

# 골절치유의 전기적 특성에 대한 연구

서울대학교 의과대학 정형외과학교실

한문식 · 이도영 · 김 양 · 최 송

= Abstract =

## Electromechanical and Bioelectrical Characteristics of Fracture Healing

Moon Sik Hahn, M.D., Do Young Lee, M.D., Yang Kim, M.D., and Song Choi, M.D.

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

It is widely believed that the new bone formation is provoked by fine electrical stress to bone. There have been many experimental studies that showed much efforts to define these small amounts of electricity, and these fine electricities are being used in the orthopedic field for the treatment of various fractures, nonunions and pseudarthrosis. The author has checked the electrical potentials changing in the course of fracture healing in rabbit's femur. Comparing these data with that of the normal control group, the following results were obtained.

1. In the normal rabbit's femur the electrical potential was 13.6mV less on the concave side than on the convex side. This finding can be explained by the existence of stress generated potential or piezoelectricity.
2. Electrical potentials on the fractured femoral sites were lowered significantly from that of the control group. So author could confirm the existence of bioelectrical generated by increased electrical activity of the living bone.
3. The electrical potential of the fractured femoral site has been decreased 50% and 20% as low as that of the normal site at 8 weeks respectively. It is expected that these lowered electrical potentials may become close to the normal values when the changed metabolic process due to the fractured bone is no longer functioning and it is believed to take human 2 years to get the normal value.

**Key Words:** Electromechanical of Fracture Healing

### 서 론

미세전기를 취급하는 전자공학(electronics)이 1939년 Szent-Gyorgyi에 의해 생물학에 도입된 이래, 이 개념은 의학분야에서도 광범위하게 이용되어 왔다<sup>22)</sup>.

이러한 발전은 정형외과 영역에도 영향을 주어 골의 오목한 쪽(concave side) 혹은 압력(compression)이 주어지는 부위는 전기적으로 음성이며 볼록한쪽(convex side) 혹은 장력(tension)이 주어지는 부위는 전기적으로 양성임이 Yasuda에 의해 밝혀진 후 이러한 전압의 차이는 세포의 생사에는 무관하여 탈석회화한 골교원질만에 의해서도 발전됨이 밝혀져 이들 골의 압

전기(piezo-electricity) 혹은 응력에 의하여 발생된 전압(stress generate potentials)이라 부르게 되었고<sup>16, 20, 22, 24)</sup> 이는 또한 응력이 주어지는 방향으로 긴장골이 발생한다는 Wolff 법칙을 설명하는 한 방법으로 대두되고 있다.

한편 성장판—골간단 부위는 골간에 비하여 전기적으로 음성이고 골절된 골은 정상골에 비하여 전기적으로 음성이며, 골세포를 고에너지에 의하여 파괴하면 골사체의 음성도가 떨어진다는 관찰들에 의거하여 응력을 가하지 않은 골에서 생기는 전기적 음성도는 생존하는 골세포의 작용에 기인하여 발생한다고 생각하여 이를 생전기적 전압(bioelectrical potential)이라 칭하게 되었다<sup>6, 12, 14)</sup>.

### 골절치유의 전기적 특성

이러한 관찰에서 야기되는 의문 즉 미세전기 자극을 골에 가함으로써 신생골을 유발시킬 수 있지 않을까 하는 문제에 대하여는 많은 동물실험을 통하여 긍정적으로 인정되고 있으며<sup>9, 9, 11, 15, 21, 23, 26, 27, 29, 31, 33</sup> 1970년대에 들어와서는 이를 임상에서 각종의 골절, 부전유합, 가관절증등의 치료에 사용하여 그 치료효과를 입증하는 논문들이 보고되고 있다.<sup>1, 3, 5, 10, 12, 19, 20, 22, 25</sup>

저자는 골절의 치유시 발생하는 전기적 음성도가 치유기간에 따라 어떻게 변화하는가를 관찰하기 위하여 본 실험을 시행하였다.

### 실험재료 및 방법

체중 2.5kg 정도의 성숙한 흰색 집토끼 34마리를 사용하여 20% urethane 0.8cc/kg과, ketamine 30mg/kg를 복합하여 전신마취를 한 후 좌측 대퇴부의 외측에 피부절개를 가하여 대퇴골 간부를 노출시키고 대퇴골 중상의 골절 예정부위의 근위와 원위에 각각 3개 도합 6개의 Steinmann pin을 중렬로 대퇴골 간부에 직각이 되도록 약 2cm 간격으로 양피질을 통과시켜 삽입하였다. 이 핀들을 길이 10cm, 넓이 1cm이며 양쪽 끝부분에 2.5cm 길이의 세로홈이 있는 스페스판과 플라스틱으로 접착시켜 골의 고정술을 시행하였다. 이어 대퇴골 간부의 중앙에 두께 1.2mm의 틈을 사용하여 횡적골절이 되도록 절골술을 시행하고 이 골절부위에 polyethylene판으로 절연한 1/32 inch Steinmann pin

의 전극을 삽입한 후 골절의 안정도를 확인하고 창상은 세척후 일차 봉합하였다.

수술 직후에서부터 주 1~2회 삽입된 전극과 인접 연부조직 사이의 전압차를 측정하되 전압은 100uV( $10^{-4}$ V), 전류는 10nA( $10^{-8}$ A)까지 0.05% 이하의 오차로서 측정할 수 있는 Digital multimeter(Digitec)을 사용하여 계속하였다.

수술한 토끼는 격주 간격으로 방사선 사진촬영을 실시하여 골절의 융합도를 관찰하였으며(Fig. 1), 수술후 4주, 8주, 12주, 22주 그리고 26주에 각각 토끼를 마취하에서 수술한 좌측 대퇴골과 정상의 우측 대퇴골을 골막하에 노출시켜 다음과 같이 전압차를 측정하였다.

즉 첫째로 기초자료로서 여러가지 조직의 전기적 특성을 알아보기 위하여 대퇴골간, 안정시의 인접근육, 피하연부조직 그리고 4배에서 발견된 연부조직 농양과 지구 표면과의 전압차를 측정하였으며 둘째로 응력에 의하여 발생하는 전압이 실제로 존재하는가를 알아보기 위하여 정상 대퇴골의 오목한쪽 즉 후면과 볼록한 전면 사이의 전압차를 측정하였다. 이어 셋째로 골절부의 표면과 지구표면 사이의 전압차를 측정 하였으며 아울러 정상측과 환측의 전압차를 비교 관찰하였고 넷째로 골표면이 아닌 골내부의 전기적 특성을 알아보기 위하여 골절부에 5/64 inch 크기의 구멍을 뚫고 이 구멍을 통하여 골내부와 지구표면 사이의 전압차를 측정하였다.

- a. Immediately after operation,      b. 2 weeks after operation,      c. 4 weeks after operation,  
d. 2 months after operation,      e. 3 months after operation.

Fig. 1. Fractured femur with external fixation.

학적인 신빙성이 충분하였다(Table 2).

실험 성적

여러가지 조직과 지표사이의 전압차는 본 실험의 기초자료로서 사용하기 위하여 측정되었는바 그 결과는 근육은 지표에 대하여  $-229 \pm 25mV$  옴으로 대전되어 있었으며 연부조직농양이  $-188 \pm 53mV$  골이  $-141 \pm 30mV$  그리고 피하연부조직이  $-138 \pm 26mV$ 이었다. 따라서 전압은 피하연부조직, 골, 연부조직농양, 근육의 순서로 낮은 상태에 있었으며 각 조직의 전압차의 표준편차는 대략 25~30mV 정도를 나타내었으나 유독농양내에서는 53mV로서 평균값의 25% 이상을 상회하고 있었다(Table 1).

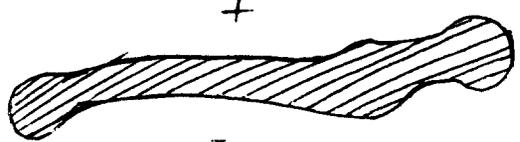
세포의 생사에는 무관하며 응력에 의해 발생하는 전압 즉 piezo-electricity가 실제로 존재할 것인가를 알아보기 위하여 정상 대퇴골의 볼록한 전면에 양극, 오목한 후면에 음극을 접촉시켜 그 전압차를 측정하여 보았는바 측정한 34개의 대퇴골에서 오목한 후면은 볼록한 전면에 비하여 산술평균과 표준편차가  $-13.6 \pm 18.6mV$ 이었으며 중앙값은  $-15.5mV$ 로 옴으로 대전되어 있었으며 이때의 t검사는  $t < 0.005$  이어서 통계

Table 1. The electricity of the various tissues at resting states

Tissue	Number of cases	Tissue-earth voltage difference(mV)
I. Muscle	21	$-229 \pm 25$
II. Soft tissue abscess	4	$-188 \pm 53$
III. Bone(femur shaft)	15	$-141 \pm 30$
IV. Subcutaneous soft tissue	21	$-138 \pm 26$

t test : I-III, III, IV :  $t < 0.05$ , II-III, IV :  $t < 0.05$ , III-IV :  $t > 0.40$ .

Table 2. Piezo-electricity of the rabbit femur



Number : 34 normal femur, Mean :  $-13.6mV$ , Median :  $-15.5mV$ , S.D. :  $18.6mV$ ,  $t < 0.005$

Table 3. Changes of electrical potentials at the fracture site(fracture site-earth)

Post-operative weeks	Number of cases	Bone surface-earth(mV)	Bone holeearth(mV)
I. control	15	$-126 \pm 25$	$-141 \pm 30$
II. 8	6	$-185 \pm 20$	$-209 \pm 23$
III. 12	10	$-152 \pm 36$	$-168 \pm 33$
IV. 22	9	$-151 \pm 18$	$-169 \pm 36$

t test : I-II, III, IV :  $t < 0.05$ , II-III, IV :  $t < 0.05$ , III-IV :  $t > 0.40$ .

골절부의 생전기적 전압을 측정하기 위하여 골막을 벗긴 골절표면과 지표, 골절부의 구멍과 지표 사이의 전압차이를 보면 골절표면과 지표사이에서는 정상 대조군이  $-141 \pm 30mV$ , 수술후 8주에  $-209 \pm 23mV$  12주에  $-18 \pm 33mV$  그리고 22주에  $-169 \pm 36mV$  이어서 골내부는 골표면보다 15-25mV가 더 옴으로 대전되어 있었으며 골절의 수술후 8주에서는 전압이 정상 대퇴간부의 항정전압의 약 50%가 강하 하여 의미있게 강하하고 있음을 관찰할 수 있었다. 그러나 이러한 강하는 시간이 경과할수록 줄어들어 12주에서 22주 사이에서는 고원현상에 접어들며 항정전압 보다 약 20%가 강하하여 대조군보다 의미있게 낮은 것을 관찰할 수 있었다(Table 3).

또한 정상과 골절치유중의 전기적 변화를 보기 위하

여 정상인 우측 대퇴골간과 골절 시켰던 좌측 대퇴골의 골절부와의 전압차이를 보면 골절부는 4주에서  $-53 \pm 16.8mV$ , 8주에서  $-48.2 \pm 17.1mV$ , 12주에서

Table 4. Differences of electrical potentials between the fracture site and normal shaft

Post-fracture weeks	Number of cases	Decrease in potentials(mV)
Control	15	0 $\pm 30.0$
4	2	$-53.0 \pm 16.8$
8	6	$-48.2 \pm 17.1$
12	4	$-39.5 \pm 18.5$
22	9	$-31.2 \pm 6.2$
26	3	$-26.3 \pm 5.1$

-39.5±18.5mV, 22주에서 -31.2±6.2mV 그리고 26주에서 -26.3±5.1mV로서 골절치유의 초기에 팔목할만큼 강하였다가 점차 올라가서 골절치유 3개월 이후에 고원현상에 도달하나 약 6개월에도 정상보다는 낮은 것이 관찰되었다(Table 4).

고 안

골절이나 가관절증에서 전기자극을 이용하려는 시도는 아주 새로운 것은 아니다. 1841년 Hartshorne는 1821년부터 Birch가 "Shock of electric"으로 경골의 부전유합을 성공적으로 치료하였음을 기술하고 있으며 1861년 Garratt는 금으로 된 건극을 사용하여 가관절 증을 치료하려고 시도하였다<sup>17)</sup>. 이들의 시도가 성공하였는지의 여부는 믿을만큼 정확하게 기재된 바 없고, 그 후 전기자극을 이용한 골절의 치료는 거의 무시되어 왔던 것이 사실이다.

밀리볼트(mV)나 마이크로암페어(μA)를 취급하는 전자공학의 발달과 더불어 1939년 Szent-Gyorgyi는 고형의 전자기전이 생리적으로도 의의가 있다고 주장하여 전자공학을 생물학에 도입하게 되었으며<sup>32)</sup>, 1953년 Yasuda는 골에서의 전자기전 즉 역학적응력(mechanical stress)에 의해 발생하는 미세전압 즉 압전기라는 골의 전기적 특성을 발견하였다. 그는 이러한 응력에 의한 미세전압이 골성장을 촉진하는 주요한 요소일 것이라는 가정하에 실험을 계속하여 1μA의 지속적인 전류를 골에 주면 음극쪽에 신생골이 발생함도 발견하였다<sup>33)</sup>.

그 후 여러학자들의 연구에 의하여 압전기는 세포의 생존과는 무관하며 골교원질만 존재하여도 발전됨이 발견되었다<sup>2, 16, 30, 33, 34)</sup>. 그러나 이 응력에 의하여 발생한 전압은 신생골 형성에 관여하는 유일한 전기현상은 아니며 골에는 응력과는 관계가 없는 전기적 음성도도 존재함이 알려져 있다. 이러한 음성도는 골세포의 생존도와 깊은 관계가 있어 활동적인 골 즉 골간단이나, 골절부위에서는 더 낮은 음성도를 보여줌이 밝혀져서 이를 생전기적 전압(big-electrical potential)이라고 부르게 되었다<sup>6, 12, 14)</sup>.

저자의 실험에서는 토끼대퇴부의 오목한 후면 즉 응력을 더 받는 부위가 볼록한 전면보다 -13.6mV의 전압을 나타내어 압전기의 존재를 확인하였다. 또한 생체내의 모든 조직은 지구표면에 대하여 음으로 대전되어 높은 에너지 수준을 유지하고 있으며 보다 분화된 근육은 보다 원시적인 조직인 골이나 피하연부조직보

다 더 음으로 대전되어 있고 골과 피하연부 조직은 거의 같은 음성대전도를 나타내어 원시적인 조직일 수록 음성대전도가 심하지 않다고 볼 수도 있으나 아직 단정할 수는 없는 단계이다.

또한 골절후에는 대조군인 정상 대퇴간부보다 의미 있게 음성도가 증가하여 있으므로 골절의 치유시는 세포와 그 인접조직의 작용으로 발생한 생전기적 전압의 실존함도 간접적으로 증명되었다.

이러한 생리적 전압이 골절후에 어떻게 변화하는가에 대한 관찰에서는 골절치유 8주까지는 정상전압의 약 50%가량 전압이 떨어졌다가 서서히 합정전압으로 되돌아 가고 있었으나 치유 6개월후 까지도 정상전압보다 약 20%정도 강하된 음으로 대전되어 있었다(Fig. 2).

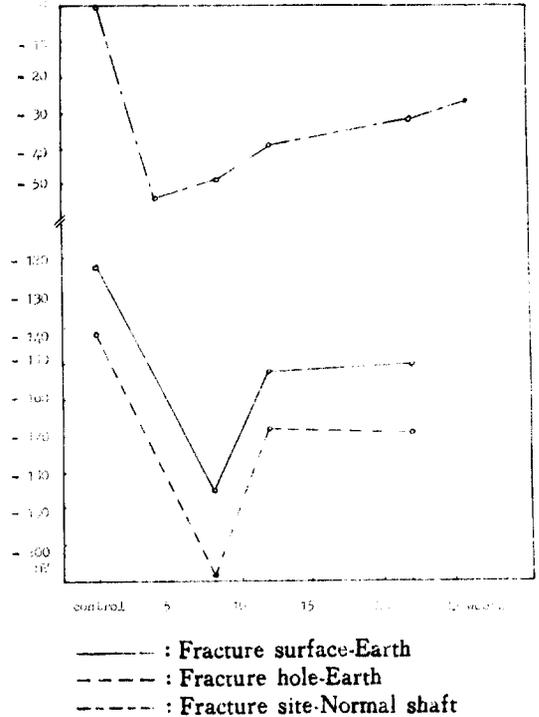


Fig. 2. Differences of electrical potentials.

이 결과는 Lopez-Duran Stern 등의 결과와 일치하는 소견이다<sup>34)</sup>. 여기에서 이 하강된 전압이 언제 정상으로 되돌아 갈 것인가 하는 문제가 발생된다. 토끼의 대퇴골에서 방사선상의 치유는 대략 8~9주 정도면 완성되어 있었으나(Fig. 1) 8~9주 후에도 골의 대사율은 재건(remodelling) 등으로 아직 높을 것이므로 사람에게서는 재건이 완성되어 합정상태를 유지하고 골주사상

(bone scanning)이 정상으로 되돌아가는 약 2년후에는 전압의 하강도 정상으로 되돌아갈 것이 예상되나 과연 토끼의 대퇴골에서 언제 정상으로 되돌아갈 것인가는 현재로서는 정확히 추정할 수가 없다.

미세전기가 어떤 기전으로 골성장을 촉진하는가 하는 문제는 순전히 경험적인 사실이며 합리적으로 증명된 것은 아니다. 즉 골에서 미세전기가 증명되었고 적당한 미세전기 즉 5~20 $\mu$ A의 직류전기나 골 1cm<sup>2</sup>당 1~3mV의 유도전압을 만들어 주는 진동전자자장(pulsed electromagnetic field)을 골에 주면 신생골이 생긴다는 경험적인 사실이다<sup>1, 2, 5, 10, 13, 20, 22, 23</sup>.

미세전기 자극이 신생골형성을 촉진시킨다는 이론으로서 Brighton은 미세전기 자극이 골조직은 산소분압을 낮추고 알칼리성 pH를 만들어 주어 골세포와 연골세포의 주대사과정인 혐기성 대사과정(anaerobic metabolic pathway)에 유효하게 작용할 것이라고 설명하고 있으며<sup>6, 7</sup> Yasuda는 미세전기 자극이 직접 신생골형성을 유도한다고 주장하였고<sup>23</sup> Norton 등은 미세전기 자극을 주면 성장판에 cyclic AMP가 변동하여 골형성을 촉진시킨다고 주장하고 있다<sup>24</sup>.

이들의 주장은 미세전기가 골형성을 촉진하는 직접 혹은 간접적인 원인이 된다는 것인데 이러한 변화가 전기자극과 관련된 하나의 현상일 가능성을 완전히 배제하지 못하고 있으며 미세전기가 골절치유의 결과이며 부산물이 아니라는 증거를 밝히고 있지는 못하다.

미세전기 자극이 골형성을 촉진시키리라는 것은 다음 두가지 면에서 설명될 수 있다. 첫째로 미세전기 자극이 골이나 연골에 직접 작용하여 골형성을 촉진시킨다는 가정으로서 골이나 연골세포에 미세전기자극을 주고 그 전기량이 아주 미세하여 세포나 조직의 기존 음전압에 영향을 주지 못하거나 또는 너무 과도하여 피사를 일으키지 않는 정도라면 즉 저정량의 전기자극이라면 그 음극쪽에서 활성화되는 전자는 인접조직이나 세포의 에너지수준을 높여 그들을 활성화 하므로서 그 대사과정을 촉진시킬 수 있을 가능성이 있다.

둘째는 미세전류 및 전압이 골이나 연골세포의 증가된 활동의 부산물일 경우로서 이러한 부산물의 미세전기를 미리 줌으로써 골형성과 파괴의 평형이 형성쪽으로 가도록 촉진시킬 수도 있을지 모른다.

### 결 론

성숙한 토끼의 좌측 대퇴골 골간 증상에 골절을 만들어 변화하는 미세전압을 시간의 경과에 따라 측정하

고 이 값을 반대쪽 정상 대퇴골간의 수치와 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 토끼의 정상 대퇴골 표면의 오목한 쪽은 불룩한 쪽보다 -13.6mV가 더음으로 대전되어 있어 응력에 의해 발생하는 골전압 즉 piezo-electricity의 존재를 인정할 수 있었다.
2. 골절된 대퇴골의 골절부는 대조군에 비해 의미있게 강하여 있었으므로 살아있는 골의 증가된 작용에 의해 발생된 생전기적 전압의 존재를 간접적으로 확인할 수 있었다.
3. 골절시킨 토끼의 대퇴골에서 골절의 치유로 인한 전압은 치유 8주후에는 함전전압보다 약 50% 강하여 있었으며 6개월후에도 약 20%가 낮았다. 이러한 전압의 강하는 골절에 기인된 대사과정이 정상으로 되돌아갈때 함정전압으로 되돌아갈 것으로 사료되며 사탐에서는 약 2년이 걸릴 것으로 생각된다.

### REFERENCES

- 1) 이덕용, 최인호, 이상훈, 정문상: 전기자극을 이용한 선천성 경골 가관절증 치험 1례보고. 대한정형외과학회지. 15 : 2 : 350, 1980.
- 2) Bassett, C.A.L., and Becker, R.V.: Generation of electric potentials in bone in response to mechanical stress. *Science.*, 137:1063, 1962.
- 3) Bassett, C.A.L., Pawluk, R.J., and Pilla, A.A.: Augmentation of bone repair by inductively coupled electromagnetic fields. *Science.*, 184 : 575, 1974.
- 4) Bassett, C.A.L., Pawluk, R.J., and Becker, R.O.: Effects of electric current on bone in vivo. *Nature*, 204 : 652, 1964.
- 5) Becker, R.O., Spadaro, J.A., and Marino, A.A.: Clinical experiences with low intensity direct current stimulation of bone growth. *Clin. Orthp.*, 124 : 75, 1977.
- 6) Becker, R.O.: The bioelectric factors in amphibian limb regeneration. *J. Bone Joint Surg.*, 43A : 643, 1961.
- 7) Brighton, C.T., Ray, Soble, L.W., and Kuettner, K.E.: In vitro epiphyseal plate growth in various oxygen tensions. *J. Bone Joint Surg.*, 51-A : 1383, 1969.
- 8) Brighton, C.T., and Krebs, A.A.: Oxygen ten-

- sion of healing fractures in the rabbits. *J. Bone Joint Surg.*, 54A : 323, 1972.
- 9) Cieszynski, T.: *Studies on the regeneration of ossal tissue. 11. Treatment of bone fractures in experimental animals with electric energy.* *Arch. Immunol. Ther. Exp.*, 11 : 199, 1963.
  - 10) Connolly, J.F., Hahn, H., and Jarpon, O.M.: *The electrical enhancement of periosteal proliferation in normal and delayed fracture healing.* *Clin. Orthop.* 124 : 97, 1977.
  - 11) Friedenberg, Z.B., Anderews, E.T., Smolenski, B.I., Pearl, B.W., and Brighton, C.T.: *Bone reaction to varying amount of direct current.* *Surg. Gynecol. Obstet.*, 131 : 894, 1970.
  - 12) Friedenberg, Z.B., and Brighton, C.T.: *Bioelectric potentials in bone.* *J. Bone Joint Surg.* 48A-915, 1966.
  - 13) Friedenberg, Z.B., Harlow, M.C., and Brighton, C.T.: *Healing of nonunion of the medial malleolus by means of direct current a case report.* *J. Trauma*, 11 : 883, 1971.
  - 14) Friedenberg, Z.B., Harlow, M.C.: *Heppenstall, R.B., and Brighton, C.T.: Cellular origin of bioelectric potentials in bone.* *Calcif. Tissue Res.*, 13 : 53, 1973.
  - 15) Friedenberg, Z.B., Roberts, P.G., Didizian, N. H., and Brighton, C.T.: *Stimulation of fracture healing by direct current in the rabbit fibula.* *J. Bone Joint Surg.*, 53-A : 1400, 1971.
  - 16) Fukada, E. and Yasuda, I.: *On the piezo-electrical effect of bone.* *J. Physiol. Soc. Jpn.*, 12 : 1158, 1957.
  - 17) Garrett, A.C.: *Electrophysiology and electrotherapeutics.*, Boston. 1860.
  - 18) Hartshorne, E.: *Pseudarthrosis.* *Am. J. Med. Sci.*, 1 : 121, 1841.
  - 19) Jorgensen, T.E.: *The effect of electric current on the healing time of crural fractures.* *Acta Orth. Scand.*, 43 : 421, 1972.
  - 20) Jorgensen, T.E.: *Electrical stimulation of human fracture healing by mean of a slow pulsating, assymmetric direct current.* *Clin. Orthp.*, 124 : 124, 1977.
  - 21) Lavinc, L.S., Lustrin, I., and Shamos, M.H.: *Experimental model for studying the effect of electric current on bone in vivo.* *Nature.*, 224 : 1112, 1964.
  - 22) Lavine, L., Lustrin, I., and Shamos, M.H.: *Treatment of congenital pseudarthrosis of the tibia with direct current.* *Clin. Orthp.*, 124 : 69, 1977.
  - 23) Levy, D.D., and Rubin, B.: *Inducing bonegrowth in vivo by pulse stimulation.* *Clin. Orthop.*, 88 : 218, 1972.
  - 24) López-Duran, L., and Yageya, J.: *Bioelectical potentials after fracture of the tibia in rats.* *Acta. Orthp. Scand.*, 51 : 601, 1980.
  - 25) Masureik, C., and Eriksson, C.: *Preliminary clinical evaluation of the effect of small electrical currents on the healing of jaw fractures.* *Clin. Orthop.*, 124 : 84, 1977.
  - 26) Minkin, C., Paulton, B.R., and Hoover, W.H.: *The effect of direct current on bone.* *Clin. Orthop.*, 57 : 303, 1968.
  - 27) Noguchi, K.: *Study on dynamic callus and electrical callus.* *J. Jph. Orthop. Surg. Sac.*, 31 : 641, 1957.
  - 28) Norton, L.A., Ronan, G.A., and Bourrent, L.A.: *Epiphyseal cartilage CAMP changes produced by electrical and mechanical protuberance.* *Clin. Orthp.*, 124 : 59, 1977.
  - 29) O. conner, B.T., Charlton, H.M., Currey, J.D., Kirby, D.R.S., and Woods, C.: *Effects of electric current on bone in vivo.* *Nature.*, 222 : 162, 1969.
  - 30) Shanos, M.H., Lavine, L.S., and Shamos, M.I.: *Piezoelectric effect in bone.* *Nature.*, 148 : 157, 1941.
  - 31) Smith, S.O.: *Induction of partial limb regeneration in rena pipicus by galvanic stimulation.* *Anat. Rec.* 158 : 89, 1967.
  - 32) Szent-Gyorgyi, A.: *The study of energy level in biochemistry,* *Nature.*, 148 : 157, 1941.
  - 33) Yasuda, I.: *Fundamental aspects of fracture treatment.* *J. Kyoto Med. Soc.*, 4 : 395, 1953.
  - 34) Yasuda, I.: *Noguchi, K., and Sata, T.: Dynamic callus and electric callus.* *J. Bone Joint Surg.*, 27-A : 1292, 1955.