

7 기능적 전기자극(FES)

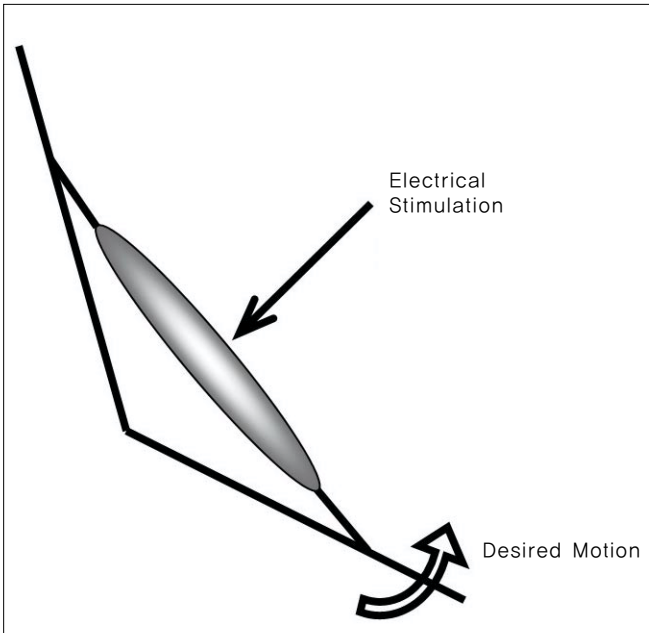
전기 자극으로 마비된 근육 · 신경 움직인다

글 | 강 곤 _ 경희대 동서의료공학과 교수 gkhang@khu.ac.kr

‘기능적 전기자극(FES)’이라는 명칭은 웬지 딱딱한 느낌이 들고 우리의 일상생활과는 직접적인 연관성이 없는 연구라는 느낌마저 들지만, 실제로는 우리가 사고나 질병 등으로 인하여 신체를 움직이는 기능을 상실했을 때 그 잃어버린 기능을 일부나마 보상해 주는 공학의 한 분야로서 우리의 생활에 직접 적용할 수 있는 연구 분야 중 하나다. 예를 들면, 우리가 주먹을 쥐거나 다리를 펴는 등 신체를 움직이려고 할 때는 뇌에서 움직임을 만들라는 명령신호가 만들어지고 이 명령신호가 운동신경원을 따라 신경과 근육이 접하는 운동종판을 넘어 해당 근육을

수축하게 한다.

사고나 질병 등으로 상부운동신경원이 손상되면 뇌에서는 움직임을 만들라는 명령신호가 만들어지더라도 이 명령신호가 근육까지 전달되지 않는 경우가 발생한다. 척수손상이 가장 대표적인 예로서 뇌로부터의 명령이 척수를 따라 내려오다가 손상부분에서 더 이상 나아가지 못하여 결국 스스로 움직임을 만들어낼 수 없게 된다. 이러한 환자의 마비된 근육이나 그 근육을 관장하는 하부운동신경원에 뇌로부터의 명령 대신에 외부로부터 전기자극을 가하면, 근육이 수축하면서 해당 관절을 굽히거나 펴으로써 다리를 펴거나 손으로 물체를 잡는 등의 일상생활에 필요한 움직임을 불완전하나마 만들어 낼 수 있다. 또한, 이러한 관절의 움직임 외에도, 전기자극으로 방광을 수축하게 하여 배변을 돕거나 시신경이나 청신경에 전기자극을 가함으로써 보거나 듣는 것을 가능하게 할 수도 있다. 이렇게 외부로부터 전기를 가하여 인체의 기능을 만들어내는 것을 ‘기능적 전기자극’이라고 한다. 마비된 근육 혹은 신경에 전기자극을 가하여 관절의 움직임을 만들어내는 분야에 대하여 간단히 알아본다.



마비된 근육에 전기자극을 가하면 근육이 수축하고 이에 따라 관절이 굽혀지거나 펴진다.

뇌 · 척수 손상 마비환자 대부분이 30세 이하

현대에 이르러 의학이 급속히 발전해 왔음에도 불구하고, 마비 환자의 기동성을 회복시키거나 잔존해 있는 생체기능을 향상시킬 수 있는 FES에 대한 연구의 저변확대 및 필요성이 강조되고 있다. 산업이 점차 발달함에 따라 이전과 비교하여 교통사고, 스포츠 사고, 산업재해 또는 질병 등으로 인하여 상부 운동신경원에 손상을 입어 기동성을 상실하게 되는 척수손상, 조산 등으로 인하여 뇌신경에 손상을 입게 되는 뇌성마비, 그리고 중장년층 이상에서 적지

않게 발생하는 뇌졸중(stroke) 등이 FES를 적용할 수 있는 대표적인 예라고 할 수 있다.

미국의 척수척수장애협회(www.spinalcord.org)에서 발표한 통계자료에 의하면, 2003년 미국 내 척수손상 환자의 수는 약 45만 명이며, 매년 7천800명씩 척수손상 환자가 증가하고 있다. 척수손상의 원인은 자동차사고(44%), 낙상(22%), 스포츠 사고(8%), 범죄(24%), 기타(2%)이고, 척수손상 당시 환자의 나이는 16~30세가 전체의 84%를 차지하며, 가장 사고가 많이 발생하는 나이는 19세라고 한다. 우리나라의 경우도 이와 크게 다르지 않아서, 보건복지부에서 발표한 통계자료인 장애인 등록현황에 의하면, 척수손상 환자가 포함되어 있는 지체 장애인의 수는 총장애인 수의 50% 이상을 차지하고 있으며, 매년 6만 명 이상 증가하고 있다. 뇌병변, 발달장애를 가진 사람도 매년 각각 2만 명, 1천 명 이상씩 증가하고 있다.

국내의 통계자료에는 척수손상환자가 따로 분리되어 있지 않고, 또한 1999년에는 전체 장애인 등록 인원과 지체장애인의 수만 발표되었지만 통계자료에 나타나있는 것과 같이, 뇌나 척수의 손상으로 기동성을 잃는 사람들이 매년 증가하고 있으며, 그 중 대다수가 30세 이하이다. 과거에는 기동성을 잃으면 특정 부위에 지속적인 압력을 가해서 생기는 욕창 등의 부수적인 병변들에 의하여 수명이 짧았으나, 요즘에는 의료처치의 발달로 인하여 장애인의 평균수명이 비장애인과 크게 다르지 않을 정도로 증가하였다. 그러므로 공학적인 방법으로 마비환자의 기동성을 회복하게 함으로써 삶의 질을 높여줄 수 있는 방법이 더욱 더 필요하게 되었다.

전기자극으로 근육수축 · 이완 반복시켜 혈액순환 등 촉진

FES는 휠체어나 브레이크 등의 보조기구에 비하여 두드러진 장점을 가지고 있다. FES는 마비되어 스스로 움직일 수 없는 근육을 전기자극으로 수축과 이완을 반복시켜 주기 때문에 근육의 수축 능

력을 향상시켜주며, 근육이 수축과 이완을 반복함에 따라 관절운동도 병행되므로 관절의 운동범위가 줄어드는 것을 방지할 수 있다. 또한, FES 근육강화 프로그램을 수행하면 오랜 시간 사용하지 않음으로써 위축된 근육의 근력을 비롯한 수축능력을 일부나마 회복시켜 줄 수 있으며 위축 그 자체를 예방할 수 있다. 특히, 불완전마비환자의 경우에는 기동성뿐 아니라 해당 신체 부위의 감각기능도 향상시킬 수 있다.

깨어있는 시간의 대부분을 휠체어에 앉아 있는 하반신 마비환자에게 FES를 적용하여 일어서고 걷도록 하면, 혈액순환이 촉진되고 호흡시스템을 활성화시키는 효과를 기대할 수 있다. 또한, FES는 마비환자가 장시간 동일한 자세를 유지하여 특정부위에 지속적인 압력이 가해질 때 발생하는 욕창이나 근육의 경축과 관절이 굳어지는 현상을 예방할 수 있다. FES는 관절이나 골격근에 좋은 영향을 주는 것뿐만 아니라 방광 기능과 배설 기능을 촉진하며, 일어서 있거나 보행하면서 균형을 유지하는 반사 작용을 유지 또는 강화시켜 준다.

FES의 또 다른 중요한 장점은 이러한 생리적 효과에 못지않게 정신적으로도 긍정적인 영향을 미친다는 것이다. 즉, 전기자극으로 마비된 근육이 움직임으로써 마비에 대한 인식을 긍정적으로 바꾸어 주고, 일어서는 과정이나 일어서 있는 모습이 비장애인과 유사하여 생활에 자신감을 주며, 수축되었던 근육의 부피가 증가하여 외형적으로도 비장애인과 비슷해지므로 일상생활에서의 정신적인 태도를 향상시킬 수 있다.

물론 FES가 많은 장점만을 가지고 있거나 마비환자의 장애를 모두 해결해 줄 수 있는 것은 아니다. 욕창 등 이미 피부 손상이 심하여 전극을 부착하기 어려운 환자, 경직이 심한 환자, 골다공증 환자, 전기에 과민한 반응을 보이는 환자 등에게는 FES를 적용할 수 없다. 또 다른 단점으로는 표면전극을 사용하는 경우에는 피부에 손상을 줄 수 있고, 하부 운동신경원 또는 근육계에 이상이 있을 경우에는 FES 프로그램을 수행할 수 없으며, 전기로 근육을 자극하면 자발적인 수축에 비하여 피로 현상을 빨리 나타내 비장애인에 비하여 일어서 있거나 걷는 시간이 짧을 수밖에 없다.

1961년 족하수증에 FES 최초 적용

FES를 최초로 일상생활에 적용한 예로는 니버손과 그의 동료들이 1961년에 보행시 발을 지면 위에서 끄는 현상을 줄인 것을 들 수 있다. 뇌졸중 등으로 한쪽 다리가 마비된 환자는 보행시 마비된 다

1999 ~ 2003년도 보건복지부 발표 국내 장애인 등록 현황 (단위: 명)

조사연도	등록 장애인	지체장애	뇌병변	발달장애
1999	697,513	502,647	-	-
2000	958,196	606,422	33,126	1,514
2001	1,134,177	682,325	64,950	2,516
2002	1,294,254	745,651	91,998	4,014
2003	1,454,363	813,916	117,514	5,717



하반신이 마비되어 움직이지 못하는 환자의 다리에 전극을 부착하고, 부착된 전극으로 마비된 근육을 전기자극하여 보행하게 하고 있다.

리를 앞으로 전진시킬 때 발목을 굽히지 못하기 때문에 발이 지면 위에서 끌리게 된다. 이를 족하수증(footdrop 혹은 dropfoot)이라고 하는데 발목을 굽혀줘야 할 시점에 환자의 비골신경(peroneal nerve)을 전기적으로 자극하면 훨씬 자연스러운 보행이 가능하다. 이 연구로 인하여 FES에 대한 관심이 매우 커지게 되었으며 그 이후에 여러 면에서 수많은 연구성과와 임상적인 적용이 가능하게 되었다.

칸트로비츠는 1963년에 하반신 마비환자(T-3 손상)의 대퇴사두근과 둔근을 자극하여 몇 분 정도 서있을 수 있는 성과를 얻었다. 즉, 휠체어에 앉아 있거나 침대에 누워 있어야 했던 하반신 마비환자가 스스로의 근육을 사용하여 짧은 시간이나마 일어서서 상대방과 대화를 나누거나 선반 위에서 물건을 내리는 등의 동작이 가능

하게 되었다는데 큰 의미를 갖는 연구결과가 보고된 것이다.

1973년에는 슬로베니아(당시 유고슬라비아) 루블라나 대학의 크랄린과 그의 동료들이 50명의 하반신 마비환자를 대상으로 본격적으로 전기자극에 대한 근육의 수축특성을 실험하였으며, 표면전극을 사용하여 앉은 자세에서 일어서는 동작을 회복하는 연구를 수행하였다. 또한 1983년에는 하반신 마비환자의 무릎신경을 자극하여 일어서고, 일어난 자세를 유지하게 한 후 환자 자신의 뒷몸 조절기능과 전기자극에 의한 굴곡반사, 즉 하지 관절을 굽히려고 하는 반사작용을 이용하여 앞으로 나아가는 보행을 일상생활에 적용하기 시작하였다. 물론, 일어서고 걸을 때는 안전을 위하여 평행봉이나 워커 등을 사용하였다. 그 후 계속적인 연구의 결과로 1986년에는 하나의 근육 그룹을 지속적으로 자극하지 않고, 근육 그룹을 교대로 자극하는 자세교환 방법을 도입하여 근육의 피로현상을 줄임으로써 일어서 있는 시간을 늘리는 연구를 수행하였다.

미국 케이스 웨스턴 리저브 대학의 코벤틱 등은 1994년과 1997년에 삼입전극과 표면전극을 동시에 사용하는 다채널 자극기를 개발하여 23명의 척수손상 환자를 대상으로 FES 보행 연구를 하였다. 하반신 마비환자가 FES 보행을 할 때 보행한 주기 동안 시간에 따른 자극강도의 변화에 대하여 연구하였으며, FES 보행을 위하여 사용하는 근육의 수에 따른 보행 속도, 보폭 그리고 보행자세를 비교하였다. 하반신 마비환자의 일어서기 및 보행뿐 아니라 편마비 혹은 사지마비환자의 팔이나 손 동작의 회복에 관한 연구도 활발히 수행되었으며, 대표적인 연구진으로는 미국 케이스 웨스턴 리저브 대학의 페컴 교수 그룹, 일본 도호쿠 대학의 호시미야 교수 그룹 등을 들 수 있다.

이러한 연구결과와 병행하여 1996년에는 국제FES학회(www.ifess.org)가 설립되어 2007년 11월에는 미국 클리블랜드에서 12회 학술대회를 개최하며, 국내에서도 2000년에 한국FES학회가 창립되어 매년 학술대회를 개최하고 있다.

근력강화 · 다이어트 보조수단 등에 적용 기대

국내에서는 1990년에 필자가 FES를 처음으로 소개했는데, 아직은 외국만큼 저변이 확대되지는 않았다. 그러나 1990년대 후반부터는 꾸준히 국제학술대회에 참여하는 등 국제연구와 비교해 질적으로는 뒤지지 않는 연구 성과를 보이고 있다. 국내의 FES 연구 초기의 가장 큰 성과는, 1994년부터 시작한 하반신 마비환자의 일어서기 및 보행이다. T-12 불완전 마비환자의 경우, 1990년 후반



휴대용 8개 채널 전기자극기

에는 12m/min 속도로 약 5분간 보행할 수 있었다. 이 환자의 근력을 강화시키기 위하여 근력을 강화하는 FES 프로그램을 100주간 적용한 결과 오른쪽 다리는 13배, 왼쪽 다리는 8배 증가하였고, 다리둘레는 14% 증가하는 결과를 얻었다.

하반신 마비환자의 보행과 근육강화 FES 프로그램 이외에도 국내에서 하반신 마비환자의 보행 및 근력강화훈련을 위한 휴대용 다 채널 자극기를 개발하는 연구, FES를 이용한 하반신 마비환자의 재활훈련 프로그램 연구, 하반신 마비환자의 심장 및 호흡기능 강화 훈련이 가능한 FES 사이클링 모델 개발, 전기자극을 이용한 방광의 과민성 증상을 치료하는 연구, 근전도 및 보행이벤트 등을 이용한 FES 피드백 보행 시스템을 개발하는 연구 등이 활발히 진행되고 있다.

비록 FES가 생체 기능을 향상시켜주고, 사고나 질병이 발생한 후에 욕창이나 다른 병변이 발생하는 것을 방지하는 등의 많은 장점을 가지고 있으나, 현재로서는 FES를 적용하고 있는 대상과 적용범위가 좁은 것이 사실이다. 이러한 FES의 한계를 극복하기 위해서는 국내에서 노인의 복지 및 국민의 삶의 질을 높이는 쪽으로 관심이 기울어지고 있다는 점과 FES의 장점을 면밀히 고찰해 볼

필요가 있다. 앞으로는 경제력을 가진 노인인구가 점점 늘어나고, 이 노인들이 자신의 삶의 질을 높이기 위한 수요가 크게 증가할 것이라는 것은 정부기관의 보고서에서도 빈번히 나타난다. 또한 젊은 사람들도 자신의 건강을 유지, 또는 발전시키는 방법에 대해 관심이 증가하리라는 것은 누구나 예상할 수 있는 일이다.

따라서 노화에 따라 근력이 줄어드는 것을 지연시키거나, 젊은 사람들이 건강을 유지·향상시키는데 보다 효과적인 방법, 예를 들어 근력을 강화하기 힘든 부분의 근육에 FES를 적용하여 보다 손쉽게 근력을 키우거나, 다이어트의 보조수단으로 사용하는 방법에 대한 수요가 증가하고 있으므로 이런 분야에 관련된 방향으로도 FES 연구가 진행될 것으로 예상된다. FES는 사람들의 일상생활을 돕고자하는 데서 그 연구가 출발하였으므로, 비록 형태와 분야는 달라질 수 있겠지만 앞으로도 우리의 일상생활과 함께 할 것으로 기대된다. ㉔



글쓴이는 서울대학교 기계공학과 졸업 후 동대학원에서 석사학위를, 스탠퍼드대학에서 박사학위를 받았다. 일본 교토대학 객원교수, 건국대 의공학과 교수 등을 지냈으며, 현재 대한생체역학회 회장, 한국전자기치료학회 회장 등을 겸임하고 있다.