

# 원자현미경을 이용한 세라믹 브라켓 슬롯의 표면조도에 대한 연구

박기호<sup>a</sup> · 윤현주<sup>a</sup> · 김수정<sup>b</sup> · 이기자<sup>c</sup> · 박현국<sup>d</sup> · 박영국<sup>e</sup>

교정용 브라켓과 강선 사이의 마찰저항력에 영향을 미치는 요소들 중 브라켓 슬롯의 표면조도에 대한 연구가 그동안 많이 시행되어 왔는데 기존 연구는 주로 주사전자현미경(SEM)이나 Profilometer를 사용하여 이루어졌다. 이 연구는 원자현미경(AFM)을 사용하여 다섯 종류의 브라켓 슬롯의 표면조도를 정량적으로 측정하여 세라믹 브라켓이 스테인리스 스틸 브라켓보다 더 거칠고 다결정 알루미늄 브라켓이 단결정 알루미늄 브라켓보다 더 거친지 규명하는데 목적이 있다. 대조군인 스테인리스 스틸 브라켓(Succes<sup>®</sup>)과 두 종류의 단결정 알루미늄(Inspire Ice<sup>®</sup>, Perfect<sup>®</sup>)와 두 종류의 다결정 알루미늄(Crystalline V<sup>®</sup>, Invu<sup>®</sup>)를 슬라이드 글라스에 접착하고 슬롯을 노출시키기 위해 치과용 하이스피드 핸드피스와 샴퍼버를 이용해 왕을 연마하였다. 원자현미경 이미지는 Nanostation II<sup>™</sup>를 사용하여 관찰하였다. Sa, Sq, Sz 모두 Invu<sup>®</sup>와 Inspire Ice<sup>®</sup>는 대조군인 Succes<sup>®</sup>와 유의미한 차이가 없었으며 Perfect<sup>®</sup>와 Crystalline V<sup>®</sup>는 Succes<sup>®</sup>보다 컸다. Perfect<sup>®</sup>와 Crystalline V<sup>®</sup> 사이에서는 Sa, Sq, Sz 모두 유의미한 차이가 없었으며 Invu<sup>®</sup>와 Inspire Ice<sup>®</sup> 사이에서도 Sa, Sq, Sz 모두 유의미한 차이가 없었다. 따라서, 대조군인 Succes<sup>®</sup>와 단결정 브라켓인 Inspire Ice<sup>®</sup>, 다결정 브라켓인 Invu<sup>®</sup>가 낮은 조도의 슬롯 표면을 가지고 다결정 브라켓인 Crystalline V<sup>®</sup>와 단결정 브라켓인 Perfect<sup>®</sup>가 거친 슬롯 표면을 가진 것으로 판단된다. 따라서, 유사한 재료의 브라켓이라도 제조사에 따라 다양한 슬롯 표면조도를 나타낸다고 할 수 있다. (대치교정지 2010;40(5):294-303)

**주요 단어:** 원자현미경, 표면조도, 브라켓 슬롯

## 서론

교정 치료 시에 브라켓과 아치와이어 사이에는 마찰력이 작용하게 되며 이 힘은 원하는 이동방향과 반대 방향으로 작용하기 때문에 마찰력이 클수록 치료 속도가 늦어지고 원하는 방향의 치아 이동이 발생하게 된다. 따라서, 교정적 치아 이동 시 브라켓과 와이어 사이의 마찰력이 매우 중요한 요소이며 그동안 브라켓과 와이어의 마찰에 대한

많은 연구가 행해져 왔다. 교정용 브라켓과 아치와이어 사이의 마찰 저항력에 영향을 미치는 요소들 중 기계적인 요인으로는 교정용 와이어의 재질,<sup>1,2</sup> 와이어의 단면적과 크기,<sup>3,4</sup> 와이어의 표면조도,<sup>5,6</sup> 브라켓의 재질과 표면조도,<sup>1,2</sup> 브라켓 슬롯의 폭경과 깊이,<sup>1,5</sup> 브라켓 형태,<sup>3,4,7</sup> 브라켓과 와이어 간의 결합 재료,<sup>4,5,8</sup> 결합방법<sup>7,9</sup> 등이 있다.

이 요소들 중에서 브라켓 슬롯의 조도(roughness)에 대한 여러 연구가 그동안 시행되어 왔다. Pratten 등<sup>2</sup>과 Bednar 등<sup>10</sup>은 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)을 이용하여 브라켓 표면을 관찰하였으며 세라믹 브라켓이 스테인리스 스틸 브라켓보다 더 거칠다고 하였다. Saunders와 Kusy<sup>11</sup>는 주사전자현미경으로 여섯 종류의 세라믹 브라켓을 관찰하여 단결정 알루미늄(monocrystalline alumina) 브라켓이 다른 다섯 종류의 다결정 알루미늄(polycrystalline alumina) 브라켓보다 더 매끄러웠다고 하였다. Zinelis 등<sup>12</sup>은 profilometer를 이용하여 여

<sup>a</sup>임상강사, <sup>b</sup>조교수, <sup>c</sup>교수, 경희대학교 치의학전문대학원 교정학교실.

<sup>d</sup>연구원, <sup>e</sup>교수, 경희대학교 의학전문대학원 의공학교실.

교신저자: 박영국.

서울시 동대문구 회기동 1 경희대학교 치의학전문대학원 교정학교실.

02-958-9392; e-mail, ygpark@khu.ac.kr.

원고접수일: 2010년 2월 17일 / 원고최종수정일: 2010년 6월 24일 /

원고채택일: 2010년 6월 30일.

DOI:10.4041/kjod.2010.40.5.294

\*본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 바이오 기술 개발 사업으로부터 지원받아 수행되었음(과제번호: 2009-0092562).

러 가지 브라켓 슬롯의 조도를 관찰하였다.

그러나, 선학들의 연구 결과 profilometer와 주사전자현미경으로 관찰한 결과 사이에 차이가 있었고<sup>13</sup> profilometer로 시편의 측정 위치를 정확하게 조절하는 것이 불가능하였다.<sup>14</sup> 또한 주사전자현미경은 high-vacuum chamber가 필요하고, 표면의 변화 양상을 실시간으로 관찰할 수 없을 뿐 아니라 정량적, 정성적 분석을 동시에 할 수 없었다.<sup>15-17</sup> 이런 profilometer와 주사전자현미경의 한계점 때문에 표면조도의 연구를 위한 원자현미경(atomic force microscope)의 사용 필요성이 대두되었다.

원자현미경은 스프링 캔틸레버(spring cantilever) 끝에 길이가 100 - 200  $\mu\text{m}$ , 100  $\text{\AA}$  이하의 직경을 가진 팁(SiN)이 부착되어 있는 스프링 휨 시스템(spring deflection system)이고 이 팁이 시편을 주사할 때 팁과 표면 사이에 반데르발스(Vander Waals) 힘이 작용하여 캔틸레버를 굴곡시킨다. 이것은 캔틸레버 뒷면에서 입사되는 레이저의 굴곡으로 광검출기(photodetector)에서 감지되어 원자단위의 수준으로 물질의 표면구조를 3차원으로 형상화할 수 있고 표면의 변화양상을 실시간으로 관찰할 수 있다(Fig 1).<sup>18,19</sup> 또한 표면의 수치화가 가능하여 정량적 분석에 유용하다는 장점이 있다.<sup>21-24</sup>

치과 영역에서는 원자현미경이 자주 사용되지는 않았지만 Marshall 등<sup>16,17</sup>은 1993년에 원자현미경을 이용하여 상아질에 산처리를 한 후, 변화의 초기단

계를 연구하였으며 Cassinelli와 Morra<sup>15</sup>는 상아질 접착제와 치아 경조직의 상호 작용을 연구하면서 원자현미경을 이용하여 상아질 접착제의 작용기전에 대한 새로운 정보를 제공하였고, 치아 경조직을 형상화하는데 원자현미경을 이용할 수 있다는 것을 보여 주었다. Kim과 Woo<sup>25</sup>는 연마방법에 따른 복합레진의 활택도에 관한 연구내용을 발표하여 치아 및 수복재료의 표면관찰에 원자현미경이 유용하다는 것을 보여주었다. Valois 등<sup>26</sup>은 근관 치료용 스테인리스 스틸 파일과 나이트이 파일을 원자현미경으로 관찰하였으며 Lamolle 등<sup>27</sup>은 원자현미경(AFM), 주사전자현미경(SEM), profilometer를 이용하여 표면 처리된 티타늄 임플란트를 관찰하였다.

교정 영역에서 원자현미경을 이용한 논문을 살펴보면 Bourauel 등<sup>23</sup>이 원자현미경을 사용하여 교정용 와이어의 표면을 연구하였으며 Lin 등<sup>24</sup>은 원자현미경을 이용하여 스테인리스 스틸 브라켓의 윙의 표면조도를 관찰하였다. 그러나, 실질적으로 강선과 마찰이 발생하는 부분은 브라켓 슬롯인데 아직까지 브라켓 슬롯의 조도를 원자현미경으로 연구한 논문은 없었다. 이 연구의 목적은 원자현미경을 사용하여 한 종류의 스테인리스 스틸 브라켓과 네 종류의 세라믹 브라켓의 슬롯 바닥의 조도를 정량적으로 측정하고 평가하는 데 있다.

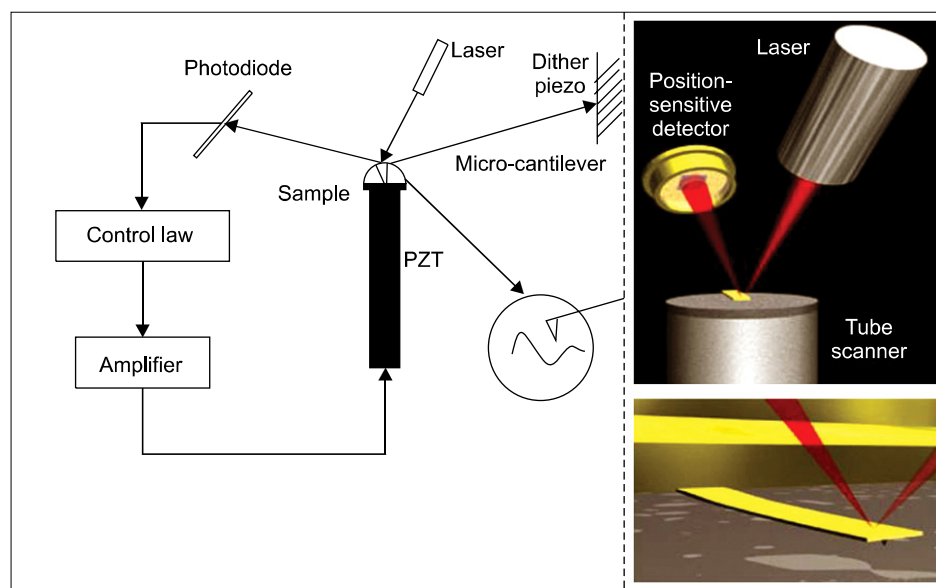


Fig 1. A schematic view of atomic force microscopy imaging systems.<sup>20</sup>

## 연구방법

### 연구재료

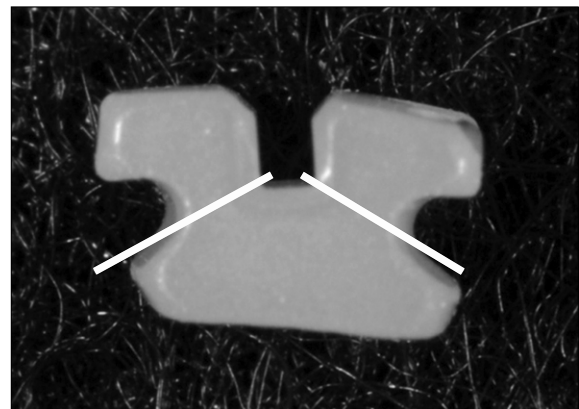
대조군으로는 스테인리스 스틸 브라켓인 Succes<sup>®</sup> (Tomy, Tokyo, Japan)를 사용하였으며 실험군인 세라믹 브라켓은 단결정 알루미나 브라켓인 Inspire Ice<sup>®</sup> (Ormco, Orange, CA, USA), Perfect<sup>®</sup> (Hubit, Seoul, Korea)와 다결정 알루미나 브라켓인 Crystalline V<sup>®</sup> (Tomy, Tokyo, Japan), Invu<sup>®</sup> (TP Orthodontics, La Porte, Ind, USA)를 사용하였다 (Fig 2).

### 연구방법

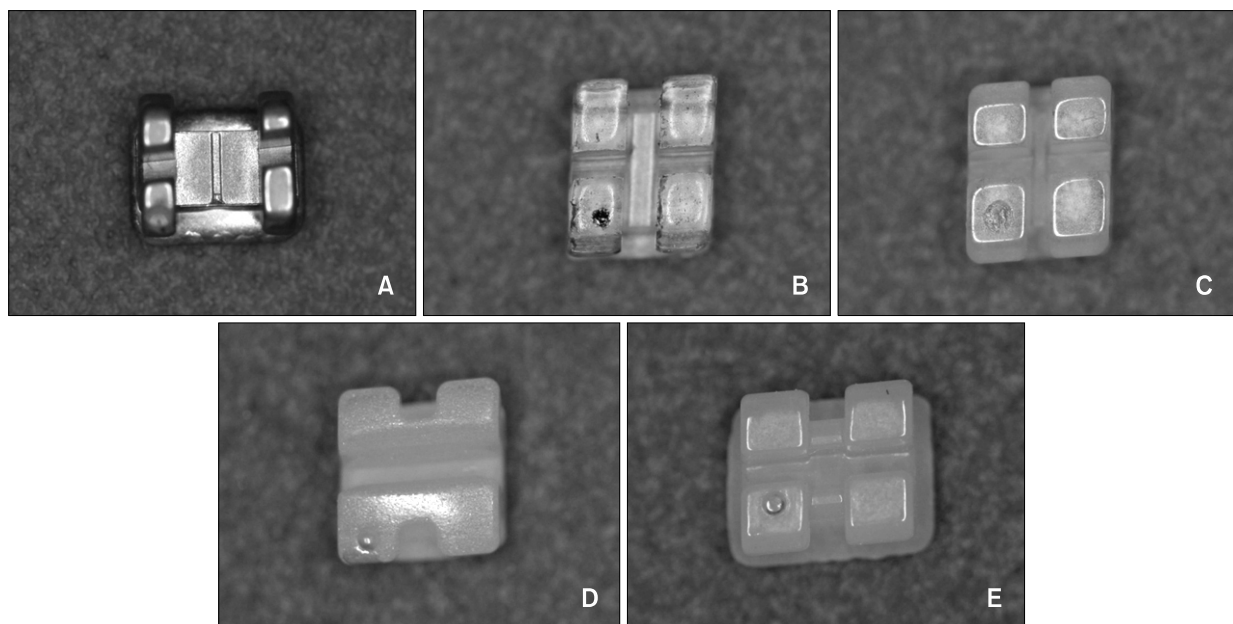
접착제(cyanoacrylate adhesive, AXIA<sup>®</sup>, Alteco, Korea)를 사용하여 각 브라켓을 슬라이드 글라스에 접착하고 30분 후에 치과용 하이스피드 핸드피스와 샴퍼버를 이용하여 브라켓 윙을 연마하였다. 슬롯 바닥을 노출시켜 원자현미경의 probe가 슬롯 바닥에 접근할 수 있도록 하기 위해 실선 방향으로 베벨을 부여하면서 연마하였다 (Fig 3). 바닥에 남아있을 수 있는 이물질을 제거하기 위해 모든 브라켓을 air syringe로 5초간 dry하고 알코올 스펀지로 5회 문지

른 후 알코올 용액에 5초간 담궈서 헹구고 다시 air syringe로 10초간 dry하였다. 이후 광학현미경을 통해 500배까지 배율을 증가시키면서 잔존 debris의 유무를 관찰한 후 원자현미경을 적용하였다.

사용한 원자현미경은 Nanostation II<sup>™</sup> (Surface Imaging Systems, Herzogenrath, Germany)였으며 (Fig 4) 비접촉식 모드를 사용하였다. 스캔 사이즈는 기존 논문<sup>22</sup>에 근거하여  $30 \times 30 \mu\text{m}$ 로 설정하였으며 각 브라켓 슬롯 바닥을 수평적으로 4등분한 선과



**Fig 3.** Direction of grinding. Bracket wings were ground to open slot base.



**Fig 2.** Control group (A) and experimental groups (B - E). A, Succes<sup>®</sup> (Tomy); B, Inspire Ice<sup>®</sup> (Ormco); C, Perfect<sup>®</sup> (Hubit); D, Crystalline V<sup>®</sup> (Tomy); E, Invu<sup>®</sup> (TP Orthodontics).

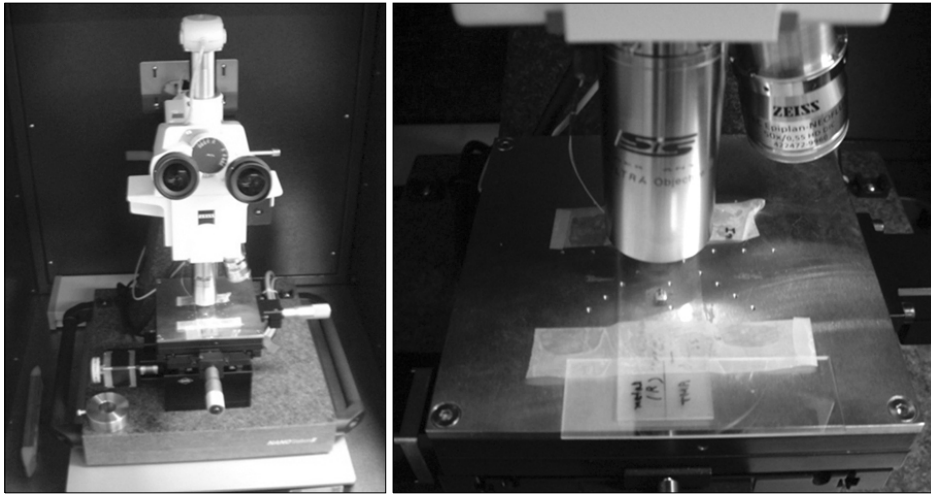


Fig 4. Atomic force microscope (Nanostation II™).

양쪽 윙의 수직 중심선의 교차점 여섯 군데를 관찰하였다. 원자현미경 스캔에 앞서 광학현미경을 이용하여 브라켓 표면을 500배율로 확대하여 찍을 부위를 선정한 후 AFM tip을 광학현미경으로 정한 target 부위에 위치시켰다. 0.8 line/s의 속도로 스캔하였으며 얻어진 원자현미경 이미지의 해상도는  $512 \times 512$  픽셀<sup>28,29</sup>이었다. 이렇게 획득된 원자현미경 이미지에 대한 데이터 처리는 SPIP™ (Scanning Probe Image Processor, version 4.1, Image Metrology, Denmark)에 의해 시행되었으며 이 프로그램에서 평면화 과정(planification)을 거쳐 조도 측정 기준면 ( $z=0$  plane, 즉  $xy$ 면)을 결정하였다.

표면조도를 분석하기 위한 파라미터로는 roughness average (Sa), root mean square parameter (Sq), ten point height (Sz)를 사용하였다.

Roughness average (Sa)는 스캔된 영역의 Z축 높이 값들에 대한 그들의 평균 높이 값으로부터 차이 값의 평균을 나타내며 스캔된 영역의 Z축 높이에 대한 거칠기 정도를 표현하는 가장 일반적인 파라미터라고 할 수 있다. M과 N은 픽셀 사이즈를 의미하며 본 연구에서는  $512 \times 512$  픽셀로 스캔을 하였으므로 M과 N은 512가 된다.

$$S_a = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} |z(x_k, y_l) - \mu|, \quad \mu = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} z(x_k, y_l) \quad (\text{Eq. 1})$$

Root mean square parameter (Sq)는 스캔된 영역의

Z축 높이 값과 그들의 평균 높이 값의 차이 값을 제곱하여 평균을 구한 후 제곱근을 취한 값으로 스캔된 영역의 Z축 높이에 대한 거칠기 정도를 좀 더 미세하게 나타낼 수 있는 파라미터이다.

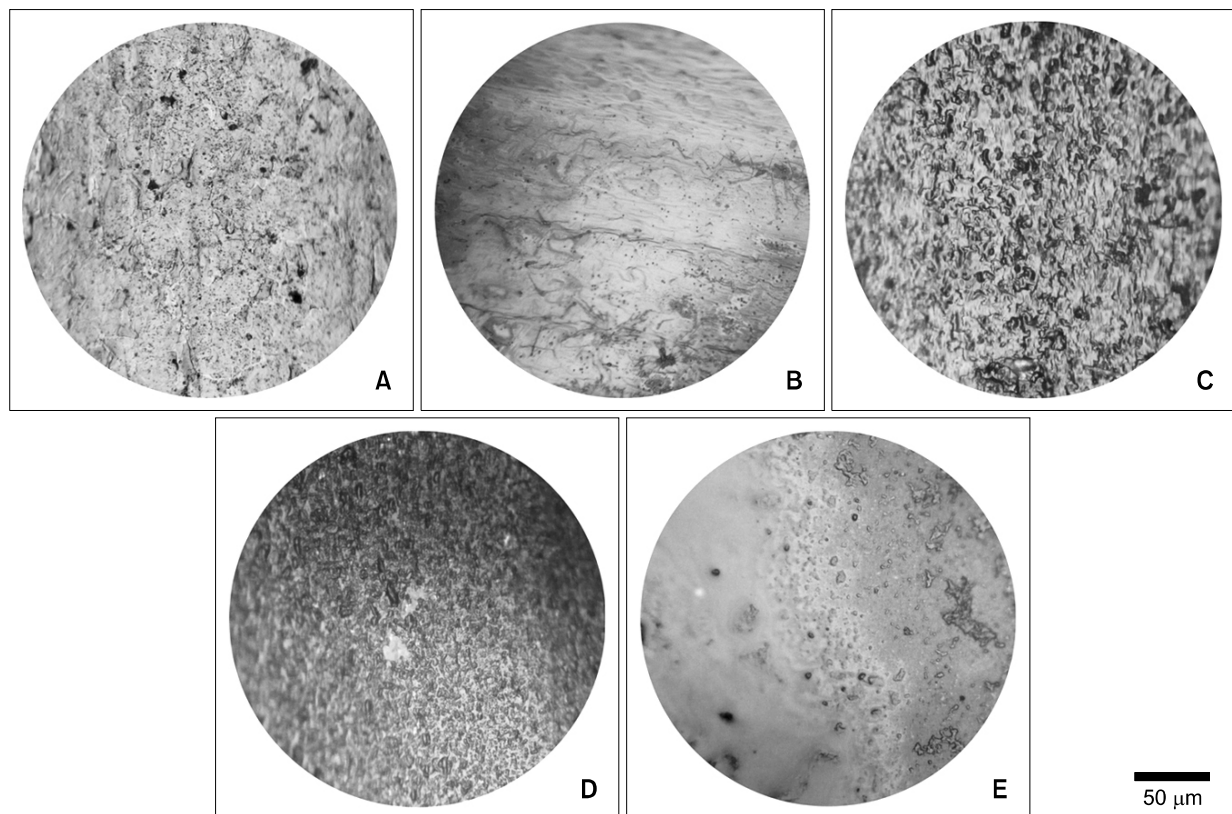
$$S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} [z(x_k, y_l) - \mu]^2}, \quad \mu = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} z(x_k, y_l) \quad (\text{Eq. 2})$$

Ten point height (Sz)는 스캔된 영역의 Z축 높이 값 중에서 가장 높은 5개의 값과 가장 낮은 5개의 값들이 가지는 전체 평균 높이 값으로부터 차이 값의 평균을 나타내며 이 또한 스캔된 영역의 거칠기 정도를 표현하는 파라미터로 사용될 수 있다.

$$S_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |z_{pi} - \mu| + \sum_{i=1}^5 |z_{vi} - \mu|}{5}, \quad \mu = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} z(x_k, y_l) \quad (\text{Eq. 3})$$

#### 통계분석

각 브라켓의 roughness average (Sa), root mean square parameter (Sq), ten point height (Sz)의 비교 분석은 SPSS 13.0 (SPSS, Chicago, IL, USA) 프로그램을 이용하여 행해졌다. 각 종류마다 여섯개의 브라



**Fig 5.** Optical microscopic images of several brackets ( $\times 500$ ). **A**, Succes<sup>®</sup>; **B**, Inspire Ice<sup>®</sup>; **C**, Perfect<sup>®</sup>; **D**, Crystalline V<sup>®</sup>; **E**, Invu<sup>®</sup>.

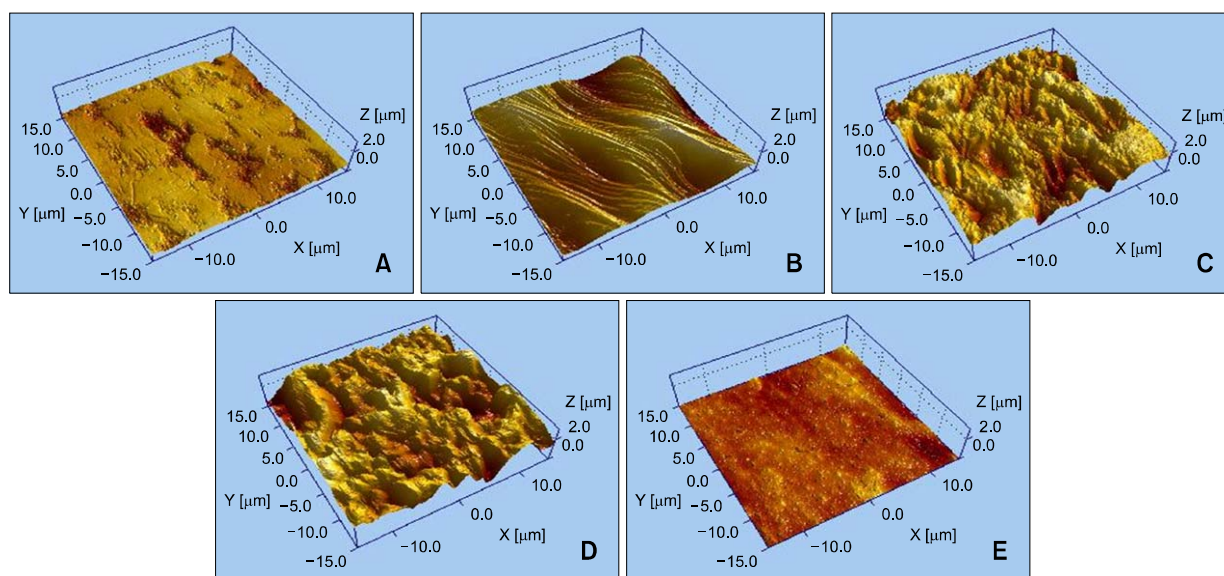
켓을 사용하였고 한 브라켓당 여섯 군데를 관찰하여 샘플 수는 36이었으며 세 가지 조도 파라미터 분석을 위해 One way ANOVA를 시행하고 Duncan 분석법으로 사후검정 하였다. 모든 통계 분석은 유의 수준 0.05에서 시행하였다.

#### 연구성적

Fig 5는 슬롯의 넓은 부위를 관찰하기 위해 촬영한 각 브라켓의 500배 광학현미경 이미지이며 Fig 6은 원자현미경을 이용해 각 브라켓을 3차원으로 구성한 이미지이다. 대조군인 Succes<sup>®</sup>, 실험군 중 Inspire Ice<sup>®</sup>, Invu<sup>®</sup>의 브라켓 슬롯이 비교적 매끄러운 이미지를 나타내었고, 실험군 중 Crystalline V<sup>®</sup>, Perfect<sup>®</sup>의 브라켓 슬롯이 비교적 거친 이미지를 나타내었다.

각 브라켓 슬롯 표면의 원자현미경 이미지로부터 추출된 세 가지 조도 파라미터(roughness parameter) 결과는 다음과 같다 (Tables 1 and 2).

Sa의 경우 Inspire Ice<sup>®</sup> ( $45.9 \pm 7.89$ )와 Invu<sup>®</sup> ( $47.0 \pm 6.68$  nm)는 대조군인 Succes<sup>®</sup> ( $52.8 \pm 8.54$ )와 유의미한 차이가 없었으며 Perfect<sup>®</sup> ( $251.7 \pm 38.35$ )와 Crystalline V<sup>®</sup> ( $220.2 \pm 37.92$ )는 Succes<sup>®</sup>보다 컸다. Sq의 경우에도 Invu<sup>®</sup> ( $65.3 \pm 10.39$ )와 Inspire Ice<sup>®</sup> ( $62.7 \pm 12.82$ )는 대조군인 Succes<sup>®</sup> ( $72.31 \pm 11.69$ )와 유의미한 차이가 없었으며 Perfect<sup>®</sup> ( $329.3 \pm 51.59$ )와 Crystalline V<sup>®</sup> ( $281 \pm 46.81$ )는 Succes<sup>®</sup>보다 컸다. Sz도 Invu<sup>®</sup> ( $645 \pm 54.8$ )와 Inspire Ice<sup>®</sup> ( $622 \pm 68.1$ )는 대조군인 Succes<sup>®</sup> ( $704 \pm 89.6$ )와 유의미한 차이가 없었으며 Perfect<sup>®</sup> ( $2,424 \pm 301.6$ )와 Crystalline V<sup>®</sup> ( $2,250 \pm 368.6$ )는 Succes<sup>®</sup>보다 컸다. Perfect<sup>®</sup>와 Crystalline V<sup>®</sup> 사이에서는 Sa, Sq, Sz 모두 유의미한 차이가 없었으며 Invu<sup>®</sup>와 Inspire Ice<sup>®</sup> 사이에서도 Sa, Sq, Sz 모두 유의미한 차이가 없었다.



**Fig 6.** Three-dimensional topographic images of control group (A) and experimental groups (B - E). A, Succes<sup>®</sup>; B, Inspire Ice<sup>®</sup>; C, Perfect<sup>®</sup>; D, Crystalline V<sup>®</sup>; E, Invu<sup>®</sup>.

**Table 1.** Sa extracted from each surface of bracket slot using scanning probe image processor (n = 36)

Bracket type	Sa: Mean ± SD (nm)
Succes <sup>®</sup>	52.80 ± 8.54 <sup>a</sup>
Inspire Ice <sup>®</sup>	45.90 ± 7.89 <sup>a</sup>
Perfect <sup>®</sup>	251.70 ± 38.35 <sup>b</sup>
Crystalline V <sup>®</sup>	220.20 ± 37.92 <sup>b</sup>
Invu <sup>®</sup>	47.00 ± 6.68 <sup>a</sup>

<sup>a,b</sup>Groups with different letters were significantly different from each other at the level of  $p < 0.05$ .

## 고찰

### 실험방법(AFM)에 대한 고찰<sup>18,19</sup>

원자현미경 탐침의 끝은 원자 몇 개 정도의 크기인데 이러한 탐침이 시료 표면에 접근하면 탐침 끝의 원자와 시료 표면의 원자 사이에 서로의 거리에 따라 끌어당기는 힘(인력)과 밀치는 힘(척력)이 작용하게 된다(반데르발스 힘). 이 때 인력을 이용하는 방식을 비접촉식 모드(non-contact mode), 척력을 이용하는 것을 접촉식 모드(contact mode)라 한다.

접촉식 모드에서는 척력을 사용하는데 이러한 1 - 10 nN 정도의 미세한 힘에 의해서 캔틸레버가 휘

**Table 2.** Sq and Sz extracted from each surface of bracket slot using scanning probe image processor (n = 36)

Bracket type	Sq: Mean ± SD (nm)	Sz: Mean ± SD (nm)
Succes <sup>®</sup>	72.31 ± 11.69 <sup>a</sup>	704.0 ± 89.6 <sup>c</sup>
Inspire Ice <sup>®</sup>	62.7 ± 12.82 <sup>a</sup>	622.0 ± 68.1 <sup>c</sup>
Perfect <sup>®</sup>	329.3 ± 51.59 <sup>b</sup>	2,424.0 ± 301.6 <sup>d</sup>
Crystalline V <sup>®</sup>	281.0 ± 46.81 <sup>b</sup>	2,250.0 ± 368.6 <sup>d</sup>
Invu <sup>®</sup>	65.3 ± 10.39 <sup>a</sup>	645.0 ± 54.8 <sup>c</sup>

<sup>a,b,c,d</sup>Groups with different letters were significantly different from each other at the level of  $p < 0.05$ .

어지는 정도는 캔틸레버 윗면에서 반사된 레이저의 각도를 포토다이오드(photodiode)로 측정하여 알 수 있으며 0.01 nm 정도의 미세한 움직임까지 측정해 낼 수 있다. 이러한 접촉식 모드 원자현미경은 대기 중에서도 버퍼용액 같은 액상에서도 측정 가능하다는 장점뿐 아니라 고속 표면 분석이 가능하고 높낮이 변화가 심한 거친 시료의 경우도 쉽게 분석 가능하다는 것이 특징이다. 단, 생물학적 시료나 고분자 같은 부드럽고 약한 시료의 경우 접촉 시 표면에 작용하는 힘이 커서 손상이 생길 수 있다는 단점이 있다.

비접촉식 모드에서는 0.01 - 1 nN 정도인 원자 간



인력을 사용하는데 접촉식에 비해 훨씬 작으므로 손상되기 쉬운 부드러운 시료의 측정에 유리하게 사용될 수 있다. 비접촉식 모드 원자현미경에서는 캔틸레버를 공진주파수 부근에서 기계적으로 진동 시키는데 이러한 탐침이 시료 표면에 근접하면 원자간 인력에 의해 캔틸레버의 공진주파수가 변하게 되어 진폭과 위상에 변화가 생기게 되는데 그 변화를 lock-in amplifier로 측정한다. 즉 캔틸레버의 진폭(amplitude)을 일정하게 유지시키기 위하여 탐침이나 시료를 상하로 움직이게 되고 이로 인해 시료의 표면 형상을 분석할 수 있다. 탐침이 시료에 직접적으로 접촉하지 않으므로 시료의 손상 없이 표면 측정이 가능하다는 장점을 가진다. 하지만 적은 공진 주파수와 큰 탄성계수를 가지는 캔틸레버를 사용하여야 하며 시료 표면에 존재하는 흡수층 등에 의해 실제 표면 형태 분석에 방해 받을 수 있다는 단점을 가진다. 이번 실험에서는 브라켓 슬롯 표면의 미세한 손상을 최소화하기 위해 비접촉식 모드를 사용하였다.

일반적인 광학현미경은 약 200 nm 정도의 분해능(resolution)만 가지며 그보다 더 높은 분해능(약 100 Å)을 가진 전자현미경(EM)의 경우 시료를 진공에서 관찰해야 한다는 제한을 가진 반면 원자현미경은 0.1 Å 이상의 수직 분해능을 가지면서 시료의 전 처리가 거의 필요 없으므로 전자현미경에 비해 우수한 3차원 영상을 구현할 뿐 아니라 정량적인 분석이 가능하다.

원자현미경의 탐침의 끝은 원자 몇 개 정도의 크기로 미세하기 때문에 시료에 오목한 부위가 있으면 접근이 불가능하다는 단점이 있다. 이번 실험에서 브라켓의 wings를 제거한 이유는 슬롯바닥을 관찰할 때 슬롯의 측벽이 오목한 부분을 만들어서 탐침의 접근이 불가능하게 하기 때문이다. 따라서, 슬롯의 바닥과 측벽의 표면조도가 비슷하다는 가정하에서 슬롯의 바닥만을 관찰하였다.

## 결과에 대한 고찰

1986년 처음 소개된 이후 주요 교정재료 제조사들에 의해 다양한 종류의 세라믹 브라켓<sup>30</sup>들이 현재 제공되고 있다.<sup>31,32</sup> 세라믹 브라켓은 단결정과 다결정체로 나뉘며<sup>33-35</sup> 실험에서 사용된 브라켓 중 Inspire Ice<sup>®</sup>와 Perfect<sup>®</sup>는 단결정 알루미늄이며 슬롯은 둘 다 절삭(milling)에 의해 제조되었다. 실험에서 사용된 브라켓 중 Crystalline<sup>®</sup>과 Invu<sup>®</sup>는 다결

정 알루미늄이다. Crystalline V<sup>®</sup>는 슬롯은 절삭에 의해 제조되었고 슬롯 표면에 실리카 라이너를 용착하여 슬롯의 모서리와 세라믹 부분이 완전히 가려지게 하였으며 이로 인해 마찰로 인한 아치와이어의 손상을 방지하고 부드러운 이동이 가능하게 하였다. Invu<sup>®</sup>의 슬롯은 용융주입(injection molding)에 의해 제조되었으며 슬롯의 내외측 코너 부분을 둥글게 하여(rounding) 아치 와이어와의 마찰에 의한 마모로 인해 코너가 날카로워지는 것을 막았다.

본 연구의 결과를 보면 Invu<sup>®</sup>와 Inspire Ice<sup>®</sup>는 Sa, Sq, Sz 모두 대조군인 Succes<sup>®</sup>와 유의미한 차이가 없었으며 Perfect<sup>®</sup>와 Crystalline V<sup>®</sup>는 Succes<sup>®</sup>보다 유의미하게 컸다. Perfect<sup>®</sup>와 Crystalline V<sup>®</sup> 사이에서는 Sa, Sq, Sz 모두 유의미한 차이가 없었으며 Invu<sup>®</sup>와 Inspire Ice<sup>®</sup> 사이에서도 Sa, Sq, Sz 모두 유의미한 차이가 없었다. 이 결과를 종합해 보면 스테인리스 스틸브라켓이며 대조군인 Succes<sup>®</sup>와 단결정 알루미늄 브라켓인 Inspire Ice<sup>®</sup>, 다결정 알루미늄 브라켓인 Invu<sup>®</sup>의 슬롯 표면이 유사하게 낮은 조도를 가지며 다결정 알루미늄 브라켓인 Crystalline V<sup>®</sup>와 단결정 알루미늄 브라켓인 Perfect<sup>®</sup>가 거친 슬롯 표면을 가진 것으로 판단된다.

그동안 여러 연구들에서 브라켓 슬롯 표면조도는 주사전자현미경을 사용하여 측정하였으며 주사전자현미경의 분해능은 약 100 Å (10 nm)<sup>18</sup>이고 본 실험에서 측정되었던 브라켓의 조도 파라미터 중 가장 작은 것이 Inspire Ice<sup>®</sup>의 Sa인 45.9 nm이므로 주사전자현미경은 브라켓의 표면조도를 관찰할 수 있을 정도의 분해능을 가진 것으로 판단되며 따라서 기존 연구들의 주사전자현미경상이 양호한 해상도를 나타내었다. 그러나, 기존 연구에서는 정량화된 표면조도를 제시하지는 못하였고 따라서, 본 연구는 브라켓 슬롯 표면조도를 정량화하기 위하여 원자현미경을 사용하였다. 과거에 몇몇 논문에서 세라믹 브라켓이 스테인리스 스틸 브라켓보다 더 거칠고<sup>2,10</sup> 다결정 알루미늄 브라켓이 단결정 알루미늄 브라켓보다 더 거친 것으로 발표하였으나<sup>11</sup> 본 실험의 연구 결과 세라믹 브라켓 중 Invu<sup>®</sup>와 Inspire Ice<sup>®</sup>는 스테인리스 스틸 브라켓인 대조군과 비슷한 표면조도를 나타내었고 Invu<sup>®</sup>는 다결정 알루미늄 브라켓이지만 비교적 매끈한 슬롯 표면을 나타내었으며 Perfect<sup>®</sup>는 단결정 알루미늄 브라켓이지만 비교적 거친 슬롯 표면을 나타내었다. 따라서, 유사한 재료의 브라켓이라도 유사한 슬롯 표면조도를 가지지 않을 수 있으며 다양한 표면조도를 보임을 알 수

있었다. 본 연구의 결과가 과거 연구 결과와 차이가 나는 이유는 아마도 과거 연구에서 사용되었던 브라켓이 이번 연구에서 사용되었던 브라켓 제품과 제조사가 달랐기 때문으로 생각된다(예를 들어, Pratten 등<sup>2</sup>의 논문은 Unitek사의 스테인리스 스틸 브라켓과 GAC사의 세라믹 브라켓, Bednar 등<sup>10</sup>의 논문은 Ormco사의 스틸 브라켓과 Orec의 스틸 브라켓과 GAC사의 세라믹 브라켓). 또한 기존 연구에서는 스틸 브라켓과 세라믹 브라켓을 한두 종류만 사용하여 연구한 경우가 많았기 때문에 다양한 제품에 대한 비교가 부족했었던 것으로 판단된다.

Omana 등<sup>8</sup>은 용융주입법(injection-molded) 세라믹 브라켓이 다른 세라믹 브라켓보다 매끄럽고 마찰이 적다고 하였으며 다결정 알루미늄 브라켓이지만 Invu<sup>®</sup>의 슬롯 표면이 매끄러운 것은 다른 세라믹 브라켓과 달리 슬롯 제작 시 하이테크의 용융주입법을 사용했기 때문으로 판단된다. Russell<sup>36</sup>은 Inspire Ice<sup>®</sup>의 경우 붕소 탄화물 텀블링 과정(boron carbide tumbling process)과 열연마(heat polishing)로 인해 매끄러운 표면을 가진다고 하였으며 이 때문에 본 연구에서 Inspire Ice<sup>®</sup>가 유사한 재질의 단결정 알루미늄 브라켓인 Perfect<sup>®</sup>보다 표면조도가 낮았던 것으로 생각된다.

브라켓의 표면조도와 마찰력과의 연관성에 대해서는 다양한 연구가 진행되어져 왔다. Proffit 등<sup>37</sup>과 Kusy<sup>38</sup>는 스테인리스 스틸 브라켓과 세라믹 브라켓의 표면조도를 비교하여 다결정 알루미늄 브라켓의 표면이 가장 거칠며 이는 세라믹 브라켓의 제작과정에서 연마가 어려워 울퉁불퉁한 표면을 가지기 때문이라고 하였다. 또 이것 때문에 다결정 알루미늄 브라켓의 마찰력이 크다고 하였다. Angolkar 등<sup>1</sup>은 단결정 알루미늄 브라켓의 표면이 금속처럼 매끄럽지만 스테인리스 스틸 브라켓보다 큰 마찰력을 보이는데 이는 와이어와 브라켓 재료 간의 화학적 상호작용 때문일 것이라고 보고하였다. Saunders와 Kusy<sup>11</sup>는 표면조도의 차이에도 불구하고 단결정 알루미늄과 다결정 알루미늄의 마찰력은 유의한 차이가 없었으며 이는 세라믹 브라켓의 내부 화학구조와 관련이 있다고 하였다. Je 등<sup>39</sup>은 일반적인 세라믹 슬롯이면서 슬롯 기저면이 각지게 처리된 단결정 알루미늄 계열의 Inspire Ice<sup>®</sup>가 다른 스테인리스 스틸 브라켓이나 메탈 슬롯이 첨가된 다른 브라켓보다 마찰력이 더 크게 나타났으며 다결정 알루미늄 계열의 Crystalline V<sup>®</sup>는 선재와 접촉되는 슬롯 내면에 실리카 라이너를 용착하여 슬롯의 모서리와

세라믹 부분이 완전히 가려져 있고 아치와이어와 직접 접촉하는 슬롯 내면은 세라믹 재질이 아니므로 슬롯 내면에서 발생하는 마찰력이 가장 작게 나타난다고 하였다.

이러한 기존의 연구들을 종합해 보면 본 연구에서 측정된 브라켓 슬롯의 표면조도가 브라켓과 아치와이어 사이의 마찰력을 직접적으로 좌우한다고 보기는 힘들며 마찰력에 영향을 미치는 다른 요소들이 많기 때문에 이러한 요소들과 브라켓 슬롯 조도와와의 관계에 대해서 더 많은 연구가 필요할 것으로 생각한다.

또, 스테인리스 스틸 브라켓의 슬롯 표면의 조도도 제품마다 다양할 가능성이 있기 때문에 향후 다른 종류의 스테인리스 스틸 브라켓 슬롯 표면을 관찰하여 대조군으로 사용된 Succes<sup>®</sup>가 스테인리스 스틸 브라켓의 표면조도를 대표할 수 있는지에 대한 연구가 진행되어야 할 것이며 더 많은 종류의 세라믹 브라켓의 슬롯 표면을 관찰할 필요성이 있을 것으로 판단된다. 또 브라켓이 실질적으로 구강 내에서 어떠한 표면조도와 마찰력의 변화를 나타내는지에 대해서도 지속적인 연구를 진행할 계획이다.

## 결론

이 연구는 원자현미경(AFM)을 사용하여 다섯 종류의 브라켓 슬롯의 표면조도를 정량적으로 측정하여 세라믹 브라켓이 스테인리스 스틸 브라켓보다 더 거칠고 다결정 알루미늄 브라켓이 단결정 알루미늄 브라켓보다 더 거친지 규명하는데 목적이 있다.

대조군인 스테인리스 스틸 브라켓(Succes<sup>®</sup>)과 두 종류의 단결정 알루미늄(Inspire Ice<sup>®</sup>, Perfect<sup>®</sup>)와 두 종류의 다결정 알루미늄(Crystalline V<sup>®</sup>, Invu<sup>®</sup>)를 광학현미경 500배로 관찰한 후 원자현미경을 사용하였다. 원자현미경 이미지는 Nanostation II<sup>™</sup> (Surface Imaging Systems, Herzogenrath, Germany)를 사용하여 관찰하였다.

결과는 다음과 같다.

Sa, Sq, Sz 모두 Invu<sup>®</sup>와 Inspire Ice<sup>®</sup>는 대조군인 Succes<sup>®</sup>와 유의미한 차이가 없었으며 Perfect<sup>®</sup>와 Crystalline V<sup>®</sup>는 Succes<sup>®</sup>보다 컸다.

Perfect<sup>®</sup>와 Crystalline V<sup>®</sup> 사이에서는 Sa, Sq, Sz 모두 유의미한 차이가 없었다.

Invu<sup>®</sup>와 Inspire Ice<sup>®</sup> 사이에서는 Sa, Sq, Sz 모두 유의미한 차이가 없었다.

대조군인 Succes<sup>®</sup>와 단결정 브라켓인 Inspire Ice<sup>®</sup>,



다결정 브라켓인 Invu<sup>®</sup>가 비교적 매끄러운 슬롯 표면을 가지고 다결정 브라켓인 Crystalline V<sup>®</sup>와 단결정 브라켓인 Perfect<sup>®</sup>가 비교적 거친 슬롯 표면을 가진 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- Angolkar PV, Kapila S, Duncanson MG Jr, Nanda RS. Evaluation of friction between ceramic brackets and orthodontic wires of four alloys. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1990;98:499-506.
- Pratten DH, Popli K, Germane N, Gunsolley JC. Frictional resistance of ceramic and stainless steel orthodontic brackets. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1990;98:398-403.
- Sung HM, Park YC. Comparison of the frictional resistance between orthodontic bracket & archwire. *Korean J Orthod* 1991;21:543-59.
- Riley JL, Garrett SG, Moon PC. Frictional forces of ligated plastic and metal edgewise brackets. *J Dent Res* 1979;58:A21.
- Drescher D, Bourauel C, Schumacher HA. Frictional forces between bracket and arch wire. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1989;96:397-404.
- Kusy RP, Whitley JQ, Mayhew MJ, Buckthal JE. Surface roughness of orthodontic archwires via laser spectroscopy. *Angle Orthod* 1988;58:33-45.
- Sims AP, Waters NE, Birnie DJ, Pethybridge RJ. A comparison of the forces required to produce tooth movement in vitro using two self-ligating brackets and a pre-adjusted bracket employing two types of ligation. *Eur J Orthod* 1993;15:377-85.
- Omana HM, Moor RN, Bagby MD. Frictional properties of metal and ceramic brackets. *J Clin Orthod* 1992;26:425-32.
- Dowling PA, Jones WB, Lagerstrom L, Sandham JA. An investigation into the behavioral characteristics of orthodontic elastomeric modules. *Br J Orthod* 1998;25:197-202.
- Bednar JR, Gruendeman GW, Sandrik JL. A comparative study of frictional forces between orthodontic brackets and arch wires. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1991;100:513-22.
- Saunders CR, Kusy RP. Surface topography and frictional characteristics of ceramic brackets. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1994;106:76-87.
- Zinelis S, Eliades T, Eliades G, Makou M, Silikas N. Comparative assessment of the roughness, hardness, and wear resistance of aesthetic bracket materials. *Dent Mater* 2005;21:890-4.
- Horton CB, Paulus HM, Pelleu GB, Rudolph JJ. An evaluation of commercial pastes for finishing composite resin surfaces. *J Prosthet Dent* 1977;37:674-9.
- Roulet JF, Roulet-Mehrens TK. The surface roughness of restorative materials and dental tissues after polishing with prophylaxis and polishing pastes. *J Periodontol* 1982;53:257-66.
- Cassinelli C, Morra M. Atomic force microscopy studies of the interaction of a dentin adhesive with tooth hard tissue. *J Biomed Mater Res* 1994;28:1427-31.
- Marshall GW Jr, Balooch M, Tench RJ, Kinney JH, Marshall SJ. Atomic force microscopy of acid effects on dentin. *Dent Mater* 1993;9:265-8.
- Marshall GW Jr, Balooch M, Kinney JH, Marshall SJ. Atomic force microscopy of conditioning agents on dentin. *J Biomed Mater Res* 1995;29:1381-7.
- Park HK. Atomic microscopy in kidney research. The 5th Congress of nephrology. Kyunghee Univ 2007 Nov:127-32.
- Park WQ. A study on surface roughness of metals after finishing and polishing - an atomic force microscope study. A master's thesis Kyunghee Univ. 1998.
- Jalili N, Laxminarayana K. A review of atomic force microscopy imaging systems: application to molecular metrology and biological sciences. *Mechatronics* 2004;14:907-45.
- Widu F, Drescher D, Junker R, Bourauel C. Corrosion and biocompatibility of orthodontic wires. *J Mater Sci Mater Med* 1999;10:275-81.
- Huang HH. Variation in surface topography of different NiTi orthodontic archwires in various commercial fluoride-containing environments. *Dent Mater* 2007;23:24-33.
- Bourauel C, Fries T, Drescher D, Plietsch R. Surface roughness of orthodontic wires via atomic force microscopy, laser specular reflectance, and profilometry. *Eur J Orthod* 1998;20:79-92.
- Lin MC, Lin SC, Lee TH, Huang HH. Surface analysis and corrosion resistance of different stainless steel orthodontic brackets in artificial saliva. *Angle Orthod* 2006;76:322-9.
- Kim HS, Woo JH. A study on surface roughness of composite resins after finishing and polishing - an atomic force microscope study. *J Korean Acad Prosthodont* 1997;35:719-41.
- Valois CR, Silva LP, Azebedo RB. Atomic force microscopy study of stainless-steel and nickel-titanium files. *J Endod* 2005;31:882-5.
- Lamolle SF, Monjo M, Lyngstadaas SP, Ellingsen JE, Haugen HJ. Titanium implant surface modification by cathodic reduction in hydrofluoric acid: surface characterization and in vivo performance. *J Biomed Mater Res A* 2009;88:581-8.
- El Feninat F, Ellis TH, Sacher E, Stangel I. A tapping mode AFM study of collapse and denaturation in dentinal collagen. *Dent Mater* 2001;17:284-8.
- Freitas A, Espejo LC, Botta SB, Teixeira FS, Luz MA, Garone-Netto N, et al. AFM analysis of bleaching effects on dental enamel microtopography. *Appl Surf Sci* 2010;256:2915-9.
- Graber TM. Orthodontics: current principles and techniques. 3th ed. St. Louis: Elsevier; 2000. p. 330-2.
- Birnie D. Ceramic brackets. *Br J Orthod* 1990;17:71-5.
- Fox NA, McCabe JF. An easily removable ceramic bracket? *Br J Orthod* 1992;19:305-9.
- Swartz ML. Ceramic brackets. *J Clin Orthod* 1988;22:82-8.
- Gwinnett AJ. A comparison of shear bond strengths of metal and ceramic brackets. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1988;93:346-8.
- Phillips HW. The advent of ceramics. *J Clin Orthod* 1988;22:69-70.
- Russell JS. Aesthetic orthodontic brackets. *J Orthod* 2005;32:146-63.
- Proffit WR, Fields HW, Sarver DM. Contemporary orthodontics. St Louis: Mosby; 2000. p. 385-416.
- Kusy RP. Morphology of polycrystalline alumina brackets and its relationship to fracture toughness and strength. *Angle Orthod* 1988;58:197-203.
- Je YJ, Chang MH, Lim YK, Lee DY. Evaluation of friction of esthetic brackets according to different bracket-wire angulations. *Korean J Orthod* 2007;37:341-50.

## Surface roughness analysis of ceramic bracket slots using atomic force microscope

Ki-Ho Park, DMD, MSD, PhD,<sup>a</sup> Hyun-Joo Yoon, DMD,<sup>a</sup> Su-Jung Kim, DMD, MSD, PhD,<sup>b</sup>  
Gi-Ja Lee, BS, MS, PhD,<sup>c</sup> Hun-Kuk Park, MD, MMS, PhD,<sup>d</sup> Young-Guk Park, DMD, MSD, PhD<sup>c</sup>

**Objective:** This study was designed to measure the surface roughness at the slot floor of various ceramic brackets. **Methods:** One kind of stainless steel bracket (Succes<sup>®</sup>), two kinds of monocrystalline brackets (Inspire Ice<sup>®</sup>, Perfect<sup>®</sup>) and two kinds of polycrystalline brackets (Crystalline V<sup>®</sup>, Invu<sup>®</sup>) were examined. Atomic force microscopy (AFM) was used to measure the surface roughness of each bracket. Data acquisition and processing were performed using SPIP<sup>™</sup>. **Results:** The differences in values of Sa, Sq, and Sz in Invu<sup>®</sup> and Inspire Ice<sup>®</sup> were not statistically different from the control group Succes<sup>®</sup>. The values of Sa, Sq, and Sz of Perfect<sup>®</sup> and Crystalline V<sup>®</sup> were greater than those of Succes<sup>®</sup>. Differences of all the Sa, Sq, and Sz values between Perfect<sup>®</sup> and Crystalline V<sup>®</sup> were not statistically significant. **Conclusions:** It is concluded that the slot surfaces of Succes<sup>®</sup>, Inspire Ice<sup>®</sup>, and Invu<sup>®</sup> were smooth compared to those of Crystalline V<sup>®</sup> and Perfect<sup>®</sup>. (*Korean J Orthod* 2010;40(5):294-303)

**Key words:** AFM, Surface roughness, Bracket slot

<sup>a</sup>Clinical Instructor, <sup>b</sup>Assistant Professor, <sup>c</sup>Professor, Department of Orthodontics, College of Dentistry, Kyunghee University.

<sup>c</sup>Chief Researcher, <sup>d</sup>Professor, Department of Biomedical Engineering, College of Medicine, Kyunghee University.

*Corresponding author: Young-Guk Park.*

*Department of Orthodontics, College of Dentistry, Kyunghee University, 1 Hoegi-dong, Dongdaemun-gu, Seoul 130-702, Korea.*

*+82 2 958 9392; e-mail, ygpark@khu.ac.kr.*

Received February 17, 2010; Last Revision June 24, 2010; Accepted June 30, 2010.