

## 흉수 손상 환자에서 기능적 전기 자극에 의한 근력의 변화

연세대학교 의과대학 재활의학교실

진 미 령 · 박 창 일 · 박 은 숙

=Abstract=

### Changes of Muscle Strength after Functional Electrical Stimulation in Complete Paraplegia

Mi-ryeong Jin, M.D., Chang Il Park, M.D. and Eun Sook Park, M.D.

*Department of Rehabilitation Medicine, Yonsei University College of Medicine*

Functional electrical stimulation(FES) has been shown to increase muscle bulk and strength and prevent muscle atrophy in complete paraplegic patients. There are some controversies about the effects of FES on spasticity.

In order to assess the effects of FES on muscle strength and spasticity, 15 complete thoracic spinal cord injured patients were investigated in this study. The subjects were divided into two groups with 5 patients as a control group and 10 patients as a FES treatment group.

We measured the changes of peak torques of the knee extensors at the speed of 30°/sec, 60°/sec, 90°/sec, 120°/sec, and 150°/sec of isokinetic exercise. The changes of thigh circumferences and the changes of spasticity after a 6-week FES treatment period were recorded.

The results are as follows;

1) The peak torques of knee extensors at 30°/sec, 60°/sec, 90°/sec, 120°/sec, and 150°/sec of angular velocities were significantly increased in FES treatment group after 6 weeks of treatment compared to control group( $p < 0.05$ ).

2) There was no statistical difference between two groups in the changes of thigh circumferences( $p > 0.05$ ).

3) In the FES treatment group, 5 patients showed no change in spasticity, one showed decreased spasticity and 4 patients showed increased spasticity. 5 patients of control group showed no change in spasticity.

The above results may lead to the conclusion that functional electrical stimulation was helpful in increasing muscle strength in complete thoracic spinal cord injured patients. Additionally, there was a tendency of increasing spasticity with a long term functional electrical stimulation.

---

**Key Words:** Functional electrical stimulation, Muscle strength, Spasticity

## 서 론

1961년 Liberson등<sup>19)</sup> 이 편마비 환자에서 총비골 신경의 전기적 자극으로 수족(footdrop)을 예방할 수 있었다고 처음 보고한 이후 기능적 전기 자극(functional electrical stimulation), 또는 기능적 신경 근육 자극(functional neuromuscular stimulation)에 대한 연구가 진행되어 요즘은 척수 손상으로 인한 하지 마비 환자에게 사용되고 있다<sup>3, 9, 23, 25, 27, 29, 40)</sup>.

척수 손상 환자에서의 기능적 전기 자극은 신경에 전기적 자극을 줌으로써 마비된 근육을 수축시켜 완전 하지 마비 환자가 보조기를 착용하지 않고도 기립 및 보행을 가능하게 하는 이점이 있다. 이 외에도 관절 구축 및 골다공증을 예방하고 욕창 방지, 경직 감소, 심부 정맥 혈전증의 예방 등의 2차적인 효과들이 있는 것으로 알려져 있다<sup>12, 14, 18, 21, 24, 26, 38, 39, 44)</sup>.

기능적 전기 자극이 근력에 미치는 영향에 관한 연구 보고들에 의하면, 1989년 Kralj과 Bajd<sup>16)</sup>는 완전 하지 마비 환자에서 기능적 전기 자극후, 슬관절 신근의 등척성 근력이 증가하였다고 하였으며 1990년 Yarkony등<sup>43)</sup>은 25명의 환자에서 기능적 전기 자극으로 21명에서 기립이 가능했다고 보고하였다. 1993년 Sipski등<sup>39)</sup>은 기능적 전기 자극을 시행하여 하지 마비 환자에서 62%, 사지 마비 환자에서는 65%의 근 지구력 증가를 보였다고 보고하였다.

또한 1993년 Granat등<sup>10)</sup>은 기능적 전기 자극후, 대퇴 사두근의 근력이 증가하였다고 보고하였다.

기능적 전기 자극이 경직에 미치는 영향을 보면 1993년 Granat등<sup>10)</sup>은 기능적 전기 자극 후 24시간 까지 경직의 감소가 지속된다고 보고하는 등 몇몇 연구자들은 기능적 전기 자극후 경직이 감소된다고 주장하였다<sup>2, 31, 35, 37)</sup>. 그러나 기능적 전기 자극에 의한 경직의 감소는 24시간을 지속하지 못하며 장기간 기능적 전기 자극을 시행했을 때는 오히려 경직이 증가한다는 보고들도 있다<sup>4, 7, 15, 33, 41, 42)</sup>. 이상과 같이 기능적 전기 자극이 경직에 미치는 효과에 대해서는 아직 많은 논란이 있는 상태이다.

따라서 본 연구에서는 완전 흉수 손상 환자를 대상으로 기능적 전기 자극에 의한 근력 증가 양상을 알아 보고 이를 근력의 증가와 근위축을 방지하는 데 이용

할 수 있는 지 규명하고자 하였다. 그리고 기능적 전기 자극을 장기간 시행하였을 때 경직에 어떤 변화를 주는지도 확인하고자 하였다.

## 대상 및 방법

### 1) 대 상

완전 흉수 손상 환자로서 하운동 신경원 손상이 없고 기능적 전기 자극을 시행했을 때 근육 수축의 반응이 있는 환자 15명을 대상으로 10명은 기능적 전기 자극 치료군으로 하고 5명은 대조군으로 하였다.

### 2) 방 법

(1) 기능적 전기 자극은 festim을 사용하였으며, 자극 전류의 특성은 자극 빈도는 24 Hz, 자극 지속 시간은 0.25 msec, 자극 강도는 70~149 mA의 asymmetric rectangular biphasic pulse이었다.

(2) 기능적 전기 자극 치료군 환자는 앉은 자세에서 고관절과 슬관절을 90°로 굴곡시키고 자극기(festim)를 이용하여 양측 대퇴 사두근의 motor point에 표면 전극을 부착하여 양측 대퇴 사두근에 4초씩 번갈아가면서 자극이 되도록 하여 1회 30분간, 1주에 5회 이상, 6주간 기능적 전기 자극을 시행하였다.

(3) Isokinetic Rehabilitation & Testing System(Model No. Cybex 340)을 이용하여 기능적 전기 자극 치료전과 6주간 치료후 각속도 30°/sec, 60°/sec, 90°/sec, 120°/sec, 150°/sec에서 각각 등속성 운동시의 슬관절 신근의 최대 우력치를 구하여 비교 분석하였다. 또한 치료군의 경우는 매 2주마다 검사하여 시간 경과에 따른 근력 변화의 양상을 관찰하였다.

(4) 기능적 전기 자극 치료전과 치료후 슬개골 상부 20 cm 부위의 대퇴 돌레를 측정하였고 modified Aschworth scale을 이용하여 경직의 정도를 조사하였다.

### 3) 분석방법

본 연구에서 얻은 결과들은 SPSS(Statistical Program for Social Science)를 이용하여 평균 및 표준 편차를 구하였다. 그리고 처음 평가시와 6주후 평가시의 슬관절 신근의 최대 우력치의 비교는 Wil-

**Table 1. Age and Sex Distribution**

Age(years)	Control			FES*		
	Male	Female	Total	Male	Femal	Total
20~29	1	1	2	5	1	6
30~39	2	0	2	1	2	3
40~49	0	0	0	0	1	1
50~59	0	1	1	0	0	0
Total	3	2	5	6	4	10

Values are number of cases.

FES\*: Functional Electrical Stimulation

**Table 2. Causes of Spinal Cord Injury**

Causes	No. of cases	
	Control	FES*
Traffic accident	3	5
Falls	1	4
Direct blow	1	0
Airplane accident	0	1
Total	5	10

FES\*: Functional Electrical Stimulation

**Table 3. Spinal Cord Injury Levels**

Levels	No. of cases	
	Control	FES*
T3	0	1
T4	0	2
T5	1	1
T6	2	1
T7	0	1
T8	1	3
T9	0	0
T10	1	0
T11	0	1
Total	5	10

FES\*: Functional Electrical Stimulation

coxon signed rank test를 이용하여 검사결과와 통계적 유의성을 검토하였다.

## 결 과

### 1) 연령 및 성별 분포

총 15명 대상 환자의 연령 분포는 20세부터 52세까지로서 대조군은 평균  $31.0 \pm 13.1$ 세, 기능적 전기 자극 치료군은 평균  $28.1 \pm 7.1$ 세였다. 성별 분포는 대조군이 남자 3명, 여자 2명이었으며, 치료군은 남자 6명, 여자 4명이었다(Table 1).

### 2) 손상원인

대상 환자의 손상 원인은 대조군은 교통 사고가 3명, 기능적 전기 자극 치료군은 5명으로 두 군 모두 교통 사고가 가장 많았다(Table 2).

### 3) 손상 부위 및 기간의 분포

대상 환자의 손상 부위는 제 3 흉수에서부터 제 11

흉수까지였으며(Table 3) 대상 환자의 척수 손상 시기는 3개월에서 71개월전으로써 대조군은 평균  $26.4 \pm 23.2$  개월이었고, 기능적 전기 자극 치료군은 평균  $17.5 \pm 23.6$  개월이었다(Table 4).

### 4) 각속도에 따른 슬관절 신근의 최대 우력치

(1) 치료전 슬관절 신근의 최대 우력치는 평가한 모든 각속도에서 대조군과 기능적 전기 자극 치료군 간에 통계적으로 유의한 차이가 없었다( $p > 0.05$ , Table 5).

(2) 대조군에서 슬관절 신근의 최대 우력치를 처음과 6주후 비교하여 본 결과 유의한 차이를 보이지 않았으나( $P > 0.05$  by Wilcoxon signed rank test) 기능적 전기 자극 치료군의 경우는 6주간 치료후 슬관

질 신근의 최대 우력치는 치료전에 비하여 유의하게 증가되었다( $p < 0.05$  by Wilcoxon signed rank

test, Table 6).

(3) 기능적 전기 자극 치료군에서 매 2주마다 측정

**Table 4. Spinal Cord Injury Duration**

Months	No. of cases	
	Control	FES*
0~12	2	7
13~24	0	1
25~48	2	1
49~60	1	0
61~72	0	1
Total	5	10

FES\*: Functional Electrical Stimulation

**Table 5. Peak Torques According to the Angular Velocities before FES\***

	Control	FES*
30°/sec	13.3±7.2	11.7±4.6
60°/sec	12.2±7.0	11.5±4.4
90°/sec	10.0±8.9	10.2±5.5
120°/sec	7.2±9.5	8.3±5.6
150°/sec	6.4±9.2	6.1±6.0

Values are given mean and standard deviation(ft-lbs)

FES\*: Functional Electrical Stimulation

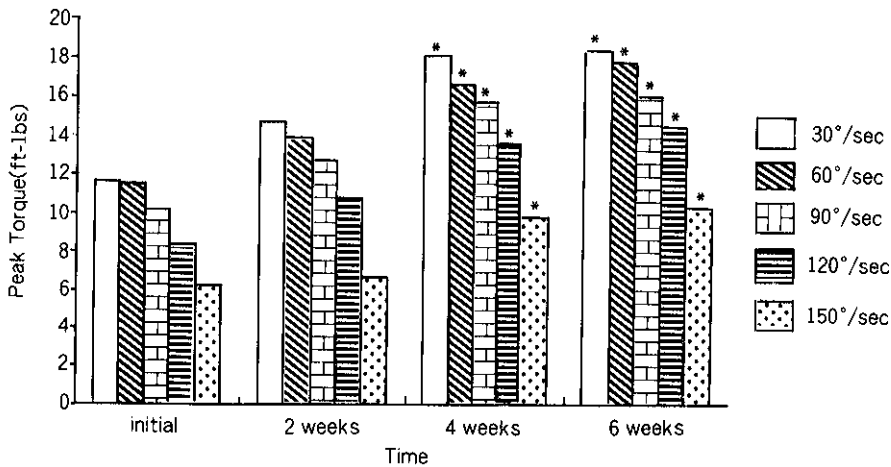
**Table 6. Changes of Peak Torques According to the Angular Velocities before and after FES\***

	Control		FES*	
	Before	After	Before	After
30°/sec	13.2±7.2	13.0±7.7	11.7±4.6	18.4±5.8*
60°/sec	12.2±7.0	11.6±7.2	11.5±4.4	17.8±6.2*
90°/sec	10.0±8.9	10.6±8.6	10.2±5.5	16.1±6.0*
120°/sec	7.2±9.5	6.0±8.9	8.3±5.6	14.4±5.7*
150°/sec	6.4±9.2	5.2±7.7	6.1±6.0	10.3±7.9*

Values are given mean and standard deviation(ft-lbs)

\*  $p < 0.05$  by Wilcoxon signed rank test

FES\*: Functional Electrical Stimulation



**Fig. 1. Changes of peak torque(\* $p < 0.05$ ).**

Table 7. Comparison of Thigh Circumferences before and after FES\*

	Control		FES*	
	Before	After	Before	After
Right	38.1±1.4	38.1±1.5	41.9±5.5	42.2±5.1
Left	36.9±4.8	37.0±4.9	41.5±5.9	42.0±5.7

Values are given mean and standard deviation(cm)  
FES\*: Functional Electrical Stimulation

Table 8. Changes of Spasticity after FES\*

	Control	FES*
No change	5	5
Increase	0	4
Decrease	0	1
Total	5	10

FES\*: Functional Electrical Stimulation

한 슬관절 신근의 최대 우력치는 모든 각속도에서 점차 증가하는 경향을 보였으며, 특히 치료 4주와 6주후에는 평가한 모든 각속도에서 처음 평가에 비해 통계적으로 유의한 증가를 보였다(Fig. 1).

### 5) 대퇴부 둘레의 변화

대퇴부 둘레는 대조군과 기능적 전기 자극 치료군 간에 유의한 차이가 없었다( $p > 0.05$ , Table 7).

### 6) 경직의 변화

10명의 기능적 전기 자극 치료군중 5명에서는 경직의 변화가 없었고 1명은 경직이 감소, 4명은 경직이 증가하였다. 5명의 대조군에서는 경직에 변화가 없었다(Table 8).

## 고 찰

기능적 전기 자극(functional electrical stimulation)은 신경에 전기 자극을 가하여 마비된 근육에 수축을 일으켜서 척수 손상으로 인한 하지 마비 환자에서 근력의 강화는 물론 기립, 더 나아가서는 보행까지도 가능하게 하는 기능적 능동적 보조기의 역할을 할 수 있다. 그 외에도 기능적 전기 자극은 하지의 관

절 구축을 예방하며 골다공증을 예방하고 경직을 감소하는 등 여러 가지 장점들이 알려져 왔으며 요즘 많은 연구가 진행중이다<sup>10, 16, 20, 22, 23, 35, 39</sup>.

그러나 기능적 전기 자극을 척수 손상 환자에게 적용하여 보행을 하게 하는 데에는 아직 많은 제한점이 있다. 1990년 Jaeger 등은 환자의 선택 기준은 흉수 4번에서 12번 사이의 손상으로서 양측 상지에 기능장애가 없으며 심 혈관계나 신장 질환등 다른 내과적 문제가 없어야 하고 18세에서 50세 사이인 경우라고 하였는데 이 선택 기준에 속하는 환자는 192명의 하지 마비 환자중 약 20명(10.4%)이라고 하였다<sup>13</sup>.

기능적 전기 자극은 정상인에서도 근력을 증가시킬 수 있다고 알려져 왔다. 1982년 Romeo 등은 정상인에서 하루 15분씩 5주간 전기 자극 후 등척성 근력이 통계적으로 의미있게 증가하였다고 보고하였으며 각속도 30°/sec와 60°/sec에서 등속성 근력을 평가했을 때는 30°/sec의 각속도에서만 통계적으로 의미있게 근력이 증가하였다고 보고하였다<sup>34</sup>. 또한 1985년 Selkowitz는 정상인을 대상으로 4주간의 전기 자극을 시행한 결과 대퇴 사두근의 등척성 근력이 증가했다고 보고하였다<sup>36</sup>.

1973년 Kralj과 Grobelnik는 척수 손상 환자에서 50 Hz의 자극 빈도로 1회 10분간 하루 3회, 6개월간 기능적 전기 자극 후 근력이 5배 증가하였다고 보고하였고<sup>17</sup> 1983년 Marsolais와 Kobetic은 1명의 횡단성 척수염 환자에서 8개월간의 기능적 전기 자극후에 슬관절 신근의 최대 우력치가 60°/sec의 각속도에서 기능적 전기 자극 치료전에 비해 약 10배가 증가했다고 보고하였다<sup>21</sup>. 1984년 Holle 등은 2명의 척수 손상 환자에서 30 Hz의 자극 빈도로 매일 30분씩 4주동안 기능적 전기 자극을 하여 근력이 2배 증가하였다고 보고하였으며<sup>11</sup>, 1986년 Robinson 등에 의하면 8명의

완전 하지 마비 환자에서 1회 20분간 하루 2회, 3~8 주간의 기능적 전기 자극을 준 결과, 통계적으로 의의 있는 근력의 증가를 관찰할 수 있다고 보고하였다<sup>32)</sup>.

1988년 Ragnarsson 등은 1주에 3회, 4주간의 전기 자극후에 19명중 13명의 환자에서 근력 및 근 지구력의 증가를 보고하였는데 이것은 근섬유의 비대와 mitochondria 농도의 증가, oxydative enzyme의 증가 및 모세혈관의 증대를 동반한 근 섬유내의 조직 화학적 변화로 설명할 수 있다고 하였다<sup>30)</sup>.

또한 1989년 Kralj과 Bajd는 기능적 전기 자극후, 기립 및 보행이 가능하기 위해서는 근력의 증가가 필요한데 슬관절 신근의 근력이 약 50 Nm 정도 되어야 기립이 가능하다고 하며 완전 하지 마비 환자에서 근력이 50 Nm 정도에 도달하기까지는 약 4개월 정도의 근력 강화 기간이 필요하다고 하였다<sup>16)</sup>. 1992년 Rabishong 및 Ohanna는 완전 하지 마비 환자에서 30분간 하루 2회씩, 2개월동안 기능적 전기 자극 치료 후, 등척성 근력을 측정된 결과 통계적으로 의의 있는 근력의 증가를 보였다고 하였다<sup>28)</sup>. 1993년 Granat 등은 불완전 척수 손상 환자에서 25 Hz의 자극 빈도로 3개월간 기능적 전기 자극 치료후 대퇴 사두근의 근력이 증가했다고 보고하였다<sup>10)</sup>. 본 연구에서는 측정된 모든 각속도에서 기능적 전기 자극 4주후부터 통계적으로 유의한 근력의 증가를 보였다. 그러나 근력의 증가 정도는, 30°/sec의 각속도에서 기능적 전기 자극 치료전 슬관절 신근의 최대 우력치 11.7 ft-lbs에서 6주간 치료후 18.4 ft-lbs로, 약 63.6%로서 다른 연구자들에 비해 증가가 적었는데, 이것은 다른 연구자들에 비해 기능적 전기 자극 치료 기간이 본 연구에서는 6주간으로 짧았기 때문으로 생각된다. 그리고 기능적 전기 자극의 자극 빈도 및 시행 방법도 연구자마다 차이가 있어서 어떤 방법이 가장 효과적으로 근력을 증가시킬 수 있는지는 아직 잘 알려져 있지 않다. 그러나 본 연구에서 6주간 치료후 보인 30°/sec의 각속도의 평균 18.4ft-lbs의 최대 우력치는 1989년 Kralj 및 Bajd등이 기립 및 보행에 필요한 최소의 우력치인 50 Nm(36.87 ft.lbs)에는 못 미치는 값으로서 6주간의 짧은 훈련 기간으로는 기립 및 보행에 필요한 최소의 근력까지 증가가 어려운 것으로 생각되며 이에 대해서는 더 연구가 필요한 것으로 생각된다.

기능적 전기 자극은 근섬유의 비대를 일으키고 근위

축을 방지하는 것으로 알려져 왔다. 1984년 Fournier 등은 5명의 하지 마비 환자에서 12주간 기능적 전기 자극후 대퇴부 둘레가 평균 2.5 인치 증가하였다고 보고하였으며<sup>9)</sup> 1988년 Ragnarsson등도 8명의 환자에서 4개월간의 기능적 전기 자극 에르고미터 훈련후에 대퇴부 둘레가 평균 2.1 인치의 증가를 보였다고 보고하였다<sup>30)</sup>. 1992년 Arnold 등은 12~14 개월간의 기능적 전기 자극후에 대퇴부 둘레가 통계적으로 의의있게 증가했으나 장딴지 둘레는 변화가 없었다고 하였다<sup>1)</sup>. 한편 1989년 Block 등은 3명의 하지 마비 환자에서 6주간의 기능적 전기 자극 에르고미터 훈련후에 대퇴부 둘레는 통계적으로 의의있는 변화는 없었으나, 전산화 단층 촬영으로 측정된 대퇴부의 평균 절대 근육 면적은 통계적으로 의의있는 변화를 보인다고 하였다<sup>5)</sup>.

1992년 Bremner 등<sup>6)</sup>은 12주간 기능적 전기 자극을 시행하여 5명중 2명에서만 대퇴부 둘레의 증가를 보였고 1명의 환자에서는 전산화 단층 촬영으로 측정된 전체 근육 면적은 증가하였으나 지방 조직의 감소로 인해 대퇴부 둘레가 변화하지 않았다고 하였다. 그리고 1988년 Ragnarsson 등도 전산화 단층 촬영상 근육 면적은 증가했고 근육내 지방 조직은 감소하였다고 하였다<sup>30)</sup>. 본 연구에서는 6주간의 기능적 전기 자극후에 대퇴부 둘레의 변화는 통계적 의미가 없는 것으로 나타났는데 이것은 다른 연구자들에 비해 기간이 짧았기 때문일 가능성과 실제 근육 면적은 증가하였더라도 지방 조직의 변화로 인해 대퇴부 둘레는 변화가 없는 것으로 나타났을 가능성을 생각할 수 있다.

기능적 전기 자극후 경직의 변화에 대해서는 많은 논란이 있다. 1981년 Siegfried 등<sup>37)</sup>은 500례를 분석하여 1/3에서 기능적 전기 자극후 경직의 완화를 보고했으며 1985년 Bajd 등<sup>2)</sup>은 경피적 전기 자극(transcutaneous electrical stimulation)으로 척수 손상 환자에서 경직의 감소가 2시간까지 지속되었다고 보고하였으며 1988년 Robinson 등<sup>39)</sup>은 기능적 전기 자극 직후에는 경직의 감소를 보고하였다. 1993년 Granat 등도 기능적 전기 자극후 Aschworth scale 및 pendulum drop test를 이용하여 경직을 평가하였는데 6명의 불완전 척수 손상 환자에서 경직의 감소가 24시간까지 지속된다고 보고하였다<sup>10)</sup>. 1994년 Sieb 등은 5명의 척수 손상 환자와 5명의 의

상성 뇌손상 환자를 대상으로 전기 자극 직후와 24시간후의 경직을 평가하였는데 척수 손상 환자에서는 통계적으로 유의있게 경직이 감소했다고 보고하였다<sup>35)</sup>.

한편 전기 자극후 경직의 감소는 24시간 지속되지 못한다는 보고들도 많이 있다<sup>7,15,41,42)</sup>. 1989년 Barr등은 12주간 기능적 전기 자극후 오히려 경직이 증가했다고 보고하였다<sup>4)</sup>. 그리고 1988년 Robinson등은 31명의 척수 손상 환자를 대상으로 전기적 자극 치료 4주후에 통계적으로 유의있게 경직이 증가했다고 보고하였으며 하지 마비 환자보다 사지 마비 환자에서, 완전 마비보다 불완전 마비인 경우가 더 경직이 심하다고 하였다<sup>33)</sup>.

본 연구에서는 6주간 기능적 전기 자극을 시행한 10명의 환자중 1명은 경직이 감소했고 4명은 경직이 증가하였으며 나머지 5명은 경직에 변화가 없었다. 이상의 결과만으로는 환자의 수가 적고 경직 평가 방법도 modified Aschworth scale을 이용한 것으로 객관적이라고 볼 수 없으므로 기능적 전기 자극을 장기간 시행시에 경직에 대해 어떤 영향을 가져 온다고 말하기 어렵다. 따라서 좀 더 많은 환자를 대상으로, 그리고 좀 더 객관적인 평가 방법을 이용한 연구가 필요하리라 생각된다.

## 결 론

완전 흉수 손상 환자 15명을 대상으로 6주간의 기능적 전기 자극 치료전 후에 30°/sec, 60°/sec, 90°/sec, 120°/sec, 150°/sec에서 각각 등속성 운동시 슬관절 신근의 최대 우력치의 변화와 대퇴부 둘레의 변화, 경직의 변화를 평가하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 6주간의 기능적 전기 자극 치료후 슬관절 신근의 최대 우력치는 평가한 모든 각속도에서 대조군에 비해 통계적으로 유의있는 증가를 보였다.

2) 대퇴부 둘레는 대조군과 치료군 간에 유의한 차이가 없었다.

3) 10명의 치료군중 5명은 경직의 변화가 없었으며 1명은 경직이 감소하였고, 4명은 경직이 증가하였으며 5명의 대조군은 경직의 변화가 없었다.

이상의 결과로 보아 기능적 전기 자극이 완전 흉수 손상 환자의 근력을 증가시킬 수 있었고 6주간의 기능

적 전기 자극 후 경직은 증가하는 경향을 보였으나 이에 대해서는 보다 객관적인 평가 방법을 이용한 연구가 필요하리라 생각된다.

## 참 고 문 헌

- 1) Arnold PB, Mcvey PP, Farelll WJ, Deurloo TM, Grasso AR: *Functional electrical stimulation: It's efficacy and safety in improving pulmonary function and musculoskeletal fitness. Arch Phys Med Rehabil* 1992; 73: 665-668
- 2) Bajd T, Gregoric M, Vodovnik L, Benko H: *Electrical stimulation in treating spasticity resulting from spinal cord injury. Arch Phys Med Rehabil* 1985; 66: 515-517
- 3) Bajd T, Kralj A, Turk R: *Standing-up of a healthy subject and a paraplegic patient. J Biomechanics* 1982; 15: 1-10
- 4) Barr FMD, Moffat B, Bayley JIL, Middleton FRI: *Evaluation of the effects of functional electrical stimulation on muscle power and spasticity in spinal cord injury patients. Clin Rehabil* 1989; 3: 17-22
- 5) Block JE, Steinbach LS, Friedlander AL, Steiger P, Ellis W, Morris JM, Genant HK: *Electrically stimulated muscle hypertrophy in paraplegia: Assessment by quantitative CT. J Comput Assisted Tomo* 1989; 13: 852-854
- 6) Bremner LA, Sloan KE, Day RE, Sculll ER, Ackland T: *A clinical exercise system for paraplegics using functional electrical stimulation. Paraplegia* 1992; 30: 647-655
- 7) Dimitrijevic M, Illis L, Nakajima K, Sharkey P, Sherwood A: *Spinal cord stimulation for the control of spasticity in patients with chronic spinal cord injury: II. neurophysiological observations. CNS Trauma* 1986; 3: 145-152
- 8) Fournier A, Goldberg M, Green B, Brucker B, Petrofsky J, Eismont F, Quencer R, Sosenko J, Pina I, Shebert R, Kessler K, MacDonald A, Fiore P, Burnett B: *A medical evaluation of the effects of computer assisted muscle stimulation in paraplegic patients. Orthopaedics* 1984; 7: 1129-1133
- 9) Gordon T, Mao J: *Muscle atrophy and procedures for training after spinal cord injury. Physical*

- Therapy* 1994; 74: 50-60
- 10) Granat MH, Ferguson ACB, Andrews BJ, Delargy M: *The role of functional electrical stimulation in the rehabilitation of patients with incomplete spinal cord injury - observed benefits during gait studies.* *Paraplegia* 1993; 31: 207-215
  - 11) Holle J, Frey M, Gruber H, Kern H, Stohr H, Thoma H: *Functional electrostimulation of paraplegics: Experimental investigations and clinical experience with an implantable stimulation device.* *Orthopaedics* 1984; 7: 1145-1160
  - 12) Jaeger RJ, Yarkony GM, Roth EJ: *Rehabilitation technology for standing and walking after spinal cord injury.* *Am J Phys Med Rehab* 1989; 68: 128-133
  - 13) Jaeger RJ, Yarkony GM, Roth EJ, Lovell L: *Estimating the user population of a simple electrical stimulation system for standing.* *Paraplegia* 1990; 28: 505-511
  - 14) Katz RT, Green D, Sullivan T, Yarkony G: *Functional electrical stimulation to enhance systemic fibrinolytic activity in spinal cord injury patients.* *Arch Phys Med Rehabil* 1987; 68: 423-426
  - 15) Kawamura J, Ise M, Matsuya M, Tagami M, Ezaki S, Nishihara K: *Clinical use of electrical stimulation for reducing spinal spasticity.* In Popovic D(ed): *Advances in external control of human extremities IX.* Belgrade, Yugoslav Committee for Electronics and Automation, 1987, pp353-362
  - 16) Kralj A, Bajd T: *Functional electrical stimulation - standing and walking after spinal cord injury.* Boca Raton FL: CRC, 1989, pp17-35
  - 17) Kralj A, Grobelnik S: *Functional electrical stimulation - a new hope for paraplegic patients.* *Bull Prosthet Res* 1973; 75: 10-20
  - 18) Levine SP, Kett RL, Gross MD, Wilson BA, Cederna PS, Juni JE: *Blood flow in the gluteus maximus of seated individuals during electrical muscle stimulation.* *Arch Phys Med Rehabil* 1990; 71: 682-685
  - 19) Liberson WT, Holmquest HJ, Scott D, Dow M: *Functional electrotherapy - stimulation of the peroneal nerve synchronized with the swing phase of the gait of hemiplegic patients.* *Arch Phys Med Rehabil* 1961; 42: 101-105
  - 20) Marsolais EB, Edwards BG: *Energy costs of walking and standing with functional neuromuscular stimulation and long leg braces.* *Arch Phys Med Rehabil* 1988; 69: 243-249
  - 21) Marsolais EB, Kobetic R: *Functional walking in paralyzed patients by means of electrical stimulation.* *Clinical Orthopaedics and Related Research* 1983; 175: 30-36
  - 22) Marsolais EB, Kobetic R, Chizeck HJ, Jacobs JL: *Orthoses and electrical stimulation for walking in complete paraplegia.* *J Neuro Rehab* 1991; 5: 13-22
  - 23) McClelland M, Andrews BJ, Patrick JH, Freedman PA, El Masri WS: *Augmentation of the oswestry parawalker orthoses by means of surface electrical stimulation - gait analysis of three patients.* *Paraplegia* 1987; 25: 32-38
  - 24) Pacy PJ, Hesp R, Halliday DA, Katz D, Cameron G, Reeve J: *Muscle and bone in paraplegic patients, and the effect of functional electrical stimulation.* *Clinical Science* 1988; 75: 481-487
  - 25) Peckham PH: *Functional electrical stimulation: Current status and future prospects of applications to the neuromuscular system in spinal cord injury.* *Paraplegia* 1987; 25: 279-288
  - 26) Petrofsky JS: *Functional electrical stimulation, a two year study.* *J Rehabil* 1992; 58: 29-34
  - 27) Phillips CA, Petrofsky JS, Hendershot DM, Stafford D: *Functional electrical exercise: A comprehensive approach for physical conditioning of the spinal cord injured patient.* *Orthopaedics* 1984; 7: 1112-1123
  - 28) Rabischong E, Ohanna F: *Effects of functional electrical stimulation(FES) on evoked muscular output in paraplegic quadriceps muscle.* *Paraplegia* 1992; 30: 467-473
  - 29) Ragnarsson KT: *Physiologic effects of functional electrical stimulation-induced exercises in spinal cord injured individuals.* *Clinical Orthopaedics and Related Research* 1988; 233: 53-63
  - 30) Ragnarsson KT, Pollack S, O'Daniel W, Edgar R, Petrofsky J, Nash MS: *Clinical evaluation of computerized functional electrical stimulation after spinal cord injury: A multicenter pilot study.* *Arch Phys Med Rehabil* 1988; 69: 672-677
  - 31) Richardson RR, McLone DG: *Percutaneous epidural neurostimulation for paraplegic spasticity.*



- Surg Neurol* 1978; 9: 153-155
- 32) Robinson CJ, Bolam J, Chinoy M, Engelmeier P, Fruin R, Johnson N, Kett N, Nemachusky B, Wurster R: *Response to surface electrical stimulation of the quadriceps in individuals with spinal cord injury. Proceedings of the 9th annual RESNA Conference. RESNA association for the advancement of the rehabilitation technology, Washington DC, 1986, p282*
- 33) Robinson CJ, Kett N, Bolam J: *Spasticity in spinal cord injured patients: 2. initial measures and long term effects of surface electrical stimulation. Arch Phys Med Rehabil* 1988; 69: 862-868
- 34) Romeo JA, Sanford TL, Schroeder RV, Fahey TD: *The effects of electrical stimulation of normal quadriceps on strength and girth. Medicine and Science in Sports and Exercise* 1982; 14: 194-197
- 35) Seib TP, Price R, Reyes MR, Lehmann JF: *The quantitative measurement of spasticity: Effect of cutaneous electrical stimulation. Arch Phys Med Rehabil* 1994; 75: 746-750
- 36) Selkowitz DM: *Improvement in isometric strength of the quadriceps femoris muscle after training with electrical stimulation. Physical Therapy* 1985; 65: 186-196
- 37) Siegfried J, Lazorthes Y, Broggi G: *Electrical spinal cord stimulation for spastic movement disorders. Appl Neurophysiol* 1981; 44: 77-92
- 38) Sipski ML, Alexander CJ, Harris M: *Long-term use of computerized bicycle ergometry for spinal cord injured subjects. Arch Phys Med Rehabil* 1993; 74: 238-241
- 39) Stein RB, Belanger M, Wheeler G, Wieler M, Popovic DB, Prochazka A, Davis LA: *Electrical systems for improving locomotion after incomplete spinal cord injury: An assessment. Arch Phys Med Rehabil* 1993; 74: 954-959
- 40) Turk R, Obreza P: *Functional electrical stimulation as an orthotic means for the rehabilitation of paraplegic patients. Paraplegia* 1985; 23: 344-348
- 41) Vodovnik L: *Therapeutic effects of functional electrical stimulation. Med Biol Eng Comput* 1981; 19: 470-478
- 42) Vodovnik L, Bowman BR, Hufford P: *Effects of electrical stimulation on spinal spasticity. Scand J Rehabil Med* 1984; 16: 29-34
- 43) Yarcony GM, Jaeger RJ, Roth E, Kralj AR, Quintern J: *Functional neuromuscular stimulation for standing after spinal cord injury. Arch Phys Med Rehabil* 1990; 71: 201-206
- 44) Yarcony GM, Roth EJ, Cybulski G, Jaeger RJ: *Neuromuscular stimulation in spinal cord injury: I. restoration of functional movement of the extremities. Arch Phys Med Rehabil* 1992; 73: 78-86
-