

아말감과 복합레진의 수복 과정과 수복 후 발생하는 상아세관액 흐름의 실시간 측정

김선영¹ · 조병훈¹ · 백승호¹ · 임범준² · 이인복^{1*}서울대학교 치의학대학원, ¹치과보존학교실, ²치과생체재료학교실

ABSTRACT

REAL-TIME MEASUREMENT OF DENTINAL TUBULAR FLUID FLOW DURING AND AFTER AMALGAM AND COMPOSITE RESTORATIONS

Sun-Young Kim¹, Byeong-Hoon Cho¹, Seung-Ho Baek¹, Bum-Sun Lim², In-Bog Lee^{1*}¹Department of Conservative Dentistry, ²Department of Dental Biomaterials, School of Dentistry, Seoul National University

The aim of this study was to measure the dentinal tubular fluid flow (DFF) during and after amalgam and composite restorations. A newly designed fluid flow measurement instrument was made. A third molar cut at 3 mm apical from the CEJ was connected to the flow measuring device under a hydrostatic pressure of 15 cmH₂O. Class I cavity was prepared and restored with either amalgam (Copalite varnish and Bestaloy) or composite (Z-250 with ScotchBond MultiPurpose: MP, Single Bond 2: SB, Clearfil SE Bond: CE and Easy Bond: EB as bonding systems). The DFF was measured from the intact tooth state through restoration procedures to 30 minutes after restoration, and re-measured at 3 and 7 days after restoration.

Inward fluid flow (IF) during cavity preparation was followed by outward flow (OF) after preparation. In amalgam restoration, the OF changed to IF during amalgam filling and slight OF followed after finishing.

In composite restoration, application CE and EB showed a continuous OF and air-dry increased rapidly the OF until light-curing, whereas in MP and SB, rinse and dry caused IF and OF, respectively. Application of hydrophobic bonding resin in MP and CE caused a decrease in flow rate or even slight IF. Light-curing of adhesive and composite showed an abrupt IF. There was no statistically significant difference in the reduction of DFF among the materials at 30 min, 3 and 7 days after restoration ($P > 0.05$). [J Kor Acad Cons Dent 34(5):467-476, 2009]

Key words: Dentinal tubular fluid flow, Amalgam, Composite, Bonding system

-Received 2009.6.29., revised 2009.8.31., accepted 2009.9.1.-

I. 서 론

치아과민증 (dentin hypersensitivity)은 온도 자극, 화

학적 자극, 기계적 자극 등에 대해 지속 시간이 짧고 예리한 통증을 일으키는 특징이 있다¹⁾. 치아과민증은 치주 질환으로 인한 치근 노출, 비우식성 치경부 병소, 치아 파절 증후군 등과 같이 순수하게 병적으로 오는 경우도 있고, 다른 한편으로 전에는 과민증이 없었던 치아에서 경미한 치아우식증이나 무증상의 비우식성 치경부 질환 등을 복합레진으로 치료한 후에 저작할 때나 air, 냉온 자극에 민감하게 반응하게 되는 경우도 있다^{2,3)}. 아말감 수복의 경우에는 술 후 저작에 의한 과민증의 발생 빈도는 적은 대신에 수복 직후에 냉

*Corresponding Author: In-Bog Lee

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

275-1 Yeongseon-Dong, Jongno-Gu, Seoul, 110-768, Korea

Tel: 82-2-2072-3953 Fax: 82-2-2072-3859

E-mail: inboglee@snu.ac.kr

*이 논문은 서울대학교 치과병원 집중육성연구비 3-2008-0014의 지원에 의해 이루어졌음.

자극에 술후민감증이 약 25-50% 정도 나타난다고 보고되고 있다^{4,5)}. 이와 같이 직접 수복 후 발생하는 술후민감증은 환자에게 고통을 주고 술자를 당황하게 한다.

치아과민증을 설명하는 여러 이론 중에서 현재는 유체역학설 (hydrodynamic theory)이 가장 널리 인정되고 있다⁶⁾. 유체역학설은 상아세관에 가해진 자극이 상아세관액을 이동시킴으로 상아질이나 치수 감각신경의 기계적 수용기를 자극하여 통증을 야기한다는 것이다. 지금까지 여러 가지 자극에 대한 상아세관액의 흐름 양태에 대해서 많은 보고들이 있었다. 냉 자극이나 강한 바람은 상아세관액의 outward flow를, 온열 자극은 inward flow를 야기한다. 고장성 용액과 같은 삼투압이 작용할 경우는 outward flow를, 접촉 자극은 경미한 inward flow를 야기한다고 보고되고 있다. 교합압에 해당하는 기계적 부하를 가한 경우에는 inward flow가, 부하를 제거하면 반대로 outward flow가 일어난다⁷⁻¹⁰⁾.

아말감 수복은 와동 형성과 충전의 비교적 단순한 술식인 반면에, 복합레진 수복은 와동형성, 산 처리, 수세 및 건조, 접착제 적용과 광중합, 복합레진 충전과 광중합, 전동 기구를 이용한 마무리와 광택 등의 여러 단계를 거친다. 이런 일련의 수복 과정은 상아질에 열적, 기계적, 삼투압, 모세관 힘과 같은 유체역학적 자극으로 작용하여, 시간에 따라 더욱 복잡하게 상아세관액의 흐름을 변화시킬 것으로 보인다. 현재까지 아말감과 직접 복합레진 수복 과정에서 일어나는 연속적인 상아세관액의 유동 (dentinal fluid flow, DFF)을 보여준 연구는 많지 않으며, 특히 아말감과 복합레진 수복 과정에서의 상아세관액의 유동을 비교한 연구는 없었다. Hashimoto 등¹¹⁾은 처음으로 접착 과정 중에 일어나는 유체 유동을 연속적으로 관찰했으며, Ratih 등¹²⁾은 복합레진 수복 과정 중에 일어나는 상아세관액의 유동을 교두 굴곡과 함께 보여주었다. 그러나 이 연구들은 실제 와동이 아닌 상아질 원판을 이용하여 접착 과정만을 보여주었거나 와동의 형성 과정을 포함하지 않았으며 전 수복 과정의 상아세관액의 유동을 보여주지는 않았다.

최근의 상아세관액의 유동을 관찰하는 연구에서 Flodec system^{11,12)}을 대부분 사용했지만 그 결과들이 각 수복 과정에서 일어나는 상아세관액의 유동을 분명하게 보여주지는 못하였다. 본 연구에서는 정밀도가 더 높은 미세 유체 흐름 측정장치 (fluid flow measurement instrument)를 제작하여 임상적 상황과 유사하게 생리학적인 정수압을 적용한 상태에서 와동 형성을 포함한 아말감과 복합레진의 전 수복 과정과 수복 후에 일어나는 상아세관액의 흐름을 실시간으로 측정하였고 접착제의 종류에 따른 차이점을 비교하고자 하였다.

Ⅱ. 실험 재료 및 방법

1. 미세 유체 흐름 측정장치의 구조와 동작원리

본 연구에서 제작한 미세 유체 흐름 측정장치는 크게 세 부분으로 구성되어 있다. 첫째; 물의 흐름을 감지하는 모세관과 광 센싱부, 둘째; 물의 흐름을 추적하는 서보모터와 구동부, 셋째; 모터의 회전을 측정하여 물의 이동량으로 변환하는 엔코더와 컴퓨터 기록 장치이다.

1) 물의 흐름을 감지하는 모세관과 광 센싱부

물 저장고와 치아에 연결된 실리콘 튜브의 중간에 내경 0.5 mm의 유리 모세관이 연결되어 있다. 물이 채워진 유리 모세관 안에는 공기 방울이 하나 들어가 있다. 물의 흐름이 있는 경우 공기 방울도 동시에 이동하게 되고 이 공기 방울의 움직임은 모세관에 근접하고 있는 광센서에 의해 감지된다. 물과 공기의 광 투과도가 다르므로 공기 방울의 위치에 따른 전압이 광센서에서 출력된다. 이 출력 전압은 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 서보 모터와 구동부

비교기에서 출력된 전압은 서보 앰프에 입력되어 충분한 전력 증폭을 한 후 모터에 공급된다. 모터는 연결된 나사 (lead ball screw)를 회전시키고, 나사에 연결된 너트 (nut)를 좌우로 움직인다. 너트에는 광센서가 고정되어 있어 모터의 회전 방향은 항상 광센서가 공기 방울과 물의 계면 사이에 위치되도록 동작한다. 이러한 부채환 동작 (negative feedback mechanism)이 연속적으로 이루어져 물의 흐름에 따른 공기 방울의 움직임을 실시간으로 정확히 추적할 수 있다.

3) 모터의 회전을 물의 이동량으로 변환하는 엔코더와 컴퓨터 기록 장치.

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

사용된 나사 산의 1회전 당 이송거리가 1 mm/회전이고 엔코더의 해상도가 1000 펄스/회전 이므로, 본 장치의 해상도는 1 mm / 1000 펄스 = 1 μ m가 된다. 모세관의 지름이 0.5 mm 이므로 최소 측정 가능한 물의 흐름량은 (0.25

$\text{mm} \times 0.25 \text{ mm} \times \pi \times 1 \mu\text{m} = 0.196 \text{ nL}$ 가 된다.

2. 시편 제작

발치 후 3개월 이내의 치아우식증이 없는 제 3 대구치가 연구에 사용되었다. 본 연구는 서울대학교 치과병원의 IRB 승인을 취득하였다 (CRI09005). 발치 된 치아는 1% chloramine T 용액에 보관하였다. Low speed diamond saw (Isomet, Buehler, IL)를 이용하여 CEJ 하방 3 mm의 치근을 절제하였다. 치수강에 존재하는 치수는 3% NaOCl용액과 근관 치료용 파일을 이용하여 제거하였다.

10 mm×10 mm×2 mm의 plexiglass를 sandblasting한 후 중앙에 지름 0.9 mm의 구멍을 형성하였다. 구멍에 지름 0.9 mm의 금속 튜브를 삽입한 후 금속 튜브의 한쪽 끝이 치수강에 위치하도록 plexiglass를 치아의 절단면에 상아질 접착제 (Scotbond Multipurpose, 3M)와 flow-able 레진 (Denflow, Vericom, Korea)을 이용하여 접착하였다. 접착된 Plexiglass와 치아, 금속 튜브의 경계면에 nail varnish로 도포하였다. 노출된 금속 튜브의 끝 쪽 1/3을 제외하고 시편을 rubber mold에 위치한 후, epoxy resin을 이용하여 CEJ 상부 1 mm까지 매몰하였다.

만들어진 시편을 증류수에 보관하였으며, 실험 24시간 전부터 15 cm H₂O의 정수압을 미리 가하여 치수압과 비슷한 조건을 만들었다¹³⁾.

3. 와동 형성 및 수복 과정, 수복 후 상아세관액 흐름 (DFF)의 측정

위에서 제작한 치아 시편을 증류수가 흐르고 있는 실리콘

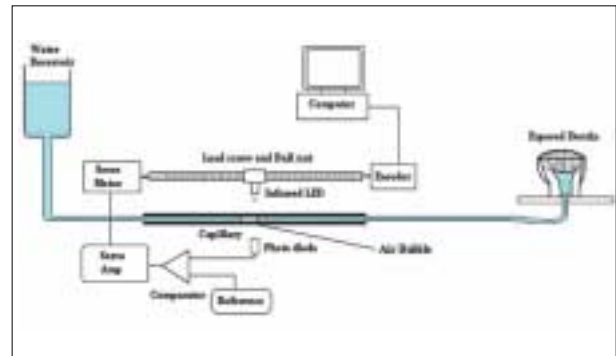


Figure 1. Schematic diagram of the dentinal tubular fluid flow measurement system.

튜브 (내경 0.81 mm)를 통해 미세 유체 흐름 측정장치에 연결하였다 (Figure 1). 생리적 치수압과 유사한 조건을 위해 실험 내내 15 cmH₂O의 정수압을 적용하였다. 모든 시편은 측정장치에 연결한 후 10분 동안 안정되는 시간을 가졌다. 유체 흐름의 측정은 와동 형성 전 10분 동안 발생한 상아세관액 흐름의 변동폭이 0~±5nL 임을 확인한 후 시작하였다.

치아의 교합면에 근원×협설 폭이 각각 5 mm×3 mm이며 깊이가 중심구로부터 2.0 mm인 1급 와동을 주수 하에 고속 핸드피스와 다이아몬드 버를 이용하여 형성하였다. 형성된 와동은 면구를 이용해 blot-dry한 후 약 10분간 공기 중에 방치하였다. 수복 전 5분 동안 일정하게 나타나는 flow의 변화를 경과 시간으로 나눈 평균 flow rate는 추후에 측정하는 dentinal fluid flow rate의 비교 기준인 baseline flow rate가 되었다. 형성된 와동은 각 군의 재료에 따라 제조사의 지시를 따라 수복되었다 (Table 1).

Table 1. The restorative materials and procedures for each group.

Restoration type	Group Code	Materials	Procedure
Amalgam	AM	Copalite (Cooley & Cooley), Bestaloy (Lathe-cut type, Dongmyung)	Copalite application, Amalgam filling
Resin composites	MP	ScotchBond MultiPurpose (3M ESPE), Z-250 (3M ESPE)	E, P, A, LC(10s), RF&LC(40s): incrementally by 2 layer
	SB	Single Bond 2 (3M ESPE), Z-250 (3M ESPE)	E, PA, LC(10s), RF&LC(40s): incrementally by 2 layer
	CE	Clearfil SE Bond (Kuraray), Z-250 (3M ESPE)	SE, A, LC(10s), RF&LC(40s): incrementally by 2 layer
	EB	Easy Bond (3M ESPE), Z-250 (3M ESPE)	SEA, LC(10s), RF&LC(40s): incrementally by 2 layer

Abbreviation: E, acid etching for 15 sec; P, Primer application; A, Adhesive application; PA, application of mixed agent with primer and adhesive; SE, self-etching primer application; SEA, application of self-etching adhesive; LC, light-curing; RF, resin composite filling.

상아세관액 유동의 측정은 흐름이 거의 없는 와동 형성 전부터 와동 형성 과정, 수복 과정, 수복 후 30분 동안 연속해서 실시간으로 이루어졌다. 모든 시편에 대해 와동 형성, 접착 과정, 수복 과정의 각 단계별로 시간을 기록하여 timetable을 만들었다. 이 timetable은 각 단계별로 대응되는 상아세관액의 흐름을 인지하는 데 이용되었다. 수복이 완료된 시편은 100% humidity에서 15 cm H₂O의 정수압을 계속 가한 상태로 보관 후 3일째, 7일째에 다시 측정장치에 연결하여 상아세관액의 유동을 측정하였다.

수복 후 3일과 7일째의 flow rate를 측정 시에는 시편을 측정장치에 연결하고 10분간 안정되는 시간을 가진 후 10분 동안 flow rate를 측정하였다. 수복 30분 후의 flow rate는 수복 30분 후부터 5분 동안 일어나는 평균 flow rate 값을 구하였으며, 수복 후 3일, 7일째는 10분 동안 발생한 평균 flow rate 값을 구하였다.

Flow rate의 변화는 baseline flow rate에 비추어서 수복 후 30분, 3일, 7일째에 생긴 flow rate의 감소량을 %로 표시하였다. 측정장치에 연결한 시편은 와동 형성에서 수복 후 30분까지의 시간을 제외하고는 모두 wet gauze를 이용해서 100% humidity의 조건을 유지하였다. 측정 시 실내 온도는 $24 \pm 0.5^\circ\text{C}$, 습도는 $30 \pm 5\%$ 였다. 각 군당 치아 시편의 수는 10개였다.

수복 방식과 측정 시간에 따른 flow rate에 차이가 있는지 여부의 검증은 SPSS 14.0을 이용해서 95% 신뢰구간에서 repeated measure ANOVA를 시행하였다.

III. 결 과

1. 아말감과 복합레진 수복 시 상아세관액의 유동의 전체적 조망

각 수복 방식에 따라 수복 과정 중 일어나는 상아세관액의 유동은 Figures 2-6과 같다. 대부분의 시편에서 주수를 동반한 와동 형성 시 inward로 fluid flow가 일어나는 것을 관찰할 수 있었다. 와동 형성이 끝나고 blot dry한 후에는 outward로 전환하는 것을 관찰할 수 있었다. 아말감 수복의 경우 와동 형성 후 outward였던 flow가 아말감 응축을 하면서 inward로 바뀌었으나 시간이 지나면서 작은 양의 outward의 flow를 보였다.

복합레진의 경우, 와동 형성 후 outward였던 flow가 접착 과정을 거친 후 3회의 광중합 (1회의 본딩제 광중합과 적층 충전을 위한 2회의 복합레진 광중합)을 시행하는 동안 급격히 inward로 바뀌었다. 마지막 광중합이 끝나고 나서는 바로 큰 outward의 flow로 보상이 일어난 후 일정 시간이 지나면 flow rate가 감소해서 작은 양의 outward flow를 보였다.

2. 접착 과정 중 발생하는 상아세관액 유동의 미시적 관찰

복합레진 수복 시 각 접착 시스템의 접착 과정 중에 나타나는 상아세관액의 유동을 보다 상세히 Figures 3(b)-6(b)에 나타냈다. Total-etch 방식의 접착인 MP와 SB의 경우, etching gel을 도포하자 outward 방향의 fluid flow가 약간 inward로 바뀌거나 flow rate가 감소하였다. 수세를 할 경우 inward flow가 발생했고 blot-dry를 시행하자 outward flow를 보였다. 또한 접착 과정 중 gentle air blasting에도 대개 급격하게 outward flow rate가 증가함을 보여주었다. MP의 경우에서 본딩제를 도포하자 flow rate가 감소하여 0에 가깝게 되거나 때로는 약간 inward의 flow가 일어나기도 했다.

Self-etch 방식의 CE와 EB의 경우를 보면, self-etching primer 또는 self-etching prime & adhesive를 도포했을 때 상아세관액의 flow의 방향이나 rate에 큰 변화를 보이지 않았다. 공기 건조 시 급격히 증가된 outward flow rate를 보였고, CE의 경우, 본딩제를 도포하자 outward flow rate가 감소하여 0에 가까워지거나 때로는 약간 inward의 flow를 보이기도 했다.

3. 수복 후 30분, 3일, 7일 경과 후 flow rate의 감소량

Table 2는 baseline과 비교하여 수복 후 30분, 3일, 7일 후에 flow rate의 감소량을 퍼센트로 보여준다. 수복 후 30분, 3일, 7일째의 flow rate 감소량에 있어서 각 군간에 통계적으로 유의한 차이는 보이지 않았다 ($P > 0.05$).

Table 2. Flow rate reduction (%) of each group at 30 minutes, 3 days, and 7days after restoration with respect to baseline (n=10).

Group	Reduction (s.d)		
	30 min	3days	7days
AM	97.1 (3.7)	95.8 (4.5)	97.4 (4.2)
MP	94.8 (4.4)	97.8 (3.3)	97.8 (2.8)
SB	96.8 (2.8)	97.8 (2.9)	97.4 (3.1)
CE	95.1 (4.1)	96.6 (6.6)	95.8 (5.1)
EB	94.6 (7.4)	94.8 (9.9)	88.7(16.2)

There was no statistically significant difference among groups for each measurement time. There was no statistically significant difference according to the measurement time for each material. s.d=standard deviation.

IV. 총괄 및 고찰

본 연구는 임상에서 일어나는 실제 상아세관액의 flow를 재현하기 위해서 생리적 치수압을 가한 상태에서 누수에 의한 상아세관액의 흐름을 허용하지 않는 폐쇄 환경 (closed system)을 구축하여 실험을 진행하였다. 본 연구는 이런 폐쇄 환경을 구축한 상태에서 와동 형성을 포함한 전 수복 과정 동안에 일어나는 상아세관액의 유동을 연속적으로 측정 한 최초의 연구이다. 기존의 연구들이 공기 분사나 냉온 자극 등의 큰 자극에 대한 단발적인 상아세관액의 유동을 보여준 반면, 본 연구에서는 수복 과정 중 와동 형성이나 충전과 같은 주요 자극들뿐만 아니라 수세 및 건조, 접착제 도포와 같은 중간 단계에서 일어나는 flow의 변화까지 세밀하게 관찰할 수 있었다. 더욱이 이번 연구는 아말감과 복합레진의 수복 과정에서의 상아세관액의 유동을 비교하고, 접착제의 종류별로 다르게 나타나는 유동을 비교하는 첫 시도였다.

임상적인 상황과 유사한 환경을 만들기 위해 생리학적인 정수압을 적용하여 기본적으로 outward flow의 동인을 만들었음에도 불구하고, 와동 형성 과정에서 상아세관액의 유동은 대부분이 inward로 일어났다. 와동 형성 중 생기는 inward flow의 이유는 치질을 삭제하는 동안의 버의 마찰 때문에 생긴 열에 의해 상아세관액이 이동을 하거나, 고속 핸드피스에서 분사되는 수압으로 인해 물이 노출된 상아세관으로 밀려 들어가기 때문인 것으로 생각된다.¹⁴⁾ 와동 형성이 끝난 직후에는 inward였던 flow의 방향이 생리학적인 치수압과 수분의 증발에 의해서 다시 outward flow로 변하는 것으로 볼 수 있었다.

아말감 충전 과정에서는 상아세관액의 급격한 outward나 inward flow가 발생하지 않고 비교적 단순한 유동을 보였다 (Figure 2). 와동 형성 후 outward였던 상아세관액의 흐름은 아말감 충전을 시행하자마자 inward로 전환되고 버니싱이 완료된 후에는 0에 가까운 완만한 outward flow를 보였다. 아말감 충전과정에서 주로 충전과 버니싱 등을 통해 가해지는 압력은 급격한 상아세관액의 흐름 변화를 야기하지는 않는 것으로 보인다. 다만, Copalite 바니쉬와 아말감을 통해 상아세관을 물리적으로 폐쇄시켜서 flow rate가 완만하게 0에 근접하게 되는 것으로 생각된다.

복합레진의 경우는 수복 과정 중에 급격한 outward 및 inward flow를 반복하는 것을 관찰할 수 있었다 (Figures 3-6). 광중합은 상아세관액의 흐름을 급격히 inward로 변화시켰으며, 공기 분사는 약하게 행해진 경우에도 상아세관

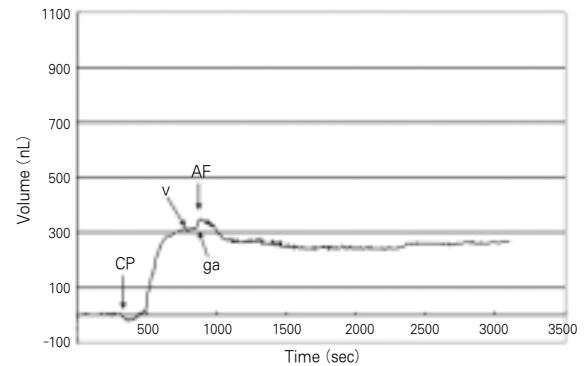


Figure 2. Consecutive DFF during amalgam restoration. Upward movement (+) vs time on graph indicates outward DFF, whereas downward movement (-) indicates inward DFF. CP: cavity preparation; V: varnish application; ga: gentle air stream; AF: amalgam filling.

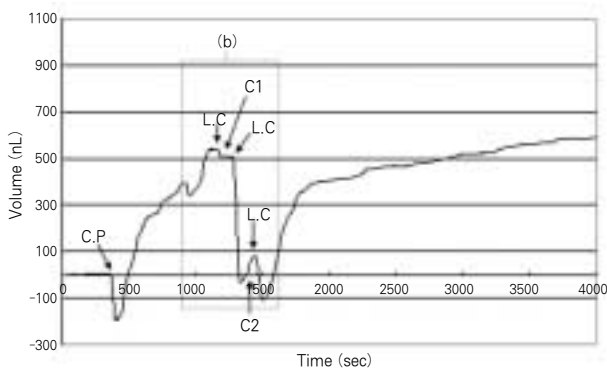


Figure 3. (a) Consecutive DFF during composite restoration with MP. (b) Magnified view of consecutive DFF during bonding procedure of MP. Upward movement (+) vs time on graph indicates outward DFF, whereas downward movement (-) indicates inward DFF. CP: cavity preparation; LC: light curing; C1: first layer filling of composite; C2: second layer filling of composite; E: acid-etching; r: rinse; d: blot-dry; P: primer application; ga: gentle air; A: adhesive application.

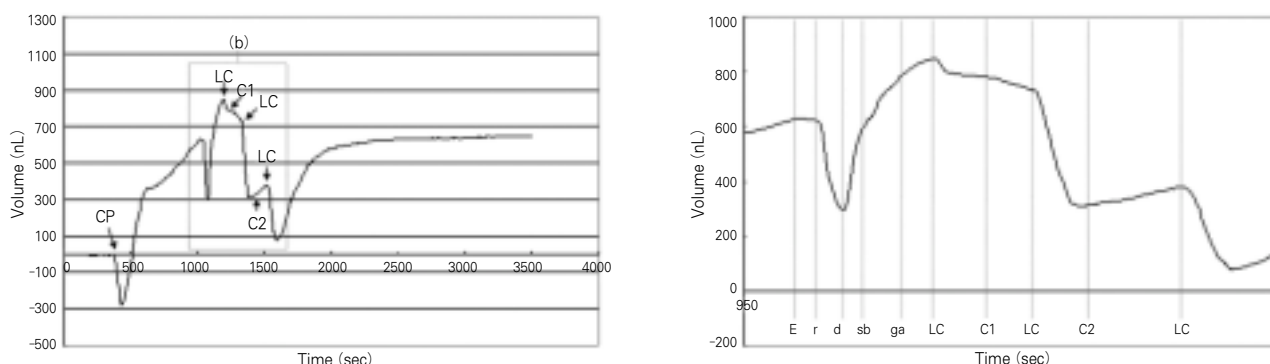


Figure 4. (a) Consecutive DFF during composite restoration with SB. (b) Magnified view of consecutive DFF during bonding procedure of SB. Upward movement (+) vs time on graph indicates outward DFF, whereas downward movement (-) indicates inward DFF. CP: cavity preparation; LC: light curing; C1: first layer filling of composite; C2: second layer filling of composite; E: acid-etching; r: rinse; d: blot-dry; sb: Single Bond application; ga: gentle air.

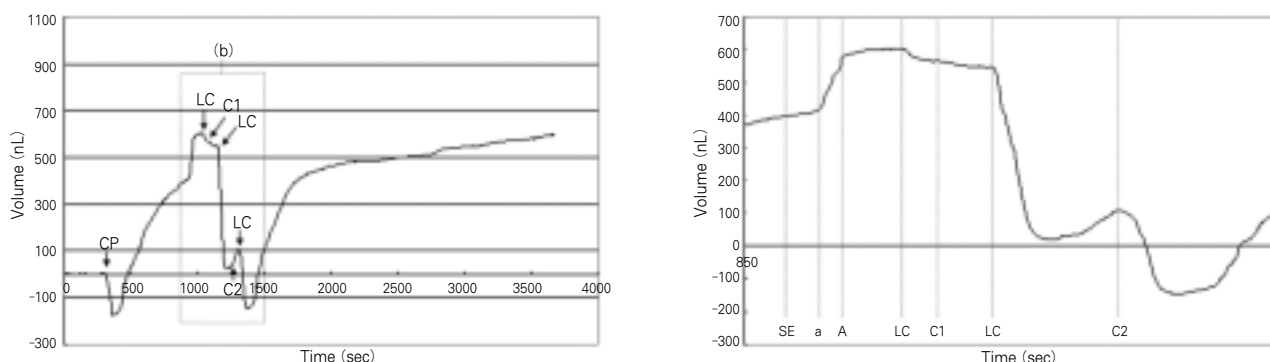


Figure 5. (a) Consecutive DFF during composite restoration with CE. (b) Magnified view of consecutive DFF during bonding procedure of CE. Upward movement (+) vs time on graph indicates outward DFF, whereas downward movement (-) indicates inward DFF. CP: cavity preparation; LC: light curing; C1: first layer filling of composite; C2: second layer filling of composite; SE: self-etching primer application; a: air-dry; A: adhesive application.

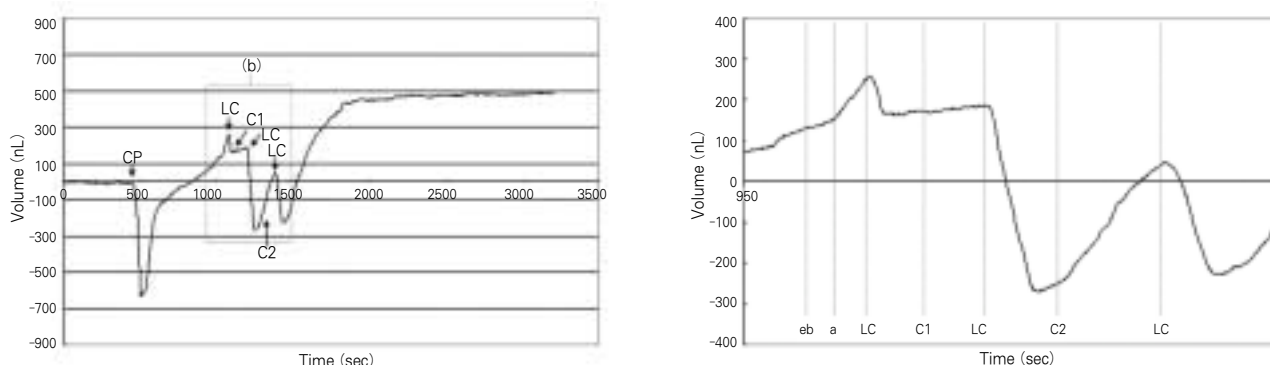


Figure 6. (a) Consecutive DFF during composite restoration with EB. (b) Magnified view of consecutive DFF during bonding procedure of EB. Upward movement (+) vs time on graph indicates outward DFF, whereas downward movement (-) indicates inward DFF. CP: cavity preparation; LC: light curing; C1: first layer filling of composite; C2: second layer filling of composite; eb: Easy Bond application; a: air-dry.

액 outward flow rate를 급격히 증가시켰다. 이러한 결과는 이전의 연구들과 유사하며, 임상과 유사한 상황에서 재 확인되었다고 할 수 있다.^{7,11)}

광중합 과정에서의 inward flow는 주로 광중합기로부터 발생하는 열과 복합레진의 중합열에 의한 열팽창 때문일 것으로 생각된다. 열이 가해지면 액체는 식 $\beta \Delta TV_0$ (β : volumetric thermal expansion coefficient, 2.07×10^{-4} at 20 °C for distilled water, ΔT : degree of temperature change, V_0 : initial volume)에 의해 팽창한다¹⁵⁾. 본 연구에서 40초 동안 연속으로 중합을 시행했을 때 광중합기 tip 표면에서의 온도는 실온보다 20°C 이상 증가하였다. 접착제나 복합레진에 의해 와동의 표면이 밀폐된 상태에서 이러한 온도 상승에 의한 상아질과 치수강에 존재하는 물의 팽창은 급격한 inward flow를 야기할 것이다. 복합레진의 광중합 후에는 곧바로 급격한 outward flow로 다시 되돌아오는 것을 볼 수 있는데, 이는 온도가 내려가면서 팽창했던 상아세관액과 치수강액이 다시 수축하여 일어나는 “rebounding effect”에 의한 것이라고 생각된다.

공기 분사는 치과용 접착제의 접착 과정 중 유기용매를 휘발시키기 위해서나 접착제의 pooling을 막거나 과잉으로 두껍게 적용된 제제를 얇게 펴기 위해 종종 시행된다. 공기 분사가 급격한 outward flow를 야기하는 기전으로는 크게 두 가지를 들 수 있다. 첫째는 공기 분사가 와동 표면에서 수분 증발을 촉발함으로 더 증가된 모세관 현상에 의해 상아세관액이 outward로 급격히 이동하는 것을 들 수 있다. 내경의 지름이 r 인 모세관의 모세관현상에 의한 물의 상승 높이는 $h = 2\sigma / g\rho r$ (h : 모세관에 의한 물의 상승(m), g : 중력 가속도 (9.81 m/s^2), ρ : 물의 밀도 (1000 kg/m^3), σ : 물의 표면 장력(0.07 N/m))로 주어지며 상아세관과 같이 1-5 μm 의 매우 작은 지름의 모세관은 약 7 m (평균 지름 2 μm 로 볼 경우) 높이의 물기둥을 만들 수 있을 정도로 흡인력이 크다¹⁵⁾. 둘째로는 공기 분사가 와동의 표면 온도를 낮추는 냉 자극으로 작용해서 역시 상아세관액의 outward 이동을 야기할 수 있을 것이다.

본 실험에서 관찰한 바와 같이 아말감에 비해 복합레진의 수복 과정에서 상아세관액의 유동은 그 변화가 작으며, 복잡한 양상을 보인다. 복합레진의 술후민감증의 주요 원인이 복합레진의 중합수축인 것은 의심할 여지가 없지만¹⁶⁾, 수복 과정에서의 이러한 작은 상아세관액의 변화하는 흐름 역시 감각신경 말단을 조기에 흥분시켜서 술후민감증의 요인으로 작용할 수 있을 것이다¹⁷⁾.

Total-etch 접착제와 비교했을 때 self-etch 접착제의 술식에서 가장 큰 차이점은 산 처리와 수세 과정이 없다는 점이다. Total-etch 방식의 접착제에서는 산 처리 후 수세와 건조 과정이 필수적이어서 상아세관액의 방향이 그에 대응해서 각각 inward와 outward로 순차적으로 일어나 계곡모

양 (valley shape)의 상아세관액 유동을 볼 수 있었다 (Figure 3, 4). 이에 반해 self-etch 방식의 접착제에서는 각 단계별로 flow rate의 차이를 보이기는 하지만 광중합 전까지 outward flow를 지속했다.

접착제의 종류에 따른 상아세관액의 유동 차이는 소수성 본딩제를 별도로 적용하는 접착제 (MP, SE)와 프라이머와 본딩제를 혼합시켜 단순화한 접착제 (SB, EB) 사이에도 나타났다. MP나 SE에서는 소수성 본딩제를 적용하는 것만으로도 flow rate가 감소하여 0에 가까운 양의 기울기를 보이거나 때로는 plateau 내지는 약간 완만한 inward flow를 보이기도 했다 [(Figure 3(b), 5(b))]. 반면에, primer와 adhesive가 함께 섞여 있는 SB와 EB의 경우는 적용 자체로 outward flow를 크게 변화시키지는 못했다. 이러한 단순화된 접착시스템은 보다 높은 농도의 친수성 레진 단량체를 포함하고 있어서 상아질에 침투성이 좋을 수 있으나 반면에 친수성으로 인해 outward flow의 상아세관액의 이동을 물리적으로 막는 능력은 떨어질 수 있다. 기존의 연구들에서도 two-step etch-and-rinse 방식과 one-step self-etch방식의 단순화된 접착제는 중합이 된 후에도 접착층 내에 water channel이 많이 존재하게 되어 접착제 층이 반투과성 막(semi-permeable membrane)처럼 작용한다는 것을 보고해 왔다^{18,19)}. 소수성 본딩제를 따로 적용하는 방식은 그 적용 자체만으로도 즉각적인 outward dentinal fluid flow를 줄이는 효과가 있다는 것을 본 연구에서 확인할 수 있었고 이는 초기의 치질과 레진의 안정적인 접착을 용이하게 하는 데 기여할 수 있으리라 생각된다.

이상적으로는, 와동을 수복하면 상아질의 permeability를 완전하게 차단해서 세균의 침투나 치아파괴증의 문제가 없어야 한다. 본 연구에서 수복 후 30분, 3일, 7일에 상아세관액의 유동을 측정했을 때, baseline flow rate와 비교하여 아말감과 복합레진 수복에서 평균 88.7-97.8%의 flow rate 감소를 보였으나 완전한 밀폐를 보이지는 못했다. 생리학적 치수압을 적용하여 지속적으로 outward fluid flow가 있는 상황에서 어떤 접착제도 이상적인 결과를 가져오기 어려웠을 것이다.

상아세관액 흐름의 감소율은 수복 재료의 종류에 따라서 유의한 차이를 보이지 않았다. 본 연구에서는 30분, 3일 그리고 7일의 비교적 짧은 기간 동안에 수복 후 flow rate를 측정하였다. 짧은 기간에서는 아말감과 복합레진, 각 접착제를 이용한 복합레진 수복에서 permeability의 차이가 거의 나타나지 않는다고 생각될 수 있다. 아말감과 복합레진 수복 후의 투과도 감소율을 측정했던 이전의 연구에서, 3개월에서는 아말감 수복이 보다 낮은 투과도를 보였지만, 1주일에서는 아말감과 복합레진 수복 후의 간에 유의한 차이를 보이지 않았다²⁰⁾. Microleakage를 측정한 최근의 다른 연구들에서도 아말감과 복합레진 수복에서 유의한 차이를 보

고하지 못했다^{21,22)}. 열순환 (Thermo-cycling)과 같이 구강 내 환경을 모방하거나 오랜 기간 동안 생리적 치수압을 적용한 후 투과도의 차이를 측정하는 추가적인 연구를 통해 아말감과 복합레진 수복의 차이를 확인해 보아야 할 것이다.

이전의 몇몇 연구에서 접착제 종류별로 fluid movement를 측정하여 투과도를 비교해서 접착제들 간의 차이를 보고하기도 하였다^{11,23-25)}. 본 연구에서 사용된 접착제들 간에 투과도의 차이를 보이지 않은 것에 대해서는 기존의 연구들에 비추어서 고려해야 할 다른 점들이 몇 가지 있다. 첫째, 이전의 연구들이 대개 acid-etching을 해서 투과도를 높은 상태를 baseline으로 잡았던 반면에, 본 연구에서는 임상적 상황을 그대로 재현하기 위해서 와동 형성 후에 smear layer가 남아 있는 상태의 flow rate를 baseline으로 삼았다. 둘째, 본 연구에서는 단순히 접착제만을 중합하여 투과도를 측정한 것이 아니라 1급 와동에 복합레진까지 충전한 후 상아세관액의 flow rate를 측정한 것이다. 와동의 모든 변연은 레진-상아질 접착보다 훨씬 견고한 레진-범랑질 접착으로 이루어져 있어 시편으로 dentin disk를 사용하거나 수평으로 삭제해서 상아질을 모두 노출 시킨 치아를 사용한 기존의 연구들과 비교하여 훨씬 더 높은 밀폐 능력을 보였을 것이다. 마지막으로, 상부에 올려진 복합레진의 수축응력이나 수화 팽창과 같은 요인들이 복잡하게 투과도에 영향을 줄 수도 있음을 고려해야 한다. 따라서 본 연구의 접착제들간의 수복 후 투과도에 대해서 이전 연구들과 직접적으로 비교하기는 어렵다. 본 연구 결과 내에서, 와동 변연이 범랑질에 놓인 1급 와동의 복합레진 수복에 있어서는 실험에 사용된 접착제들 사이에는 fluid movement를 통한 투과도 측면에서는 유의한 차이가 없는 것으로 보인다.

노출된 상아질 표면에서 outward의 상아세관액 유동을 일으키는 수분의 증발에 영향을 주는 요소는 온도와 습도이다. 실제 임상에서 수복을 위해 형성된 와동 표면에서의 온도와 습도는 일정한 상태가 아니다. 와동 형성 후 보통 치아는 러버댐으로 격리가 되면서 와동 주위는 37℃ 100% 습도의 구강 내 환경으로부터 실온과 실내 습도의 상태에 놓이게 된다. 상아세관액의 유동 양태는 접착 및 충전뿐만 아니라 전동 기구를 사용하는 마무리와 연마 과정에 의해서도 변할 수 있다. 앞으로 보다 세밀하게 와동표면의 온도, 습도의 변화를 재현하고 마무리와 연마 과정을 포함한 임상 술식을 그대로 재현해서 dentinal fluid flow와 수복물의 투과도에 어떤 변화가 생기는 지 관찰해 볼 필요가 있을 것이다.

참고문헌

1. Addy M, West N. Etiology, mechanisms, and manage-

- ment of dentine hypersensitivity. *Curr Opin Periodontol* 2:71-77, 1994.
- Walters PA. Dentine hypersensitivity: a review. *J Contemp Dent Pract* 15:6(2):107-117, 2005.
- Johnson GH, Gordon GE, Bales DJ. Postoperative sensitivity associated with posterior composite and amalgam restorations. *Oper Dent* 13(2):66-73, 1988.
- Gordan VV, Mjör IA, Huckle RD, Smith GE. Effect of different liner treatments on postoperative sensitivity of amalgam restorations. *Quintessence Int* 30(1):55-59, 1999.
- Grover PS, Hollinger J, Lorton L. A review of the incidence of pain after an operative treatment visit: Part I. *J Prosthet Dent* 51(2):224-225, 1984.
- Brännstrom M, Lindén LA, Aström A. The hydrodynamics of the dental tubule and of pulp fluid. A discussion of its significance in relation to dentinal sensitivity. *Caries Res* 1(4):310-317, 1967.
- Brännstrom M, Lindén LA, Johnson G. Movement of dentinal & pulpal fluid caused by clinical procedures. *J Dent Res* 47(5):679-682, 1968.
- Brännstrom M. The hydrodynamic theory of dentinal pain: sensation in preparations, caries, and the dentinal crack syndrome. *J Endod* 12(10):453-457, 1986.
- Pashley DH, Matthews WG, Zhang Y, Johnson M. Fluid shifts across human dentin in vitro in response to hydrodynamic stimuli. *Arch Oral Biol* 41(11):1065-1072, 1996.
- Paphangkorakit J, Osborn JW. The effect of normal occlusal forces on fluid movement through human dentine in vitro. *Arch Oral Biol* 45(12):1033-1041, 2000.
- Hashimoto M, Ito S, Tay FR, Svizero NR, Sano H, Kaga M, Pashley DH. Fluid movement across the resin-dentin interface during and after bonding. *J Dent Res* 83(11):843-848, 2004.
- Ratih DN, Palamara JE, Messer HH. Dentine fluid flow and cuspal displacement in response to resin composite restorative procedures. *Dent Mater* 23(11):1405-1411, 2007.
- Ciucchi B, Bouillaguet S, Holz J, Pashley D. Dentine fluid dynamics in human teeth, In vivo. *J Endod* 21(4):191-194, 1995.
- Horiuchi H, Matthews B. In-vitro observations on fluid flow through human dentine caused by pain-producing stimuli. *Arch Oral Biol* 18(2):275-294, 1973.
- Benenson W, Harris JW, Stocker H, Lutz H. Handbook of physics. New York: Springer; 2006.
- Bausch JR, de Lange K, Davidson CL, Peters A, de Gee AJ. Clinical significance of polymerization shrinkage of composite resins. *J Prosthet Dent* 48(1):59-67, 1982.
- Pashley DH. Dynamics of the pulpo-dentin complex. *Crit Rev Oral Biol Med* 7(2):104-133, 1996.
- Tay FR, Pashley DH, Suh BI, Carvalho RM, Itthagarun A. Single-step adhesives are permeable membranes. *J Dent* 30(7-8):371-382, 2002.
- Tay FR, Pashley DH. Water treeing-a potential mechanism for degradation of dentin adhesives. *Am J Dent* 16(1):6-12, 2003.
- Ozok AR, De Gee AJ, Wu MK, Wesselink PR. The influence of resin composite and bonded amalgam restorations on dentine permeability in Class II cavities in vitro. *Dent Mater* 17(6):477-484, 2001.
- Hersek N, Canay S, Akça K, Ciftçi Y. Comparison of microleakage properties of three different filling mate-

- rials. An autoradiographic study. *J Oral Rehabil* 29 (12):1212-1217, 2002.
22. Murray PE, Hafez AA, Smith AJ, Cox CF. Bacterial microleakage and pulp inflammation associated with various restorative materials. *Dent Mater* 18(6):470-478, 2002.
23. Chersoni S, Suppa P, Grandini S, Goracci C, Monticelli F, Yiu C, Huang C, Prati C, Breschi L, Ferrari M, Pashley DH, Tay FR. In vivo and in vitro permeability of one-step self-etch adhesives. *J Dent Res* 83(6):459-464, 2004.
24. Grégoire G, Guignes P, Millas A. Effect of self-etching adhesives on dentin permeability in a fluid flow model. *J Prosthet Dent* 93(1):56-63, 2005.
25. 이인복, 김민호, 김선영, 장주혜, 조병훈, 손호현, 백승호. 미세물 흐름 측정장치의 개발과 상아세관액의 수력학에의 응용. *대한치과보존학회지* 33(2):141-147, 2008.

국문초록

아말감과 복합레진의 수복 과정과 수복 후 발생하는 상아세관액 흐름의 실시간 측정

김선영¹ · 조병훈¹ · 백승호¹ · 임범순² · 이인복^{1*}

서울대학교 치의학대학원, ¹치과보존학교실, ²치과생체재료학교실

본 연구의 목적은 아말감과 복합레진의 수복 과정과 수복 후 상아세관액의 흐름(dentinal fluid flow, DFF)을 측정하기 위함이다. 치근을 절제한 제 3 대구치를 자체 제작한 미세 유체 흐름 측정장치에 연결한 후 1급 와동을 형성하여 아말감과 복합레진 수복을 시행하였다. DFF의 측정은 와동 형성부터 수복 후 30분까지 연속적으로 이루어졌고, 수복 후 3, 7일에 재 측정하였다.

주수 하에 와동 형성 시 DFF는 inward로, 끝난 후에는 outward로 바뀌었다. 아말감 충전 시 DFF는 inward로 바뀌었고 충전 완료 후 미약한 outward DFF를 보였다. 복합레진 수복의 경우, 산 처리 후 수세와 건조 시 각각 inward와 outward DFF를 보였고 primer 도포 후 공기 분사는 급격한 outward, 소수성 본딩제를 적용하는 단계에서는 outward 였던 DFF가 감소하여 0에 가까워지거나 약간 inward 흐름을 보였다. 접착제와 복합레진의 광중합은 급격한 inward의 DFF를 일으켰다. 수복 후 30분, 3일, 7일째 수복 재료에 따른 DFF의 감소에 통계적으로 유의한 차이는 없었다 ($P > 0.05$).

주요단어: 상아세관액의 유동, 아말감, 복합레진, 접착시스템