

## 미세전기자극이 가토의 경골 골치유에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

서울대학교 의과대학 정형외과학교실

이덕용 · 정문상 · 오상빈 · 이수용

인제대학교 부속백병원 정형외과학교실

오 인 석

### = Abstract =

#### The Effect of Electrical Stimulation on Bone — An Experimental Study on Rabbits —

Duk Yong Lee, M.D., Moon Sang Chung, M.D., Sang Bin Oh, M.D. and Soo Yong Lee, M.D.

Department of Orthopedic Surgery, College of Medicine, Seoul National University, Seoul, Korea

In Suk Oh, M.D.

Department of Orthopedic Surgery, Inje Medical College, Paik Hospital, Seoul, Korea

Experiences of 26 cases of electrical bone stimulation on normal adult rabbits was documented in this paper. The cathodic electrode was introduced longitudinally into the medullary cavity of the proximal tibia and the anodic electrode was introduced transversely in the distal femur of the same side. The contralateral tibia was used as the control, of which the Teflon coated Kirschner wire was introduced longitudinally into the medullary cavity. 10uA of direct current was passed continuously through the fixed wires between the proximal tibia and distal femur. At the second, fourth and sixth week, random bone scan with 99m-Tc was performed and the animals were sacrificed. The specimen X-rays of the tibia and femur were taken and the specimens were prepared for the microscopic study. The followings are obtained from this experimental study.

1. The rate of new bone formation is 69.2% in the stimulated group and 7.7% in the control group. There were also fibrosis and cartilage formation as well as the new bone formation. The fibrosis and cartilage formation are observed only in the electrically stimulated side and their occurrences are 69.2% and 11.1% respectively. So The new bone formation and fibrosis are definitely increased in the bones of the cathodic electrical stimulation than those of the control side.
2. The intramembraneous ossification is the predominant feature of this electrically stimulated new bone formation.
3. Bone and soft tissue necrosis was the main microscopic feature in the anode side.
4. Since new bone, fibrous tissue and sometimes new cartilage were observed in this study, it seems that the cathodic electrical stimulation is not specific for the new bone formation, but induce crude tissues such as bone, cartilage, fibrous tissue or vessels. Furthermore, it can be postulated that the 10uA electrical stimulation is only one of the best electrical environment for the formation of the crude tissues, especially for bone and fibrous tissue.

---

**Key Words :** Electrical stimulation, bone.

\* 본 논문은 서울대학교병원 대단위 연구 보조비로 이루어 졌음.

## 서 론

미세전기자극이 골절의 치유에 유효하다는 것은 1812년 St. Thomas Hospital의 Mr. Birch가 Shocks of Electric Fluid를 이용하여 경골골절불유합의 치료에 성공한 것을 표시<sup>39)</sup>로 여러 임상적인 경험의 성공례가 발표되어 왔다.

1953년 Yasuda<sup>41)</sup>에 의해 골의 전기적성질이 보고된 이후 골에 대한 미세전기자극의 작용기전이나 성상의 연구는 계속되고 있으나 확실하고 결정적인 결론에는 도달하지 못하였다.

본 교실에서는 성숙성상가토를 이용하여 미세전기자극이 골에 미치는 영향을 관찰하여 문헌고찰과 함께 보고하는 바이다.

## 실험재료 및 방법

이 실험에서 사용된 기구는 세가지로 (Fig. 1) 첫째는 미세전류조절기로서 저항이 변화하더라도 일정한 전류(10  $\mu$ A)가 흐르도록 고안된 것으로 본 교실에서 자체 생산한 것이다. 둘째는 전원으로서 9V의 직류전지를 사용하였으며 셋째는 전극(電極: Electrode)으로서 끝부분 5mm를 제외하고는 Teflon으로 절연되어 있는 Stainless Steel K-강선을 사용하였다.

2.5-3kg의 성숙한 흰색 가토를 사용하여 20% Urethan 8cc를 복막내에 투여하고 Ketamine 2cc를 근육주사하여 전신마취를 도모하였고 필요에 따라 Ketamine을 첨가하기도 하였다. 먼저 강선을 삽입할 술관절 주위

를 Betadine 용액으로 소독하고 준비된 K-강선을 양측 경골근위부의 골수강을 통하여 골간단내로 삽입하였다. 대퇴원위부는 같은 K-강선으로 골간단부에 횡으로 삽입하여 K-강선의 끝부분이 골수강내에 있게 하였다. 대퇴골과 경골에 동시에 강선을 삽입한 측에서 각기 경골부 강선에는 음극, 대퇴골부강선에는 양극을 연결한후 술관절부를 강선과 전류조절기를 포함하여 석고붕대로 고정하고 9V 직류 전전지를 미세전류조절기에 꽂아 임의로 교환할 수있게 하였다 (Fig. 2). 반대측의 대조군으로 사용하고저 하였던 경골부 강선은 피하에 함몰되게 잘랐으며 별도로 고정하지 않았다. 미세전류조절기에 직류전지(9V)를 연결한후 매주마다 전류의 크기를 측정하고 새 전전지로 교환하였다. 매 주말의 전류는 대개 5-6  $\mu$ A로서 실제 이 실험에서 사용된 전류는 5-10  $\mu$ A의 영역이라고 하겠다.

술후 3주, 6주에 임의추출에 의하여 <sup>99m</sup>Tc를 이용한 양측하퇴부의 골주사(骨走査: Bone Scan)를 시행하였으며 이때는 0.5cc의 Ketamine을 정맥주사하여 가토의 요동이 없이 평행한 하퇴부위에서 골주사를 할 수있게 하였다. 이때 사용된 <sup>99m</sup>Tc의 양은 <sup>2uCi</sup>였다.

술후 2주, 4주 그리고 6주에 각 10마리, 8마리 그리고 8마리의 가토를 희생시켜 실험군과 대조군의 경골 및 양극을 가한 대퇴골을 적출하여 방사선촬영을 시행한 후 탈석회화하고 병리조직표본으로 만들었다. 병리조직 절취부는 골수강내 강선중 절연체로 싸이지 않은 끝부분 5mm에 해당되는 경골간단부를 횡으로 절단하여 H-E 염색을 실시하였다. 대퇴골의 병리조직은 강선이 삽입된 부분을 횡으로 절단하여 경골과 같은 방법으로

Fig. 1. 실험에 사용된 기구. 1-가: 9V 직류 전전지, 1-나: 미세전류 조절기, 1-다: Teflon 이 표면 처리된 K-강선.

Fig. 2. 정상 성숙가토에 K-강선 조작과 전류조절기 및 전전지를 연결한 후 술관절부를 석고붕대로 고정한 사진.

3-가. 술후 3주 좌측 슬관절부의 음영이  
우측 슬관절부(대조군) 보다 증가되어 있는 소  
견을 보인다.

3-나. 술후 6주 좌측 슬관절부(실험군)의  
음영이 우측 슬관절부(대조군) 보다 증가되어 있  
고 더욱 확대된 소견을 보인다.

Fig. 3. 골주사 소견

- 4-1. 실험군 : K-강선이 삽입되었던 주위에 골경화 현상을 볼 수 있다. 1-가 : 술후 2주, 1-나 : 술후 4주, 1-다 : 술후 6주.
- 4-2. 대조군 : K-강선이 삽입되었던 흔적만 보이며 다른 소견을 볼 수 없다. 2-가 : 술후 2주, 2-나 : 술후 4주, 2-다 : 술후 6주.
- 4-3. 양극을 가한 대퇴골 원위부 : K-강선이 삽입되었던 주위에 골조송증을 볼 수 있다.

Fig. 4. 방사선 소견.

제작하였다.

병리조직검사는 신생골 생성여부 및 생성강도, 연골 생성여부, 섬유화여부, 염증병발의 여부에 대한 소견을 주로 관찰하였다.

신생골생성의 강도(強度: Intensity)는 골수강내의 충족도(充足度: Filling Degree)에 따라 3개군으로 나누

고 신생골생성이 있되 25%이하의 충족도이면 1, 25-50%의 충족도이면 2, 50% 이상의 충족도이면 3의 강도로 간주하였다. 골막의 신생골생성강도는 골막에 신생골생성이 있되 원주(圓周: Circumference) 전체의 25% 이하에 국한되면 1, 25-50%이면 2, 50% 이상의 원주를 차지하면 3의 강도로 간주하였다.

- 5-1: 강도 1의 신생골 형성을 나타낸 대조군(제 2 주). 섬유화를 관찰할 수 없고 피골의 혈관증식도 관찰할 수 없다. 나머지 부분의 골수강은 정상 골수 소견을 보인다.
- 5-2: 강도 3의 신생골 형성을 나타낸 실험군(제 2 주). 섬유화 현상이 나타나고 피골의 혈관 증식을 관찰할 수 있다.
- 5-3: 강도 3의 신생골 형성을 보인 실험군(제 4 주). 신생골 형성부와 신생골 생성부 사이에 섬유화 현상이 보이고 피골이 혈관증식을 보인다. 골수강내에 연골 형성을 관찰할 수 있다.

- 5-4: 골막의 신생골 형성을 확대한 사진으로서 골수강에서도 신생골 형성이 있음을 보인다. 골수강내 강한 섬유화 현상 및 피골내의 혈관 증식을 볼 수 있다(제 2 주 실험군).
- 5-5: 골수강내 연골 골화현상(제 4 주 실험군중) 사진 중간 부분에 강한 염증 반응을 보인다.
- 5-6: 실험군에서 강한 신생골 형성을 보이는 것으로 동시에 전체적으로 분포된 염증 소견을 관찰할 수 있다.

Fig. 5. 조직병리소견.

**Fig. 5-7 :** 대조군의 경골 : 골수강내 강선이 삽입되었던 흔적이 있으나 골의 변화는 보이지 않는다. 즉 정상적인 골수강 모양이며 골수강내 섬유화나 피골내의 혈관중식도 관찰 할 수 없다.

**Fig. 6.** 양극을 가한 대퇴원위부, 연골 형성을 볼 수 있고 강한 섬유화 현상을 볼 수 있으며 좌측 중간에 피사된 골편들을 볼 수 있다. 염종 소견도 강하게 나타나 있는 곳이 있다.

**Table 1.** 실험결과 분석

강 도	2 주		4 주		6 주		계	
	대조군 마리수(%)	실험군 마리수(%)	대조군 마리수(%)	실험군 마리수(%)	대조군 마리수(%)	실험군 마리수(%)	대조군 마리수(%)	실험군 마리수(%)
0	8(80%)	2(20%)	8(100%)	2(25%)	8	4(50%)	24(92.3%)	8(30.8%)
1	2(20%)	0	0	2(25%)	0	0	2( 7.7%)	2( 7.7%)
2	0	0	0	2(25%)	0	4(50%)	0	6(23.1%)
3	0	8(80%)	0	2(25%)	0	0	0	10(28.4%)
계 (마리수)	10	10	8	8	8	8	26	26
평균강도	0.2	2.4	0	1.5	0	0.5	0.08	1.7
신생골 생성빈도	20%	80%	0	75%	0	50%	7.7%	69.2%

강도 : 0 : 신생골 형성의 증거가 없음. 1 : 골수강내 25% 이하, 혹은 골막주위의 25% 이하에서 신생골 형성이 있을 때, 2 : 골수강내 25~50%, 혹은 골막주위 25~50% 까지 신생골 형성이 있을 때, 3 : 골수강내 50% 이상, 혹은 골막주위 50% 이상에서 신생골 생성이 있을 때.

### 실험 성적

#### 골주사 소견 (Fig. 3)

임의적 추출에 의한 골주사는 3 주, 6 주에 시행되었

으며 실험군에서 대조군보다 음영의 강도가 강하거나 광범위한 음영을 나타냄으로써 미세전기자극을 가한 부분에서 골의 활동도가 증가되어 있다는 것을 간접적으로 알 수 있었다.

## 방사선 소견 (Fig. 4)

제 2 주, 4 주 그리고 6 주에서 음극을 가한 경골간단부는 골경화(骨硬化: Osteosclerosis) 소견을 보였고 양극을 가한 대퇴골간단부는 골조종증(骨粗鬆症: Osteoporosis) 소견을 보였으며 대조군의 경골간단부는 별 변화를 관찰할 수가 없었고 단지 강선이 삽입된 장소가 결손부(缺損部: Filling Defect)로 남아있는 것을 관찰할 수 있었다.

## 병리조직 소견 (Fig. 5)

신생골생성은(Table 1) 그 빈도에 있어 실험군에서 69.2%, 그리고 대조군에서 7.7%이었으며 그 강도는 실험군에서 1.7 대조군에서 0.1로서 공히 실험군에서 월등히 높은 발생빈도와 강도를 나타내었다. 기간에 따라서는 빈도 및 강도가 시간이 지날수록 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 빈도는 80%→75%→50%로, 강도는 2.4→1.5→0.5로 감소하는 경향을 보인다.

이러한 신생골생성은 강선이 삽입된 골수강내 뿐만 아니라 골막에서도 나타남을 관찰할 수 있었다(Fig. 5-2, 4). 신생골생성의 주된 성상은 막내골화(膜內骨化: Intramembranous Ossification) 이었고 2 레에서 연골골화(軟骨骨化: Endochondral Ossification)를 관찰할 수 있었으나(Fig. 5-3, 5)이는 전체 신생골생성의 11.1%에 해당할 뿐이었다.

섬유화 소견은 제 2 주, 4 주 그리고 6 주에서 신생골생성과 같이 관찰되었으며 대조군에서는 관찰할 수 없었다. 섬유화의 빈도는 신생골생성빈도와 같이 69.2%이었다(Fig. 5-2, 3, 4, 5, 6).

염증소견은 실험군과 대조군에서 공히 관찰할 수 있었으나 실험군에서 그 빈도 및 강도가 증가되어 있음을 관찰할 수 있었다(Fig. 5-6). 그러나 감염으로 인한 국소적 염증소견은 무시할만 하였다.

양극을 가한 대퇴원위부의 골변화는 조직소견상 전례에서 대동소이하게 괴사된 부분과 연골형성 그리고 섬유화가 강하게 나타남을 관찰할 수 있었다(Fig. 6).

## 고 찰

전기자극이 골형성(骨形成: Osteogenesis)에 도움을 준다는 사실은 1812년 Mr. Birch<sup>33)</sup> 이후 19세기 중반에 Garratt,<sup>17)</sup> Mott,<sup>28)</sup> 그리고 Lente<sup>25)</sup> 등에 의하여 임상적 경험제가 발표되었으나 별 주목을 끌지 못하다가 1953년 Yasuda 등<sup>41)</sup>이 골의 압전기(壓電氣: Piezoelectricity)적 성질을 보고하고 골에 가한 활동성에너지(活動性에너지: Dynamic Energy)가 전기적에너지(電氣的 에너지: Electric Energy)로 전환되며 골에 압축을 가하면 음극,

긴장을 가하면 양극의 전기적 성질이 나타나고 음극쪽에서는 골형성이 촉진되고 양극쪽에서는 골흡수가 일어난다고 하였다. 이러한 사실은 활동성에너지를 가하지 않고 직접 골에 전기적에너지를 가함으로써 골형성을 촉진시킬 수 있다는 것을 증명하여 주는 것으로서 이전의 전기자극을 이용한 골절치유의 임상적 경험에 대한 이론적 뒷받침을 해준과 동시에 전기자극을 이용한 골절치유가 새로이 시작되고 또한 이를 이용하여 골절의 불유합과 선천성가관절증 치료등이 활발하게 되었다. 이미 이에 따른 성공적인 임상적 경험례<sup>1, 3, 5-8, 10, 11, 25, 26, 30, 31, 34, 35, 39, 40)</sup> 및 연구논문이 120례 이상에서 발표된 바 있다<sup>2, 4, 9, 12-16, 18-24, 27, 29, 32, 36, 38)</sup>.

그러나 이 미세전기자극이 골형성에 관여하는 기전이나 그 성상에 대한 많은 연구에도 불구하고 술자들 간에는 전기의 종류<sup>19, 26, 27)</sup>, 시술의 방법<sup>10, 26)</sup> 및 주파수의 범위<sup>26)</sup> 등에 많은 의견을 보이고있어 그에 대한 확실하고 정확한 결론에는 도달하지 못한 것으로 사료된다.

본 저자들이 사용한 방법은 계속적으로 일정한 직류의 미세전기를 골수강내에 삽입된 강선을 통하여 통과시켜 줌으로써 음극을 삽입한 경골의 골수강내에서 일어난 변화를 관찰한 것이다.

성숙가토의 골막이나 골수강내에는 정상적으로는 신생골이 없던 곳이나 미세전류를 통한 후 신생골을 관찰할 수 있었다는 것은 이러한 미세전류가 골형성을 유도(誘導: Induce) 하는 것으로 해석된다.

그리고 신생골생성의 빈도나 강도(強度: Intensity)에 있어 실험군에서 대조군보다 월등히 높아 미세전기자극이 신생골을 생성시킨다는 것을 확인함과 동시에 1977년 Spadaro<sup>37)</sup>가 발표한 바와 같이 골에 대한 미세전기자극이 신생골형성에 효과적이라는 95%의 논문에 긍정적인 결과를 더할 수 있는 것이다.

그러나 본 실험에서 관찰할 수 있었던 섬유화 소견 내지는 연골형성 소견은 이러한 전기자극이 골형성이란 특이적인 반응만을 나타낸다고 할 수 없다는 점을 야기시킨다.

골형성의 종류로는 막내골화가 89%, 연골골화가 약 11% 관찰됨으로써 주된 골형성의 성상은 막내골화임을 보여주는 것이다.

현재까지 발표된 논문들에서와 마찬가지로<sup>1, 4, 5, 7, 11, 13, 15, 16, 29, 34, 38, 40)</sup> 본 실험에서 사용된 5-10uA의 미세전기자극이 신생골생성을 야기시켰다는 사실은 이러한 범위의 미세전류가 골생성의 여러가지 조건들 중 전기적인 환경중에는 최적인 범위내에 있는 환경인 것으로 사료된다.

또한 본 실험중 전기자극을 가한 경골의 약 30%에서는 신생골형성이 관찰되지 않는 바 기술적으로는 결함

을 발견할 수가 없었으므로 생체에의 전기자극에 의한 신생골형성은 어떤 적정량의 전기자극과 개체사이의 상호작용에 의한 것이며 전기자극만이 유일한 골형성의 이자이지는 않은 것으로 사료된다.

## 결 론

본 서울대학교 의과대학 정형외과학교실에서는 미세 전기 자극을 성숙개체의 골에 가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 골에 음극의 미세전기자극을 가하면 골생성이 나타난다.
- 2) 골형성의 주된 성상은 막내골화이다.
- 3) 양극의 전류를 가한 골에서는 골흡수 내지 골괴사가 일어난다.
- 4) 미세전기자극시 음극부위에 골생성을 강하게 나타냈지만 섬유화나 연골생성 소견도 나타냄으로써 미세 전기자극이 골형성만을 특이하게 나타내는 것이 아님을 알 수있었고 미세전기자극은 신생골형성만을 촉진하는 것이 아니며 섬유조직, 연골 및 혈관등의 생성도 촉진하는 비특이적인 자극인 것으로 사료된다.

5) 같은 미세전기자극의 조건에서도 개체에 따라 신생골형성의 반응을 보이지 않는 경우가 약 30%에 가까우므로 이러한 신생골형성이 전기량과 개체간의 상호작용에 의한 것이며 전기자극에만 기인되지 않는 것으로 사료된다.

## REFERENCES

- 1) 정문상, 한문식, 이덕용, 이상훈, 김용훈 : 전기자극을 이용하여 치료한 선천성 가관절증과 불유합의 임상경험. 대한정형외과학회지, 16:518, 1981.
- 2) Bassett, C.A.L. and Becker, R.O. : *Generation of Electrical Potentials by Bone in Response to Mechanical Stress*, Science 137:1063, 1962.
- 3) Bassett, C.A.L., Caulo, B.S.N. and Kort, J. : *Congenital "Pseudarthrosis" of the Tibia: Treatment with Pulsing Electromagnetic Fields*, Clin. Orthop. 154:136, 1981.
- 4) Bassette, C.A.L., Pawluk, R.J. and Becker, R.D. : *Effects of Electric Currents on Bone in Vivo*, Nature 204:652, 1964.
- 5) Bora, F.W., Osterman, A.L. and Brighton, C.T. : *The Electrical Treatment of Scaphoid Nonunion*, Clin. Orthop. 161:33, 1981.

- 6) Brighton, C.T., Friedenberg, Z.B., Zemsky, L.M. and Pollis, R.P. : *Direct Current Stimulation on Nonunion and Congenital Pseudarthrosis: Exploration of its Clinical Application*, J. Bone and Joint Surg. 57A:368, 1975.
- 7) Brighton, C.T., Friedenberg, Z.B., Mitchell, E.I. and Booth, R.E. : *Treatment of Nonunion with Constant Direct Current*, Clin. Orthop. 124:106, 1977.
- 8) Brighton, C.T., Black, J., Friedenberg, Z.B., Esterhai, J.L., Day, L.J. and Connolly, J.F. : *A Multicenter Study of Treatment of Nonunion with Constant Direct Current*, J. Bone and Joint Surg. 63A:2, 1981.
- 9) Brighton, C.T., Friedenberg, Z.B., Black, J., Esterhai, J.L., Mitchell, J.E.I. and Montique, F. Jr. : *Electrically Induced Osteogenesis : Relationship Between Charge, Current Density and the Amount of Bone Formed*, Clin. Orthop. 161:122, 1981.
- 10) Connolly, J.F. : *Selection, Evaluation and Indication for electrical Stimulation of Ununited Fractures*, Clin. Orthop. 161:39, 1981.
- 11) Day, L. : *Electrical Stimulation in the Treatment of Ununited Fractures*, Clin. Orthop. 161:54, 1981.
- 12) Friedenberg, Z.B. and Brighton, C.T. : *Bioelectric Potentials in Bone*, J. Bone and Joint surg. 48A:915, 1966.
- 13) Friedenberg, Z.B., Kobanim, M. : *The Effect of Direct Current on Bone*, Surg. Gynecol. Obstet. 127:97, 1968.
- 14) Friedenberg, Z.B., Andrews, E.T., Smolenski, B.I., Pearl, B.W. and Brighton, C.T. : *Bone Reaction to Varying Amounts of Direct Current*, Surg. Gynecol. Obstet. 131:894, 1970.
- 15) Friedenberg, Z.B., Roberts, P.G.Jr., Didizian, N.H. and Brighton, C.T. : *Stimulation of Fracture Healing by Direct Current in the Rabbit Fibula*, J. Bone and Joint Surg. 56A:1023, 1974.
- 16) Friedenberg, Z.B., Zemsky, L.M., Pollis, R.P. and Brighton, C.T. : *The Response of Non-Traumatized Bone to direct Current*, J. Bone and Joint Surg. 56A:1023, 1974.
- 17) Garratt, A.C. : *Electro-Physiology and Electro-Therapeutics*. Boston, Ticknor and Fields, 1861, P. 657. (cited from a brief historical note on the use of electricity in the treatment of fractures in Clin. Orthop. 161:4, 1981.)

- 18) Harris, W.H., Moyer, B.J.L., Thrasher, E.L.II., Davis, L.A., Cobden, R.H., Mackenzie, D.A. & Cywinski, J.K. : *Differential Response to Electrical Stimulation*. Clin. Orthop. 123:31, 1977.
- 19) Herbst, E. : *Electric Stimulation of Bone Growth and Repair : A Review of Different Stimulation Methods*. (cited from *Electric Stimulation of Bone Growth and Repair*, by Burny, F., Herbst, E. and Hinsenkams, M. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1978: p.1)
- 20) Hassler, C.R., Rybicki, E.F., Diegle, R.B. and Clark, L.C. : *Studies of Enhanced Bone Healing via Electrical Stimuli : Comparative Effectiveness of Various Parameters*, Clin. Orthop. 124:9, 1977.
- 21) Inoues, S., Ohashi, T., Yasuda, I. & Fukuda, E. : *Electret Induced Callus Formation in the Rat*, Clin. Orthop. 124:57, 1977.
- 22) Lavine, L.S., Lustrin, I. & Shamos, M.H. : *Experimental Model for Studying the Effect of Electric Current on Bone in Vivo*, Nature 224:1112, 1969.
- 23) Lavine, L.S., Lustrin, I. & Shamos, M.H. & Moss, M.L. : *The Influence of Electric Current on Bone Regeneration in Vivo*, Acta Orthop. Scand. 42:305, 1971.
- 24) Lavine, L.S., Lustrin, I., Rinaldi, R.A. and Liboff, A.R. : *Electrical Enhancement of Bone Healing*, Science 175:1118, 1972.
- 25) Lente, F.D. : *Cases of Ununited Fractures Treated by Electricity*, NY, J. Med. 5:317, 1850 (cited from a brief historical note on the use of electricity in the treatment of fractures, in Clin. Orthop. 161:4, 1981.)
- 26) Lechner, F., Ascherl, R. and Uraus, W. : *Treatment of Pseudarthrosis with Electrodynamic Potentials of Low Frequency Range*, Clin. Orthop. 161:71, 1981.
- 27) Levy, D. and Rubin, B. : *Inducing Bone Growth in Vivo by Pulse Stimulation*, Clin. Orthop. 88:218, 1972.
- 28) Mott, V. : *Two Cases of Ununited Fractures Successfully Treated by Sten, Medical and Surgical Register I (Part 2): 375, 1820* (cited from a brief historical note on the use of electricity in the treatment of fractures in Clin. Orthop. 161:4, 1981)
- 29) O'Connor, B.T., Charlton, H.M., Currey, J.D., Kirby, D.R.S. & Woods, C. : *Effects of Electrical Current on Bone in Vivo*, Nature 222:162, 1969.
- 30) Paterson, D., Lewis, G.N. and Cass, C.A. : *Treatment of Delayed Union and Nonunion with an Implanted direct Current Stimulator*, Clin. Orthop. 148:117, 1980.
- 31) Paterson, D., Lesis, G.N. and Cass, C.A. : *Treatment of Congenital Pseudarthrosis of the Tibia with Direct Current Stimulation*, Clin. Orthop. 148:129, 1980.
- 32) Paterson, D.c., Hellier, T.M., Carter, R.F., Ludbrook, J., Maxwell, G.M. and Savage, J.P. : *Experimental Delayed Union of the Dog and its use in Assessing the Effect on an Electrical Bone Growth Stimulator*, Clin. Orthop. 128:340, 1977.
- 33) Peltier L.F. : *A Brief Historical Note on the use of Electricity in the Treatment of Fractures*, Clin. Orthop. 161:4, 1981.
- 34) Piekarski, K., Demetriades, D. and Mackenzie, A. : *Osteogenetic Stimulation by Externally Applied DC Current*, Acta Orthop. Scand. 49:113, 1978.
- 35) Romano, R.L., Burgers, E.M. and Rubenstein, C.P. : *Percutaneous Electrical Stimulation for Clinical Tibial Fracture Repair*, Clin. Orthop. 114:290, 1976.
- 36) Shamos M.H., Lavine L.S. and Shamos, M.I. : *Piezoelectric Effect in Bone*, Nature 197:81, 1963.
- 37) Shadaro J.A. : *Electrically Stimulated Bone Growth in Animals and Man*, Clin. Orthop. 122:325, 1977.
- 38) Steinberg, M.E., Busenkell, G.L., Black, J. and Korostoff, E. : *Stress Induced Potentials in Moist Bone in Vitro*, J. Bone and Joint Surg. 56A:704, 1974.
- 39) Sutcliffe, M.L., Goldberg, A.A.J. : *The treatment of Congenital Pseudarthrosis of the Tibia with Pulsing Electromagnetic Fields*, Clin. Orthop. 166:45, 1982.
- 40) Weigert, M. and Werhahn, C. : *The Influence of Electric Potentials on Plated Bones*, Clin. Orthop. 124:20, 1977.
- 41) Yasuda, I. : *Piezoelectricity of Living Bone*, J. Kyoto Pref. Univ. Med. 53:325, 1953. (cited from electrically stimulated bone growth in animals and man, by spadaro, Clin. Orthop. 122:325, 1977.)