

## 척수손상 고양이에서 척수자극이 경직성에 미치는 영향

연세대학교 의과대학 재활의학교실

박창일 · 전세일 · 신정순 · 신지철

=Abstract=

### The Effect of Spinal Cord Stimulation for Release of Spasticity in Spinal Cord Injured Cats

Chang Il Park, M.D., Sae-il Chun, M.D., Jung Soon Shin, M.D. and Ji Cheol Shin, M.D.

Department of Rehabilitation Medicine, Yonsei University College of Medicine

Spinal cord electrical stimulation has been used to decrease spasticity in spinal cord injured patients. With this therapeutic method, the polarity of the applied electrical field and the frequency of the stimulation is critical for a satisfactory therapeutic result. However, frequencies widely ranging from 20Hz to 1,500Hz have been used in clinical trials, and results were variably reported. So, this study was designed to determine the optimal frequencies for spinal cord stimulation.

In eight cats which were hemisected at the T11 level, spasticity was markedly present in six cats. Immediately after surgery, all reflex and locomotor hindlimb activity was depressed ipsilaterally in the six cats. At the end of the first week postoperatively, muscle tone and deep tendon reflexes began to increase and the hindlimb partially regained walking capability and a marked degree of spasticity appeared by the fourth week postoperatively.

Cathodal stimulation was applied at the L2 level using currents of less than 1mA at 50, 100, 250, and 500Hz with a duration of 0.25msec in these six cats. Electromyographic changes in hamstring and quadriceps muscles (during spasticity induced by dorsiflexion of the paw or by painful stimuli) were monitored. Spasticity was markedly suppressed at 100Hz in four cats, and moderately in the other two cats. But it was variable, usually increasing at 250Hz and 500Hz.

According to the above results, 100Hz is the most effective frequency for spinal cord stimulation to release spasticity in spinal cord injured cats.

**Key Words:** Spasticity, Spinal cord injury, Spinal cord stimulation

### 서 론

경직은 중추신경계의 병변으로 인하여 발생하는 근

긴장도의 증가와 과반사 현상을 말하며, 발생기전이 복잡하여 여러가지 학설으로 설명되고 있다<sup>4,6,35</sup>. 환자의 치료와 일상생활 동작에 다양한 영향을 미치는 경직에 대한 치료는 물리치료, 약물치료, 수술적 요법과 전기자극 등의 방법이 있으며, 환자에 따라 여러가지 치료법이 시도되고 있는 실정이다<sup>11,12,21,26,27,33</sup>.

전기자극법은 1967년에 Shealey등<sup>42</sup>이 처음으로

\*본 논문은 1989년도 연세대학교 의과대학 교수연구비에 의하여 이루어진 것임.

통증치료를 위하여 척수에 시행하였으며, 1973년 Cook과 Weinstein<sup>10)</sup>은 다발성 경화증 환자를 대상으로 척수자극(spinal cord stimulation)시에 경직이 감소하는 사실을 보고하였다. 그 이후 척수자극은 경직에 대한 치료방법으로 척수손상환자<sup>2,7,13)</sup>, 뇌졸중환자<sup>9,32)</sup>, 다발성 경화증 환자<sup>17,24,36)</sup>, 뇌성마비 환자<sup>18,22)</sup>들을 대상으로 시행하여 다양한 결과를 보고하고 있으며, 특히 Gybels와 van Roost<sup>20)</sup>는 경직에 대한 척수자극 치료법에 대한 연구결과들을 분석하여 척수손상 환자에서 가장 효과가 있으나, 경직에 대한 객관적인 평가의 부족과 자극변수들과 방법의 다양함 때문에 전반적으로 대상환자의 20~40%에서 경직의 완화를 기대할 수는 있지만, 많은 연구가 더 필요하다고 결론지었다.

한편, Waltz<sup>47)</sup>은 만족스러운 치료효과를 위하여서는 자극부위와 자극빈도가 가장 중요한 요소라고 하였으며, Maiman<sup>30)</sup>은 고양이로 대상으로 한 실험에서 자극빈도를 100Hz, 자극기간을 0.25 msec로 하여 단극자극을 하였을 때에 가장 효과적이라고 보고하였고, Barolat-Romana<sup>33)</sup>도 35~100 Hz의 자극빈도가 효과적이라고 하였으나, 많은 연구들에서는 20 Hz에서 1,500 Hz사이의 다양한 자극빈도에서 효과가 있었다고 보고하고 있으며<sup>5,22,37)</sup>, 자극빈도만의 변화시 나타나는 척수자극의 경직에 대한 효과에 관한 연구는 드문 실정이다.

이에 본 실험에서는 자극빈도의 변화가 경직에 어떤 영향을 미치는지를 알아 보기 위하여 척수손상 고양이로 대상으로 경직에 대한 척수자극을 시행하였다.

### 실험대상 및 방법

체중이 2.5 내지 3.2 Kg 되는 성숙한 고양이 12마리를 암수 구별없이 사용하였다. 먼저 척수손상을 위하여, 실험 고양이에 ketamine(1 mg/kg)을 근육주사하여 마취를 유도하였다. 마취된 고양이는 고정대에 복와위자세로 사지를 고정시켰으며, 수술현미경하에서 제11번 흉추를 중심으로 정중절개후에 후궁절제술을 시행하고 경막을 절개하여 척수를 노출시킨 후에, 11번 blade를 이용하여 외측 편측절단(lateral hemisection)을 시행하였다. 절단시는 외측에서 적

어도 척수의 2/3 이상을 절단하였으며, 다시 근육과 피부를 봉합하였고, 고양이가 마취에서 깨어나는 것을 확인한 후에 개별 우리로 옮겼다. 수술후 처치는 3일 동안 항생제(claforan)와 진통제를 투여하였고, 매일 봉합부위의 상처를 치료하였으며 1주일 후에 봉합사를 제거하였다.

척수손상받은 고양이의 관리는 Eldridge<sup>15)</sup>의 지침에 근거하여, 매일 마비된 하지의 수동적 관절운동을 시행하였으며, 요실금이 생기기 전까지는 매일 방광천자를 통하여 배뇨시켰고, 요실금이 생긴 후에는 매일 Crede 방법으로 완전히 방광이 비어지게 하였다. 척수손상으로 인한 신경인성 장의 관리를 위하여서는 복부마사지나 이완제를 이용하여 적어도 이틀에 한번은 대변을 보게하였으며, 마비된 하지에 욕창이나 골절 등의 다른 합병증이 발생하였는지를 관찰하였다.

경직이 나타나는지를 관찰하기 위하여 Carter<sup>8)</sup>이 제시한 평가(표 1)를 이용하여, 매일 고양이를 우리밖으로 꺼내어 30분에서 1시간동안 운동을 시키면서, 심부전반사, 근긴장도, 족지 과반사, 족관절 간대, 보행시 마비된 하지에 체중부하 여부를 관찰하였으며, 3점 이상의 경직이 나타나면 척수자극실험을 시행하였다.

척수자극실험은 먼저 대상고양이에게 ketamine만을 이용하여 마취를 시켰으며, stereotaxic instrument with spinal cord fixator에 복와위자세로 위치시킨 후에 경직이 나타난 하지도 고정하였다. 수술현미경하에서 제 2번 요추에 후궁절제술을 시행하였고, 50 mm 단극 침전극(TECA Corp.)을 electrode holder을 이용하여 경막 정중앙에 위치하도록 하였다. 전기자극은 Dig Pulser Series 1830(World Precision Instruments, Inc.)을 이용하여 50 Hz, 100 Hz, 250 Hz와 500 Hz의 자극빈도에서 각각 0.

표 1. 경직의 임상적 평가

점수	심부전반사	근긴장도	족지 과반사	족관절 간대
0	-	-	-	-
1	감소	감소	-	-
2	정상	정상	-	-
3	↑	↑	-	-/+
4	↑	↑	+	+

25, 0.5, 0.75, 1.0mA의 세기로 음극(cathodal) 자극을 주었으며, 자극기간(pulse width)은 0.25 msec이었다.

그리고 전기자극의 경직에 대한 효과를 보기 위하여 12 mm 단극 침전극을 각각 대퇴사두근과 슬관절굴근에 고정하였으며, 기록은 MS60 근전도기록기를 이용하여 여과주파수는 20 Hz에서 1,000 Hz, 민감도는 100 ~ 200  $\mu$ V/division, 소인(sweep)속도는 3 sec/division으로 하였다. 기록방법은 Maiman 등<sup>30)</sup>의 방법을 이용하여 먼저 족관절을 배측굴곡시키거나 아픈 자극을 주어 경직을 유발한 후에 나타나는 반응을 30초간 기록하면서, 그 중간에 10초의 척수자극을 주어 그 변화양상을 관찰하였다.

## 결 과

모두 12마리의 고양이에게 척수손상을 주었으며, 그 중 2마리는 수술후 2일째와 3일째에 호흡기감염으로, 다른 2마리는 수술후 7일째와 9일째에 혈뇨를 동반한 비뇨기 감염으로 사망하였다. 나머지 8마리중에 2마리는 수술후 8주가 지나가도록 심부건반사나 근긴장도의 증가를 보이지 않아서 실험에서 제외시켰다.

합병증으로는 나머지 6마리중 한마리에서 혈뇨가 있었으나 항생제치료와 수액공급으로 정상화 되었으며, 수술부위의 감염이 있었던 다른 한마리는 국소항생제로 치료하였다.

### 1) 경직의 발현

경직의 발현에 대한 행동양상의 관찰은 6마리를 대

상으로 하였는데, 배뇨기능은 수술후 2일에서 6일 사이에 점차적으로 회복되어 요실금현상이 나타나기 시작하였으며, 수술후 1주일부터는 6마리 모두에서 반사배뇨가 가능하였다.

수술지후부터 손상측의 하지는 이완된 상태에서 수의동작이 관찰되지 않았으며, 수술후 1주가 지나면서 약간의 수의동작이 관찰되었고, 근긴장도는 이때부터 점차 증가하기 시작하여 관절운동시 약간의 저항이 발생하였으며, 3주말부터는 긴장도의 증가로 인하여 관절운동시 많은 저항이 있었다. 그리고 보행시 마비된 하지의 체중부하는 4주가 지나면서 부분적으로 가능하였으나 자주 마비측으로 넘어졌으며 꼬리도 마비측으로 편향되는 양상을 관찰할 수 있었다.

심부건반사는 수술후 1주가 지나면서 나타나기 시작하여 2주후부터는 증가된 양상을 나타내어 지속되었으며, 족관절 간대는 수술후 2주말부터 3주사이에 관찰되기 시작하였고, 족지 과반사는 3마리에서만 관찰되었는데 수술후 3주가 되면서 나타나기 시작하였다.

Carter 등<sup>8)</sup>이 제시한 점수에 의하면, 대상고양이 6마리중 2마리는 3점이었고 나머지 4마리는 4점으로 충분한 경직을 마비된 하지에서 관찰할 수 있었으며, 이들의 척수손상후 척수자극 실험까지의 생존기간은 평균 34일이었다(표 2).

### 2) 척수자극결과

경직에 대한 척수자극의 효과를 판정하기 위하여, 경직시 측정된 대퇴사두근과 슬관절 굴근의 진폭을 각각 기준으로 하여 척수자극시에 진폭의 변화를 관찰하였다(그림 1).

표 2. 척수손상후 임상양상의 변화

	증례 1	증례 2	증례 3	증례 4	증례 5	증례 6
척수손상후 척수자극까지 기간(일)	32	37	25	30	43	46
요실금이 나타난 시기(일)	6	2	5	3	5	5
심부건반사가 나타난 시기(일)	9	9	8	7	8	10
근긴장도가 나타난 시기(일)	10	8	5	4	8	11
족지 과반사가 나타난 시기(일)		19		14	18	
보행시 체중부하가 가능한 시기(일)	24	26	23	11	27	26
족관절 간대가 나타난 시기(일)	17	14	19	12	15	16
최종 경직 점수	3	4	3	4	4	4

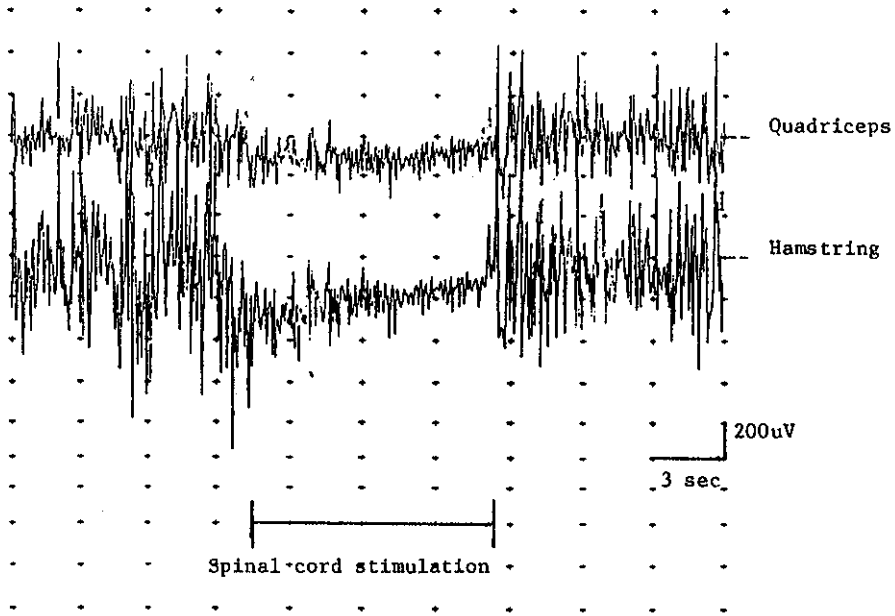


그림 1. 근전도로 측정된 전기자극시의 경직변화.

표 3. 척수자극시 경직의 변화양상

자극변수		경직의 변화 정도					
빈도	세기	중례 1	중례 2	중례 3	중례 4	중례 5	중례 6
50Hz	0.25mA	-	-	-	-	-	-
	0.50	+	↑	+	-	-	-
	0.75	+	↑	+	-	-	+
	1.00	+	↑	-	↑	-	++
100Hz	0.25mA	-	-	-	-	-	-
	0.50	++	++	++	++	+	-
	0.75	++	++	++	++	+	+
	1.00	++	+	+	++	+	+
250Hz	0.25mA	-	+	-	++	-	-
	0.50	-	-	↑	++	+	-
	0.75	↑	↑	↑	-	-	-
	1.00	↑	↑	↑	-	-	-
500Hz	0.25mA	-	-	-	↑	-	-
	0.50	↑	-	-	↑	-	-
	0.75	↑	↑	↑	↑	-	↑
	1.00	-	↑	↑	↑	↑	-

↑: 경직이 증가함

-: 변화가 없었음

+: 초기진폭의 50%미만 감소함

++: 초기진폭의 50%이상 감소함

자극빈도를 50 Hz로 주었을 때에 50% 이상의 진폭 감소를 관찰할 수 있었던 경우는 한마리이었으며, 50% 미만의 감소를 두마리에서 관찰할 수 있었고, 한마리에서는 오히려 진폭이 증가하였다.

100 Hz의 자극빈도에서 진폭의 감소가 가장 현저하였는데, 네마리에서 50% 이상의 감소를 관찰할 수 있었으며, 나머지 2마리에서도 50% 미만의 감소를 관찰할 수 있었다.

그러나 250 Hz의 자극빈도에서는 한마리에서만 50% 이상의 진폭감소를 관찰할 수 있었고, 250과 500 Hz의 자극빈도에서는 진폭의 변화가 없거나 진폭의 증가를 주로 관찰하였다(표 3).

## 고 찰

척수손상으로 인한 경직에 관한 동물실험은 척수손상시 동반되는 마비와 신경인성 방광 등의 합병증에 의한 사망율을 줄이고, 손상부위에 따라 다양하게 나타나는 경직의 발현을 최대화하는 척수손상법이 바람직한데<sup>15,31)</sup>, 이를 위하여 Ritz등<sup>39)</sup>은 천미부(sacrocaudal) 척수에 손상을 주어서 사지의 변화 없이 꼬리에서만 경직을 관찰하는 방법을 제시하였으며, Carter등<sup>8)</sup>은 제 5번 요수부에서의 외측 편측절단을 시행하여 모든 대상 고양이에서 경직을 관찰하였으며, 임상적 경직의 정도와 유발전위상의 경직의 정도와는 통계학적으로 유의한 상관관계가 있었다고 보고하였다. 본 실험에서는 손상부위 이하의 척수에 전기자극을 주어야 하며, 그 자극에 의한 경직의 변화정도를 대퇴부위에서 측정하고자 하였기 때문에 제 11번 흉수부위에 손상을 주었으며, 대상 고양이 8마리중 6마리에서 분명한 경직을 관찰할 수 있었다. 이러한 결과는 제 12번 흉수부위에 손상을 주어 일부에서 심부전 반사의 증가만 관찰하였다고 보고한 Hultborn과 Malmsten<sup>23)</sup>의 결과에 비하여 경직의 발현도가 높았으며, 아마 본 실험에서는 척수의 2/3이상을 손상하였고 손상시 복측(ventral) 척수동맥을 보존하였기 때문이라고 생각한다.

대상 고양이 6마리 모두에서 수술후 1주일이 지나면서 반사배뇨가 가능하였는데, 이러한 결과는 Stoddard등<sup>44)</sup>의 결과와 비슷하였지만, Maiman등<sup>30)</sup>의 결과보다는 비교적 빠른 시기이었다. 그리고 다른 연구

들의 결과와 비슷하게<sup>8,31)</sup>, 경직은 수술후 3주가 지나면서 마비된 하지에서 완전히 나타났으며, 마비된 하지에 체중부하는 Kato<sup>25)</sup>의 1주일보다는 늦었지만, Edgerton등<sup>14)</sup> 및 Hultborn과 Malmsten<sup>23)</sup>의 결과와 비슷하게 부분적으로 수술후 4주째부터 가능하였다.

전기를 인체의 신경-근육계에 적용하는 경우는 진단적, 치료적, 기능적 목적으로 분류할 수 있으며<sup>45)</sup>, 기능적 전기자극(functional electrical stimulation)을 이용한 경직의 감소는 표면<sup>40)</sup>, 말초신경<sup>16,46)</sup>, 소뇌<sup>34)</sup> 혹은 척수<sup>2,38)</sup>를 자극하여 다양한 결과를 보고하고 있다. 그중 척수자극치료는 다발성 경화증 환자들에서 신경인성 방광에 대하여서 70% 이상의 치료율을 보이고 있으며<sup>17,24,36)</sup>, 경직에 대하여서도 Siegfried등<sup>43)</sup>은 약 500례를 분석하여 1/3에서 경직의 완화를 기대할 수 있다고 보고하였으며, 척수손상환자의 경직에 대한 치료율은 많은 연구들에서 80% 이상의 효과를 보고하고 있다<sup>2,7,13)</sup>.

그러나 Gybel과 van Roost<sup>20)</sup>은 척수손상환자들에 대한 연구들을 분석하여 아직까지 경직의 감소기전이 불명확하고 연구들마다 자극변수가 다양하기 때문에 치료효과에 대한 결론을 내리기에는 빠르다고 주장하였으며, Hugenholtz등<sup>22)</sup>도 척수자극의 경직에 대한 효과판정에 있어서 다양한 결과를 보고하는 이유로 환자의 주관적인 증상의 완화에 의존하여 객관적 평가가 부족하기 때문이라고 하였다. 그러나 Laitinen과 Fugl-Meyer<sup>28)</sup>는 등속성 운동기구인 Cybex와 근전도를 이용하여, 그리고 Maiman등<sup>30)</sup>은 근전도를 이용하여 객관적인 경직의 완화를 보고하였으며, 본 연구에서도 객관적 평가방법인 근전도 기계를 이용하여 경직의 변화를 평가하였다.

한편, 현재까지의 연구결과에 의하면 척수자극이 경직을 완화시키는 기전에 대하여서는 아직 정확하게 밝혀져 있지는 않으나, 전각운동세포의 탈극화<sup>30,38)</sup>, 척수에서의 신경전달의 억제<sup>29)</sup>, 분절성 신경로(segmental tract)의 자극<sup>1,19,36,38,45)</sup>, 화학적으로 내인성 물질의 생성에 의한 신경접합부(synapsis)의 변화<sup>10,45)</sup>, 그리고 자율신경계를 통한 억제<sup>32,38)</sup> 등의 다양한 기전이 설명되고 있는 실정이므로, 앞으로 여기에 대한 연구가 필요하다고 생각한다.

자극방법과 변수에 대하여서는 Richardson과 Mc-

Lone<sup>38)</sup>은 경직의 종류, 원인질병과 개인에 따라 자극 변수는 개별적이어야 한다고 주장하였으며, Larson 등<sup>29)</sup>은 필요한 전류의 양이 적은 음극을 이용한 자극을, Maiman 등<sup>30)</sup>은 쌍극(bipolar)자극보다는 단극(monopolar)자극이 보다 효과적이라고 하였다. 또한 자극 변수에 대하여서는 자극기간(width)은 거의 모든 연구들에서 0.2~0.3 msec을 사용하고 있으나<sup>2,7,13)</sup>, 자극빈도에 대하여서는 20 Hz에서 1,500 Hz까지 다양한 빈도에서 척수자극을 시행하고 있는 실정이다<sup>22,36,37)</sup>. 그러나 Richardson과 McLone<sup>38)</sup>은 저빈도의 자극시에 경직완화는 더욱 현저하다고 주장하였으며, Maiman 등<sup>30)</sup>은 고양이를 대상으로 척수자극을 시행하여 25 Hz보다는 100 Hz에서의 자극빈도에서 더욱 효과가 있었다고 보고하였다. 본 연구에서는 자극빈도를 50, 100, 250과 500 Hz로 자극을 주면서 하지의 경직 변화를 근전도로 평가하였는데, 경직의 완화는 100 Hz에서 가장 현저하여 이들의 결과와 유사한 결과를 보였다.

본 연구에서는 불완전손상을 받은 고양이를 대상으로 손상받은 척수아래에 음극자극을 주고, 경직의 변화를 하지에서 근전도를 이용하여 평가하였으며, 그 결과 자극빈도가 100 Hz일 때에 경직의 감소가 현저하였음을 알 수 있었다. 그러나 Robinson 등<sup>41)</sup>은 8주 이상의 장기적인 치료시 전기자극에 의한 근력의 증가로 인하여 오히려 경직이 증가하였다고 보고하였으므로, 앞으로 경직에 대한 객관적 평가방법을 이용한 장기간의 척수자극이 경직에 어떠한 영향을 미치는 지에 대한 연구가 필요하다고 생각한다.

## 결 론

연세대학교 의과대학 재활의학교실에서는 고양이를 대상으로 제 11번 흉수에 불완전손상을 주어 경직의 발현양상을 관찰하였으며, 충분한 경직이 나타난 고양이를 대상으로 제 2번 요수에 전기자극을 주면서, MS60 근전도 기계를 이용하여 대퇴사두근과 슬관절 굴근에서의 경직의 변화를 관찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 척수손상을 받은 12마리의 고양이들중에 4마리는 수술후 1주일내에 호흡기나 비노기계의 감염으로 인하여 사망하였으며, 나머지 8마리중 2마리는 수술후

8주가 지나도록 경직이 나타나지 않아서 실험에서 제외하였다.

2) 수술후 1주일이 되면서 대상고양이 6마리 모두에서 요실금현상이 생기면서 반사배뇨가 가능하였으며, 근긴장도와 심부건반사는 1주일이 지나면서 증가하기 시작하여 4주째부터는 충분한 경직이 나타났으며 마비된 하지에 부분적인 체중부하가 가능하였다. 족관절 간대는 2주가 지나면서 나타나기 시작하였고, 족지과반사는 대상고양이의 반수에서만 3주가 지나면서 관찰되었다.

3) 음극자극을 0.25 msec의 자극기간으로 고정된 후에, 각각 50, 100, 250과 500 Hz의 자극빈도로 척수자극을 하였을 때에 하지에서 측정된 경직의 변화는 100Hz일때 6마리 모두에서 감소하였으며, 그이상의 빈도에서는 경직이 증가하는 양상을 관찰하였다.

이상의 결과에서 척수손상으로 발생하는 경직에 대한 척수자극치료시에는 자극빈도가 100 Hz일 때에 가장 효과가 현저하다고 생각하며, 앞으로 지속적인 척수자극시 경직의 변화에 대한 연구가 필요하다고 생각한다.

## 참 고 문 헌

- 1) Bantli H, Broedel JR, Long DM, Thienprasit P: *Distribution of activity in spinal pathways evoked by experimental dorsal column stimulation. J Neurosurg* 42: 290-295, 1975
- 2) Barolat G, Myklebust JB, Wenninger W: *Effects of spinal cord stimulation on spasticity and spasms secondary to myelopathy. Appl Neurophysiol* 51: 29-44, 1988
- 3) Barolat-Romana G, Myklebust JB, Hemmy DC, Myklebust B, Wenninger W: *Immediate effects of spinal cord stimulation in spinal spasticity. J Neurosurg* 62: 558-562, 1985
- 4) Botte MJ, Nickel VL, Akeson WH: *Spasticity and contracture: Physiologic aspects of formation. Clin Orthop* 233:7-18, 1988
- 5) Broseta J, Garcia-March G, Sanchez-Ledesma MJ, Barbera J, Gonzalez-Darder J: *High-frequency cervical spinal cord stimulation in spasticity and motor disorders. Acta Neurochir Suppl (Wien)* 39: 106-111, 1987
- 6) Burke D: *Spasticity as an adaptation to pyrami-*

- dal tract injury. Adv Neurol* 47: 401-423, 1988
- 7) Campos RJ, Dimitrijevic MR, Sharkey PC, Sherwood AM: *Epidural spinal cord stimulation in spastic spinal cord injury patients. Appl Neurophysiol* 50: 453-454, 1987
  - 8) Carter RL, Ritz LA, Shank CP, Scott EW, Sybert GW: *Correlative electrophysiological and behavioral evaluation following L5 lesions in the cat: A model of spasticity. Exp Neurol* 114: 206-215, 1991
  - 9) Cioni B, Meglio M, Zamponi A: *Effect of spinal cord stimulation on motor performances in hemiplegics. Stereotact Funct Neurosurg* 52: 42-52, 1989
  - 10) Cook AW, Weinstein SP: *Chronic dorsal column stimulation in multiple sclerosis: Preliminary report. NY J Med* 73: 2868-2872, 1973
  - 11) Davidoff RA: *Antispastic drugs: Mechanisms of action. Ann Neurol* 17: 107-116, 1985
  - 12) DeLisa JA, Gans BM: *Rehabilitation medicine: Principles and practice, 2nd ed, J.B. Lippincott Company, Philadelphia, 1993, pp666-680*
  - 13) Dimitrijevic MR, Halter JA, Sharkey PC, Sherwood AM: *Epidural spinal cord stimulation and carry-over effect in chronic spinal cord injury patients. Appl Neurophysiol* 50: 449-450, 1987
  - 14) Edgerton VR, Roy RR, Hodgson JA, Prober RJ, deGuzman CP, deLeon R: *Potential of adult mammalian lumbosacral spinal cord to execute and acquire improved locomotion in the absence of supraspinal input. J Neurotrauma (suppl): S119-S128, 1992*
  - 15) Eldridge L: *Lumbosacral spinal isolation in cat: Surgical preparation and health maintenance. Exp Neurol* 83: 318-327, 1984
  - 16) Fpiedman M, Toriumi DM, Gryauskas V, Applebaum EL: *Treatment of spastic dysphonia without nerve section. Ann Otol Rhinol Laryngol* 96: 590-596, 1987
  - 17) Fredriksen TA, Bergmann S, Hesselberg JP, Stolt-Nielsen A, Ringkjøb R, Sjaastad O: *Electrical stimulation in multiple sclerosis: Comparison of transcutaneous electrical stimulation and epidural spinal cord stimulation. Appl Neurophysiol* 49: 4-24, 1986
  - 18) Gottlieb GL, Myklebust BM, Stefoski D, Groth K, Kroin J, Penn RD: *Evaluation of cervical stimulation for chronic treatment of spasticity. Neurology* 35: 699-704, 1985
  - 19) Guru K, Mailis A, Ashby P, Vanderlinden G: *Postsynaptic potentials in motoneurons caused by spinal cord stimulation in humans. Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 66: 275-280, 1987
  - 20) Gybels J, van Roost D: *Spinal cord stimulation for spasticity. Adv Tech Stand Neurosurg* 15: 63-96, 1987
  - 21) Herz DA, Looman JE, Tiberio A, Ketterling K, Kreitsch RK, Colwill JC, Grin OD: *The management of paralytic spasticity. Neurosurg* 26: 300-306, 1990
  - 22) Hugenholtz H, Humphreys P, McIntyre WM, Spasoff RA, Steel K: *Cervical spinal cord stimulation for spasticity in cerebral palsy. Neurosurg* 22: 707-714, 1988
  - 23) Hultborn H, Malmsten J: *Changes in segmental reflexes following chronic spinal cord hemisection in the cat: I. Increased monosynaptic and polysynaptic ventral root discharges. Acta Physiol Scand* 119: 405-422, 1983
  - 24) Illis LS, Sedgwick EM, Tallis RC: *Spinal cord stimulation in multiple sclerosis: Clinical results. J Neurol Neurosurg Psychiatr* 43: 1-14, 1980
  - 25) Kato M: *Chronically isolated lumbar half spinal cord generates locomotor activities in the ipsilateral hindlimb of the cat. Neurosci Res* 9: 22-34, 1990
  - 26) Kottke FJ, Lehmann JF: *Krusen's handbook of physical medicine and rehabilitation, 4th ed, W.B. Saunders, Philadelphia, 1990, pp740-741*
  - 27) Katz RT: *Management of spasticity. Am J Phys Med* 67: 108-116, 1988
  - 28) Laitinen LV, Fugl-Meyer AR: *Assessment of functional effect of epidural electrostimulation and selective posterior rhizotomy in spasticity. Appl Neurophysiol* 45: 331-334, 1982
  - 29) Larson SJ, Sances A, Riegel DH, Meyer GA, Dallmann DE, Swiontek T: *Neurophysiological effects of dorsal column stimulation in man and monkey. J Neurosurg* 41: 217-223, 1974
  - 30) Maiman DJ, Myklebust JB, Barolat-Romana G: *Spinal cord stimulation for amelioration of spasticity: Experimental results. Neurosurg* 21: 331-333, 1987
  - 31) Murray M, Goldberger ME: *Restitution of function and collateral sprouting in the cat spinal cord: The partially hemisectioned animal. J Comp*

- Neur* 158: 19-36, 1974
- 32) Nakamura S, Tsubokawa T: *Evaluation of spinal cord stimulation for postapoplectic spastic hemiplegia. Neurosurg* 17: 253-259, 1985
- 33) Oppenheim WL: *Selective posterior rhizotomy for spastic cerebral palsy: A review. Clin Orthop* 253: 20-29, 1990
- 34) Penn RD, Gottlieb GL, Agarwal GC: *Cerebellar stimulation in man: Quantitative changes in spasticity. J Neurosurg* 48: 779-786, 1978
- 35) Pierrot-Deseilligny E: *Pathophysiology of spasticity. Triangle* 22: 165-174, 1983
- 36) Read DJ, Matthews WB, Higson RH: *The effect of spinal cord stimulation on function in patients with multiple sclerosis. Brain* 103: 803-833, 1980
- 37) Reynolds AF, Oakley JC: *High frequency cervical epidural stimulation for spasticity. Appl Neurophysiol* 45: 93-97, 1982
- 38) Richardson RR, McLone DG: *Percutaneous epidural neurostimulation for paraplegic spasticity. Surg Neurol* 9: 153-155, 1978
- 39) Ritz LA, Friedman RM, Rhoton EL, Sparkes ML, Vierck CJ: *Lesions of cat sacrocaudal spinal cord: A minimally disruptive model of injury. J Neurotrauma* 9: 219-230, 1992
- 40) Robinson CJ, Kett NA, Bolam JM: *Spasticity in spinal cord injured patients: 1. Short-term effects of surface electrical stimulation. Arch Phys Med Rehabil* 69: 598-604, 1988
- 41) Robinson CJ, Kett NA, Bolam JM: *Spasticity in spinal cord injured patients: 2. Initial measures and long-term effects of surface electrical stimulation. Arch Phys Med Rehabil* 69: 862-868, 1988
- 42) Shealey CN, Mortimer JT, Reswick JB: *Electrical inhibition of pain by stimulation of the dorsal columns: Preliminary clinical report. Anesth Analg* 46: 489-491, 1967
- 43) Siegfried J, Lazorthes Y, Broggi G: *Electrical spinal cord stimulation for spastic movement disorders. Appl Neurophysiol* 44: 77-92, 1981
- 44) Stoddard SL, Tyce GM, Cook JA, Gaumann DM, Yaksh TL: *Adrenal medullary secretion with splanchnic stimulation in spinal cats. J Auton Nerv Syst* 38: 105-116, 1992
- 45) Vodovnik L, Rebersek S, Stefanovska A, Zidar J, Acimovic R, Gros N: *Electrical stimulation for control of paralysis and therapy of abnormal movements. Scand J Rehabil Med (Suppl)* 17: 91-97, 1988
- 46) Walker JB: *Modulation of spasticity: Prolonged suppression of a spinal reflex by electrical stimulation. Science* 216: 203-204, 1982
- 47) Waltz JM, Andreesen WH, Hunt DP: *Spinal cord stimulation and motor disorders. PACE Pacing Clin Electrophysiol* 10: 180-204, 1987