

Half sine-wave pulsed electromagnetic fields 내에서 교정력에 의한 치아 이동에 대한 연구

김영준¹⁾ · 유영규²⁾

I. 서 론

교정력에 의한 치아 이동에 대한 연구는 크게 두가지로 대별되어 생물학적인 생리 생화학과 물리적인 역학의 관점에서, 가능한 빠른 시간 내에 치아 및 치아 주위 조직의 손상 없이 원하는 최적의 치료 목표를 달성하기 위하여 상호 연관되어 진행되어 왔다.

교정 영역에서 생물학적인 생리 생화학에 관한 연구에 있어서는 Sanstedt⁹⁰⁾, Schwarz⁹¹⁾, Oppenheim⁷⁵⁾, Reitan^{77,78,79,80,81,85)}, Storey^{95,96,97)}, Rygh^{85,86,87,88,89)}, Baumrind^{18,19,20)}, Norton^{68,69,70,71,72,73,74)}, Yamasaki^{106,107)}, Kurihara⁵⁶⁾, Davidovitch^{37,38,39,40,41)} 등이 교정력에 의해 발생하는 치조골의 골개조 기전을 밝히고자 하였으며, Reitan⁸¹⁾, Gianelly 와 Goldman⁵⁰⁾, Mostafa와 Dsdoby⁶⁵⁾, Davidovitch⁴¹⁾ 등이 이같은 연구에 대한 내용을 종합하여 치조골의 골개조 기전을 요약하여 보고하였다. 그같은 연구들의 내용은 압박측에서의 직접성 골흡수, 잠행성 골흡수 및 그에 따르는 초자질화대의 생성과 흡수, 견인측에서의 골침착 기전, 더 나아가서 파골 세포의 기원과 parathyroid hormone, prostaglandin, interleukin, vitamine-D, drugs, 전류와 전자기장 등의 요소들이 전구세포가 파골 세포로 활성화 되는 과정에서 미치

는 영향, 세포 수준에서 관찰되는 세포내의 생화학적 반응에 관한 것이었다^{20,22,24,38,41,43,51,66,68,76,112,113,123,124)}.

한편 교정 영역에서의 물리적인 역학에 관한 연구는 Angle⁹⁾이 고정식 교정 장치를 개발한 이후 Tweed¹⁰¹⁾, Merrifield⁶³⁾, Begg²¹⁾, Jarabak⁵³⁾, Thurow^{98,99)}, Ricketts⁸⁴⁾, Mulligan⁶⁷⁾, Andrews^{1,2,3,4,5,6,7,8)}, Burstone^{27,28,29,30,31,32,33,34)}, Melsen^{60,61,62)}, Fontenelle^{45,46)}, 박¹¹⁸⁾, 김¹²⁵⁾ 등에 의하여 치아와 그 주위 조직에 손상을 주지 않으면서 원하는 형태의 치아 이동을 도모하기 위해서 힘의 크기, 적용 시간 뿐만 아니라 치아 이동 형태를 결정하는 모멘트/힘의 조절, 고정식 교정 장치의 변형 등의 여러 요소에 대한 연구가 진행 되어 왔다.

교정력에 의한 치아 이동을 설명하는 생물학적인 이론적 배경은 파골 세포와 조골 세포가 과연 어떤 기전에 의하여 활성화되어서 치조골이 어떻게 골개조 되는가를 규명하는 것으로서 크게 두가지로 대별 된다. 고전적인 학설인 치주인대의 압박-신장 학설은 기계적인 힘에 의하여 치주인대를 통한 혈류 공급의 변화가 초래되고, 이로 인한 화학적 환경 변화가 화학적 매개체를 생성 및 분비시키고, 이로 인하여 세포 분화가 활성화되어 치아를 이동시킨다고 설명하고 있으며^{18,65,66)}, 비교적 최근의 학설인 생물학적인 전기학설(bioelectric theory)에서는 적어도 부분적으로는 치아 이동이 치조골의 굽힘으로부터 발생하는 전기 신호에 의해서 조절되는 골대사의 변화와 관련이 있다고 설명하고 있다^{65,66,68,69)}. 이

접수일자 : 10월 1일

¹⁾연세대학교 치과대학 치과교정학교실, 전임강사

²⁾연세대학교 치과대학 치과교정학교실, 교수

두가지 학설은 상호 보완적인 것으로서, 치아 이동의 생물학적인 설명을 뒷받침 하고 있다⁷⁶⁾.

생체계에 대한 전기적인 영향에 대한 연구는 이미 1841년 Hartshone과 1850년 Lemte 등이 골 절시 전기적인 에너지가 골 치유에 영향을 미친다고 보고하였으나 과학적인 입증이 부족하여 거의 1세기 동안 관심을 끌어오지 못하였다¹⁰⁹⁾. 그러나 1954년 Fukada와 Yasuda^{48,108)}가 외부에서 골조직에 응력을 가하였을 때 골이 휘면서 전기적인 전위가 발생하여 압박 부위에서는 양전하, 견인 부위에서는 음전하가 발생한다는 사실을 실험을 통하여 입증하였고, 이러한 현상을 골 결정 구조물의 압전기 현상 (piezoelectric phenomenon)이라고 보고함으로서 생체계에 대한 전기적인 영향이 다시 관심을 끌게 되었다. 이어서 1950년대 말 Bassett와 Becker¹⁰⁾도 외부에서 골에 응력을 가한 경우 압전기 현상이 발생하는 것을 보고하였고, 또한 양전하와 음전하를 띠는 곳에서 각각 파골 세포와 조골 세포의 활동도가 증가되어 기계적인 자극이 전기적인 자극으로 바뀌어서 세포의 반응을 촉진하는 것을 입증하였으며, 1960년대 초 Shamos와 Lavine⁹²⁾, Freidenberg⁴⁷⁾와 Brighton²⁶⁾ 등도 유사한 결과를 보고함으로서, 골개조와 전기 에너지가 적어도 부분적으로는 관련이 있음이 밝혀졌다. 이와 같은 연구의 결과들에 힘입어 생체계의 세포 활동을 촉진시키기 위해서 전기 에너지를 사용하는 것이 기초 과학 분야와 의학 및 치의학의 임상 분야에서 관심을 받게 되었다. 1960년대 들어와서 정형 외과 분야에서 골절 부위의 골 형성을 촉진시키거나 유착되지 못한 골절부를 치료하기 위해 Bassett^{10,11,12,13)}와 Becker¹⁰⁾ 등이 전기 에너지를 이용한 연구를 활발히 하여, 생체의 골에 전극을 심어 전류를 가한 경우 음극 부위에서는 골 침착이 증가하였으나 양극 부위에서는 골 흡수가 발생하지 않았다고 보고함으로서 생체에 전기 에너지를 직접 공급하는 방법에 대한 관심을 불러 일으켰다. 그러나 외과적으로 수술을 하여 전극을 매식하는 방법의 불편함과 그에 따르는 부작용의 가능성 때문에 다른 대체 방법이 고려되고 있던 중, 1976년 Bassett, Pilla와 Pawluk¹⁴⁾

등이 생체에 전기 에너지를 전달하기 위해서 전자기장이 변화할 때마다 전자기장 내에 있는 도체에서는 유도 전류가 발생한다는 유도 결합 원리(inductive coupling principle)를 이용하여, 전자기장을 처음으로 임상에 적용함으로서 종래의 치료 방법으로는 상당한 제한이 있어 흔히 절단 수술을 요하는 장골 골절의 경우에 있어서도 전자기장을 이용하여 성공적인 치유를 유도하였다^{15,16,17,121)}. 치과 영역에서도 전자기장을 이용하여 Jacobs와 Norton⁵²⁾, Kopczyk⁵⁵⁾ 등이 치조골 결손 부위의 치유를 촉진시켜 치주질환자의 치조골 재생을 도모하였으며, Wester 와 Spadaro 등이 만성 골수염의 치유의 촉진을 도모하였고, Masureic과 Eriksson이 안면골 골절의 치료를 위해 전자기장을 이용하여 치유를 촉진시켰다는 보고가 있다¹¹⁶⁾.

교정 영역에서 교정력에 의한 치아 이동시 골 개조와 전기 에너지의 관련성을 초기에는 압전기 현상으로 설명하였다. Zengo^{110,111)} 등은 교정력에 의해 발생하는 기계적인 힘에 의해 치조골이 휘게 되고 이로 인해서 전기적인 전위를 띠게 되는데 이와 같은 현상을 압전기 현상이라고 하였으며, 압전기에 의해 흰 치조골의 불록한 부위와 오목한 부위는 각각 양전하와 음전하를 띠게 되며 음전하를 띤 부위에서는 조골 세포의 활동이 증대되고 양전하 혹은 전기적으로 중성인 부위에서는 파골 세포의 활동이 증대 된다고 주장하였다. 압전기는 외부의 응력에 의해 불완전한 상태가 유발되어 전자들이 결정 격자의 한 곳에서 다른 곳으로 이동하면서 발생하는 전류로서, 이와 같은 압전기 신호는 빠른 소실률과 힘이 소멸되는 순간 반대 방향의 신호가 발생하는 특징을 가지고 있어 일반적인 골격 유지와 정상적인 저작시 치조골이 훨씬 치아를 둘러싸고 있는 치조골의 유지에 있어서 매우 중요한 역할을 하지만 교정적인 치아 이동을 유도하는데 사용되는 형태의 지속적인 압력에서는 확실한 압전기 신호가 발생하지 않아서, 지극히 짧은 순간의 진동적인 힘을 가하는 경우를 제외하고는 압전기 현상으로 교정적인 치아 이동을 설명할 수 없다^{68,76,93)}. 그러나 또 다른 형태의 전기 신호 유형인

내재성 생전기 전위(endogenous bioelectric potential)가 응력을 받지 않는 골 조직에서 관찰됨으로서, 이같은 생전기 전위가 교정적인 치아 이동에 관련이 있는 것으로 보고되고 있다^{73,74,76)}. 대사가 활발한 골 또는 결합 조직의 세포는 활동적인 정도에 따라 그에 비례하는 음전하가 발생하며 비활동적인 세포 또는 그 영역은 전기적으로 중성을 띠고 있어, 외부에서 전기 신호를 제공하는 경우 세포막 수용체 또는 막투과성에 영향을 미치게 된다고 알려져 있다⁷⁶⁾. Davidovitch⁴⁰⁾, 김¹¹⁶⁾, 김¹¹⁷⁾ 등은 동물 실험을 통하여 전극을 매식하여 낮은 전압의 직류를 치조골에 가하였을 때 생전기성 전위를 변화 시켜 더 빠른 치아 이동을 얻었다고 보고하였으며, Stark와 Sinclair⁹⁴⁾는 전극을 매식하는 불편함과 그에 따른 부작용을 방지할 수 있는 pulsed electromagnetic field를 이용하여 유용한 결과를 얻었다는 보고를 하고 있다. Davidovitch⁴⁰⁾, Stark와 Sinclair⁹⁴⁾, 김¹¹⁶⁾, 김¹¹⁷⁾ 등에 의하면 전기 혹은 전자기장이 골 세포와 조골 세포에 영향을 미쳐 교정적인 치아 이동을 좌우하는 치조골 개조를 변화시킬 수 있다는 보고가 있지만, 국내외적으로 전기 자극 혹은 전자기장이 교정적인 치아 이동에 미치는 영향에 대한 연구가 아직은 미비한 실정이다.

표 1. 전자기장의 적용 여부와 힘의 크기에 따른 실험 동물의 분류

군	HSPEMF	이개력(g)	숫자(마리)
정상군	-	0	3
대조군 I	-	6	10
	-	12	10
실험군 I	+	6	10
	+	12	10

HSPEMF : Half sine-wave pulsed electromagnetic field

- : HSPEMF를 적용하지 않은 경우

+ : HSPEMF를 적용한 경우

이에 저자는 half sine-wave pulsed electromagnetic field가 교정적인 치아 이동에 미치는 영향을 연구하고, 직접성 골흡수 및 치근 흡수를 방지하는데 있어서 필수적인 교정력의 크기를 낮추는데 있어서 이같은 half sine-wave pulsed electromagnetic field가 어떤 영향을 미치는지를 연구하기 위하여, Guinea pigs를 실험 대상으로 하여 half sine-wave pulsed electromagnetic field 내에서 교정적인 치아 이동을 실시하여 치아 이동량과 치아 주위 조직의 변화를 관찰하여 다소의 지견을 얻었기에 이에 보고 드리는 바이다.

II. 실험 재료 및 방법

가. 실험 재료

본 연구의 연구 대상으로 10일간 동일 조건에서 사육하여 연구 시작시 연령 35일, 체중 약 260g의 건강한 웅성 Hartley guinea pigs 43 마리를 사용하였다. Storey⁹⁵⁾의 보고에 의하면 이 같은 연령에서는 전상악골 봉합이 융합되어 교정력에 의하여 이개되지 않기 때문에, 연령 35 일의 Hartley guinea pigs를 실험 동물로 선택하였다. 정상군 3 마리, 대조군 20 마리, 실험군은 각각 구분하였으며, 대조군과 실험군은 각각 6 g 및 12 g의 이개력을 받는 군으로 재구분 하였다. (표 1)

나. 실험 장치

실험 동물은 하루중 16시간은 상온하에서 금속으로 만든 30 cm × 50 cm의 쥐장에서 5 마리씩 사육하고, 하루중 8 시간은 전자기장을 방해하지 않는 재질인 아크릴로 만든 쥐장에서 사육하였다. 쥐장은 4 mm 두께의 투명한 아크릴로 만들었으며, 내부장과 외부장으로 나누어서 제작하였다. 내부장은 381 mm × 57 mm 원판을 판금속 벤더 상에서 냉열 가공하여 제작하였다. 실험을 시행하는 동안 Guinea pigs의 두부를 일정한 부위에 위치 시킬 수 있도록 내부장의 전후

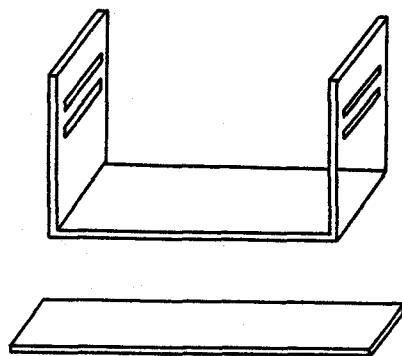


그림 1. 내부 쥐장 및 지붕판

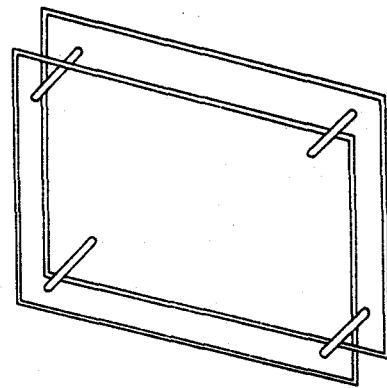


그림 2. 외부 쥐장

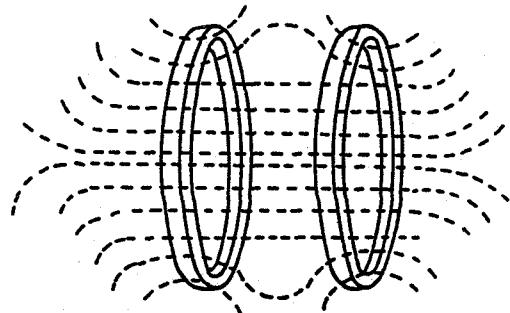


그림 3. Helmholtz coil

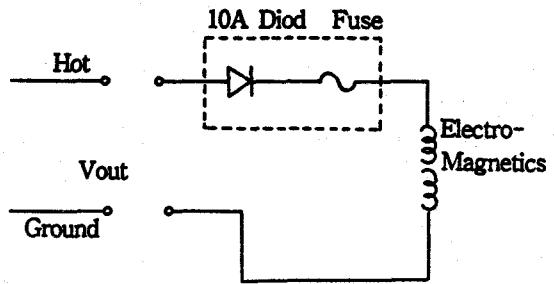


그림 4. Half sine-wave pulsed electromagnetic field의 회로도

방 외면의 상부에 지붕판이 들어갈수 있는 홈을 2개 제작하였고, 지붕판은 229 mm × 450 mm 크기로 제작하였다(그림 1). 외부장은 229 mm × 305 mm 크기의 2 장 아크릴 판을 직경 5 mm, 길이 60 mm 아크릴 봉을 이용하여 네 귀퉁이에서 접착제를 이용하여 연결하였다(그림 2). 또한 half sine-wave pulsed electromagnetic field를 가하는 실험군에서는 외부장의 양쪽 외면에 Helmholtz 코일을 부착할수 있도록 직경 5 mm, 길이 30 mm 아크릴 봉을 접착제를 이용하여 부착시켰다. 내부장 및 외부장은 전자기장을 방해하지 않도록 제작 과정에서 금속을 사용하지 않았다.

Half sine-wave pulsed electromagnetic field

는 전류를 유도하는 자기장을 최대한 균일하게 하기 위해서 한쌍의 원형 코일을 그 직경의 절반이 되는 거리에 두는 Helmholtz 코일을 이용하였다. (그림 3) 각각의 코일은 직경 1 mm의 에나멜 구리선을 130 mm 직경의 아크릴 원판 위에 68회 감았으며 60 Hz, 8 볼트, 최대 전류가 6 암페어인 전원을 공급하여 최대 전자기장력이 5.3 milli Tesla가 되도록 하였다. 이같은 자기장력을 유도하는 공식은 다음과 같다. $B_{center} = 32\pi N / 5^{3/2} a \cdot I / 10 = 9.3 I$ (Gauss) 이 때 60 Hz의 주파수에서 코일의 Impedance $Z = \sqrt{R^2 + (WL)^2} = 2.0 \Omega$, $I = V / Z = 4.0 A$, Peak current $I_{pk} = \sqrt{2} I_{rms} = \sqrt{2} \times 4 = 5.76 A$ 따라서 $B_{pk}(center) = 9.3 \times 5.76 = 53.6 G = 5.4$ milli Tesla 본 실험에서 사용한

half sine-wave pulsed electromagnetic field의 회로도는 그림 4와 같다. 또한 본 실험에서는 한 군의 실험 동물을 동시에 실험하기 위해서 각각의 실험 동물에 8 볼트의 전원이 공급 될수 있도록 가변 전압기를 사용하여 실험군의 12개 half sine-wave pulsed electromagnetic field를 직렬로 연결하였으며, 전자기장 형성시 발생하는 열에 의한 합선 방지를 위한 10 암페어용 휴즈와 교류를 정류하기 위한 10 암페어용 정류기를 장착한 조절 박스 2 개를 직렬로 연결하였다.

6g 및 12g의 이개력을 발휘 할수 있는 스프링은 Storey의 실험에서 사용한 것과 같은 압박 코일 스프링을 이용하여, 0.010 인치의 스테인리스 스틸 와이어로 만들었으며, 제작후 2인이 응력계이지를 이용하여 제작된 압박 코일 스프링을 평가하였다.

다. 실험 방법

염산 케타민(Ketamin HCl : 유한 양행 케타라)을 체중 Kg당 5-10 mg 근육 주사하여 마취시킨후, 실험 동물 상악 좌우측 중절치의 절단면에서 2 mm 하방 부위에 1/4 라운드 버를 장착한 고속 엔진을 이용하여 이개 스프링을 장착할수 있는 구멍을 형성한후, 각각의 군에 해당되는 이개 스프링을 장착 하였다. 10 일 간의 실험 기간 동안 실험군에서만 half sine-wave pulsed electromagnetic field를 가한 상태에서 하루에 8 시간씩 아크릴 쥐장에 실험 동물을 넣었으며, 나머지 16 시간은 금속 쥐장에서 자유롭게 물과 연동식을 먹도록 하였으며, 매일 상악 좌우측 중절치 사이의 이개된 거리를 백분의 일 밀리까지 측정할수 있는 디지털 캘리퍼를 이용하여 측정하였다.

10일간 실험을 시행한후 실험 동물을 희생시키고, 상악 좌우측 중절치를 주변 상악골과 함께 절단하였다. 절단물을 10 % 중성 formalin에 6일간 고정 시키고 0.1 M sodium cacodylate 완충액 (PH 7.4)으로 15분간 2회 세척한후 rapid solution에 10일간 탈회하고 paraffin에 포매시켜 불력을 형성하였다. 쥐의 치근이 협설측으로 만곡되어

있기 때문에 치근단 1/5 부위를 제외한 나머지 부위를 볼수 있도록 rotary microtome 상에 위치시킨후 3 μm 두께로 연속 절편을 만들어 그중에서 5-10번 째 절편을 hematoxylin-eosin 염색을 하여 광학 현미경 상에서 관찰을 하고, 100 배율의 광학 현미경 상에서 drawing attachment를 이용하여 단위 치조골 면적당 파골 세포 수를 측정하였다.

통계 처리는 SPSS/PC Program을 이용하였으며, 각군에서의 치아 이동량에 대한 평균값과 표준 편차를 구하고, 각군에 대한 Student's t-test로 유의성을 검증하였으며, 유의 수준은 0.05 이하일때 통계적 의의를 부여하였다.

III. 연구 결과

정상군은 전 실험 기간을 통하여 치아의 이동이 없었으며, 치조골의 흡수 및 침착을 보이지 않았다. 치아 이동량이 6g의 이개력을 사용한 경우에 있어서는, 실험 시작 7일 이후부터 실험군 ($\text{Mean} = 2.28 \pm 0.27 \text{ mm}$)이 대조군 ($\text{Mean} = 1.96 \pm 0.21 \text{ mm}$)보다 유의성 ($P < 0.01$) 있게 더 크게 나타났으며, 실험 10 일째에서도 실험군 ($\text{Mean} = 2.67 \pm 0.26 \text{ mm}$)이 대조군 ($\text{Mean} = 2.15 \pm 0.24 \text{ mm}$)보다 유의성 ($p < 0.001$) 있게 더 크게 나타났다(표 2, 그림 5). 또한 12g의 이개력을 사용한 경우에 있어서도 실험 시작 7일째부터 실험군 ($\text{Mean} = 2.92 \pm 0.32 \text{ mm}$)이 대조군 ($x = 2.46 \pm 0.32 \text{ mm}$)보다 유의성 있게 ($P < 0.01$) 더 크게 나타났으며, 실험 10 일째에서도 실험군 ($\text{Mean} = 4.11 \pm 0.35 \text{ mm}$)이 대조군 ($\text{Mean} = 3.26 \pm 0.34 \text{ mm}$)보다 유의성 있게 ($p < 0.001$) 더 크게 나타났다(표 3, 그림 6). 치아 이동 증가량에 있어서는 6g의 이개력을 사용한 경우 실험 4일, 5일, 6일, 7일, 8일과 10일에서 실험군이 대조군보다 유의성 있게 ($p < 0.05$) 더 크게 나타났으며(표 4, 그림 7), 12g의 이개력을 사용한 경우 4일, 6일, 7일, 8일, 9일과 10일에서 유의성 있게 ($p < 0.05$) 더 크게 나타났다(표 5, 그림 8). 6g의 이개력과 half sine-wave pulsed electromagnetic field를 함께 적용한 실험군 I과

표 2. 6g의 이개력을 사용한 경우에서 총 치아 이동량

일	대조군	실험군	유의수준
	(Mean \pm S.D.)	(Mean \pm S.D.)	
1	0.77 \pm 0.10	0.76 \pm 0.12	0.937
2	1.02 \pm 0.19	1.01 \pm 0.15	0.908
3	1.58 \pm 0.20	1.61 \pm 0.22	0.786
4	1.76 \pm 0.19	1.88 \pm 0.24	0.246
5	1.84 \pm 0.19	2.00 \pm 0.27	0.148
6	1.89 \pm 0.20	2.15 \pm 0.25	0.022
7	1.96 \pm 0.21	2.28 \pm 0.27	0.008**
8	2.03 \pm 0.23	2.42 \pm 0.22	0.001***
9	2.09 \pm 0.24	2.51 \pm 0.26	0.001***
10	2.15 \pm 0.24	2.67 \pm 0.26	0.000***

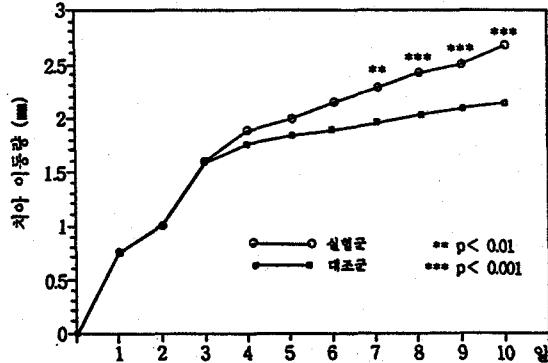
*** : $p < 0.001$ ** : $p < 0.01$ 

그림 5. 6g의 이개력을 사용한 경우에서 총 치아 이동량

표 3. 12g의 이개력을 사용한 경우에서 총 치아 이동량

일	대조군	실험군	유의수준
	(Mean \pm S.D.)	(Mean \pm S.D.)	
1	1.44 \pm 0.19	1.45 \pm 0.20	0.973
2	1.74 \pm 0.28	1.71 \pm 0.20	0.834
3	1.96 \pm 0.29	1.97 \pm 0.24	0.940
4	2.07 \pm 0.30	2.15 \pm 0.24	0.484
5	2.19 \pm 0.30	2.33 \pm 0.27	0.308
6	2.31 \pm 0.32	2.61 \pm 0.34	0.054
7	2.46 \pm 0.32	2.92 \pm 0.32	0.005**
8	2.68 \pm 0.33	3.30 \pm 0.28	0.000***
9	2.95 \pm 0.38	3.70 \pm 0.31	0.000***
10	3.26 \pm 0.34	4.11 \pm 0.35	0.000***

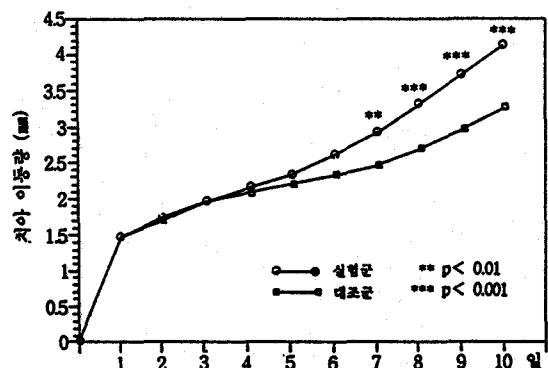
*** : $p < 0.001$ ** : $p < 0.01$ 

그림 6. 12g의 이개력을 사용한 경우에서 총 치아 이동량

12g의 이개력 만을 적용한 대조군 II에서 치아의 총 이동량을 비교할 때 4일에서 8일까지는 유의 차가 없었으나, 1일에서 3일까지와 9일, 10일에서는 유의성 있는($p < 0.001$) 차이를 보였다(표 6, 그림 9).

파골 세포수에 있어서도 6g의 이개력을 사용한 경우 실험군 (7.09 ± 1.99)이 대조군 ($4.45 \pm$

2.01)에서 보다 더 크게 나타났으며, 12g의 이개력을 사용한 경우에서도 실험군 (12.77 ± 1.89)이 대조군 (9.39 ± 2.05)에서 보다 더 크게 나타났다(표 7).

표 4. 6g의 이개력을 사용한 경우에서 1일 치아 이동 증가량

일	대조군	실험군	유의수준
	(Mean±S.D.)	(Mean±S.D.)	
1	0.77 ± 0.10	0.76 ± 0.12	
2	0.25 ± 0.09	0.24 ± 0.05	0.885
3	0.57 ± 0.07	0.60 ± 0.08	0.279
4	0.18 ± 0.06	0.27 ± 0.06	0.004**
5	0.08 ± 0.03	0.12 ± 0.05	0.049*
6	0.05 ± 0.01	0.15 ± 0.07	0.001***
7	0.07 ± 0.04	0.13 ± 0.05	0.005**
8	0.07 ± 0.02	0.13 ± 0.08	0.023*
9	0.06 ± 0.01	0.09 ± 0.05	0.100
10	0.06 ± 0.01	0.15 ± 0.06	0.001***

*** : $p < 0.001$

** : $p < 0.01$

* : $p < 0.05$

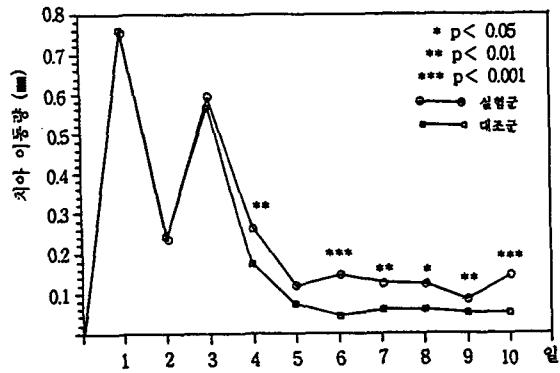


그림 7. 6g의 이개력을 사용한 경우에서 1일 치아 이동 증가량

표 5. 12g의 이개력을 사용한 경우에서 1일 치아 이동 증가량

일	대조군	실험군	유의수준
	(Mean±S.D.)	(Mean±S.D.)	
1	1.44 ± 0.19	1.45 ± 0.20	
2	0.30 ± 0.11	0.27 ± 0.07	0.515
3	0.22 ± 0.05	0.26 ± 0.05	0.175
4	0.10 ± 0.05	0.18 ± 0.05	0.003**
5	0.13 ± 0.06	0.17 ± 0.05	0.060
6	0.11 ± 0.04	0.28 ± 0.10	0.000***
7	0.16 ± 0.05	0.31 ± 0.05	0.000***
8	0.22 ± 0.06	0.38 ± 0.08	0.000***
9	0.27 ± 0.08	0.40 ± 0.08	0.002**
10	0.31 ± 0.05	0.41 ± 0.13	0.047*

*** : $p < 0.001$

** : $p < 0.01$

* : $p < 0.05$

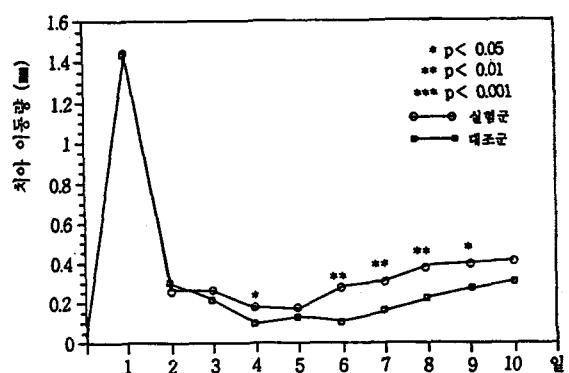


그림 8. 12g의 이개력을 사용한 경우에서 1일 치아 이동 증가량

표 6. 6g의 이개력파 HSPEMF를 함께 적용한 실험군 I과 12g의 이개력 만을 적용한 대조군 II에서 총 치아 이동량

일	대조군 (Mean±S.D.)	실험군 (Mean±S.D.)	유의수준
1	1.44 ± 0.19	0.76 ± 0.12	0.000***
2	1.74 ± 0.28	1.01 ± 0.15	0.000***
3	1.96 ± 0.29	1.61 ± 0.22	0.007**
4	2.07 ± 0.30	1.88 ± 0.24	0.139
5	2.19 ± 0.30	2.00 ± 0.27	0.147
6	2.31 ± 0.32	2.15 ± 0.25	0.243
7	2.46 ± 0.32	2.28 ± 0.27	0.192
8	2.68 ± 0.33	2.42 ± 0.22	0.051
9	2.95 ± 0.38	2.51 ± 0.25	0.008**
10	3.26 ± 0.34	2.66 ± 0.26	0.000***

*** : $p < 0.001$

** : $p < 0.01$

표 7. 실험군과 대조군의 입박측에서 단위 치조골 면적당 파골 세포수

교정력	대조군 (Mean±S.D.)	실험군 (Mean±S.D.)	유의수준
6g	4.45 ± 2.01	7.09 ± 1.99	0.001***
12g	9.39 ± 2.05	12.77 ± 1.89	0.001***

*** : $p < 0.001$

IV. 총괄 및 고찰

교정력에 의한 치아 이동을 설명하는 생물학적 전기 학설이 교정력에 의한 치아 이동을 아직 완벽하게 설명하고 있지는 못하지만, 직접 외인성 전류를 적용하던 혹은 간접적으로 pulsed electromagnetic field에 의해 발생한 유도 전류를 적용하던 간에 골 또는 결합 조직의 세포들이 보유하고 있는 생전기 전위에 영향을 미쳐 치조골의 골개조가 영향을 받고 있는 것은 분명하다⁷⁶⁾. Cochran³⁶⁾ 등은 저작과 연하 혹은 골내 체액의 동적 작용을 통하여 전류가 발생할 수 있다는 가설을 주장하였으며, Norton은 생체에서 기계

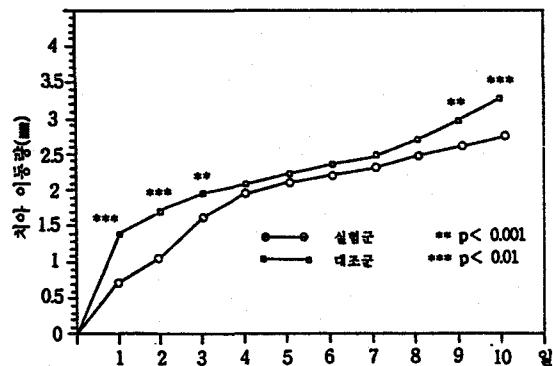


그림 9. 12g의 이개력을 사용한 경우에서 총 치아 이동량

적 에너지가 전기적 에너지로 전환할 때 세포의 영향 조절, 국소적 수소 이온 농도 조절, 효소의 활성 및 억제, 세포내 거대 분자의 변화, 세포의 이동성과 증식 활성, 세포의 합성능 및 세포막 투과성의 변화 등에 영향을 미친다고 하였다^{71,73,74)}. Davidovitch가 고양이 치조골에 외인성 전류를 가한 경우 치조골의 cyclic nucleotide가 증가하였고, 음극 근처에서 증가된 조골 세포에 의하여 골 첨가가 증가되었으며, 또한 교정력과 전류를 함께 가한 경우 교정력만을 단독으로 가한 경우보다 치아 이동량이 증가하였다고 보고 하였으며⁴⁰⁾, 국내의 김¹¹⁶⁾, 김¹¹⁷⁾ 등도 이와 유사한 결과를 보고하였다. Norton은 전기적 교란이 하전 분자의 집단으로 구성된 세포막 수용체에 영향을 주어 이온을 이동시키며 세포 증식과 관련된 DNA 합성 증가, 세포 주기의 변화, 국소적인 수소 이온 농도의 변화 및 산소 분압의 변화 등을 초래한다고 하였다⁷⁴⁾.

이같은 외인성 전기 자극을 이용하여 직접 직류 전류를 가하는 방법은 교정적인 치아 이동을 하는데 있어서 유용한 장점을 가지고는 있지만 전극을 외과적으로 수술하여 매식을 하여야 하고 또한 그 부위의 치유 과정에서 부작용을 유발

할수 있는 단점이 있다⁹⁴⁾. 그러나 pulsed electromagnetic field를 이용하게 되면 다같이 전기 에너지를 이용하는 면에서는 유사하지만 전극의 매식과 그에 따르는 부작용을 피할수 있는 것 외에도, Norton에 의하면 외인성 전기 자극에서 사용하는 직류는 세포막을 통과하지 않고 세포 표면의 이온 재분배 혹은 전하를 띤 분자의 운송을 통하여 세포막의 전기 화학적 변화를 일으키지만, 맥동 전자기장은 세포막 수준에서 작용하기도 하지만 세포막을 통과하여 세포내 소기관에 직접 영향을 미침으로서 생물학적 반응을 일으키는데 더 효과적이라고 하였다^{71,126)}.

Gerling과 Sinclair⁴⁹⁾는 Guinea pigs를 실험 동물로하여 100 Hz의 pulsed electromagnetic field를 하루에 8시간씩 적용하여, 혈관 생성의 증가, 연골 세포간 기질의 첨가 및 교유꼴 형성을 관찰하였다고 보고하였으며, 국내의 양¹²⁰⁾은 맥동 전자기장과 하악의 기능적 전방 이동을 유도하는 악기능 교정 장치가 백서의 하악 과두 성장에 미치는 영향을 연구하여 전기장에 노출한 경우 전구 연골아 세포의 증식, 비대 연골 세포 층의 세포 간질 및 연골내 골화층의 석회화가 증가된 것을 보고하였다. Stark와 Sinclair⁹⁴⁾는 전자기장이 교정적인 치아 이동에 미치는 영향에 대한 실험에서 Guinea pigs를 실험 동물로 하여 25 Hz, 15 볼트, 4.5 암페어의 전원에 의해 최대 자기장이 5.3 milli Tesla인 pulsed electromagnetic field를 하루에 8 시간씩 적용하여 10 일간 실험한 결과 전자기장을 가한 경우가 전자기장을 가하지 않은 경우보다 교정적인 치아 이동량과 이동률 및 신장측에서 골 침착 등이 모두 증가하였다고 보고하였다.

본 연구에서 6g과 12g의 이개력을 가한 두 가지의 경우에서 모두 실험군이 대조군보다 치아 이동량과 이동률이 더 크게 나타남으로서, Stark와 Sinclair의 결과와 유사한 양상을 보이고 있다. 그러나 본 실험에서는 Stark와 Sinclair이 사용한 25 Hz의 pulsed electromagnetic field를 사용하지 않고, 60 Hz의 half sine-wave pulsed electromagnetic field를 이용하였다⁹⁴⁾. Stark와 Sinclair가 사용한 pulsed wave를 이용하기 위해

서는 별도로 pulse generator를 필요로 하며, 이 같은 pulse generator를 이용하면 사각 형태의 펄스파가 형성되어 보다 빠르게 최대 유도 전류에 도달하게 되어 도체에 더 많은 유도 전류를 발생시킬수 있는 장점이 있으나 고가의 pulse generator를 구입하여야 한다. 그러나 본 연구에서처럼 단순히 정류기에 의해 정류된 반파를 사용하여 half sine-wave pulsed electromagnetic field를 이용한 경우, 보다 저렴하고 간편하게 제작함으로서 아직 완벽하게 입증되지 않은 이 분야의 연구에 보다 용이하게 적용할수 있는 장점이 있다. 또한 Stark와 Sinclair의 실험에서 사용한 pulsed wave도 Helmholtz 코일의 저항과 코일 직경에 비례하는 L(inductance) 값에 따라 실지의 pulsed wave는 커브를 이루면서 최대 전류에 도달하게 되어, 본 연구에서 이용한 half sine pulsed wave와 거의 유사한 형태를 이루어, 본 연구의 결과와 Stark, Sinclair의 결과를 비교하는데 있어서 적용한 전자기파의 파형의 차이에 따르는 변수는 크게 문제가 되지 않을 것으로 사료된다. 물론 전자기장이 교정적인 치아 이동에 미치는 영향에 대한 연구가 더욱 정립된다면 전자기장의 pulsed wave의 파형에 따른 영향도 더욱 연구 되어야할 분야로 여겨진다.

본 연구에서는 연구의 초점이 전자기장이 교정적인 치아 이동량과 이동율의 증가에 영향을 미친다는 Stark와 Sinclair의 연구 결과를 확인하는 것은 물론이고, 그와 같이 확인한 결과를 바탕으로 전자기장을 이용하여 실험 동물에서 교정적인 치아 이동을 위한 교정력의 역치를 낮출수 있는가를 확인하는 것이었다. 물론 Guinea pigs의 전치를 이동시킬 수 있는 교정력의 역치를 확인하고, 과연 전자기장을 가함으로서 치아의 이동을 위한 역치를 낮출 수 있는가를 확인하는데 있어서는 미흡한 점이 있지만, 본 연구의 실험에서 사용한 12g의 이개력과 그 절반이 되는 6g의 이개력을 이용하여 그 결과를 비교 분석하여 이에 대한 평가를 함으로서, 실험 동물에서 전자기장이 치아를 이동시킬 수 있는 교정력의 역치에 미치는 영향에 대한 연구의 기초가 될 수 있는 것으로 기대된다. 본 연구의 실험 결과에

의하면 비록 6g의 이개력과 전자기장을 함께 가한 경우가 12g의 이개력 만을 가한 경우보다 더 많은 이동량과 이동율을 보이지는 않았지만, 6g의 이개력 만을 가한 경우와 Storey^{95,96,97)}의 실험에서 이용한 5g의 이개력을 사용한 경우보다는 더 많은 이동량과 이동율을 보이고 있다. Fontenelle^{45,46)}은 치아가 주변 치조골과 함께 이동하느냐 혹은 주변 치조골을 관통하여 이동하느냐의 관건은 직접성 골흡수와 잠행성 골흡수를 어떻게 조절하느냐에 달려 있다고 하였으며, 치아가 주변 치조골과 함께 이동하기 위해서는 치아가 이동하려는 방향으로 직접성 골흡수가 발생하여야 하며, 이를 위해서는 교정력이 균일하게 분포될 수 있도록 모멘트/힘을 조절하는 것도 중요하지만 교정력 크기 자체가 약한 힘이어서 치주 인대의 초자화를 방지할 수 있어야 한다고 주장하였다. 만일 교정적인 치아 이동에 미치는 전자기장의 효과에 대한 이론이 더욱 확실하게 입증이 되고 임상적으로 적용할 수 있도록 개선이 된다면, 필요한 경우 전자기장을 이용하여 보다 약한 교정력과 적절한 모멘트/힘을 조절을 통하여 직접성 골흡수를 일으킴으로서 주변 치조골을 동반한 치아 이동을 시행할 수 있으리라 기대된다.

본 연구에서 전자기장이 교정적인 치아 이동에 미치는 영향에 대한 조직학적인 연구를 시행한 결과 실험군이 대조군에서 보다 압박측에서 파골 세포의 수가 증가된 것을 확인하였고, 견인 측에서의 골침착도 실험군이 대조군에서 보다 더 많이 침착된 것이 관찰되어 Stark와 Sinclair의 연구 결과와 유사한 결과를 보였다. Guinea pigs는 중절치 치근의 만곡이 심할뿐만 아니라 중절치의 외측이 주로 피질골로 둘려 싸여 있어 조직학적 소견을 관찰하기에는 해부학적으로 다소 부적절한 것으로 사료되었지만, 아직 전자기장이 교정적 치아 이동량과 이동율에 미치는 영향에 대한 입증이 충분하지 않은 상황 속에서 본 연구는 연구의 주 목적이 전자기장이 교정적인 치아 이동량과 이동율에 미치는 영향을 평가하여 그 내용을 입증하는 것이었기 때문에 Guinea pigs를 실험 동물로 선택하였다. 따라서 전자기

장이 교정적인 치아 이동에 미치는 영향에 대한 조직학적인 연구를 위해서는 해부학 및 조직학적인 구조를 고려하여 추가의 연구가 더 시행되어야 할 것으로 사료된다.

전자기장이 교정적인 치아 이동에 미치는 영향에 대한 연구에 있어서 선결되어야 할 사항은 과연 이같은 전자기장을 적용하였을 때 인체 혹은 실험 동물에서의 안정성에 대한 평가이다. 본 연구에서 사용한 전자기력은 신경과 근육 조직의 흥분을 야기하지 않는 것으로 알려져 있으며, 또한 Bassett는 낮은 수준의 pulsed electromagnetic field의 에너지는 감각적으로 감지될 수 있는 열을 발생하지 않는다고 보고하였다¹⁶⁾. 펠스 전자기장에 의해서 발생할 수 있는 더 심각한 부작용은 배자 기형 발생과 악성 종양의 발생 가능성이 관한 것이다. FDA에서는 전자기 교란을 이유로해서 pacemaker를 사용하는 사람과 임산부에서는 사용을 금지하고 있는데, 이같은 이유는 병아리의 배를 시간 변환 자기장에 노출시킨 경우 배자의 기형 변화와 기관 형성의 변화가 관찰 되었기 때문이다^{42,102)}. 또한 악성 종양에 대해서는 적입적으로 강한 전자기장에 노출된 경우 백혈병이 증가되는 경향이 있다는 보고가 있지만, Bassett는 현재 사용되고 있는 pulsed electromagnetic field가 악성 종양을 일으켰다는 사실을 인정할 수 없다고 반박하고 있으며, 경우에 따라서는 악성 종양을 억제한 경우도 있다고 하였다¹²⁶⁾. 이같이 악성 종양의 발생에 대해서는 상반된 주장이 대립되고 있으므로 이에 대해서는 보다 더 광범위한 연구가 진행되어서, 반드시 전자기장이 실험 동물에서뿐만 아니라 인체에서도 안전성을 확실하게 보장할 수 있는가를 입증할 필요가 있는 것으로 사료된다.

자기장은 영구 자석에 의해 형성되는 정적 자기장과 전자석에 의해 형성되는 전자기장으로 구별이 되나, 정적 자가장은 전자기장에 비하여 많은 약점을 가지고 있기 때문에 임상과 연구 영역에 있어서 주로 전자기장인 pulsed electromagnetic field가 이용되어 왔다. 동물 실험 혹은 인체에서 이용할 수 있을 정도의 크기를 가진 영구 자석에 의해 형성된 정적 자기장의 자기력이

매우 미약하기 때문에, 그동안 영구 자석은 주로 영구 자석의 견인력과 반발력을 이용한 임상 적용에 치중되어 왔으나^{23,57,58,115)}, 최근 보다 강력한 자기력을 가진 neodymium-iron-boron magnet이 개발되면서 Camilleri³⁵⁾ 등이 이같은 영구 자석에 의해 형성되는 정적 자기장이 기관과 세포와 같은 생물학적인 체계에 영향을 미친다고 하였으며, Tenforde는 정적 자가장이 유리기를 포함하고 있는 다양한 효소 체계에 영향을 미친다고 보고하고 있으나, 아직은 이에 대한 과학적인 입증이 부족한 실정이기 때문에 보다 더 광범위한 연구를 필요로 하고 있다.

V. 결 론

Half sine-wave pulsed electromagnetic field가 교정적인 치아 이동에 미치는 영향을 알아보기 위하여, Hartley guinea pig를 실험 대상으로 하여 상악 좌우측 중절치에 이개력을 발휘하는 스프링을 장착한 후, 실험군에만 half sine-wave pulsed electromagnetic field를 하루에 8시간씩 적용하여 발생한 치아 이동량과 이동 속도, 조직학적 소견을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 10일의 실험 기간 후 총 치아 이동량은 6g과 12g의 이개력을 적용한 모두에서 half sine-wave pulsed electromagnetic field를 적용한 실험군이 대조군에서보다 유의성 있는 더 큰 증가를 보였다($p < 0.001$).
2. 치아 이동 속도는 6g과 12g의 이개력을 적용한 모두에서 half sine-wave pulsed electromagnetic field를 적용한 실험군이 대조군에서 보다 유의성 있는 더 큰 증가를 보였다($p < 0.05$).
3. 10일의 실험 기간 동안 총 치아 이동량에 있어서 6g의 이개력 및 half sine-wave pulsed electromagnetic field를 함께 적용한 실험군 I과 12g의 이개력 만을 적용한 대조군 II를 비교할 때 4일에서 8일까지는 유의차가 없었으나, 1일에서 3일까지와 9일, 10일에서는 유의

성 있는 차이를 보였다($p < 0.01$).

4. 10일의 실험 기간 후 압박측에서 파골 세포수는 half sine-wave pulsed electromagnetic field를 적용한 실험군이 대조군에서 보다 더 많이 나타났다($p < 0.001$).

이상의 결과를 종합하여 보면 half sine-wave pulsed electromagnetic field를 적용한 경우 교정적인 치아 이동량이 증가되었다.

REFERENCES

1. Andrews, L.F. : The six keys to normal occlusion, Am. J. Orthod., 62 : 296-309, 1972.
2. ——— : Straight wire appliance : explained and compared, J. Clin. Orthod., 10 : 99-114, 1976.
3. ——— : Straight wire appliance : explained and compared, J. Clin. Orthod., 10 : 174-195, 1976.
4. ——— : Straight wire appliance : explained and compared, J. Clin. Orthod., 10 : 282-303, 1976.
5. ——— : Straight wire appliance : explained and compared, J. Clin. Orthod., 10 : 360-378, 1976.
6. ——— : Straight wire appliance : explained and compared, J. Clin. Orthod., 10 : 425-441, 1976.
7. ——— : Straight wire appliance : explained and compared, J. Clin. Orthod., 10 : 507-529, 1976.
8. ——— : Straight wire appliance : explained and compared, J. Clin. Orthod., 10 : 581-588, 1976.
9. Angle, E.H. : The latest and best in orthodontic mechanisms, Dent. Cosmos, 70 : 1143-1158, 1928.
10. Bassett, C.A.L., Becker, R.O. : Generation of electric potentials in bone in response to mechanical stress, Science, 137 : 1063-1064, 1962.
11. ———, Pawluk, R.J., and Becker, R.O. : Effects of electric current on bone in vivo, Nature, 204 : 652-654, 1964.
12. ——— : Biologic significance of piezoelectricity, Calcif. Tissue Res. 1 : 252-272, 1968.
13. ———, Herrmann, I. : The effect of electrostatic fields on macromolecular synthesis by fibroblasts in vitro, J. Cell Biol. 39 : 9a, 1968.
14. ———, Pawluk, R.J., and Pilla, A.A. : Acceleration of fracture repair by electromagnetic fields. A surgically noninvasive method, Ann.

- N.Y. Acad. Sci., 238 : 242-261, 1974.
15. ——— : Pulsating electromagnetic fields : A new method to modify cell behavior in calcified and noncalcified tissues, *Calcif. Tissue Int.*, 34 : 1-8, 1982.
 16. ———, Valdes, M.G., and Hernandez, E. : Modification of fracture repair with selected pulsating electromagnetic fields, *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 64-A : 888-895, 1982.
 17. ——— : Fundamental and practical aspects of therapeutic uses of pulsed electromagnetic fields (PEMFs), *Crit. Rev. Biomed. Eng.*, 17 : 451-529, 1989.
 18. Baumrind, S.A. : Reconsideration of the property of the "Pressure-tension" hypothesis, *Am. J. Orthod.*, 55 : 12-22, 1969.
 19. Beaulieu, J.F., Calvert, R. : The effect of EGF on the differentiation of the rough endoplasmic reticulum in fetal mouse small intestine in organ culture, *J. Histoschem. and cytol.*, 29 : 765-770, 1981.
 20. ———, Buck, D.I. : Rate changes in cell replication and protein synthesis in the periodontal ligament incident to tooth movement, *Am. J. Orthod.*, 57 : 109-131, 1970.
 21. Begg, P.R. : Differential forces in orthodontic treatment, *Am. J. Orthod.* 42 : 481-509, 1956.
 22. Binderman I., Cox, J.C. : Effect of mechanical stress on cultured periosteum cells : Stimulation of DNA synthesis, *J. Dent. Res.*, 56 : Abstract No. 86, 1977.
 23. Bondemark, L., Kurol, J. : Distalization of maxillary first and second molars simultaneously with repelling magnets, *Euro. J. Orthod.*, 14 : 264-272, 1992.
 24. Bouncci, E. : Knowledge on the origin, function and fate of osteoclasts, *Clin. Orthop.*, 158 : 252-269, 1981.
 25. Brighton, C.T. : Current concepts review - The treatment of non-unions with electricity, *J. Bone Joint Surg.*, 63A : 847-51, 1981.
 26. Brighton, C.T., and et al. : Electrically induced osteogenesis : Relationship between charge, current density, and the amount of bone formed : Introduction of a new cathode concept, *Clin. Orthop. and Rel. Res.*, 161 : 122-132, 1981.
 27. Burstone, C.J. : The rationale of the segmented arch, *Am. J. Orthod.* 48 : 805-821, 1962.
 28. ——— : Mechanics of the segmented arch technique, *Angle Orthod.*, 36 : 99-120, 1966.
 29. ———, and Koenig, H. A. : Force systems from an ideal arch, *Am. J. Orthod.*, 65 : 270-289, *Am. J. Orthod.*, 65 : 270-289, 1974.
 30. ——— : Optimizing anterior and canine retraction, *Am. J. Orthod.*, 70 : 1-20, 1975.
 31. ——— : Deep overbite correction by intrusion, *Am. J. Orthod.*, 72 : 1-22, 1977.
 32. ——— : The segmented arch approach to space closure, *Am. J. Orthod.*, 82 : 361-378, 1982.
 33. ———, and Manhartberger : Precision lingual arches : Passive application, *J. Clin. Orthod.*, 22 : 444-452, 1988.
 34. ——— : Precision lingual arches : Active application, *J. Clin. Orthod.*, 23 : 101-109, 1988.
 35. Camilleri, S., McDonald, F. : Static magnetic field effects on the sagittal suture in *Rattus Norvegicus*, *Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.*, 103 : 240-246, 1993.
 36. Chambers T.J. : Resorption of bone, In Davidovitch, Z., editor : *Biological mechanisms of tooth eruption and root resorption*, EBSCO Birmingham, Ala., 1988.
 37. Davidovitch, Z., Shanfeld, J.L., Iannaccone, W., and Korostoff, E. : Electric currents of orthodontic tooth movement in cats by locally applied electric currents, *J. Dent. Res.*, 56(A) : 190, 1977.
 38. ———, Shanfeld, J.L. : Prostaglandin E (PGE) levels in alveolar bone of orthodontically-treated cats, *J. Dent. Res.*, 59 : 977, 1980.
 39. ———, and et al. : Electric currents, bone remodeling and orthodontic tooth movement. I. The effect of electric currents on periodontal cyclic nucleotides, *Am. J. Orthod.*, 77 : 14-32, 1980.
 40. ——— : Electric currents, bone remodeling and orthodontic tooth movement. II. Increase in rate of tooth movement and periodontal cyclic nucleotides levels by combined force and electric currents, *Am. J. Orthod.*, 77 : 33-47, 1980.
 41. ——— : Biological mechanisms of tooth movement and craniofacial adaptation, 53-54, EBSCO, Birmingham, Ala., 1992.

42. Delgado, J.M.R., and et al. : Embryological changes induced by weak, extremely low frequency electromagnetic fields, *J. Anat.*, 134 : 3 : 533-551, 1982.
43. Epker, B.N., Frost, J. M. : Correlation of bone resorption of bone resorption and formation with the physical behavior of loaded bone, *J. Dent.Res.*, 44 : 33-41, 1965.
44. Estervig, D., Maerklein, P.B., and Scott, R.E. : Resistance to neoplastic transformation induced by non-terminal differentiation, *Cancer Res.*, 49 : 1008-1013, 1989.
45. Fontenelle, A. : Une conception parodontale du mouvement dentaire provoqué : Evidences clinique raisonnée, *Rev. Orthop. Dento-Faciale*, 16 : 37-53, 1982.
46. ——— : Lingual orthodontics in adults, In Melsen, B., editor : Current controversies in orthodontics, 219-268, Quintessence Publishing Co., Chicago, 1991.
47. Freidenberg, Z.B., and et al. : Bone reaction to varying amount of direct currents, *Surg. Gynecol. Obst.*, 131 : 894-899, 1970.
48. Fukada, E., Yasuda, L. : On the piezoelectric effect of bone, *J. Physiol. Soc.*, 12 : 1158-1160, 1957.
49. Gerling, J.A., Sinclair, P.M., and Roa, R.L. : The effect of electromagnetic fields on condylar growth in guinea pig, *Am. J. Orthod.*, 87 : 211-223, 1985.
50. Giannelly, A.A. : Force-induced changes in the vascularity of the periodontal ligament, *Am. J. Orthod.*, 55 : 5-11, 1969.
51. Hanaoka, H., Yabe, H., and Bun, H. : The origin of osteoclasts, *Clin. Orthop.*, 239 : 286-298, 1989.
52. Jacobs, J.D., Norton, L.A. : Electrical stimulation of osteogenesis in periodontal defects, *Clin. Orthop. and Rel. Res.*, 124 : 41-52, 1977.
53. Jarabak, J. P., Fizzel, J. A. : Technique and treatment with light wire edgewise appliances, 48-92, C.V. Mosby, 1972, Saint Louis.
54. Kiliaridis, S., Egermark, I., and Thilander, B. : Anterior open bite treatment with magnets, *Euro. J. Orthod.*, 12 : 447-457, 1990.
55. Kopczyk, R.A., Norton, L.A., and Kohn, M.W. : Method to investigate bioelectric regeneration of bone in periodontal defect, *J. Dent. Res.*, 4 : 914, 1975.
56. Kurihara, S. : An electronic microscopic observation of cell found in bone resorption area incident to experimental tooth movement, *Bull. Tokyo Med. Dent. Univ.*, 24 : 103-123, 1977.
57. Linder-Aronson, S., Lindskog, S. : A morphometric study of bone surfaces and skin reactions after stimulation with static magnetic fields in rats, *Am. J. Orthod.*, 99 : 1 : 44-48, 1991.
58. Malinin, G.I., Gregory, W.D., Morelli, L., Sharma, V.K., and Hench, J.C. : Evidence of morphological and physiological transformation of mammalian cells by strong magnetic fields, *Science*, 194 : 844, 1976.
59. McLeod, B.R., Smith, S.D., and Liboff A.R. : Timing and biosystem changes ; two important parameters in modeling ELF interactions with living systems. Scottsdale, Arizona : Bioelectric repair and growth society, 1991.
60. Melsen, B., Agerbak, N., and Markenstam, G. : Intrusion of incisors in adult patients with marginal bone loss, *Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.*, 96 : 232-241, 1989.
61. ——— : Tissue reactions following application of extrusive and intrusive forces to teeth in adult monkeys, *Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.*, 89 : 469-475, 1986.
62. ———, editor : Limitations in adult orthodontics : Current controversies in orthodontics, 147-180, Quintessence Publishing Co., Chicago, 1991.
63. Merrifield, L.L., Cross, J.J. : Directional force, *Am. J. Orthod.*, 57 : 450-464, 1970.
64. Miura, F., Kurihara, S. : Alveolar bone resorption caused by orthodontic stimulus, *Dent. Outlook*, 61 : 1231-1242, 1983.
65. Mostafa, Y.A., Weakly-Dybvig, M., and Osdoby, P. : Orchestration of tooth movement, *Am. J. Orthod.*, 83 : 245-250, 1983.
66. Moyer, R.E. : Handbook of orthodontics, 4th ed. : 306-331, Year Book Medical Publisher, Inc., Chicago, 1988.
67. Mulligan, T.F. : Common sense mechanics, *J. Clin. Orthod.*, 13 : 18-21, 1979.
68. Norton, L.A., Moore, R.E. : Bone growth in organ culture modified by an electric field, *J. Dent. Res.*, 51 : 1491-1499, 1972.
69. ——— : Implications of bioelectric growth con-

- trol in orthodontics and dentistry, *Angle Orthod.*, 45 : 34-42, 1975.
70. ———, and et al. : Epiphyseal cartilage cAMP changes produced by electric and mechanical perturbations, *Clin. Orthop. and Rel. Res.*, 124 : 59-68, 1977.
71. ———, Hansley, K.L., and Turkewics, J. : Bioelectric perturbations of bone, *Angle Orthod.*, 54 : 73-87, 1984.
72. ——— : Effects of pulsed electromagnetic fields on mixed chondroblastic tissue culture, *Clin. Orthop. and Rel. Res.*, 167 : 280-290, 1982.
73. ——— : The effect of aging cellular mechanisms on tooth movement, *Dent. Clin. North Am.*, 32 : 437-446, 1988.
74. ——— : Stress-generated potentials and bioelectric effects : their possible relationship to tooth movement. In Norton L.A., Burstone, C.J., ed. : *The biology of orthodontic tooth movement*, Boca Raton, Fla, 1989, CRC, Press.
75. Oppenheim, A. : A possibility for physiologic orthodontic movement, *Am. J. Orthod. and Oral Surg.*, #0 : 277-328, 1944. Proffit, W.R. : *Contemporary orthodontics*, 1st ed.
76. ——— : *Contemporary orthodontics*, 2nd ed., 266-288, Mosby Co., St. Louis, 1993.
77. Reitan, K. : Tissue rearrangement during retention of orthodontically rotated teeth, *Angle Orthod.*, 29 : 105-113, 1959.
78. ——— : Tissue behavior during orthodontic tooth movement, *Am. J. Orthod.*, 46 : 881-900, 1960.
79. ——— : Some factors determining the evaluation of forces in orthodontics, *Am. J. Orthod.*, 43 : 32-45, 1967.
80. ——— : Comparative behavior of human and animal tissue during experimental tooth movement, *Angle Orthod.*, 41 : 1-14, 1971.
81. ——— : Biomechanical principles and reactions, In Gruber, T.M., and Swain, B.D., ed. : *Current orthodontic concepts and techniques*, ed. 2, W.B. Saunders Co., Philadelphia, 1975.
82. Reitz, J.R., Milford, F.J., ed. : *Foundations of electromagnetic theory*, 2nd ed., Addison-Wesley Publishing Co., Massachusetts, 1978.
83. Reno, V.R., Nutini, L.N. : Effect of magnetic fields on tissue respiration, *Nature*, 198 : 204-205, 1963.
84. Ricketts, R.M., Bench, R.W., Gugino, C.F., Hilgers, J.J., and Schulhof, D.J. : Bioprogressive therapy Part 6. 93-110, *Rocky Mountain/Orthodontics*, 1979.
85. Rygh, P., Reitan, K. : Ultrastructural changes in the periodontal ligament incident to orthodontic tooth movement, *Europ. Orthod. Soc. Trans.*, 48 : 393-405, 1972.
86. ——— : Ultrastructural vascular changes in pressure zones of rat molar periodontium incident to orthodontic movement, *Scand. Dent. Res.*, 80 : 307-321, 1972.
87. ——— : Ultrastructural cellular reactions in pressure zone of rat molar periodontium incident to orthodontic movement, *Acta Odont. Scand.*, 30 : 575-593, 1972.
88. ——— : Ultrastructural changes in pressure zones of human periodontium incident to orthodontic tooth movement, *Acta Odont. Scand.*, 31 : 109-122, 1973.
89. ———, et al. : Activation of the vascular system, *Am. J. Orthod.*, 89 : 453-468, 1986.
90. Sandstedt, C. Einige Beiträge zur Theorie der Zahnregulierung. *Nordisk Tandläkare Tidsskrift*, 4 : 1-2, 1904.
91. Schwarz, A.M. : Tissue changes incident to orthodontic tooth movement, *The International Journal of Orthodontia*, 18 : 331-352, 1932.
92. Shamos, M.H., Lavine, L.S. : *Nature*, 81 : 4862, 1963.
93. Shapiro, E. : Orthodontic movement using pulsating force-induced piezoelectricity, *Am. J. Orthod.*, 73 : 59-66, 1979.
94. Stark, T.M., Sinclair, P.M. : Effect of pulsed electromagnetic fields on orthodontic tooth movement, *Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.*, 91 : 91-104, 1987.
95. Storey, E. : Bone changes associated with tooth movement. A histological study of the effect of force in the rabbit, guinea pig and rat, *Aust. J. Dent.*, 59 : 147-161, 1955a.
96. ——— : Growth and remodeling of bone and bones, *Am. J. Orthod.*, 62 : 142-165, 1972.
97. ——— : The nature of tooth movement, *Am. J. Orthod.*, 63 : 292-314, 1973.

98. Thurow, R.C. : Technique and treatment with the edgewise appliance, Mosby Co., St. Louis, 1962.
99. ——— : Edgewise orthodontics, 4th ed., Mosby Co., St. Louis, 1982.
100. Tipler, P.L. : Physics, 2nd ed., Worth Publishers, Inc., Michigan, 1982.
101. Tweed, C.H. : Clinical orthodontics, 2nd ed., Vol. I, II, Mosby Co., St. Louis, 1970.
102. Ubeda, A., Leal, J., Trillo, M.A., Jimenez, M.A., and Delgado, J.M.R. : Pulse shape of magnetic fields influences chick embryogenesis, *J.Anat.*, 137 : 3 : 513-536, 1983.
103. Vardimon, A., Gruber, T.M., Drescher, D., and Bourauel, C. : Rare earth magnets and impaction, *Am.J. Orthod. Dentofacial Orthop.*, 100 : 6 : 494-512, 1991.
104. Von Fraunhofer, J.A., Bonds, P.W., and Johnson, B.F. : Force generation by orthodontic samarium-cobalt magnets, *Angle Orthod.*, 62 : 3 : 191-194, 1991.
105. Woods, M., Nanda, R. : Intrusion of posterior teeth with magnets : An experimental in nongrowing baboons, *Am. J. Orthod.*, 100 : 5 : 393-400, 1991.
106. Yamasaki, K. : Effect of vitamine-D on orthodontic tooth movement in rats, *J. Stomatol. Soc. Tpn.*, 43 : 44-63, 1976.
107. ———, Miura, F., and Suda, T. : Prostaglandin as a mediator of bone resorption induced by experimental tooth movement in rats, *J. Dent. Res.*, 59 : 1635-1642, 1980.
108. Yasuda, L., Noguchi K., and Sta, T. : Dynamic callus and electric callus, *J. Bone Joint Surgery*, 3751 : 1292, 1955.
109. ——— : Fundamental aspects of fracture treatment, *Clin. Orthop. and Rel. Res.*, 124 : 5-8, 1977.
110. Zengo, A.N., Pawluk, R.J. and Bassett, C.A.L. : Stress-induced bioelectric potentials in the dentoalveolar complex, *Am. J. Orthod.*, 74 : 17-27, 1973.
111. ———, Bassett, C.A.L., Pawluk, R.J. and Prountzos, G. : In vivo bioelectric potentials in the dentoalveolar complex, *Am. J. Orthod.*, 66 : 130-139, 1974.
112. 강봉기 : Prostaglandin E 가 백서의 치아 이동시 치조끌 흡수에 미치는 영향에 관한 실험적 연구, 대한치과교정학회지, 13 : 2 : 147-155, 1983.
113. 권기열, 정규립 : Vanadium 화합물이 조골세포주 MC3T3-E1에 미치는 영향, 대한치과교정학회지, 24 : 2 : 17-55, 1994.
114. 김선해, 서정훈 : 간헐적 교정력에 의한 백서 구치 치주 조직의 변화에 관한 실험적 연구, 대한치과교정학회지, 19 : 2 : 57-69, 1989.
115. 김승철, 유영규 : 영구 자석을 이용한 고양이 구치부 intrusion에 관한 초기 조직학적 연구, 대한치과교정학회지, 20 : 1 : 169-178, 1990.
116. 김영복, 양원식, 이종흔 : 외인성 전류가 고양이 치조골의 cyclic nucleotides에 미치는 영향에 관한 연구, 대한치과교정학회지, 14 : 187-202, 1984.
117. 김종태, 양원식, 김중수 : 교정력 및 외인성 전류가 고양이 치조골의 prostaglandin E에 미치는 영향에 관한 연구, 대한치과교정학회지, 14 : 203-215, 1984.
118. 박영철 : 최신 교정 치료학, 1판, 지성 출판사, 서울, 1993.
119. 손홍범, 박영철 : 성견에서 전자력을 이용한 간헐적 교정력에 의한 치아 이동시 초기 조직학적 변화에 관한 연구, 대한치과교정학회지, 20 : 2 : 409-420, 1990.
120. 양상덕, 서정훈 : 맥동 전자기장과 하악골 전방 이동이 백서의 하악 과두 성장에 미치는 영향에 관한 실험적 연구, 대한치과교정학회지, 20 : 3 : 463-498, 1990.
121. 유명철, 배대경, 김종파, 안용성 : 전기 자극법을 이용한 장관골 불유합의 치료, 대한정형외과학회지, 18 : 6 : 1177-1182, 1983.
122. 이원유, 유영규 : 백서의 구치 이동 초기에 Prostaglandin E₂와 Evening Primrose Oil의 영향에 관한 형태학적 연구, 20 : 61-86, 1990.
123. 이인환, 유영규 : Guinea pig에서 실험적 치아 이동에 따른 치아 주위 조직의 변화에 관한 전자 현미경적 연구, 대한치과교정학회지, 13 : 165-176, 1983.
124. 장지우, 유영규 : 실험적 치아 이동시 견인측 치주 조직에 미치는 영향에 관한 전자 현미경적 연구, 대한치과교정학회지, 14 : 65-74, 1984.
125. 장영일, 김영호 : 제 1 소구치 발치와 상악 제 2 대구치 발치에 관한 교정학적 감별진단, 대한치과의사협회지, 22 : 129-140, 1984.
126. 최병택, 양원식 : 맥동 전자기장이 백서의 배양 두개관 세포에 미치는 영향, 대한치과교정학회지, 20 : 3 : 499-517, 1990.
127. 황충주, 손병화 : Biphosphate (Etidronate disodium) 투여후 치아 이동에 따른 치근 흡수 및 치조골 변화에 관한 연구, 대한치과교정학회지, 21 : 77-96, 1991.

-ABSTRACT -**A STUDY ON THE ORTHODONTIC TOOTH MOVEMENT UNDER HALF SINE-WAVE PULSED ELECTROMAGNETIC FIELDS****Young-Joon Kim · Young-Kyu Ryu***Department of Dental Science, College of Dentistry, Yonsei University*

The biologic potential, which is different from the piezoelectric signals, relates tooth movement at least in part to changes in bone metabolism in bioelectric theory.

The purpose of this experiment was to determine whether the application of half sine-wave pulsed electromagnetic fields (HSPEMF) could increase both the rate and amount of orthodontic tooth movement.

Forty-three male Hartley guinea pigs, weighting approximately 255g, were utilized in this study. The animals were 35 days old at the start of the study. Laterally directed orthodontic force was applied to the maxillary central incisors of 40 Hartley guinea pigs (20 experimental, 20 control). According to the amount of orthodontic force (6g, 12g), they were divided into two sub-groups (10 experimental I, 10 experimental II, 10 control I, 10 control II). During the experimental period, experimental animals were placed in plastic animal holders with their heads positioned in an area of uniform electromagnetic field. Control animals were placed in similar plastic holders that did not carry the electric apparatus.

The results were as follows :

1. The application of a HSPEMF to the experimental groups significantly increase the final amount of orthodontic tooth movement observed over a 10-day experimental period.
2. The application of a HSPEMF to the experimental groups significantly increase the velocity of orthodontic tooth movement observed over a 10-day experimental period.
3. There was no significant difference in the final amount of orthodontic tooth movement at the fourth day to the eighth day, but there was significant difference in the final amount of orthodontic tooth movement at the ninth, tenth day during a 10-day experimental period.
4. After 10 days of HSPEMF exposure & orthodontic force, the experimental groups demonstrated more osteoclasts in the pressure side than control groups.

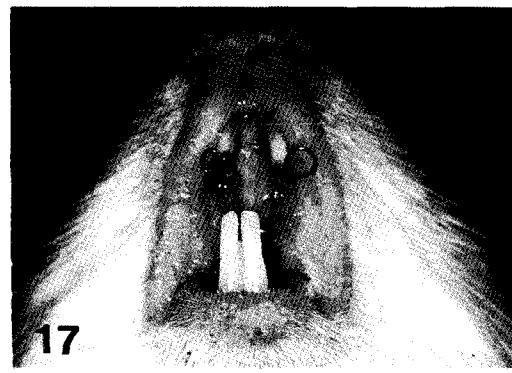
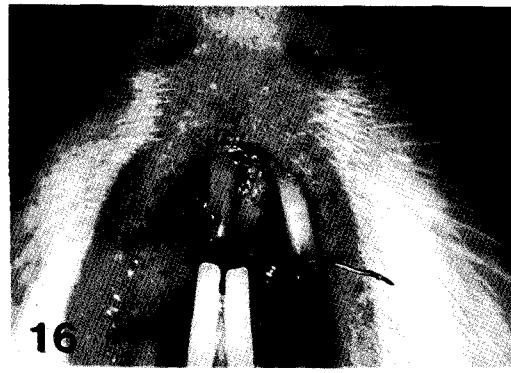
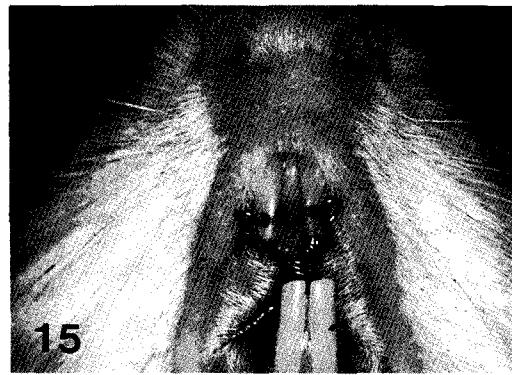
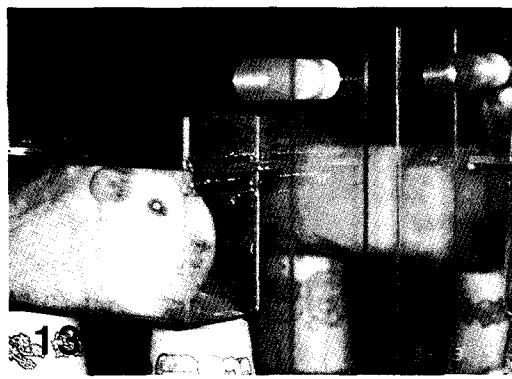
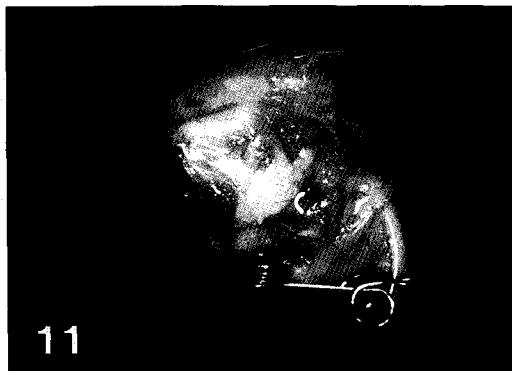
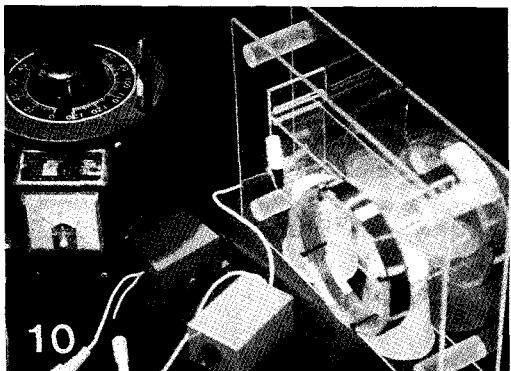
KOREA J. ORTHOD. 1994 : 24(4) : 897-916

Key words : Bioelectric theory, Bioelectric potential, Piezoelectric signals, Half sine-wave pulsed electromagnetic field (HSPEMF)

사진부도 설명

- 그림 10. Half sine-wave pulsed electromagnetic field를 발생시키는 장치로서 Helmholtz coil과 가변 전압기, 10 A용 정류기, 10 A용 휴즈가 직렬로 연결된 모습
- 그림 11. 이개 스프링을 장착한 Hartley guinea pig의 구강내 측면 모습으로 0.010 S-S로 제작한 이개 스프링이 장착되어 있다.
- 그림 12. 실험기간 동안 HSPEMF를 부여한 실험군 Guinea pigs 모습
- 그림 13. 실험기간 동안 HSPEMF를 부여하지 않은 대조군 Guinea pigs 모습
- 그림 14. 실험군 I에서 치아 이동량을 보여주는 정면 모습으로 대조군 I에서 보다 더 많은 양이 이개 되었다.
- 그림 15. 대조군 I에서 치아 이동량을 보여주는 정면 모습으로 실험군 I에서 보다 적게 이개 되었다.
- 그림 16. 실험군 II에서 치아 이동량을 보여주는 정면 모습으로 대조군 II에서 보다 더 많은 양이 이개 되었다.
- 그림 17. 대조군 II에서 치아 이동량을 보여주는 정면 모습으로 실험군II에서 보다 적게 이개 되었다.
- 그림 18. 실험군 I과 대조군 I의 치아 이동량을 비교한 모습으로 실험군 I이 대조군 I에서 보다 상악 좌우측 중절치가 더 많이 이개 되었다.
- 그림 19. 실험군 II와 대조군 II의 치아 이동량을 비교한 모습으로 실험군 II가 대조군 II에서 보다 상악 좌우측 중절치가 더 많이 이개 되었다.
- 그림 20. 실험군 II에서 압박측의 조직 소견 ($\times 150$)로 대조군 II에서 보다 더 많은 파골 세포를 보이고 있다(T : tooth, B : bone, → : 파골세포).
- 그림 21. 대조군 II에서 압박측의 조직 소견 ($\times 100$)으로 실험군 II에서 보다 파골 세포가 적게 보이고 있다(T : tooth, B : bone, → : 파골세포).
- 그림 22. 실험군 I에서 압박측의 조직 소견 ($\times 100$)으로 대조군 I에서 보다 더 많은 파골 세포를 보이고 있다(T : tooth, B : bone, → : 파골세포).
- 그림 23. 대조군 I에서 압박측의 조직 소견 ($\times 100$)으로 실험군 I에서 보다 파골 세포가 적게 보이고 있다(T : tooth, B : bone, → : 파골세포).

논문 사진부도 ①



논문 사진부도 ②

