

《자 료》

# 신경활동의 컴퓨터 분석을 위한 ‘윈도우 변별기’의 설계와 제작

이춘길 · 박정현

서울대학교 심리학과

본 연구는 신경 활동을 컴퓨터로 접속하여 분석하는데 있어서 저렴한 ‘윈도우 변별기’의 일반적 설계를 제시하고 이에 기초하여 제작된 변별기의 특성을 기술한 것이다. 제작된 변별기는 범용 집적회로들에 의한 전위의 비교, 펄스의 발생, 펄스의 계수 및 저장, 그리고 컴퓨터 접속을 포함하였다. 제작에 소요된 비용은 10만원 이하였다.

## 서 론

신경 활동의 분석은 크게 두 가지 형태의 변수에 기초하고 있는데 활동 신호의 파형에 관한 변수들과 신호의 발생 시간이다. 신호의 발생 시간이 주된 관심인 경우, 신경 신호를 일련의 동일한 펄스(pulse)로 단순화시켜 분석할 수 있다. 이때 흔히 사용되는 방법으로서 측정하고 있는 신경 신호가 일정한 기준 전위에 부합할 때마다 펄스로 치환하여 펄스의 발생 시간을 분석함으로써 신경활동에 관한 지표를 얻을 수 있는데, 이 원리를 구현한 것이 ‘윈도우 변별기(window discriminator)’이다. 이 장치의 원리는 이미 소개되었으며(Brown et al, 1973) 상업적으로도 제작되어 있다(WPI, Bak Electronics 등). 대개 이 장치의 출력은 TTL 펄스의 형태이며 이를 용이하게 분석하기 위해서는 컴퓨터에 접속되어야 한다.

본 논문은 ‘윈도우 변별기’의 일반적 설계와 이에 기초하여 제작된 변별기의 특성을 제시한 것

인데 컴퓨터와의 직접적인 접속을 가능하게 하는 기능을 포함시킨 것이 특징이다.

## 방 법

그림 1은 본 연구를 통해 최종적으로 정착된 윈도우 변별기의 회로를 보인 것이다. 증폭된 신경 신호가 왼편에 입력되면 두 개의 전위 추적기(voltage follower, 747)를 거치면서 동일한 두 개의 신호로 나누어 지고 두 개의 전위 비교기(voltage comparator, 747)에 각각 도달하여 +3V에서 -3V 사이에서 사용자에게 의해 독립적으로 조절되는 두 개의 기준 전위(상역과 하역)와 비교된다. 따라서 여기서 제시한 설계는 입력되는 신경 신호가 -3V~+3V 사이임을 가정하고 있는데 이는 일반적으로 신경 활동을 측정하는 대부분의 경우를 포함하는 범위이다. 그러나 기준 전위(747의 +입력)에 연결된 두 개의 저항(3.3K와 10K)의 비율을 바꿈으로써 +/-3V를 초과하는 입력 신호에 대해서도 기준 전위의 범

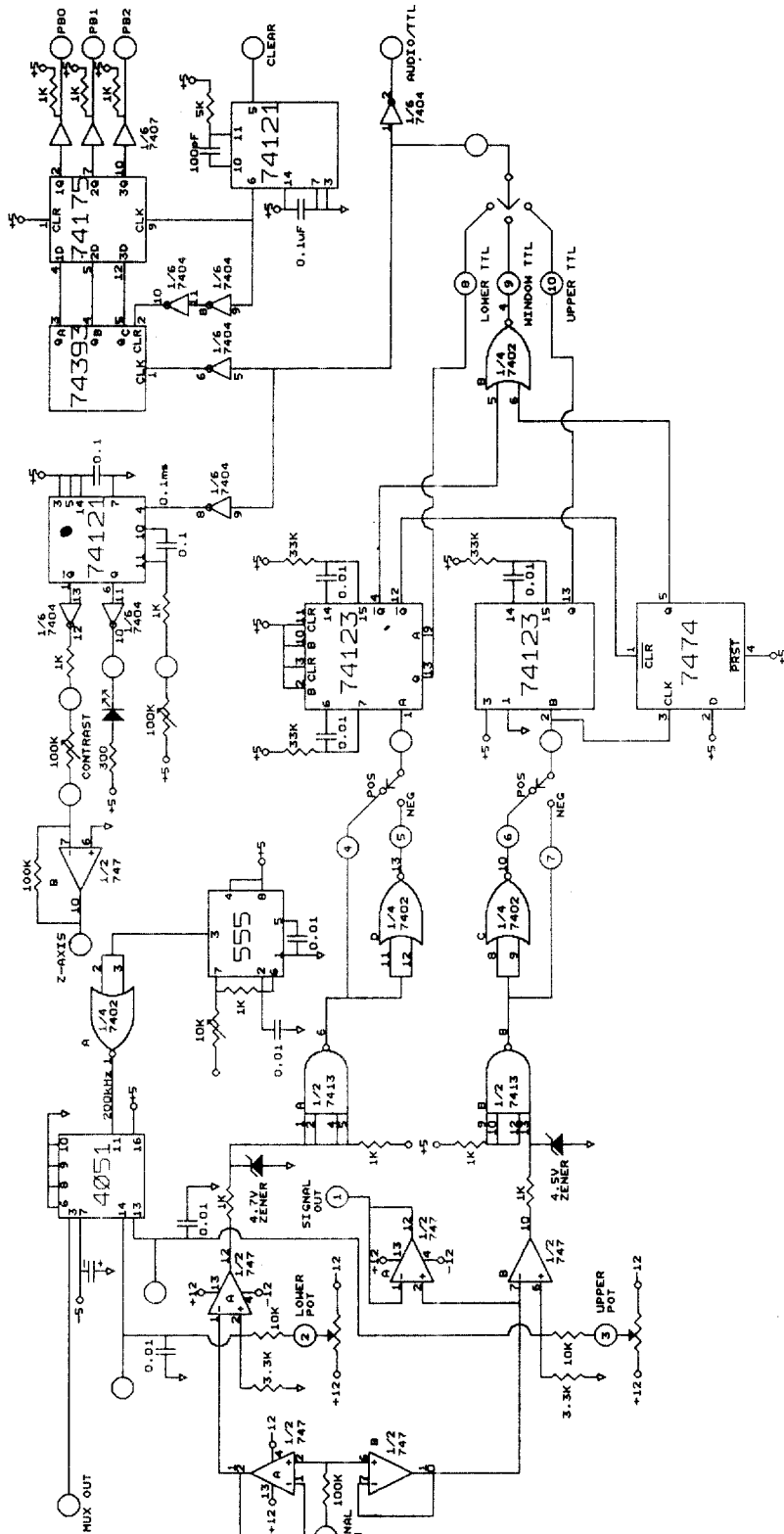


그림 1. 컴퓨터 접속을 포함한 '원도우 변별기' 회로. 사용된 모든 부품은 흔히 구할 수 있는 표준제품들이다. 회로의 원은 기기판의 전면에 부착됨. 외부의 접속되는 단자를 나타낸다. 자세한 설명은 본문을 참조.

위를 수정할 수 있다. 두 전위 비교기의 출력들은 제너 다이오드에 의해 TTL 호환 신호로 변하고 각각의 펄스 발생기(74123)에 의해 100 $\mu$ s의 펄스가 출력 단자(8, 10)에 나타난다.

임의의 신경 신호 가운데 상역(upper threshold)과 하역(lower threshold) 사이에 위치하는 크기를 탐지하기 위해서는 신호가 우선 하역을 교차하고 상역을 교차하기 전에 다시 하역을 교차하여야 한다. 하역을 교차하는 신호가 두 개의 펄스 발생기가 직렬로 연결된 74123에 의해(핀 #13과 핀 #9) 지연된 펄스를 발생시키는데 이것이 7474의 CLR-bar에 전달되어 7474의 Q 출력을 LO 상태로 초기화한다. Q 출력이 LO인 상태에서 발생하는 하역 교차 신호(Q-bar, 74123의 핀 #4)는 NOR(7402) 단계에서 윈도우의 출력을 발생한다. 7474의 CLK 입력에 상역 교차 신호(5 $\rightarrow$ 0V)가 전달되면 Q출력은 HI로 바뀌고 이 신호는 NOR 논리 회로(7402)에서 윈도우 출력을 내지 못한다. 즉, 윈도우의 출력이 HI로 되는 상태는 하역 교차 신호가 발생한 이후, 상역 교차 신호가 없는 상태에서 발생하는 하역 교차 신호에 의한다.

신경활동의 발생을 나타내는 펄스가 컴퓨터에 의해 접수되는 방식은 여러 가지가 있는데, 이는 주처리 컴퓨터, 인터페이스의 종류, 지원 프로그램, 실험 환경 등에 의해 결정된다. 흔히 사용되는 두 가지 방식은 펄스가 컴퓨터에 접속된 시계에 직접 연결되어 이전의 펄스 발생 시각부터의 시간적 지연이 측정되면서 컴퓨터에 우선 순위가 높은 'interrupt'을 발생하거나 혹은 펄스의 발생을 외부 등록기에 저장하였다가 자료 처리의 계획에 따라 등록기의 내용을 확인하는 방식이다. 여기서 제시하는 방식은 후자이다.

위에서 기술한 원리에 의해 출력되는 TTL 펄스는 외부 계수기(74393 counter)에 저장되어 컴퓨터에 입력되기 위해 대기하고 있다. 그림 1에서는 4비트 2진 계수기에서 세 비트(Q<sub>A</sub>, Q<sub>B</sub>, Q<sub>C</sub>)만을 사용하여 7개의 펄스까지를 저장할 수 있게 하였다. 이것은 컴퓨터의 작업량이 증가하여 펄스의 발생 여부를 자주 확인할 수 없는 상태에 대한 대비책이다. 계수기의 내용은 이어서 외부 등

록기(74175)에 옮겨져서 병렬 접속(parallel interface)을 통해 등록기의 내용이 읽혀진다. 계수기의 내용이 등록기로 전이되기 위해서는 등록기의 CLK에 펄스가 제공되어야 한다. 병렬 접속을 통해 펄스를 발생시키는 한 방법은 병렬 접속의 LO 상태의 한 선(CLEAR로 표시)에 HI를 출력하고 곧이어 LO를 출력하는 것이다. 이렇게 출력되는 펄스는 다시 펄스 발생기(74121)를 통해 일정한 지속 시간의 펄스를 만들어 계수기의 내용을 등록기에 옮기는 신호로 사용되며 등록기의 내용은 다음 입출력 명령에 의해 병렬 접속을 통해 컴퓨터에 접수된다. 계수기의 내용이 등록기로 이동하고 나면 계수기는 즉시 초기화되어야 하는데 계수기 내용의 이동을 일으키는 사건과 초기화시키는 사건 사이의 시간적 간격은 충분히 짧아야 한다. 왜냐하면 이 간격 사이에 일어나는 신경 신호에 의한 펄스는 상실되어 컴퓨터에 접수되지 않기 때문이다. 여기서는 7404를 사용하여 20ns의 간격을 가지도록 설계하였다. 만약 이 간격이 존재하지 않으면 즉, 위의 두 사건이 동시에 일어나면 계수기의 내용이 등록기로 충실하게 이동하지 않는다

신경 신호에 의해 발생하는 펄스는 컴퓨터에도 접속되지만 실험자가 볼 수 있어야 한다. 이를 위해 신경 펄스는 다시 펄스 발생기(74121)에 입력되어 출력되는 펄스의 시간적 크기를 100K 가변 저항으로 조절할 수 있게 하였다. 출력되는 펄스(Q, Q-bar)는 각각 기기판에 부착되는 LED와 신경활동을 나타내는 오실로스코프의 Z축을 구동한다. Z축은 또한 100K 가변저항과 증폭기를 통해 구동 전위가 가변적이어서 TTL 펄스를 출력하게 되는 신경 신호의 밝기와 밝은 상태가 지속되는 시간이 조절될 수 있다.

신경 신호와 상역 하역의 기준 전위를 비교하는 것은 실험자의 시각적 판단에 의한다. 이를 위해 기준 전위와 신경 신호를 시각적으로 제시하는데는 고려할 사항이 있다. 우선 오실로스코프의 사용 채널 수를 제한하기 위해서 상역 하역의 두 개의 전위를 한 채널로 관찰하기 위해 아나로그 교반기(analog multiplexer)를 사용하여 두 전위를 교번시키는 것이 유리하다. 이 경우 신경

신호도 함께 교변시킬 수도 있으나 왜곡의 가능성을 최소화하여 신경 신호를 관찰하기 위해서 본 설계에서는 두 개의 기준 전위만을 교변시켰다. 이를 위해 사용된 것은 4051 아날로그 교변기의 8채널 가운데 두 채널이고 교변 주파수는 555에 의해 발생된 200kHz 신호이다. 따라서 그림 1의 설계에 따라 신경 신호와 두 기준 전위를 동시에 관찰하기 위해서는 2채널이 요구된다. 한 채널만

으로 동시에 신경 신호와 두 기준 전위를 관찰하기 위해서는 4051 교변기의 세번째 입력을 사용하면서 그에 따른 스위치 신호를 공급하는 간단한 수정으로 가능하다.

### 결과 및 논의

그림 1의 회로가 구현되어 IBM AT386 호환

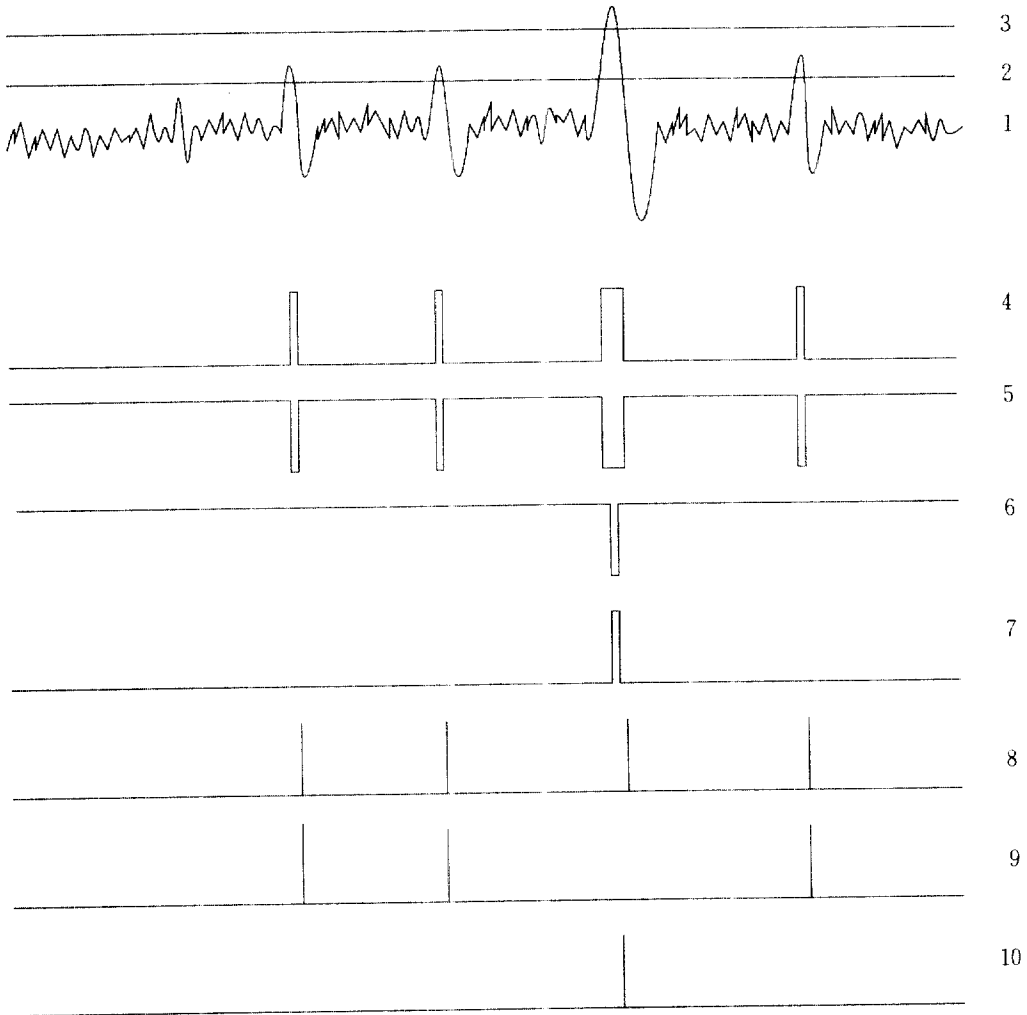


그림 2 가상적 입력과 원도우 변별기의 주요 위치들에서 관찰되는 신호들. 오른쪽의 숫자는 「그림 1」의 도면에 표시된 원속의 숫자와 대응하며, 제시된 각 신호가 관찰되는 회로상의 위치를 나타낸다. '1'은 가상적 신경 신호, '2'는 하역, '3'은 상역기준 전위를 나타낸다.

컴퓨터(대우 PRO-5000)에 접속되어 시험되었다. 또한 동일한 회로의 인쇄 기판(125×72mm, 2층)이 제작되어 시험되었다. 파형발생기의 정현파기 입력으로 사용되었고 펄스의 접수를 수행하기 위해 C-언어로 사용된 프로그램이 작성되었다.

그림 1의 도면에 보인 원들은 회로를 구현하였을 때 회로 판에서 나와 외부 패널에 접속되는 단자부를 나타내는데 이들 가운데 1에서 10까지의 수로 표시된 전략적 위치에서 관찰되는 신호들이 그림 2에 제시되어 있다. 그림 2의 오른 편의 수들은 그림 1의 왼 속의 수에 해당하는 위치들을 나타낸다. 그림 2는 제작된 변별기의 특성을 보이기 위해서, 신경활동의 패턴과 흡사한 가상적 입력(1로 표시된 신호)을 사용한 것으로 제시하였다. 그러나 입력 신호와 각 위치에서 관찰되는 신호의 위상 관계를 확립하기 위해서 실제 사용된 입력은 정현파였으며 정현파와 각 위치에서 관찰되는 출력의 위상 관계가 그림 2에 제시된 가상적 신호의 경우에 관찰된 위상 관계와 동일하도록 작성되었다. 그림 2의 경우는 상역 및 하역이 신경 신호의 접지 전위부분과 비교되기 때문에 극성 선택 스위치를 그림 1에 제시된 것처럼 POS에 위치시켰다. 신경 신호의 아래 부분이 비교될 때는 스위치가 NEG에 위치된다.

그림 1에서 하역 교차 신호(4)는 펄스발생기(74123)의 A 입력에 전달되어 그림 2의 4의 교차 신호가 하향할 때(5→0V) Q 출력이 발생하였고 이것이 그림 1의 8에 나타났는데 따라서 그림 2의 2, 4, 8을 비교하였을 때 하역 교차 출력(8)은 신경 신호가 두번째로 하역(2)을 통과할 때 발생하였다. 상역 교차의 경우 그림 2의 6의 상역 교차 신호가 펄스발생기(74123)의 B입력에 전달되어 이 입력이 상향(0→5V)할 때 Q 출력이 상역 교차 펄스(10)로 제공되었다. 그림 2의 1, 6, 10을 비교하였을 때, 하역의 경우와 마찬가지로 신경 신호(1)가 상역(3)을 두번째 통과할 때 출력 펄스(10)가 발생하였다. 상역(10) 및 하역(8) 교차 펄스의 발생 시간이 신경 신호가 두번째로 할당역을 통과할 때 발생하는 설계의 이점은 윈도우 출력이 선택될 때 윈도우 논리에 의해 출력 펄스

의 발생 시간이 지연되는 것을 상쇄하여 신경 신호의 발생 시간을 측정하는데 있어서 선택되는 비교 논리에 관계 없이 일관성을 유지할 수 있는 점이다.

‘윈도우 변별기’의 출력 펄스의 크기를 100 $\mu$ s으로 정하기 때문에 발생할 수 있는 펄스의 최대 주파수는 10kHz이었다. 알려진 단일 세포의 활동 전위의 최대 주파수는 1.5kHz를 초과하지 않기 때문에 단일 세포 활동을 측정하는 상황에서는 안전 범위가 크다. 그러나 복수의 세포의 활동을 동시에 측정하는 상황에서는 안전할 수 없다. 외부 계수기와 등록기의 구성은 이를 대비한 것이었다. 프로그램은 매 0.5ms의 주기로 등록기의 내용을 접수하였는데 이 주기는 본 실험실에서 주 컴퓨터가 수행하는 여러 과정을 최대한 빨리 수행토록 하였을 때 펄스를 접수할 수 있는 최고속 주기로서 결정된 것이었다. 이때 10kHz의 신호를 접수하면 최대 5개까지의 펄스가 입력될 수 있어서 계수기의 3bit 사용은 이론적으로도 펄스를 상실하지 않는 최소의 병렬 입력수이었다. 100 $\mu$ s 이내의 간격으로 발생하는 복수 세포의 활동 전위는 ‘윈도우 변별기’의 출력 펄스의 지속에 의해 상실되기 때문에 복수 세포의 활동에 대한 해석의 과정에서 고려되어야 한다. 여기서 사용된 100 $\mu$ s의 출력 펄스의 지속 시간은 펄스 발생기에 사용되는 저항과 콘덴서를 바꿈으로서 간단히 수정할 수 있다.

IBM PC/AT 호환 컴퓨터의 경우 한 개의 입출력 명령어가 수행되는데 소요되는 시간이 약 10 $\mu$ s이었다. 프로그램에 의해 생성된 10 $\mu$ s 펄스가 매 0.5ms 마다 등록기의 내용을 읽고 계수기를 비울 때 1kHz의 정현파 입력에 대해 한 번의 확인에 한 개 이상의 펄스가 저장되지 않았다.

그림 1에서 제시한 회로에 추가할 수 있는 기능은 ‘시간 윈도우(time window)’인데 이것은 임의로 조절되는 시간 간격 내에 발생하는 펄스만을 통과하는 것으로서 상역 혹은 하역 교차를 나타내는 펄스(그림 2의 8, 9 혹은 10)와 펄스의 길이(즉 시간 윈도우)를 조절할 수 있는 펄스 발생기의 출력을 AND시킴으로써 필요에 따라 간단히 수정할 수 있다.

본 실험실에서 사용하고 있는 '윈도우 변별기'는 '저역 통과 필터(low-pass filter)'를 포함하고 있는데 이것은 입력 단계에서 사용되어, 신경 신호 증폭기의 출력이 필터의 입력으로 사용되고 있으며 필터의 출력이 그림 1의 입력으로 연결되었다. 사용된 필터는 '4극 버터워스(4-pole butterworth)'로서 차단 주파수가 10㎐로 설정되어 있는데 이것은 본 실험실에서 사용하는 고주파 자장 신호(50㎐ 및 75㎐)를 신경 활동 신호로부터 분리하기 위해 사용한 것으로서 그림 1의 회로에서는 제외하였다. 또한 현재 사용되고 있는 '윈도우 변별기'에는 동일 전극을 통해 활동의 측정과 전기 자극을 수행할 수 있게 하는 스위치가 부착되었는데 이 회로도 지엽적인 것으로서 「그림 1」에서는 생략하였다.

## 참고문헌

Brown, P.B., Maxfield, V.W., and Moraff, H. Electronics for Neurobiologists. MIT Press, Cambridge, 1973.

## 사의

그림 1의 회로 가운데 전위 비교 회로 부분은 Brown et al(1973)이 기술한 원리에 기초하여 University of Illionis의 Joseph Malpeli의 실험실에서 제작, 사용된 것을 그대로 채택한 것이다. 변별기의 초판 제작은 정수영에 의해 이루어졌다. 본 연구는 91년도 서울대학교 발전기금 대학술 연구비에 의해 이루어졌다.

韓國心理學會誌：生物 및 生理

*Korean Journal of Biological and Physiological Psychology*  
1991. Vol. 3, 150-155

## **An inexpensive design of window discriminator for capturing neuronal spike events**

Choon-Kil Lee, and Jung-Hyun Park

Seoul National University

An inexpensive design of 'window discriminator' for capturing neuronal spike events is described. The design included voltage comparison, generation of one-shot pulse, counting and storing pulses for computer interface. Realizing the design costed approximately 150 US dollars.