

치수생활력 검사 방법으로서 laser Doppler flowmeter의 신뢰도

경북대학교 치과대학 소아치과학교실

남동우 · 김영진 · 남순현

Abstract

THE RELIABILITY OF LASER DOPPLER FLOWMETER IN PULP VITALITY TEST OF TEETH

Dong-Woo Nam, Young-Jin Kim, Soon-Hyeun Nam

Department of Pediatric Dentistry, School of Dentistry, Kyungpook National University

The purpose of this study was to evaluate the reliability of laser Doppler flowmeter on the permanent maxillary central incisors with open apex.

Laser Doppler flowmeter and electric pulp tests were done in 35 elementary students aged between 8 and 9 years and 35 females and males aged between 23 and 24 years. Teeth with open apex were confined to root developmental stage 5 and 6 by Moorrees classification.

The threshold of electric pulp tests was decided the time of tingling sensation.

More than three different electric pulp tests applied on every teeth with more than 3 minutes interval between each teeth due to the false response. Laser Doppler flowmeter test stabilization and observation stages took more than 5 minutes each

LDF values and electric pulp test thresholds were analyzed with student t-test.

The results were as follows :

1. The electric pulp test threshold on teeth with immature and mature roots showed 28.4% and 100% response respectively, and the the LDF values on teeth with immature and mature roots showed 100% response.
2. The EPT thresholds on teeth with immature roots were larger than thresholds on teeth with mature roots($p < 0.01$).

3. No significant differences were found in the LDF values on teeth with immature and mature roots.

Key word : electric pulp test, laser Doppler flowmeter, pulp vitality test

I 서 론

깊은 우식증이 있거나 치조골 병소와 관련된 치아, 외상 받은 치아 및 자가 이식 치아의 근관 치료 여부를 결정하기 위해서는 치수생활력 유무를 파악하는 것이 중요하다. 치수생활력을 파악하기 위해서는 병력 참조 및 방사선 사진 촬영, 동요도, 치아 색조, 타진등 보조 자료와 더불어 전기치수검사, 냉검사, test cavity등이 사용되고 있으나 어느것도 단독으로는 완전한 진단을 제공하지 못하며 결국 다양한 검사 결과의 종합에 의해 치수생활력 유무를 확인하게 된다.

치수생활력 검사방법 중 하나인 전기치수검사는 사용이 용이하며 치아에 특별한 손상을 주지 않으므로 오랫동안 사용되어 왔다. 그러나 치수가 액화 괴사된 치아의 경우 위양성 반응이 종종 나타나며¹⁾ 미완성 치근을 가지는 영구치와 외상받은 치아의 치수생활력 측정에 있어서도 신뢰도가 떨어지고^{2,4)} 심장 박동기를 한 환자에서는 위험성을 가지고 있는 등³⁾ 한계점을 가지고 있다. 또, 반응이 피검자의 주관에 의해 판단되므로 신뢰도에 문제가 제기되어 왔으며, 특히 소아의 경우 이해력의 부족, 치과에 대한 공포, 행동 조절 등의 문제점을 지니고 있어 신뢰도가 더욱 낮아지게 된다.

Schaffer⁶⁾는 전기치수검사 역치에 관하여 동일인의 검사 경우에도 검사 일자 및 검사 시간에 따라 다른 결과가 나타난다고 보고하였고, Godt⁷⁾는 전기치수검사 역치가 개인, 나이, 치아 종류, 치관의 크기 등에 따라 다양하게 나타난다고 보고하여 전기치수검사가 객관적인 자료로서는 한계를 가진다고 하였다.

이와같이 전기치수검사 방법은 감각신경에 근거를 둔 방법으로 치수내의 신경발달 상태뿐 아

니라 피검자의 주관에 의해 반응이 다르게 나타날 수 있다. 이에 치수내 상태를 이해하기 위해 치수 혈류에 근거를 두고 연구하고자 하는 노력이 있었으며, 치수내의 혈류를 연구하는 방법에는 intravital microscopy⁸⁾, local isotope clearance^{9,10)}, hydrogen wash-out¹¹⁾, labelled microsphere trapping^{8,12)}, photoplethysmography¹³⁾ 등의 방법이 소개되었다. 그러나 이러한 방법은 모두 치질 삭제 또는 외과적 처치가 요구되기 때문에, 치수생활력을 확인하기 위한 방법으로 임상적 적용이 어려우며 따라서 치수생활력 측정보다는 치수내 염증반응을 이해하는 방법으로 주로 사용되었다. 이에 보존적이며 임상적으로 용이한 방법이 요구되어 왔으며 한 방법으로서 laser Doppler flowmeter (이하 LDF)에 의한 치수혈류 측정 방법이 소개되었다.

LDF를 이용한 방법은 저출력(1-3 mW)의 He-Ne 빛을 이용하여 움직이는 물체 및 정지해 있는 물체에 의해 반사되는 파장의 차이를 이용해 치수 혈류를 측정하는 방법이다.

LDF는 Riva¹⁴⁾ 등이 토끼 망막의 혈류 측정에 적용을 보고한 이래, Stern 등¹⁵⁾은 피부와 부신 피질에 혈관 수축 약제를 투여하여 혈류의 변화를 관찰하였고, Oberg¹⁶⁾는 골격근, Williams 등¹⁷⁾은 대뇌 피질 그리고 Hellem 등¹⁸⁾은 하악골에 적용하는 등 각종 신체 장기의 혈류측정에 다양하게 사용되었다.

또한 치수혈류 측정에 있어 Gazelius 등¹⁹⁾은 LDF를 사람에서 최초로 사용하였고, Gazelius 등¹⁹⁾과 Musselwhite 등²⁰⁾은 사람 치아를 대상으로 LDF를 이용하여 연구한 결과 pulsatile signal이 cardiac cycle과 동일하게 나타난다고 보고하였다. 그러나, LDF를 이용한 치수생활력 검사에 대한 대부분의 보고는 완성된 치아를 대상으로 한 것이었고, 미완성 치근단을 가진 치아에 대한 연구는

않지 않다. 특히 소아치과 영역에서 미완성 치근단을 가진 치아의 손상이 있을시 기존의 방법으로는 생활력을 확인하기 힘들다고 생각되는 바, 미완성 치근단을 가진 치아에 대한 LDF의 신뢰도 및 정상치를 확인하는 것은 대단히 중요하다고 생각된다.

이에 저자는 미완성치근을 가진 초기 영구치의 치수생활력 측정시 LDF의 신뢰도를 알아보기 위해 전기치수검사기 및 LDF를 사용하여 미완성 및 완성 치근단을 가진 치아의 치수생활력을 측정하여 다소의 지견을 얻었기에 보고하는 바이다.

II. 재료 및 방법

1. 시험대상

23세에서 24세 성인 남녀 35명 및 8세에서 9세 취학 아동 35명의 상악 좌우 중절치를 대상으로 하였다. 완성 치근을 가지는 성인 치아를 대조 치아로 하였고, 미완성 치근을 가지는 초기 영구치를 시험 치아로 하였다. 모든 대상 치아는 치과적 외상 병력이 없으며, 치아우식증 및 수복의 경험이 없고, 치근단 방사선 사진상 치근단 병소가 존재하지 않고, 임상 증상이 없으며, 정상 색조를 가지는 치아로 한정하였다. 시험 치아는 치근단 방사선 사진상 Moorrees 등²¹⁾에 의한 치근 발육 단계를 참고하여 5 및 6 단계를 대상으로 하였다.

2. 시험재료

치수생활력측정을 위한 전기치수검사기는 Digitest® (Parkell, USA)를 사용하였고 분석 범위 scale은 0에서 64까지 였으며 치아에 전류를 전달하기 위해 치약을 전기 매질로 사용하였다. Laser Doppler flowmeter는 저출력 (0.8 - 1 mW)과 적외선 (파장 780 또는 630nm)이 사용된 Periflux system 4000 (Perimed사, Sweden)을 사용하였고, 시간 계수는 0.2초, 사용된 출력 신호는 perfusion unit(P.U.)였다. Probe로 직경 1.5mm의 PF407을 사용하였다.

3. 시험방법

치수생활력검사에 앞서 치근단 완성 여부를 확인하기 위해 치근단 방사선 사진을 XCP를 이용하여 표준화하여 촬영하였다. 전기치수검사를 위해 거즈로 치아를 분리한 후 공기로 건조하고, 치아 순면 중앙 1/3에 치약을 묻힌다음 probe를 접촉시켜 검사를 시행하였다. 검사시 피검자가 따끔거리는 감각을 느끼면 왼손을 들게하여 확인하였으며, 자극에 초기 반응이 나타나는 시점을 전기치수검사 역치로 정하였다. 전기치수검사는 세 번 이상 실시하였으며, 위반응의 가능성을 줄이기 위해 각 시험간 간격은 3분이상으로 하였다. 오차가 큰 경우 검사 회수를 늘여 최고치와 최저치를 제외한 나머지 값을 평균하여 통계처리 하였다.

LDF에 의한 치수생활력 검사를 위해 거즈로 치아를 분리한 후 공기로 건조하였고, 치은 혈류에 의한 영향을 감소시키기 위하여 치은연에서 3mm 떨어진 치아 순면 중앙을 선택하였으며, 10% 인산으로 15초간 산부식시킨 다음 광중합 레진을 이용하여 probe holder를 부착하였다. artifacts가 나오지 않고 signal이 안정될 때까지 약 5분 가량 관찰하였고, signal의 안정을 확인한 후 5분 이상 측정하고, 안정된 상태의 평균치를 통계에 이용하였다.

대조치아 및 시험 치아간 LDF 및 전기치수검사 역치는 student t-test를 이용하여 비교, 통계처리 하였다.

III. 성 적

1. 반응 빈도 비교

전기치수검사 및 LDF 검사에서 양성 반응 빈도는 Fig. 1과 같이 나타났다.

전기치수검사의 경우 완성 치근을 가진 치아의 경우 100%에서 양성 반응이 나타난 반면, 미완성 치근을 가진 치아의 경우는 28.4%에서만 양성 반응이 나타났다.

LDF 검사의 경우 완성 치근 및 미완성 치근을 가진 치아 모두 100%에서 양성 반응이 나타났다.

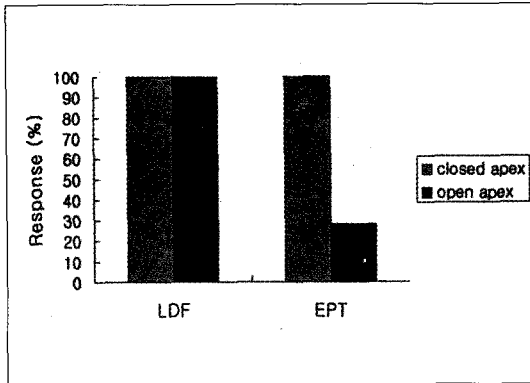


Fig. 1. The incidence of positive response

2. 전기치수검사 역치

미완성 치근 및 완성 치근을 가진 치아의 전기치수검사 역치는 Table. 1 및 Fig. 2와 같이 나타났다.

상악 우측 중절치의 경우 완성 치근을 가진 치

Table 1. Electric pulp test thresholds on mx. right & left central incisors (Mean \pm S.D.)

	n	Close apex	n	Open apex
RI	35	5.80 \pm 2.70*	9	26.67 \pm 11.25*
LI	35	5.54 \pm 2.68**	11	28.27 \pm 12.99**

RI : maxillary right central incisor

LI : maxillary left central incisor

* Statistically significant ($p < 0.01$)

** Statistically significant ($p < 0.01$)

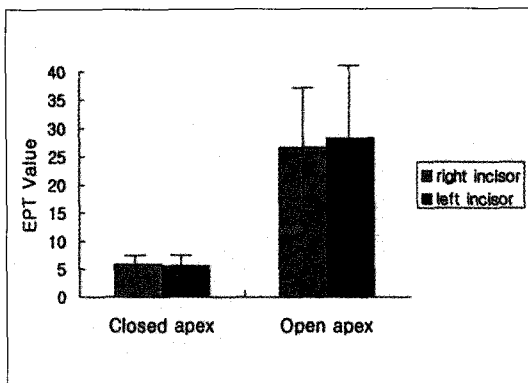


Fig. 2. The threshold to electric pulp test on maxillary right and left central incisors(mean \pm S.D.)

아는 5.80 \pm 2.70, 미완성 치근을 가진 치아는 26.67 \pm 11.25로 나타났고 상악 좌측 중절치의 경우 완성 치근을 가진 치아는 5.54 \pm 2.68, 미완성 치근을 가진 치아는 28.27 \pm 12.99로 나타났다. 완성 및 미완성 치근을 가진 치아간에는 유의한 차이가 나타났다 ($p < 0.01$).

3. Laser Doppler flowmeter 측정

완성 치근을 가진 치아 및 미완성 치근을 가진 치아의 LDF에 의한 측정값은 Table. 2 및 Fig. 3과 같이 나타났다.

상악 우측 중절치의 경우 완성 치근을 가진 치아는 12.18 \pm 3.63, 미완성 치근을 가진 치아는 12.43 \pm 5.73으로 나타났고, 상악 좌측 중절치의 경우 완성 치근을 가진 치아는 12.59 \pm 4.40, 미완성 치근을 가진 치아는 13.37 \pm 7.98로 나타났다. 완성 및 미완성 치근을 가진 치아의 LDF 수치간에는 유의한 차이가 나타나지 않았다 ($p > 0.05$).

Table 2. LDF values on mx. right & left central incisors (Mean \pm S.D.)

	n	Close apex	n	Open apex
RI	35	12.18 \pm 3.63*	35	12.43 \pm 5.73*
LI	35	12.59 \pm 4.40**	35	13.37 \pm 7.98**

RI : maxillary right central incisor

LI : maxillary left central incisor

* Statistically significant ($p < 0.01$)

** Statistically significant ($p < 0.01$)

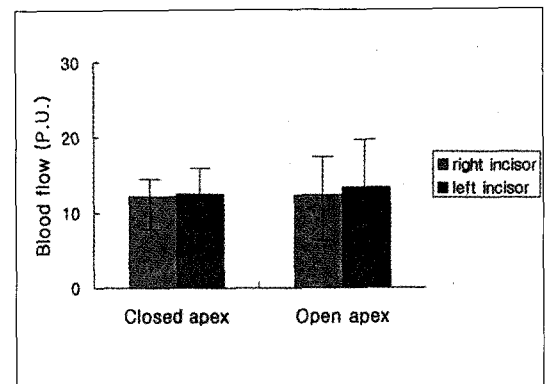


Fig. 3. The values to laser Doppler flowmeter on maxillary right and left central incisors(mean \pm S.D.)

IV. 고 찰

치수의 괴사에 의해 야기되는 치조골 파괴, 치아 상실 등을 방지하기 위해서 적절한 시기에 근관 치료를 시행하는 것이 필요하며, 이를 위해서 치수 생활력을 정확히 진단 할 수 있는 방법이 필요하다. 지금까지 치수 생활력을 측정하는 방법으로 전기치수검사, 냉검사, test cavity 등의 방법이 사용되어 왔으나, 이러한 방법은 모두 감각 신경 자극에 대한 피검자의 주관성에 기초하므로 신뢰도에는 문제가 제기되어 왔다.

치아의 신경지배는 치아가 구강내로 맹출하면서 급속히 발달한다. 치아맹출 및 저작에 의해 상아질, Raschkow plexus, 치주인대, 접합상피 등에 신경분포 밀도의 증가 및 신경 종말의 발달이 나타나고, 치아의 기능이 가해지면서 신경지배가 급속도로 발달하는 것으로 알려져 있다²²⁻²⁴. Fearnhead²⁵는 치아가 4년에서 5년간 기능을 할 경우 신경지배가 완전하게 형성되며, Raschkow plexus는 서서히 발달하여 치근형성이 완료된 후 저명해진다고 보고하였다. Bernick²⁶은 미맹출 치아의 조상아세포와 전상아질 사이에는 신경 말단 및 loop가 존재하지 않는다고 보고하였고, 맹출중인 치아에서는 신경섬유의 entrapment가 관찰되기 시작한다고 하였다. Johnson 등²⁷은 미완성 치근단을 가진 치아에서 더 작은 수의 myelinated axon을 가지며, 전기치수검사 역치와 치수내 myelinated axon의 수 사이에는 반비례 관계가 나타난다고 보고하였고, Klein³은 맹출중인 영구 치아의 전기치수검사 역치는 치근 발육단계, 이차상아질의 양, 신경섬유의 entrapment와 직접적인 연관이 있다고 보고했다.

전기치수검사는 Magitot에 의해 최초로 치수생활력 측정에 이용된 이래로 현재까지 광범위하게 사용되고 있지만, 치근의 완성도, 환자의 전신 상태 등에 따라 결과가 다르게 나타날 수 있다⁶⁷.

Fuss 등²⁸은 성인의 상악 중절치를 전기치수검사한 결과, 100%에서 반응이 나타났으며 9-13세 군에서는 79%에서만 반응이 나타났다고 보고하였고, Klein³은 6-11세 소아를 대상으로 전기치수검사를 하여 10.8%에서만 반응이 나타났다고 보고하였다. 최 등²⁹은 6-11세 소아 영구 중절치를 대

상으로한 전기치수검사에서 완전히 개방된 치근단의 경우 13.1%의 양성 반응을 나타냈고, 치근단이 완전히 폐쇄된 경우 80%에서 양성 반응이 나타났다고 보고하였다.

본 시험에서 전기치수검사를 한 결과 완성 치근단에서는 100% 반응을 나타내는데 반해, 미완성 치근을 가진 치아의 경우 28.4%에서만 반응하였다. 또한 전기치수검사의 역치값은 상악 우측 중절치의 경우 완성 치근단을 가진 치아는 5.80%, 미완성 치근단을 가진 치아는 27.67%를 나타냈으며, 상악 좌측 중절치의 경우 완성 치근단을 가진 치아는 5.54%, 미완성 치근단을 가진 치아는 28.67%로 나타나 미완성 치근을 가진 치아가 완성 치근을 가진 치아보다 높은 역치를 나타내었다.

본 시험의 결과는 미완성 치근단을 가진 치아가 완성 치근단을 가진 치아보다 역치가 높다는 선행들의 연구 결과와 일치하는 소견을 나타내었는데, 이는 전기치수검사가 치수내 감각신경의 반응을 나타내므로 미완성 치근단을 가진 치아에서는 조상아세포층 내로의 불완전한 신경지배 및 신경섬유의 미성숙과 관계가 있다고 사료된다. 양성 반응의 빈도는 Fuss²⁸ 및 Klein³의 연구와 다소 다르게 나타났으나, 이는 Fuss 등²⁸의 연구는 9세에서 13세군의 영구 중절치를 대상으로 실시하여 본 시험 대상보다 치근단 완성 빈도가 높은 것으로 사료되며, Klein³의 경우 6세에서 11세를 대상으로 한 것으로 본 시험보다 미완성된 치근단을 대상으로 하였기 때문에 사료된다.

치아가 외상을 받은 경우 초기에는 신경 및 혈관의 손상이 존재하는 경우가 많다. 그러나 혈관은 외상을 받더라도 대부분 조기에 재혈관화가 나타나지만³⁰ 손상받은 신경은 재생이 느리고 치유 시까지 수개월이 소요된다. 따라서 전기치수검사 등의 기존 방법으로는 외상 초기의 정확한 치수생활력 측정이 어렵고, 부가적으로 치관의 색조, 치근단 방사선 사진등이 이용되기도 하지만 치관의 색조 및 일시적 치근단 투과상은 회복이 가능³¹하므로 신뢰하기가 어렵다.

이에 치수생활력측정시 그 지표로서 감각 신경의 반응을 관찰하는 것보다는 치수내의 혈류를 기준으로 삼고자하는 연구가 있었으며 한 방법으로 LDF를 이용한 치수혈류측정 방법이 소개되었다.

Laser Doppler flowmeter에 의한 방법은 치수혈류를 측정하여 치수생활력을 판정하는 방법으로 주로 저출력(1-3 mW)의 He-Ne 빛을 사용하며, 레이저 조사시에 움직이는 물체에 의해 반사되는 빛의 파장이 변하게 되는데, 이러한 원리를 이용하여 치수내 적혈구에 의해 반사되어 파장이 변한 빛을 감응기에서 인지하여 치수혈류량을 측정하게 된다. 이를 전기적 신호로 변화시켜 나타내며 이 signal은 perfusion unit(P.U.)로 표시하며 이는 적혈구의 속도 및 적혈구 농도의 곱에 의해 결정된다³⁰⁾. 본 시험에서는 probe의 위치에 따라 출력 수치가 다르게 나타나고 치은쪽 또는 치관의 중심부보다 치아의 절단면 부위에서 측정하는 경우 낮은 출력 수치를 나타낸다는 보고^{33,34)}를 참고하여 이러한 변화요인을 감소시키기 위해 모든 대상 치아에서 치은연에서 3mm 떨어진 치아 순면 중앙에 probe 위치를 설정하였다. LDF로 검사하는 경우 환자의 안정된 상태 및 주위의 영향이 없는 조용한 환경에서의 측정이 필수적이며, 본 시험에서는 안정된 상태를 유도하기 위해 5분이상 관찰하였고 안정 상태 도달시 5분이상 유지하여 측정하였다.

Gazelius 등³⁵⁾은 탈구된 치아를 LDF를 이용하여 장기간 관찰한 결과, 치수혈류는 외상 후 6주 경에 부분적으로 회복되고 9개월 후에는 정상 수준까지 치유되었으며, 전기치수검사기를 사용한 관찰에서는 9개월 경에 일부에서 반응이 나타났고 2년 후에 모든 치아에서 반응이 나타났다고 보고하였다. Olgart 등³⁶⁾은 병리학적 변화없이 아탈구된 치아의 치수생활력 측정에 LDF가 유용하며 전기치수검사 등의 치수생활력 검사로는 위음성 반응이 나타나지만, LDF는 외상 초기 단계에서도 치수생활력측정이 가능하다고 보고하였다.

본 시험에서는 상악 우측 중절치의 완성치근 및 미완성 치근을 가진 치아에서 각각 12.18%, 12.43%, 상악 좌측 중절치에서 각각 12.59%, 13.37%을 나타냈으며 통계학적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다. 이러한 결과는 미완성 치근 및 완성 치근을 가진 치아간에 치수혈류량에는 큰 차이를 보이지 않음을 의미한다고 사료되나, 치근 발육 정도에 따른 치수혈류량에 대한 연구는 미흡한 실정이며 치아가 맹출 중인 경우에 치수혈

류량이 증가한다는 주장³⁶⁾도 있으나, 향후에 더 많은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

이상의 결과를 고찰하여 볼 때 LDF는 미완성 치근단을 가진 치아의 치수생활력측정시 전기치수검사와 달리 높은 재현성 및 신뢰도를 나타내며 반응빈도에서도 100%를 보여 높은 신뢰도를 나타내었다. 그러나, 적혈구 농도와 LDF 측정값 사이에 완전한 비례 관계가 성립되지 않아³⁷⁾ 농도에 따라 정확도가 떨어질 가능성이 있으며 측정시 시간이 많이 걸리는 단점등이 있다. 그러나 이러한 점이 보완된다면 앞으로 외상받은 치아나 자가 이식 치아 및 미완성 치근단을 가진 치아에 광범위하게 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

V. 요 약

미완성 치근을 가진 영구 중절치에 대한 치수생활력검사에서 LDF의 신뢰도를 알아보기 위해 8-9세의 취학 아동 35명을 대상으로 전기치수검사 및 LDF에 의한 치수생활력 검사를 시행하고 대조군으로 23-24세 성인 남녀 35명의 상악 영구중절치를 대상으로 동일한 검사를 시행하였다.

미완성 치근단을 가진 치아는 방사선 사진상 Moorrees 등의 연구를 참조하여 치근 발육 5 및 6 단계로 한정하였다.

전기치수검사는 최초의 감각이 나타나는 시기를 역치로 정하였으며, 대상 치아당 3회 이상 실시하였고, 위음성 반응의 가능성 때문에 검사간 간격은 3분 이상으로 하였다. LDF는 안정된 signal이 나타날 때 까지 5분 이상 관찰하였으며, 안정 상태 도달 후 5분 이상 측정하였다. 모든 반응인자의 정규 분포를 확인한 다음, 대조 치아 및 시험 치아간 LDF 및 전기치수검사의 역치를 student t-test를 이용하여 비교하였다.

1. 전기치수검사시 미완성 치근에서는 28.4%에서만 반응이 나타났으며, 완성 치근의 경우 100%에서 반응이 나타났고, LDF에 의한 검사시 미완성 치근 및 완성 치근 모두에서 100% 반응이 나타났다.
2. 완성 치근 및 미완성 치근을 가진 치아의 전기치수검사 역치는 미완성 치근을 가진 치아가 큰

값을 나타내며 유의한 차이가 있었다 ($p < 0.01$).
 3. 완성 치근 및 미완성 치근을 가진치아 사이의 LDF 수치는 유의한 차이가 나타나지 않았다 ($p > 0.05$).

참 고 문 헌

1. Ehrmann EH : Pulp testers and pulp testing with particular reference to the use of dry ice. *Aust Dent J* 22: 272-279, 1977.
2. Bhaskar SN, Rappaport HM : Dental vitality test and pulp status. *J Am Dent Assoc* 86: 409-411, 1973.
3. Klein H : Pulp responses to an electric pulp stimulator in the developing permanent anterior dentition. *J Dent Child* 45: 199-202, 1978.
4. Fulling HJ, Andreasen JO : Influence of maturation status and tooth type of permanent teeth upon electrometric and thermal pulp testing. *Scan J Dent Res* 84: 286-290, 1976.
5. Woolley LH, Woodworth J, Dobbs JL : A preliminary evaluation of the effects of electrical pulp testers on dogs with artificial pacemakers. *J Am Dent Assoc* 89: 1099-1101, 1974.
6. Schaffer J : Pulp Testing. *New York J Dent* 28: 48-61, 1958.
7. Godt IL : Bertrag zur Emihlung der Elektrischen Reizschwelle Am Zahn Deut Zahrant 22: 1363-1368, 1967.
8. Kim S : Regulation of pulpal blood flow. *J Dent Res* 64: 590-596, 1985.
9. Edwall L, Kindlova M : The effect of sympathetic nerve stimulation on the rate of disappearance of tracers from various oral tissues. *Acta Odont Scand* 29: 387-400, 1971.
10. Edwall B, Gazelius B, Berg JO et al. : Blood flow changes in the dental pulp of cat and rat measured simultaneously by laser Doppler flowmetry and local ^{125}I clearance. *Acta Physiol Scand* 131: 81-91, 1987.
11. Heyeraas-Tonder KJ, Aukland K : Blood flow in the dental pulp in dogs measured by local H_2 gas desaturation technique. *Arch Oral Biol* 20: 73-79, 1975.
12. Meyer MW, Path MG : Blood flow in the dental pulp of dogs determined by hydrogen polarography and radioactive microsphere methods. *Arch Oral Biol* 24: 601-605, 1979.
13. Shoher I, Mahler Y, Samueloff S : Dental pulp photoplethysmography in human beings. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 36:915-921, 1973.
14. Riva C, Ross B, Bendek GB : Laser Doppler measurements of blood flow in capillary tubes and retinal arteries. *Invest Ophthalmol* 11: 936-944, 1972.
15. Stern MD, Bowen PD, Parma R et al. : Measurement of renal cortical and medullary blood flow by laser Doppler spectroscopy in the rat. *Am J Physiol* 236: 80-87, 1979.
16. Oberg PA, Nilsson GE, Tenland T et al. : Measurement of skeletal muscle blood flow in bullet wounding with a new laser Doppler flowmeter. *Microvasc Res* 18: 298, 1979.
17. Williams PC, Stern MD, Bowen PD et al. : Mapping of cerebral cortical strokes in rhesus monkeys by laser Doppler spectroscopy. *Med Res Eng* 13: 3-5, 1980.
18. Hellem S, Jacobsson LS, Nilsson GE et al. : Measurement of microvascular blood flow in cancellous bone using laser Doppler flowmetry and ^{133}Xe -clearance. *Int J Oral Surg* 12: 163-177, 1983.
19. Gazelius B, Olgart L, Edwall B et al. : Non-invasive recording of blood flow in human dental pulp. *Endod Dent Traumatol* 2: 219-221, 1986.
20. Musselwhite JM, Klizman B, Maixner W et al. : Laser Doppler : a clinical test of pulpal vitality. *Oral Surg*, 1996.
21. Moorrees CFA, Fanning EA, Hunt EF : Age variation of formation for ten permanent teeth. *J Dent Res* 42: 1490-1502, 1963.
22. Nagata E, Kondo T, Ayasaka N et al. : Immunohistochemical study of nerve fibers

- with substance P- or calcitonin gene-related peptide-like immunoreactivity in the junctional epithelium of developing rats. *Archs Oral Biol* 37: 655-662, 1992.
23. Bernick S : Differences in nerve distribution between erupted and non erupted human teeth. *J Dent Res* 43: 406-411, 1964.
24. Tsuzuki H, Kitamura H : Immunohistochemical analysis of pulpal innervation in developing rat molars. *Archs Oral Biol* 36: 139-146, 1991.
25. Fearnhead RW : The histological Demonstration of nerve fibers in human dentin. In sensory mechanics in dentin symposium. Royal Society of Medicine, London, 1962. cited from Anderson ED: Sensory mechanism in dentin, Pergam Press, Oxford : 15-24, 1963.
26. Bernick S : Innervation of teeth and periodontium after enzymatic removal of cancellous elements. *Oral Surg* 10: 323-337, 1957.
27. Johnson DC, Harshbarger J, Rymer HD : Quantitative assessment of neural development in human premolars. *Anat Rec* 205: 421-429, 1983.
28. Fuss Z, Trowbrige H, Bender IB et al. : Assessment of reliability of electrical and thermal pulp testing agent. *J Endod* 12: 301-305, 1986.
29. 최재홍, 차문호 : 영구 전치의 치근 발육 단계에 따른 Electric Pulp Stimulator에 대한 치수 반응. 대한 소아치과학회지 6: 27-32, 1979.
30. Andreasen JO : Atlas of replantation and transplantation of teeth, 1st ed, Sanders Co., Philadelphia 35-51, 1992.
31. Andreasen FM : Transient apical breakdown and its relation to color and sensibility changes after luxation injuries to teeth. *Endod Dent Traumatol* 2: 9-19, 1986.
32. Olgart L, Gazelius B, Lindh-Stromberg O : Laser Doppler flowmetry in assessing vitality in luxated permanent teeth. *Int Endod J* 21: 3300-306, 1988.
33. Ingolfsson ER, Tronstad L, Riva CE : Reliability of laser Doppler flowmetry in testing vitality of human teeth. *Endod Dent Traumatol* 10 : 185-187, 1994.
34. Ramsay DS, Arrun J, Martinen SS : Reliability of pulpal blood flow measurements utilizing laser Doppler flowmetry. *J Dent Res* 70: 1427-1430, 1991.
35. Gazelius B, Olgart L, Edwall B : Restored vitality in luxated teeth assessed by laser Doppler flowmeter. *Endod Dent Traumatol* 4: 265-268, 1988.
36. Bryer LW : An experimental evaluation of the physiology of tooth eruption. *Int Dent J* 7: 432-478, 1957.
37. Vongsavan N, Matthews B : Experiments on extracted teeth into the validity of using laser Doppler technique for recording pulpal blood flow. *Archs Oral Biol* 38: 431-439, 1993.