

감각신경 전도속도 측정시스템 설계에 관한 연구

유 세근, 민 병관, 김 정우, 김 종원, 윤 형로*, 김 성환

서울 시립대학교 전자공학과
*연세대학교 의용전자공학과

A Study on the Design of Sensory Nerve Conduction Velocity Measurement System

S.K.Yoo, B.G.Min, J.W.Kim, J.W.Kim, H.R.Yoon*, S.H.Kim.

Dept. of Electronics Eng. Seoul City Univ.

*Dept. of Biomedical Eng. Yonsei Univ.

= Abstract =

The sensory nerve study is the important index to diagnosis peripheral neuromyotic disease. This paper discusses about the design of parameter - latency, amplitude, conduction velocity - measurement system in the sensory nerve. This system consists of three parts which are Main Control Unit(MCU), Stimulator, and external output unit. Also new measurement algorithms which is adaptive threshold method is presented in this paper. The designed system is controlled by MCU includes automatic detection algorithms and self-diagnostic functions.

I. 서론

신경전도속도(NCV: Nerve Conduction Velocity)측정은 근육질환의 임상적 판별에 있어서 중요한 지표가 되고 있다. [1] 특히, SNCV는 간단한 신경병 즉 국부적신경병, Charcot-Marie-Tooth병, 당뇨병 진단등에 유용하다. 1956년 Dawson은 말초신경마비 증상이 있는 환자에게서 인체의 순수한 감각신경전도속도(sensory nerve conduction velocity : SNCV)를 처음으로 측정하였다. [2] 감각신경전도속도(SNCV) 측정법에는 두 가지 방법이 있는데 하나는 신경자극이 축색을 따라 원위부(distal)에서 근위부(proximal)로 전파되는 순방향전도(orthodromic conduction) 측정법이고, 다른 하나는 신경자극이 축색을 따라 근위부에서 원위부로 전파되는 역방향전도(antidromic conduction) 측정법이 있다. 감각신경은 운동신경과는 달리 자극에 의해 복합신경활동전위(compound nerve action potential: CNAP)가 변경되므로 진폭을 결정하기 어렵지만 감각신경 활동전위의 시지연(latency), 기간(duration), 진폭(amplitude), 전도속도등을 자동으로 측정하여 정확한 정보를 알아내는 것이 환자의 진단에 중요한 자료가 된다. [2] 본 논문에서는 역방향전도 측정법을 이용하여 감각신경 활동전위를 측정하여 average를 취함으로써 noise의 영향을 줄이고, 적응문턱치(adaptive threshold)를 이용하여 latency와 amplitude 및 전도속도의 자동진단과 함께 주파수분석을 병행함으로써 보다 효율적인 분석이 가능하도록 시스템을 설계하였다.

본 연구에서 설계한 감각신경 전도속도 측정시스템은 크게

세 부분으로 나뉘는데 전체 시스템을 제어하는 MCU(main control unit), 자극을 인가하는 신경자극기, 그리고 측정된 값들을 출력시켜주는 출력디바이스로 구성하였다. 감각신경의 활동전위는 수 $[\mu V]$ 로서 진폭이 매우 작아서 검출이 매우 어렵고 noise에 의한 영향이 크므로 noise의 영향을 줄임과 동시에 정확한 onset 지점을 찾는 것이 중요하다. 이를 위하여 본 시스템은 파라메타값들을 자동으로 검출하여 효율적인 진단을 할 수 있도록 하였다.

II. 시스템 구성 및 소프트웨어 설계

2-1. 하드웨어 시스템구성도

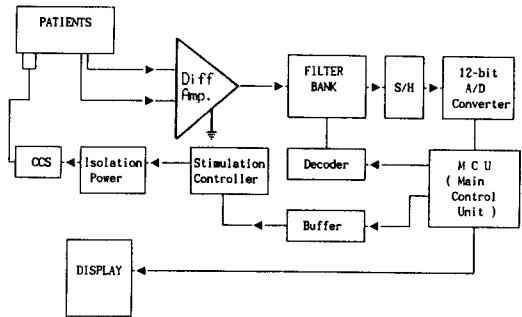


Fig 1. Block diagram of overall system

전체적인 시스템은 그림 1에서와 같이 MCU, 증폭기, 신경자극기, 12-bit A/D 변환기, 센서 등으로 구성된다. 신경자극기는 정전류원 신경자극기로 구성하였다. Pre-Amplifier의 gain은 1000, 입력임피던스는 10 MΩ이며 입력되는 신호의 잡음레벨은 2μV rms로 하였다. Aliasing error를 방지하기 위해서 증폭기와 A/D 변환기 사이에 2nd order Butterworth Low pass Filter를 위치시켰다. Main amplifier와 Band pass filter(10 - 2000Hz)는 신호를 A/D 변환하기 위해서 pre-amplifier의 작은 신호크기를 증폭한 뒤 순수한 신호성분만을 전달하여 주기 위해서 사용한다. 변환된 신호는 중앙제어부(MCU)에서 모든연산과정을 거쳐 출력되며 MCU가 Stimulation controller를 제어하여 자극 펄스와 A/D 변환이 동기될 수 있도록 하였다.

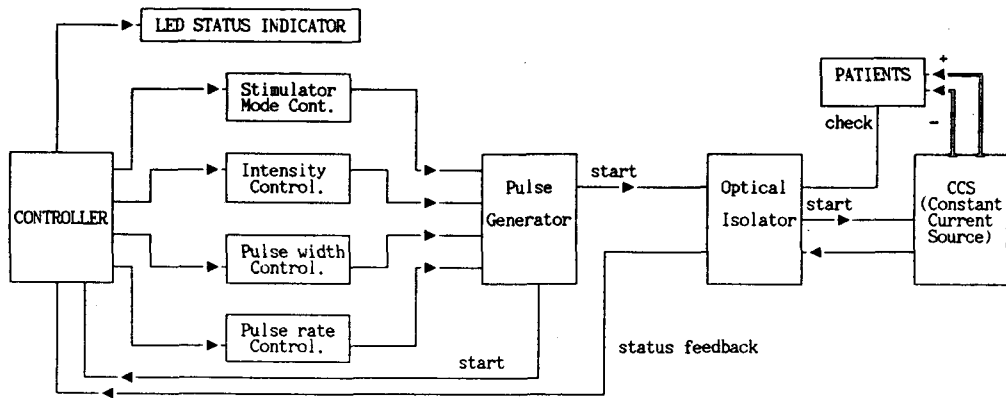


Fig 2. Block diagram of Nerve stimulator

2-2. 신경자극기

본 시스템에서 사용한 신경자극기는 정전류원(constant current source)을 갖는 자극기로서 인가한 자극과 그에 따른 반응곡선이 선형적인 특성을 보이기 때문에 subthreshold 방법을 이용한 artifact 제거에 유리하다. 그림 2.에서 Stimulator의 모든 동작과 error 검출은 main controller 로 부터 제어되도록 하였다. sub-controller로 부터 Stimulator의 mode (Single mode or Recurrent mode), Pulse 의 width, intensity, rate 등이 결정되어 광학적으로 isolation 된 power 보드로 전달되며 특히, 자기감시기능(self-diagnostic function)이 포함되어 있어서 과전류 및 과부하가 걸렸을때 error 신호가 자동적으로 LED로 출력하도록 설계하였다.

stimulator의 펄스폭은 stimulation controller 로 부터 소프트웨어적으로 50μsec 에서 1 msec 까지 제어할 수 있도록 하였다. 펄스의 빈도(rate)는 0.5 pps(pulse per second) 부터 7.0 pps 까지 제어가능하도록 하였으며 전류의 세기는 1mA - 80mA 로 제어할 수 있도록 하였다.

2-3. 소프트웨어

감각신경에 자극을 인가하게 되면 자극에 대한 활동전위를 나타내게 되는데 전형적인 신경활동전위(nerve action potential)는 그림 3 과 같다. 초기의 자극 artifact를 제거하고 뒤에 나타나는 신경 활동전위의 onset point를 검출함으로써 신경전도 속도를 구해낼 수 있는데 시지연(latency)을 자극부위(stimulation site)와 검출부위(recording site) 사이의 거리로 나눔으로써 구해낼 수 있다.

$$\text{Conduction Velocity} = \frac{\text{Distance between two points}}{\text{Latency to onset point}} \quad (1)$$

Onset point 로 부터 negative peak 까지의 기간을 duration 이라고 하며 positive peak의 진폭은 감각신경의 밀도를 나타내 준다.

본 논문에서는 averaging(ensemble average)방법을 도입하여 noise의 영향을 줄였으며, 자극과 동시에 수집된 신호는 자동분석 루틴을 거쳐 처리되는데 정확한 onset의 검출을 위해 가변문턱치(adaptive threshold) 방법을 사용하여 신경전도속도를 정확하게 측정할 수 있도록 하였다.

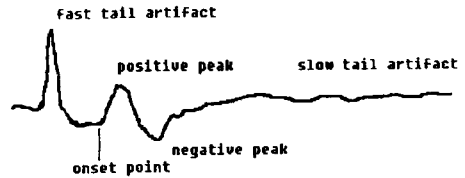


Fig 3. Typical waveform of sensory nerve action potential

그림 4.의 흐름도에서 Onset point 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{ONSET} = \text{abs} [\text{max} - \text{base}] * r_1 \quad (2)$$

그리고, K 번째 귀환되는 onset point의 적응문턱치는 아래와 같다.

$$\text{ONSET}_k = \left[\frac{\text{ONSET}_k + \left\{ \sum_{k=1}^N \text{ONSET}_{k-1} * r_2 \right\}}{2} \right] \quad (3)$$

여기서 N = Average time
K = Current input time
이다.

즉, 현재 입력되는 ONSET 의 문턱치는 바로 전 까지 입력값들의 80 % 값을 현재의 입력과 합하여 평균을 취한 값이 되었다. 이렇게 해서 구해진 문턱치는 10번 까지의 Average가 모두 취해졌을때 가장 정확한 문턱치가 최종적으로 적용되어진다. 여기서 r1 과 r2는 실험적으로 0.06과 0.8로 취하였다. 또한, 감각신경은 피부온도에 의한 영향이 크기 때문에 온도에 의한 영향을 고려하여 온도보상을 해주어야 하는데 손목 부근에서의 정상체온인 35 °C 을 기준으로 하여 환산 처리해 주어야 한다. [3] 온도에 대한 영향은 각각의 신경에 따라서도 조금씩의 변화가 있기 때문에 감각신경 전도속도 측정에서 주로 관여하는 정중신경(median nerve)과 척골신경(ulnar nerve)에 대해서도 고려해 주었다. 온도보상에 대한 주요 처리과정은 그림 5.와 같다.

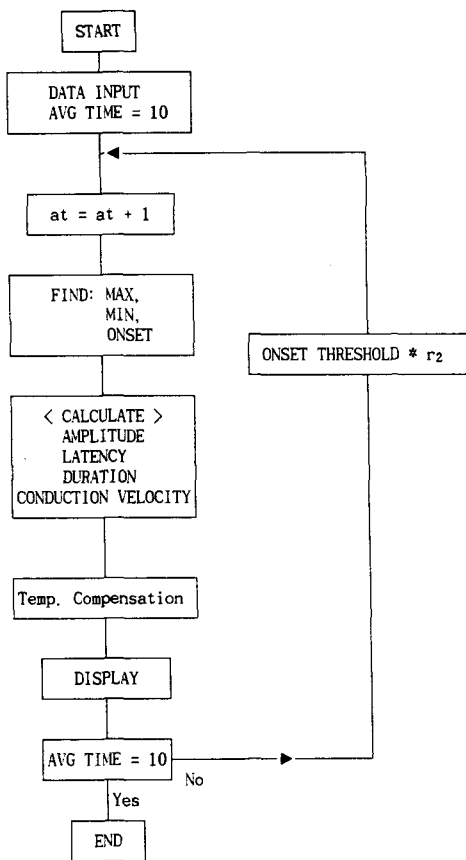


Fig 4. Flow chart of detection algorithm

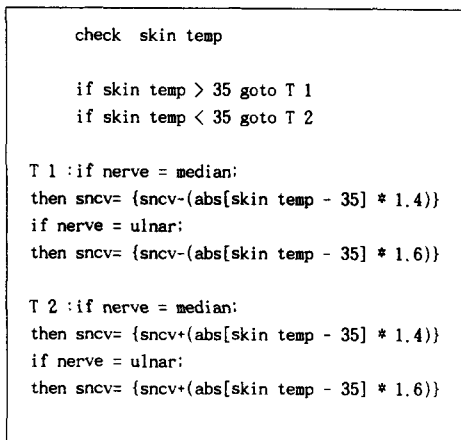


Fig 5. Temperature compensation Scheme

III. 실험 및 결과 고찰

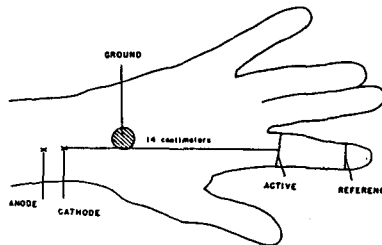


Fig 6. Position of the stimulation and recording electrodes

손가락에 한 쌍의 ring electrode를 가지고 역행측정법으로 기록된 신경전위는 보통 초기에 negativity를 가지는 biphasic 형태의 파형이다. 일반적으로 신경전위의 진폭은 감각신경염도를 나타내는데 감각신경에 있어서 진폭은 보통 $15\mu V$ 정도이다. 데이터의 수집을 위해 그림 6. 과 같이 ring electrode를 각각 두번째 손가락의 (metacarpophalangeal joint) 와 (distal interphalangeal joint)에 위치시킨다. 그리고, 수집전극으로부터 약 13 cm - 14 cm 정도 떨어진 손목(wrist)에서 median nerve에 자극을 인가하여 수집된 신호는 8192 Hz의 샘플링 주파수로 A/D 변환하였다. 이때 자극은 20 mA의 intensity, 0.1ms pulse duration, single pulse 로 자극하였다. 감각신경활동전위의 시지연은 자극을 인가한 때로부터 onset point까지의 시간의 경과를 나타내며 onset이 결정되어지면 duration의 계산이 가능하게 된다. latency 나 duration의 변화로써 정상과 비정상의 판별이 가능하다. 일반적으로 감각신경에 있어서 latency는 3.2 ± 0.25 msec 에서 정상치를 보이며 신경활동전위의 진폭은 정상성인(25세)인 경우 $11\mu V$ 이상을 정상범위로 잡는다[3]

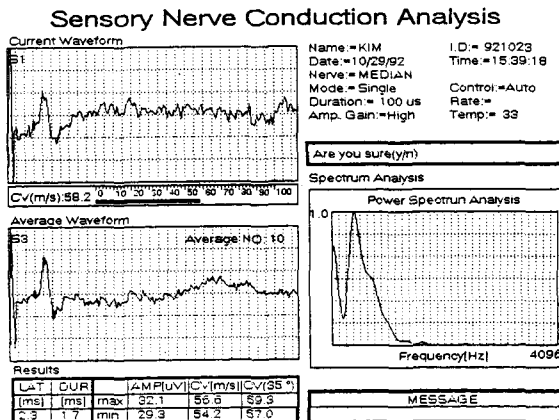


Fig 7. The results of sensory nerve conduction velocity measurement (median nerve)

본 연구에서 설계한 시스템으로 감각신경에서의 신경전도를 측정할 결과 그림 7.과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 신경전위에 대한 분석은 average된 신호에서 수행되는데 각각의 신호에 대한 전도속도는 현재의 파형 (fig 7.(a))아래 부분에 막대 그래프(fig 7.(b))로 출력하여 직관적으로 판단이 가능하도록 하였다. average된 파형(fig 6.(c))에서 slow tail artifact 부분의 noise 가 감소하였음을 알 수 있다. 제한된 알고리즘에 의해 계산된 파라메타값들(fig 7.(d)) 은 모두 자동으로 측정되며 각각의 값들을 정확하게 측정할 수 있었다. 주파수 분석(fig 7.(f))에서 불수 있듯이 400 Hz 주위에 스펙트럼이 분포함을 알 수 있었다.

이는 정상인의 감각신경활동전위 스펙트럼 양상으로써 비정상인의 스펙트럼과 비교분석 연구할 수 있도록 시스템을 설계하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 역방향전도 측정법을 이용하여 감각신경 활동전위를 측정하여 average를 취함으로써 noise 의 영향을 줄이고, 적응문턱치(adaptive threshold)를 이용하여 latency와 amplitude 및 전도속도의 자동진단과 함께 주파수분석을 병행함으로써 효율적인 분석이 가능하도록 시스템을 설계하였다.

본 연구에서는 정전류원 신경자극기와 중앙제어장치를 사용하여 감각신경의 전도속도를 측정할 수 있는 시스템을 설계하였다. 감각신경의 전도속도는 시지연(latency)을 자극 부위(stimulation site)와 검출부위(recording site) 사이의 거리로 나눔으로써 구해낼 수 있었으며 피부온도에 의한 영향이 크기 때문에 온도에 의한 영향을 고려하여 온도보상을 해 주었다. 본 시스템을 사용하여 감각신경의 전도속도를 정확히 측정가능하였으며 주파수 분석을 통하여 미시적인 질병까지도 진단이 가능하도록 하였다.

참고문헌

- [1] Jun kimura, M. D., "Electrodiagnosis in diseases of nerve and muscle", F.A. Davis company, 1984.
- [2] Joseph Goodgold, Arthur Eberstein, "Electrodiagnosis of neuromuscular diseases".
- [3] J.A. Delisa, Keith Mackenzie, Ernest M. Baran, " Manual of Nerve conduction velocity and Somatosensory evoked potentials", Raven Press Books, 1987.
- [4] V. Jasrotia and P.A. Parker, "Matched filters in nerve conduction velocity estimation", IEEE Trans, Biomed. Eng., vol. BME-30, pp.1-9, Jan 1983.
- [5] G. N. MC Vicar and Philip A. Parker, "Spectrum dip estimator of nerve conduction velocity", IEEE Trans, Biomed. Eng., vol. 35, NO. 12, Dec 1988.
- [6] K. McGill, K. L. Cummins, L. J. Dorfman, B. B. Berlizot, K. luetkemeyer, D. G. Nishimura, and B. Widrow, "On the nature and estimation of stimulation artifact in the nerve signals evoked and recorded using surface electrodes", IEEE Trans, Biomed. Eng., vol. BME-29, pp. 129-137, 1982.
- [7] Marco Knafnitz and Roberto Merletti, "Suppression of stimulation artifact from myoelectric - evoked

potential recording, IEEE Trans, Biomed. Eng., vol 35, NO. 9, Sep 1988.

- [8] M. D. Flore, J. L. Atlee III, J. G. Webster, and W. J. Tompkins, "A Microcomputer-based neuromuscular blockade monitor", IEEE Tras, Biomed. Eng., vol. BME 28, NO. 11, Nov 1981.