

## 초소형 전기 장치에 의한 전기 자극이 치아 이동과 주위 조직 개조에 미치는 효과에 관한 연구

박순정<sup>1)</sup> · 이영준<sup>2)</sup> · 박영국<sup>3)</sup> · Zeev Davidovitch<sup>4)</sup>

낮은 강도의 전류는 골세포의 활성화 대사를 증가시키는 것으로 알려져 왔다. 이 연구는 초소형 전기 장치에 의한 전기 자극이 교정적 치아 이동에 미치는 영향을 규명하기 위하여, 체중 3kg 내외의 고양이 6마리를 대상으로 가철성 교정장치와 NiTi coil spring(75gm)을 사용하여 상악 견치를 이동시켰다. 실험군측 견치에는 교정력과 간헐적인 20 $\mu$ A의 전기 자극을 가하였고, 대조군측에는 같은 크기의 교정력만을 가한 후 4주 동안의 치아 이동량을 측정하여 비교하였으며, 치아를 중심으로 조직을 절취하여 탈회하고 조직 처리 후 광학 현미경으로 치주조직의 변화를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 28일간의 실험 기간 동안 실험측의 치아 이동량은 대조군에 비하여 현저히 증가하여, 4주후에 실험측의 치아는 대조군에 비하여 37% 증가된 이동량을 기록하였다.
2. 전기 자극을 받은 치아의 치근 견인측에서 대조군에 비하여 조직학적으로 증가된 골형성 양상이 관찰되었다.
3. 28일간의 전기 자극과 교정력으로 실험측 치아의 압박측에서 대조군에 비하여 증가된 골 흡수 양상이 관찰되었다.
4. 실험군 견치 치근 주위 조직에서는 전반적으로 더 많은 수의 조골 및 파골 세포들과 모세 혈관, 골양 조직들이 관찰됨으로써 증가된 조직 세포 활성을 반영하였다.
5. 1일 5시간 동안의 간헐적 전류 자극은 치아 이동량을 증가 시키고 조직 개조를 활성화 시키는 효과가 있었다.

이상의 결과는 외부에서 가한 낮은 강도의 간헐적 전기 자극으로 교정적 치아 이동량이 많아지고 치주 조직의 개조 활성이 증가됨을 보이므로 초소형 전기 장치에 의한 자극은 치아 이동과 주위 조직 개조를 촉진시킬 가능성이 있을 것으로 평가 되었다.

( 주요 단어 : 교정적 치아 이동, 전류, 조직 개조, 초소형 전기 장치 )

### I. 서 론

현재 널리 사용되고 있는 치열 교정 장치들은 대부분 기계적 힘을 치아 혹은 골조직에 가하여 치아의 이동을 조절하는 장치들이다. 교정적 치아 이동은 이동하고자 하는 방향으로 치아를 둘러싸고 있는 치조골의 흡수와 반대측 골의 침착에 의해 용이하게 진행된다. 치아 이동의 생물학적 기전에 대한 세포 생물학

<sup>1)</sup> 경희대학교 치과대학 교정학교실, 분당제생병원 치과교정과.  
<sup>2)</sup> 경희대학교 치과대학 교정학교실, 조교수.  
<sup>3)</sup> 경희대학교 치과대학 교정학교실, 교수.  
<sup>4)</sup> Case Western Reserve University, Cleveland, OH, USA.  
 교신저자 : 박영국  
 서울특별시 동대문구 회기동 1  
 경희대학교 치과대학 교정학교실 / 02-958-9395  
 ygpark@khu.ac.kr  
 원고접수일 : 2003년 4월 14일 심사통과일 : 2003년 6월 24일

적, 분자 생물학적 연구를 통해, 교정적 치아 이동을 위해 외부 자극원으로 사용되는 기계적 힘은 자극원의 일종이지 유일한 수단이 아님이 밝혀졌다. 그럼에도 불구하고, 치아 이동을 보다 효과적으로 유도할 수 있는, 기계적 힘 이외의 다른 자극원의 임상적 이용은 그리 활발하게 진행 되지 못했다. 이러한 자극원에는 기계적 자극 외에, 전기적, 화학적, 열이나 빛과 같은 물리적 자극들을 들 수 있으며, 이 들 가운데 유력한 후보 중의 하나가 전기 자극을 이용하는 방법이다.

골조직 내에서 전기적 성질에 관한 연구는 1950년대 초반으로 거슬러 올라간다. Fukada와 Yasuda는<sup>1)</sup> 골조직의 기계적 변형이 전위차로 전환될 수 있음을 보고하였고, 그들은 이 전위차가 조골 활성을 유도할 수 있는 신호가 된다고 가설하였다. 결체 조직 내에서 기계적으로 생전기가 유도된다는 사실이 장골에서 처음 관찰되었고 이 생전기가 골조직을 유지하고 기능적 요구에 대한 반응을 조절하는데 역할을 한다는 가설을 지지하는 여러 실험 결과들이 발표되었다<sup>2,3)</sup>.

자극을 받은 결체 조직 내에서 생전기의 발견은 외부에서 전류를 가해 주었을 때 이것이 조직에 미치는 영향에 대한 연구를 유도하였다. Davidovitch등<sup>4,5)</sup>은 비관혈적인 방법으로 고양이 치주조직에 직류 전류를 적용하는 실험에서 10-20 $\mu$ A의 직류 전류가 비관혈적 방법으로 치조골에 도달할 수 있고 치조골 개조 활성화에 영향을 미칠 수 있음을 보고 하였다. 음전극 근처에서는 골 형성이 일어났고 양전극 부위에서는 골 흡수가 관찰 되었다. 전류에 노출된 치주 세포에서 cAMP와 cGMP에 강하게 염색된 세포수가 증가하는 실험 결과를 통해 골세포에 대한 전류의 효과는 cyclic nucleotides에 의해 매개될 수 있음을 제안하였다. 또한 전류 자극에 의한 cyclic nucleotides의 변동은 호르몬이나 약물 투여 후에 관찰 되는 결과와 유사하다는 결론을 내렸다.

의학 분야에서는 전기력을 사용하여 장골에서 골절의 치유에 성공한 보고가 있어 왔다<sup>6, 7)</sup>. 치과 분야에서는 전자기장의 원리를 사용하여 치주 결손 부위의 치유를 가속화 시키고 치조골 흡수를 감소시키며 치조와의 치유를 증진 시키고 안면 구조물의 치유 속도를 증가 시키며 하악골 과두 성장을 자극하거나, 임플란트 식립 후 골 형성을 촉진시키고자 하는 시도가 있어왔다<sup>8)</sup>. 여러 실험들에서 가해진 전기장이 골과 연골에서의 정상적 전기적 상태를 바꿀 수 있고, 세포 분열과 대사 속도를 증가 시킬 수 있으며, 따라서 골 결손 부위 치유를 증진 시킬 수 있음을 보여 주었다<sup>9)</sup>.

낮은 강도의 전류를 골조직에 가할 경우 골세포의 활성화 대사를 증가 시킨다는 보고들을 바탕으로 하여 교정 치료에 직류 전류를 이용하기 위한 논의가 시작되었고, 고양이에서 직류 전류를 가했을 때 기계적 힘만을 가한 경우보다 치아 이동이 촉진된다고 보고 되었다<sup>4,5)</sup>. 이는 교정 치료 시 기존의 전통적인 기계적 힘을 전달하는 장치에 직류 전류를 함께 가한다면 치아 이동 속도를 증가 시켜 교정 치료 기간을 단축시킬 수 있음을 의미한다. 또한, 호르몬이나 약물 등이 그 효과가 치조골에 국한되지 않고 다분히 전신적으로 영향을 미치는데 반하여 국소적으로 적용된 전류는 전극 인접 부위 약 2~3mm에만 영향을 미칠 수 있고, 비관혈적으로 전극을 적용시키므로 구강 조직에 외상을 줄 필요가 없다는 점에서 보다 유리한 자극원이 된다<sup>5)</sup>.

그러나, 이러한 전류 자극을 교정적 치아 이동에 적용할 때에 장기간의 변화에 대한 조직학적 관찰과 전류 적용의 기간에 대한 고찰은 많이 이루어 지지 않았다.

본 연구는 20 $\mu$ A의 직류 전류를 공급하는 초소형 전기 장치를 가철성 유지 장치에 포함시켜 고양이의 상악에 장착하고 간헐적으로 전류 자극을 가하면서 상악 견치를 후방 이동시킨 후, 치아 이동량의 측정 및 조직학적 관찰을 통해 전기 자극이 교정적 치아 이동량과 치조골의 개조 과정에 미치는 영향을 규정하는데 목적이 있다.

## II. 연구재료 및 방법

### 1. 연구 재료

본 연구의 실험 대상으로는 3kg 내외의 고양이 6마리를 사용하였다. 실험 동물로써 고양이를 사용한 것은 첫째, 견치와 소구치 사이에 공간이 존재하여 치아의 발거 없이 치아 이동을 유도하기에 적합하기 때문이었다. 둘째, 치아의 발거 자체가 관련된 조직의 염증을 유발할 수 있어서 치주 조직에 대한 전류의 순수한 효과를 관찰 하기에 방해가 될 수 있다. 셋째, 고양이의 치은은 그 두께가 약 1.0~1.5 mm 가량으로 짧은 전류 경로를 허용하기 때문에 전극을 조직에 삽입할 필요 없이 표면 전극에서부터 하방 치조골까지 전류가 도달 할 수 있기 때문이었다.

### 2. 연구 방법

고양이 상악골의 좌측과 우측을 각각 실험군과 대

조군으로 하여 실험군에는 전기력과 교정력을, 대조군에는 교정력만을 가하였다. 매 실험 때 마다 동물들의 마취를 위하여 Ketamine과 Rompun(유한양행, 한국)을 1:1로 혼합한 후 근육 주사하였다(35mg/kg). 알지네이트로 인상을 채득한 후 석고 모형상에서 individual tray를 제작 하였다. 가철성 장치의 유지를 위해서 상악의 제 2, 제 3 소구치 근, 원심 면에 고속 엔진으로 유지구를 형성 한 후, Rubber 인상재를 사용하여 최종 모형을 만들었다. 전류 발생 장치와 클래스프를 모형에 적합 시키고 치은 조직에 직접 닿는 전극 부분과 클래스프의 끝 부분, 전류 발생 장치의 스위치 부분을 제외한 전기 장치의 나머지 부분은 레진으로 덮었다. 이 때, 전극의 양극(+) 부분은 견치의 원심측에, 음극(-) 부분은 견치의 근심측에 위치 시켰고, 혀나, 볼과 같은 연조직에 의해 전극이 치은 조직과 맞닿는 것이 방해 받지 않도록 레진이 전극 부위를 충분히 감싸고, 전정 부위까지 연장 되도록 하였다. 전극의 위치에 대하여 Friedenbergr 등<sup>10)</sup>과 Bassett등<sup>11)</sup>은 조직 반응이 전극으로부터 수 mm 내에 국한 된다고 하였고, Davidovitch 등<sup>4,5)</sup>은 국소적으로 적용된 전기는 전극 인접 부위 약 2~3mm에만 영향을 미친다고 하였다. Beeson 등의 실험에서<sup>12)</sup>, 치아 이동량의 유의할 만한 차이를 관찰 하지 못했던 것은 전극을 이동하려는 치아에서 다소 먼 거리, 즉 전극 간 거리를 15mm로 두었던 데에 원인이 있었던 것으로 생각된다. 따라서, 본 연구에서는 전극을 이동 시키려는 치아의 치근에서 1.5~2mm 이내에 위치 시키고자 하였다.

마취 하에 장치를 장착하고, 상악 견치에 lingual button(ORMCO, Glendora, USA)을 부착하였다. 견치의 원심 이동을 위하여 NiTi extension spring(light force, ORMCO, Glendora, USA)을 사용하였는데, 한 쪽 끝은 가철성 장치에 포함 시킨 강철 hook에 연결하고, 반대편은 견치에 부착된 lingual button에 ligature tying 하면서 스프링을 활성화 시켜서 좌, 우측 모두 약 75gm의 힘이 가해지도록 하였다. 전류 발생 장치의 스위치를 on/off 시켜서 하루에 5시간 동안 실험측에 전류가 흐르도록 조절하였으며, 전류 공급량은 digital multimeter (digital high tester 3256, Hioki, Nagano, Japan)를 사용하여 확인 하였다. 일주일 간격으로 전자 caliper를 사용하여 양측 견치의 이동량을 0.02mm까지 측정 하였다.

가하는 전류의 양과 전류의 형태에 대하여, 대부분의 연구들에서 0.1~100 $\mu$ A 범위의 직류 전류를 사용하였고, 일부는 파동형의 직류 전류, 교류 전류, 전자

장치를 사용하여 전기 자극을 가하였다 Friedenbergr 등<sup>10,13)</sup>과 Bassett등<sup>11)</sup>은 가해진 직류 전류 양의 변화에 따른 골 반응을 관찰 하였는데, 조직의 파괴는 양극에서 일어났고 20 $\mu$ A와 그 이상에서 가장 심했다고 보고하고, 골 형성은 음극에서 일어났으며 최적의 전류는 5~20 $\mu$ A라고 하였다. 다양한 주파수, 진폭, 유형의 전류에 의한 골 형성 양을 비교한 결과, 어떤 것도 20 $\mu$ A의 일정한 직류 전류에서보다 많은 양의 골 형성을 하는 경우는 없었다. 전극 재료의 종류도 최적의 전류 크기를 결정하는 요소인데, 강철선의 경우에는 20 $\mu$ A, 백금의 경우는 3~5 $\mu$ A, 은의 경우는 훨씬 낮은 즉, nanoampere 범위의 전류가 골 형성을 유도하는 최적의 전류라고 보고된 바 있다. 따라서, 본 연구에서는 강철 전극을 사용하여 20 $\mu$ A의 직류 전류를 공급하고자 하였다. 또한, 전극 부위에서 조직 저항이 생김에 따라 골 조직에 제공되는 전류는 감소하므로<sup>13)</sup>, 조직 저항에 영향을 받지 않고 일정한 전류를 공급 할 수 있도록 설계된 장치를 사용 하였다.

4주 후에 마취제를 과량 주사하여 고양이를 희생시킨 후, 상악을 적출하여 10% neutral formalin에 고정 하였다. 고정 후, 탈회, 수세, 탈수의 과정을 거친 후 파라핀에 포매 하였다.

조직 절편을 제작 하고 H-E 염색을 시행 한 후 광학 현미경으로 검경하여 조직의 변화를 관찰 하였다.

### 전류 발생 장치

본 연구에서 사용한 전류 발생 장치는 소형의 인쇄 회로 기판 위에 소형 전기 소자 및 소형 전지를 기판 양쪽에 집적하여 크기를 최소화 하였다. 아래 그림은 (Fig. 1) 본 연구의 전기 장치 회로도 이다.

Q1과 Q2는 트랜지스터로서, 각각의 베이스 전극이 서로 연결되고 Q1의 베이스는 콜렉터와 연결되어 다이오드 동작을 하는 전형적인 전류 반복기 형태를 취하고 있다. 실제 치아에 인가되는 전류는 전원의 양극에서 공급되어 치아 골조직을 거친 후 음극으로 들어와 Q2의 콜렉터를 거쳐 전지의 음극으로 흐른다. 이때의 전류 값은 트랜지스터 Q1과 저항 R1, R2 및 전지의 전압으로 결정된다. Q1으로 흐르는 전류는 치아에 흘리는 전류를 조절하기 위한 부가적인 전류이므로, 전지의 전류 소모량을 줄여 사용시간을 늘리기 위해 최소화 되어야 한다. 따라서, 에미터 저항(R2)에 의해 Q1에 흐르는 전류를 Q2에 흐르는 전류보다 훨씬 작게 할 수 있다. 가장 적절한 자극 전류는 약 20 $\mu$ A 정도로 알려져 있으므로, 전원은 1.5V 가량의 전압을

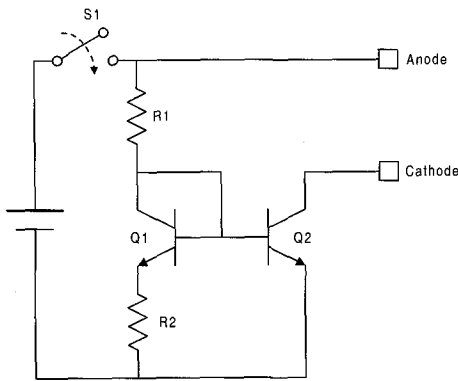


Fig. 1. Schematic diagram of electric circuit  
S1 : switch Q1, Q2 : transistor  
R1, R2 : resistor

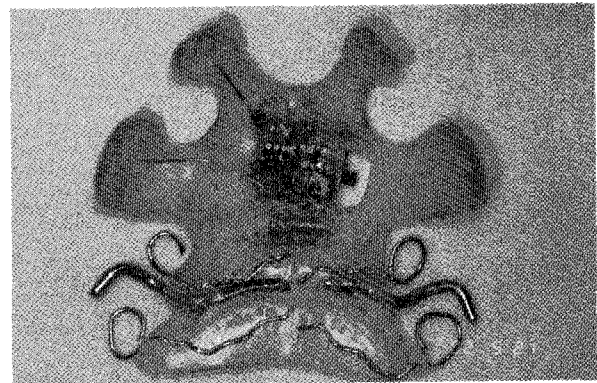


Fig. 2. Electric device used to deliver 20 $\mu$ A of constant direct current to gingiva

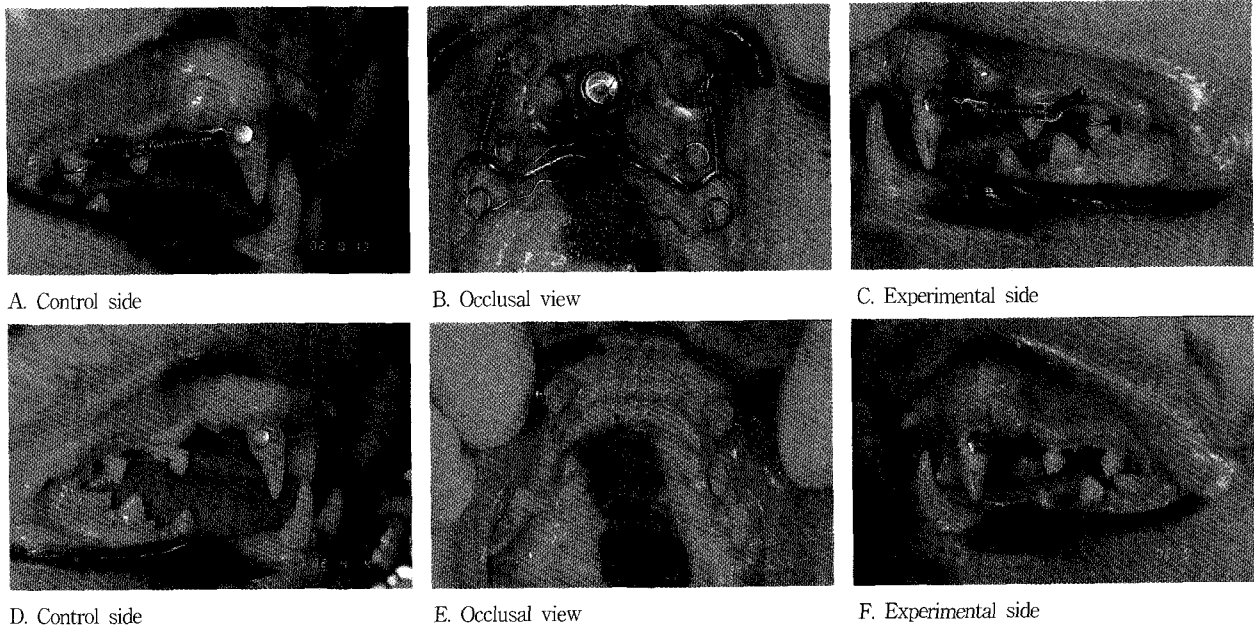


Fig. 3. Results after 2 weeks of treatment (A, B, C) and 4 weeks of treatment (D, E, F)

갖는 버튼형 초소형 전지 1개로 구현될 수 있다. 스위치(S1)에 의해 동작을 on/off 시킬 수 있다.

본 연구의 장치는 기존 장치에 비하여 다음과 같은 장점을 갖는다.

- 1) 소형 전지 1개로 동작 가능하므로 초소형으로 교정 장치에 부가하여 사용 가능하다.
- 2) 인쇄 회로 기판에 집적화하여 소형화를 도모하였다.

3) 개체간 혹은 장착될 위치간 치아 조직의 등가 임피던스의 변화에도 일정한 전류가 유지 된다.

4) On/off 스위치로 장치 장착 후 동작 시간 조절이 가능하다.

장치는 6mm×8mm 크기의 인쇄 회로 기판에 구현되었으며, 전지를 제외한 모든 소자들이 한 쪽 기판 면에 장착되었고, 전지는 반대편 기판에 장착 되었다 (Fig. 2). 장치 구현에 사용된 소자는 다음과 같다.

Table 1. Mean and standard deviation of tooth movement at each experimental period.

	Experimental side	Control side	Statistical significance (type I error p-value)	Clinical significance (proportionate increment in % = ((mechanical + electrical) mechanical) / mechanical only)
1 week	1.05 ± 0.65mm	0.66 ± 0.59mm	0.063	61%
2 week	0.91 ± 0.95mm	0.97 ± 0.86mm	0.813	-6%
3 week	1.07 ± 0.66mm	0.63 ± 0.44mm	0.031*	68%
4 week	0.55 ± 0.08mm	0.36 ± 0.40mm	0.438	54%
Sum	3.58mm	2.62mm	0.144	37%

\*p<0.05

- 1) 소형 건전지 : Silver-Oxide, 지름=6mm, 두께=1.6mm, 전압=1.55V (SONY, Tokyo, Japan)
- 2) 트랜지스터 IC : dual bipolar IC (ZDT 1049, Zetex, Manchester, UK)
- 3) 저항 : 칩 저항 2개(R1:180kΩ, R2:68kΩ)
- 4) 강철 전극
- 5) 스위치

**통계**

통계적 분석은 SAS JMP4.0.4(SAS Ins. Cary, USA)를 사용한 Wilcoxon Signed Rank Test를 사용하였다. 통계적 유의성은 type I error p-value로 평가되었다. 집단 내 대상의 수가 작았으므로 (n=6), 치아 이동의 실제 차이의 크기와 무관하게 통계적 유의성이 없을 가능성이 매우 높았다. 따라서, proportionate increment index를 사용한 임상적 유의성을 측정 하였다.

**III. 연구성적**

**1. 치아이동량**

매 주마다 측정된 고양이 견치의 치아 이동량은 실험측과 대조측이 동일하지 않았으며, 4주후에는 육안으로 구별할 수 있을 만큼의 이동량의 차이가 관찰되었다(Fig. 3). 6마리의 고양이에서 매주 측정된 치아 이동량의 평균값은 다음과 같았다(Table 1).

2주째를 제외한 나머지 기간 동안에 실험군에서의 평균 치아 이동량이 대조군에서 보다 많았다. 1주째에는 한 마리를 제외한 다섯 마리의 고양이에서 실험측의 치아 이동량이 대조측 보다 많았다. 2주째에는

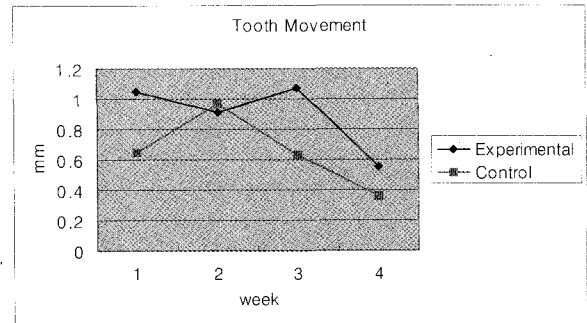


Fig. 4. Tooth movement at each experimental period.

한 마리에서는 동일한 이동량, 네 마리에서는 실험측이 대조측보다 많은 이동량, 나머지 한 마리에서만 대조측이 실험측보다 많은 치아 이동량을 나타내었으나, 그 차이가 컸기 때문에 평균치에서는 대조측과 실험측의 치아 이동량이 거의 차이가 나지 않는 것으로 계산되었다. 3주째에는 총 여섯 마리의 고양이 모두에서 실험측의 이동량이 대조측 보다 많았다. 4주째에는 한 마리를 제외하고 나머지 실험 동물에서의 치아 이동량이 실험군에서 많았다.

위 그래프(Fig 4)에서 보는 바와 같이 대조군에서의 치아 이동은 2주째에 최고에 도달하고 3주째에는 1주째 수준으로, 4주째에는 다시 그 절반으로 줄어 들었다. 반면, 실험군에서는 1, 2, 3주 째가 거의 동일한 수준의 치아 이동량을 나타냈고, 4주째의 치아 이동량은 그 전 주까지의 이동량의 절반 수준이었다.

통계적 유의성과 임상적 유의성을 살펴보면, 위 Table 1에서와 같이 1주에서, 실험측에서의 치아 이

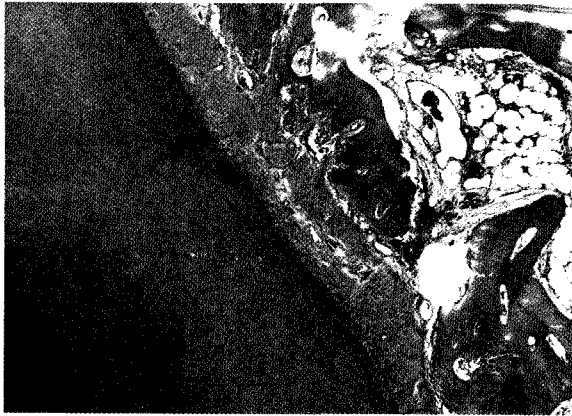


Fig. 5A. ×40

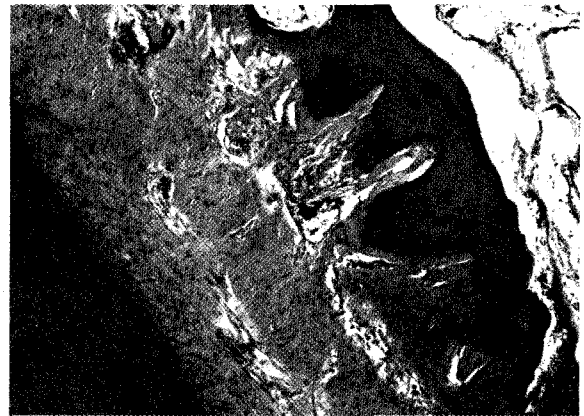


Fig. 5B. ×100

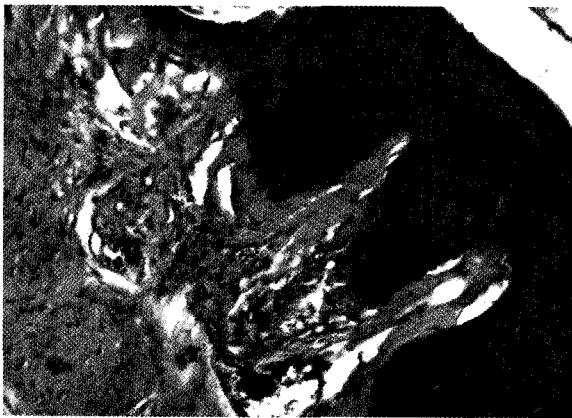


Fig. 5C. ×200

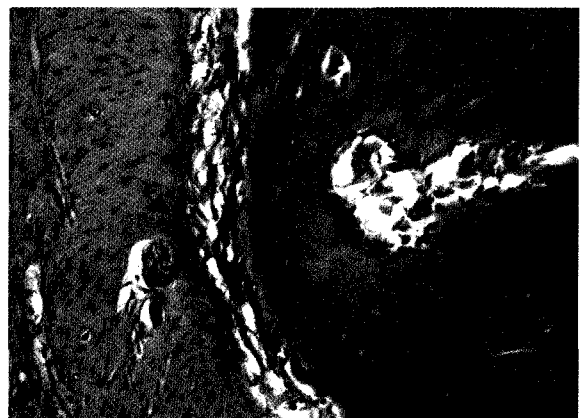


Fig 5D. ×200

Fig. 5. Mesial aspect of the experimental canine. Note the increased osteoblastic activity. A. Note the increase of cellular elements and widening of PDL space. B. Newly formed bundle bone and osteoid were detected. C. Osteoid tissues are marked. D. Stretched fibers, osteoblastic cells and reversal lines were seen.

동량이 61% 많았다. 그러나, 그 차이는 통계학적 유의성이 없다 ( $p=0.063$ ).

2주에서, 실험측에서의 치아 이동량은 6% 작았다. 그 차이 또한 통계학적 유의성은 없었다 ( $p=0.813$ ).

3주에서, 실험측과 대조측의 치아 이동량은 통계학적으로 유의한 차이가 있었다 ( $p=0.031$ ). 실험측에서의 치아 이동량이 대조측 보다 68% 많았다.

4주에서, 실험측에서의 치아 이동량은 대조측에 비하여 54% 많은 것으로 측정 되었다. 그 차이는 통계학적 유의성은 없었다 ( $p=0.438$ ).

이상의 결과에서 실험측의 치아 이동량과 대조측의 치아 이동량의 차이는 3주째를 제외하고는 통계학적 유의성은 없는 것으로 분석되었으나, 그 임상적 유의성은 각각 61%, -6%, 68%, 그리고 54% 실험측에

서의 치아 이동량이 많았으며 총이동량에 있어서는 실험측의 이동량이 37% 많았다.

## 2. 조직학적 소견 (Fig. 5~8)

상악 견치 치근의 근심측에서는 치주 인대에서 치근을 향하여, 신생골의 형성이 관찰 되었는데 실험군 견치에서 더 많은 양의 골양 조직과 조골 세포, 모세 혈관 증식이 관찰되었다. 견치 원심측에서는 치조골의 흡수가 관찰 되었고, 실험측에서는 대조군에 비하여 증가된 파골 양상과 백악질의 흡수 양상이 관찰 되었다. 전반적으로 실험측에서, 더 많은 조골과 파골 세포들이 관찰되고, 증가된 세포 활성을 나타내었다.

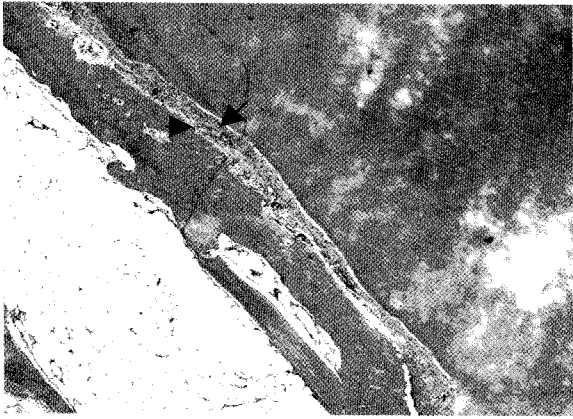


Fig. 6A.  $\times 40$



Fig. 7A.  $\times 40$

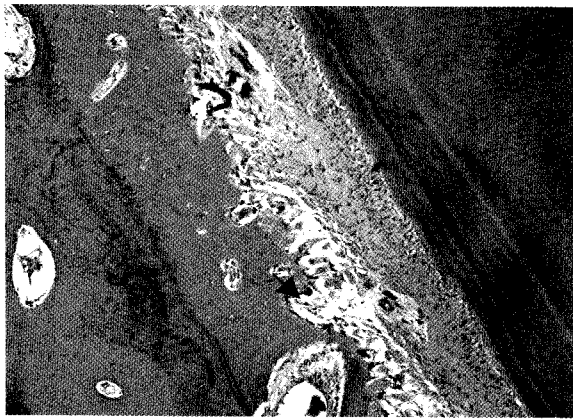


Fig. 6B.  $\times 100$

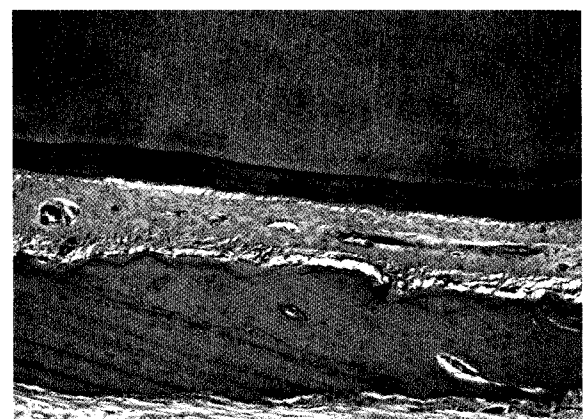


Fig. 7B.  $\times 100$

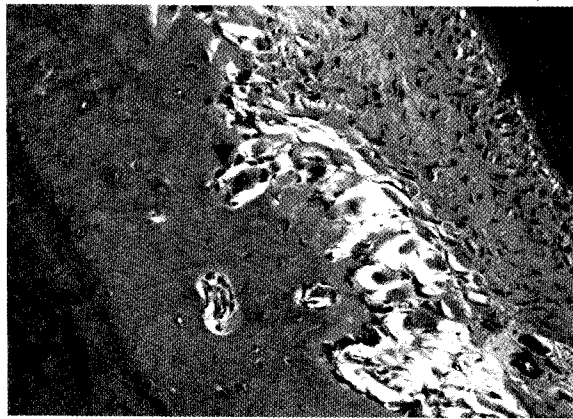


Fig. 6C.  $\times 200$

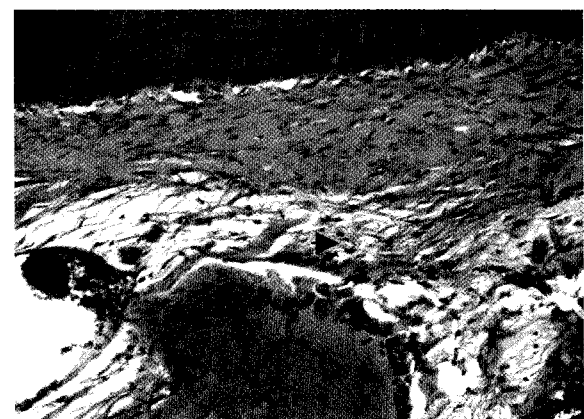


Fig. 7C.  $\times 200$

**Fig. 6.** Distal aspect of the experimental canine. Note the increased osteoclastic and cementoclastic activity. A. Narrowed PDL space was seen. B. Irregular bone surface and resorption lacunae were examined. C. Note numerous osteoclasts along the bone surface.

**Fig. 7.** Mesial aspect of the control canine. A. This photograph showed widened PDL space. B. Bony deposition and fiber lengthening were observed. C. The stretched fibers and the lining of osteoblasts indicated the tension side.

IV. 총괄 및 고찰

1957년 Fukada와 Yasuda는 골조직 내에서 piezoelectricity를 관찰하였는데, 그들은 기계적인 방법에 의한 골조직의 구부러짐이 압박 부위와 장력 부위에 전위차를 유발 한다는 사실을 보고하였다. 전위차는 가해진 부하에 비례하고, 압박하에 있는 조직에서는 음전위가, 장력하에 있는 조직에서는 양전위가 생긴다고 하였다<sup>1)</sup>. Piezoelectricity란 많은 결정체들 내에서 관찰 되는 현상으로, 결정 구조의 변형으로 결정 격자 내에서 전자가 변위 됨으로써 일어난다. 골 무기질이 piezoelectric한 성질을 가진 결정 구조일 뿐 아니라, 교원질 자체도 piezoelectric 하여<sup>14-17)</sup> 건조 골 시편 내의 stress-generated potentials은 piezoelectricity에 의해 발생하는 것으로 간주 되었다. 한편, 체액 내 이온들은 골이 구부러 질 때 생기는 복잡한 전기장과 상호 작용하여 전기 신호를 일으켜서, 세포외액에 전류가 생성 된다. 이 때 관찰되는 작은 전압을 streaming potentials이라고 부르는데, 이는 전기적으로 하전된 체액이 고정된 전하를 가진 세포막 위를 밀고 나갈 때 생기는 것이다. 이 전압은 건조한 물질에서 관찰되는 piezoelectric signals과는 다르지만, 유사한 특징들을 가진다. Pollack 등은<sup>18)</sup> 살아있는 골내에 존재하는 체액은 생화학적으로 활성을 가진 매개일 뿐 아니라, 전기-기계적 효과에 중요한 요소라고 하였다. 골조직은 전기적 이중층으로 둘러싸여 있고 이 안에서 스트레스와 연관된 체액의 흐름과 조화를 이루는 전하의 흐름이 생겨서 이들은 세포막 뿐 아니라, 주변 거대 분자들에 까지 영향을 미친다고 가정하였다. 장골들이 기계적 스트레스를 받을 때 생기는 개조 변화나, 교정력에 대한 치조골의 조화로운 변화를 유도하는 자극 신호로써 골조직의 전기적 성질이 제안 됨으로써<sup>19)</sup> 이 전기적 성질이 생물학적 전환기, 즉 자극을 생물학적으로 인식 가능한 신호로 변환하여 성장과 흡수 과정을 조절할 가능성에 대하여 관심이 모아 졌다<sup>17)</sup>.

골조직 내에서 전기적 성질에 대한 발견은 골 치유와 재생에 외재성 전류의 사용 가능성에 대한 실험으로 이어졌다. 1960년대 이 후 외인성 전류를 사용하여 골형성을 개시하고, 비유합 골의 치유 과정에서 골침착을 증진 시키는 시도들이 많이 이루어졌다. Bassett 등<sup>20)</sup>, Lavine 등<sup>16)</sup>, Friedenber 등<sup>10)</sup>은 동물에서의 생체 실험을 통해, Lavine 등<sup>21)</sup>, Masureik과 Eriksson은<sup>7)</sup> 인체에서, 전류 자극에 의해 음극 주위에서는 골 형

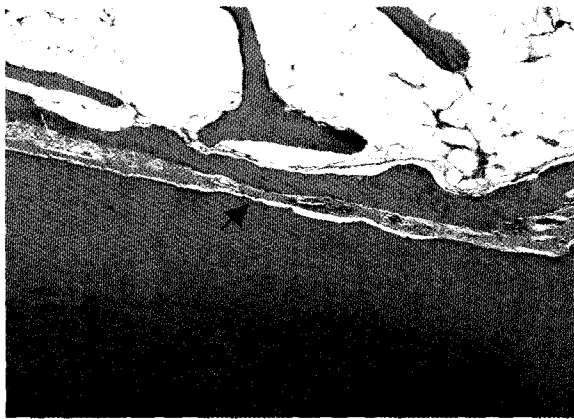


Fig. 8A. ×40

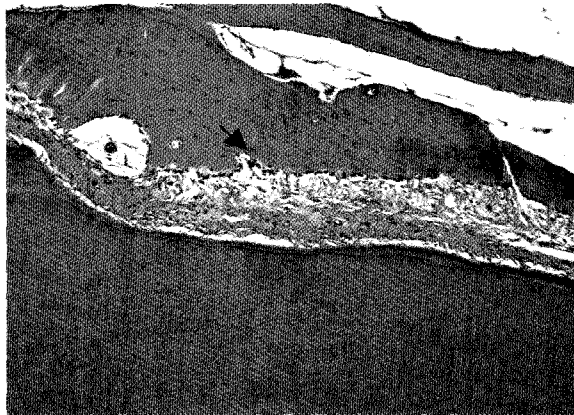


Fig. 8B. ×100

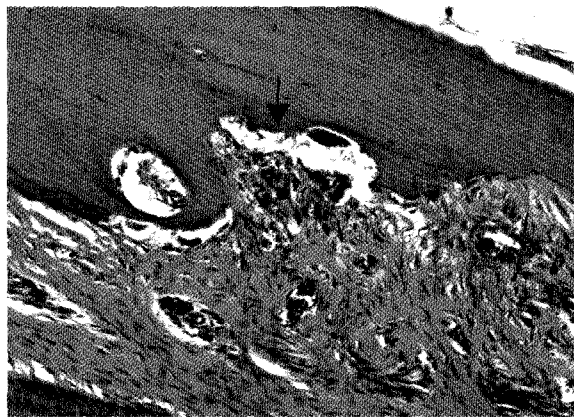


Fig. 8C. ×200

Fig. 8. Distal aspect of the experimental canine. A. PDL space was constricted. B. Osteoclastic activity was seen. C. Resorption lacuna and osteoclastic activity were obvious in the higher magnification.



성이 양극 주위에서는 골 흡수가 증가되는 것을 보고하였고, Forsted등은<sup>22)</sup> 비유합 환자의 치유가 개선되는 임상 결과를 관찰하였다.

고무적인 임상적 증거에도 불구하고, 전류 적용 후에 관찰되는 조직 변화들과 이를 야기하는 기전에 대해서는 명확하게 알려지지 않고 있다. 전류에 의한 조직 변화는 크게 두 가지 관점에서 설명하고 있는데, 이는 세포 미세 환경의 변화에 의한 것과 직접적 세포 활성의 변화에 의한 것이다<sup>16)</sup>. 음극 주위에서 감소된 산소 분압과 증가된 수소 이온 농도를 관찰하고, 이러한 세포 주변의 미세 환경 변화는 세포들의 골형성 반응에 영향을 준다고 하였다<sup>7,23)</sup>. 알칼리성 환경이 골형성에 유리한데, 낮은 조직 산소 분압은 미토콘드리아에서 칼슘의 유리를 활성화하고 이는 국소적으로 석회화 과정을 개시하는 것이라고 하였다. 골세포 활성에 대한 직접적인 영향으로 cAMP system의 활성화<sup>4,5,24)</sup>, 세포막 수용기, 이온 통로의 변화, 세포 골격 요소들의 변화, 세포의 증식 활성의 변화<sup>25)</sup>, 세포 분화의 증가<sup>8)</sup> 등이 언급되었다. Davidovitch등은 기계적 힘이나, 전자기장을 적용시킨 후 치조골과 치주 세포에서 cyclic nucleotides (cAMP, cGMP)와 prostaglandins의 증가를 관찰하고, cyclic nucleotides가 전자기장 자극에 대한 세포 반응에서 중심적인 역할을 한다고 하였다<sup>4,5)</sup>. Lavine등<sup>21)</sup>은 직류전류를 가한 골절 부위의 세포들에서 골지 복합체에서 유래한 membrane-bound vesicles의 수가 증가하고, 이 vesicles에서 dense material이 활발하게 분비되는 것이 보였으며, rough endoplasmic reticulum이 ribosome-lined cisternae로 형태적인 전이를 하고, 미토콘드리아의 공포화(vacuolization)를 통해 세포 활성이 자극됨을 보고 하였다. Evans 등<sup>26)</sup>은 조직에 대한 전기 자극의 영향으로써, 혈류량의 증가, 산소압의 증가, 콜라겐의 형성, 중성구와 대식 세포의 혈관외 유출의 증가, 박테리아의 억제 등을 들었고, 전기 자극은 만성적인 외상 부위에서 치유의 촉매제와 같은 역할을 하고 외상 수축을 돕고, 일부 성장 요소의 생성을 증가시킨다고 하였다<sup>8)</sup>. 이와 같이 전류에 의해 유도되는 골 형성의 정확한 기전에 대해서는 명확히 알려지지 않았으나, 여러 가지 요소들이 관련되어있고 한가지 이상의 기전이 역할을 하는 것 같다.

골조직의 전기적 성질에 대한 관찰이 교정학에서는 교정력에 의한 치조골의 bending 개념의 재 도입을 촉진 시켰다. 교정력에 의해 치조골이 구부러 질 수 있다는 것은 Farrar에 의해 1888년에 강조 되었고,

Baumrind<sup>27)</sup>는 쥐에서, Grimm<sup>28)</sup>은 사람에서 그 현상을 관찰 하였다. Picton은<sup>29)</sup> 아주 작은 힘으로도 치조골의 구부러짐 가능하며, 초기 치아 이동량의 25%는 골의 변형에 의한 것이라고 하였다. DeAngelis는<sup>19)</sup> 치조골의 구부러짐에 의해서 생기는 하전된 입자와 이로 인한 전기적 환경의 변화가, 치근막과 직접 접촉하지 않는 바깥 협측 혹은 설측 골면에서도 교정력의 영향을 받게 되는 기전이 될 것이라고 하였다. 교정력에 의한 치조골의 편향은<sup>27,29)</sup> piezoelectric response를 유도하고, 이 때 전기적 음극 부위에서는 골 형성이, 전기적 양성 혹은 중성 부위에서는 골 흡수가 생김으로써 외력과 세포의 대사 활성을 연결하는 주요 기전으로 간주 되었다.

골조직에서의 전기적 현상이 치아 이동을 조절하는 기전의 하나로 설명되면서, 외부에서 가해진 전류가 교정적 치아 이동에 영향을 줄 가능성에 대해 연구하게 되었다. 동물과<sup>5)</sup> 사람에서의 실험<sup>30)</sup> 모두에서 낮은 전압의 직류 전류를 가했을 때, 생전류가 조절되면서 치아 이동이 빨라지는 것을 관찰 하였다. 전자기장 또한 세포막 전압과 투과성에 영향을 줄 수 있어서 세포 활성 변화를 유발 시킬 수 있다. 동물 실험에서 전자기장이 치아 이동이 일어나기 전의 초기 lag phase를 단축 시킴으로써 치아 이동을 가속화시키는 것을 관찰하였다. Davidovitch 등의 연구는 전류 적용 7일 후에 치조와를 따라 음극 근처에서 새로운 골 기질의 형성을 관찰하였고, 생화학적으로는 음극과 양극 모두 근방의 골 표면 세포들과 치주인대 세포에서 1일 후에 cyclic nucleotides에 강하게 염색된 세포들이 발견 되었다. 기계적 힘이 가해졌을 때 관찰되는 다양한 염색 강도와는 대조적으로 전극 주변의 조골 세포와 치주 인대 세포들은 cyclic nucleotides에 다소 일정한 염색강도가 관찰되었는데, 이는 전류가 기계적 응력 보다 골과 치주 인대 세포에 대한 보다 효과적인 자극될 일 수 있음을 암시한다. 교정치료 중에 치주조직에 전류를 가해주면, 기계적 힘의 효과에 효력을 더하여 세포들의 활성을 증가시키고, 개조 과정에 보다 많은 세포들을 유입 시키게 된다고 하였다<sup>4,5)</sup>.

이와 같이 전기 자극을 이용하여 치아 이동을 가속화 시키고자 하는 시도는 이미 1980년대 이전부터 있어 왔으나, 임상에서 실용화 되기에는 몇 가지 문제점들이 지적되어 왔다. Davidovitch등의 이전 연구들<sup>4,5)</sup>은 최대 관찰 기간을 2주까지로 제한 하였으므로 2주 후에 대조측에서의 치아 이동이 실험측을 따라 갈 수

있는 가능성을 배제 할 수 없었다. 또한, 4개의 전지가 사용된 크기가 큰 전기 발생 장치로 실험 기간 내 내 전류가 흐르도록 디자인 되었는데, 이로 인한 치은의 자극이 관찰 되었고, 이는 전기력과 교정력이 아닌 다른 자극에 의한 염증 반응의 유발로 전기력과 교정력만의 순수한 효과를 관찰 하는데 어려움이 있었다. Storey는<sup>31)</sup> 염증을 교정에서 조직 반응의 필수적인 부분으로써 치아 이동을 용이하게 하는 흡수 기능과 침착 기능 모두에 필요한 세포들을 제공하는 과정이라고 하였다. 순수한 전류의 효과를 알기 위해서는 전류의 효과가 장치의 자극이나 불량한 구강 위생 등으로 인한 염증의 형성으로 감추어지거나 과장되어서는 안 된다. 따라서 본 연구는 이와 같은 문제점들을 보완하여, 장치에 의한 자극을 최소화 할 수 있는 초소형의 전기 발생장치와, 스위치의 개폐를 통한 자극 시간의 조절, 그리고 관찰 기간을 4주까지 연장하여 교정적 치아 이동에서 간헐적 전류 자극의 효과를 알아보고자 하였다.

Rinaldi 등<sup>25)</sup>은 생체 내에서 골 개조 활성이 최고조에 이르는 것은 전기자극 약 2~3주 후인 것 같다고 보고 하였다. Masureik과 Eriksson은 치유 과정이 10~14일 후에 증가 하는 것을 관찰 하였다<sup>7)</sup>. Bassett 등<sup>20)</sup>도 음극 주변에서의 골 형성은 2주경에 최고에 도달 하였고, 3주군에서는 보다 성숙된 섬유골이 관찰 되었다고 보고 하였다. 본 연구의 결과는 대조군에서는 2 주째에 전치의 평균 이동량이 최고에 이르렀다가 이후 감소하는 반면, 실험군에서는 3주째 까지도 유사한 정도의 최고 이동량이 관찰 되었고 이후 감소하는 양상을 보였다.

자극이 가해지는 기간에 대한 고찰이 필요하다. 골 흡수와 형성의 과정은 일단 과정이 개시되면 부가적인 신호 없이 국소적 기전이 개조 과정을 진행 시켜 완성하는 것으로 보인다. 골조직은 세포외 기질이 기계적으로 변형되어 생기는 strain memory 성질을 가지고 있어서 초기 기계적 신호가 제거된 이후에도 세포는 치아 이동을 위해 계속 자극 받을 수 있는 것 같다. 기계적 자극에 아주 짧게 노출하는 것으로 개조를 자극 할 수 있다는 점과<sup>32)</sup> 장기간의 지속적인 전류에 노출하는 것은 오히려 세포들을 자극에 대해 저항적으로 만들 수 있다는 점등을 고려하여 본 연구에서는 간헐적 전류 자극의 방식을 선택하였다.

본 실험에서 관찰된 백악질의 흡수를 전기적 성질과 관련하여 살펴보면, DeAngelis는<sup>19)</sup> 골과 백악질의 흡수성의 역치는 piezoelectric induction에 대한 상대

적인 민감성에 있을 수 있다고 하였다. 상아질은 콜라겐을 함유하고 있으므로 piezoelectric 성질을 가지고 있고, 백악질도 그러하다. 치아에 과도한 힘이 가해지면, 치조골의 변형 잠재력은 그 한계를 넘어서게 되어서 치아가 변형되는 범위에 들어서게 된다. 이는 치근 흡수를 개시할 수 있는 전기적으로 양성 환경을 만들게 된다. 따라서 치근 흡수는 piezoelectric induced cementoclasia를 자극하는 치근 변형을 야기하기에 충분한 힘의 크기와 방향에 대하여 이차적으로 생기게 된다고 하였다.

본 연구의 실험 결과에 영향을 줄 수 있는 다른 요소들을 살펴보면, 첫째, 치은의 자극에 의한 염증을 들 수 있다. 이전의 연구들에 비하여 현저히 작은 전류 발생 장치를 사용하여 간헐적 전류 자극의 방법을 택하였으나, 실험 동물의 구강 위생을 위한 본 연구의 방법은 이로 인한 염증의 가능성을 완전히 배제하기에 부족한 점이 있었다. 둘째, 치아가 이동된 방식에 관한 것인데, 본 연구에서는 치아의 비조절성 경사 이동과 회전이동이 일어났으나, 치아를 치체 이동 시켜서 압박 부위와 긴장 부위를 구별 하여 각각에 양극과 음극이 가해졌다면 보다 효과적일 수 있었을 것이라고 예상된다. 다음으로, 치아 이동을 위하여 본 연구에서 사용된 NiTi coil spring을 활성화 시키는 과정은 실험측과 대조측에 동일한 힘을 적용시키는 데에 오차가 발생할 수 있다. 또한 치아 이동량을 측정하는 측정상의 오차가 생길 수 있다.

생물학적인 관점에서 볼 때, 현대 교정학은 아직도 상당히 원시적이라고 할 수 있다. 예를 들어, 이상적인 상태에서 골조직은 하루에 약 100 $\mu$ m 씩 흡수되어서 한 달에 약 3mm의 교정적 치체 이동을 얻을 수 있다고 한다<sup>14)</sup>. 이 양은 어떤 임상 방법의 효율성을 능가하는 것으로, 임상적 효율과 생물학적 잠재력 간에 상당한 차이가 존재한다는 것을 나타낸다. 본 연구를 통하여 치아 이동에서 조직 개조의 범위와 치아 이동 속도는 치주 세포들과 상호 작용 할 수 있는 요소인 전류에 의해서 상당히 영향을 받을 수 있음이 밝혀졌다. 최적의 교정력은 전류와 같이 치조골 형성을 가속화 할 수 있는 부가적인 신호를 동반한 것이라고 제안한다. 전류 발생 장치를 고정성 장치에 이용하는 방법, 다수 치아의 이동에 적용하는 방법 등이 고안된다면, 전류 자극의 이용은 교정 치료 기간의 단축은 물론, 보다 안정적이고 불편감 적은 치료 방법이 될 것으로 기대 된다.

## V. 결 론

낮은 강도의 전류는 골세포의 활성화 대사를 증가시키는 것으로 알려져 왔다. 이 연구는 초소형 전기 장치에 의한 전기 자극이 교정적 치아 이동에 미치는 영향을 규명하기 위하여, 체중 3kg 내외의 고양이 6 마리를 대상으로 가철성 교정 장치와 NiTi coil spring(75gm)을 사용하여 상악 견치를 이동 시켰다. 실험군측 견치에는 교정력과 간헐적인 20 $\mu$ A의 전기 자극을 가하였고 대조군에는 같은 크기의 교정력만을 가한 후 4주 동안의 치아 이동량을 측정하여 비교하였으며, 치아를 중심으로 조직을 절취하여 탈회하고 조직 처리 후 광학 현미경으로 치주조직의 변화를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 28일간의 실험 기간 동안 실험측의 치아 이동량은 대조군에 비하여 현저히 증가하여, 4주후에 실험측의 치아는 대조군에 비하여 37% 증가된 이동량을 기록하였다.
2. 전기 자극을 받은 치아의 견인측에서 대조군에 비하여 조직학적으로 증가된 골형성 양상이 관찰되었다.
3. 28일간의 전기 자극과 교정력으로 실험측 치아의 압박측에서 대조측에 비하여 증가된 골 흡수 양상이 관찰되었다.
4. 실험군 견치 치근 주위 조직에서는 전반적으로 더 많은 수의 조골 및 파골 세포들과 모세 혈관, 골양 조직들이 관찰됨으로써 증가된 조직 세포 활성을 반영하였다.
5. 1일 5시간 동안의 간헐적 전류 자극은 치아 이동량을 증가시키고 조직 개조를 활성화 시키는 효과가 있었다.

이상의 결과는 외부에서 가한 낮은 강도의 간헐적 전기 자극으로 교정적 치아 이동량이 많아지고 치주조직의 개조 활성이 증가됨을 보이므로 초소형 전기 장치에 의한 자극은 치아 이동과 주위 조직 개조를 촉진시킬 가능성이 있을 것으로 평가 되었다.

## 참 고 문 헌

1. Fukada E, Yasuda I. On the piezoelectric effect of bone. *J Physiol Soc Jap* 1957 ; 12 : 1158-62.
2. Cochran GV, Pawluk RJ, Bassett CA. Stress generated electric potentials in the mandible and teeth. *Arch Oral Biol* 1967 ; 12 : 917-20.
3. Zengo AN, Bassett CA, Pawluk RJ, Proutzos G. In vivo bioelectric potentials in the dentoalveolar complex. *Am J Orthod* 1974 ; 66 : 130-9.

4. Davidovitch Z, Finkelson MD, Steigman S, et. al. Electric currents, bone remodeling, and orthodontic tooth movement. I. The effect of electric currents on periodontal cyclic nucleotides. *Am J Orthod* 1980 ; 77 : 14-32.
5. Davidovitch Z, Finkelson MD, Steigman S, et. al. Electric currents, bone remodeling, and orthodontic tooth movement. II. Increase in rate of tooth movement and periodontal cyclic nucleotide levels by combined force and electric current. *Am J Orthod* 1980 ; 77 : 33-47.
6. Jorgensen TE. The effect of electric current on the healing time of crural fractures. *Acta Orthop Scand* 1972 ; 43 : 421-37.
7. Masurek C, Eriksson C. Preliminary clinical evaluation of the effect of small electrical currents on the healing of jaw fractures. *Clin Orthop* 1977 ; 124 : 84-91.
8. Kubota K, Yoshimura N, Yokota M, Fitzsimmons RJ, Wikesjo ME. Overview of effects of electrical stimulation on osteogenesis and alveolar bone. *J Periodontol* 1995 ; 66 : 2-6.
9. Stark TM, Sinclair PM. Effect of pulsed electromagnetic fields on orthodontic tooth movement. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1987 ; 91 : 91-104.
10. Friedenber ZB, Roberts PG Jr, Didizian NH, Brighton CT. Stimulation of fracture healing by direct current in the rabbit fibula. *J Bone Joint Surg Am* 1971 ; 53 : 1400-8.
11. Bassett CA, Pawluk RJ, Pilla AA. Acceleration of fracture repair by electromagnetic fields. A surgically noninvasive method. *Ann N Y Acad Sci* 1974 ; 238 : 242-62.
12. Beeson DC, Johnston LE, Wisotzky J. Effect of constant currents on orthodontic tooth movement in the cat. *J Dent Res* 1975 ; 54 : 251-4.
13. Friedenber ZB, Andrews ET, Smolenski BI, Pearl BW, Brighton CT. Bone reaction to varying amounts of direct current. *Surg Gynecol Obstet* 1970 ; 131 : 894-9.
14. Roberts WE, Goodwin WC Jr, Heiner SR. Cellular response to orthodontic force. *Dent Clin North Am* 1981 ; 25 : 3-17.
15. Shamos MH, Lavine LS. Piezoelectricity as a fundamental property of biological tissues. *Nature* 1967 ; 21 : 213 : 267-9.
16. Lavine LS, Lustrin I, Shamos MH, Moss ML. The influence of electric current on bone regeneration in vivo. *Acta Orthop Scand* 1971 ; 42 : 305-14.
17. Marino AA, Becker RO, Soderholm SC. Origin of the piezoelectric effect in bone. *Calcif Tissue Res* 1971 ; 8 : 177-80.
18. Pollack SR, Salzstein R, Pienkowski D. The electric double layer in bone and its influence on stress-generated potentials. *Calcif Tissue Int* 1984 ; 36 Suppl 1 : S77-81.
19. DeAngelis V. Observations on the response of alveolar bone to orthodontic force. *Am J Orthod* 1970 ; 58 : 284-94.
20. Bassett CAL, Pawluk RJ, Becker RO. Effects of electric currents on bone in vivo. *Nature (Lond.)* 1964 ; 204 : 652-654.
21. Lavine L, Lustrin I, Rinaldi R, Shamos M. Clinical and ultrastructural investigations of electrical enhancement of bone healing. *Ann N Y Acad Sci* 1974 ; 238 : 552-63.
22. Forsted DL, Dalinka MK, Mitchell E, Brighton CT, Alavi A. Radiologic evaluation of the treatment of nonunion of fractures by electrical stimulation. *Radiology* 1978 ; 128 : 629-34.
23. Brighton CT, Friedenber ZB. Electrical stimulation and oxygen tension. *Ann N Y Acad Sci* 1974 ; 238 : 314-20.
24. Finkelson MD, Eymontt M, Shanfeld JL, et. al. The increase in vivo by electric currents of the <sup>99m</sup>Tc-methylene diphosphonate uptake and cyclic AMP content of the bone of the cat mandible. *Arch Oral Biol* 1983 ; 28 : 217-24.
25. Rinaldi R, Shamos M, Lavine L. Uptake of tritiated thymidine during

- electrical stimulation of induced cortical bone defects. *Ann N Y Acad Sci* 1974 : 238 : 307-13.
26. Evans RD, Foltz D, Foltz K. Electrical stimulation with bone and wound healing. *Clin Podiatr Med Surg* 2001 : 18 : 79-95.
27. Baumrind S. A reconsideration of the propriety of the "pressure-tension" hypothesis. *Am J Orthod* 1969 : 55 : 12-22.
28. Grimm FM. Bone bending, a feature of orthodontic tooth movement. *Am J Orthod* 1972 : 62 : 384-93.
29. Picton DC. On the part played by the socket in tooth support. *Arch Oral Biol* 1965 : 10 : 945-55.
30. Giovannelli S, Festa F. Effect of electric stimulation on tooth movement in clinical application. In : Davidovitch Z and Norton LA, ed. *Biological Mechanisms of Tooth Movement and Craniofacial Adaptation*. 1996 : 249-53.
31. Storey E. The nature of tooth movement. *Am J Orthod* 1973 : 63 : 292-314.
32. Gibson JM, King GJ, Keeling SD. Long-term orthodontic tooth movement response to short-term force in the rat. *Angle Orthod* 1992 : 62 : 211-5.

- ABSTRACT -

## A study on the effects of Electrical stimulation by the miniature Electric device on the tooth movement and tissue remodeling

Soon-Jung Park<sup>1)</sup>, Young-Jun Lee<sup>1)</sup>, Young-Guk Park<sup>1)</sup>, Zeev Davidovitch<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Department of Orthodontics, College of Dentistry, Kyung Hee University

<sup>2)</sup> Case Western Reserve University, Cleveland, OH, USA

Electric current is a highly probable way as a clinical tool for tooth movement. The purposes of this study were to determine the usefulness of exogenous electric currents in accelerating orthodontic tooth movement and to investigate the effects of electric-orthodontic treatment on the remodeling of the periodontal tissue histologically. The study was performed with six male cats weighing around 3kg. The electric device which is providing the direct electric current of 20 $\mu$ A was inserted to the removable appliance. The right and left maxillary canines were assigned as control and experimental sides respectively. The control canine was provided with orthodontic force (75gm) only and the experimental side was given the same amount of force and electricity. The lingual buttons were bonded to the maxillary canines and both sides of canines were retracted with NiTi coil spring. The electric device was adjusted to provide 20 $\mu$ A direct current to the experimental canines 5 hours a day. The amount of the canine movement was measured with electronic caliper every week. After 4 weeks of tooth movement, the animals were sacrificed and the histologic study was performed.

The results of this study were as follows :

1. The application of a direct current to the experimental tooth significantly increased the final amount of orthodontic tooth movement. The amount of tooth movement after 28-day was 37% more in the experimental side.
2. The electrically stimulated tooth showed histologic evidence of significant increases in the amount of bones and matrix deposition in the area of tension.
3. In the compression side, the electric-orthodontic treatment stimulated bone resorption more extensively in the experimental canines.
4. After 28 days of electricity exposure and orthodontic force, the experimental side demonstrated significantly more osteoblasts, osteoclasts, capillaries and osteoid tissues, reflecting an increase in the local tissue's cellular activity.

5. Intermittent electrical stimulation (five hours a day) had effects to enhance orthodontic tooth movement and tissue remodeling.

These results suggested that the low-intensity exogenous electric current by the miniature electric device might accelerate orthodontic tooth movement and bone remodeling in vivo and have the possibility to reduce the orthodontic treatment duration.

KOREA. J. ORTHOD. 2003 : 33(4) : 279-91

---

※ **Key words** : Orthodontic tooth movement, Electric current, Tissue remodeling, Miniature electric device