

전기 자극을 이용하여 치료한 선천성 가관절증과 불유합의 임상 경험

서울대학교 의과대학 정형외과학교실

정문상 · 한문식 · 이덕용 · 이상훈 · 김용훈

= Abstract =

Clinical Experiences of Congenital Pseudarthroses and Non-Unions by Direct Current Stimulation

Moon Sang Chung, M.D., Moon Sik Hahn, M.D., Duk Yong Lee, M.D., Sang Hoon Lee, M.D.
and Yong Hoon Kim, M.D.

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

Congenital pseudarthroses and non-unions have been recognized as some of the most challenging problems in orthopaedic surgery. with a standard surgical procedure, such as bone grafting, nailing, plating or a combination of these, it was frequently failed to unite. After repeated surgical failures, amputation has been the main course. With the advent of an electrical control of osteogenesis, however, this dismal outlook is brightening.

The earliest report of the use of electrical energy to directly stimulate bone healing seems to be in 19th century, but it was not reliable. In this century, the electrical properties of bone were first described by Yasuda et al in 1953. After then, several investigators have shown that the application of small amounts of the electrical current to bone stimulates osteogenesis at the site of the cathode. Clinical trials using various forms in the treatment of delayed union, non-union, and congenital-pseudarthrosis began early in the 1970's. Constant direct current, pulsed current, and electromagnetically induced current have all been used clinically to heal bone defects with varying degrees of success. But, to this date it is unknown what is the mechanism of stimulating bone healing with electricity, and which form of electricity is most efficient in stimulating osteogenesis.

We have experienced direct current stimulation to promote osteogenesis in 9 cases of non-union and 4 cases of congenital pseudarthroses of the tibia from August, 1978 to December, 1980. Of 9 non-unions, 7 (77.8%) achieved solid bony union. We had obtained bony union in 4 cases of non-union only with the electrical stimulation. In 4 cases of congenital pseudarthroses of the tibia, all cases achieved solid bony union with the electrical stimulation and bone graft, but in 3 cases, refractures were occurred. At this moment, our conclusions from this study are as follows.

1. Direct current stimulation is one of the reliable methods inducing osteogenesis.
2. Regular follow-up and determination of the stimulator integrity are essential steps in the electrical stimulation.
3. Combined treatment with the electrical stimulation and bone graft have markedly improved the success rate.

* 본 연구는 서울대학교 병원 임상 연구비의 보조로 이루어졌음.
** 본 연구에 도움을 주신 이은우, 정우구, 김영태 선생님에게 감사드립니다.

4. In direct current stimulation of congenital pseudarthrosis, the mechanically sound bony alignment, massive bone graft and protection using long leg brace seem to be mandatory procedures.

Key Words: Direct Current Stimulation, Congenital Pseudarthroses, Non-Union

서 론

전기 자극(electrical stimulation)이 골생성(osteogenesis)을 촉진할 수 있다는 것은 1953년 Yasuda²⁰⁾에 의해 골의 전기적 성질이 보고된 이래 많은 실험과 임상 연구를 통해 현재는 거의 입증되어 있다. 1812년에 Mr. Birch²¹⁾가 "shocks of electronic" fluid로 경골 불유합을 치료하였다는 보고가 있으며 그후 1860년 Garrett²²⁾에 의해 선천성 가관절증에 적용하여 성공하였다고 보고하였다. 그후 특별한 주목을 끌지 못하다가 Yasuda의 연구가 발표된 이후 현재까지 120가지 이상의 논문이 나오면서 각광을 받기 시작하였다. 임상적으로는 1971년 Friedenber²³⁾ 등이 경골 내측 추골(medial maleolus)의 불유합에서 골유합에 성공한 1례를 최초로 보고하였다.

본 서울대학교 의과대학 정형외과학 교실에서는 자체에서 생산한 기구를 이용하여 9례의 불유합과 4례의 선천성 경골 가관절증 환자에 시행하여 만족할만한 결과를 얻었기에 문헌 고찰과 함께 보고하는 바이다.

방 법

현재까지 발표된 전기 자극 방법은 크게 3가지로 분류할 수 있는 바, 첫째는 전기 자극 기구를 신체내에 완전히 삽입하는 invasive technique, 둘째는 전류의 생성기구는 체외에 있으면서 전극(electrode)을 체내에 삽입하는 semi-invasive technique, 세째 모든 기구가 체외에 있게 되는 noninvasive technique이다. 저자들이 사용한 것은 Brighton에 의해 실시되었던 semi-invasive한 방법과 유사한 것으로 9V의 전전지를 사용하여 15~20 μ A의 미세 전류를 통하게 하는 전류 조절기를 체외에 두고 전극을 체내에 삽입하는 방법을 이용하였다(Fig. 1).

사용된 기구는 크게 3가지로 이루어지는데, 첫째는 미세 전류 조절기로서 변화하는 저항에 대하여 일정한 전류가 흐르도록 하는 것이고, 둘째는 전원으로서는 9V의 전전지를 사용하였으며, 세째는 전극으로서 stainless steel—즉, 일반적으로 이용되는 Kirschner wire를 polyethylene등으로 insulation하여 그 끝에서만

전류가 통하도록 하여 골내에 주입하였다. 전극 삽입 방법으로는 초기에는 하나의 양극(anode)을 골절과 떨어진 같은 골에 주입하고 하나의 음극(cathode)을 직접 골절 부위에 삽입하였으나 현재는 두개의 음극을 이용하고 있다. 환자는 전극을 삽입한 후 퇴원하여 1주일에 한번씩 전전지를 교환하고, 한달에 한번씩 내원하여 흐르는 전류량을 확인하였다.

Fig. 1. 전기 자극 기구.

가) 미세전류 측정기. 나) 전원 다) 전극(음극 2, 양극 1), 라) 미세 전류 조절기.

증 례

9례의 불유합과 4례의 선천성 경골 가관절증 환자에 시행하였는 바, 이중 불유합은 경골 간부가 4례, 대퇴골이 4례 그리고 경골 내측 추골이 1례이었으며 골절후 평균 기간은 14.3개월이고 전에 수술을 받은 횟수는 평균 1.4회이었다. 이중 3례는 감염이 같이 있었던 예이었다.

선천성 경골 가관절증 환자는 4례로서 평균 1.3회에 간은 3.8년이었다(Table 1).
 걸쳐 수술을 받은 적이 있었으며 수술전 평균 이환 기 이들중 3례는 전에 보고된 바가 있었던 예이다^{1,2)}.

Table 1. Case analysis

Sex/Age	Diagnosis	Duration (yrs)	Previous Op.	Combined Op.	Duration of stim. (mos)	Result	Complication
1 M/ 9	Cong. P., tibia	7	BG (Allo)	BG (DO)	4	U	—
2 M/ 7	Cong. P., tibia	3	—	BG (DO)	4	U	refracture
3 M/35	Nonunion, femur	2	O/R & I/F	I/F	3	U	—
4 M/32	Nonunion, tibia	8/12	cast	—	3	U	—
5 F/ 2	Cong. P., tibia	1 3/12	1. cast 2. plate & BG 3. IM & BG	BG(SO)	4	U	refracture
6 M/8	Cong. P., tibia	4	IM & BG	1. I/F & BG 2. I/F & BG	1. 4 2. 3	U U	refracture —
7 M/33	Nonunion, femur	8/12	O/R & I/F	PP	4	UU	—
8 M/44	Nonunion, tibia	1	1. cast 2. BG	—	3	U	—
9 M/55	Nonunion, m. mall.	8/12	cast	—	3	UU	—
10 M/36	Nonunion, femur	1	1. O/R & I/F 2. PP	PP & BG	3	U	angulation
11 F/46	Nonunion, tibia	3	1. BG 2. BG	—	3	U	—
12 M/33	Nonunion, femur	10/12	PP	PP	12	U	—
13 M/27	Nonunion, tibia	11/12	1. O/R & I/F 2. PP	—	5	U	—

* Cong. P. : Congenital pseudarthrosis

BG : Bone graft, DO : Dual onlay, SO : Single onlay, PP : Pins & plaster, IM : IM nailing,

U : United, UU : Ununited.

증례 6. 이○○ 남자, 8세

선천성 경골 가관절증 환자로 전에 수차례에 걸쳐 석고고정과 한 차례의 골이식술을 받았으나 골유합에 실패하였던 예이다(Fig. 2).

일차 수술로 고정 절골술과 골수강내 금속 고정술 및 골이식술을 시행하여 5개월 후에 골유합을 이룰 수 있었으나 1년 6개월 후에 자연적으로 다시 골절이 되었다. 2차 수술로 관혈 정복술 후에 4 hole 금속판으로 고정하고 골이식술을 시행하였으며 술후 1주일부터 상기된 방법의 전기 자극을 시작하였다. 전기 자극을 4개월간 시행한 후 골유합을 이룰 수 있었으나, 다시 3개월 후에 친구에게 차인 후 골절 되었다. 3차 수술로 삽입된 금속판을 제거하고 다시 6 hole 금속판으로 고정함과 동시에 골이식을 시행한 후 전기 자극을 재차 시행하였다. 3개월간의 전기 자극후 bridging callus

를 보이고 있어 전기 자극을 중지하였으며 현재 장하지 보조구(long leg brace)를 한 채로 보행하고 있다.

증례 11. 조○○ 여자, 46세

3년전에 교통사고로 우측 경골 간부의 골절을 입은 후, 약 6개월간 장하지 석고 고정을 하였으며 그후 두 차례에 걸쳐 골이식술을 받았으나 골유합이 이루어지지 않았다. 입원 당시 방사선 소견상 elephant foot type의 불유합을 보이고 있으며 거시적으로도 가관절을 형성하고 있었다.

오직 전기 자극만을 3개월간 시행하여 가관 형성을 보였으며 그후 두달간 PTB석고 고정을 하여 안정을 도모한 바 시술후 5개월에는 완전한 골유합을 얻을 수 있었다(Fig. 3).

Fig. 2. 증례 6. 선천성 경골 가관절증, 남자, 8세 : 가. 1차 입원시 수술전 방사선 소견 : 심한 전 내측 굴곡 변형을 보였다. 나. 수술 5개월 후의 방사선 소견 : 골수강내 금속 고정술 및 골이식술을 시행하여 골유합을 얻었다. 다. 1년 6개월 후의 방사선 소견 : 재골절이 일어남을 보여 준다. 라. 2차 수술 후의 방사선 소견 : 금속판으로 고정하고 골이식술을 한 후 전기 자극을 하였다. 마. 2차 수술 후 4개월 뒤의 사진 : 골유합이 되었음을 보여 준다. 바. 2차 수술 후 7개월 뒤의 사진 : 친구에게 차인 후 재골절이 발생되었다. 사. 3차 수술 직후의 방사선 소견 : 2차 수술과 동일한 것을 재차 시행하였다. 아. 3차 수술 후 3개월 뒤의 사진 : 골유합이 되었으며 양극 부위에서 골흡수가 일어나는 것도 볼 수 있다.

증례 분석

13례에서 14회 시행하여 12회에서 골유합을 성공하여 85.7%의 성공률을 보였다. 이중 골이식술을 같이 시행한 예는 6회로서 Boyd's dual onlay graft가 2례 single onlay graft가 1례 이었으며 망상골 이식술(cancellous bone graft)을 한 예가 3회이었다. 이 6례에서는 모두 골유합에 성공하여 100%의 성공률을 보였다. 감염이 같이 있었던 3례(증례 7, 10, 13)에서는 2례에서 골유합을 보여 67%의 성공률을 보였다. 자극 기간은 3~4개월이었으나 증례 12에서는 전극이 골절

에서 자주 벗어나 모두 12개월에 걸쳐 시행하였다.

불유합 9례에서는 7례에서 골유합을 이루어 77.8%의 성공률을 보였으며 이중 전기 자극만을 시행한 5례에서는 4례(80%)에서 골유합을 이루었고 금속 내고정술을 같이 시행한 1례와 pins and plaster와 골이식술을 같이 한 1례에서는 모두 골유합을 이루었으며 pins and plaster를 같이 시행한 2례 중 1례에서만 골유합을 성공하였다.

실패의 원인으로 생각될 수 있는 것은 확실하지는 않지만 증례 7에서는 만성 골수염이 같이 있었기 때문인 것으로 보여지며, 증례 9에서는 특수한 사정으로 정기적인 전류량의 확인을 시행하지 않아서 확실한 원

Fig. 3. 증례 11. 3년된 경골 불유합. 여자, 46세.

가. 시술전 방사선 소견 : 전형적인 불유합의 소견을 보여 주고 있다.

나. 시술직후의 방사선 소견 : 전극만을 삽입하고 전기 자극을 시행하고 있다.

다. 시술 5개월후의 방사선 소견 : 골유합이 되었음을 보여준다.

인을 알 수는 없으나 불충분한 전류량이 원인이었거나 혹은 기구 자체의 문제가 있지 않았는가 생각되어 진다.

선천성 경골 가관절증 4례에서는 5회에 걸쳐 모두 골이식술을 같이 시행하여 전례에서 골유합을 이루었으나 이중 3례에서는 재골절(refracture)이 일어났다. 따라서 앞으로는 골유합보다는 재골절을 방지하는 것이 가장 중요한 점이라 하겠으며, 이들 재골절이 일어난 3례는 모두 단 하지 보조구로 보호(protection)를 한 예이었고 재골절이 일어나지 않은 1례에서는 장 하지 보조구를 착용하였던 바, 장 하지 보조구를 착용함으로써 재골절을 방지할 수 있을 것으로 사료된다. 여기에 완전한 골선열(bony alignment)과 다량의 골이식이 추가되면 재골절의 방지는 가능할 것으로 본다.

pin 감염을 보였던 증례 13 외에는 특별한 부작용은 인지되지 않았다.

고 안

1. 전기 자극의 역사적 고찰

19세기에 Mr. Birch²⁴⁾, Dr. Galett²⁵⁾ 등에 의해 최초로 시행되었다고 하는 보고도 있으나 그 시술 방법

과 결과등이 정확히 알려져 있지 않고 또한 그 당시는 전기공학이 현대처럼 발달되지 않은 상태이어서 실험성이 떨어지는 바, 전기 자극의 효시로는 Yasuda^{26,27)}를 들 수 있겠다. Yasuda^{26,27,28)}는 1953년 가토(rabbit)의 대퇴골에서 1 μ A로 3주간 vitallium needle 전극을 통하여 지속적인 전류 자극을 하여 신생골(new bone)이 형성되는 것을 보고 이물 piezoelectricity, 즉 기계적인 stress로 전기 잠재성(electrical potential)이 발생하는 것에 의한 것이라고 하였다. 즉, 압축력(compression)을 받는 곳에서는 전기적 음성이 되어 골형성이 일어나고 긴장력(tension)을 받는 곳에서는 전기적 양성이 되어 골흡수가 일어난다고 하였으며 이는 Küntschere에 의하여 제창되었던 골절없는 가골(callus without fracture), 즉, 기계적(mechanical), 열(thermal), 화학적(chemical) 자극(irritation)에 의해 가골이 형성될 수 있다는 것을 실험적으로 증명한 것이다.

그후 1964년 Basett와 Becker는²⁹⁾ 골에서의 stress-generated voltage를 관찰하여 이를 semiconduction mechanism에 의한 것이라고 설명하였고, 1966년 Friedenbergl와 Brighton²⁰⁾은 stress없이도 골에는 전기 잠재성이 있어 골간단에는 음성이 골단과 골간에는 양

성이 존재하며 만약, 골절이 되면 이 부위가 음성을 나타내는 것을 관찰하여 이를 bioelectricity라고 하였다. 1971년 Basett^{4,5)}는 직류(direct current) 뿐만 아니라 파동 전류(pulsating current)에 의해서도 골절치유를 촉진할 수 있다고 하였으며 이를 임상에 적용하여 발표하였다. 1971년에 Friedenber²¹⁾ 등은 10 μ A의 직류 자극을 내측 추골의 불유합에 사용하여 치유에 성공하였다. 1972년 Lavine^{22,23)} 등은 처음으로 선천성 가관절증에서 직류 전기를 사용하여 4개월만에 유합된 1례를 보고하였으며, 1975년 Brighton^{10,14)} 등은 semi-invasive technique으로 직류 자극을 사용하여 선천성 가관절증 5례와 불유합 24례를 치료하여 보고하였고 다시 1981년 불유합 269례를 모아 발표하였다. Paterson^{21,22)}은 1980년 invasive technique으로 직류 자극을 시행하여 치료한 선천성 경골 가관절증 6례, 불유합과 지연 유합 84례를 보고하였다.

2. 전기 자극의 일반적 고찰

전기 자극으로써 골생성을 촉진할 수 있다는 것은 많은 연구와 임상 실험을 통해 경험적으로 입증되었다^{6, 8, 16, 18, 19, 23, 25, 28, 33, 35, 37)} Spadaro (1977)³⁴⁾는 전기 자극에 대해 보고한 119개의 논문들을 총괄하여 검토한 바, 단 6개의 보고에서만 회의적인 반응을 보였다고 한다. Connolly¹⁶⁾에 의하면 이러한 전기 자극은 골형성 기간을 단축하는 것은 아니고, 그 유도(induction)에 도움을 주며 유도후에 골유합까지의 기간은 일반적으로 골절 치유에 소요되는 기간과 동일하다고 하였다.

전기 자극의 장점으로서서는 첫째, 수술적 가로가 필요없으며 간단한 시술로 적용할 수 있다는 점, 둘째, 입원 기간을 줄일 수 있으며 때로 외래에서도 시행할 수 있다는 점, 셋째 이환율이 낮으며 시술후 통증이 적다는 점, 넷째 적은 위험도로도 높은 효과를 얻을 수 있다는 점, 다섯째 사용 기구들이 휴대용이어서 임상 활동이 가능하다는 점, 여섯째, pulsating magnetic field를 제외한 방법에서는 금속 고정술과 골이식술들을 동시에 시행할 수 있다는 점, 일곱째, 감염된 불유합에서도 사용될 수 있다는 점이며 최근에는 전기 자극으로 감염증을 치료하려는 움직임도 있다.⁷⁾

단점으로 들 수 있는 것은 첫째, 대부분의 골절은 자연 치유되므로 일상적으로 사용될 수는 없다는 점, 둘째, 전극을 삽입함으로써 이를 제거하기 위한 시술이 필요하다는 점, 셋째, 아직 발전되지는 않았으나 이러한 전기화학적 반응에 의한 부산물(electrochemical by-products)들이 일으킬 수 있는 부작용의 가능성, 네

째, 아직 작용기전(mechanism of action)이 밝혀지지 않은 점이다.

이러한 전기 자극의 부작용은 pin 감염, 양극하에서의 자극 및 골흡수, 전극의 절단, 음극의 돌출등이 보고되었으나 대부분 효과에 비한다면 무시할 수 있는 정도이며 Brighton¹⁰⁾은 43예의 골수염이 있었던 예중 2례에서 만성 골수염이 재발하는 것을 관찰하였으나 이는 일반적인 골수염의 재발률에 비하면 낮은 것이다.

전기 자극이 실패한 원인으로 거론되었던 것들은 첫째, 불충분한 전류량이 가장 많은 원인이었으며, 둘째, 음극의 위치가 좋지 않은 경우, 셋째, 석고 고정등의 외고정을 너무 빨리 제거한 경우, 넷째, 환자의 협조가 불충분하였던 경우, 다섯째, steroids를 투입하였거나 감염이 같이 존재하였던 경우, 여섯째는 원인불명인 경우들을 들 수 있으며 마지막을 제외한 경우에는는 그 실패 요인을 감소시킴으로써 보다 높은 성공률을 이룰 수 있을 것으로 보인다.

3. 결과 비교(Table 2)

가. 선천성 가관절증

Masserman (1974)³⁰⁾은 Mayo clinic에서 고전적 요법으로 치료하였던 52례의 선천성 가관절증을 검토하였는 바, 모두 174회의 수술을 받아 평균 3.5회이었고 수술적 치료를 받았던 36례중 15례에서 골유합을 이루어 42%의 성공률을 보고하였다. Brighton¹⁴⁾은 모두 5례에서 시행하여 이중 1례에서 골유합을 이루어 낮은 성공률을 보고하였으나 이들은 골이식술들을 시행하지 않고 전기 자극만을 시행한 예이다. Paterson²²⁾은 골이식술을 동시에 시행한 6례중 5례에서 성공하였고 그중 1례는 재골절이 나타나 2회에 걸쳐 실시하였으며 성공한 다른 4례는 모두 장 하지 보조구로 보호(Protection)하였었다. Basett⁵⁾은 electrical magnetic field를 사용하여 치료한 34례를 모아 발표한 바, 이중 17례(50%)에서는 완전한 유합을 이루었으며, 7례(21%)에서는 골유합은 되었으나 불충분한 기능을 보였고, 10례(29%)에서는 실패하였다. 완전한 골유합을 보인 17례중 13례에서는 골이식술을 같이 시행한 예이다. 저자들은 골이식술을 동시에 시행하여 전례에서 골유합을 이룸으로써 보다 높은 성공률을 보였으나 3례에서 재골절이 일어나 이를 방지하는 것이 가장 중요하다고 하겠다.

나. 불유합

저자들은 다른 보고들과 거의 비슷한 결과를 얻을 수 있었으며 특히, 3례의 감염례에서 2례를 성공하여

Table 2. Comparative analysis of electrical stimulation

Model		Nonunion		Congenital pseudarthrosis		Total	
		No. of cases	Union rate(%)	No. of cases	Union rate(%)	No. of cases	Union rate(%)
Brighton	Semi-invasive D.C.S.	189 (1981)	78.8	5 (1977)	20.0	194	77.3
Basett (1977)	Non-invasive E.M.F.	13	79.9	12	75.0	25	76.0
Paterson (1980)	Invasive D.C.S.	84	85.7	7	85.7	91	85.7
Authors (1981)	Semi-invasive D.C.S.	9	77.8	5	100.0	14	85.7

특기할만하다 할 수 있다.

Boyd (1961)¹⁰⁾는 842례의 지연 유합과 불유합에서 골이식술로 치료하여 1차 수술에서 88%, 최종 94%의 성공률을 보고하여 보다 좋은 결과인 듯이 보이나, 이들의 평균 이환기간은 8개월이어서 저자들의 14.3개월 Brighton의 2.7년 보다는 짧은 것이었고, 치유의 소요기간이 평균 8개월로 저자들의 4.3개월 보다 길었으며 골이식술을 받은 적이 있는 예에서 시행한 경우는 66%의 성공률로 저자들의 전례 성공률보다는 낮았으며, 감염예에서는 감염 치유후 6개월 이상은 기다려야 하는 것이 약점이었다.

4. 작용 기전에 대한 가설

전기 자극이 골생성을 촉진한다는 것은 경험적으로 입증되었으나 아직 그 작용 기전에 대해서는 합리적으로 알려진 바가 없다.

Brighton¹¹⁾에 의하면 음극이 산소를 소모하여 (oxygen consumption) $2H_2O + O_2 + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ 라는 반응을 나타내 국소 조직의 산소 분압을 떨어뜨리고 산도 (pH)를 증가시키게 되어 골생성을 촉진한다고 하였다 이러한 근거로서는 첫째, 골성장판 (growth plate)의 골연골 이환부 (bone-cartilage junction)와 골절시 생성된 가골에서의 산소 분압이 낮은 점과,^{12,13)} 둘째, 생체의 (in vitro) 실험에서 산소 환경이 낮은 곳에서 골성장기가 왕성하다는 점,¹⁵⁾ 세째로는 성장판에서의 골과 연골 세포들은 주로 무기성 물질대사로 (anaerobic metabolic pathway)를 갖는 점등을 들었다. 그러나, 이러한 점들은 모두 골형성에 있어서 일어날 수 있는 수많은 현상중 일부만을 보고 미루어 짐작하는 것이며 그러한 현상 자체의 신빙도도 떨어지는 것으로, 인정되기 곤란한 가설로 생각되어 진다. 그예로 Basett¹⁶⁾는 이와 반대로 산소 분압이 높고 압축력 (compression

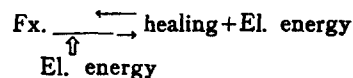
force)이 있을 때는 골이 형성되고 산소 분압이 낮을 때는 연골이 형성된다고 하여 반대의 현상을 보고하였다.

저자들의 견해로는 두가지 측면에서 가설을 세울 수 있는 바, 즉 전기적 에너지가 작용하는 위치에 대한 것이다. 첫째는 전류 자체가 골절 치유를 촉진할 수 있다는 가설로서 골절에 전기적 에너지가 가해짐으로써 골절 치유가 일어난다는 것으로 다음과 같은 식으로 표시할 수 있다.



Brighton의 가설은 이와 같은 측면의 것으로서 전기적 에너지가 아닌 산소 분압과 pH의 역할로써 골절 치유가 된다는 것이다.

두번째 가설로는 전기적 에너지는 골절 치유의 부산물이라는 측면이다. 즉, 전기적 에너지는 하나의 측면으로써 작용한다는 것으로 다음과 같은 식으로 표시될 수 있다.



이때의 골절치유의 결과로 나타나는 전기적 에너지는 일종의 적은 량의 bioelectrical potential이다. 이러한 반응의 예로서는 흔히 사용되는 석고를 들 수 있다. 즉, 석고가 굳어지는 것을 화학 방정식으로 보면



이때, 이 반응에 열 (heat)을 가하면 보다 빠른 반응이 우측으로 진행되어 소위 말하는 rapid-setting이 가능하게 되는 것이다. 저자들의 견해로는 후자의 측면이 보다 타당성이 있는 것으로 생각되어진다. 즉, 전기 자극 자체는 골생성을 촉진하지는 않는 것이고 골

치유는 적절한 환경(millieu)이 조성되면 자연히 촉진될 수 있다고 생각되며 이러한 적절한 환경중의 하나가 electricity이라고 여겨진다. 이러한 환경의 요인이 될 수 있는 것들로는 산소 분압, electricity, 온도, 습도, 산도(pH) 등 여러가지가 있을 것이며 각 요인들에 있어서 골생성의 적절한 정도가 있을 것이다. 이중에 electricity는 Yasuda, Friedenbergt등에 의해 증명되었다고 볼 수 있다. Friedenbergt¹⁹⁾는 가토의 경골에서 실험한 결과 전류량이 5 μ A이하일 때는 골이 형성되지 않으며 5~20 μ A일 때 가장 왕성한 골형성이 일어나고 30 μ A이상일 때는 골괴사(osteonecrosis)가 일어난다고 하였다. 이것을 저자들이 세운 가설에 비유한다면 electricity라는 환경은 5~20 μ A일 때 가장 적절한 것이 되는 것이다.

결 론

본 서울대학교 의과대학 정형외과학교실에서는 1979년 8월 부터 1980년 12월까지 국립 의료원, 을지병원, 필동 성심 병원의 협조를 얻어 모두 9명의 불유합과 4명의 선천성 경골 가관절증을 semi-invasive technique으로 직류 자극을 시행하여 11례에서 골유합을 이루어 85%의 성공률과 함께 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 직류 전기 자극(direct current stimulation)은 골형성(osteogenesis)을 유도하는 믿을 만한 방법이라 할 수 있다.
2. 정기적인 추시 관찰로 전기 자극량을 측정하는 것이 중요하다.
3. 전기 자극과 골이식술을 같이 시행하여 견해에서 골유합을 이룰 수 있었다.
4. 선천성 가관절증에서는 골이식술을 같이 시행하여 골유합을 얻는 때는 어려움이 없으나 재관절을 방지하기 위하여는 역학적으로 견고한 골 선열(alignment)을 얻는 것과 다량의 골이식이 필요하며, 가능하면 장하지 보조구를 사용하여 장기간 보호(protection)하는 것이 중요하다.

REFERENCES

- 1) 김동호, 박명현, 정문상, 오정일, 정은구: 전기자극을 이용한 지연유합과 부전유합의 치료. —치형 2례보고—. 최신의학, 제23권 제11호: 43—47, 1980.

- 2) 이덕용, 최인호, 이상훈, 정문상: 전기자극을 이용한 선천성 경골 가관절증. —치형 1례 보고— 대한정형외과학회지, 제15권 제2호: 350—355, 1980.
- 3) Bassett, C.A.L.: *Current Concepts of Bone Formation*. *J. Bone and Joint Surg.*, 44-A: 1217—1229, 1962.
- 4) Bassett, C.A.L., Pilla, A.A., and Pawluk, R.J.: *A Nonoperative Salvage of Surgically Resistant Pseudarthroses and Nonunions by Pulsing Electromagnetic Fields*. *Clin. Orthop.* 124: 129—143, 1977.
- 5) Bassett, C.A.L., Caulo, N., and Kort, J.: *Congenital "Pseudarthroses" of the Tibia: Treatment with Pulsing Electromagnetic Fields*. *Clin. Orthop.* 154: 130—149, 1981.
- 6) Becker, R.O.: *The Significance of Electrically Stimulated Osteogenesis*. *Clin. Orthop.* 141: 266—274, 1979.
- 7) Becker, R.O., and Spadaro, J.A.: *Treatment of Orthopaedic Infections with Electrically Generated Silver Ions. A Preliminary Report*. *J. Bone and Joint Surg.*, 60-A: 871—881, 1977.
- 8) Becker, R.O., Spadaro, J.A., and Marino, A.A.: *Clinical Experiences with Low Intensity Direct Current Stimulation of Bone Growth*. *Clin. Orthop.* 124: 75—83, 1977.
- 9) Boyd, H.B., Lipinski, SW., and Wiley, J.H.: *Observations on Non-Union of the Shafts of the Long Bone, with a Statistical Analysis of 842 patients*. *J. Bone and Joint Surg.*, 43-A: 159—168, 1961.
- 10) Brighton, C.T., Black, J., Friedenbergt, E.B., Esterhai, I.L., and Connolly, J.F.: *A Multicenter Study of the Treatment of Non-Union, with Constant Direct Current*. *J. Bone and Joint Surg.*, 63-A: 2—13, 1981.
- 11) Brighton, C.T., Friedenbergt, Z.B., Mitchell, E.I., and Booth, R.E.: *Treatment of Nonunion with Constant Direct Current*. *Clin. Orthop.* 124: 106—123, 1977.
- 12) Brighton, C.T., and Heppenstall, R.B.: *Oxygen Tension in Zones of the Epiphyseal Plate,*

- the Metaphysis and Diaphysis. An In Vitro and In Vivo Study in Rats and Rabbits. J. Bone and Joint Surg.*, 53-A: 719-728, 1971.
- 13) Brighton, C.T., and Krebs, A.G.: *Oxygen Tension of Healing Fractures in the Rabbit. J. Bone and Joint Surg.*, 54-A: 323-332, 1972.
 - 14) Brighton, C.T., Friedenberg, Z.B., Zemsky, L.M., and Pollis, R.P.: *Direct-Current Stimulation of Non-Union and Congenital Pseudarthrosis. Exploration of its Clinical Application. J. Bone and Joint Surg.*, 57-A: 368-377, 1975.
 - 15) Brighton, C.T., Ray, R.D., Soble, L.W., and Kuettner, K.E.: *In Vitro Epiphyseal Plate Growth in Various Oxygen Tensions. J. Bone and Joint Surg.*, 51-A: 1383, 1969.
 - 16) Connolly, J.F., Hahn, H., and Jardon, O.M.: *The Electrical Enhancement of Periosteal Proliferation in Normal and Delayed Fracture Healing. Clin. Orthop.* 124: 97-105, 1977.
 - 17) Dawson, W.J., Mead, N.C., Sweeney, H.J., and Schafearin, F.: *Onlay Fibular Bone Grafting in Treatment of Tibial Fracture Non-Union. Clin. Orthop.* 130: 247-253, 1978.
 - 18) DeHass, W.G., Lazarovic, M.A., and Morrison, D.M.: *The Effect of Low Frequency Magnetic Fields on the Healing of the Osteotomized Rabbit Radius. Clin. Orthop.* 145: 245-251, 1979.
 - 19) 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., Gynec. and Obstet.*, 131: 894-899, 1970.
 - 20) Friedenberg, Z.B., and Brighton, C.T.: *Bioelectric Potentials in Bone. J. Bone and Joint Surg.*, 48-A: 915-923, 1966.
 - 21) 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: 883-885, 1971.
 - 22) Garrett, A.C.: *Electrophysiology and Electrophraeputics*, Boston, 1860.
 - 23) Harris, W.H., Moyon, B. J.L., Thrasher I., E. L., Davis, L.A., Cobden, R.H., MacKenzie, D.A., Cywinski, J.K.: *Differential Response to Electrical Stimulation-A Distinction Between Induced Osteogenesis in Intact Tibiae and the Effect on Fresh Fracture Defects in Radii. Clin. Orthop.*, 124: 31-40, 1977.
 - 24) Hartshorne, E.: *Pseudarthrosis. Am. J. Med. Sci.* 1: 121, 1841.
 - 25) Inoue, S., Ohashi, T., Yasuda, I., and Fukada: *Electret Induced Callus Formation in the Rat. Clin. Orthop.*, 124: 57-58, 1977.
 - 26) Jorgenson, T.E.: *The Effect of Electric Current on the Healing Time of Crural Fractures. Acta Orthop. Scandinavica*, 43: 421, 1972.
 - 27) Jorgensen, T.E.: *Electrical Stimulation of Human Fracture Healing by Means of a Slow Pulsating Asymmetrical Direct Current. Clin. Orthop.*, 124: 124-127, 1977.
 - 28) Lavine, L.S., Lustia, I., Rinaldi, R.A., and Liboff, A.R.: *Electrical Enhancement of Bone Healing. Science*, 175: 1118-1121, 1972.
 - 29) Lavine, L.S., Lustrin, I., and Shamos, M.H.: *Treatment of Congenital Pseudarthroses of the Tibia with Direct Current. Clin. Orthop.*, 124: 69-74, 1977.
 - 30) Masserman, R.L., Peterson, H.A., and Bianco, A.O.: *Congenital Pseudarthrosis of the Tibia. Clin. Orthop.*, 99: 140-148, 1974.
 - 31) Paterson, D.C., Lewis, G.N., and Cass, C.A.: *Treatment of Delayed union and Nonunion with an Implanted Direct Current Stimulator. Clin. Orthop.*, 148: 117-128, 1980.
 - 32) Paterson, D.C., Lewis, G.N., and Cass, C.A.: *Treatment of Congenital Pseudarthrosis of the Tibia with Direct Current Stimulation. Clin. Orthop.*, 148: 129-135, 1980.
 - 33) Paterson, D.C., Hillier, T.M., Carter, R.F., Ludbrook, J., Maxwell, G.M., and Savage, J.P.: *Experimental Delayed Union of the Dog*

- Tibia and its Use in Assessing the Effect of an Electrical Bone Growth Stimulator. Clin. Orthop.*, 128 : 340—350, 1977.
- 34) Spadaro, J.A.: *Electrically Stimulated Bone Growth in Animals and Man-Review of the Literature-Clin. Orthop.*, 122 : 325—332, 1977.
- 35) Treharne, R.W., Brighton, C.T., Korostoff, E., and Pollack, S.R.: *An In Vitro Study of Electrical Osteogenesis Using Direct and Pulsating Currents. Clin. Orthop.* 145 : 301—306, 1979.
- 36) Yasuda, I.: *Fundamental Aspects of Fracture Treatment. Clin. Orthop.*, 124 : 5—7, 1977.
- 37) Yasuda, I.: *Electrical Callus and Callus Formation by Electret. Clin. Orthop.*, 124 : 53—56, 1977.
- 38) Yasuda, I., Noguchi, K., and Sata, T.: *Dyn-amic Callus and Electric Callus. J. Bone and Joint Surg.*, 37-A : 1292, 1955.
- 39) Yasuda, I.: *Fundamental Aspects of Fracture Treatment, J. Kyoto Med. Soc.* 4 : 395, 1953.