

전기도금을 이용한 스테인레스 스틸 각형 선재의 굵기 증가 후 물성 변화

이 정 석¹⁾ · 이 기 현²⁾ · 황 현 식³⁾

본 연구는 전기도금을 이용하여 각형 선재의 굵기를 증가시킨 후 기존의 선재와 물성을 비교함으로써 이의 임상적 적용 가능성을 알아보고자 시행되었다.

한 변의 길이가 0.016 인치인 정사각형 스테인레스 스틸 교정용 선재에 니켈 전기도금을 시행하여 굵기를 0.001 인치 증가시켜 한 변의 길이가 0.017 인치인 정사각형 선재로 만들었고 도금층의 밀착성을 증진시키기 위해 400°C의 전기로에서 10분간 열처리를 시행하였다. 시편의 물성변화를 알아보기 위하여 전기도금을 이용하여 제작된 15개의 시편을 실험군(016P군)으로, 기존의 0.016 인치(016군), 0.017 인치(017군) 스테인레스 스틸 교정용 선재를 대조군으로 설정한 후 3점 굴곡 시험과 비틀림 시험을 시행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 3점 굴곡 시험 결과 016P군이 016군에 비해 강성과 항복강도, 극한강도 모두 증가하는 경향을 보였으며, 강성과 극한강도는 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.05$).
2. 3점 굴곡 시험 결과 016P군이 017군보다 강성과 항복강도, 극한강도 모두 낮은 경향을 보였으며, 강성은 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.05$).
3. 비틀림 시험 결과 016P군이 016군에 비해 비틀림 강성과 항복 비틀림 모멘트, 최대 비틀림 모멘트 모두 높았으며, 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.05$).
4. 비틀림 시험 결과 016P군이 017군에 비해 비틀림 강성과 항복 비틀림 모멘트, 최대 비틀림 모멘트 모두 낮은 경향을 보였으며, 이 중 항복 비틀림 모멘트와 최대 비틀림 모멘트에서 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.05$).

이상의 결과를 요약해 보면 각형 선재에 도금을 시행하여 굵기를 증가시키고 물성이 증가될 수 있음을 알았다. 비록 도금을 시행한 016P군이 기존의 017군보다 강성이 낮았으나 이는 반대로 016P군이 017군보다 탄성이 높음을 나타내며 토코조절이 부족한 경우 브라켓 슬롯에 쉽게 삽입되어 교정력을 발휘할 것으로 기대된다.

(주요 단어 : 전기도금, 물성변화, 각형선재, 굵기증가)

I . 서 론

1928년 Angle에 의해 에지와이즈 장치가 소개된 후 치아의 3차원적 조절이 가능해졌으며 지금까지 널리 사용되고 있다^{1,2)}. 에지와이즈 장치를 이용한 대부분의 교정치료는 배열과 레벨링, 마무리의 치료단계를 포함하고 있다³⁾. 치료 초기에 배열과 레벨링을 위

1) 전남대학교 치과대학 교정학교실, 대학원생.

2) 전남대학교 치의학연구소, 치과대학 교정학교실, 조교수.

3) 전남대학교 치의학연구소, 치과대학 교정학교실, 교수.

교신저자 : 황현식

광주시 동구 학동 8번지

전남대학교 치과대학 교정학교실 / 062-220-5486

hhwang@chonnam.ac.kr

Table 1. Composition of experimental wire

Stainless steel alloy	Proportion(%)
Chromium	17.0~19.0
Nickel	8.0~10.0
Manganese	2.0
Silicon	1.0
Phosphorus	0.04
Sulfur	0.03
Carbon	0.08~0.20
Iron	Balance

해 가늘고 탄성이 좋은 원형 선재가 많이 사용되며 마무리 단계에는 치아의 토크(torque) 조절을 위해 굵은 각형 선재가 사용된다. 대부분의 마무리 선재는 브라켓 슬롯보다 작은 각형 선재를 사용하게 되며 이로 인해 각형 선재는 브라켓 슬롯 안에서 운동이 가능하며 이러한 상태를 유격(play)이라 한다⁴⁾. 유격은 선재의 삽입을 용이하게 하지만 토크 조절의 손실을 가져오는 단점도 있다. 마무리 초기에는 유격이 큰 가는 각형 선재를, 마무리 말기에는 유격이 작은 굵은 각형 선재를 사용하여 치아의 토크를 조절하여 결과적으로 원하는 치아 이동을 얻을 수 있다.

또한 각 단계마다 가는 선재에서 좀더 두꺼운 선재로 교환해 줌으로써 점진적이고 안정적으로 치아를 이동시킬 수 있으며 환자의 불편감도 덜어줄 수 있다. 하지만 이전 단계의 호선 모양과 똑같이 새 호선을 준비하는 것은 사실상 불가능하므로 새 호선 장착시 불필요한 치아 이동은 피할 수 없으며 이는 치근 흡수와 치료기간 증가의 원인이 되기도 한다.

호선을 교환하지 않기 위해 Ni-Ti 같은 탄성이 높은 각형 선재를 이용하여 배열과 레벨링, 토크조절을 한번에 시행하는 방법이 소개되고 있으나 이 또한 치근의 전후방이동(jiggling effect)에 의해 불필요하고 바람직하지 못한 치근 이동이 야기되므로 유익하지 않다³⁾.

조⁵⁾는 전기도금을 이용하여 초기 삽입된 선재의 직경을 증가시키는 방법을 연구하였다. 그는 원형 선재에 도금을 하여 물성 변화를 관찰함으로써 임상적 적용 가능성을 제시하였다. 그러나 각형 선재의 도금에 대한 연구는 전무한 바 본 연구는 전기 도금을 이용하여 각형 선재의 굵기를 증가시킨 후 단면 관찰과 물성 변화, 토크 조절정도를 평가하여 그 임상적 적용 가능성을 알아보고자 하였다.

Table 2. Composition of electroplating solution and plating conditions

Electroplating composition (g/L)	
Nickel sulfate (NiSO ₄ ·6H ₂ O)	100
Nickel chloride (NiCl ₂ ·6H ₂ O)	60
Boric acid (H ₃ BO ₃)	30
Ammonium chloride (NH ₄ Cl)	50
Condition	
Voltage (V)	1.7
Temperature (°C)	25-29
pH	3.1-3.3

II. 연구 재료 및 방법

1. 재료

본 실험의 연구재료로 Table 1과 같은 조성을 가진 스테인레스 스틸계의 각형 선재(Tru-Chrome®, Rocky Mountain Co., USA)를 사용하였다.

전기도금을 통한 직경 증가를 위해 0.016 × 0.016 인치 각형 선재를 이용하였고, 도금 후 물성 비교를 위한 대조군으로 기존의 0.016 × 0.016 인치, 0.017 × 0.017 인치의 각형선재를 이용하였다(Table 1).

2. 방법

가. 시편제작

조⁵⁾의 실험방법을 이용하여 0.016 × 0.016 인치 선재의 표면에 균일하게 니켈을 전기 도금하여 15개의 0.017 × 0.017 인치 굵기의 시편을 다음과 같이 제작하였다.

① 전처리

선재와 도금금속 사이의 기계적 결합력을 증진시키기 위하여 샌드블라스터(Microetcher II, Danville Engineering Inc., USA)를 사용하였다^{6,7)}. 샌드블라스터 처리 후 n-헥산과 99.9% 에탄올에 각각 침적 수세한 다음 화학적 결합력 증진을 위하여 50~60°C의 PdCl₂ 용액(1g/L PdCl₂ + 1ml/L HCl)에 5초간 침적 수세하였다⁶⁻⁸⁾.

② 전기도금

전처리한 시편을 Table 2의 조건을 만족하는 전기 도금 수조를 이용하여 굵기가 0.017 인치로 0.001 인

Table 3. Grouping of samples

Group	Classification
016	Original 0.016 × 0.016 inch stainless steel wire
016P	Electroplated 016 × 016 inch stainless steel wire
017	Original 0.017 × 0.017 inch stainless steel wire

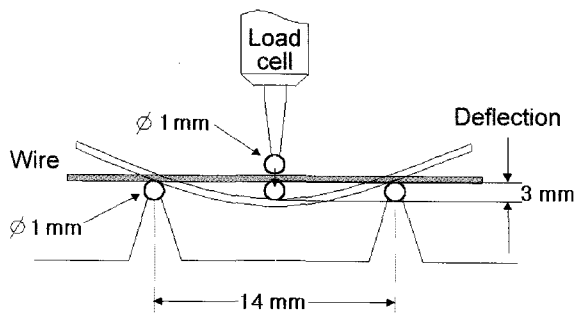


Fig. 1. Schematic diagram of three-point bending test.

치(0.026mm)가 증가할 때까지 전기도금을 시행하였다. 직경 증가는 매 1분마다 0.001mm까지 측정 가능한 디지털 마이크로미터(Mitutoyo, Japan)를 이용하여 계측 확인하였다.

③ 열처리

도금 후 선재와 도금층간의 밀착성을 증진시키기 위해 전기도금된 시편을 400℃ 온도의 전기로에서 10분간 열처리를 시행하였다^{9,10)}. 이렇게 하여 아무런 처리도 하지 않은 기존의 제품(0.016 × 0.016 인치, 0.017 × 0.017 인치)군과 전기도금을 이용하여 0.001 인치의 굽기를 증가시키고 열처리한 군, 모두 3군으로 분류하였고 각 군 당 시편의 수는 15개였다(Table 3).

나. 단면의 면적 평가

균일한 두께로 도금되었는지 알아보기 위하여 시편을 레진블럭에 매몰하여 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, JSM-5400, JEOL, Japan)으로 단면을 관찰하였다.

레진블럭에 시편을 수직으로 위치시킬 수 있는 지그를 제작하였으며 이를 이용하여 각 군당 15개씩 45개의 시편을 레진블럭에 매몰하였다. 주사전자현미경 관찰을 위해 표면을 연마한 후 1.2kV로 1분간 금이온 코팅(JFC-1100, JEOL, Japan)을 시행하였다.

주사전자현미경으로 단면을 관찰한 후 이미지 파일

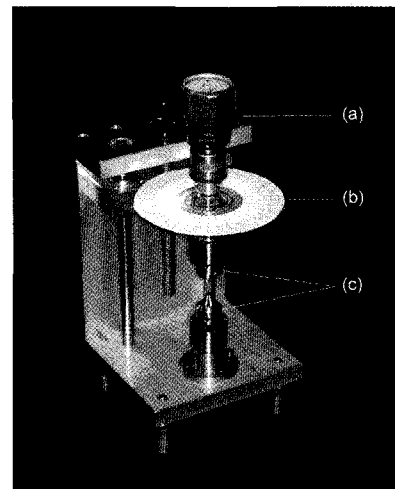


Fig. 2. Torque testing device composed of Torque Gauge (a), graduator (b) and chucks (c).

로 저장한 다음 이미지 분석 프로그램(Image-Pro Plus, Media Cybernetics, USA)을 이용하여 단면의 면적을 측정하였다.

다. 탄성 시험

① 굽곡 시험(bending test)

각 시편의 강성(stiffness)과 항복강도(yield strength), 극한강도(ultimate tensile strength)를 측정하기 위하여 만능물성시험기(Universal Testing Machine, STM-5, United Calibration Corporation, USA)를 이용하여 3점 굽곡 시험(three-point bending test)을 시행하였다¹¹⁻¹³⁾. 조⁵⁾의 시험방법에 따라 시편 길이를 14mm, 크로스 헤드 속도(cross head speed)를 1mm/min으로 조정한 후 1kg의 로드셀(load cell)로 3mm가 변형되는 지점까지 하중을 가해 하중-변형 곡선을 구하였다(Fig. 1).

구해진 하중-변형 곡선에서 직선부위로 나타나는 영역에서의 강성을 구하기 위하여 하중에 대한 변형률(g/mm)을 계산하였다. 또한 0.2%의 영구변형이 나타나는 지점의 항복강도와 곡선 상에서 최고의 하중을 보이는 극한강도를 각각 측정하였다.

② 비틀림 시험(torsion test)

비틀림 각도와 모멘트를 측정하기 위해서 최 등¹⁴⁾의 방법에 따라 토크측정기기(torque testing device)를 제작하였다. 이 장치는 두개의 Jacob 척(chuck)으로 구성되어 있는데, 아래쪽의 척은 고정되어 있고,

Table 4. Comparison of wire thickness among 016, 016P and 017

Group	Number	Mean \pm SD(μm^2)	Median
016	15	163.30 \pm 1.44	163.56
016P	15	172.99 \pm 1.32	172.49
017	15	173.19 \pm 1.23	173.14

* $p < 0.05$

위쪽의 척은 마찰없이 자유롭게 회전할 수 있으며 상하로 이동하면서 척간길이(inter-chuck distance)를 조절할 수 있도록 되어 있다. 위쪽 척과 동축선 상에 연결장치(extension)를 부착하고 토크게이지(Torque Gauge, 651X-4M, Data Instruments Inc., USA)를 장착하였다. 토크게이지는 최대 6000gmm까지 측정가능하며 최소 250gmm까지 측정할 수 있게 제작하였다. 연결장치의 측면에 바늘을 장착하고 비틀림 각도를 측정하도록 각도계를 부착하였다(Fig. 2).

척간 길이는 평균적인 브라켓간 거리인 7mm로 고정하고 선재에 가한 비틀림 모멘트를 250gmm씩 증가시키면서 영구변형이 관찰될 때까지 비틀림 각도를 1° 까지 측정하였다. 각 군당 15개의 시편을 측정하여 비틀림 강성(torque/twist rate), 5° offset에서의 항복 비틀림 모멘트(yield torsional moment), 최대 비틀림 모멘트(ultimate torsional moment)를 구하였다.

라. 비틀린 선재의 표면 관찰

비틀림 시험에 의해 선재는 측면 관찰시 나선형으로 소성변형이 일어난다. 도금층의 결합력이 약한 경우 변형에 의해 도금층이 탈락되고 선재의 표면이 노출된다. 만약 결합력이 충분히 높다면 선재의 변형에 의한 도금층의 탈락은 일어나지 않을 것이므로 비틀림 시험을 시행하여 소성변형이 일어난 016P군의 표면을 주사전자현미경으로 관찰하여 도금층의 결합력을 간접적으로 추정하였다.

마. 통계처리

NCSS(Number Cruncher Statistical System, NC-SS Statistical Software, USA) 통계 처리용 프로그램을 이용하여 아무런 처리도 하지 않은 기존 제품군과 도금을 시행한 군 사이의 물성 차이를 비교하기 위하여 Kruskal-Wallis검정 및 비모수적 사후검정을 시행하였다.

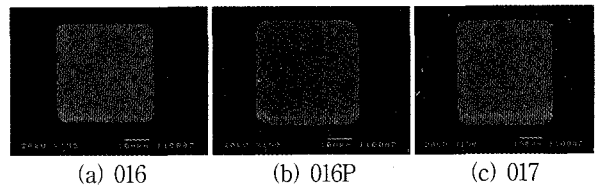


Fig. 3. Scanning electron micrographs of original 0.016 \times 0.016 (a), plated 0.016 \times 0.016 (b) and original 0.017 \times 0.017 wire (c).

III. 연구성적

1. 단면의 면적 평가

016P군의 단면의 면적과 016군의 단면의 면적을 비교한 결과 016P군의 단면의 면적이 크게 나타났으며 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.05$)(Fig. 3, Table 4). 016P군의 단면의 면적과 017군의 단면의 면적을 비교한 결과 통계적으로 유의한 차이는 없었다(Table 4).

2. 도금과 열처리에 의한 물성변화

① 굴곡 시험

3점 굴곡 시험에 의한 각 군의 하중-변형률은 전반적으로 017군이 가장 높았으며 다음으로 016P군이, 가장 낮은 군은 016군이였다(Fig. 4).

전기도금을 시행한 016P군은 016군에 비하여 강성과 항복강도, 극한강도 모두 증가하는 경향을 보였으며 이중 강성과 극한강도는 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.05$). 016P군은 017군에 비해서는 강성과 항복강도, 극한강도 모두 낮은 경향을 보였으며 강성은 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.05$) (Table 5).

② 비틀림 시험

각 군의 비틀림-강성 곡선을 보면 전반적으로 017군이 가장 높았으며, 다음으로 016P군이였고, 가장 낮은 값의 곡선을 그리는 군은 016군이였다(Fig. 5).

016P군은 016군에 비하여 비틀림 강성과 항복 비틀림 모멘트, 최대 비틀림 모멘트 모두 높았으며 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.05$). 016P군은 017군에 비하여 항복 비틀림 모멘트와 최대 비틀림 모멘트가 통계적으로 유의하게 낮았으며 이는 도금을 시행한 선재가 같은 굵기의 기존의 선재에 비해 물성이 떨어짐을 나타내었다($p < 0.05$)(Table 6).

Table 5. Comparison of the results of three-point bending test

Group	N	Load/Deflection rate (g/mm)		Yield strength (g)		Ultimate tensile strength (g)	
		Mean ± SD	Median	Mean ± SD	Median	Mean ± SD	Median
016	15	676.45 ± 18.05	677.27	394.90 ± 98.93	379.79	855.68 ± 19.99	857.01
016P	15	753.88 ± 18.55	749.51	403.86 ± 81.19	397.52	916.74 ± 19.14	915.95
017	15	778.71 ± 14.63	775.86	413.93 ± 96.38	429.36	935.51 ± 15.76	935.50

*p<0.05

Table 6. Comparison of the results of torsion test

Group	N	Torque/Twist rate (gmm/deg)		Yield torsional moment (gmm)		Ultimate torsional moment (gmm)	
		Mean ± SD	Median	Mean ± SD	Median	Mean ± SD	Median
016	15	19.76 ± 2.48	20.58	58.93 ± 5.31	56.00	140.53 ± 13.10	135.00
016P	15	26.16 ± 3.42	26.15	67.07 ± 5.04	68.00	170.80 ± 4.74	172.00
017	15	29.50 ± 3.31	30.05	88.40 ± 4.26	90.00	206.67 ± 4.82	205.00

*p<0.05

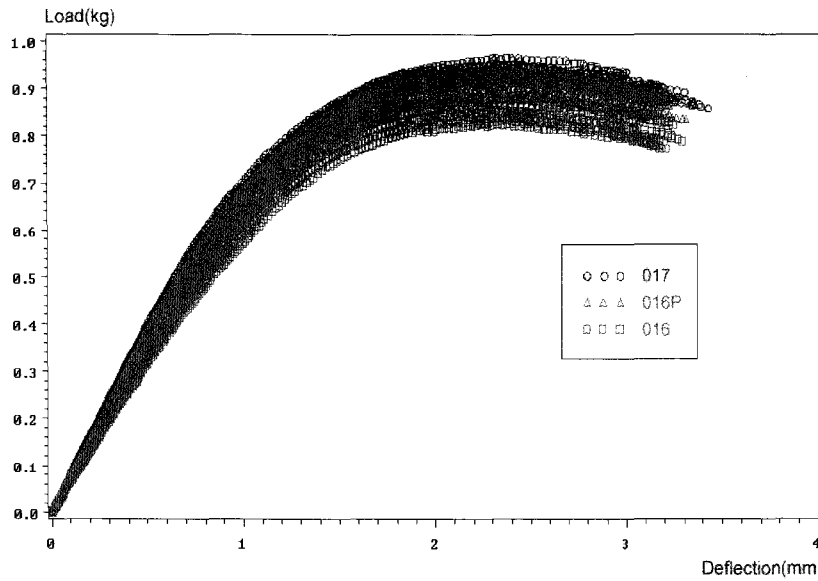


Fig. 4. Comparison of the load-deflection curves between experimental groups after three-point bending test.

3. 비틀림 선재의 표면 관찰

시편의 길이를 7mm, 비틀림 각도를 170° 이상으로 비틀림 시험을 시행하였던 016P군(N=15)의 표면을

주사전자현미경으로 관찰한 결과 2개의 시편에서 도금층의 탈락이 관찰되었으며 13개의 시편에서 본래의 도금 상태를 유지하였다. 결과적으로 비틀림 시험시 13%의 시편에서 도금층의 탈락을 관찰하였다(Fig. 6).

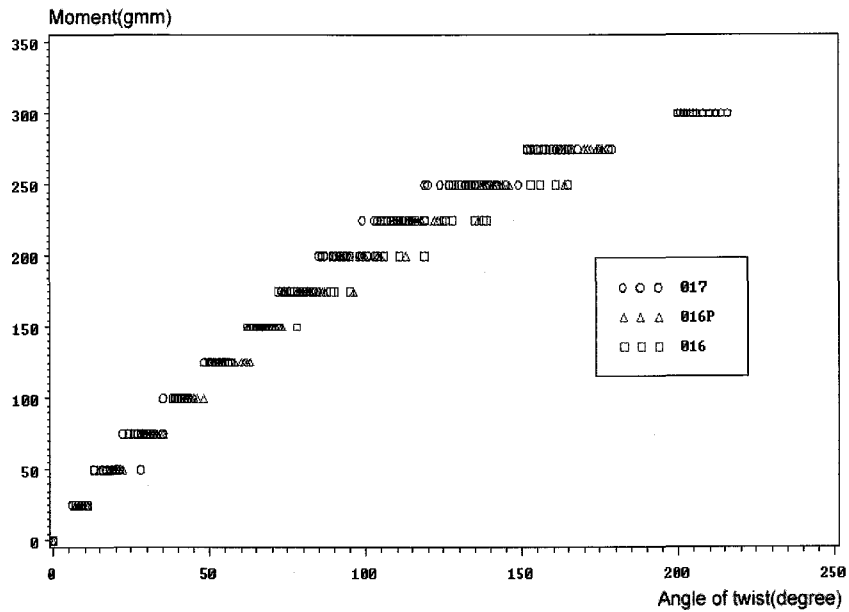


Fig. 5. Comparison of the torque/twist curves between experimental groups after torsion test.

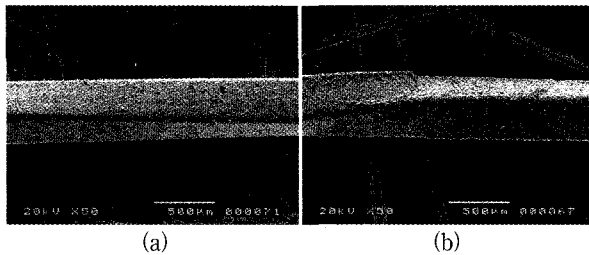


Fig. 6. Scanning electron micrographs of plated 0.016 x 0.016 wire after torque test: intact surface (a), cracked surface (b).

IV. 총괄 및 고찰

에지와이즈 장치를 이용한 교정치료의 경우 치료가 진행되어감에 따라 미세한 치아조절을 위해 가는 선재에서 굵은 선재로의 교환이 필요하며 또한 마무리 단계의 토크 조절을 위해서 각형 선재의 사용이 필요하다. 선재의 교환을 용이하게 하기 위한 연구는 이미 많이 시행되어 왔다. 호선에 1차, 2차 및 3차 굴곡을 일일이 부여하여야 하는 번거로움을 줄인 스트레이트 와이어 시스템¹⁵⁾이 개발되었으나 이는 일반인의 평균치를 이용하여 제작된 것이므로 적지만 여전히 호선에 3차원적 조절을 해주어야 하며 또한 호선

교환시 기존의 호선 모양을 정확히 재현할 수 없으므로 불필요한 치아이동은 불가피한 실정이다. 최근 CAD/CAM 시스템을 이용하여 호선을 제작할 수 있는 기계¹⁶⁾가 개발되기도 하였으나 장비가 고가이며 과정이 다소 복잡하여 널리 보급되지 못한 실정이다. 호선 교환의 불편함을 줄이는 방법으로 조⁵⁾는 도금을 이용하여 원형선재의 직경을 증가시켜 물성을 비교함으로써 임상적 적용가능성을 제시하였다. 원형선재의 사용 후 치아의 3차원적 조절을 위해서 각형선재의 사용이 필요한 바 이에 본 연구는 도금을 이용하여 각형선재의 굵기 증가 후 물성 변화와 토크 조절 정도를 평가하여 그 임상적 적용 가능성을 알아보고자 시행하였다.

각형 선재의 전기도금의 경우 도금 후에 원래의 형태를 유지하면서 굵기만 증가되어야 하며 이를 확인하기 위해 주사전자현미경으로 도금 전과 후 시편의 단면을 관찰하였다. 단면 관찰을 위해서는 시편을 레진블럭에 매몰하여야 하는데 레진블럭에 시편이 수직으로 위치하지 않을 경우 시편의 사면이 보이므로 정사각형 선재의 단면이 직사각형이나 마름모로 보이게 된다. 이를 막기 위하여 시편을 수직으로 위치시킬 수 있는 지그를 이용하는데¹⁷⁾ 본 시험의 경우 시편을 수직으로 위치시킨 후 레진블럭을 만들 수 있는 지그를 제작하여 사용하였다. 이미지 분석 프로그램

은 디지털 이미지 파일에서 단면의 모양을 이루고 있는 윤곽선을 찾아 윤곽선내의 해당 화소를 이용하여 면적을 측정한다¹⁸⁾. 단면의 면적을 비교한 결과 016P 군과 017군이 통계적으로 유의한 차이가 없어 도금이 균일하게 되었음을 나타내었다.

선재의 물성 시험에는 굴곡, 신장, 비틀림 시험이 있는데 전기도금된 시편의 경우 신장 시험시 도금층의 탈락이 나타나 시험 결과에 영향을 미칠 수 있으므로 본 연구에서는 굴곡시험 중 가장 많이 사용하는 3점 굴곡 시험과 비틀림 시험을 시행하여 도금 전후의 물성을 알아보았다.

3점 굴곡 시험시 각 하중-변형 곡선을 보면 하중에 따라 변형률이 선상으로 증가하는 직선 구간이 나타나는데 이 구간이 탄성 구간으로 이 범위 내에서는 가해지는 하중을 제거하면 선재가 변형 없이 본래의 상태로 돌아가게 된다. 이러한 정도를 탄성계수라 부르기도 한다. 본 연구에서는 이러한 직선 구간을 추정하기 위하여 회귀분석의 R-square 값이 가장 높은 지점($R^2=0.999$)까지의 하중/변형률을 계산하여 강성으로 사용하였다.

전반적인 하중-변형 곡선을 보면 016P군이 기존의 016군 보다 강성, 항복강도, 극한강도에서 모두 증가하는 경향을 보였으며 이중 강성과 극한강도는 통계적으로 유의한 차이가 있었다. 항복강도의 경우 그래프상 넓게 분포되어 편차가 심함을 나타내었다. 편차가 높게 나타난 원인으로 도금 과정 중에 나타날 수 있는 기저금속 원자의 배열 변화나 도금층과 기저금속간의 결합력의 차이 그리고 균일하지 못한 열처리를 고려할 수 있다.

치아를 원하는 위치로 이동시키기 위해서 치아의 치축경사를 조절하는 힘을 토크라 한다. Angle이 에지와이즈 장치를 도입한 이래 많은 장치의 변화와 재료의 발달이 있었지만 여전히 각형의 브라켓 슬롯은 개개 치아의 토크를 조절하기 위해 사용되고 있다¹⁷⁾. 토크에 의해 치근의 이동과 치아의 3차원적 조절이 가능해졌으며^{19,20)} 임상적으로 각형 선재를 비틀어 슬롯에 삽입함으로써 치아에 토크를 부여하게 된다. 각형 선재와 슬롯사이에는 유격이 존재하며 브라켓 슬롯의 크기와 선재의 굽기 그리고 모서리 만곡(rounding)정도에 의해 유격이 결정된다^{21, 23)}. 유격은 선재가 브라켓 슬롯에 삽입되는 것을 용이하게 하지만 선재의 토크 조절능력을 감소시킨다. 따라서 도금에 의해 선재의 굽기를 증가시키면 유격이 줄어들고 결과적으로 선재의 토크 조절능력을 증가시킬 수 있다. 토

크를 측정하는 방법으로 ϕ degaard 등²⁴⁾은 레이저 빔과 반사경 그리고 도르레를 이용하여, 최 등¹⁵⁾은 토크게이지와 Jacob 척을 이용하여 토크측정기기를 개발하였다. 최 등이 사용한 토크측정기기는 토크게이지를 이용하므로 측정이 간편하며 경우에 따라 토크게이지를 교환하여 보다 정밀한 측정이 가능하며 쉽게 척간길이를 조절할 수 있어 가상적인 브라켓간 거리의 재현이 쉬워 본 시험에서는 최 등의 토크측정기기를 사용하였다.

비틀림 시험에서 각형 선재의 비틀림과 모멘트의 관계를 살펴보면 하중시 초기의 직선 부위를 탄성 범위라고 한다. 탄성 범위에서는 하중제거시 초기의 하중곡선을 따라 돌아오지만 소성 범위에서는 하중제거시 영구 변형이 일어나면서 직선 형태를 이루며 되 돌아온다. 곡선을 이루는 부위에서의 선재는 일부는 탄성, 일부는 소성 변형이 일어나 그 경계를 정확히 구분하기 힘들다. 따라서 임상적으로 무시할만한 영구 변형의 양을 미리 정하여(본 시험에서는 5° offset) 그 만큼의 변형이 일어나는 모멘트의 크기를 항복 비틀림 모멘트라 부르며 이 이상의 모멘트가 가해지면 선재의 영구변형이 일어난다. 선재에 비틀림 모멘트를 계속 가할지라도 어느 시점에 이르러서는 더 이상의 모멘트가 가해지지 않게 된다. 즉 곡선이 안정기(plateau)를 이루면서 선재가 발휘할 수 있는 최대한의 모멘트의 크기를 최대 비틀림 모멘트라고 한다. 이 상태에서는 모든 부위에서 소성 변형이 일어나지만 잔여 응력에 의해서 하중제거시 평행한 직선형태로 내려온다.

탄성 범위 또는 하중제거시의 직선의 기울기를 비틀림 강성이라 하며 단위 각도 당 비틀림 모멘트의 크기를 말한다. 이는 3점 굴곡 시험시의 하중/변형률에 해당하며 비틀림 강성이 낮을수록 약하고 지속적인 모멘트를 치아에 가할 수 있다.

비틀림 시험 결과 016P군이 기존의 017군과 비교시 항복 비틀림 모멘트와 최대 비틀림 모멘트에서 통계적으로 유의한 차이를 보이며 낮게 나온 반면 비틀림 강성의 경우 그 값이 낮게 나왔지만 두 군의 표준 편차가 커 통계적 유의차는 나타나지 않았다. 이는 강도가 낮은 니켈을 도금한 것을 고려할 경우 예상되었던 결과로서 조의 시험 결과와 일치하였다. 비록 강성이 기존의 017군에 비해 낮게 나왔으나 이는 탄성이 017군보다 더 높음을 나타내므로 임상적으로 과도한 교정력을 가하지 않음으로써 환자의 불편감은 감소되

는 장점은 있을 것으로 생각된다.

도금할 금속 표면에 유기물이나 기타 무기물 혼합물이 존재할 경우 도금의 질이 떨어지며 도금 금속의 밀착성 또한 저하되어 적은 힘에도 기저금속에서 도금금속이 탈락된다. 이는 물성의 저하와 바로 직결되므로 도금의 밀착성은 매우 중요하다. 그러나 정상적으로 오염되지 않고 만들어진 시편이라 할지라도 도금표면이 탈락될 가능성을 배제해서는 안된다. 단지 임상적으로 시편에 굴곡과 비틀림 모멘트를 가할 경우 도금표면의 탈락 여부가 더 중요하다. 비틀림 시험의 경우 $171^\circ \pm 5^\circ$ 의 토크를 주어 물성을 알아보았는데 이는 임상적으로 사용하는 토크양($0^\circ - 30^\circ$)에 비해서는 매우 높은 값이다. 비틀림 시험을 마친 시편의 표면을 관찰한 결과 13%의 시편에서 도금 표면의 분리가 관찰되었는데 이는 비틀림 시험시 비틀림 각도가 170° 이상임을 고려한다면 도금된 시편이 임상적으로 충분한 밀착성을 가지고 있음을 나타내었다.

앞으로 밀착도에 대한 보다 체계적인 연구가 필요하리라 생각되며 도금한 선재의 물성증가를 위해 니켈 이외의 금속을 도금한다거나 도금 과정의 개선이 필요할 것이며 도금 후 금속 유리 정도에 대한 연구도 시행되어야 할 것으로 생각한다.

V. 결 론

한 변의 길이가 0.016 인치인 정사각형 스테인레스 스틸 교정용 선재에 니켈 전기도금을 시행하여 굵기를 0.001 인치 증가시켜 한 변의 길이가 0.017 인치인 정사각형 선재로 만들었고 도금층의 밀착성을 증진시키기 위해 400°C 의 전기로에서 10분간 열처리를 시행하였다. 시편의 물성변화를 알아보기 위하여 전기도금을 이용하여 제작된 15개의 시편을 실험군(016P군)으로, 기존의 0.016 인치(016군), 0.017 인치(017군) 스테인레스 스틸 교정용 선재를 대조군으로 설정한 후 3점 굴곡 시험과 비틀림 시험을 시행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 3점 굴곡 시험 결과 016P군이 016군에 비해 강성과 항복강도, 극한강도 모두 증가하는 경향을 보였으며, 강성과 극한강도는 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.05$).
2. 3점 굴곡 시험 결과 016P군이 017군보다 강성과 항복강도, 극한강도 모두 낮은 경향을 보였으며, 강성은 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.05$).

3. 비틀림 시험 결과 016P군이 016군에 비해 비틀림 강성과 항복 비틀림 모멘트, 최대 비틀림 모멘트 모두 높았으며, 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.05$).

4. 비틀림 시험 결과 016P군이 017군에 비해 비틀림 강성과 항복 비틀림 모멘트, 최대 비틀림 모멘트 모두 낮은 경향을 보였으며, 이 중 항복 비틀림 모멘트와 최대 비틀림 모멘트에서 통계적으로 유의한 차이가 있었다($p < 0.05$).

이상의 결과를 요약해 보면 각형 선재에 도금을 시행하여 굵기를 증가시키고 물성이 증가될 수 있음을 알았다. 비록 도금을 시행한 016P군이 기존의 017군보다 강성이 낮았으나 이는 반대로 016P군이 017군보다 탄성이 높음을 나타내며 토크 조절이 부족한 경우 브라켓 슬롯에 쉽게 삽입되어 교정력을 발휘할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. Lindquist JT. Evolution and development of the edgewise appliance. In: Graber TM, Swain BF ed. Current orthodontic concepts and techniques. Philadelphia: WB Saunders Co., 1975: 453-6.
2. Lindquist JT. Attachments. In: Graber TM, Swain BF ed. Current orthodontic concepts and techniques. Philadelphia: WB Saunders Co., 1975: 502-14.
3. Proffit WR. Contemporary orthodontics. USA: Mosby, 2000: 526-51.
4. Sebanck J, Brantley WA, Pincsak JJ, Conover JP. Variability of effective root torque as a function of edge bevel on orthodontic arch wires. Am J Orthod 1984; 86: 43-51.
5. 조진형. 전기도금을 이용한 교정용 선재의 직경 증가에 관한 실험적 연구. 전남대학교 대학원 석사학위논문 2000.
6. Mandich NV, Krulik GA. On the mechanisms of plating on plastics. Plat Surf Finish 1993; 80: 68-73.
7. Schwartz M. Deposition from aqueous solutions: an overview. In: Bunshah RF ed. Deposition technologies for films and coatings. New Jersey: Noyes Publications, 1982: 385-449.
8. Mimani T, Mayanna SM. Electroless nickel plating from an acidic tartrate bath. Plat Surf Finish 1991; 78: 66-9.
9. Dhar S, Chakrabarti S. Electroless nickel plated contacts on porous silicon. App Phys Lett 1996; 68: 1392-3.
10. Gao LJ, Ma P, Novogradez KM, Norton PR. Characterization of permalloy thin films electrodeposited on Si(111) surfaces. J App Phys 1997; 81: 7595-9.
11. Nakano H, Satoh K, Norris R, et. al. Mechanical properties of several nickel-titanium alloy wires in three-point bending tests. Am J Orthod Dentofac Orthop 1999; 115: 390-5.
12. Oltjen JM, Duncanson MG Jr., Ghosh J, Nanda RS, Currier GF. Stiffness-deflection behavior of selected orthodontic wires. Angle Orthod 1997; 67: 209-18.
13. Kusy RP, Dillej GJ. Elastic modulus of a triple-stranded stainless steel arch wire via three- and four-point bending. J Dent Res 1984:

- 63 : 1232-40.
14. 최광철, 김경호, 박영철, 강창수. 교정용 와이어의 비틀림 모멘트. *대치교정지* 2000 : 30 : 467-73.
 15. Andrews LF. The straight-wire appliance : origin, controversy, commentary. *J Clin Orthod* 1976 : 10 : 99-114.
 16. Jost-Brinkmann PG, Cacciafesta V, Riemeier F. Lingual treatment with the Bending Art System. In : Romano R ed. *Lingual orthodontics*. London : B. C. Decker, 1998 : 185-93.
 17. Raphael E, Sandrik JL, Klapper L. Rotation of rectangular wire in rectangular molar tubes : Part I. *Am J Orthod* 1981 : 80 : 136-44.
 18. Image-Pro Plus reference guide. USA : Media Cybernetics, 2000 : 1- 40.
 19. Rauch ED. Torque and its application to orthodontics. *Am J Orthod* 1959 : 45 : 817-30.
 20. Creekmore TD. Dr. Thomas D. Creekmore on torque. *J Clin Orthod* 1979 : 13 : 305-10.
 21. Meling TR, Ødegaard J. The effect of cross-sectional dimensional variations of square and rectangular chrome-cobalt archwires on torsion. *Angle Orthod* 1998 : 68 : 239-48.
 22. Sebanc J, Brantley WA, Pincsak JJ, Conover JP. Variability of effective root torque as a function of edge bevel on orthodontic arch wires. *Am J Orthod* 1984 : 86 : 43-51.
 23. Ødegaard J, Meling T, Meling E. An evaluation of the torsional moments developed in orthodontic applications : an in vitro study. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1994 : 105 : 392-400.
 24. Meling T, Ødegaard J, Segner D. On bracket slot height : a methodological study. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1998 : 113 : 387-93.

- ABSTRACT -

Change of physical properties after diameter increase by electroplating of orthodontic rectangular stainless steel wire

Jeong-Seok Lee, D.D.S., M.S.D., Ki-Heon Lee, D.D.S., M.S.D., Ph.D.,
Hyeon-Shik Hwang, D.D.S., M.S.D., Ph.D.

Department of Orthodontics, College of Dentistry, Dental Science Research Institute, Chonnam National University

The purpose of this study was to evaluate clinical applications of electroplating method through investigation of the physical properties of orthodontic rectangular wires according to varying their cross section. For the study, it was accomplished to electroplate the 0.016-inch orthodontic rectangular stainless steel wire.

The cross section of stainless steel orthodontic rectangular wire increased from 0.016×0.016 inch to 0.017×0.017 inch by electroplating. The wire was heat treated to improve an adhesion between the wire and electroplated metal.

A three-point bending test and torsion test were conducted in order to compare physical properties among three wire groups; 0.016×0.016 wires (group 016), electroplated 0.016×0.016 wires (group 016P) and 0.017×0.017 wires (group 017). Through the investigations of each wire group, following results were obtained.

1. At three-point bending test, the group 016P showed higher tendency in the degree of stiffness, yield strength and ultimate tensile strength than the group 016. Stiffness and ultimate tensile strength showed statistically significant differences between two groups at three-point bending test ($p < 0.05$).
2. Stiffness, yield strength, and ultimate tensile strength of the group 016P showed lower tendency than those of the group 017. Stiffness showed statistically significant differences between two groups at three-point bending test ($p < 0.05$).
3. Torque/twist rate, yield torsional moment, and ultimate torsional moment of the group 016P showed higher tendency than those of the group 016. All measurements showed statistically significant differences between two groups after torsion test ($p < 0.05$).
4. Torque/twist rate, yield torsional moment, and ultimate torsional moment of the group 016P showed lower tendency than those of the group 017. Yield torsional moment, and ultimate torsional moment showed statistically significant differences between two groups after torsion test ($p < 0.05$).

KOREA. J. ORTHOD. 2003 : 33(2) : 131-40

Key words : Electroplating, Change of physical properties, Rectangular wire, Increase wire size