대한물리치료학회지 제13권 제2호
The Journal of Korean Society of Physical Therapy
Vol. 13, No. 2 pp 399~405, 2001.

기능적 전기자극에 대한 고찰

동아정형외과의원 물리치료실
박 규 현
대구미래대학 재활공학과
김 선 규
대구대학교 재활과학대학 물리치료전공
정 현 애
대구대학교 재활과학대학 물리치료학과
박 래 준

The Review of Functional Electrical Stimulation

Park, Kyu-Hyun, P.T., M.S.
Department of Physical Therapy, Donga Orthopaedic Sugery
Kim, Sun-Kyoo, Ph.D.
Department of Rehabilitation Engineering, Taegu Mirae college
Chung, Hyun-Ae, P.T.
Department of Physical Therapy, Graduate School of Rehabilitation Science, Taegu University
Park, Rae-Joon, P.T., Ph.D.
Department of Physical Therapy Taegu University

< Abstract >

Attainment of the goals of functional electrical stimulation(FES) applications such as strengthening of muscle, increasing muscular endurance, improvement in joint range of motion or the reduction of spasticity does not insure that patients will be able to produce voluntary muscle contraction sufficient to maintain posture or produce purposeful movements.

In many patients who have sustained CNS damage, the control exerted by higher nervous system center over muscle contraction may impaired. In Searched patients, a variety of advanced therapeutic exercise techniques have been employed traditionally to facilitate the return of controlled functional muscular activity or maintain postural alignment until recovery from dysfunction occurs

Among the most common clinical applications of FES for functional muscle contraction is as a substitute for static or dynamic orthotic devices

Ⅰ. 서 론

살아있는 조직에 전기를 가하면 신경세포에 활동전위(action potential)를 유발하는 등 다양한 효과를 나타낸다. 가령, 전기에 의하여 유발된 자극은 신경시스템의 가지를 따라 퍼져 나가는 방법을 사용하여 인체의 거의 대부분의 장기에 영향을 줄 수 있다.

Hodgkin과 Huxley(1945)가 제안한 모델을 사용하

면 활동전위가 전파되는 과정을 이론적으로 설명할 수 있다. 전기를 의료에 적용한 가장 좋은 예로 인공 심장 박동기(pace maker)를 들 수 있다(Zoll, 1952). 1950년대에 이미 여러 종류의 전기자극기를 개발하고 그에 따른 특허를 얻었다(Reswick, 1973). 전자공학이 발달함에 따라 Liberson(1961) 등은 전기자극기를 만들어 편마비환자의 족하수증을 교정하는데 사용하였다. 즉, 발뒤꿈치에 센서를 부착하고 발뒤꿈치가 지면에서 떨어지면 자극기가 작동되어 슬와의 비골신경 위에 부착한 전극에 자극을 전달한다. 자극이 가해지면 배측굴곡이 유발된다.

이러한 생각이 발전되어 기능적 전기자극(functional electrical stimulation, 이하 FES라 한다)이라는 새로운 재활분야가 탄생하게 되었다(Vodovnik, 1971). 1967년에 FES를 "더 이상 자발적으로 제어하지 못하게 된 근육에 전기자극을 가하여 근육수축을 유발하고 기능적으로 유용한 움직임을 만들어내는 작용"이라고 정의하였다(Gracanin, 등, 1967).

하부 운동신경원의 명령전달 능력을 보존하고 있는 환자, 즉 상부 운동신경원이 손상되어 마비현상을 나타내는 환자의 말초신경에 FES를 가하여 골격근의 수축을 유발할 수 있다. 이러한 대표적인 경우로는 편마비환자, 척수손상환자, 뇌성마비를 나타내는 어린이환자, 그리고 질병 등으로 인하여 중추신경계에 손상을 입은 환자 등이 있다.

현재 사용하고 있는 재활방법에 비하여 FES는 보다 새롭고 효과적으로 적용될 수 있다.

하반신 마비환자에게 FES를 적용하면 더욱 효과적이며 완전 SCI 환자가 FES를 사용해서 기동성을 회복한 예도 있다(Wilemon 등, 1976). 1987년에 이르러 SCI 환자들이 표면전극을 통한 FES 시스템을 일상생활에서 사용하게 되었다.

FES의 앞날은 신경조직의 흥분을 제어할 수 있는 능력, 여러 가지 신호 중에 어느 하나 또는 몇 개를 골라서 제어하는 방법, 환자가 아직도 유지하고 있는 기능을 FES에 조화시키는 방법 등에 달려있다고 보여진다.

본 연구는 전기치료학 및 보장구 분야에서 새로운 분야로 각광을 받고 있는 FES를 현재까지의 연구 동향과 이용가능성을 고찰해 봄으로써 환자에게 바른 적용법과 향 후 이 분야 연구자들에게 기초 자료로 활용될 수 있도록 문헌을 통하여 고찰하고자 한다.

Ⅱ. 기능적 전기자극의 기본원리와 전기자극 기술

마비된 근의 운동기능을 수동적으로 수행시키기 위하여 각 동작에 대한 외부의 명령을 마비근의 지배신경에 전달하여 근을 수축시키는 방법으로 구성은 프로그램이 내장된 자극기와 자극기로부터의 자극을 신경에 전달하는 전극(electrode)이다. 어떠한 동작을 수행하고자 할 때, 예를 들어 컵을 잡는 동작을 수행하기 위해서는 정상인에서 이 동작 시 관여하는 근들의 근전도를 구한다. 이 때는 각 근의 활동성(수축)에 대한 강약의 정도와 각 근육이 동원되는 시간간격을 중점적으로 분석한다. 그 후 이러한 정상자료를 입력기에 입력시켜서 그 환자에게 적합한 자극강도를 설정한다. 이와 같이 일상생활에 필수적인 몇 가지 기본동작을 자극기에 입력하여 필요에 따라서 동작의 종류를 선택하면 그 동작을 수행할 수 있는 전기자극이 환자에게 전달된다.

마비된 근만을 선택적으로 지배하는 신경의 운동점(motor point)을 찾은 후 국소마취하에서 주사침을 이용하여 전극을 운동점에 삽입한다. 이때 전극의 끝부위는 teflon 피복을 제거하여 전류가 신경에 잘 전달되도록 한다. 이처럼 마비된 각 근의 운동점에 전극을 삽입한 후, 전극들을 피하를 통하여 일정한 부위로 출구를 만들어 외부로 노출시킨 후 자극기와 연결할 수 있는 연결장치를 마련한다. 그 후 필요에 따라서 자극기를 전극에 연결시키기도 하고, 필요없을 경우는 자극기를 분리한다.

Ⅲ. 환자의 선택

특정 환자의 재활프로그램 적용가능성과 기대되는 효과 등을 결정할 때에는 가급적 빨리 판단을 내려야 한다. 여러 형태의 외상을 입은 후 필요한 치료를 받은 환자는 일정 시간이 흐르면 이른바 안정상태에 도달하는데, 이 때 FES를 이용한 재활프로그램을 적용하기 시작할 수 있다. 또 환자의 골격계와 신경근육계를 포함한 완벽한 신체검사가 요구된다. 상부 운동신경원 손상인지 하부 운동신경원 손상인지 가려내는 작업이 매우 중요하다, 몸통과 팔/손의 근육에 대한 기능검사도 빼 놓을 수 없다. 다음에는 환자의 일반적인 상태를 검사하여야 한다.

1. 손상부위와 정도에 의한 환자선택

더 이상 신경의 지배를 받지 못하는 근육은 빠른 시간 내에 위축현상을 보이므로 FES를 적용하지 못한다. 따라서 T-4와 T-12 사이의 환자라 하더라도 상당수가 FES의 직접적인 대상이 되지 못하고 T-12 이하의 환자와 같이 간주하여야 한다. T-4 이상의 환자는 몸통을 자의로 움직일 수 없으므로 서있는 자세를 유지하기 매우 힘들다. 따라서 이 경우에는 FES를 적용할 때 적절한 브레이스를 같이 사용하여야 한다(Carter, 1976).

FES의 가장 적당한 대상은 T-4와 T-12 사이의 부위에 손상을 입은 하반신 마비 환자라 할 수 있다. 이러한 환자들에게는 FES를 사용하여 중력을 이겨내면서 불완전하나마 간단한 움직임을 회복할 수 있고 앞으로는 일어선 상태에서 짧은 시간 동안이나마 균형을 유지할 수 있을 것이다(Bertolini and Leutert, 1978). 환자의 전반적인 상태를 고려하여 FES를 일어서기에 적용할 것인지 보행에 적용할 것인지 결정한다.

2. 신경상태에 의한 환자상태

FES를 사용하려면 환자는 신경시스템이 안정한 상태이어야 한다. 우선, 상부 운동신경원 손상 또는 하부 운동신경원 손상의 부위를 살펴보고 어느 정도까지 감각을 유지하고 있는지 세밀히 검토한다. 동시에 반사운동도 살펴본다. 하지근육의 신전반사(stretch reflex)를 살펴보고, 경직과 진전을 시험한 후 반사작용에 의한 상승작용으로 팔다리가 일정한 양식으로 움직이는 경우가 있는지 살펴본다.

각 관절을 움직이는 주요 근육들에 대하여 하부 운동신경원 손상이라고 판단되면 일어서거나 앉는 동작을 할 때 반드시 환자자신의 팔을 사용하여야 하며 일어선 상태에서는 브레이스를 사용해서 관절을 고정시켜야 한다. 이러한 환자들은 FES가 스윙 단계에서만 약간의 도움을 줄뿐이므로 FES로 큰 혜택을 받지는 못한다.

3. 생리적인 상태에 의한 환자선택

우선, 환자의 기능 상태를 철저하게 점검하고 기록한다. 매일 물리치료를 받는 경우보다 훨씬 더 광범위하게 생리적인 상태를 계속 측정하고 검토해야 한다. 매일 물리치료를 받는 경우에는 장비도 부족하고 부분적으로 매 환자마다 많은 시간을 할애할 수 없는 까닭에 환자가 어떤 동작을 취하고 있는 상태, 즉 '움직이는' 상태에서 생리적인 상태를 측정한다.

환자의 생리적인 상태는 치밀하게 계획된 운동을 거치면 많이 향상될 수 있고, 생리적 상태의 변화과정은 1) 심장의 박동률, 2) 혈압, 3) 지칠 때 나타나는 증상, 4) 심전도, 5) ergogram으로 알아 낼 수 있다. FES 프로그램을 적용할 수 있는 환자를 선택하는데 필요한 주요 수치는 원칙적으로, 물리치료에서 사용하는 제반사항을 그대로 적용하면 된다.

4. 신체검사와 FES의 가능성

일반적으로 신체검사는 그림1과 같이 팔, 다리, 그리고 몸통에 중점을 둔다. 이러한 신체검사의 결과는 환자가 FES를 이용한 재활프로그램에 들어가기 전의 상태로서 가치를 가지고 있다. 골다공증, 혹은 뼈에 기타 문제가 있어서 적절한 하중을 이겨내지 못해서 걷는데 위험이 있다고 판단되는 환자는 FES 대상에서 제외된다. 여러 가지 신체검사를 거친 후 환자가 다리 전체에 브레이스를 부착하고 보행훈련을 할 수 있으면 FES를 적용할 수 있다(Guttman, 1973; Bedbrook, 1981; Ford, 1972). 다음으로, 각 관절의 안정성과 운동범위(range of motion)를 검토한다. 인대가 늘어나서 관절이 불안정한 경우는 FES 대상에서 제외한다.

고관절 또는 무릎관절의 운동범위가 좁아서 완전히 펴지 못할 때는 운동을 통하여 해당 관절의 운동범위가 다시 넓어지지 않는다면 FES를 적용하는데 많은 어려움이 있다. FES를 사용하여 일어서거나 보행을 원만히 하려면 5°이상 배측굴곡이 가능해야 하고, 무릎은 완전히 펼 수 있어야 하며 고관절은 적어도 5°정도의 과신전이 가능해야 한다.

환자선택 과정에서 빼 놓을 수 없는 요소로서 나이, 일반적인 신체상태, 시력, 영양상태, 환자의 협력의지, 사회적인 신분, 교육정도 등이 있다.

지금까지 살펴 본 바와 같이 FES를 위한 환자를 선택할 때에는 여러 관련분야의 인원이 동원되어 서로 협조가 잘 이루어 져야 한다. 표2와 3은 FES의 대상과 제외대상을 요약하였다.

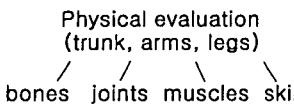

그림1. FES를 적용하기 전에 해야 할 신체검사

표1. FES의 대상환자

1. T-4에서 T-12사이의 손상환자
2. 상부 운동신경원 손상환자
3. FES 재활프로그램의 성과가 좋은 환자
4. 관절경축이나 골화, 골다공증 등의 문제가 없는 환자
5. 피부에 심각한 문제가 없는 환자
6. 균형 및 방향전위에 대한 정상적인 감각기능을 가지고 있는 환자
7. 정신적인 상태가 양호한 환자
8. 스스로 노력하며 협동의식이 있는 환자
9. 윗몸의 기능을 적절히 유지하고 있는 환자
10. 생리상태가 거의 정상을 유지하고 있는 환자(심장, 폐, 혈액순환, 대사기능 등)

표2. FES를 적용할 수 없는 환자

1.심장, 폐 혹은 혈액순환에 병변이 있는 환자
2.대사기능에 이상이 있거나 자율신경계의 손상으로 인한 병변을 나타내는 환자
3. 골다공증 환자
4. 관절의 골화를 보이는 환자
5. 주요 다리근육의 하부 운동신경원 손상 환자
6. 욕창이나 피부상태에 문제가 있는 환자
7. 전류에 과민반응을 보이는 환자
8. 비만환자
9. 경직이 심각한 환자
10. 앉아 있을 때 균형을 제대로 잡지 못하는 환자
11. 정신상태 및 교육정도가 부적절한 환자

Ⅳ. FES를 사용함으로서 받는 혜택

생명체는 어떤 기능을 발휘하는데 스스로 잘못된 점을 발견하고 고치는 방법을 무수히 많이 가지고 있다. 인체에는 여러 가지 센서가 있어서 잘못된 점을 찾아내어 다양한 형태의 정보를 제공한다. 그림 2를 보면, 생명체가 안전하게 또는 정상적으로 작동하는 영역(안전영역)을 둘러싸고 있는 또 하나의 영역은 오래 지속하면 해가 되거나 지장을 초래할 가능성이 있음을 나타낸다. 대부분의 경우에 충분한 시간이 흐르면 인체가 스스로 고치거나 치료하는 기능을 발휘해서 손상을 회복한다. 즉, 이 두 번째 영역에서는 가역(reversible)변화가 일어난다. 만약 생명체가 오랜 기간 동안 강한 스트레스를 받으면, 세 번째 조건부 가역영역(conditional reversible domain)에 들어가거나 네 번째 비가역(irreversible)영역으로 들어가서 결국 병변을 유발한다. 조건부 가역영

역에 있을 때에는 생명체가 아직 스스로 고쳐나가는 능력을 갖고 있기 때문에 환경과 조건이 맞으면 어느 정도는 정상을 회복할 수 있다. 예를 들면, 심장마비가 왔을 경우에 충분한 혈액과 산소가 심장에 공급될 수 있다면 심장근육이 입은 손상을 줄일 수 있으므로 조건부 가역영역에 머무는 시간이 길지 않으면 치명적인 것은 아니다. 이 조건부 영역을 둘러싸고 있는 비가역영역은 일단 들어가면 어떤 경우에도 기능을 회복할 수 없다.

신체가 손상을 입으면, 특히 척수가 손상되면 다양한 외상, 감각상실, 자율신경계의 이상, 여러 가지 기관의 비정상적인 작동 등으로 인하여 안전영역과 가역영역이 좁아진다. 신체가 어떠한 작동을 하고 있을 때에는 여러 영역 중 어디엔가에 위치하고 있으며 움직이는 방향과 크기는 시간에 따라 다르고 신체의 항상성(homeostasis)을 유지하는데 영향을 주는 다양한 파라미터를 나타내고 있다.

사람은 주로 곧바로 서있도록 진화되어 왔고, 따라서 오랜 시간동안 앉아있거나 누워있으면 몸에 좋지 않다. 예를 들면, 방광과 신장이 이뇨작용을 하기 어렵게 만든다. 어떠한 보조기구를 사용하든지 매일 일정시간만 서 있을 수 있다면 위와 같은 악화과정을 막을 수 있다는 점을 유의할 필요가 있다. 적어도, 브레이스와 같은 보조기구를 사용하여 수동으로 서있는 것보다는 FES와 같이 능동적으로 일어서고 서있는 경우가 훨씬 효과적이라고 믿고 있다.

환자가 아직 유지하고 있는 기능과 FES를 혼합적으로 사용하여 규칙적으로 일어서고 일어선 자세를 유지한다면 환자의 다리 이외의 기능, 특히 심폐기능도 향상될 수 있다(Phillips등, 1984).

Issekutz 등(1966)은 정상인 수동적으로 서있을 때의 효과를 알아보기 위한 실험을 하였다. 그들의 결과에 의하면, 침대에서 매일 4 시간까지 운동을 해도 가만히 누워 있을 때 늘어나는 소변내의 칼슘을 줄일 수 없었다. 또한, 8시간씩 조용히 앉아 있어도 소변에 포함된 칼슘량을 줄이지 못하였으나, 하루에 3시간씩만 가만히 서있어도 서서히 줄어든다는 것을 보였다.

Claus-Walker 등(1972)은 3일 동안만 침대에 누워 있으면 소변내에 칼슘량이 현저히 증가한다고 보고하였다.

요약하면, FES를 사용해서 일어서고 서있는 동작을 하면 다리의 모든 관절의 운동 범위가 현상태로 유지되고(Leo, 1985) 근육이 FES에 의하여 규칙적으로 수축/신장되며 자극이 구심성(afferent effect)을 나타내기 때문에 경직도 현저히 줄어들 뿐 아니라, 뼈속의 칼슘이 감소하는 것을 방지하므로 칼슘과잉뇨증과 요로결석을 예방하고, 순환계통과 방광의 기능을 향상시킨다고 보여지며, 이 외에도 직립위치에서의 반사기능을 유지하고 자세를 점차 정상적으로 교정함에 따라 신체 내의 각 기관들도 원래의 위치를 되찾게 되는 등 생리적으로 도움을 준다.

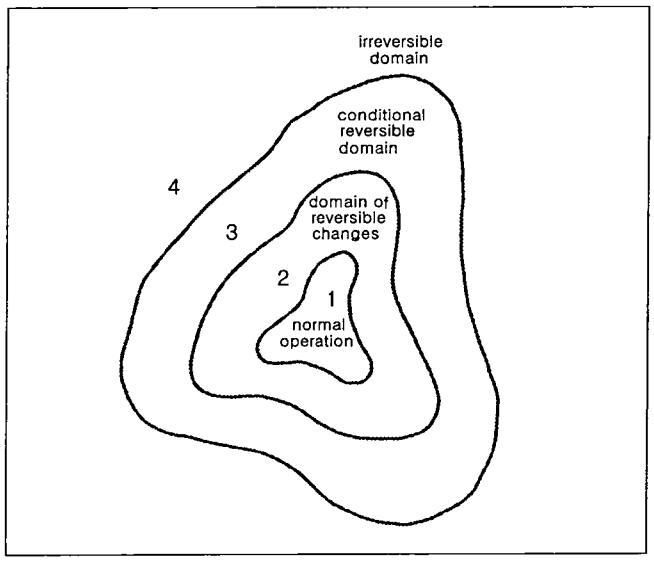

그림2. 생체외 가역영역과 비가역영역

Ⅴ. 보행훈련

환자 스스로 적어도 3-5분 정도 혼자서 안전하게 서있을 수 있을 때 보행훈련을 시작한다. 시작하기 전에 환자를 생체역학적인 측면에서 다시 한번 관찰할 필요가 있다. 이 때 운동범위가 충분한가, 골다공증은 없는가, 골격시스템이 안정한가 등을 중요하게 생각해서 환자를 선택해야 한다. 또 하드웨어에 갑작스런 문제가 생기거나 외부로부터 갑자기 방해가 들어와서 환자가 넘어지거나 돌발적으로 움직이는 경우에 대비해서 환자가 입을 수 있는 손상을 미리 예방하는 것이 중요하다. 전극이 떨어지거나 전선이 코넥터(connector)에서 빠지거나 혹은 동작기가 작동이 안될 때 응급처치하는 방안에도 특별히 주의를 기울여야 한다. 걸을 때 넘어지는 연습을 미리 해두는 것도 권장할만 하다.

훈련의 초기에는 보행거리를 짧게 하고 내딛는 걸음의 수도 보통 2-3번에서 6-10번 정도로 한다. 연습이 끝나면 두 다리로 체중을 지탱하면서 서있는 자세를 취하고 치료사가 환자가 있는 곳까지 바퀴의자를 가지고 올 때까지 그대로 서있는 연습을 해야 한다.

Ⅵ. 결 론

FES의 출현은 상부 운동신경원 손상환자에게 가정에서 남의 도움 없이 사용할 수 있는 시스템이 앞으로 수년내에 상업화 될 것이라는데 그 중요성이 있다. 아마도, 초기에는 환자가 일어서는데 사용하면서 가정에서 몇 걸음 움직이는데 도움을 주는 간단한 FES 시스템이 선보일 것이다. 현실적이고 환자가 사용하기 편리하도록 제작된 차세대 시스템에는 환자의 안전을 고려한 장치와 환자의 감각정보에 의해서 작동되는 논리제어 시스템이 포함되어야 할 것이다. 또한 환자가 일상생활에서 매일 이런 시스템을 사용할 때 어느 정도의 기동성 및 기능을 나타낼 수 있는가에 대해서 심도있게 생각하고 예측해 보아야 할 것이다. 그리고 시스템을 몸에 부착하고 떼내는 방식, 외관, 시스템을 몸에 부착하고 FES 기능을 즉시 얻을 수 있는가의 여부 등을 꼽을 수 있다. 이러한 사항을 고려할 때 FES는 기능적으로 더욱 중요하다고 인식될 것이며 임상적용이 보편화될 것이라 믿는다.

〈 참 고 문 헌 〉

Bedbrook, G. M., : The Care and Management of Spinal Cord Injuries, Springer-Verlag, Berlin, 1981.

Bertolini, R. and Leutert, G., : Atlas der Anatomie des Menschen - nach systematischen und topographischen Gesichtspunkten, Band I: Arm und Bein, VEB Georg Thieme, Leipzig, 1978.

Carter, D., : Bone compressive strength: the influence of density and strain rate, Science, 194, 1174, 1976.

Claus-Walker, J., Campos, R. J., Carter, R. E., Vallbona, C., and Lipscomb, H., : Calcium excretion in quadriplegia, Arch. Phys. Med. Rehabil., 53, 14, 1972.

Ford, W. R., : Analysis of knee joint forces during flexed knee stance, in Resident Papers, Univ. of Southern California, Rancho Los Amigos Hospital, Los Angeles, 5, 135, 1972.

Gracanin, F., Prevec, T., and Trontelj, J., : Evaluation of use of functional electronic peroneal brace in hemiparetic patients, in Proc. Int. Symp. External Control Human Extremities, Dubrovnik, Yugoslavia, August 29 to September 2, 198, 1967.

Guttman, L., : Spinal Cord Injuries - Comprehensive Management and Research, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1973.

Hodgkin, A. L. and Huxley, A. F : Resting and action potentials in single nerve fibers, J. Physiol.(London), 104, 176, 1945.

Issekutz, B., Blizzard, N. C., and Rodahl, K., : Effects of prolonged bed rest and urinary calcium output, J. Appl. Physiol., 21, 1013, 1966.

Leo, K., : The effects of passive standing, Paraplegia News, November, 45, 1985.

Liberson,W.T., Holmquest, H.J., Scott, d., and

Dow, A : Functional electrotherapy stimulation of the peroneal nerve synchronized with swing phase of the gait in hemiplegic patients, Arch. phys. Med. Rehabil., 42,101, 1961.

Phillips, C. A., Petrofsky, J. S., Hendershot, D. M., and Stafford, D., : Functional electrical exercise - a comprehensive approach for physical conditioning of the spinal cord injured patient, Orthopedics, 7, 1112, 1984.

Reswick, J. B : A brief history of functional electrical stimulation, in Neural Organization and Its Relevance to Prosthetics, Fields, W. S. and Leavitt, L. A., Eds., Intercont. Med Book Corp., New York, 1973, 3.

Vodovnik, L., : Functional electrical stimulation of extremities, in Advances in Electronics and Electron physics, Vol. 30, Marton, L., Ed., Academic Press, NY, 1971.

Wilemon, W.K., Mooney, V., McNeal, D. R., and Reswick, J. B., : Surgically implanted peripheral neuroelectric stimulation, internal report of Rancho Los Amigos Hospital, Downey, CA, 1976.

Zoll, P. M : Resuscitation of the heart in ventricular standstill by external electric stimulation, N. Engl. J. Med., 247,768, 1952.