

# 마비된 말단근육의 제어를 위한 휴대용 다중 채널의 기능적 전기자극(FES) 장치

\*0류영재, \*박봉기, \*김영민, \*임영철, \*\*김하경  
\*전남대학교, \*\*광주행복재활병원

A Portable Multichannel FES System for Control of Paralyzed Extremities

\*0Young-J. Ryoo, \*Bong-K. Park, \*Young-M. Kim, \*Young-C. Lim, \*\*Ha-K. Kim  
\*Chonnam National Univ., \*\*Hangbok Rehabilitation Hospital and FES Clinic

## Abstract

A portable multichannel functional electrical stimulation(FES) system for the fine control of the paralyzed extremities in spinal cord injury patients is described. This system is composed of a stimulation data creating system, a serial communication device, a 16-bit microprocessor, D/A converter of 32 channels and a display device. Stimulation patterns are created from analytical results of integrated EMGs during motion in normal subjects and are stored in the stimulation data creating system as data files. And then the stimulation patterns are sent to the memory in the portable multichannel FES system through serial communication interfacing device. Sophisticated fine control of paralyzed extrimities was realized by transmitting multichannel stimulation patterns to percutaneous intramuscular electrodes, which stimulate the the motor function of paralyzed muscle simultaneously. Advantages of this system are as follows:

- 1) It is possible to modify stimulation patterns in accordance with the patient's situation.
- 2) This system is small and light.

keywords : Functional Electrical Stimulation, portable FES system, multichannel stimulation, paralyzed extremity.

## 1. 서론

오늘날 산업 발달 및 교통량의 급증으로 인한 산업재해, 교통사고와 뇌졸중, 뇌성마비에 의해 중추신경계가 손상되는 경우가 증가하고 있다. 이러한 경우에 손상된 중추신경계 이하 부분에서 마비현상이 일어나게 된다.

전기적인 자극법으로 마비된 운동 근육의 치료가 가능함이 1960년대 초에 제안된 이래 마비된 팔과 다리에 기능을 회복 시키기 위한 시도가 있었다.[1-2] 미국의 Case Western Reserve University에서는 사지의 동작을 역학적으로 분석

하여 제어하는 방법을 시도하였다. 그리고 유럽공동기술개발기구(Eureka)에서는 CALIES(Computer-Aided Locomotion by Electrical Stimulation)라는 계획하에 연구 진행 중이다. 앞으로 이들은 근육 내에 삽입하는 전극과 섬유질 전극을 환자에게 시술할 예정이다.[3] 또한 일본에서는 1971년부터 1976년 까지 호흡기에 기능을 회복 시키는 전기 자극에 대해 연구하였고 손, 팔꿈치, 어깨 순으로 제어 대상을 넓혀 가고 있다. 앞으로 일본의 Sendai FES 연구진은 뇌로부터 제어 신호를 검출하는 방법과 편리한 전극을 개발하는 것을 목표로 연구해 갈 계획이다.[4]

여러 가지 전기적 자극 방법이 연구되어가고 있으나 마비된 근육을 정교하게 제어하기 위해서는 여러 개의 수축 근육 및 이완 근육을 동시에 자극해야 하며, 각각의 운동 근육과 신경에는 각기 다른 복잡한 자극 패턴이 전달되어야 한다.[5-6] 또한 환자가 이런 장치를 휴대할 수 있기 위해서는 소형화, 경량화 될 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 다수의 근육을 동시에 제어하고 휴대성을 고려하여 시간 분할을 이용한 다중 채널 방식의 자극장치를 개발하였고 V40 마이크로 프로세서를 이용함으로써 기존 장치의 하드웨어에 의존한 기능을 소프트웨어로 처리하게 하였다.

## 2. 휴대용 FES 장치의 구조

휴대용 FES 장치는 V40 CPU를 탑재한 마이크로 콘트롤러 보드, D/A 컨버터와 32채널 멀티플렉서를 내장한 전기 자극 보드, 입출력 장치인 버튼 스위치와 액정표시장치(LCD) 그리고 DC-DC 컨버터로 구성되어 있다. 전체적인 휴대용 FES 장치의 구조는 <그림 1>과 같다.

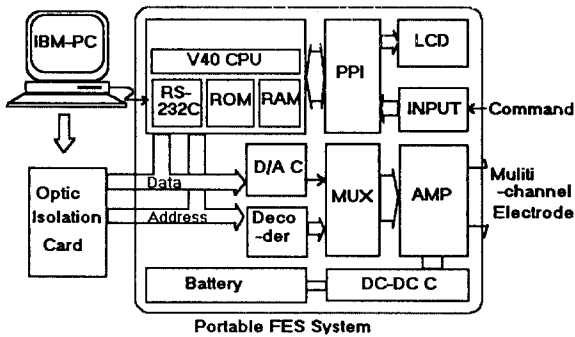
환자의 상태에 맞는 자극 패턴은 IBM-PC와 전기 자극 보드의 병렬 입출력 포트를 연결하여 생성된다. 전기적인 자극은 인체를 대상으로 하기 때문에 완벽한 전원의 분리가 필요하므로 포토커플러를 이용하여 데이터와 어드레스를 입출력하는 Optic Isolation Card를 제작하였다.

마이크로 컨트롤러는 개발이 편리한 V40 CPU, 주 프로그램이 저장된 ROM, IBM-PC에서 자극 패턴을 전송받는 시리얼 통신부 그리고 전송받은 데이터를 저장하는 SRAM을 사용하여 설계되었다. V40 CPU의 구조는 인텔사의 80계열의 것과 비슷하여 원보드 개발에 용이함을 가지고 있다.

SRAM에 저장된 데이터를 재배치하여 다중 채널의 순서에 따라 D/A컨버터로 전달한다. 이때 어드레스의 순차적인 디코딩 신호에 따라 멀티플렉서는 각 채널에 해당하는 데이터를 출력하도록 하였다. 전기 자극 패턴은 진폭변조(AM) 되어진 파형을 사용하여야 하는데 멀티플렉서의 채널을 선택하고 동시에 변조(Modulation)하는 것을 소프트웨어로 처리하여 하드웨어의 크기를 감소시켰다.

환자의 동작 명령을 입력하는 장치는 4개의 스위치가 사용되며 장치의 현재 상태 표시 및 환자와 상호 대화를 고려하여 액정표시장치(LCD)을 이용하였다. 입출력 장치와 마이크로 컨트롤러의 인터페이스는 PPI 8255를 이용하였다.

멀티플렉서 채널의 신호는 최대 2.56(V)의 적은 신호이므로 증폭기를 통하여 인체 내 근육에 삽입된 전극에 전달된다. 이 전달되는 패턴 전압의 크기는 0~50(V)이며 환자의 상태에 따라 최대 자극 전압 크기가 다양하다. 따라서 12V의 전지 전압을 입력으로 한 DC-DC 컨버터는 TTL소자 구동용 5(V), CMOS소자를 위한 12(V) 그리고 증폭기 구동용 전압을 20~50(V) 가변할 수 있게 하여 환자의 상태에 따라 최대 자극 전압이 변하는 문제를 해결하였다.



< 그림 1 > 휴대용 FES 장치의 구조

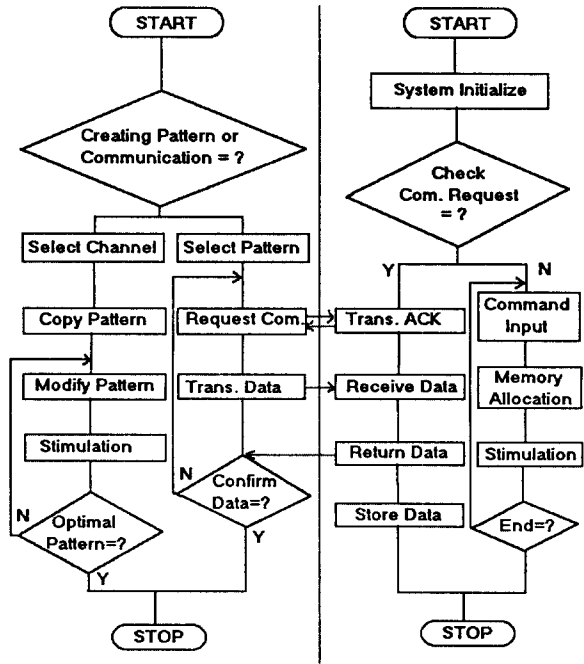
### 3. 소프트웨어의 구조

소프트웨어는 <그림 2>에서 볼 수 있는 바와 같이 전체적으로 IBM-PC측에서 사용하는 부분과 휴대용 FES장치에서 사용하는 부분으로 나뉘어진다.

IBM-PC측의 소프트웨어는 다중 채널 자극 패턴 생성 부분과 패턴의 데이터 전송 부분으로 구성하였다. 환자의 상태에 가장 적합한 자극 패턴을 생성하기 위해 자극 펄스 간격의 조정, 패턴 편집, 파일 저장 기능을 통합환경 내에 구축하였다. 뿐만 아니라 자극 펄스의 주파수에 따라 근육의 피

로현상이 결정되므로 편집과정에서 이를 조절하여 알맞은 주파수를 선택하도록 하였다.

그리고 휴대용 FES 장치의 소프트웨어는 시스템 초기화 및 통신 프로그램과 자극 패턴 전달 프로그램으로 되어있다. ROM에는 마이크로 컨트롤러와 주변기기를 초기화 시키고 IBM-PC와 통신하여 전송되어온 자극 패턴을 받아 메모리에 저장하는 부분이 내장되어있다. 자극 패턴 전달 프로그램은 환자의 동작 명령에 따라 필요한 자극 패턴을 메모리에서 재배치하여 D/A 컨버터로 데이터를 전달한다. 더불어 소형화에 따른 한정된 입출력장치로 다양한 기능을 표시하기 위해 상위 메뉴에서 하위 메뉴를 선택하여 사용하는 풀다운 메뉴 방식을 사용하였다.



< 그림 2 > 자극 패턴 생성 장치와 휴대용 FES장치의 흐름선도

### 4. 전극

인체내 근육에 삽입된 전극은 ultrafine SUS 316L 스테인레스 강선과 Teflon-coated 19 strand rope가 꼬여져서 헬리칼(Helical) 코일 구조를 가지므로 높은 신축성을 가지고 있다. 스테인레스 선 하나의 직경은 25 $\mu$ m이고 코일의 최외 직경은 0.48mm이다. 전극의 끝은 각 근육에 자극 전류를 흘리기 위해 절연이 제거되어 있다.[7] 전극은 spinal needle를 이용해 피하지방을 통과하여 자극될 근육에 삽입 장착된다.

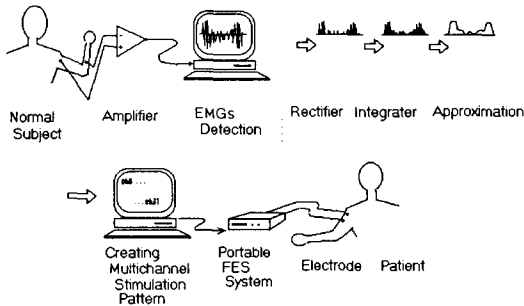
## 5. 실험방법

마비된 팔 다리의 기능을 복원 하기 위해서는 모든 근육을 동시에 자극해야 한다. 예를 들어 최소 에너지로 손 쥐는 동작을 제어하기 위해서는 손목이 동시에 움직여야 할 뿐만 아니라 손목은 Prime mover와 더불어 Synergists 와 Antagosists 근육의 공유협조에 의해 동작이 된다.[5] 따라서 한 가지 동작을 위해서는 모든 근육을 동시에 해석하는 다중 채널 패턴이 요구된다. 표준 자극 패턴을 생성하는 과정은 다음과 같다.

- 1) 정상인의 팔 다리 동작 동안 근전위(EMG) 신호를 검출 하였다.
- 2) 근전위(EMG) 신호를 최대치에 기준하여 정규화한 후 반복 측정한 여러 신호를 평균하여 표준 자극 패턴을 생성하였다.

하지만 환자의 상태에 따라 인체 내의 저항 성분이 차이가 있고 근육 마다 전극이 놓이는 위치의 편차가 있어 패턴을 재조정할 필요가 있다.[8] 따라서 <그림 3>에서 보는 바와 같이 자극 패턴 생성 장치에서는 환자가 고통을 느끼지 않는 최대 자극 전압과 최소한의 근육 운동을 유발하는 최저 자극 전압을 입력함에 의해 적절한 자극 패턴을 생성하도록 프로그램 하였다.

완성된 자극 패턴 데이터를 휴대용 FES 장치의 메모리로 전송하여 환자가 사용하게 함으로써 마비된 손의 기능을 복원하는데 도움을 주었다.



< 그림 3 > 자극 패턴 생성장치와 휴대용 FES 장치의 실험 방법

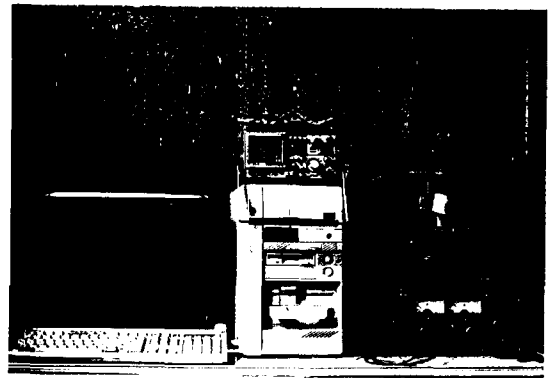
## 6. 실험결과

환자는 11세의 남자 어린이로 출생시부터 뇌성마비에 의해 좌반신 마비(Spastic hemiplegic, cerebral palsy)이었다. 수술 전 환자의 왼 손가락은 쥐고 있는 상태이고, 왼 손목은 굴곡수축 되었으며, 팔꿈치는 펴지 못 하였다. 1991년

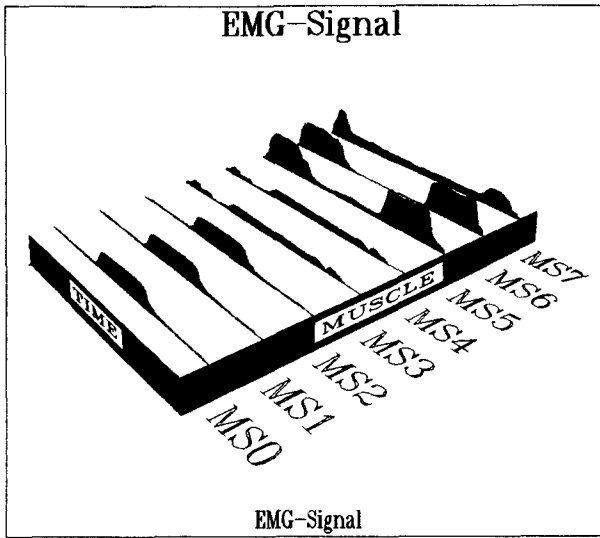
7월 9개의 전극을 마비된 왼 팔에 삽입하였다. 좌측상지에 전극이 삽입된 근육 및 신경과 각 채널은 다음과 같다.

MUSCLE 0 - 수부 제 1 골간근 (the 1st Interossei)	- CHANNEL 0
MUSCLE 1 - 수부 제 2 골간근 (the 2nd Interossei)	- CHANNEL 1
MUSCLE 2 - 수부 제 3 골간근 (the 3rd Interossei)	- CHANNEL 2
MUSCLE 3 - 심요골신경(회외근 자극 동반) (Deep Radial nerve, unstimul supinator)	- CHANNEL 3
MUSCLE 4 - 심요골신경(회외근 자극 없음) (Deep Radial nerve, stimuls supinator)	- CHANNEL 4
MUSCLE 5 - 총지신근 (Extensor Digitorum (Communis))	- CHANNEL 5
MUSCLE 6 - 단무지의전근 (Abductor Pollicis Brevis)	- CHANNEL 6
MUSCLE 7 - 상완삼두근 (Triceps Brachii)	- CHANNEL 7
Ground - 어깨	- GND

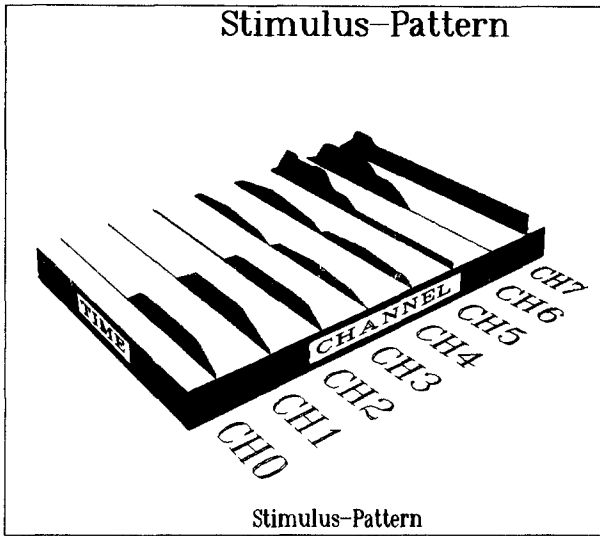
<그림 5> a)와 같은 EMG신호에 근거한 b)의 자극 패턴을 생성한 후 다중 채널을 이용하여 마비된 왼 팔의 운동 근육 및 신경을 자극하였다. 자극 운동 결과 좌측 전완 (forearm)의 굴곡 근육들의 경련성 수축(Spasticity)은 현저히 감소하여 좌측 수근관절의 굴곡이 증립으로 되었다. 또한 일상 생활에 기본이 되는 손 쥐는 동작과 펴는 동작을 하기 위한 자극 패턴을 휴대용 FES 장치의 메모리에 저장하였다. 그리하여 환자가 스위치를 조작하여 명령을 입력하면 휴대용 FES 장치에 의해 마비된 왼손이 쥐는 동작이나 펴는 동작을 하여 물건을 집을 수 있는 기본적인 기능에 도움이 되게 하였다. <그림 6> a)는 전기적인 자극없이 환자가 마비된 왼손으로 물건을 집을 때의 모습을 보여준다. 왼손은 오른손의 도움을 받지 않고는 물건을 집을 수 없는 상태이다. b)와 c)는 자극 패턴에 의해 손을 편 상태와 쥘 상태를 보여주고 있다. d)는 자극 명령에 의해 손을 제어하여 물건을 집을 모습이다.



< 그림 4 > 전체 실험 장치의 사진



a)



b)

< 그림 5 > a) 각 근육의 근전위(EMG) 신호  
b) 각 채널의 자극 패턴



a)



b)



c)



d)

< 그림 6 > a) 자극이 없을 때의 물건을 잡는 동작  
b) 자극에 의해 쥐는 동작  
c) 자극에 의해 펴는 동작  
d) 자극 명령에 의해 손을 제어하여 물건을 잡는 동작

## 7. 결론

중추신경계의 손상으로 인해 마비된 팔 다리의 운동 근육을 제어하기 위해 휴대용 FES장치를 개발하였다. 본 장치를 이용하여 환자는 마비된 근육을 제어할 수 있었으며 팔의 기능을 복원하는 데 도움을 주었다. 32채널의 다중 채널 방

식을 이용해 다수의 근육을 동시 제어할 수 있게 하였으며 V40 마이크로 프로세서를 이용하여 기존의 하드웨어에 의존하던 기능을 소프트웨어로 처리함으로써 소형, 경량화 시켰다. 더불어 자극 패턴 장치를 대중화 된 IBM-PC로써 이용할 수 있게 설계하고 일반화된 부품으로 휴대용 FES 장치를 제작하여 저가격화를 실현하였다. 최대 자극 전압을 가변하도록 DC-DC 컨버터를 제작하여 환자의 상태에 따라 융통성 있게 하였으며, 소프트웨어에 의해 자극 펄스 주파수를 조절하여 근육의 피로도를 줄일 수 있었다.

## 8. 참고문헌

1. J.Thomas Mortimer, Motor Prosthesis: as I Experience the Field, Proceeding of the 1st International FES Symposium, July 1992
2. Long C. and Masciarelli, An Electrophysiologic splint for the hand, Arch. Phys. Med, 44:499-503, 1963
3. P.Rabischong, E.Rabischong, M.Benichou, P.Apicella, J.P.Micallef, Clinical Perspectives of the Use of Neural Electrodes in the CALIES Project, Proceeding of the 1st International FES Symposium, July 1992
4. N.Hoshimiya, Historical Review of the "SENDAI FES Project" and the Future Challenge, Proceeding of the 1st International FES Symposium, ppl-6, July 1992
5. M.Ichie, Y.Handa, A.Naito, T.Handa, N.Matsushita, and N.Hoshimiya, EMG Analysis of the Thumb and its Application to FNS, Proceedings of the Eighth Annual Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp60-62, November 1986
6. Kevin L.Kilgore, P.Hunter Peckham, Michael W.Keith and Geoffrey B. Thrope, Electrode Characterization for Functional Application to Upper Extremity FNS, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol 37, No 1, ppl2-21, January 1990
7. Y.Handa, N.Hoshimiya, Y.Iguchi, T.Oda, Development of Percutaneous Intramuscular Electrode for Multichannel FES System, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.36, No. 7, pp705-710, July 1989
8. N.Hoshimiya, K.Iijima, R.Futami, Y.Handa and M.Ichie, A New FES System for the Paralyzed Upper Extremities, Proceedings of the Seventh Annual Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp327-330, September 1985