

## 미세 물 흐름 측정장치의 개발과 상아세관액의 수력학에의 응용

이인복\* · 김민호 · 김선영 · 장주혜 · 조병훈 · 손호현 · 백승호

치과보존학교실, 서울대학교 치의학대학원

### ABSTRACT

#### DEVELOPMENT OF NANO-FLUID MOVEMENT MEASURING DEVICE AND ITS APPLICATION TO HYDRODYNAMIC ANALYSIS OF DENTINAL FLUID

In-Bog Lee\*, Min-Ho Kim, Sun-Young Kim, Juhea Chang,

Byung-Hoon Cho, Ho-Hyun Son, Seung-Ho Back

*Department of Conservative Dentistry, School of Dentistry, Seoul National University*

This study was aimed to develop an instrument for real-time measurement of fluid conductance and to investigate the hydrodynamics of dentinal fluid. The instrument consisted of three parts: (1) a glass capillary and a photo sensor for detection of fluid movement, (2) a servo-motor, a lead screw and a ball nut for tracking of fluid movement, (3) a rotary encoder and software for data processing.

To observe the blocking effect of dentinal fluid movement, oxalate gel and self-etch adhesive agent were used. BisBlock (Bisco) and Clearfil SE Bond (Kuraray) were applied to the occlusal dentin surface of extracted human teeth. Using this new device, the fluid movement was measured and compared between before and after each agent was applied.

The instrument was able to measure dentinal fluid movement with a high resolution (0.196 nL) and the flow occurred with a rate of 0.84 to 15.2 nL/s before treatment. After BisBlock or Clearfil SE Bond was used, the fluid movement was decreased by 39.8 to 89.6%. [*J Kor Acad Cons Dent* 33(2):141-147, 2008]

**Key words** : Dentinal tubule, Water conductance, Dentin hypersensitivity, Oxalate, Self etching adhesive, Hydrodynamics

- Received 2008.2.5., revised 2008.3.3., accepted 2008.3.8.-

### I. 서 론

상아질은 법랑질과 비교하여 유기질과 수분 함량이 각각 30% 와 25% 정도로 매우 높다. 상아질에는 미세한 상아세

관이 분포하고 있고 그 안에는 치수로부터 유래한 조상아세 포 돌기와 상아세관액으로 가득 차 있는 상아질-치수 복합체를 형성하고 있다<sup>1-5)</sup>. Hydrodynamic theory<sup>3-6)</sup>에 의하면 와동형성과 같은 기계적 자극이나, 강한 바람, 수복물의 충전, 또는 외부로 노출된 상아질에 접촉한 고농도의 액체는 상아세관액의 이동을 유발하고 이로 인하여 치수-상아질 경계면에 존재하는 신경말단의 수용기를 자극 해 치아과민증이 유발된다고 알려져 있다<sup>1-6)</sup>.

와동형성이나 충전과 같은 수복행위나 상아질과민증과 관련하여 상아세관액의 미세이동을 정량적으로 측정하려는 노력으로는, Brännstorm 등<sup>4,6,7,9)</sup> 이 최근에 모세관을 연결하

\* Corresponding Author: In-Bog Lee

Department of Conservative Dentistry,  
School of Dentistry, Seoul National University  
275-1 Yeongeon-Dong, Jongno-Gu, Seoul, 110-768, Korea  
Tel: 82-2-2072-3953 Fax: 82-2-2072-3859  
E-mail: inboglee@snu.ac.kr

여 상아질의 수분투과도를 측정하였고, 최근에는 발전된 전자-기계공학 서보기술을 이용하여 거의 실시간으로 상아질을 통한 수분이동을 측정할 수 있게 되었다. 이중 대표적인 장치는 Flodec (De Marco Engineering, Geneva, Switzerland)이란 측정장치로서 많은 연구자들이 이를 이용하여 상아질의 수분투과도<sup>10,11)</sup>, 치아과민증 치료제나 상아질접착제의 상아세관 밀폐효과<sup>12-15)</sup>, 복합레진 수복과정이 상아세관액의 이동에 미치는 영향<sup>16-18)</sup>, 근관충전재의 밀폐효과<sup>19)</sup> 등에 관해서 보고하였다.

현재 국내에서 상아세관액의 미세이동과 관련된 연구는 거의 이루어지지 않고 있으며, 연구를 진행하고자 하여도 고가의 외제 실험장비를 구입하기 위해 많은 비용이 소요되는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 상아세관액의 미세이동을 계측할 수 있는 장치를 새롭게 개발하였음을 보고하고, 많은 연구자들이 이를 이용할 수 있도록 그와 관련된 원천기술을 공개하고자 한다. 또한 그 응용에 관해 고찰하고자 상아질의 수분투과성을 측정하고 치아 과민증 치료제와 상아질접착제의 상아세관 밀폐효과를 새로 개발한 미세 흐름 측정장치를 통해 조사하였다.

## II. 실험재료 및 방법

상아질의 물 투과도를 측정하기 위해 나노리터 수준의 측정해상도를 갖는 미세흐름 측정장치를 개발하였다. 본 장비를 이용, 교합면을 절단하여 노출된 상아질의 물 투과도와 치아과민증의 치료에 사용되는 약제의 상아세관 밀폐효과를 검증하였다.

### 1. 미세흐름 측정장치의 구조와 동작원리

본 연구에서 제작한 미세흐름 측정장치는 크게 세 부분으로 구성되어 있다. 첫째, 물의 흐름을 감지하는 모세관과 광

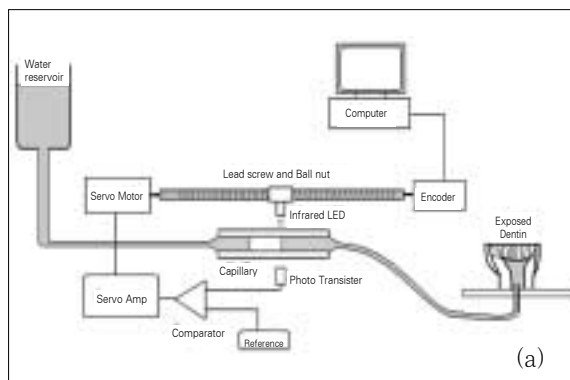
센서부, 둘째 물의 흐름을 추적하는 서보모터 (servomotor)와 구동부, 셋째, 모터의 회전을 측정하여 물의 이동량으로 변환하는 엔코더 (encoder)와 컴퓨터 기록 장치 (Figure 1-a).

#### 1) 물의 흐름을 감지하는 모세관과 광 센서부

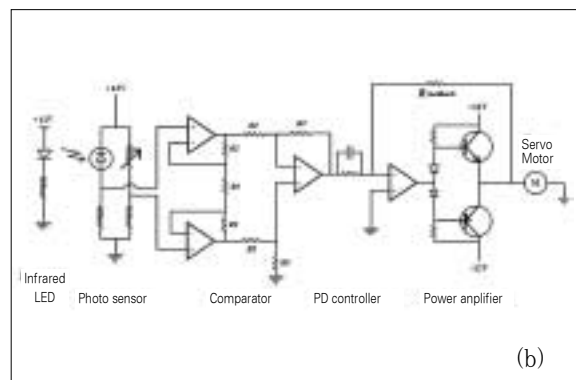
물 저장고와 치아에 연결된 플라스틱 튜브의 중간에 내경 0.5 mm의 유리 모세관이 연결되어 있다. 물이 채워진 유리 모세관 안에는 공기방울이 하나 들어가 있다. 물의 흐름이 있는 경우 공기방울도 동시에 이동하게 되고 이 공기방울의 움직임은 모세관에 근접하고 있는 광센서에 의해 감지된다. 광 센서는 적외선 발광 다이오드 (LED)와 광 트랜지스터 (photo transistor)로 구성되어 있다. 물과 공기의 광 투과도가 다르므로 공기방울의 위치에 따른 전압이 광트랜지스터에서 출력된다. 이 출력전압은 연산증폭기 (LM17741, National semiconductor, U.S.A)로 구성된 비교기에 입력되어, 공기 방울과 물의 계면에서의 광센서 출력과 동일하게 미리 고정해 놓은 전압과 비교된다. 두 전압의 차이에 비례하는 전압이 비교기에서 출력된다.

#### 2) 물의 흐름을 추적하는 서보모터와 구동부

비교기에서 출력된 전압은 두 개의 push-pull npn/pnp 트랜지스터로 구성된 서보앰프에 입력되어 충분한 전력증폭을 한 후 모터에 공급된다 (Figure 1-b). 모터는 연결된 이송나사 (lead ball screw)를 회전시키고, 이송나사에 연결된 너트 (nut)를 좌우로 움직인다. 너트에는 적외선 발광 다이오드와 광센서가 고정되어 있어 모터의 회전방향은 항상 발광다이오드와 광센서가 공기방울과 물의 계면 사이에 위치되도록 동작한다. 이러한 부채환동작 (negative feedback mechanism)이 연속적으로 이루어져 물의 흐름에 따른 공기방울의 움직임을 실시간으로 정확히 추적할 수 있다.



**Figure 1-a.** Schematic diagram of the nano-flow measurement device.



**Figure 1-b.** Circuit diagram of photo sensor and servo amplifier.

3) 이송나사의 회전을 물의 이동량으로 변환하는 엔코더와 컴퓨터 기록장치

모터에 연결된 이송나사의 회전은 증분-회전형 엔코더(E40S-1000-3-2, Autonics, Yangsan, Korea)로 측정된다. 이 엔코더는 1 회전당 1000 개의 펄스를 출력하며 펄스의 개수는 데이터 획득장치(PCI 6016, National instrument, Mopac Expwy, Austin, Tx, U.S.A) 내의 계수기에 의해 계수되어 컴퓨터에 저장된다.

사용된 나사산의 1 회전당 이송거리가 1 mm/회전이고 엔코더의 해상도가 1000 펄스/회전 이므로, 본 장치의 해상도는  $1 \text{ mm} / 1000 \text{ 펄스} = 1 \mu\text{m}$  가 된다. 모세관의 지름이 0.5 mm 이므로 최소 측정 가능한 물의 흐름량은  $(0.25 \text{ mm} * 0.25 \text{ mm} * \pi) * 1 \mu\text{m} = 0.196 \text{ nL}$  가 된다.

## 2. 상아질의 물 투과성의 측정과 상아질과민증 치료제의 상아세관 밀폐효과 검증

발치 후 1 주일 이내인 4 개의 소구치와 4 개의 대구치의 교합면을 다이아몬드 버를 이용해 중심구 부위의 법랑-상아질 경계부 하방까지 삭제하여 상아질 면을 노출 시킨 후 500, 1000 번의 사포로 주수하에 연마하였다. 치근은 치관-치근 경계부 하방 3 mm 에서 수평 절단 후 동일한 방법으로 연마하였다. 절단된 치근면을 15 초 동안 32% 인산(Uni-Etch, Bisco, Inc., Schaumburg, IL, U.S.A)으로 산 부식 후, 상아질접착제(Adper single bond 2, 3M ESPE, St. Paul Mn, U.S.A)를 도포하여 Figure 1-a와 같이 sandblasting 된 플라스틱 slide에 유동성복합레진(Denflow, Vericom, Anyang, Korea)를 이용하여 접착하였다. 접착 전 치수 강에는 지름 0.9 mm 의 금속관을 삽입 고정하여 물을 공급하는 플라스틱 튜브를 연결할 수 있도록

하였다. 삭제 후 연마된 교합면의 상아질 표면에 덮여있는 도말층을 제거하기 위해 32% 인산으로 15 초 동안 산부식 후 수세하여 상아세관이 노출되도록 한 후, 40 cm의 정수압으로 인산염완충식염수(phosphate buffered saline)를 치근에 연결된 금속관을 통하여 치수강에 공급하였다.

물 저장고로부터의 플라스틱 튜브를 연결하기 전, 공기방울을 하나 튜브에 함입시킨 후 측정장치의 유리모세관의 중앙에 위치시켰다. 모세관의 출구 쪽 플라스틱 튜브를 치근 쪽 금속관에 연결 한 후 측정을 시작하였다. 총 5 분 동안 1 data point/s 의 비율로 상아질을 통한 물의 흐름을 실시간으로 기록하였다.

상아세관을 밀폐시키는 기전으로 상아질과민증 치료제로 시판되고 있는 제재인 BisBlock (Bisco, Inc., Schaumburg, IL, U.S.A)과 복합레진 수복 시 사용되는 자가부식형 접착제인 Clearfil SE Bond (Kuraray Medical Inc, Okayama, Japan)의 상아세관 밀폐효과를 검증하기 위해, 위에서 사용한 시편의 노출 상아질을 가볍게 건조(blot dry)시킨 후 제조자의 지시에 따라 노출된 상아질 표면에 각각 적용 후, 상아세관액의 흐름을 5 분 동안 측정하였다.

두 재료에 대하여 각각 4 개씩의 치아(2 개의 소구치와 2 개의 대구치)를 사용하였다. 각 재료를 노출된 상아질 표면에 적용하기 전과 후의 상아세관액의 흐름과 초당 흐름을 비교하였다.

## Ⅲ. 결 과

삭제 후 도말층을 제거한 후와 Bisblock 또는 Clearfil SE bond로 표면 처리한 후의 상아질을 통한 물의 흐름은 Figure 2 및 Table 1과 같다. 표면 처리 전 노출된 상아질

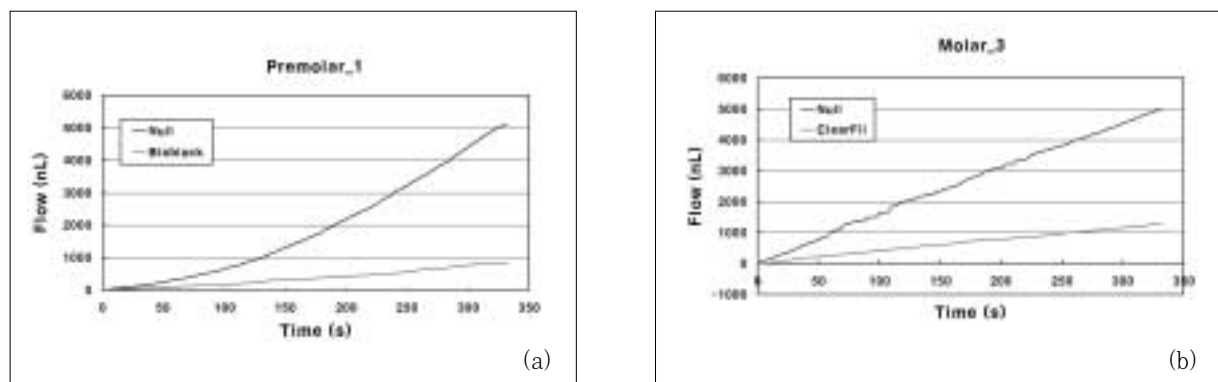


Figure 2. Representative curves of dentinal fluid flow before and after application of BisBlock (a) or Clearfil SE bond (b).

**Table 1.** Water flow (nL) during 300 s and mean flow rate (nL/s) through dentin before and after application of BisBlock or Clearfil SE bond on the exposed dentin surface

Tooth	Treatment						
	Null		Bisblock		Clearfil SE Bond		Decrease %
	Flow (nL)	Flow Rate (nL/s)	Flow (nL)	Flow Rate (nL/s)	Flow (nL)	Flow Rate (nL/s)	
Premolar_1	4429	14.8	769	2.56			82.6
Premolar_2	251	0.84	26	0.09			89.6
Molar_1	394	1.31	45	0.15			88.6
Molar_2	3019	10.06	1817	6.06			39.8
Premolar_3	797	2.66			94	0.31	88.2
Premolar_4	272	0.91			121	0.40	55.5
Molar_3	4562	15.2			1155	3.85	74.7
Molar_4	2307	7.69			580	1.93	74.9

의 물 투과율은 0.84 - 15.2 nL/s를 보였다. Bisblock 처리 후 39.8 - 89.6%의 투과율 감소를 보였으며 Clearfil SE bond의 경우는 55.5 - 88.2%의 투과율 감소를 나타냈다.

#### IV. 총괄 및 고찰

본 연구에서 제작한 미세 흐름 측정장치는 광센서 기술, 서보모터 및 부궤환을 이용한 정밀 이송제어 기술, 디지털 측정기술 등, 전자 및 정밀 기계공학을 생체조직의 유체역학적 계측연구에 응용한 예라 할 수 있다. 과거에는 단순히 모세관을 치근침부에 연결하여 시계와 자로서 상아세관을 통한 물의 이동을 측정하거나 현미경으로 모세관 내의 물에 함유되어 있는 불투명 입자 등을 관찰하였다<sup>4,6-9)</sup>. 이와 비교하여 본 연구에서 제작한 측정장치는 실시간으로, 노출된 상아질 표면에 대한 조작이 상아세관액의 이동에 미치는 영향을 물의 총 흐름량과 더불어 초당 흐름율을 0.2 나노 리터 (nL) 수준의 분해능으로 평가할 수 있었다. 이는 기존의 연구자들이 사용한 Flodec의 분해능 2.8 nL 보다 14 배나 우수하다.

본 장치를 개발하는 과정에서 어려웠던 점은 광센서에서 나오는 전압신호를 증폭한 후 서보모터에 공급해 불나사와 너트를 움직여 광센서가 항상 공기방울과 물의 경계면을 추종할 수 있도록 서보앰프의 적절한 증폭률을 결정하는데 있었다. 증폭률이 과도할 경우 진동이 유발되어 매끄러운 측정신호를 얻기 어려웠고 낮은 경우 빠른 응답성을 얻기 어려웠다. 결국 여러 번의 시행 착오를 거쳐 적절한 증폭률을 얻을 수 있었다. 또한 서보모터로 일반 brush DC 모터를 사용해 동작 시 약간의 소음과 진동이 유발되었으나 이는

고품질의 brushless DC 모터로 교체하면 해결될 것으로 사료된다.

본 실험의 결과 상아질은 상당량의 물에 대한 투과성을 지니는 것을 알 수 있었다. 상아세관을 통해 물이 외부로 누출되는 동력원은 크게 두 가지로 설명될 수 있다. 첫째, 상아세관의 모세관 작용에 의한 흡인력과 표면에서의 증발작용이다. 내경의 지름이  $r$ 인 모세관의 흡인력에 의한 물의 상승 높이는  $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$  ( $h$ : 모세관에 의한 물의 상승 (m),  $g$ : 중력가속도 ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ),  $\rho$ : 물의 밀도 ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ),  $\sigma$ : 물의 표면장력 ( $0.07 \text{ N/m}$ )) 로 주어지며 상아세관과 같이 1 - 5  $\mu\text{m}$ 의 매우 작은 지름의 모세관은 약 7 m (평균지름 2  $\mu\text{m}$ 로 볼 경우) 높이의 물기둥을 만들 수 있을 정도로 흡인력이 크며 노출된 상아질 표면에서의 증발은 이를 더욱 촉진한다<sup>3,20)</sup>. 둘째, 치수의 정수압은 30 mmHg 정도가 되는 것으로 알려져 있다<sup>3,5,7,16)</sup>. 본 연구에서는 이를 재현하기 위해 물 저장고를 40 cm의 높이에 매달아 정수압을 치아에 적용하였다.

본 연구에서 측정된 노출 상아질의 물 투과도는 치아에 따라 0.84 - 15.2 nL로 차이가 매우 컸다. 그 이유는 치아 간 크기에 따른 노출 상아질의 표면적 차이 외에도 치아의 연령이나 우식에 의한 이차 상아질 형성에 따른 석회화 정도의 차이, 절단면의 높이에 따른 상아세관의 지름과 밀집도의 차이로 인해 상아질의 물에 대한 투과도가 크게 변하기 때문이다<sup>1,5,14)</sup>. Poiseuille 법칙 ( $\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\pi R^4}{8\eta l} P$ ,  $\Delta V$ : flow volume,  $R$ : 관의 지름,  $\eta$ : 유체의 점도,  $l$ : 관의 길이,  $P$ : 유체에 작용하는 압력)에 의하면 관을 통한 물의 이동은 동일한 정수압을 가했을 경우 관의 지름의 4 제곱에 비례한다<sup>20)</sup>. 결국 상아세관을 통한 물의 이동은 관의 직경이 작아질수록 모세관 현상에 의한 흡인력은 커지나, 물의 흐름에 대

한 저항성 또한 증가하여 두 요인 사이의 균형을 이루는 점에서 물의 투과율이 결정된다 볼 수 있다. 실험 시편 준비 단계에서 일정한 두께로 교합면의 법랑질과 상아질을 삭제하려 노력하였으나 치수각의 높이가 치아마다 매우 달라, 때로는 치수각 부위에서 치수강이 노출되어 실험이 불가능한 경우도 있어 균일한 두께의 잔존 상아질을 얻는 것이 매우 어려웠다. 따라서 차기 연구에서는 치수강의 외형에 따라 일정하게 상아질 면을 노출시키는 방법을 시도해 볼 필요성이 있을 것으로 사료된다.

한편 관을 통한 유체의 이동 속도는 위의 식에서와 같이 유체의 점성에 반비례한다. 본 연구에서는 치수액을 대체하기 위해 인산염완충식염수를 사용하였다.

치아민감증의 치료에 사용되는 Oxalate 제제나 상아질접착제는 상아세관을 통한 물의 이동을 효과적으로 제한할 수 있음이 실험적으로 입증되었다. Kolker 등<sup>15)</sup>은 BisBlock과 같은 Oxalate 제제는 상아질에 도포 시 상아세관에 Ca-Oxalate 결정을 형성하여 상아세관 입구를 봉쇄한다고 보고하였다. 상아질접착제의 경우 부식된 상아질면에 레진-콜라겐 혼성층과 레진 태그를 형성해 상아세관액의 이동을 제한하는 것으로 알려져 있다<sup>7,12,15)</sup>. 상아세관액의 이동이 크게 줄어든 것은 hydrodynamic theory<sup>3-6)</sup>에 의거했을 때 이들 제제의 적용이 치아 과민증을 크게 줄여 줄 수 있음을 의미한다.

본 연구에서 자가부식형 프라이머와 본드로 구성된 Clearfil SE bond를 사용한 이유는 산부식과 접착과정이 분리되어 이루어지는 total etching 접착시스템과 비교했을 때 self etching 시스템의 경우 산부식과 접착과정이 동시에 일어나 상아세관 밀폐효과가 좋아 치아과민증을 덜 유발한다고 알려져 있기 때문이다. 상아질접착제를 적용한 후에 상아질의 수분투과도가 55.5 - 88.2% 감소하긴 하였으나 상아세관액의 이동을 100% 완전히 차단한 것은 아니다. 이는 상아질 표면에 적용된 접착제를 통하여 상아세관으로부터 지속적인 수분의 누출이 일어난다는 Breschi 등<sup>21)</sup>과 Tay와 Pashley<sup>22)</sup>의 연구결과와 일치한다.

대부분의 치아과민증 치료제의 효과에 대한 연구는 환자에 대한 설문 조사를 통해 이루어지는 바, 이 경우 환자의 주관적 감각에 의존하게 되어 결과의 신뢰도에 문제가 있을 수 있다. 이에 본 실험장치를 이용해 얻어지는 객관적인 자료는 새로운 치아과민증 치료제나 치료방법의 효능에 대한 검증에 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

본 장치는 상아질의 물 투과성, 치아과민증의 기전에 대한 연구 및 과민증 치료제의 효과를 검증하는 것 외에도, 수복 과정에 따른 상아세관액의 이동, 수복재의 밀폐효과, 근관 충전재 또는 역충전재의 종류와 방법에 따른 근관 밀폐효과 연구에 유용한 방법을 제공할 것으로 기대된다. 또한 복합레진의 중합수축을 측정하기 위해 사용되는 water

dilatometer의 수위변화를 실시간으로 정밀하게 측정할 수 있는 센서로도 사용할 수 있을 것으로 그 응용 분야는 매우 넓다 하겠다.

## V. 결 론

1. 본 연구에서는 나노리터 수준의 물 흐름을 측정할 수 있는 장치를 제작하였고, 이를 이용하여 상아질의 물 투과도를 측정할 수 있었다.
2. 노출 연마된 상아질은 0.84 - 15.2 nL/s 의 물 투과도를 보였고 Oxalate 제제인 BisBlock이나 자가부식형 접착제인 Clearfil SE bond 적용 시 투과도가 39.8 - 89.6% 감소하였다.

## 참고문헌

1. Roberson TM, Heymann HO, Swift EJ. Art and science of operative dentistry. 4<sup>th</sup> ed. 14-62, Mosby, 2002.
2. Summitt JB, Robbins JW, Schwartz RS. Fundamentals of operative dentistry. 2nd ed. 8-22, Quintessence publishing co, Inc. 2001.
3. M Brännström. Dentin and pulp in restorative dentistry. Wolfe medical, 1981.
4. Hirata K, Nakashima M, Sekine I, Mukouyama Y, Kimura K. Dentinal fluid movement associated with loading of restorations. *J Dent Res* 70:975-978, 1991.
5. Orchardson R, Cadden SW. An update on the physiology of the dentin-pulp complex. *Dent Update* 28:200-209, 2001.
6. Brannstorm M, Linden L, Johnson G. Movement of dentinal and pulpal fluid caused by clinical procedures. *J Dent Res* 5:679-682, 1968.
7. Pashley DH, Derkson GD, Tao L, Kalathoor S. The effect of a multi-step dentin bonding system on dentin permeability. *Dent Mater* 4:60-63, 1988.
8. Sauro S, Pashley DH, Montanari, Chersoni S, Carvalho RM, Toledano M, Osorio R, Tay FR, Prati C. Effect of simulated pulpal pressure on dentin permeability and adhesion of self-etch adhesives. *Dent Mater* 23:705-713, 2007.
9. Paphangkorakit J, Osborn JW. The effect of normal occlusal forces on fluid movement through human dentin *in vitro*. *Arch Oral Biol* 45:1033-1041, 2000.
10. De La Macorra JC, Escibano NI. Comparison of two methods to measure permeability of dentin. *J Biomed Mater Res* 63:531-534, 2002.
11. Ozok AR, Wu MK, ten Cate JM, Wesslink PR. Effect of dentinal fluid composition on dentin demineralization *in vitro*. *J Dent Res* 83:849-853, 2004.
12. Gregoire G, Joniot S, Guignes P, Millas A. Dentin permeability: self etching and one bottle dentin systems. *J Prosthet Dent* 90:42-9, 2003.
13. Pashley DH, Matthews WG, Zhang Y, Johnson M. Fluid shifts across human dentin *in vitro* in response to hydrodynamic stimuli. *Arch Oral Biol* 41:1065-1072, 1996.
14. Ciucchi B, Bouillaguet S, Holz J, Pashley D. Dentinal fluid dynamics in human teeth, *In vivo*. *J Endod*

- 21:191-193, 1995.
15. Kolker JL, Vargas MA, Armstrong SR, Dawson DV. Effect of desensitizing agents on dentin permeability and dentin tubule occlusion. *J Adhes Dent* 4:211-221, 2002.
16. Ratih DN, Palamara JEA, Messer HH. Dentinal fluid flow and cuspal displacement in response to resin composite restorative procedures. *Dent Mater* 23:1405-1411, 2007.
17. Ratih DN, Palamara JEA, Messer HH. Temperature change, dentinal fluid flow and cuspal displacement during resin composite restoration. *J Oral Rehab* 34:693-701, 2007.
18. Ciucchi B, Bouillaguet S, Delaloye M and Holz J. Volume of the internal gap formed under composite restorations *in vitro*. *J Dent* 25:305-312, 1997.
19. Martin RL, Monticelli F, Brackett WW, Loushine RJ, Rockman RA, Ferrari M, Pashley DH, Tay FR. Sealing properties of mineral trioxide aggregate orthograde apical plugs and root fillings in an *in vitro* apexification model. *J Endod* 33:272-275, 2007.
20. Beneson W, Harris JW, Stocken H, Lutz H. Handbook of physics. P 153-210, springer, 2006.
21. Breschi L, Mazzoni A, Ruggeri A, Cadenaro M, Linarda RD, Dorigo EDS. Dental adhesion review: Aging and stability of bonded interface. *Dent Mater* 24:90-101, 2008.
22. Tay FR, Pashley DH. Water treeing-a potential mechanism for degradation of dentin adhesives. *Am J Dent* 16:6-12, 2003.

## 국문초록

### 미세 물 흐름 측정장치의 개발과 상아세관액의 수력학에의 응용

이인복\* · 김민호 · 김선영 · 장주혜 · 조병훈 · 손호현 · 백승호

치과보존학교실, 서울대학교 치의학대학원

본 연구의 목적은 나노리터 수준의 물 흐름을 계측할 수 있는 장치를 개발하고, 상아질의 물 투과성을 측정하여 치아 과민증 치료제와 상아질 접착제의 상아세관 밀폐효과를 알아보고자 하였다. 본 연구에서 제작한 미세흐름 측정장치는 첫째, 물의 흐름을 감지하는 모세관과 광 센서부, 둘째 물의 흐름을 추적하는 서보모터와 구동부, 셋째, 모터의 회전을 측정하여 물의 이동량으로 변환하는 엔코더와 컴퓨터 기록장치 등 세 부분으로 구성되어 있다. 본 장비를 이용하여 교합 면이 절단되어 노출된 상아질의 물 투과도와 치아과민증 치료제인 BisBlock과 자가부식형 상아질접착제인 Clearfil SE bond의 상아질 밀폐효과를 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 나노리터 수준의 물 흐름을 측정할 수 있는 장치를 제작하였고, 이를 이용하여 상아질의 물 투과도를 측정할 수 있었다.
2. 삭제 후 노출 연마된 상아질은 0.84 - 15.2 nL/s의 물 투과도를 보였고 Oxalate 제제인 BisBlock 이나 자가부식형 접착제 Clearfil SE bond 적용 시 투과도가 39.8 - 89.6% 감소하였다.

**주요어:** 상아세관, 물 투과도, 치아과민증, Oxalate, 자가부식형 상아질접착제, 수력학