

교정용 브라켓과 강선 사이의 운동마찰저항력에 관한 실험적 연구

이 재 환¹⁾ · 이 기 수²⁾

이 연구의 목적은 호선으로 유도되는 치아이동을 실험실에서 실현하는 동안 브라켓과 선재의 운동 마찰저항에 대한 브라켓 수, 브라켓 폭경, 선재 크기가 미치는 영향을 관찰하기 위한 것이다. 상악 제 1, 2 소구치, 제 1 대구치와 유사한 크기의 레진 치아를 사용하였으며, 치주인대와 탄성계수가 비슷한 폴리 에테르 인상재를 사용하였다.

스테인레스 스틸 트윈 에지와이즈 브라켓으로 좁은 폭경(2.4 mm), 중간 폭경(3.0 mm), 넓은 폭경(4.3 mm)을 사용하였으며, 강선으로는 0.016, 0.018, 0.016 × 0.022, 0.019 × 0.025인치의 굵기를 사용하였고, 결찰은 합성고무링을 이용하고, 제1소구치에 부착된 좁은 폭경 브라켓 1개, 제 1, 2 소구치에 부착된 2개의 중간 폭경 브라켓 및 제 1, 2 소구치와 제 1 대구치에 부착된 3개의 중간 폭경 브라켓과 각 강선 사이의 운동 마찰저항력을 계측하여 다음의 결론을 얻었다.

1. 좁은 폭경, 중간 폭경, 넓은 폭경 세 종류의 브라켓 모두에서 교정용 선재의 단면 크기가 증가할수록 마찰저항력도 증가하였다.
2. 0.016, 0.018 인치 원형 강선은 브라켓 폭경이 증가하면 운동마찰저항력은 감소하며, 0.016 × 0.022, 0.019 × 0.025인 치 각형 강선은 브라켓 폭경이 증가하면 운동마찰저항력이 증가하는 경향이 있었고 0.016 인치 원형 강선과 폭경이 다른 브라켓과의 운동마찰저항력 사이에는 통계적으로 유의차가 없었다.
3. 중간 폭경 브라켓의 수가 증가할수록 마찰저항력은 크게 나타났으며, 그 증가율은 브라켓의 수에 비례하였으나 정수배로 증가하지는 않았고 강선의 굵기에 따라 차이가 있었다.

(주요 단어 : 운동마찰저항, 교정용 브라켓수, 브라켓 폭경, 교정용 선재)

I. 서 론

교정성 장치를 이용한 교정치료 과정에서는 필연적으로 브라켓과 교정용 선재 사이에 마찰저항력이 발생한다. 치료 과정에 따라서는 특정 부위의 마찰저항이 큰 것이 임상적으로 유리할 때도 있으나, 브라켓이 교정용 선재를 따라 활주(sliding)되도록 하여 치아를 이동시키고자 할 경우에는 가능한 한 마찰저항

력을 줄일 수 있도록 계획하여야 치아 및 그 주위조직의 유해한 손상 방지, 교정원의 과도한 상실 등의 부작용 없이 양호한 치료결과를 얻을 수 있다.

교정용 브라켓과 강선 사이의 마찰저항력에 직접, 간접적으로 영향을 미치는 요소로는 교정용 선재의 재질¹⁻¹¹⁾, 선재의 단면적과 크기^{1-4,8,10-13)}, 선재의 Stiffness¹⁴⁾, 선재의 표면 거칠기^{15,16)}, 브라켓의 재질^{1,2,5,17)}, 브라켓 슬롯의 폭경과 깊이^{1-4,7,15)}, 브라켓 형태^{18,19)}, 브라켓과 선재간의 결찰방식^{1,13)}, 결찰형태^{19,20)}, 인접 브라켓 슬롯의 높이 차이 그리고 교정력의 종류와 타액^{5,6,12,21,22,23)}, 치태 및 부식¹³⁾ 등이 있다.

교정용 브라켓과 선재 사이의 마찰저항력에 미치는 요소들에 관한 실험 결과는 임상적으로 교정용 선재, 교정용 브라켓, 결찰 방식 및 교정력을 선택하는

¹⁾ 경희대학교 치과대학 교정학교실, 대학원생.

²⁾ 경희대학교 치과대학 교정학교실, 교수.

교신저자 : 이재환

서울특별시 동대문구 회기동 1번지

경희대학교 치과대학 / 02-958-9391

sangkim@wonkwang.ac.kr

Table 1. Orthodontic materials used in this study

Material	Specification	Stock No.	Manufacturer
Orthodontic wire	Stainless steel wire		3M Unitek, USA
	0.016 inch	211-160	
	0.018 inch	211-180	
	0.016 × 0.022 inch	251-622	
	0.019 × 0.025 inch	251-925	
Orthodontic bracket	Stainless steel standard edgewise twin bracket(0.022 × 0.028 inch slot)		Tomy, Japan
	narrow (2.4mm)	200-08	
	medium (3.0mm)	200-26	
	wide (4.3mm)	200-02	
Ligation	Elastomeric module	100-379	TP Orthodontics, USA

중요한 정보를 제시해왔다.

Angolkar등²⁾, Peterson등⁴⁾, Andreasen과 Quevedo¹²⁾는 교정용 선재의 단면적이 증가함에 따라 마찰저항력이 증가하며, 일반적으로 각형 선재가 원형 선재보다 마찰저항력이 더 크다고 보고하였다. 그러나 Frank와 Nikolai¹⁾는 치아 이동과정에서 브라켓이 교정용 선재에 대해 기울어지면(Tipping) 단면적이 작고 유연성이 큰 교정용 선재가 단면적이 크고 유연성이 낮은 교정용 선재보다 마찰저항력이 더 크다고 하였으며, 브라켓과 선재간의 변연접촉(Binding)이 마찰저항력의 크기를 결정하는 주된 요소라고 하였다.

Kapila등³⁾, Frank와 Nikolai¹⁾, Peterson등⁴⁾, Andreasen과 Quevedo¹²⁾는 브라켓 폭경의 크기가 마찰저항력에 미치는 영향에 대한 연구에서, 브라켓 폭경이 증가할수록 마찰저항력이 커진다고 하였으나, Drescher등¹⁵⁾, Bednar등¹⁴⁾, Omana등²⁴⁾은 치아 이동 과정에서 폭경이 좁은 브라켓에서 선재와 브라켓간에 변연접촉이 더 심하게 발생하기 때문에 오히려 폭경이 넓은 브라켓보다 마찰저항력이 더 크게 발생한다는 상반된 보고가 있었다.

브라켓과 교정용 선재 사이에 발생하는 마찰저항력에 대한 이러한 기존의 연구들은 마찰저항력을 측정하는 과정에서, 교정용 선재에 대해 브라켓의 tipping이나 rotation을 허용하지 않거나, 브라켓을 실험 장치에 부착할 때 교정용 선재에 대해 인위적으로 특정한 각도를 고정된 상태로 부여하였거나 또는 마찰이 거의 없는 ball bearing에 브라켓이 부착된 기저판을 고정하여 근원심 방향에서 브라켓이 제한된 범위에서 기울어질 수 있도록 하였기 때문에 브라켓이 부

착된 치아가 3차원적으로 자유롭게 움직이는 실제 임상과는 차이가 있다.

또한 기존의 연구들은 한 개의 브라켓에 대한 마찰저항력만을 측정하였으며, 실제 임상에서처럼 인접한 여러 개의 브라켓에서 동시에 발생하는 마찰저항력에 대한 연구는 거의 없었다. 단지 Taylor와 Ison²⁵⁾이 다수의 브라켓에서 발생하는 마찰저항력을 비교측정하였는데, 이들은 실험과정에 포함되는 브라켓의 수가 증가함에 따라 마찰저항력이 브라켓 수에 정수배로 비례한다고 보고하였다. 그러나 이들은 마찰저항력을 측정하는 과정에서 브라켓이 교정용 선재에 대해 평행하도록 고정된 상태로 실험을 진행하였기 때문에 실제 치아 이동과정에서 발생하는 브라켓과 교정용 선재 사이의 마찰저항력과는 차이가 있을 것으로 사료된다.

본 연구는 마찰저항력에 미치는 여러 요소들에 대한 상반된 견해의 원인이 실험 과정에서 발생하는 것으로 파악하여, 실제 치아이동 과정을 가능한 정확히 재현한 상태에서 교정용 강선의 단면 크기, 브라켓 폭경 및 브라켓 수가 교정용 강선과 브라켓 사이의 운동마찰저항력에 미치는 영향을 규명하기 위하여 시행하였다.

II. 연구재료 및 방법

1. 재료

본 실험에서 사용한 교정용 강선은 0.016, 0.018, 0.016×0.022, 0.019×0.025인치 스테인레스 강선(3M

Table 2. Elastic modulus of the periodontium and materials used in this study

Periodontium	Elastic modulus (kg/mm ²)	Materials	Elastic modulus (kg/mm ²)	Manufacturer
Periodontal ligament	6.8×10^{-2}	Polyether impression material	7×10^{-2}	Espe, Germany
Cancellous bone	70.41	Blue inlay wax	76.04	Shofu, Japan
Cortical bone	1.4×10^3			

Unitek Inc., U.S.A.)이며, 브라켓은 폭경이 각각 2.4 mm (narrow bracket), 3.0 mm (medium bracket), 4.3 mm (wide bracket)인 0.022 × 0.028인치 슬롯 크기의 스테인레스 강재 standard edgewise twin 브라켓(Tomy Co. Japan)을 사용하였으며 결찰은, 결찰방법에 따라 마찰저항력이 변화하지 않도록 시판하고 있는 합성고무링(Plain ligature ring clip, TP Orthodontics Inc, U.S.A.)을 이용하여 계측 직전에 설치하였으며 10회 계측 후 새 것으로 교체하였다(Table 1).

2. 방법

실제 치아와 그 주위조직을 재현하기 위해, Wheeler의 치아 형태학에 근거하여 실물 크기의 상악 제1, 2소구치와 상악 제1대구치를 레진으로 제작하였으며, 치주인대와 탄성률이 비슷한 폴리에테르 탄성인상재 (Impregum F, ESPE Co., Germany)를 치근에 약 0.5mm 두께로 도포하였다. 이렇게 준비한 레진 치아에 각각의 브라켓을 간접 부착술식으로 재현성 있게 부착하였으며, 브라켓이 부착된 레진 치아의 치근을 치조골의 해면골과 탄성률이 비슷한 Blue inlay wax (SHOFU Co., Japan)를 사용하여 이 실험을 위해 특수 제작된 실험장치에 매식하였다(Table 2.).

치아를 매식할 때는 브라켓과 교정용 강선 사이에 경사가 발생하지 않도록 0.0215 × 0.028인치 스테인레스 강선을 브라켓 슬롯내에 삽입한 후 단단하게 강선 결찰을 하여 매식하였다.

본 실험을 위해 제작한 실험 기구는 크게 두 부분인데, 하나는 치아를 매식한 부분으로, 이것은 Instron (Instron 6022, Instron Co., USA) 인장시험기의 Crosshead 및 load cell에 직접 연결되어 Crosshead가 상단으로 이동하는 과정에서 마찰저항력을 측정할 수 있게 되어 있다. 다른 하나는 Instron 하단 고정부에 연결한 부분으로, 교정용 강선을 고정할 수 있게 하였다.

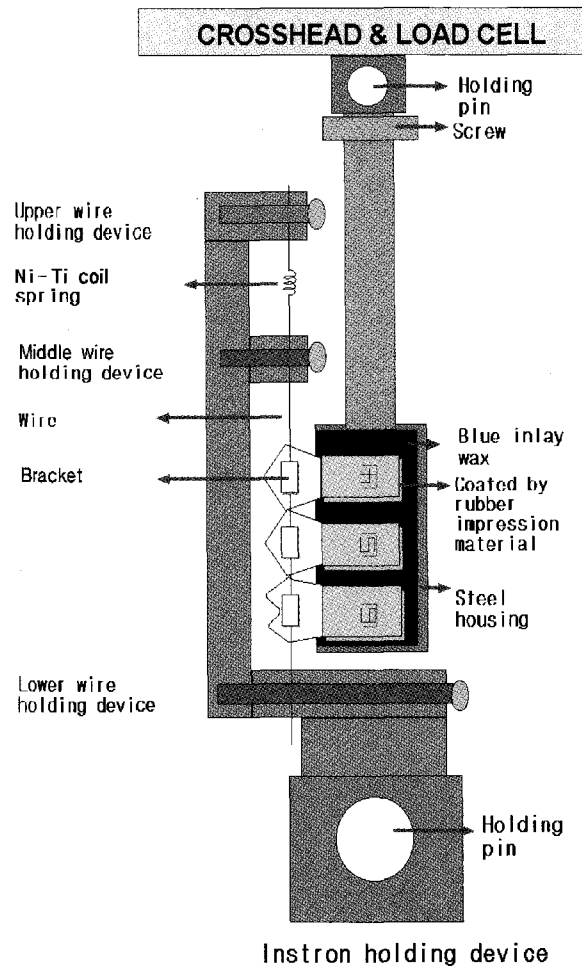


Fig. 1. Friction measurement were performed with a friction-testing assembly mounted on a Instron machine. The friction testing assembly consisted of a simulated tooth (real sized resin tooth) coated by polyether rubber impression material with 0.022 inch bracket attached to it and an elastomeric module ligature. The simulated teeth and its supporting structure(blue inlay wax) were mounted in a steel housing. The wire was mounted in wire holding devices. Frictional force was measured with Instron load-cell during upward movements of the crosshead, during which the bracket was drawn along the wire.

Table 3. Comparison of friction of each bracket with different wire size

Wire size (inch)	Narrow bracket		Medium bracket		Wide bracket	
	Mean ± S.D.(gm)	Scheffe test	Mean ± S.D.(gm)	Scheffe test	Mean ± S.D.(gm)	Scheffe test
0.019 × 0.025	116.6 ± 5.6	*	123.7 ± 9.2		168.2 ± 10.6	
0.016 × 0.022	91.7 ± 6.3		96.4 ± 11.2		111.4 ± 7.3	
0.018	91.0 ± 7.3		88.3 ± 7.0		72.8 ± 7.7	
0.016	78.8 ± 13.4		78.0 ± 7.4		71.7 ± 10.2	

Results of Scheffe's test are represented by vertical lines, mean linked by vertical lines were not significantly different at the 95% confidence level.

7 cm 길이로 준비된 교정용 강선의 하단부는 실험기구의 최하단 고정부에 단단히 고정하고, 상단 끝부분은 고리 형태로 만들어 9mm Ni-Ti coil spring(Ortho organizer Inc. USA)을 연결하였다. 이것은 교정용 강선을 고정할 때 선재가 일직선이 되게 장력을 부여하도록 한 것이다. 그 후에 중간 고정부를 단단히 고정하였다(Fig. 1). 이후에 브라켓을 부착한 치아가 매식되어 있는 실험기구를 교정용 강선이 고정된 부분에 삽입하고, 합성고무링으로 결합한 후 Instron을 영점 조정하였다. 실험 계획에 따라, 첫 번째 실험은 좁은 폭경의 브라켓은 제1소구치에, 중간 폭경의 브라켓은 제2 소구치에 부착하며, 넓은 폭경의 브라켓은 제1 대구치에 부착하여 각각의 치아를 실험장치에 매식하여, 네 가지 단면 크기의 교정용 강선과의 마찰저항력을 측정하였고, 두 번째 실험에서는 중간 폭경의 브라켓을 제 1, 2 소구치와 제 1 대구치에 부착하여 제 1 소구치 한 개, 제 1, 2 소구치 두 개, 제 1, 2 소구치 두 개와 제 1 대구치 한 개를 실험 장치에 매식하여, 네 가지 단면 크기의 교정용 강선과의 운동마찰저항력을 측정하였다. 각 실험을 10회 시행한 후 브라켓과 교정용 강선을 교체하였고 이것을 3 회 반복하였다. 모든 실험은 실온이 18 ± 4°C에서 건조상태로 진행하였다.

본 실험에서 측정한 마찰저항력은 운동마찰력인데, 이것은 건조한 조건에서 강철로 제작된 두 개의 물체사이의 정지 마찰계수와 운동 마찰계수는 차이가 거의 없다는 Böge²⁶⁾의 주장과, 낮은 crosshead 속도에서는 정지 마찰력과 운동 마찰력이 거의 동시에 발생하여 구분이 어렵다는 Drescher¹⁵⁾의 주장을 근거로 하였다.

본 실험에 사용한 Instron 인장 시험기는 5 kg의 load cell을 가지고 있으며, crosshead의 속도는 5 mm/min로 하여 상단으로 이동시켰다. 이 crosshead의

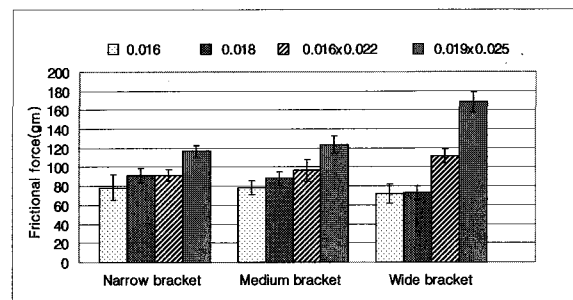


Fig. 2. Histogram of the comparison of friction of each bracket with different wire size.

속도는 0.1 mm/min에서 10 mm/min 사이 속도에서는 통계적으로 유의한 차이가 없다는 Ireland²⁷⁾의 연구결과에 근거하여 중간 정도의 속도로 결정하였다.

운동마찰력은 crosshead를 1분간 상단으로 이동시켜 측정한 값 중, 첫 최대 마찰저항력에서 1 mm이동한 거리동안에 나타나는 마찰 저항력 값들에서 측정 횟수를 나눈 평균값을 각 실험의 대표 마찰저항력으로 간주하였고 그램(gm)으로 환산하였다.

각각의 실험에서 측정한 마찰저항력에 대해 평균 및 표준편차를 산출하였고, 교정용 강선의 단면 크기, 브라켓 폭경 및 브라켓 수의 변화가 마찰저항력에 미치는 영향에 대한 통계적 유의차를 검정하기 위해 5% 유의수준에서 일원분산분석(one-way ANOVA)과 Scheffe의 다중범위검정(multiple range test)을 시행하였다. 그리고 교정용 강선의 단면 크기 증가에 따른 마찰저항력의 변화양상, 브라켓 폭경의 증가에 따른 마찰저항력의 변화양상 그리고 브라켓 수의 증가에 따른 마찰저항력의 변화양상을 알아보기 위해 선형회귀분석을 실시하였다.

Table 4. Comparison of friction of each wire size with different bracket width

Bracket	0.016		0.018		0.16 × 0.022		0.019 × 0.025	
	Mean ± S.D.(gm)	Scheffe test	Mean ± S.D.(gm)	Scheffe test	Mean ± S.D.(gm)	Scheffe test	Mean ± S.D.(gm)	Scheffe test
Narrow bracket	78.8 ± 13.4	*	91.0 ± 7.3		91.7 ± 6.3		116.6 ± 5.6	
Medium bracket	78.0 ± 7.4		88.3 ± 7.0		96.4 ± 11.3		123.7 ± 9.2	
Wide bracket	71.7 ± 10.1		72.8 ± 7.7		111.4 ± 7.3		168.2 ± 10.6	

Results of Scheffe's test are represented by vertical lines, mean linked by vertical lines were not significantly different at the 95% confidence level.

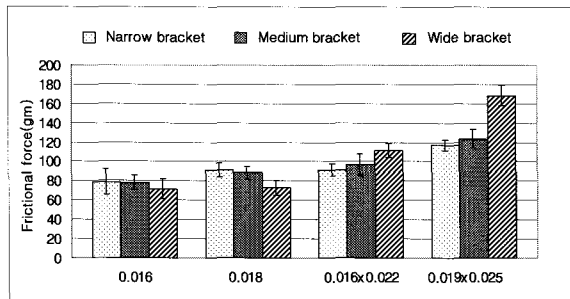


Fig. 3. Histogram of the comparison of friction of each wire size with different bracket width.

III. 연구성적

1. 교정용 강선의 단면 크기가 마찰저항력에 미치는 영향

좁은 폭경 브라켓에서는 원형 강선과 각형 강선 모두에서 단면의 크기가 증가할수록 마찰저항력이 증가하였으나 0.018, 0.016 × 0.022인치 강선 사이에는 통계적으로 유의한 차이가 없었다. 중간 폭경 브라켓에서는 원형 강선과 각형 강선 모두에서 단면의 크기가 증가할수록 마찰저항력이 증가하였으며 통계적으로 유의한 차이가 있었다. 넓은 폭경 브라켓에서는 원형 강선과 각형 강선 모두에서 단면의 크기가 증가할수록 마찰저항력이 증가하였으나 0.016, 0.018인치 원형 강선 사이에는 통계적으로 유의한 차이가 없었다(p < 0.05, Table 3, Fig. 2).

2. 브라켓 폭경이 마찰저항력에 미치는 영향

0.016 인치 원형 강선의 경우에는 브라켓 폭경의 크기가 증가할수록 마찰저항력이 감소하였으나 브라켓 폭경의 변화에 따른 마찰저항력의 크기에 대해 통계적 유의 차가 없었다. 0.018 인치 강선의 경우에는 넓은 폭경 브라켓에 비해 좁은 폭경 브라켓과 중간 폭경 브라켓의 마찰저항력이 각각 1.25 배, 1.21 배 크게 타났으나, 좁은 폭경 브라켓과 중간 폭경 브라켓 사이에는 통계적으로 유의한 차이는 없었다. 0.016 × 0.022인치 강선의 경우에는, 넓은 폭경 브라켓에서 마찰저항력이 가장 크게 나타났고 좁은 폭경 브라켓과 중간 폭경 브라켓에서 발생한 마찰저항력에 비해 1.21 배, 1.15 배 정도 크며, 0.019 × 0.025인치 강선의 경우에도 넓은 폭경 브라켓에서 마찰저항력이 가장 크게 나타났고 좁은 폭경 브라켓과 중간 폭경 브라켓에 비해 1.44 배, 1.36 배 컸다. 하지만 0.016 × 0.022, 0.019 × 0.025인치 강선 모두에서 좁은 폭경 브라켓과 중간 폭경 브라켓 사이에는 통계적으로 유의한 차이는 없었다(p < 0.05, Table 4, Fig. 3).

3. 브라켓의 수가 마찰저항력에 미치는 영향

이 실험에서 사용한 브라켓 폭경은 중간 폭경이었다. 0.016 인치 원형 강선의 경우에는 브라켓의 수가 1 개일 때에 비해 2 개 및 3 개일 때 마찰저항력이 각각 2.2 배, 2.8 배로 증가하여 다른 강선에 비해 가장 많은 증가를 나타냈고, 브라켓 수에 따른 상관식은 $y = 69.86x + 14.86$ ($R^2 = 0.8990$)로, 마찰저항력의 증가는 브

Table 5. Comparison of friction of each wire size with different number of bracket

Number of bracket	0.016		0.018		0.016 × 0.022		0.019 × 0.025	
	Mean ± S.D. (gm)	Scheffe test	Mean ± S.D. (gm)	Scheffe test	Mean ± S.D. (gm)	Scheffe test	Mean ± S.D. (gm)	Scheffe test
One	78.0±7.4		88.3±7.0		96.4±11.3		123.7±9.2	
Two	168.0±12.1		127.3±9.6		168.0±16.1		221.4±14.2	
Three	217.7±9.4		211.4±11.1		236.4±16.8		306.6±8.0	
R ²	0.8990		0.7415		0.8923		0.9729	

Results of Scheffe's test are represented by vertical lines, mean linked by vertical lines were not significantly different at the 95% confidence level. R² : coefficient of determination

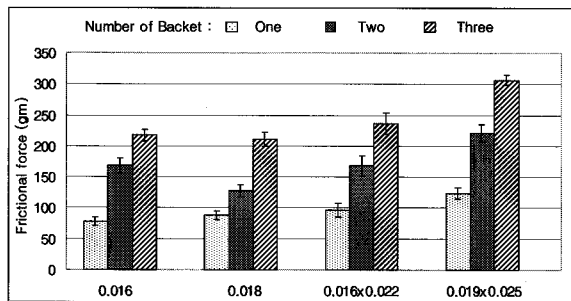


Fig. 4. Comparison of friction of each wire size with different number of bracket.

라켓 수에 비례하였으나 정수배로 증가하지 않았다. 0.018 인치 원형 강선의 경우에는 브라켓 수가 1개일 때에 비해 2 개 및 3 개 일 때 마찰저항력이 각각 1.4 배, 2.39 배로 증가하여 다른 강선에 비해 가장 낮은 증가를 나타냈고, 브라켓 수에 따른 상관식은 $y = 61.53x + 19.28$ ($R^2 = 0.7415$)로써, 마찰저항력의 증가는 브라켓 수에 비례하였으나 정수배로 증가하지 않았다. 0.016 × 0.022인치 각형 강선의 경우에는 브라켓 수가 1 개 일 때에 비해 2 개 및 3 개 일 때 마찰저항력이 각각 1.74 배, 2.45 배로 증가하였고, 브라켓 수에 따른 상관식은 $y = 69.99x + 26.95$, ($R^2 = 0.8923$)로써, 마찰저항력의 증가는 브라켓 수에 비례하였으나 정수배로 증가하지 않았다. 0.019 × 0.025인치 각형 강선의 경우에는 브라켓 수가 1 개일 때에 비해 2 개 및 3 개 일 때 마찰저항력이 각각 1.78 배, 2.48 배로 증가하였고, 브라켓 수에 따른 상관식은 $y = 91.44x + 34.36$ ($R^2 = 0.9739$)로써, 마찰저항력의 증가는 브라켓 수에 비례하였으나 정수배로 증가하지 않았다($p < 0.05$, Table 5, Fig. 4, 5).

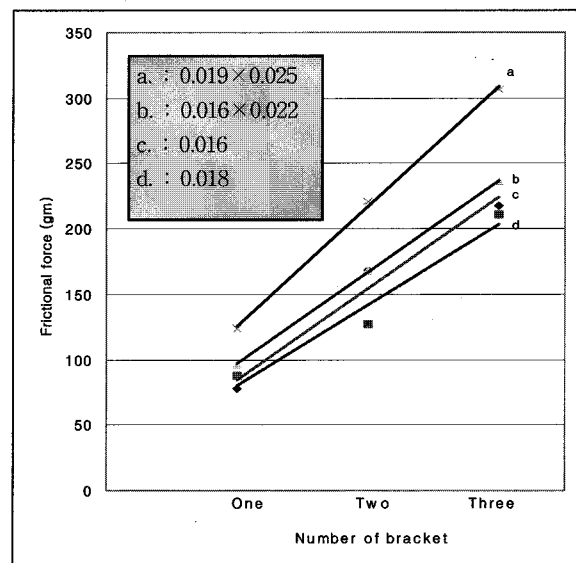


Fig. 5. Co-relation between frictional resistance and number of bracket.

a. (0.019x0.025) : $F = 91.44X + 34.36$ ($R^2 = 0.9739$)
 b. (0.016x0.022) : $F = 69.99X + 26.95$. ($R^2 = 0.8923$)
 c. (0.016) : $F = 69.86X + 14.86$ ($R^2 = 0.8990$)
 d. (0.018) : $F = 61.53X + 19.28$ ($R^2 = 0.7415$)
 F : frictional force, X : number of bracket.
 R² : Coefficient of determination

IV. 고 찰

이 연구는 고정식 교정장치를 사용한 교정치료 과정에서 발생하는 교정용 브라켓과 강선 사이의 운동 마찰저항력을 실험적으로 측정하는 것으로서, 치아 이동과정을 재현하기 위해 새로이 고안한 장치를 이용하였다.

교정용 브라켓과 강선 사이에 발생하는 마찰저항력에 대한 다른 많은 연구에서도 치아 이동 과정을 실험적으로 재현하기 위해 다양한 방법이 고안되었다. Frank 와 Nikolai¹⁾, Tselepis등²⁹⁾, Pizzoni등³⁰⁾은 브라켓을 실험장치에 고정할 때 교정용 선재에 대해 0°, 3°, 5°, 10° 등으로 일정한 각도를 부여하여 교정용 선재와 브라켓 간의 변연접촉(binding)을 재현하였고, Kapila등³⁾, Angolkar등²⁾은 브라켓이 부착된 플라스틱 기저판을 마찰이 거의 없는 ball bearing에 고정하여 일정한 범위 내에서 브라켓이 교정용 선재에 대해 기울어질 수 있게 하였고, Drescher등¹⁵⁾은 브라켓이 부착된 치아모형을 elastic rubber foam을 이용하여 실험장치에 매식함으로써 치아의 3차원적 이동을 허용하였다.

이러한 기존의 연구결과를 기초로 하여 본 실험에서는, 치아 이동 과정을 가능한 한 정확하게 재현하기 위해 실제 치아와 그 주위조직을 시뮬레이션 하였다. 우선 실험 크기의 상악 제 1, 2 소구치와 상악 제 1 대구치를 레진으로 제작하였으며, 치주인대와 탄성물이 비슷한 폴리에테르 탄성인상재를 치근에 약 0.5 mm 두께로 도포하였다. 이렇게 준비한 레진 치아에 각각의 브라켓을 간접 부착술식으로 재현성 있게 부착하였으며, 브라켓이 부착된 레진 치아의 치근을 해면골과 탄성물이 비슷한 blue inlay wax를 사용하여 이 실험을 위해 특수 제작된 실험장치에 매식하였다. 이렇게 함으로써 레진 치아가 치주인대와 해면골의 탄성율과 유사한 폴리에테르 탄성인상재와 blue inlay wax로 인해, 실제 치아이동 과정에서 발생하는 치아의 tipping이나 rotation을 실험과정에서도 재현하여, 교정용 강선과 브라켓 사이에서 실제 치아 이동 과정과 가능한 비슷하게 변연접촉(binding)이 일어날 수 있게 하였다.

마찰력은 접촉하고 있는 두 물체가 상대적인 운동을 시작하려고 하거나, 상대적인 운동을 하고 있을 때, 두 물체의 접촉면 사이에서 운동의 반대방향으로 작용하여 운동에 저항하는 힘이다. 마찰력은 일반적으로 두 물체가 접촉하는 면적이나 두 물체의 상대적인 운동속도에는 관계없고, 두 물체 사이에 작용하는 수직항력과 두 물체 고유의 마찰계수에 비례한다. ($F = \mu N$, μ : 마찰계수, N : 수직항력) 이 때 마찰계수는 재료의 성질 뿐 아니라 표면처리, 표면막 상태, 온도 등에 따라서 변화한다.²⁸⁾

교정치료를 사용하는 브라켓과 교정용 선재 사이에도 이러한 법칙은 일반적으로 적용할 수 있지만, 치

아 이동과정에서 발생하는 마찰력은 몇 가지 면에서 역학의 일반법칙과는 다른 특성을 가지고 있다. 즉 교정용 선재와 브라켓 사이에 발생하는 마찰력은 브라켓과 교정용 선재의 마찰계수와 수직항력에 의해서만 결정되지 않으며, 정지 마찰력이 운동마찰력 보다 항상 크게 나타나지도 않는다. 그 이유는 첫째로, 교정용 선재가 브라켓과 접촉하는 면은 브라켓 슬롯의 기저면(slot base) 뿐 아니라, 브라켓 슬롯의 교합측 면이나 치은측 면과도 접촉하여, 여러 부위에서 마찰저항이 발생하기 때문이다. 이 때 마찰저항력의 크기를 결정하는 주된 요소는 브라켓 슬롯과 교정용 선재 사이의 상대적인 유격과 교정용 선재에 가해지는 걸찰력에 의한 수직 항력이다. 둘째로, 치아 이동을 위한 교정력은 모든 경우에 치아의 저항중심에서 벗어난 지점에 적용되는 관계로 치아 이동의 초기단계에, 치아가 근원심 방향과 협설측 방향으로 기울거나 회전하는(tipping, rotation) 과정에서, 브라켓과 교정용 선재 사이에 변연접촉(binding)이 발생하기 때문이다.¹⁵⁾ 이러한 상태는 브라켓과 교정용 선재가 평행으로 위치한 초기 힘 체계와 많은 차이가 있는 것으로, 이 때의 마찰저항력은 교정용 선재와 브라켓 간 유격의 크기와 경사정도, 선재의 stiffness에 의해 결정된다.¹⁾

교정용 선재의 크기가 마찰저항력에 미치는 영향에 대해서 Angolkar등²⁾, Kapila등³⁾은 브라켓과 선재 사이의 각도가 평행하거나 작은 경우에는, 교정용 선재의 크기가 증가함에 따라 마찰저항력이 증가하며, 각형 선재가 원형 선재보다 마찰저항력이 더 크다고 보고하였는데, 그 이유는 브라켓과 선재사이의 접촉면적이 클수록 마찰저항력 또한 커지기 때문이라고 하였고, 부가적으로 선재의 단면적이 큰 선재일수록 합성고무링 걸찰시 더 강한 걸찰력이 발생하여 선재와 브라켓 간의 수직항력이 커지기 때문이라고 하였다. 하지만 Frank와 Nikolai¹⁾는 치아 이동 과정에서, 브라켓이 교정용 선재에 대해 기울어(tipping, rotation)지면, 브라켓 슬롯의 변연들과 선재간에 변연접촉(Binding)이 발생하는데, 이 과정에서 원형 선재는 걸림현상이 한 지점에 집중되고, 각형 선재는 보다 넓은 부위에 힘이 분산되어 결과적으로 원형 선재의 마찰저항력이 더 크게 나타난다고 하였다. 그리고 Bednar등¹⁴⁾은 단면적의 크기가 작고 탄성이 큰 선재의 경우에는, 치아이동시 브라켓이 교정용 선재에 대해 더 많이 경사지게 되고, 선재는 브라켓 슬롯의 더 넓은 면적에 걸쳐 힘을 가하게 되어, 단면적이 크고 탄

성이 낮은 굵은 선재보다 더 큰 마찰저항력이 발생한다고 하였다. 결국 이러한 상반된 결과들은 실험과정에서 브라켓과 교정용 선재 사이의 경사정도와 교정용 선재들의 stiffness의 차이에 의해 다르게 나타난다고 할 수 있다.

본 실험의 결과를 살펴보면 좁은 폭경, 중간 폭경, 넓은 폭경 세 종류의 브라켓 모두, 교정용 선재의 크기가 증가할수록 마찰저항력도 증가하는 것으로 나타났는데, 이것의 원인으로는, 첫째, 강선의 크기가 증가할수록 브라켓 슬롯과의 유격이 작아, 슬롯의 기저면 뿐만 아니라 슬롯의 교합측 면과 치은측 면과도 접촉이 더 자주 일어나기 때문이며, 둘째, 교정용 강선의 단면적이 큰 경우, 결찰시 합성고무링이 더 늘어나서, 브라켓과 선재간의 수직항력이 증가했기 때문으로 생각한다. 하지만 좁은 폭경 브라켓에서는 0.018 인치 원형 강선과 0.016 × 0.022 인치 각형 강선 사이에는 통계적으로 유의한 차이가 없었는데, 이것은 0.016 × 0.022 인치 각형 강선의 경우, 수직항력은 크지만 0.018 인치 원형 강선의 stiffness가 작고, 브라켓 슬롯과의 수직적 유격이 0.016 × 0.022 인치 각형 강선보다 작아, 브라켓 슬롯 내 여러 부위에서 접촉이 일어나기 때문에, 두 강선 사이에는 마찰저항력이 비슷하게 나타난 것으로 생각한다. 넓은 폭경 브라켓에서는, 0.016 인치 원형 강선과 0.018 인치 원형 강선간에 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 나타났는데, 이것은 0.016 인치 원형 선재가 0.018 인치 원형 선재에 비해, 선재의 유연성이 더 크기 때문에, 결찰력에 의해 협설측 방향으로 선재의 변형이 일어났기 때문이라고 생각한다. 브라켓 폭경이 마찰저항력에 미치는 영향에 대해서는 논란이 많다.

Peterson 등⁴⁾, Andreasen과 Quevedo¹²⁾는 브라켓 폭경에 따른 마찰저항의 차이는 없다고 하였고, Frank와 Nikolai¹⁾는 폭경이 넓은 브라켓이 좁은 브라켓보다 변연 접촉이 더 빈번히 발생하기 때문에, 폭경이 넓은 브라켓에서 더 큰 마찰저항력이 나타난다고 하였으며, Kapila 등³⁾은 브라켓 폭경이 넓을수록 합성고무링 결찰시 더 많이 늘어나야 하기 때문에, 교정용 선재와 브라켓 간에 수직 항력이 커져 마찰저항이 증가한다고 하였다. 반면 Drescher 등¹⁵⁾, Bednar 등¹⁴⁾, Omana 등²⁴⁾은 폭경이 좁은 브라켓이 넓은 브라켓보다 변연 접촉이 더 심하게 발생하여 마찰저항이 더 커진다고 주장하였다.

본 실험의 결과는, 0.016 인치 원형 강선의 경우는 브라켓 폭경과 마찰저항력 사이에 통계적으로 유의

차가 없었으며, 0.018 인치 원형 강선의 경우는, 좁은 폭경 브라켓과 중간 폭경 브라켓의 마찰저항력이, 넓은 폭경 브라켓보다 더 크게 나타났지만, 좁은 폭경 브라켓과 중간 폭경 브라켓 사이에는 통계적으로 유의한 차이는 없는 것으로 나타났는데, 이는 비록 폭경이 넓은 브라켓의 수직항력이 더 크지만, 치아이동 과정에서, 폭경이 좁은 브라켓이 넓은 브라켓에 비해 변연 접촉이 더 심하게 발생하기 때문으로 생각한다. 이러한 견해는 Drescher 등¹⁵⁾이 주장한, 브라켓이 교정용 선재에 대해 기울어지면, 마찰저항력을 결정하는 주요한 요소는 브라켓과 선재 사이의 변연접촉의 정도라고 한 견해와 일치하는 것이다. 이러한 사실은 본 실험에서, 0.018 인치 원형 강선의 경우, 좁은 폭경 브라켓이 넓은 폭경 브라켓 보다 마찰저항력의 최저값은 낮거나 비슷하였지만, 최고값은 오히려 크게 나타난 것에서도 확인할 수 있었다. 반면, 0.016 × 0.022, 0.019 × 0.025 인치 각형 강선의 경우는 좁은 폭경 브라켓과 중간 폭경 브라켓 사이에는 마찰저항력이 통계적으로 유의한 차이는 없었지만, 넓은 폭경 브라켓의 마찰저항력이 좁은 폭경, 중간 폭경 브라켓보다 더 크게 나타났는데, 이것은 Kapila 등³⁾의 견해와 같이, 폭경이 넓을수록 결찰시 elastomeric module이 더 많이 늘어나서 교정용 선재와 브라켓 간에 수직항력이 커지기 때문이며, 또한 0.016 이나 0.018 인치 원형 강선에 비해, 각형 강선의 stiffness가 더 크기 때문에, 치아 이동시 치아의 경사 정도가 더 작게 발생하여, 변연접촉이 덜 일어나기 때문이라고 생각한다.

브라켓의 수가 마찰저항력에 미치는 영향에 대해서 Taylor와 Ison²⁵⁾은 협측부 본질에서 사용되는 각종의 소구치 브라켓들과 구치부 튜브를 기저판에 부착하여 마찰저항력을 측정하였는데, 그들은 실험에 사용한 브라켓 수가 많을수록 마찰저항력이 커지고, 정지 마찰력은 2 개의 소구치 브라켓을 사용한 경우가, 1 개의 소구치 브라켓을 사용한 경우보다 약 두 배 정도의 마찰저항력을 나타내었다고 보고하였다.

본 실험의 결과는 Taylor와 Ison²⁵⁾의 실험결과와 다르게 나타났는데, 0.016 인치 원형 강선의 경우는 브라켓 개수가 2 개 및 3 개일 때 마찰저항력이 1 개의 브라켓일 때보다 각각 2.2배, 2.8배 증가하였고, 0.018 인치 원형 강선의 경우는, 1.4 배, 2.39 배 증가하였고, 0.016 × 0.022, 0.019 × 0.025 인치 각형 강선의 경우는 모두 약 1.8 배, 2.5 배 증가해서, 마찰저항력은 브라켓 수에 비례하였으나 정수배로 증가하지 않는 것으로 나타났다. 그 이유는 Taylor와 Ison²⁵⁾은

마찰저항력을 측정하는 과정에서 브라켓을 교정용 선재에 대해 기울어지지 않도록 평행하게 고정하였지만, 본 실험은 마찰저항력을 측정할 때 치아가 근원심과 협설 방향으로 움직일 수 있도록 하였기 때문에 1개의 브라켓일 때보다 2개, 3개 브라켓일 때, 치아이동시 인접한 치아로 인해 브라켓이 교정용 선재에 대해 기울어지는 정도가 작아, 변연접촉이 적게 발생하기 때문이라고 생각한다. 그리고 강선의 크기에 따른 브라켓 수의 증가로 인한 마찰저항력의 증가는 0.016 인치 원형 강선이 가장 많이 증가하였고 0.016 × 0.022 인치 강선과 0.019 × 0.025 인치 강선은 유사한 정도로 증가하였고 0.018 인치 원형 강선이 가장 낮은 증가를 나타냈다. 0.016 인치 원형 강선이 가장 큰 증가율을 나타낸 것은 0.016 인치 원형 강선이 다른 선재에 비해 유연성이 높아 브라켓 사이에서 선재가 협설측으로 변형되기 때문에 마찰저항력이 크게 나타난 것이라고 생각한다. 이와 같이 다수의 브라켓에서 발생하는 마찰저항력에 대한 실험 결과에서 교정용 강선의 단면 크기에 따른 강선의 stiffness가 마찰저항력에 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 그리고 동일한 강선일지라도 브라켓간의 거리에 따라 강선의 stiffness가 많은 영향을 받는다는 것은 주지의 사실이다. 다수의 브라켓과 강선 사이에 발생하는 마찰저항력을 측정하는 실험에서 사용한 브라켓은 두 개의 상악 소구치와 한 개의 상악 제 1 대구치에 부착한 중간 폭경 브라켓으로 2 개, 3 개 브라켓일 때 각각의 브라켓 간 거리가 달라 마찰저항력의 증가양상에 영향을 주었을 것으로 사료된다. 따라서 인접 브라켓간의 거리에 따른 마찰저항력의 증가 양상에 대한 더 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

V. 결 론

이 연구는 치아와 그 주위조직을 시뮬레이션하고 교정용 강선과 브라켓 사이의 운동마찰력에 교정용 강선, 브라켓 폭경 및 브라켓의 수가 미치는 영향을 관찰하기 위하여 스테인레스 스틸 트윈 에즈와이스 브라켓으로 좁은 폭경(2.4 mm), 중간 폭경(3.0 mm), 넓은 폭경(4.3 mm)을 사용하였고, 강선으로는 0.016, 0.018, 0.016 × 0.022, 0.019 × 0.025인치의 굵기를 사용하였고, 결찰은 합성고무링을 이용하여, 제 1 소구치에 부착된 여러 폭경 브라켓 1 개, 제 1, 2 소구치에 부착된 2 개의 중간 폭경 브라켓 및 제 1, 2 소구치와 제 1 대구치에 부착된 3 개의 중간 폭경 브라켓과 각

강선 사이의 운동 마찰저항력을 측정하여 다음의 결론을 얻었다.

1. 좁은 폭경, 중간 폭경, 넓은 폭경 세 종류의 브라켓 모두에서 교정용 선재의 단면 크기가 증가할수록 마찰저항력도 증가하였다.
2. 0.016, 0.018 인치 원형 강선은 브라켓 폭경이 증가하면 운동마찰저항력은 감소하나 0.016 × 0.022, 0.019 × 0.025인치 각형 강선은 브라켓 폭경이 증가하면 운동마찰저항력이 증가하는 경향이 있으나 0.016인치 원형 강선과 폭경이 다른 브라켓과의 운동마찰저항력 사이에는 통계적으로 유의차가 없었다.
3. 중간 폭경 브라켓의 수가 증가할수록 마찰저항력은 크게 나타났으며, 마찰저항력의 증가는 브라켓의 수에 비례하였으나 정수배로 증가하지는 않았고 강선의 굵기에 따라 차이가 있었다.

참 고 문 헌

1. Frank CA, Nikolai RJ. A comparative study of frictional resistances between orthodontic bracket and arch wire. Am J Orthod 1980 : 78 : 593-609.
2. Angolkar PV, Kapila S, Duncanson MG, Nanda RS. Evaluation of friction between ceramic brackets and orthodontic wires of four alloys. Am J Orthod Dentofac Orthop 1990 : 98 : 499-506.
3. Kapila S, Angolkar PV, Duncanson MG, Nanda RS. Evaluation of friction between edgewise stainless steel brackets and orthodontic wires of four different alloys. Am J Orthod Dentofac Orthop 1990 : 98 : 117-26.
4. Peterson L, Spencer R, Andreasen GF. A comparison of friction resistance for Nitinol and stainless steel wire in edgewise brackets. Quintessence Int 1982 : 5 : 563-5.
5. Pratten DH, Popli K, Germane N, Gunsolley JC. Frictional resistance of ceramic and stainless steel orthodontic brackets. Am J Orthod Dentofac Orthop 1990 : 98 : 398-403.
6. Stannard JG, Gau JM, Hanna MA. Comparative friction of orthodontic wires under dry and wet conditions. Am J Orthod Dentofac Orthop 1986 : 89 : 485-91.
7. Tidy DC. Frictional forces in fixed appliances, Am J Orthod Dentofac Orthop 1989 : 96 : 249-54.
8. 민정미, 서정훈. 치아의 활주 이동시 교정용 브라켓과 와이어 사이에서 발생하는 마찰 저항력에 관한 비교연구, 대치교정지 1988 : 18 : 155-62.
9. 장시호, 권오원, 김교한. Tin 피막 처리된 교정 장치물의 마찰저항력에 관한 비교연구, 대치교정지 1993 : 23 : 671-91.
10. 성현미. 교정용 bracket과 archwire 사이의 마찰저항에 대한 비교 연구, 대치교정지 1991 : 21 : 543-59.
11. 조명숙, 김종철. 교정성 교정장치를 이용한 치아이동시 발생하는 마찰력, 대치교정지 1980 : 20 : 409-16.
12. Andreasen GF, Quevedo FR. Evaluation of friction forces in the 0.022" × 0.028" edgewise bracket in vitro. J Biomech 1970 : 3 : 151-60.
13. Riley JL, Garrett SG, Moon PC. Frictional forces of ligated metal and edgewise brackets. J Dent Res 1979 : 58 : A 21.

14. Bednar JR, Gruendeman GW, Sandrik JL. A comparative study of frictional forces between orthodontic brackets and arch wires. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1991 : 100 : 513-22.
15. Drescher D, Bourauel C, Schumacher H. Frictional forces between bracket and arch wire. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1989 : 96 : 397-404.
16. Kusy RP, Whitley JQ, Mayhew MJ, Buckthal JE. Surface roughness of orthodontic archwires via laser spectroscopy. *Angle Orthod* 1988 : 58 : 33-5.
17. 이원유, 임경수. 교정용 Resin bracket의 마찰 저항력에 관한 연구, *대치교정지* 1999 : 29 : 107-12.
18. Berger JL. The influence of the SPEED bracket's self-ligating design on force levels in tooth movement : a comparative in vitro study. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1990 : 97 : 219-28.
19. Sims APT, Waters NE, Birnie DJ, Pethybridge RJ. A comparison of the forces required to produce tooth movement in vitro using two self-ligating brackets and pre-adjusted bracket employing two types of ligation. *Europ J Orthod* 1993 : 15 : 377-85.
20. Langerstrom L, Sandham JA, Dowling PA. An investigation into the behavioural characteristics of orthodontic elastomeric modules. *Br J Orthod* 1998 : 25 : 197-202.
21. Baker KL, Nieberg LG, Weimer LD, Hanna M. Frictional changes in force values caused by saliva substitution. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1987 : 91 : 316-20.
22. 황현식, 박영철. 인공타액하에서 수중 교정선의 마찰력에 관한 실험적 연구, *대치교정지* 1989 : 19 : 245-56.
23. 고정석. 인공타액하에서 교정선과 브라켓간의 마찰력에 대한 연구, *대치교정지* 1988 : 18 : 55-63.
24. Omana HM, Moore RN, Bagby MD. Frictional properties of metal and ceramic brackets. *J Clin Orthod* 1992 : 26 : 425-32.
25. Taylor NG, Ison K. Frictional resistance between orthodontic brackets and archwires in the buccal segments. *Angle Orthod* 1996 : 66 : 215-22.
26. Böge A. Formeln und Tabellen zur Mechanik und Festigkeitslehre, Braunschweig / Wiesbaden : Vieweg & Sohn, 1983 : 7. (cife from *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1989 : 96 : 397-404.)
27. Ireland AJ, Sherriff M, McDonald F. Effect of bracket and wire composition on frictional forces. *Europ J Orthod* 1991 : 13 : 322-8.
28. Tselepis M, Brockhurst P, West VC. The dynamic frictional resistance between orthodontic brackets and arch wires. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1994 : 106 : 31-138.
29. Pizzoni L, Ravnholt G, Melsen B. Frictional forces related to self-ligating brackets. *Europ J Orthod* 1998 : 20 : 283-91.

- ABSTRACT -

An experimental study of dynamic frictional resistance between orthodontic bracket and arch wire

Jae-Hwan Lee, Ki-Soo Lee

Department of Orthodontics, College of Dentistry, Graduate School, Kyung Hee University

This investigation was designed to determine the effects of wire size, bracket width and the number of bracket on bracket-wire dynamic frictional resistance during simulating arch wire-guided tooth movement in vitro. For simulation of an arch wire-guided tooth movement, we simulated tooth, periodontal ligament and cancellous bone. Maxillary premolar and 1st molar were simulated as real sized resin teeth, the simulated resin teeth which its root was coated by polyether impression material which its elastic modulus is similar to periodontal ligament were embedded in steel housing with inlay wax which its elastic modulus is similar to cancellous bone. Stainless steel wires in four wire size (0.016, 0.018, 0.016 × 0.022, 0.019 × 0.025 inch) were examined with respect to three (stainless steel) bracket widths (2.4, 3.0, 4.3mm) and the number of medium bracket(one, two, three) included in the experimental assembly under dry condition. The wires were ligated into the brackets with elastomeric module.

The results were as follows :

1. In all the brackets, frictional resistance increased with increase in wire size. But, statistically similar levels of frictional resistance were observed between 0.018 inch and 0.016 × 0.022 inch wires in narrow bracket and also between 0.016

inch and 0.018 inch wire in wide bracket.

2. The frictional forces produced by 0.016 inch wire were statistically similar levels in all the brackets. In 0.018 inch round wire, wide bracket was associated with lower amounts of friction than both narrow and medium brackets. In 0.016×0.022 , 0.019×0.025 inch rectangular wire, wide bracket produced larger friction than both narrow and medium brackets. In all the wires, narrow and medium bracket demonstrated no statistical difference in levels of frictional resistance.
3. Frictional resistance increased with increase in number of medium bracket. 0.016 inch round wire demonstrated the greatest increment in frictional resistance, followed by 0.019×0.025 , 0.016×0.022 inch rectangular wire which were similar level in increment of frictional resistance, 0.018 inch wire demonstrated the least increment. The increments of frictional resistance were not constantly direct proportion to number of bracket.

KOREA. J. ORTHOD. 2001 : 31(4) : 467-477

※ **Key words** : Dynamic frictional resistance, Number of orthodontic bracket, Bracket width, Orthodontic wire