

Laser Doppler flowmeter를 이용한 치수혈류 측정

반태환 · 이재상 · 김성교

경북대학교 치과대학 치과보존학교실

ABSTRACT

MEASUREMENT OF PULPAL BLOOD FLOW USING A LASER DOPPLER FLOWMETER

Tae-Whan Ban, Jae-Sang Lee, Sung-Kyo Kim

Department of Conservative Dentistry, College of Dentistry, Kyungpook National University, Taegu, Korea

Blood supply rather than nerve supply implies pulp vitality. To evaluate pulp vitality clinically, electric pulp test and thermal test which are based on sensory nerve response have been used in addition to many auxiliary data such as past dental history, visual inspection, radiographic examination, percussion, palpation and transillumination test. However, reactivity of the nerves to the stimulation is not synonymous with normalcy. Therefore measurement of pulpal blood flow using a laser Doppler flowmeter became a new trial to test the pulp vitality.

The purpose of the present study was to evaluate normal pulpal blood flow level of maxillary teeth in adult to provide a guideline in determining the vitality of dental pulp.

Pulpal blood flow was measured in maxillary central and lateral incisors, canines, first and second premolars and first molars of seventy nine adults of 22 - 30 years old using a laser Doppler flowmeter (PeriFlux 4001, Perimed Co., Stockholm, Sweden, 780 nm infrared laser, 1mW). For directly-made splints, silicone rubber impressions were taken directly from the mouth. For indirectly-made splints, alginate impressions were taken from the mouth and stone cast were made. After making depressions on the buccal surfaces of the cast teeth to indicate the hole positions, second impressions with vinyl polysyloxane putty were taken from the cast. Holes for the laser probes were made at the putty impressions 4mm above the gingival level. Laser probe (PF416 dental probe, 1.5mm) was inserted in the prepared hole and the splint was set in the mouth. After 10 minutes of patient relaxing, pulpal blood flow was recorded for 5 minutes on each tooth. The recorded flow was saved in the computer and calculated with a software 'Perisoft' version 5.1.

Pulpal blood flow was also recorded in six teeth of five individuals with no response to electric pulp test and cold test, with periapical radiolucency, or with history of root canal treatment to compare with nonvital teeth. The difference between the mean flow values of each group of teeth were analyzed using one-way ANOVA and Duncan's Multiple Range test.

The results were as follows:

1. The average pulpal blood flow values of all the tested teeth of each location were between 9 - 16 Perfusion Unit. Pulpal blood flow value was highest in maxillary lateral incisors, followed by first premolars, second premolars, canines, central incisors, and then first molars ($p < 0.01$).
2. In six anterior teeth, indirectly-made splint group showed higher pulpal blood flow values than directly-made splint group ($p < 0.01$). In posterior teeth, however, there was no significant flow value difference between directly-made splint group and indirectly-made splint one ($p > 0.05$).
3. Teeth with vital pulps showed higher signal values than teeth with nonvital pulps ($p < 0.01$), and the flow photographs showed heartbeat-synchronous fluctuations and vasomotions, while those were absent in nonvital tooth.

I. 서 론

치수의 생활력을 판단하는 것은 해당치아의 감별진단과 치료계획 수립에 있어서 매우 중요하며 치수생활력의 상태를 조기에 알아으로써 치료의 지연이나 불필요한 치료에 따른 문제들을 피할 수 있다.

임상적으로 치수의 생활력을 측정하기 위하여 여러 가지 방법이 사용되어져 오고 있는데 전기치수검사와 냉검사, 그리고 와동검사가 주로 사용되어져 온 검사방법이고, 그 외에도 환자의 임상병력 검사, 시진, 촉진, 타진 및 광투과도 검사 등이 보조자료로서 사용되어지고 있다.

생활치수란 치수내 감각신경이 존재함을 의미하기 보다는 치수내 혈류가 존재함을 일컫는 말이다¹⁾ 임상에서 일반적으로 사용되어지고 있는 치수검사인 전기치수검사와 냉검사, 그리고 와동검사는 치수내의 신경반응에 근거를 둔 검사들로서 치수내의 혈액이 정상적으로 공급되면 치수내 감각신경이 정상적으로 반응할 것이라는 가정 하에 치수의 생활력을 간접적으로 추정하는 방법이다. 그러나 치수의 신경반응과 치수혈류가 항상 일치하지는 않는다 치수내 감각신경은 치수내의 신경발달 상태에 따라서도 달리 반응할 수 있을 뿐 아니라 피검자에 따라서도 반응이 다르게 표현될 수 있다 그리고 치수내 감각신경은 치수조직의 변화에 저항하면서 반응하는 경우도 있다²⁾. 따라서 감각 신경의 반응에 근거를 둔 방법인 전기치수검사, 냉검사 및 와동검사 등은 위음성 및 위양성의 가능성이 높은 것으로 보고되고 있으므로³⁾ 일반적으로 상기 어느 한 가지 검사의 결과만에 의존하기보다는 다양한 검사결과의 종합으로 최종적인 진단을 내리기를 권고하고 있다 이러한 맥락에서 Weine⁴⁾은 신경 지배 보다는 혈액 공급이 치수의 생활력을 더 잘 나타내주기 때문에 치수의 생활력을 측정하기 위해서는 치수의 신경분포 보다는 혈류분포를 검사하는 것이 추천된다고 하였다.

이에 그 동안 실험실에서 혈액학 연구를 위해 사용하던 laser Doppler flowmeter를 이용하여 임상에서 치수혈류를 측정하여 치수생활력 유무를 판단하고자 하는 연구가 시도되었다⁵⁾.

Laser Doppler flowmeter에서 fiber-optic probe에 의해 전달된 laser 빛은 넓게 산란되고 부분적으로 조직에 흡수되게 되는데, 움직이는 혈액세포에 부딪힌 빛은 파장의 변화를 겪는 반면, 정지된 물체에 부딪힌 빛은 변화되지 않는다. 파장에 있어서 이 변화의 도수분포와 크기는 혈액세포의 수와 속도에 직접적으로 비례하며 그것들의 운동방향에는 관여하지 않고 수신기에 의해 수집된 정보는 전기신호로 변형되고 분석되어져서 혈류치를 나타내게 된다.

출력되는 혈류측정치는 laser Doppler flowmeter probe의 치면 적용위치에 따라 달라질 수 있고 probe의 고정상

태에 의해서도 영향을 받을 수 있다 따라서 laser Doppler flowmeter를 이용하여 치수혈류를 측정하기 위해서는 probe를 치면에 고정할 필요가 있고⁶⁾ 이의 고정을 위한 많은 방법들이 고안되었다. Gazelius 등⁷⁾은 modified rubber can clamp를 사용하여 probe를 치면에 고정한 바 있고, Olsson 등⁸⁾은 고무인상 putty를, Ramsay 등⁹⁾은 교정용 bracket을 이용한 Custom-made splint를, 그리고 Watson 등¹⁰⁾은 modified mouth guard를 사용한 바 있다 그리고 Nam¹¹⁾은 치면을 산 부식시킨 다음 광중합 레진으로 probe holder를 부착하고 probe를 적용한 바 있다.

Gazelius 등⁷⁾은 laser Doppler flowmeter를 처음으로 인간의 치아에 적용하여 치수혈류를 기록할 수 있는지를 연구하여 손상받지 않은 치아에서 나오는 출력 신호가 인접하는 미반응성 치아나 치수절단한 치아에서 나오는 출력 신호와 다르게 나타남을 보고하였다 그리고 Ingolfsson 등¹²⁾도 laser Doppler flowmeter가 생활치아로부터 과시 치수를 구별하는데 도움을 주었다고 하였으며, 치아 횡면의 서로 다른 위치에 probe 적용시 laser Doppler flowmeter 출력 신호의 수치가 널리 나타났다고 하여 출력 신호가 probe 적용에 매우 민감하게 반응함을 보고하였다 Sasano 등¹³⁾은 상악 중절치에서 레이저 빛에 따른 출력 신호를 비교한 바 있고 Gazelius 등⁷⁾은 탈구된 후 재식된 하악 4전치에서, Mesaros와 Trope¹⁴⁾는 재식된 상악 중절치에서 시열관화 경과된 laser Doppler flowmeter를 사용하여 측정한 바 있다. 또한 Nam¹¹⁾은 미완성 치근을 가진 상악 중절치를 대상으로 laser Doppler flowmeter를 이용한 검사 결과를 치수생활력을 전기치수검사 결과와 비교하여 연구한 바 있다.

그러나 현재까지 구강내 전치부 및 구치부 전체를 대상으로 laser Doppler flowmeter를 적용한 치수혈류측정의 결과는 미흡한 실정이며, 근관치료 임상에서 보다 폭넓게 적용하기 위해서는 일관된 연구결과가 필요함을 인식할 수 있다.

본 연구에서는 성인치아에서 치수생활력 검사를 위해 생활력의 판단근거로 참고할 수 있는 정상혈류 측정치의 기초 자료를 마련할 목적으로, laser Doppler flowmeter를 이용하여 상악의 상악 중절치에서부터 상악 제1대구치에 이르기까지 정상 치수혈류를 측정하고, probe 고정용 splint 제작 방법 및 생활치수와 실험치수에 따른 치수혈류 측정치의 차이를 비교, 연구하여 다소의 지견을 얻었기에 이에 보고하는 바이다.

II. 재료 및 방법

1. 시험대상

정상 생활치아의 치수혈류 측정에는 22세에서 30세까지

의 성인 남녀 79명을 대상으로 하였으며, 시험 전에 시험의 목적, 성격 및 방법에 대해 설명을 하고 연구 참여에 동의를 구하였다. 검사 치아는 상악 좌우측 중절치, 측절치, 견치, 제1, 2소구치 및 제1대구치로 하였는데, 치아우식증 등으로 치수에 손상이 있거나 손상을 줄 위험을 갖고 있는 치아, 큰 수복물이나 최근의 외상병력, 임상증상 또는 교정치료의 병력이 있는 치아는 대상에서 제외하였다. 방사선 상으로 정상범주에 속하면서 전기치수검사(DE Tester 300A, J. Morita, Kyoto, Japan)나 냉검사에서 정상범주에서 반응하며 정상 색조를 가지는 치아만을 대상으로 하였다. 또한 생활치아에 대한 비교군으로 실험치아 치수혈류 측정을 위해서는 냉검사 및 전기치수검사에 반응이 없고 방사선 사진 상 치근단 투과성상을 가지거나 이전에 근관치료를 받은 경험이 있는 실험치아를 가진 성인 남녀 자원자 5명의 피사치아 6개도 함께 검사하였다.

2. 시험재료

Probe 고정용 splint 제작을 위해 사용된 인상재로는 vinyl polysiloxane 인상재 putty인 3M Express™ STD (3M, St. Paul, MN, U.S.A.)를 사용하였고, 치수혈류 측정을 위한 laser Doppler flowmeter로는 파장 780nm의 적외선 레이저를 사용하며 출력 1mW, 시간계수 0.03초의 2채널형 PeriFlux 4001 (Perimed Co., Stockholm, Sweden)을 사용하였으며, 치아에 적용하는 혈류측정용 probe로는 직경 1.5mm, fiber separation 0.25mm의 PF416 dental probe를 사용하였다. 이 laser Doppler flowmeter는 Perimed PF 1001 Motility Standard로 눈금을 조정하였고, 혈류는 Perfusion Units (PU; 1 PU = 10mV)로 측정하였다¹⁶⁾.

3. Probe 고정을 위한 splint 제작

고무인상에 hole을 뚫어 혈류측정용 probe 고정을 위한 splint로 사용하였다. 이때 고무 인상은 직접법 또는 간접법으로 채득하였으며 그 방법은 다음과 같이 하였다.

직접 인상법에서는 구강 내에서 직접 고무인상을 채득하였다. 간접 인상법에서는 구강 내에서 알지네이트 인상재를 사용하여 일차 인상을 채득하고 이것을 이용하여 만든 석고 모형에서 치은연에서 4mm 떨어진 치관부 협면 부위에 저속 round bur를 이용하여 홈을 형성하여 probe 고정위치를 표시한 다음 석고모형상에서 이차적으로 고무인상을 채득하였다. 이 때 인상재가 검사할 치아의 변연을 최소한 3mm 이상 피개하게 하였고 인상재의 두께는 최소한 5mm가 되게 하였다.

직접법으로 채득된 인상에서는 치은연에서 4mm 떨어진

치관부 협면에, 간접법으로 채득된 인상에서는 형성된 홈위치에 hand spreader를 이용하여 치면에 직각되게 치아마다 1개씩, 총 12개의 hole을 형성하고 혈류측정용 probe의 직경과 같은 크기만큼 hole을 확대하여 probe의 변연이 치은연으로부터 3mm 이상 떨어진 치관부 협면 법랑질에 위치하게 하였다. 확대된 hole에 probe를 0.5mm 정도 구강측으로 돌출되게 삽입하여 고정하였다.

4. 치수혈류 기록 및 계측

압축공기로 측정 대상치아의 표면 및 치은을 건조시키고 상기의 방법으로 제작된 splint를 환자 구강 내에 장착하여 혈류측정용 probe를 치아 협면에 적용하였다. 이때 동종의 probe 두 개를 사용하여 좌우 대칭되는 치아에 1개씩 동시에 적용하였다.

피검자는 조용한 검사실 내 치과치료대에 누워 10분 이상 안정을 취하게 하였으며 laser Doppler flowmeter에서 안정된 측정신호가 나타날 때까지 기다렸다가 artifact가 나오지 않고 출력 신호가 안정 상태에 도달한 후 각각의 치아에 대해 5분간 치수혈류를 기록하였다. 이때 피검자의 몸이나 probe의 움직임 또는 연하 등에 의해 잘못된 기록이 나오지 않도록 주의를 기울였다.

Laser Doppler flowmeter를 통해 나온 신호는 'Perisoft' version 5.10 (Perimed Co., Sweden) 소프트웨어를 이용하여 컴퓨터에 저장하였으며 동 소프트웨어를 이용하여 기록된 신호의 양을 계측하였다. 이 때 피검자나 측정장치 등의 움직임으로 인한 artifact는 평균에서 제외하였다.

5. 실험 결과의 통계적 분석

각 치아의 치수혈류는 Perfusion Unit로 측정되었으며, 각 치아마다 치수혈류 측정치의 평균 및 표준오차를 계산하였다. 각 치아간 및 군간의 측정치 평균의 차이는 일원변량분석법(one-way ANOVA) 및 Duncan's Multiple Range Test를 이용하여 분석하였다.

Ⅲ. 성 적

1. 치아별 정상 치수혈류 측정치의 범위 및 비교

상악 중절치에서부터 제1대구치까지 각 치아의 치수혈류 측정치는 Table 1 및 Fig. 1과 같이 나타났다.

Table 1. The measurements of pulpal blood flow in normal maxillary teeth

Teeth	Right						Left					
	1M	2PM	1PM	C	LI	CI	CI	LI	C	1PM	2PM	1M
Mean	12.05	14.37	15.57	14.31	15.92	12.25	11.13	14.65	12.21	12.87	12.29	10.99
S.E.	0.74	0.55	0.57	0.51	0.58	0.46	0.43	0.57	0.40	0.45	0.13	0.56
n	35	61	65	78	75	74	74	74	79	67	61	38

CI: central incisor, LI: lateral incisor, C: canine, 1PM: first premolar, 2PM: second premolar, 1M: first molar

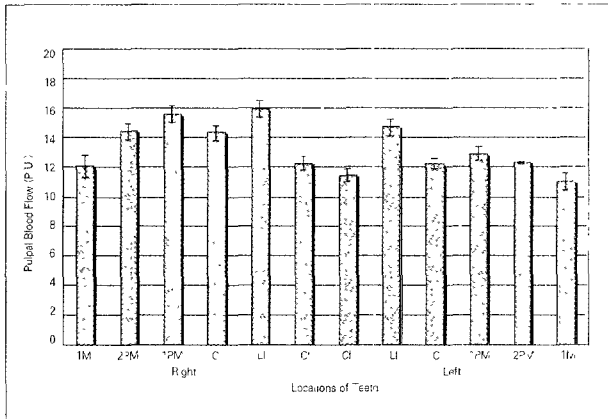


Fig. 1. Pulpal blood flow of maxillary teeth with direct and indirect impression methods (Mean±S.E., n=78) CI: central incisor, LI: lateral incisor, C: canine, 1PM: first premolar, 2PM: second premolar, 1M: first molar.

치수혈류 측정치 평균은 전치부 및 구치에서 모두 약 11 - 16 PU로 나타났고, 상악 측절치에서 가장 높게 나타났으며, 제1소구치, 제2소구치, 견치, 중절치 및 제1대구치의 순으로 높게 나타났다(p<0.01).

2 Solint 제작방법(직접 인상법과 간접 인상법)에 따른 측정치 비교

직접 인상법으로 제작된 splint를 이용한 혈류 측정의 결과는 Table 2와 같이 나타났다. 치수혈류 측정치 평균은 전치부에서 약 9 - 13 PU, 구치부에서 약 11 - 14 PU로 나타났다.

간접 인상법으로 제작된 splint를 이용한 혈류 측정치는 Table 3과 같이 나타났다. 치수혈류 측정치의 평균은 전치부에서 약 12 - 17 PU, 구치부에서 약 11 - 16 PU로 나타났다.

Table 2. The measurements of pulpal blood flow in maxillary teeth with directly-made splint

Teeth	Right						Left					
	1M	2PM	1PM	C	LI	CI	CI	LI	C	1PM	2PM	1M
Mean	12.34	13.03	14.25	11.86	12.93	9.19	9.54	11.62	10.29	11.79	11.76	11.89
S.E.	1.13	1.19	1.43	0.95	1.24	0.88	0.93	1.01	0.72	0.89	0.88	0.91
n	12	14	15	21	21	21	21	21	22	16	15	12

CI: central incisor, LI: lateral incisor, C: canine, 1PM: first premolar, 2PM: second premolar, 1M: first molar

Table 3. Pulpal blood flow of maxillary teeth with indirect impression method

Teeth	Right						Left					
	1M	2PM	1PM	C	LI	CI	CI	LI	C	1PM	2PM	1M
Mean	11.9	14.77	15.97	15.21	17.08	13.46	12.18	15.85	12.96	13.21	12.46	10.57
S.E.	0.98	0.61	0.60	0.56	0.59	0.43	0.44	0.62	0.44	0.52	0.53	0.67
n	23	47	50	57	54	53	53	53	57	51	46	26

CI: central incisor, LI: lateral incisor, C: canine, 1PM: first premolar, 2PM: second premolar, 1M: first molar

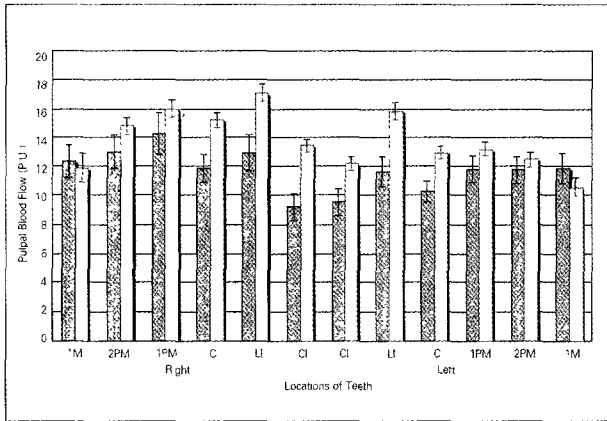


Fig. 2. Comparison of the measurements of pulpal blood flow in maxillary teeth between directly-made splints (gray bars) and indirectly-made splints (white bars). CI: central incisor ; LI: lateral incisor ; C: canine ; 1PM: first premolar ; 2PM: second premolar ; 1M: first molar.

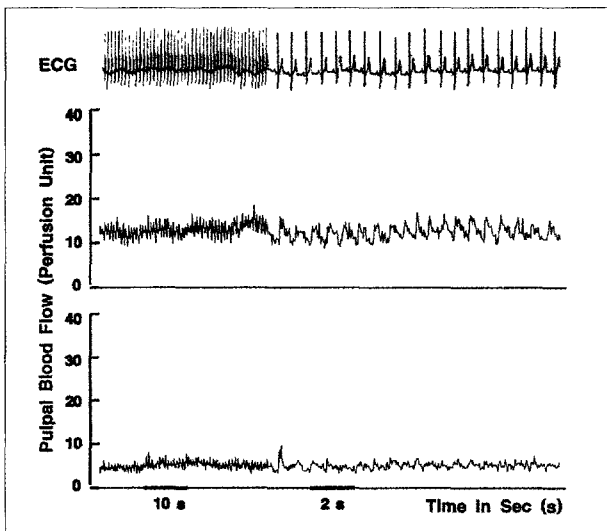


Fig. 3. Comparison of the measurements of pulpal blood flow in maxillary teeth between directly-made splints (bars with oblique lines) and indirectly-made splints (bars with dots). CI: central incisor ; LI: lateral incisor ; C: canine ; 1PM: first premolar ; 2PM: second premolar ; 1M: first molar.

간접인상법에 의한 경우와 직접인상법에 의한 경우를 비교한 바(Fig. 2) 간접인상법으로 제작된 splint 적용이 직접인상법으로 제작된 splint 적용에 비해 혈류 측정치의 평균이 전반적으로 높게 나타났는데, 상악 6전치에서는 간접인상법으로 제작된 splint 적용이 직접인상법으로 제작된 splint 적용에 의한 측정치에 대해 통계적으로 유의한 차이를 나타내었으나($p < 0.01$) 구치에서는 측정치에 있어서 유의한 차이를 나타내지 않았다($p > 0.05$).

Table 4. Flow values recorded from laser Doppler flowmeter on maxillary teeth with and without vital pulp (Perfusion Unit)

Teeth	Vital				Nonvital Incisors
	Right		Left		
	LI	CI	CI	LI	
Mean	15.92	12.25	11.43	14.65	2.70
S.E	0.58	0.46	0.43	0.57	0.69
n	75	74	74	74	6

CI: central incisor ; LI: lateral incisor.

3. 생활치아 및 실험치아 치수혈류 측정치의 비교.

생활치아 치수혈류와 실험치아 치수혈류는 Table. 4 및 Fig. 3과 같이 나타났다. 생활치아에서의 치수혈류 측정치는 실험치아에서의 측정치에 비해 현저히 높은 측정치를 나타내었으며($p < 0.01$), 생활치아에서의 치수혈류는 심장의 박동과 일치하는 파동성 및 율동성을 나타낸 반면 실험치아에서는 이러한 양상을 나타내지 않았다.

IV. 고찰

치수는 혈관, 신경섬유, 세포 및 기질로 이루어져 있으며¹⁾ 치수가 정상적인 생활력을 유지하고 있는가 하는 판단은 치아에 대한 치료계획을 수립함에 있어 매우 중요하다.

치수생활력을 파악하기 위해서 가장 보편적으로 사용되고 있는 방법은 치수의 신경반응에 근거하는 전기치수검사와 냉검사인데 이들 검사들은 비교적 높은 신뢰도를 가지는 것으로 보고되고 있지만²⁾ 가성반응을 나타내기도 하는 한계성을 가지고 있다. 전기치수검사에서는 최근에 외상을 받은 치아, 과도하게 석회화된 근관, 최근에 맹출하거나 미완성 치근을 갖고 있는 치아, 부분 괴사된 치아, 그리고 진통제, 마취약, 알콜 또는 정신안정제를 복용한 환자에서는 위음성 반응을 나타낼 수 있고, 괴사치수나 검사 전에 치아를 충분히 건조시키지 못했거나 방습이 안 된 경우 또는 환자가 불안한 경우 등에서는 위양성 반응을 나타낼 수 있다고 알려져 있다³⁾.

치수에서의 신경과 혈관과의 관계에 관해, Kim¹⁷⁾은 치수염에서 두 가지 중요한 요소는 미세혈류와 감각 신경의 흥분이고 A-delta 신경섬유의 흥분은 치수혈류에 중요한 영향을 미치지 않지만 C-신경섬유 흥분은 신경섬유 말단으로부터 neurokinin들을 유리시켜 치수혈류의 증가를 야기한다 하였다. 그리고 치수혈류의 증가는 조직압력의 증가를 통해서 A-delta와 C-신경섬유의 흥분을 야기하는 반면에 치수혈류 감소는 A-delta 신경섬유에 흥분억제 효과를 갖는다고 설명하였다.

치수의 신경반응과 조직상태와의 관계에 관해, Mullaney¹⁸⁾는 전기치수검사에 반응이 없었으나 발수시 동통을 나타냈던 치수 48개를 조직학적으로 검사한 바 오직 두 치수에서만 정상으로 보이는 신경섬유를 함유하고 있었다고 보고한 바 있다. 또한 전기검사에 대한 신경의 반응성이 치수의 상태와 같은 의미를 가지지는 않아서, 신경이 전기치수검사에 반응할 수 없을 정도로 심하게 변성되기 전에 혈액 공급이 현저히 감소할 수도 있고, 신경조직은 염증에 대한 저항성이 크기 때문에 주위조직이 변성되고 난 뒤에도 반응성을 가질 수도 있으며, 신경반응에 근거한 치수생활력 검사에 대해 정상범주에서 반응한 경우에도 그 발거된 치수가 조직분해의 증거를 보인 경우도 있다¹¹⁾ 그리고 치아가 외상을 받은 경우, 외상 초기에는 신경 및 혈관의 손상이 존재하는 경우가 많은데, 혈관은 외상을 받더라도 대부분 조직에 재혈관화¹²⁾가 나타나지만 손상받은 신경은 재생이 느리고 치유시까지 수개월이 소요되기도 한다. 따라서 이 시기에 기존의 전기치수검사 및 냉검사 등의 치수생활력검사를 시행할 경우 치수생활력이 존재하더라도 위음성 반응이 나타나게 된다. 그리고 괴사된 치수를 가지는 치아는 혈구들이 파괴되었기 때문에 광투과에 대해 정상치아에 비해 어두운 치수근관계를 보일 수 있다¹¹⁾. 그러나 기존의 방법으로는 외상 초기의 정확한 치수생활력 측정이 어려워 부가적으로 치관 색조관찰 및 치근단 방사선 사진 등이 이용되기도 하지만 치관의 색조 및 일시적 치근단 투과상은 회복이 가능하므로 신뢰하기 어렵다.

치수생활력 측정의 이러한 많은 문제점을 보완하고자 치수에 존재하는 감각신경보다는 치수혈류상태에 근거를 두고 치수상태를 파악하고자 하는 연구가 있어왔다

치수 혈류 측정방법에 관해, 임상에서 치수혈류 측정을 통해 치수의 생활력을 판단하고자 하는 시도가 있기 전에 치수의 혈역학을 연구하기 위해서 많은 종류의 치수혈류 측정방법이 실험실에서 사용되어져 왔다. 치수내 염증반응 등을 이해하기 위해서 실험실에서 사용되어져 온 치수혈류 측정 방법으로는 hydrogen polarography, radioactive microsphere method¹⁹⁾, intravital microscopy²⁰⁾, ¹³³Xenon washout method^{22,23)}, photo plethymographic approach, thermocouple approach 그리고 isotope fraction method 등²⁴⁾이 있다. 그러나, 이들 방법들은 외과적 처치나 치질삭제 등이 요구되는 방법으로서 임상에 적용하기에는 적절하지 않다고 볼 수 있다. 그러나 그 이후에 도입된 laser Doppler flowmeter를 이용하는 경우에는 비침습적인 방법으로 혈역학을 연구할 수 있게 되었고, 아울러 이 비침습적인 방법을 임상에 적용하려는 시도²⁵⁾가 이루어지게 되었다.

본 연구에서 사용된 laser Doppler flowmeter의 probe는 3개의 fiber를 가지며 삼각형으로 배열되어져 있다

Fiber 하나는 치수에 laser를 전달하고, 2개의 fiber는 반사되어 들어오는 빛을 받아들인다. Laser Doppler flowmeter는 치수 혈관에 있는 적혈구의 운동을 간파하는 것을 기초로 하며 송신 fiber에서 나온 1 - 3mW의 저출력 laser가 움직이는 혈구에 의해 반사되는 파장의 차이를 수신 fiber가 받아들여 혈류를 측정하는 방법²⁶⁾으로 모세혈관의 반경 1mm에서 적혈구 운동을 즉시 측정한다^{27,28)}

Laser Doppler flowmeter에 사용되는 probe에는 다양한 종류가 있는데 각 probe에서 fiber와 fiber 사이의 간격(separation)은 150, 250, 500, 800, 1000, 1200 및 1500 μ m으로 다양하고 probe는 0.45 - 6mm 직경의 원형 또는 삼각형의 모양을 가지는데²⁷⁾, probe내 fiber간의 간격이 클수록 측정의 정확성이 증가한다고 한다²⁸⁾ 그리고 사용되는 laser 매질도 다소 다양하여 laser의 파장이 길수록 치수 심부 조직의 혈류 측정이 가능하며, 이에 따라 혈류 측정치가 높게 나타난다고 알려져 있다²⁸⁾ 본 연구에서는 파장이 780nm인 반도체 laser를 이용하는 기기를 사용하였으며 fiber separation 0.25mm인 dental probe를 사용하였다

심장의 박출과 연관된 혈관 말단 저항은 혈류를 조절하는 한 인자가 된다 Watson 등²⁹⁾은 제한된 운동 동안에 laser Doppler flowmeter를 사용해서 치수에서 혈류변화를 측정된 바 안정상태에 비해 다소 증가된 혈류를 관찰하였으며, 혈압도 증가하였다고 하였다 또한 혈관의 말초 저항은 혈관 주위의 평활근에 존재하는 자율신경계의 교감신경에 의해 지배받고 이 교감신경은 운동이나 불안 등과 같은 많은 요소에 의해 좌우되므로³⁰⁾ 치수혈류는 운동이나 정시에 영향을 받는 교감신경계에 의해서 변화될 수 있다. 따라서 안정된 치수혈류를 측정하기 위해서는 혈류 측정 전에 환자의 편안한 상태가 필요하다 하겠다. 본 연구에서는 피검자의 신경생리적, 육체적 안정 상태를 유도하기 위해 혈류 측정 1시간 전부터 흡연 및 식음을 금하고 치료대에 누운 자세(reclined position)에서³¹⁾, 피검자의 안정된 상태 및 주위의 영향이 없는 조용한 환경하에 10분 이상 안정을 취하게 한 후 혈류를 측정하였다.

본 연구에서는 성인치아에서 치수생활력 검사를 위해 생활력의 판단근거로 참고할 수 있는 정상혈류 측정치의 기초 자료를 마련할 목적으로, laser Doppler flowmeter를 이용하여 성인의 상악 중절치에서부터 상악 제1대구치에 이르기까지 정상 치수혈류를 측정하였다 그 결과, 치수혈류 측정치 평균은 전치부 및 구치에서 모두 약 11 - 16 P₁₀₀로 나타났다.

Gazelius 등³²⁾은 1986년 laser Doppler flowmeter를 인체 치아에 처음으로 적용하여 치수혈류를 측정한 바 있는데, 그는 자신의 정상 상악 전치 및 5명의 자원자 정상치아를 대상으로 측정하여 평균 3.7에서 5.6V 사이의 측정치

를 기록한 바 있고, 이후 11세 환자의 외상받은 하악 4전치에서 치수의 혈류변화를 관찰한 바 있는데⁴⁴ 외상 후 초기에 치수의 신경반응이 나타나지 않은 경우에도 치수의 혈류는 나타났고 시간이 경과함에 따라 신경반응의 회복과 함께 치수혈류가 점진적으로 증가하여 9개월 경과시 혈류 측정치가 5.0에서 6.5V 사이로 나타났는데 이 수치를 그는 정상 수준이라고 한 바 있다. 여기에서 혈류측정치는 정상 측정치의 최저 및 최고치를 1과 10V로 나타낸 것이다. 그리고 Olgart 등⁹은 외상받은 치아의 대조군으로 쓰인 반대측 정상 치아에서 혈류 측정치 평균이 5.18V로 나타났다고 보고했다. Ingolfsson 등^{7,8}은 본 연구에서와 유사한 피검자 연령인 평균 나이 27.4세의 환자 10명의 건전한 상악 전치 10개에서 치수혈류를 측정할 때, probe 종류 및 적용 위치에 따라 다소 차이는 있었으나 평균 3.6에서 9.4PU 사이의 측정치를 구한 것으로 나타났다. 그리고 남²²은 23세에서 24세 성인 35명의 정상 상악 전치에서 직경 1.5mm의 PF407 probe를 사용하여 치수혈류를 측정할 때 평균 12에서 13PU 사이의 측정치가 나왔다고 보고한 바 있다. 이렇게 연구에 따라 측정치에 다소 차이가 나타난 것은 피검자의 치아 성숙 상태, 측정 기기의 laser 매질 및 probe 종류와 관계가 있을 것으로 보인다²². 따라서 치수의 혈류상태를 판단하기 위해서는 가능한 한 혈류 측정조건을 동일하게 하여 그 측정치들을 상호 비교할 필요가 있을 것으로 보인다.

악궁내 치아 위치에 따른 혈류 측정치에 관해, Wilder-Smith¹³은 치아간에 유의한 차이가 나타나지 않았다고 한 반면, Ingolfsson 등²⁶은 상악 절치와 상악 견치 사이에는 측정치에 차이가 나타나지 않았으나 하악 절치가 상악 절치 및 견치에 비해 높은 측정치를 나타내었다고 보고하였다. 본 연구에서는 검사된 전체 치아에서의 측정치를 순서대로 비교해 보았을 때 상악 측절치에서 가장 높게 나타났으며, 제1소구치, 제2소구치, 견치, 중절치 및 제1대구치의 순으로 높게 나타났다. 그리고 본 연구에서 치수혈류 측정치 평균은 전치부 및 구치부에서 모두 유사한 분포를 보여 전치부와 구치부의 측정치 차이가 나타나지는 않았다.

Gazelius 등¹¹은 외상받은 치아의 혈류를 시간 경과에 따라 기록한 바, 초기에는 시간이 경과할수록 혈류 측정치가 증가하다가 일정 시간 이후부터는 방사선 상아질의 침착과 함께 혈류가 감소하는 것을 관찰하였다. 그는 이 혈류의 감소를 상아질 침착으로 인한 치수용적의 감소 때문으로 해석하였다. 본 연구에서 각 위치의 치아마다 혈류측정치에 있어 다소 차이가 나타난 것으로 보아 각 치아에 따라 laser Doppler flowmeter에 측정되어진 부위의 치수 용적이 다를 것이라고 여겨진다.

Laser Doppler flowmeter의 출력 신호는 probe 적용에 매우 민감하게 반응하므로⁷ probe를 치면에 안정되게 고정

해야 한다. 실험실 연구에서는 미세조정기를 사용하여 probe를 치면에 고정하지만^{34,35} 임상에서는 이러한 방법을 사용할 수 없으므로 구강내에서 probe를 안정되게 고정할 splint가 필요하다. Gazelius 등⁵은 치아에 주위 조직으로부터 오는 영향을 피하기 위해 해당 상악 전치에 녹색의 리버뎀을 장착한 다음 변형시킨 리버뎀 클램프를 이용하여 probe를 치면에 고정한 바 있고, 실리콘 고무로 제작한 splint를 이용하기도 하였다¹⁴.

Olgart 등⁹은 elastic silicone 인상재를 사용하여 probe를 치면에 고정한 바, probe의 안정성 및 측정의 재현성이 우수하였다고 보고하였고, Ingolfsson 등^{7,8,26}도 고무인상재를 사용하여 splint를 제작하여 사용하였다.

Laser Doppler flowmeter를 사용한 치수혈류 측정시 probe 안정성과 측정 재현성에 관해, Anderson 등³⁰은 3명의 피검자 상악 중절치에서 교정용 브라켓을 이용한 probe 고정장치를 제작하여 사용한 바 동일 개체에서 같은 날에 측정을 여러 번 시행한 경우와 날짜를 달리하여 측정을 여러 번 시행한 경우에 공허 변이의 양이 매우 적었다고 보고하였다. 그리고 이 방법은 브라켓에 고정하는 장치의 견고성이 매우 필수적이고 제작에 시간이 많이 소요된다는 어려운 점도 가지고 있다고 지적한 바 있다.

본 연구에서도 상기 연구자들의 내용을 바탕으로 고무인상재를 사용하여 probe 고정을 위한 splint를 제작하여 사용하였는데, 인상재를 이용한 splint 제작의 정확성에 착안하여 splint를 직접 구강내에서 제작한 경우와 구강내 일차 인상으로 제작된 cast상에서 splint를 제작한 경우로 나누어 측정치 차이를 비교하였다. 전치부 및 구치부 모두에서 간접인상법으로 제작된 splint 적용군이 직접인상법으로 제작된 splint 적용군에 비해 높은 측정치를 나타내었고 6전치에서는 매우 유의한 차이를 나타내었다. 그리고 측정된 모든 위치의 치아에서 간접인상법으로 제작된 splint 적용군이 직접인상법으로 제작된 splint 적용군에 비해 측정치에 있어 현저히 적은 표준오차를 나타내었다. 본 연구에서 나타난 splint 제작 방법에 따른 측정치 차이의 이유를 명확하게 설명하기는 어려우나, 본 연구의 splint 제작방법에 따른 측정치 평균값과 표준오차의 차이로 미루어 보면, 간접인상법이 직접인상법에 비해 splint의 정확성을 가진다고 여겨지고, probe 고정을 위한 splint 제작시 직접인상법보다는 간접인상법을 사용하는 것이 추천된다 하겠다.

Laser Doppler flowmeter probe의 적용위치와 측정치와의 관계에 관해, Ingolfsson 등⁷은 치아의 협면에서 4개의 다른 위치 즉 절단측, 근심측, 원심측 및 치은측 치관부에서 혈류를 측정할 때의 laser Doppler flowmeter 출력신호의 신뢰성을 연구하였는데 probe를 치관의 절단측 부위에 위치시킨 경우가 probe를 치관부 치은측이나 치관 중심부에 위치하는 경우에 비해 낮은 출력 수치를 나타내었다고

보고하였다. 그는 그 이유를 치은측 치수가 절단측 치수에 비해 조직의 양이 많기 때문으로 해석하였다. 그리고 Hartmann 등⁵¹ 및 Vongsavan과 Matthews⁵⁰도 치은측에서는 치은 혈류에 의한 영향으로 혈류 측정치가 증가되어 나타난다고 하였고 치수혈류 측정시 이 영향을 배제할 필요가 있다 하였다. 본 연구에서는 이러한 치은혈류에 의한 영향을 배제하고 교합면측 또는 절단면측의 적은 치수량에 의한 변화요인을 감소시키기 위해 모든 대상치아에서 치관부 치은연에서 3mm 떨어진 치아 순면 중앙에 probe의 위치를 설정하였다.

본 연구에서는 probe의 적용위치에 따른 측정치를 조사하지는 않았다. 그러나 probe의 접근 방향이 구강의 중심 쪽이기 때문에 치아의 위치에 따라 probe의 적용위치가 다소 달라지게 된다. 상악 중절치, 측절치 및 견치의 경우에는 치관부 협면에 직각으로 probe가 위치하게 되나 소구치 및 대구치로 갈수록 probe는 치면의 근심면 쪽으로 위치하게 되었다. 그리하여 제1대구치의 경우는 probe가 치관의 근협측면에 위치하게 되었다. 본 연구에서 구강내 각 치아에 대한 접근 방향상 위치가 다소 달라질 수밖에 없었으나 Ingolfsson 등⁵¹ 과 Ramsay 등⁵⁰의 연구에서 치아에서의 높이가 동일하면 근원심간의 측정치 차이는 나타나지 않았다고 하므로 본 연구에서의 이러한 근원심방향의 probe 위치차이는 치수혈류측정치에 별 영향을 주지 않은 것으로 여겨진다.

생활치아와 실험치아의 혈류기록에 관해, Gazelius 등⁵²은 laser Doppler flowmeter를 이용하여 치수혈류를 측정할 때, 손상받지 않은 치아에서 나오는 출력 신호는 인접하는 무수치에서 나오는 출력 신호와는 현저히 달리 나타나, 정상치아의 출력 신호에서는 심박동과 일치하는 파동성이 나타난 반면 실험치아에서는 이러한 파동성 양상이 나타나지 않았고 실험치아에서는 정상 치아에 비해 출력 신호의 수준이 현저히 낮게 나타났다고 하였다. Ingolfsson 등⁵¹도 생활치아와 실험치아에서 혈류를 측정할 때 생활치아가 실험치아에 비해 현저히 높은 측정치를 나타내었고 생활치아에서는 출력신호에 있어 심박동과 일치하는 파동성⁵³이 나타났고 혈관운동(vasomotion)을 나타내는 울동성⁵⁴이 관찰되었다고 하였다.

본 연구에서도 정상 생활치아와 실험치아의 측정치 비교에 있어서 정상 생활치아에서 측정된 혈류측정치가 실험치아에서 측정된 혈류측정치에 비해 현저히 높게 나타났고 정상 생활치아에서 기록된 출력에서는 파동성과 울동성이 나타나 상기의 연구 결과와 같은 결과를 보였다. 따라서 laser Doppler flowmeter를 이용하여 생활치아와 실험치아를 구별하기 위해서는 측정된 혈류치의 수준과 더불어 출력신호에서의 파동성 및 울동성 양상을 잘 관찰하여야 할 것으로 보인다.

레이저 빛의 종류와 혈류측정 기록에 관해, Sasano 등⁵⁵은 transmitted laser light를 생활치수에 적용한 바, transmitted laser light가 back-scattered light에 비해 치수의 상태를 더 잘 나타내 줄 수 있다고 보고하였다. 이 연구에서 상악 중절치 치관부 협면에 probe를 고정하고 치관부의 절단부 1/3, 중앙부 및 치경부 1/3에서 혈류를 측정하였을 때, 실험치에서는 transmitted laser light의 출력 신호가 모두 영(zero)으로 기록되어졌고 신호의 파동성이 나타나지 않은 반면 정상치아에서는 출력이 뚜렷하게 나타나면서 심박동에 비례하여 규칙적인 oscillation이 나타났다고 한 바 있다. Odor 등⁵⁶은 파장 633nm와 810nm 레이저를 비교하여 혈류측정치를 비교한 바, 큰 파장의 레이저를 사용한 경우 감도가 증가됨과 동시에 측정치가 높게 나타났다고 하였다. 그리고 파장 810nm의 레이저는 bandwidth를 좁게 할 경우 특이성이 감소한다고 하였다. Olgart⁵⁷은 그 이유에 관해 파장이 길수록 투과성이 증가되어 측정치가 높게 나타날 수 있다고 하였고 파장이 긴 레이저는 변색이나 석회화로 인해 투과성이 감소된 치아에서 치질을 투과하기가 용이하다고 하였다. 본 연구에서는 파장 780nm인 반도체 레이저가 매질로 사용된 레이저를 사용하였다. 따라서 파장 630nm의 레이저에 비해 다소 높은 측정치를 나타내었으리라 추측된다.

Laser Doppler flowmeter는 조직에 손상을 주지 않으면서, 임상적으로 적용하기 쉽고 실 시간상에서 계속적인 기록을 얻을 수 있다는 장점을 가지지만^{40, 43} 혈류 측정에 부분적인 단점도 가지고 있다. 조직내 적혈구 이동이 중정도이거나 소량인 경우에는 출력과 적혈구 이동량이 비례하지만 조직내 적혈구가 많은 경우에는 적혈구 이동과 laser Doppler flowmeter 측정값 사이에 완전한 비례가 성립되지는 않는다는 점을 가진다. 그리고 고가의 기계를 구입해야 하고 측정시 많은 시간이 소요되며 색소가 짙은 치아에서는 레이저의 투과력이 약하여 측정이 곤란한 점을 가지며, 파절된 치아에서 타액에 오염된 경우 위양성 반응의 가능성이 존재한다^{12, 58}. 그러나 치수혈류를 인접 정상치아와 비교하여 수치의 상대적인 높낮이를 비교할 수 있으며 생활치아에서는 출력의 파동성을 가지므로 외상을 받은 치아, 신경을 영향을 줄 수도 있는 골 수술 및 큰 치근단 농양 등의 경우에 치수의 생활력을 검사할 수 있는 매우 가치있는 방법임에는 틀림없다⁵².

이상을 고찰해 볼 때, 피검자의 치아 석회화상태, 레이저 매질 및 probe의 종류에 따라 laser Doppler flowmeter로 측정되는 치수혈류치는 달라질 수 있을 것으로 보이나, 생활치아는 모두 일정 수준의 혈류 측정치를 나타냄과 아울러 출력 신호에 있어 생활치아는 실험치아와는 달리 심박동과 일치하는 파동성 및 울동성을 나타내므로 이 두 가지 특징적 양상을 향후의 치수생활력 판단에 이용할 수 있을 것으

로 보인다 그리고 치수혈류는 치수의 상태에 따라 달라질 것으로 여겨지므로 치수 상태에 따른 혈류 측정치의 변화에 관해 계속적인 연구가 뒤따라야 할 것으로 사료된다.

V. 요 약

치수생활력이란 치수내의 혈관의 상태를 가리킨다. 치수 생활력 측정을 위해서 사용되어져 온 온도검사나 전기치수 검사는 치수신경의 반응에 기초하여 간접적으로 치수의 생활력을 판단하는 방법이다. 따라서 치수생활력의 판단을 위해서 치수생활력의 기본인 치수혈류를 파악할 필요가 있어 laser Doppler flowmeter를 이용하여 치수 혈류를 측정하는 방법이 연구되었다.

본 연구에서는 성인치아에서 치수생활력 검사를 위해 laser Doppler flowmeter를 이용하여 치수혈류를 측정할 경우 생활력의 판단 근거로 참고할 수 있는 정상혈류 측정치의 기초자료를 마련할 목적으로, laser Doppler flowmeter를 이용하여 성인의 상악 중절치에서부터 제1대구치에 이르기까지 각 정상 치아의 치수혈류를 측정하고, probe 고정용 splint 제작 방법 및 생활치수와 실험치수에 따른 치수혈류 측정치의 차이를 비교, 연구하였다.

22세에서 30세까지 성인 남녀 79명을 대상으로 상악 중절치에서부터 제1대구치에 이르기까지 laser Doppler flowmeter를 사용하여 치수혈류를 측정하였고, 생활치아에 대한 비교군으로는 실험치아라고 판단되는 치아를 가진 성인 남녀 자원자 5명의 치아 13개도 함께 검사하였다. 혈류 측정 probe고정용 splint제작을 위한 고무인상시 직접법에서는 환자 구강내에서 직접 고무인상을 채득하였고, 간접법에서는 구강내에서 일차 인상을 채득하여 만든 석고모형상에서 probe 위치를 표시한 다음 석고모형상에서 이차적으로 고무인상을 채득하였다. 고무인상에서 치관부에 probe 고정을 위한 hole을 형성하고 probe를 삽입, 고정된 다음 probe를 치아 협면에 적용하였다. Laser Doppler flowmeter에서 안정된 신호가 나타날 때까지 피검자를 10분 이상 동안 안정시켰으며 안정상태 도달 후 각 치아마다 5분간 치수혈류를 기록하였다. 측정된 치수혈류는 'Perisoft' (Perimed Co., Sweden) 프로그램을 이용하여 컴퓨터에 저장한 후 측정치를 계측하였다.

각 치아간의 실험치 평균의 차이는 일원 변량 분석법 (one-way ANOVA) 및 Duncan's Multiple Range test를 이용하여 분석하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 상악 중절치에서부터 제1대구치에 이르기까지 시험대상 전 치아에서의 치수혈류 측정치 평균은 9 - 16 Perfusion Unit 사이로 나타났는데, 상악 측절치에서 가장 높게 나타났고, 제1소구치, 제2소구치, 견치, 중절치, 제1대구치의 순으로 높게 나타났다(p<0.01).

2. 상악 6전치에서는 간접인상법으로 제작된 splint 적용군이 직접인상법으로 제작된 splint 적용군에 비해 높은 측정치를 나타내었으나(p<0.01), 소구치 및 대구치에서는 측정치에 있어서 차이를 나타내지 않았다(p>0.05).

3. 생활치아에서는 실험치아에 비해 현저히 높은 측정치를 나타내었고(p<0.01), 측정선의 양상은 심장 박동과 일치하는 파동성 및 울동성을 나타내었다.

참 고 문 헌

- Weine, F. S. Endodontic therapy, 5th ed., (1996) pp84-85.
- Chambers I G. The role and methods of pulp testing in oral diagnosis' a review Int Endo J., 15:1-15, 1982.
- Cohen, S. and Burns, R. C. Pathways of the pulp, 7th ed., (1998) pp13-14.
- Fuss, Z., Trowbridge, H., Bender, I B., Rickoff, B., and Sorin, S.: Assessment of reliability of electrical and thermal pulp testing agents, J. Endodont., 12:302-304, 1986.
- Gazelius, B., Orgart, L., Edwall, B. and Edwall, L.: Non-invasive recording of blood flow in human dental pulp, Endod Dent., Traumatol., 2:219-221, 1986.
- Tenland, T.: On laser Doppler flowmetry. Methods and microvascular applications. Linkoping Univ., Linkoping (1982)pp.42-44.
- Ingolfsson, E. R., Tronstad, L. and Riva, C. E. Reliability of laser Doppler flowmetry in testing vitality of human teeth, Endod. Dent. Traumatol., 10:185-187, 1994
- Ingolfsson, E. R., Tronstad, L., Hersh, E. V. and Riva, C. E.: Efficacy of laser Doppler flowmetry in determining pulp vitality of human teeth, Endod. Dent. Traumatol., 10:83-87, 1994.
- Olgart, L., Gazelius, B. and Lindh-Stromberg, U.: Laser Doppler flowmetry in assessing vitality in luxated permanent teeth, Int. Endod J., 21: 300-306, 1988
- Ramsay D S., Artun, J. and Bloomquist, D. Orthognathic surgery and pulpal blood flow, J oral maxillofac. Surg., 49:564-570, 1991.
- Watson, A. D. M., Pittford, T. R. and McDonald, F.: Blood flow changes in the dental pulp during limited exercise measured by laser Doppler flowmetry, Int. Endod. J., 25:82-87, 1992.
- 남동우. 미완성 치근을 가진 치아의 치수생활력 검사에서 Laser Doppler flowmeter의 신뢰도, 경북대학교 치의학 석사학위 논문, 1-18, 1997.
- Sasano, T., Nakajima, I., Shoji, N., Kuriwada, S., Sanjo, D., Ogino, H. and Miyahara, T.: Possible application of transmitted laser light for the assessment of human pulpal vitality, Endod. Dent. Traumatol., 13:88-91, 1997.
- Gazelius, B., Olgart, L. and Edwall, B.: Restored vitality in luxated teeth assessed by laser Doppler flowmeter, Endod Dent. Traumatol., 4:265-268, 1988.
- Mesaros, S. V. and Trope, M.: Revascularization of traumatized teeth assessed by laser Doppler flowmetry case report, Endod. Dent. Traumatol., 13:24-30, 1997.
- Perimed: The art of microvascular perfusion measurements, User's manual, 1993
- Kim, S: Neurovascular interactions in the dental pulp in health and inflammation, J. Endodont., 16:48-53, 1990
- Mullaney, T. P., Howell, R. M. and Petrich, J. D.: Resistance of nerve fibers to pulpal necrosis, Oral Surg.,

- 30:690-693, 1970
- 19 Meyer, M W and Path, M G Blood flow in the dental pulp of dogs determined by hydrogen polarography and radioactive microsphere methods, *Archs oral Biol*, 24 601-605, 1979
 - 20 Pohto, M and Schemin, A J Microscopic observation on living dental pulp. I Method for intravital study of circulation in rat incisor pulp *Acta Odont Scand* 16 303-314, 1958
 - 21 Kim, S, Lipowsky, H H, Usami, S, and Chien, S Arteriovenous distribution of hemodynamic parameters in the rat dental pulp, *Microvascular Research*, 27 28-38, 1984
 - 22 Kim, S, Schuessler, G, and Chien, S Measurement of blood flow in the dental pulp of dogs with the ¹³³Xenon washout method, *Archs oral Biol*, 28 501-505, 1983
 - 23 Kim, S, Liu, M, Markowitz, K, Bilotto, G and Kim, J D Comparison of pulpal blood flow in dog canine teeth determined by the laser Doppler and the ¹³³Xenon washout methods, *Archs oral Biol*, 35 411-413, 1990
 - 24 Meyer, M W Methodologies for studying pulpal hemodynamics, *J. Endodont*, 6:466-472, 1980
 - 25 Nilsson, G E, Tenland, T and Oberg, P A Evaluation of a laser Doppler flowmeter for measurement of tissue blood flow, *IEEE Trans Biomed Eng*, BME-27, 579-604, 1980
 - 26 Sasano, T, Kurwada, S, Sanjo, D, Izumi, H, Tabata, T and Karita, K Acute response of periodontal ligament blood flow to external force application, *J Periodontal Res*, 27 301-304, 1992
 - 27 Laser Doppler probes, Periflux System, Instruction manual, Permed Co., Stockholm(1996) pp 3-7
 - 28 Ingolfsson, AE R, Thonstad, L, Hersh, E. V and Riva, C E Effect of probe design on the suitability of laser Doppler flowmetry in vitality testing on human teeth, *Endod Dent Traumatol*, 9: 65-70, 1993
 - 29 Odor, T M, Pittford, T. R and McDonald, F Effect of wavelength and bandwidth on the clinical reliability of laser Doppler recordings, *Endod Dent Traumatol*, 12 9-15, 1996
 - 30 Tonder, K H and Ness, G Nervous control of blood flow in the dental pulp in dogs, *Acta Physiol. Scand* 104 13-23, 1978
 - 31 Wannfors, K and Gazelius, B Blood flow in jaw affected by chronic osteomyelitis *British J of oral maxillofacial Surg*, 29 147-153, 1991
 - 32 Olgar, L M Laser Doppler flowmetry in vitality testing of teeth, *Realties Cliniques*, 5 283-291, 1994
 - 33 Wilder-Smith, P E E B A new method for the non-invasive measurement of pulpal blood flow *Int Endodontic J*, 21 307-312, 1988
 - 34 Kim, S K, Ang, L, Hsu, Y Y, Dotscher-Kim, J and Kim, S Antagonistic effect of D-myo-inositol-1,2,6-trisphosphate (PP56) on neuropeptide-Y induced vasoconstriction in the feline dental pulp, *Archives of Oral Biology*, 41 797-798, 1996
 - 35 김강교 교양이 치수에서 교감신경에 의한 미세순환조절에 관한 기능적 연구, *대한치과보존학회지* 21 375-384, 1996
 - 36 Arde son, K K, Vanarsdall, R L and Kim, S Measurement of pulpal blood flow in humans using laser Doppler flowmetry a technique allowing stability and repeatability of pulpal blood flow measurement during surgical manipulations, *Int J Adult Orthod Orthognath Surg*, 10 247-254, 1995
 - 37 Hartmann, A, Azerad, J and Boucher, Y Environmental effects on laser Doppler pulpal blood-flow measurements in man, *Archs oral Biol*, 41 333-339, 1996
 - 38 Vongsavan, N and Matthews, B Experiments in pigs on the sources of laser Doppler blood-flow signals recorded from teeth *Archs oral Biol*, 41 97-103, 1996
 - 39 Ramsay, D S., Artun, J and Martinen, S S Reliability of pulpal blood-flow measurements utilizing laser Doppler flowmetry, *J Dent Res*, 70 1427-1430, 1991
 - 40 Kim, S, Edwall, L, Trowbridge, H and Chien, S Effect of local anesthetics on pulpal blood flow in dogs *J Dent Res*, 63(5) 650-652, 1984
 - 41 Chang, H S, Pitt Ford, T. R and McDonald, F Effects of articaine local anesthetic solutions on pulpal blood flow in maxillary canines, *Endod Dent Traumatol* 12 89-95, 1996
 - 42 Mavropoulos, A., Endal, M., Aaris, H and Brown, P Effects of mandibular nerve block on heat- or cold-induced changes in pulpal flow in man, *Endod Dent Traumatol*, 11 284-287, 1995
 - 43 Matthews, B and Vongsavan, N Advantages and limitations of laser Doppler flow meters, *Int Endod J*, 25 9-10, 1993