

제 3 장

자가결찰의 생역학: 자가결찰 브라켓에 의한 힘과 모멘트의 분석

Nikolaos Pandis, Theodore Eliades and Christoph Bourauel

서론

자가결찰 브라켓은 탄성고무재 결찰이나 SS 결찰을 대체하고 치료 효율을 향상시키기 위해 도입되었다.¹⁻³ 자가결찰의 주된 장점은 안정된 와이어의 적용(engage)과 결찰을 위한 방문 횟수의 감소이다.⁴⁻⁵ 게다가 새로운 결찰 방식으로 약한 힘을 가할 수 있고, 마찰력이 감소하여 치아이동 속도가 빨라진다. 동일한 단면과 탄성계수를 갖는 와이어에서 작용하는 힘은, 브라켓 간 거리, 결찰 방식, 결찰된 치아의 수에 따라 달라진다. 작용하는 힘의 크기에 영향을 미치는 또 다른 요소로 브라켓 간 거리와 관련되는 총생의 정도, 결찰이 느슨해져서 치아로 전달되는 힘이 변화되는 것이 있다.^{7,8} 약한 힘을 가하는 것이 강조되고 있지만, 총생 치열에서 자가결찰 브라켓에 적용된 와이어가 발휘하는 힘이나 모멘트에 대한 자료는 드물다.^{9,10}

이 장(chapter)에서는 최근의 자료들을 토대로 전통적인 브라켓과 자가결찰 장치를 비교하는 생역학에 대해 알아보고자 한다. 소개될 4개의 연구는 모의실험을 통하여 전통적

인 브라켓(Orthos2, ORMCO), 수동형 자가결찰 브라켓(Damon 2, ORMCO) 및 능동형 자가결찰 브라켓(In-Ovation R, GAC)의 합입-정출, 험-설측 이동 시의 힘과 회전 이동 시 모멘트를 비교 평가해 본 것이다.

생역학 실험 설계는 다음과 같다. 총생이 있는 환자의 하악에서 치료 전 상태와 초기 배열 후 상태의 레진 모형을 각각 제작하고, 모형에 작용하는 힘과 모멘트를 Bonn 대학의 시스템(Orthodontic Measurement and Simulation System, OMSS)으로 측정하였다.¹¹ 특별하게 제작된 OMSS의 주요부분은 3차원적으로 힘과 모멘트를 동시에 측정할 수 있는 2개의 힘-모멘트 센서를 가지고 있다. 두 개의 센서는 모터로 움직이는 위치결정 대(positioning table)에 장착되어 3차원적으로 움직일 수 있고, 모든 기계적인 구성요소들은 온도-조절장치(temperature-controlled chamber) 내에 위치하며, 컴퓨터와 연결된다. 다양한 측정이 가능하고 응력-변형 곡선을 얻을 수 있으므로, 이 시스템을 사용하여 모의 치아이동 시 발생하는 힘에 대해 연구할 수 있다.

자가결찰 브리켓과 전통 브리켓을 사용한 초기 배열단계에서 발생하는 힘

첫 번째 실험¹²은 0.014" copper-nickel-titanium을 초기 와이어로 사용하였을 때 발생하는 힘과 모멘트를 평가하였는데, Damon 와이어(ORMCO)를 하악 총생에 적용한 중례가 그림 3.1에 제시되어 있다. 측절치는 설측으로 변위되어 있기 때문에 와이어 적용 시 수직방향(함입-정출)보다 협-설측으로 더 강한 힘을 받는다(그림 3.2). 그림 3.3에서 세 가지 브리켓이 치아에 가하는 힘을 살펴보았는데, Damon 2 브리켓에서 초기에 큰 힘을 나타냈다.

세 가지 브리켓에서 힘의 크기는 복잡하게 나타나고 결찰 방법, 브리켓 너비, 치열궁 형태, 치아 위치 등 여러 가지 요인이 영향을 미치는 것으로 보인다. 예를 들면 설측에 위치한 하악 측절치의 이동 시, 수직방향(함입-정출) 힘은 Damon 2 브리켓을 사용했을 때 가장 작은 값을 보였으나, 순-설측 방향 힘은 자가결찰 브리켓에서 큰 값을 나타냈다(그림 3.4).

세 가지 브리켓에 대하여 측정된 모멘트 값은 치아에 가해지는 힘과 모멘트에 치아이동 방향이 미치는 영향을 나타



그림 3.1 설측변위된 하악 측절치에 가해지는 힘을 측정하기 위해 이용한 전형적인 하악 총생치열.

냈다. 자가결찰 브리켓이 수직 축에서 작은 모멘트를 보이는 경향이 있었지만, 협설측 방향에서는 모멘트 값의 순서가 바뀌었고 심지어 반대가 되기도 하였다. 이러한 모멘트 값의 차이는 슬롯의 닫히는 구성요소(closing component)가 견고하지 않을 경우 느슨해져서 치아에 작용하는 힘이 작아지기 때문이다. 일부 수치의 차이는 임상적으로 유의하지 않을 수도 있지만, 어떤 이동에 대하여는 차이가 매우 크

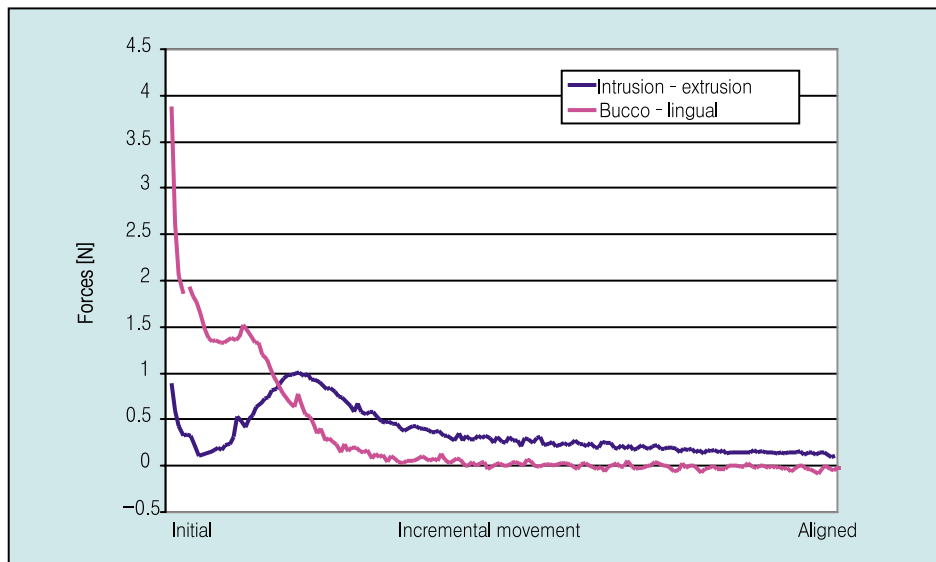


그림 3.2 그림 3.1에 나타난 설측변위된 하악 측절치에 와이어 적용 및 배열 시 힘의 변화. 측절치 변위 방향에서 예상할 수 있듯이 협설 방향으로 더 큰 힘이 작용하는 것에 주목하라.

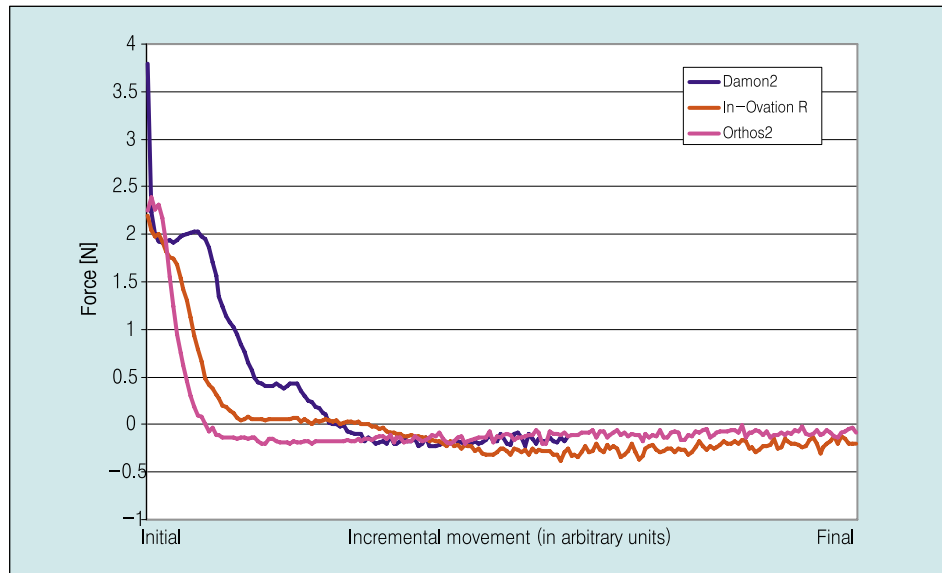


그림 3.3 그림 3.1에 나타난 설측변위된 하악 측절치에 전통적 브라켓, 능동형/수동형 자가결찰 브라켓을 사용하여 와이어 적용 및 배열 시 협설 방향 힘의 변화. 초기 와이어 삽입시에 Damon 2 브라켓에서 큰 힘을 발휘한다.

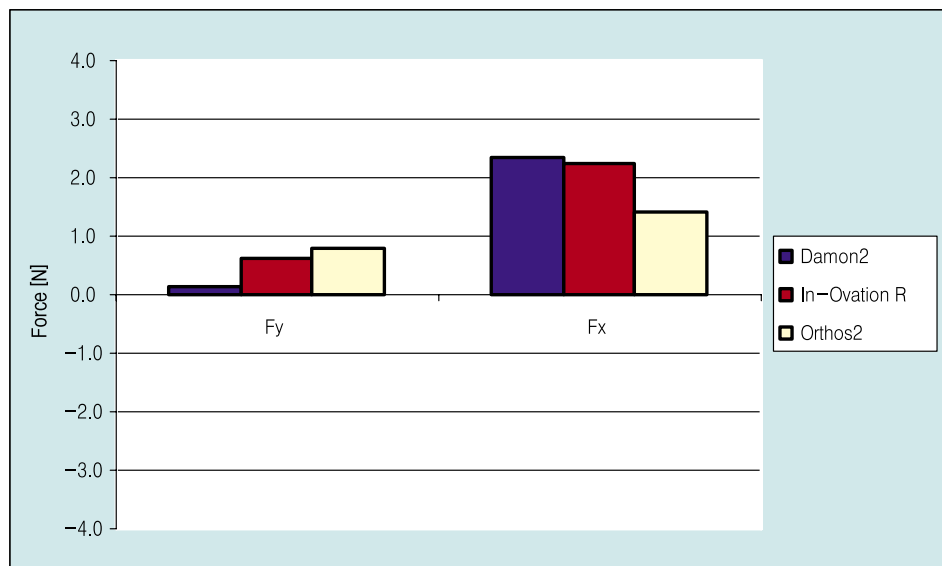


그림 3.4 전통적인 브라켓과 자가결찰 브라켓의 슬롯에 와이어 삽입 시 측절치에 발생하는 수직방향(F_y), 협설방향(F_x) 힘. 수직방향에서는 자가결찰 브라켓에 발생하는 힘의 크기가 작으나 협설방향에서는 그 반대임에 주목하라.

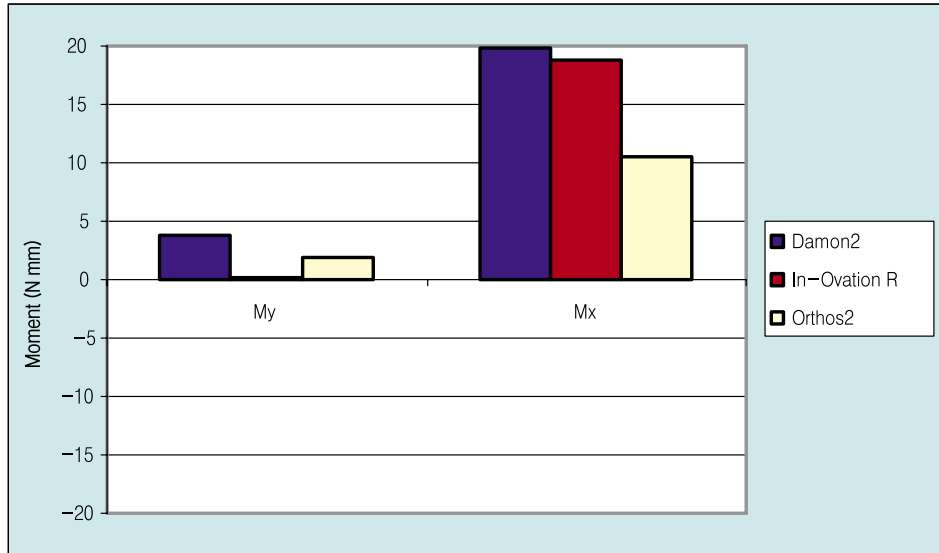


그림 3.5 전통적인 브라켓과 자가결찰 브라켓의 슬롯에 와이어 삽입 시 측절치에 발생하는 수직방향(Fy), 협설방향(Fx-근 원심 경사) 모멘트. 수직방향과 협-설축 방향 모멘트의 다양성에 주목하라. 모든 방향에서 Damon 2 브라켓에 큰 모멘트가 발생한다.

게 나타났다. 예를 들면 Damon 2 브라켓은 총생 상태의 측절치에서 20Nmm 가량의 모멘트를 발휘하지만 전통적인 장치는 같은 치아에서 이의 절반에 해당하는 모멘트만을 발휘한다. 그림 3.5는 수직축(My) 및 협-설축(Mx-근 원심 경사 모멘트)상에서 발생하는 모멘트의 절대값을(방향은 나타내지 않음) 나타내고 있다.

자가결찰 브라켓에서 특정 방향에서 힘의 크기가 감소하는 것은 와이어의 play가 증가하고 탄성고무 결찰의 접촉 같은 장애물이 없기 때문이다. 자가결찰 브라켓이 닫히는 방법(수동형 또는 능동형)은 발생하는 힘에 영향을 줄 수 있다. Damon 2 브라켓과 같은 단단한 협축 슬롯 벽은 브라켓이 설축 위치할 때 외측 슬롯 벽에 와이어가 접촉하게 됨으로써 와이어의 이동을 제한하는 요인으로 작용한다. 반대로, In-Ovation R과 같이 탄성 변형되는 클립은 유연하게 작용하여 와이어를 누르게 된다. 전통적인 브라켓은 이러한 네 번째 벽을 갖지 않으나 탄성고무 결찰이 와이어의 이동을 제한한다. 게다가 교정치료 중 여닫는 과정에서 능동형 자가결찰 브라켓의 변성(aging)으로 인해 와이어 삽입 시 발생하는 힘이 변할 수 있다.⁷

이 연구의 결과는 브라켓 간 거리만으로는 와이어 삽입 시에 발생하는 힘을 예측할 수 없다는 것을 시사한다. 이는 특히 가장 작은 너비를 갖는 브라켓(Damon 2)에서 확연히 드러난다; Damon 2 브라켓에서 항상 작은 힘이 발휘되지는 않았는데, 이것은 결찰 유형이 브라켓 간 거리보다 큰 영향을 미친다는 것을 나타낸다.

이번 연구의 실험 설계는 유사한 다른 연구에서처럼 하나의 치아에만 와이어를 삽입하는 대신,^{13,14} 하악 치열의 10개의 치아에 와이어를 적용하여 발휘되는 힘을 측정하였다; 이로써 작용하는 힘이 크게 달라졌을 것이다.

전통적인 브라켓이나 자가결찰 브라켓에 와이어 삽입 시 발생하는 힘의 크기를 조사한 연구는 적은 편이며, 와이어의 응력이 아니라 치아에 작용하는 힘을 측정한 연구는 더 더욱 드물다. Kasuya 등¹⁵은 금속 막대에 하악 절치 브라켓을 위치시키고 다양한 결찰 방법에 따른 first-order 변형 동안 와이어의 응력을 측정한 바 있다. 이들은 0.016"의 NiTi 와이어와 최대 1500µm의 변형(deflection)을 사용하였다. 이 연구에서 수동형 자가결찰보다 탄성고무 결찰이 더 큰 응력을 발생시키는 것이 밝혀졌다. 그러나 상기 연구의

재료와 방법은 이번 연구와 매우 상이하고, 특히 임상과 연관성이 적다. 반대로, 이번 연구에서와 유사한 실험 설계를 사용한 다른 연구¹⁶에서는 전체 브라켓과 0.014" NiTi 와이어를 사용하였는데, 브라켓간에 발생하는 힘의 차이가 매우 크게 나타났다. 게다가 치열궁의 특정 부위에서는 수동형 자가결찰 브라켓에서 발휘되는 힘이 크게 나타났으며 이러한 결과는 저자의 이번 연구결과에 부합된다.

모의 함입-정출 및 헵-설측 이동 실험에서 전통적인 브라켓과 자가결찰 브라켓에 의해 발생하는 힘

이 섹션(section)은 치아를 헵-설측 이동 및 함입-정출 이동 시킬 때 치아이동량과 발생하는 힘의 관계에 대한 연구¹⁷를 요약하고 있다. 그림 3.6은 이러한 연구를 위해 설계된 OMSS이다.

0.014"×0.025" Cu-NiTi Damon 아치 폼 와이어를 후 기배열단계의 레진 모형에 접착된 브라켓에 결찰한 후 힘을 측정한다. 초기 레벨링과 배열로 와이어의 아치 폼에 대한 치관의 변위량이 감소할 것으로 기대할 수 있으므로, 이 실험에서 사용한 변위의 양은 수직적으로는 2mm 이내, 안팎으로는 1mm로 제한하였다.

연구 결과 응력/변형 곡선은 와이어의 특성에 크게 의존하는 곡선을 나타낸다. 함입-정출 이동에서(그림 3.7a) 치아이동 방향은 발생하는 힘의 크기에 영향을 미치지 않았는데, 세 가지 브라켓 모두에서 이러한 결과를 얻었다. 이는 함입-정출 시에는 세 가지 브라켓 간에 큰 차이를 보이지 않는 슬롯의 절단이나 치은 측 벽에 힘이 적용되기 때문일 것이다. 자가결찰 브라켓(5.7, 5.8N)은 전통적인 브라켓(6.7N)에 비해 작은 힘을 나타냈다(그림 3.7b). 이러한 힘의 감소는 와이어의 play 증가와 워그 외측에서 탄성고무의 접촉 같은 장애물이 없기 때문이다. 그러나 그 차이가 1N, 즉 자가결찰 브라켓에서 발생하는 힘의 20%에 해당하므로 임상

적 의의에 대해서는 더 많은 연구가 필요하다.

반면, 헵-설측 이동에서는 브라켓 종류에 따라 와이어의 작용에 차이가 있을 수 있는데(그림 3.8), 능동형과 수동형 자가결찰 브라켓에서 발생하는 힘이 다를 수 있다. 이는 브라켓이 설측에 위치할 때 작용하는 힘이 슬롯 외측벽의 유연성과 연관되어 있기 때문이다. 능동형 자가결찰 브라켓은 다른 브라켓에 비해 40% 감소된 힘을 보인다(그림 3.8b). 이러한 효과는 변위의 방향이 반대(헵측으로)가 되면 사라진다(그림 3.8a). 이 방향에서는 닫히는 벽이 중요한 역할을 하지 못하고, 와이어는 단단한 슬롯의 설측벽을 압박한다.

와이어 삽입 시 발생하는 힘의 크기는 악궁의 근심측이나 원심측에서 결찰되는 치아의 수에 따라서도 달라진다.⁶ 이러한 효과는 치료역학에 더 많은 치아 단위가 포함됨으로써 와이어-브라켓 복합체의 강성이 증가함에 기인한다.

모의 회전실험에서 전통적인 브라켓과 자가결찰 브라켓에 의해 발생하는 모멘트

치축의 변위를 교정하려면 회전이동을 유발하기 위해 브라켓에 모멘트를 가해야 한다. 짝힘(rotational couple)의 크기는 결찰력과 유효 부착 너비(effective attachment width)의 곱과 같기 때문에 넓은 브라켓일수록 더 높은 모멘트를 발휘한다.^{9,10}

다음 연구에서 모의 회전이동에서 다른 종류의 브라켓에 의해 발생하는 모멘트를 측정하였다.¹⁸ 앞서 기술한 바와 같이 0.014"×0.025" Cu-NiTi Damon 아치 폼 와이어를 배열된 하악 모형에 적용하였다. 실험에서 사용된 변위의 범위는 근심에서 0°-5°로, 원심에서 0°-5°로 제한하였는데, 초기 배열에서 아치 폼에 대한 치관의 변위가 해소되었으리라고 생각하였기 때문이다.

연구결과, Damon 2 브라켓에서 가장 높은 모멘트 값을 나타냈다(그림 3.9a). 특히, 발생한 모멘트가 다른 브라켓(counter part)에 비해 100% 이상으로 나타났다(그림 3.9b).

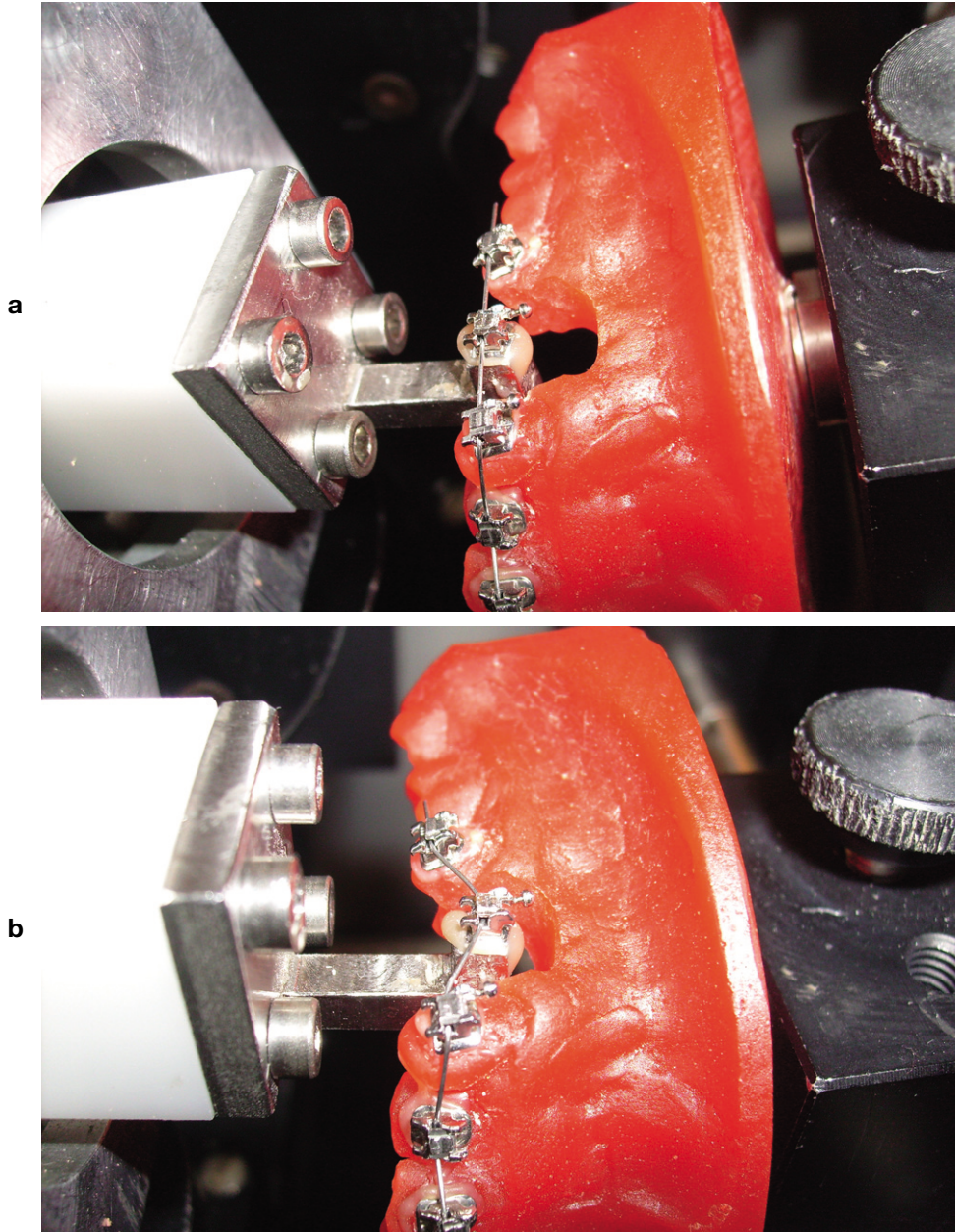


그림 3.6 소구치 함입 및 정출력 측정을 위해 고안된 OMSS에 장착된 모형. 평형상태(a), 수직변위 시(함입)(b).

또한, 적은 수의 치아가 결찰된 방향으로 회전시킬 때 더 큰 모멘트가 발생하였다. 소구치 회전의 방향(근심 또는 원심)은 발생하는 모멘트의 크기에 중요한 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다. 이는 측정 부위를 기준으로 악궁의 근심과 원심에서 치료에 포함되는 치아의 수와 관련이 있다.¹⁴ Damon 2 브라켓에 의한 모멘트는 슬롯의 닫히는 부분의 견고성에 기인한다. 이러한 견고성은 와이어가 움직이는 것을 막아서 결

찰되는 동안 생긴 에너지를 해소하는 것을 제한한다(그림 3.10a). 이러한 슬롯에 작은 직경의 와이어가 삽입되었을 때 play를 증가시킬 수 있지만, 각형 와이어 삽입 시에는 큰 응력이 발생하게 된다. 이것은 In-Ovation R 브라켓의 경우 와는 상반되는데(그림 3.10b), 이 브라켓은 탄성 변형되는 클립을 가지고 있어 슬롯 바닥으로부터 와이어가 좀 더 바깥으로 이동하는 것을 허용한다. 탄성고무의 변형 때문에 전통적

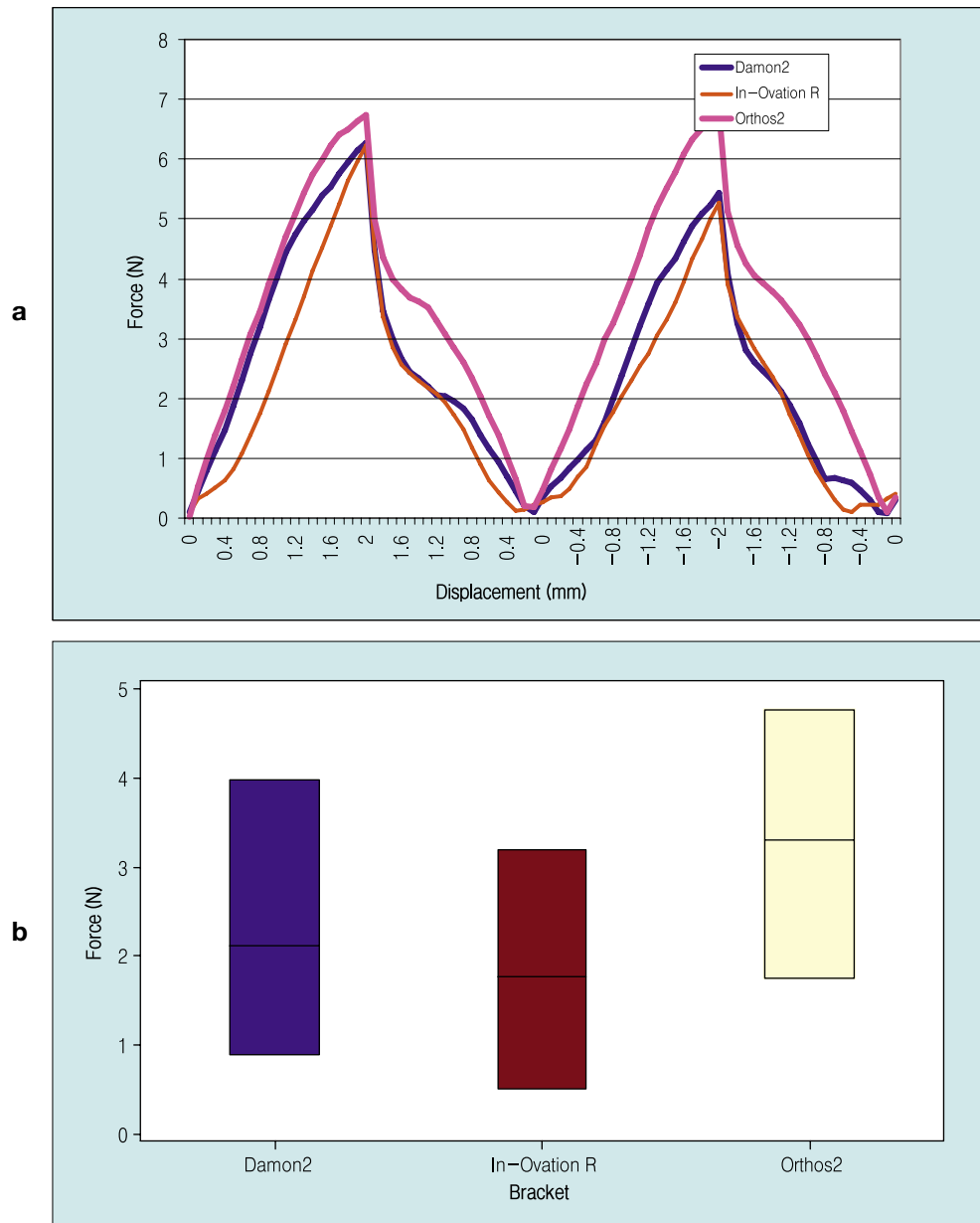


그림 3.7 (a) 함입-정출 정도에 따른 평균 힘의 변화(함입을 음의 값으로 나타냄). 각 방향으로 loading-unloading cycle을 나타낸다. 방향에 관계없이 전통적인 Ortho2 브라켓에서 더 큰 힘이 나타나는데 주목하라. (b) 전통적인 그리고 자가결찰 브라켓에서 함입-정출 동안 최대 힘을 기록.

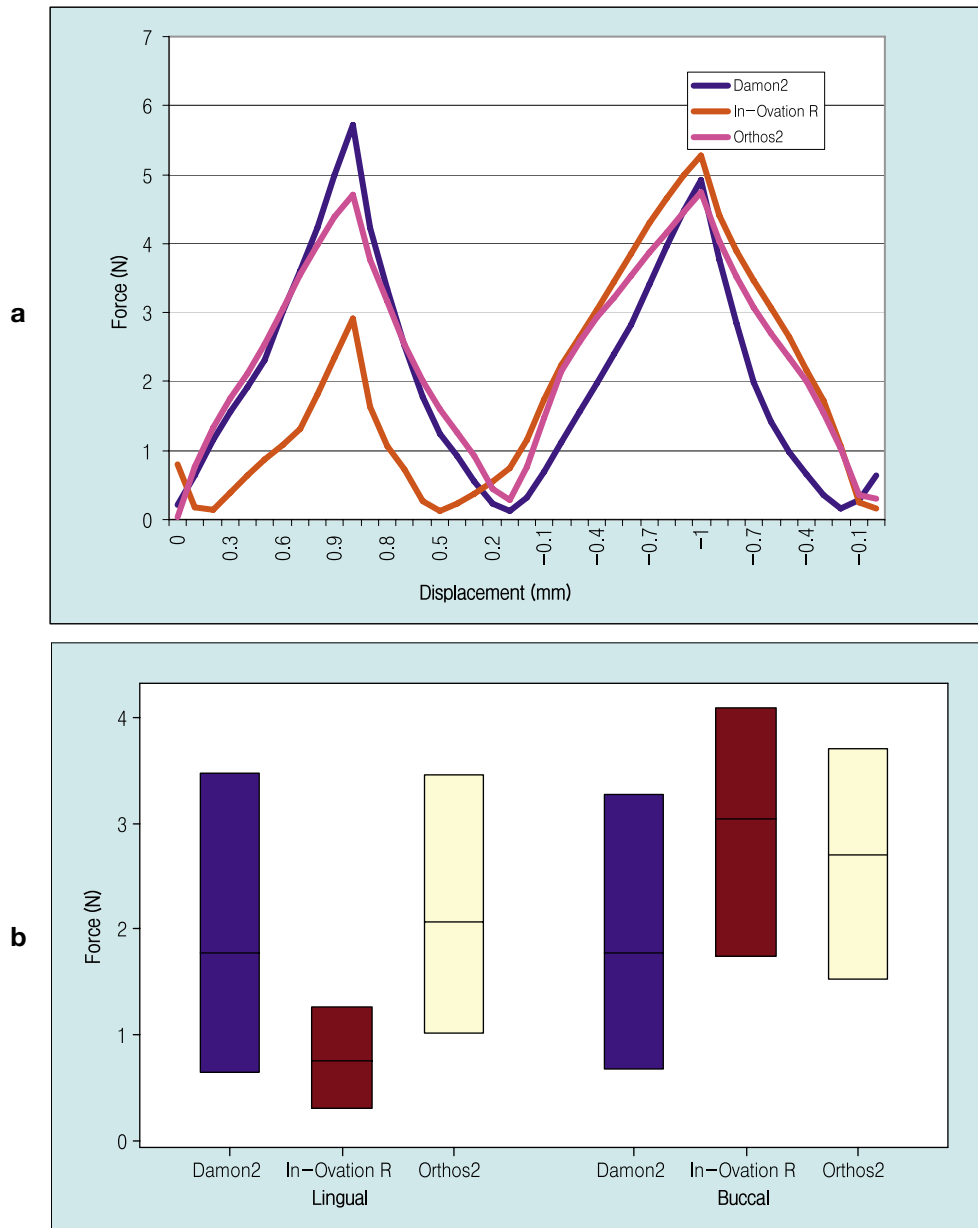


그림 3.8 (a) 협-설측 이동 정도에 따른 평균 힘의 변화(협측이동을 음의 값으로 나타냄). 각 방향으로 loading-unloading cycle을 나타낸다. 닫히는 기전이 용이해짐에 따라 In-Ovation R 브라켓에서 설측이동 시 힘이 감소하는 것에 주목하라. (b) 전통적인 그리고 자가결찰 브라켓에서 협-설측 이동 동안 최대 힘을 기록.

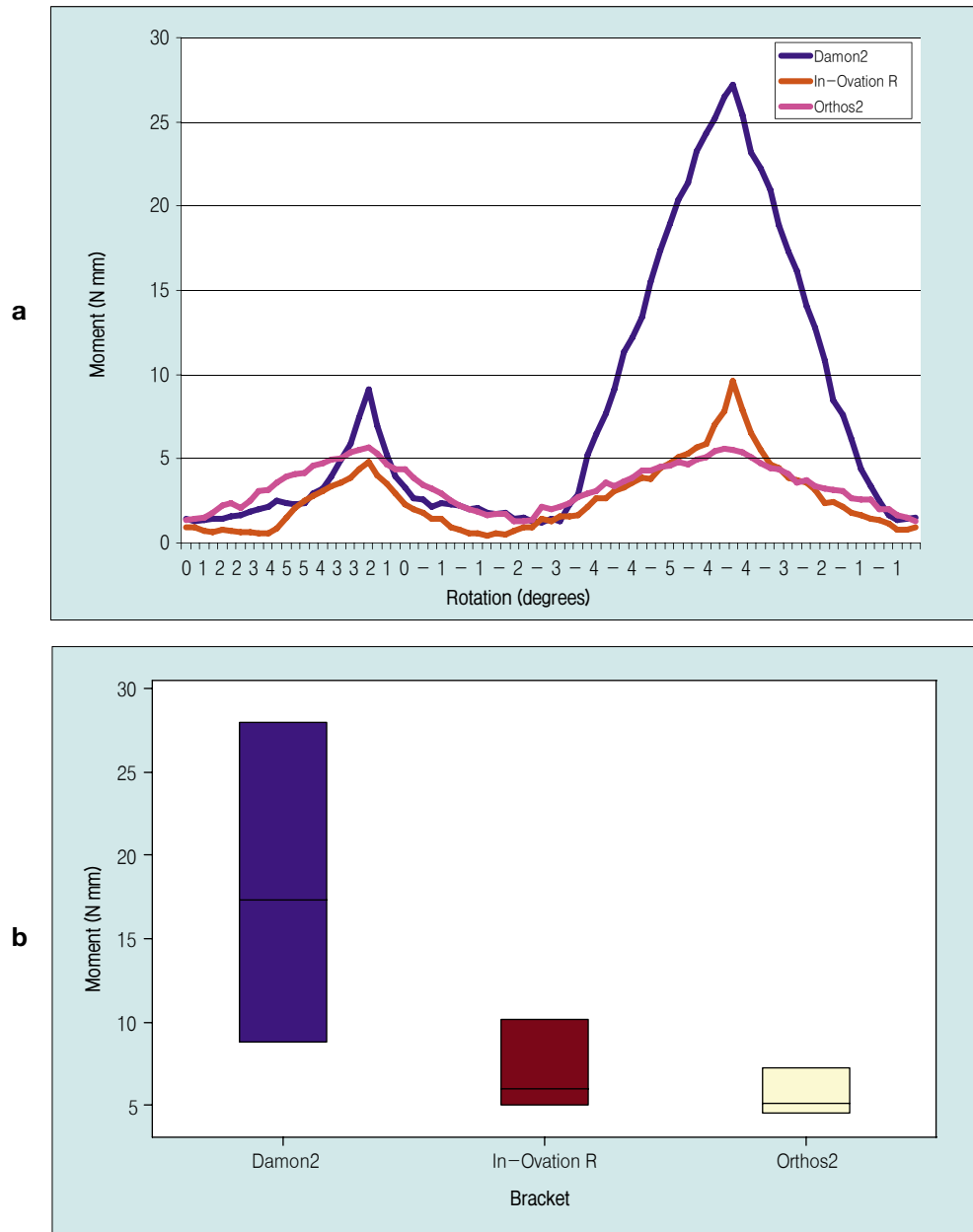


그림 3.9 (a) 회전 정도에 따른 힘의 변화. 원심회전, 적은 수의 치아가 결찰된 방향으로의 회전(음의 값으로 나타냄) 시에 큰 모멘트가 발생한다. 양방향으로 모두 Damon 2 브라켓이 큰 모멘트를 나타낸다. (b) 전통적인 자가결찰 브라켓에서 회전이동 동안 최대 모멘트를 기록.



그림 3.10 (a) 회전된 치아의 Damon 2 브라켓에 와이어 삽입; 슬롯을 닫는 4번째 벽이 단단하고 탄성적이지 않아서 탈회전 시에 큰 모멘트를 발휘. (b) 회전된 치아의 In-Ovation R 브라켓에 와이어 삽입; 클립의 탄성으로 인해 작은 모멘트 발생. (c) 회전된 치아의 전통적 브라켓에 와이어 삽입 후 탄성고무 결찰; 와이어의 완전한 삽입이 이루어지지 않아서 효율 감소; 모멘트 발생은 감소한다.

인 브라켓에서도 같은 현상이 일어나고 In-Ovation 브라켓보다도 더 느슨한 결찰을 보인다(그림 3.10c). 이 연구에서 브라켓이 탈회전 모멘트를 지속적으로 발휘할 수 있는지에 대한 정보는 알 수 없었다. 이러한 우려는 특히 탄성고무(elastomeric module)의 사용과 관련 있는데 이 폴리우레탄 기반(polyurethane based)의 고무줄은 in vitro에서 장착 24시간만에 50% 가량 힘의 감소를 보이는 것으로 나타났기 때문이다.¹⁹ 구강 내에서는 pH의 변동, 온도 변화, 효소 활동, 기계적 응력 등 불리한 환경 때문에 더 많은 힘의 감소(decay)를 예상할 수 있다. 그러므로 회전이동 시에는 탄성고무 결찰보다 SS 결찰이 더 효과적이고 안정적이다. 전통적인 결찰은 탄성고무로 8자형(figure-of-eight) 결찰을 하거나 SS로 결찰력을 조절할 수 있는 장점이 있다. 그러나 전통적인 결찰을 사용하는 것은 생물학적인 범위를 넘어서는 더 큰 모멘트의 발생을 야기할 수 있다.¹⁶ In-Ovation R 브라켓은 전통적인 브라켓보다 큰 원심회전 모멘트를 보인다;

그러나 이러한 차이는 회전이 많은 수의 치아가 결찰된 방향을 향하거나 브라켓 간 거리가 짧을 때에는 사라진다. 이러한 양상은 클립 자체의 성질과 클립 변위의 제한 때문에 발생한다. 낮은 응력에 즉시 반응하는 클립은 유연한 성질을 나타내지만 응력이 일정 수준을 넘어서면 유연성을 잃고 와이어의 협측 이동을 막는다.

치료기간 중 능동형 자가결찰 브라켓 결찰력의 일관성

클립을 가지는 능동형 자가결찰 브라켓에서 클립 강성의 변화는 결찰력의 일관성에 부정적 영향을 미친다. 구강 내 환경은 합금에서부터 고분자, 세라믹까지 많은 재료에 대해 기계적 성질과 표면구조의 시효(aging)를 야기하고 이는 결찰 기전에 해로운 영향을 미친다.²¹

네 번째 연구⁷는 구강환경에의 노출이 브라켓의 결찰기전