp. 995-1006, 2002.
 [6] Dorin Panescu, Kevin P. Cohen, John G. Webster, Robert A. Stratbucker, "The mosaic electrical characteristics of the skin", IEEE Trans. Biomed. Eng., Vol. 40, Issue 1, pp.434-439, 1993.
 [7] Keneth R. Lutchen, "Optimal selection of frequencies for estimating parameters from respiratory impedance data", IEEE Trans. Biomed. Eng, Vol. 35, Issue 8, pp. 607-617, 1988.
 [8] S. Martin, D. MacIsaac, "Innervation zone shift with changes in joint angle in the brachial biceps", Journal of Electromyography and Kinesiology, 16, pp. 144-148, 2006.
 [9] D. Farina, R. Merletti, "Estimation of average muscle fiber conduction velocity from two-dimensional surface EMG recordings", Journal of Neuroscience Methods, vol. 134, pp. 199-208, 2004.
 [10] Changfeng Tai, William C. de Groat, James R. Roppolo, "Simulation Analysis of conduction block in unmyelinated axons induced by high-frequency biphasic electrical currents", IEEE Trans. Biomedical Engineering, vol. 52, No. 7, 2005.
 [11] Farmo Ruohonen, Paolo Ravazzani, Ferdinando Grandori, "An analytical model to predict the electric field and excitation zones due to magnetic stimulation of peripheral nerves", IEEE Trans. Biomed. Eng, Vol.42, Issue 2, pp.158-161, 1995.
 [12] Bradley J. Roth, "A mathematical model of make and break electrical stimulation of cardiac tissue by a unipolar anode or cathode", IEEE Trans. Biomed. Eng, Vol. 42, Issue 12, pp.1174-1184, 1995.
 [13] J. W. Fernandez, M. L. Buist, D. P. Nickerson, P. J. Hunter, "Modelling the passive and nerve activated response of the rectus femoris muscle to a flexion loading: A finite element framework", Medical Engineering and Physics, vol. 27, pp. 862-870, 2005.
 [14] Ping Fu and Berj L.Bardakjian, Aldo D'aguanno, Peter L. Carlen, "Computations of the passive electrical parameters of neurons using a system mode", IEEE Trans. Biomed. Eng, Vol. 36, Issue 5, pp.55-64, 1989.
 [15] Arthur C. Guyton, John E. Hall, "Textbook of medical physiology", W. B. Saunders, 10th Ed. 2000.
 [16] George H. Bell, Donald Emslie-Smith, Colin R. Paterson, "Textbook of physiology ", Churchill Livingstone, 1980.

- [17] 최명애, 김주현, 박미정, "생리학", 현문사, 1995.
[18] Elaine N. Marieb, Jon Mallatt, "Human Anatomy", Benjamin, pp. 216-294, 1997.

저 자 소 개



박형준 (朴炯俊)

1961년 5월 13일생. 1984년 한양대 공대 전기공학과 졸업, 1989년 일본 오사카대학 대학원 졸업(석사), 1993년 일본 오사카대학 대학원 졸업(박사), 1993~현재 원광대학교 공대 전기공학과 부교수.

Tel : 063-850-6737

E-mail : pahumu@wonkwang.ac.kr



윤재현 (尹在鉉)

1973년 10월 9일생. 2002년 원광대 공대 전기전자공학부 졸업, 2005년 원광대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 원광대학교 전기공학과 박사과정

Tel : 063-850-6737

E-mail : sanay@wonkwang.ac.kr