

교정용 강선재의 열처리 효과에 관한 실험적 연구

연세대학교 치과대학 교정학교실

이명석 · 손병화

목 차

- I. 서 론
- II. 연구재료 및 방법
- III. 연구성적
- IV. 총괄 및 고찰
- V. 결 론
- 참고문헌
- 영문초록

I. 서 론

교정용 선재는 치아에 부착된 Bracket을 통해 치아에 적절한 힘을 부여함으로써 치아이동을 가능하게 하는 필수적인 구성요소이다.

선재는 형상에 따라서 원형과 각형으로 대별되며, 재질에 따라서 여러종류로 구분된다.

과거에는 귀금속 재료를 많이 사용하였으나 현재는 스테인레스 스틸계와 코발트-크롬계 선재인 Elgiloy를 주로 사용하고 있으며, 1960년대에 니켈-티타늄계 선재^{1,2,3)}인 Nitinol을 교정치료에 이용하게 되었으며, 최근에는 베타-티타늄계^{9,28,32)} 선재가 개발되어 이용되고 있다.

이들 교정용 선재는 일반선재와는 달리 구강 내에 존재하는 까닭에, 재료의 내식성과 물리적 특성 및 기계적 성질에 대한 이해가 선행되어야 할 것이다.

교정용 선재는 구성성분의 화학적 조성비에

따라서 다양한 상태변화를 나타내지만 각종 가공방법 및 열처리 방법, 냉각방법에 따라서는 다양한 상태변화를 나타내지만 각종 가공방법 및 열처리 방법, 냉각방법에 따라서는 원하는 물리적 성질을 얻을 수 있다^{15,16,25,27)}. 교정용 선재중에서 스테인레스 강선재가 사용되기 시작한 이래로 Backofen과 Gales⁴⁾는 스테인레스 강선재의 연화 열처리에 의한 응력제거에 대한 효과, Funk¹⁷⁾는 스테인레스 강선재의 열처리 온도에 대한 영향을, Kemler²⁶⁾는 저온 열처리에 의한 호선의 비례한계와 탄성계수의 관계를 보고하였으며, Wilkinson⁴⁷⁾은 구성성분의 관찰에 대해, Howe²⁵⁾ 등은 열처리에 따른 응력이완에 대해, Gaston¹⁹⁾은 교정용 크롬합금의 금속조직에 관한 연구를, Marcotte³⁷⁾는 스테인레스 강선재의 응력이완 열처리에 대한 최적온도와 시간에 대해, 권과 손⁵⁰⁾, 그리고 박과 유⁵²⁾ 등은 기계적 특성 및 인장특성에 대해 각각 보고 하였으며, 이⁵⁴⁾ 등은 열처리 후의 물리적 성질에 대해, 성⁵²⁾ 등은 국산 스테인레스 강선재의 물리적 성질에 관해 보고하였다.

코발트-크롬계 선재에 대해서는, Fillmore와 Tomlinson^{15,16)}은 열처리후의 영구변형에 대한 저항성을, Mahler³⁶⁾와 Martin³⁸⁾ 등은 열처리 온도와 시간변화가 인장력에 미치는 변화를, Williams⁴⁸⁾ 등은 각형선재의 열처리 효과에 관하여 보고하였으며, 오와 성⁵³⁾ 그리고 성⁵²⁾ 등은 열처리 효과와 인장 및 굽힘시험에,

정과 양⁵⁵⁾은 열처리 후의 굽힘시험에 대해 보고하였다.

니켈-티타늄 선재에 대해서는 Andreassen과 Morrow⁹⁾, Andreassen^{1,2)} 등은 니타놀 선재의 상변태 온도에 대한 효과를 Lopez³⁵⁾ 등은 니타놀 선재의 굽힘 특성에 대해, Drake¹⁴⁾ 등은 니타놀 선재의 굽힘 및 비틀림 특성에 대해 보고 하였으며, 베타-티타늄 선재에 대해서는 Burstone과 Goldberg⁹⁾가 기계적 성질을, Kusy²⁸⁾, Kusy와 Greenberg³²⁾는 니켈-티타늄과의 비교를 통해 기계적 특성을 보고 하였다.

이러한 교정용 선재는 일반공업용 선재와는 달리 우수한 내식성과 기계적 특성을 요구할 뿐만 아니라, 특히 탄성한도, 탄성을 및 최대 굽힘복원력등이 요구조건에 적합하여야 한다.

이와같이 교정용 선재의 임상적 적용범위의 확대와 사용량의 증가에 따라 교정용 선재의 열처리후의 변화에 대한 연구는 지속적으로 이루어졌으나, 일반공업용 분야와 달리 교정영역에서 가장 중요한 굽힘시험^{5,6,7,30)}과 비틀림 시험^{14,52)}에 대한 연구는 미미한 상태이다.

이에 저자는 임상교정학 분야에서 널리 사용되고 있는 교정용 스테인레스 강선재의 열처리 온도 및 시간의 변화에 따른 교정용 선재의 물리적 성질을 비교하여 최적의 열처리 온도와 시간을 알아보고자 하였다.

II. 연구재료 및 방법

가. 연구재료

미국 Unitek사의 스테인레스강선재인 Standard Stainless steel 0.016" 원형선재와 0.016"×0.022" 각형 선재를 연구재료로 선택하였다.

나. 연구방법

1. 성분분석

Stainless Steel 선재의 정확한 성분을 분석하기 위하여 30 mm로 절단한 후 원자분광분석기로 정량분석하여 구성성분의 조성범위를 관찰

하였다.

2. 열처리 온도 결정

Rigaku회사 -DTC-10A의 DT-TGA를 이용하여, 금속의 상변태점과 발열 및 흡열반응을 관찰하여 열처리 온도의 범위를 결정하였다.

3. 시험편 제작

원형 및 각형 선재를 열처리 하지 않은 대조군과 온도 및 시간 변화에 따라 열처리한 실험군으로 구분하여, 각 군마다 각각 5개씩의 시험편을 이용하였으며, acetone을 사용하여 표면의 불순물을 제거한 뒤 $\pm 1^\circ\text{C}$ 범위내에서 자동제어 되는 자동 온도 조절 장치가 부착된 전기로를 이용하여 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700°C의 온도에서 3, 6, 9분간 열처리하여 상온의 물에 급냉하였다.

4. 물성시험

가) 인장시험

인장시험은 A.S.T.M.의 시험편 제작 방법에 따라, 80 mm로 절단된 시험편을 Universal testing machin(Model 1125, Instron Co, U. S.A.)에서 측정길이 40 mm, corss head speed 0.5 mm/min, chart speed 20 mm/min, load cell 50 kg으로 하여 시험하였으며, 측정된 응력-변형곡선과 부착된 micro-computer에 의해 최대인장강도, 항복강도 등을 각각 구하였다.

나) 굽힘시험

굽힘시험은 A.S.T.M.의 시험편 제작방법에 따라 40 mm로 절단된 시험편을 Universal testing machine에서 측정길이 20 mm, cross head speed 5 mm/min, chart speed 20 mm/min, load cell 1 kg으로 하여 시험하였으며, 측정된 하중-변위 곡선으로부터, 최대 굽힘력과 복원력, 강성률등을 각각 측정하였다.

다) 비틀림 시험

비틀림 시험은 A.S.T.M.의 규격에 의거 시험편의 전체길이 76 mm, 측정길이는 선재직경의 10배로 하여, 비틀림 시험기를 이용하여

Table 1. Chemical composition of stainless steel orthodontic wire (wt. %)

wire	chemical composition							
	Cr	Ni	C	Mn	Si	P	S	Mo
standard s.s	19.11	8.79	0.07	1.15	0.51	0.024	0.012	0.19

Table 2. Mechanical properties of non-heat treated wires (kg/mm²)

Ultimate tensile strength			Yield strengt	
0.016"		0.016" X 0.022"	0.016"	0.016" X 0.022"
206.9 ± 1.3		198.2 ± 1.5	176.8 ± 2.2	141.1 ± 1.6

Table 3. Ultimate tensile strength of heat treated wire (kg/mm²)

Wire size Time (min) Temp (°C)	0.016"			0.015" X 0.022"		
	3	6	9	3	6	9
400	216.5 ± 2.2	220.5 ± 2.2	221.4 ± 2.2	208.9 ± 1.2	208.5 ± 1.2	211.6 ± 1.9
450	221.3 ± 2.2	222.1 ± 1.8	224.5 ± 2.2	206.3 ± 1.2	208.9 ± 1.2	211.6 ± 1.6
500	232.5 ± 2.2	231.7 ± 1.8	232.5 ± 2.2	211.6 ± 1.9	211.2 ± 1.3	206.6 ± 1.2
550	220.5 ± 3.6	218.1 ± 3.3	192.6 ± 2.2	205.3 ± 1.5	200.0 ± 1.2	187.0 ± 3.3
600	187.1 ± 2.8	168.8 ± 2.2	165.6 ± 2.2	179.0 ± 1.9	164.3 ± 1.2	162.5 ± 1.9
650	161.6 ± 2.2	152.9 ± 2.2	129.8 ± 2.2	157.6 ± 1.2	147.3 ± 1.6	130.8 ± 1.2
700	105.9 ± 2.2	104.3 ± 1.8	101.9 ± 2.2	100.9 ± 1.9	97.3 ± 1.3	93.3 ± 1.0

선재가 파절될 때까지의 비틀림횟수를 측정하였다.

III. 연구성적

가. 성분 분석

스테인레스 강선재의 구성성분은 Table 1과 같으며 18크롬-8니켈의 오스테 나이트계 스테인레스강선재인 SUS 304로 판명되었다.

나. 열처리 온도 결정

DT-TGA를 이용하여 상 변태점을 측정한 결과, 400°C~650°C 사이에서 금속의 상변태가 일어남을 알 수 있었다.

다. 인장 시험 결과

열처리 하지 않은 원형 및 각형 스테인레스 강선재의 최대 인장 강도 및 항복강도의 측정치는 Table 2와 같았다.

열처리 온도와 시간 변화에 따른 스테인레스 강선재의 최대인장 강도는 Table 3과 같으며 원형에서는 500°C 3분, 6분, 9분에서 가장 높았으며, 각형에서는 400°C 9분, 450°C 9분과 500°C 3분, 6분에서 가장 높았다.

열처리 온도 및 시간변화에 따른 스테인레스 강선재의 항복강도 측정치는 Table 4와 같으며, 최대 항복강도는 원형인 경우 500°C 3분, 6분, 9분에서 가장 높았으며, 각형에서는 500°C 3분, 6분에서 가장 높았다.

Table 4. Yield strength of heat treated wire (kg/mm²)

wire size Time (min) Temp (°C)	0.016"			0.016" X 0.022"		
	3	6	9	3	6	9
400	179.9 ± 3.3	184.7 ± 2.2	191.9 ± 3.3	149.6 ± 1.6	156.7 ± 3.3	158.5 ± 1.0
450	193.4 ± 4.5	198.2 ± 1.7	198.2 ± 3.3	158.1 ± 1.8	160.3 ± 1.8	163.4 ± 2.9
500	204.6 ± 3.6	203.8 ± 3.3	201.4 ± 3.6	173.7 ± 1.8	170.1 ± 2.5	157.1 ± 13.0
550	184.7 ± 2.2	180.7 ± 2.2	155.3 ± 2.8	157.6 ± 1.9	146.9 ± 2.4	135.3 ± 2.0
600	144.9 ± 2.2	121.8 ± 2.2	113.1 ± 2.1	110.7 ± 2.0	101.8 ± 1.3	116.5 ± 2.7
650	129.8 ± 2.2	121.8 ± 2.2	113.1 ± 2.1	110.7 ± 2.0	101.8 ± 1.3	91.5 ± 1.5
700	74.1 ± 2.2	72.5 ± 1.7	66.1 ± 2.2	77.7 ± 2.5	66.9 ± 3.1	60.2 ± 3.2

Table 5. Bending tests in non-heat treated wires

Maximum Bending force (gm)	Recovery force (gm)		Stiffness (gm/mm ²)		
	0.016"	0.016" X 0.022"	0.016"	0.016" X 0.022"	
368.0 ± 5.5	846.0 ± 4.5	234.0 ± 5.7	450.0 ± 7.1	47.5 ± 1.8	194.2 ± 4.7

Table 6. Maximum bending force of heat treated wires (gm)

Wire size Time (min) Temp (°C)	0.016"			0.016" X 0.022"		
	3	6	9	3	6	9
400	398.0 ± 4.5	396.0 ± 8.9	400.0 ± 4.5	852.0 ± 10.9	853.0 ± 10.9	852.0 ± 8.4
450	398.0 ± 8.4	400.0 ± 8.4	399.0 ± 2.2	852.0 ± 8.4	856.0 ± 5.5	854.0 ± 5.5
500	428.0 ± 5.5	436.0 ± 5.5	430.0 ± 5.5	874.0 ± 4.2	881.0 ± 8.9	852.0 ± 8.4
550	426.0 ± 5.5	421.0 ± 2.2	398.0 ± 4.5	833.0 ± 4.5	826.0 ± 5.5	772.0 ± 25.9
600	386.0 ± 8.9	344.0 ± 5.5	356.0 ± 5.5	746.0 ± 16.7	698.0 ± 13.0	676.0 ± 15.2
650	353.0 ± 4.5	327.0 ± 4.5	303.0 ± 4.5	680.0 ± 21.2	653.0 ± 4.5	584.0 ± 5.5
700	269.0 ± 2.2	201.0 ± 2.2	181.0 ± 2.2	505.0 ± 5.0	375.0 ± 5.0	348.0 ± 4.5

라. 굽힘 시험결과

열처리하지 않은 원형 및 각형 스테인레스 강선재의 최대굽힘력과 복원력 및 강성률은 Table 5와 같았다.

열처리 온도와 시간 변화에 따른 스테인레스 강선재의 최대 굽힘력은 Table 6과 같았으며 원형 및 각형 모두 500°C 6분에서 가장 높게 나타났다.

복원력은 Table 7과 같으며 원형 및 각형

모두 500°C 6분에서 가장 높게 나타났다.

또한 강성률은 Table 8와 같으며 원형인 경우는 550°C 9분에서 각형인 경우는 500°C 6분에서 가장 높게 나타났다.

마. 비틀림 시험 결과

열처리 하지 않은 각형 스테인레스 강선재의 파절될때까지의 비틀림 횟수는 16.4 ± 2.2회이었고 열처리 온도와 시간 변화에 따른 결과는

Table 7. Recovery force of heat treated wires (gm)

Wire size Time (min) Temp (°C)	0.016"			0.016" X 0.022"		
	3	6	9	3	6	9
400	247 ± 4.5	243 ± 4.5	252 ± 4.5	468 ± 8.4	472 ± 8.4	470 ± 10.0
450	244 ± 5.5	246 ± 5.5	250 ± 7.1	474 ± 4.2	476 ± 8.9	476 ± 5.5
500	264 ± 5.5	266 ± 5.5	264 ± 5.5	490 ± 7.1	500 ± 10.0	491 ± 7.4
550	262 ± 8.4	258 ± 4.5	228 ± 8.4	486 ± 4.2	480 ± 3.5	434 ± 15.2
600	228 ± 4.5	196 ± 5.5	212 ± 4.5	428 ± 14.9	393 ± 6.7	378 ± 14.8
650	212 ± 2.7	189 ± 2.2	179 ± 2.2	387 ± 10.9	362 ± 14.8	336 ± 11.4
700	153 ± 4.5	123 ± 4.5	97 ± 5.7	277 ± 2.1	208 ± 1.7	196 ± 2.2

Table 8. Stiffness of heat treated wires (gm/mm²)

Wire size Time (min) Temp (°C)	0.016"			0.016" X 0.022"		
	3	6	9	3	6	9
400	48.2 ± 0.6	48.5 ± 1.3	48.5 ± 1.4	198.5 ± 4.9	202.4 ± 2.9	200.1 ± 4.7
450	48.2 ± 0.5	49.3 ± 2.1	50.3 ± 1.9	203.4 ± 2.8	205.7 ± 4.6	208.3 ± 4.8
500	50.6 ± 0.5	51.8 ± 2.9	50.5 ± 2.8	214.0 ± 3.1	218.7 ± 4.7	205.3 ± 4.6
550	51.8 ± 1.8	51.1 ± 1.8	57.8 ± 1.9	194.2 ± 2.5	202.0 ± 4.7	194.2 ± 4.7
600	56.4 ± 1.2	50.5 ± 1.5	51.1 ± 1.8	193.1 ± 3.3	190.7 ± 7.1	186.4 ± 7.5
650	51.8 ± 1.8	51.1 ± 1.8	49.1 ± 1.5	194.2 ± 10.0	188.6 ± 6.1	185.0 ± 4.8
700	45.2 ± 1.8	39.2 ± 1.5	37.2 ± 4.3	173.0 ± 3.9	167.4 ± 3.9	152.9 ± 3.0

Table 9. Torsion cycle of heat treated wires (cycle/min)

Time (min) Wire size Temp (°C)	0.016" X 0.022"		
	3	6	9
400	14.6 ± 2.6	13.2 ± 1.8	12.6 ± 1.8
450	13.0 ± 2.0	11.4 ± 1.5	11.8 ± 1.3
500	10.8 ± 2.8	8.8 ± 2.2	10.6 ± 1.5
550	9.6 ± 1.7	10.2 ± 0.8	14.2 ± 1.5
600	13.2 ± 2.4	20.2 ± 1.5	20.8 ± 1.6
650	18.4 ± 3.2	23.6 ± 2.8	25.0 ± 3.2
700	31.0 ± 2.0	35.2 ± 1.5	35.8 ± 1.6

Table 10. Correlation coefficients between temperature and time

	Ultimate tensile strength (kg/mm ²)	Yield strength (kg/mm ²)	Maximum bending force (gm)	Recovery force (gm)	Stiffness (gm/mm ²)	Torsion cycle (cycle/min)
Temperature (°C)	0.877**	0.804**	0.696**	0.754**	0.379**	0.905**
Time (min)	0.119**	0.117**	0.088**	0.070**	0.024**	0.208**

P < 0.01* P < 0.001**

Table 9와 같았으며 500°C 6분에서 가장 최소로 나타났다.

또한 열처리 온도와 시간과의 상관관계는 Table 10과 같았으며 열처리 온도가 열처리 시간보다 더욱 선재의 물리적 성질에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

IV. 총괄 및 고찰

교정용 재료의 발달과 더불어 교정용 선재의 발달은 급속히 이루어지고 있으나, 아직도 교정용 스테인레스 강선재의 사용은 교정치료의 상당부분을 차지하고 있다.

또한 교정용 스테인레스 강선재는 구강내에서 화학적으로 안정성이 있으며 부식 및 변색이 없으며, 충분한 강도를 갖고 있으므로 우수한 선재로 평가받고 있다^{40,42}.

스테인레스 강은 금속조직학적으로는 높은 경도를 가지며 낮은 인성을 갖는 오스테나이트³⁴(austenite)계 및 페라이트³⁴(ferrite)계로 구분되며, γ phase인 오스테나이트계는 마르텐사이트계와 페라이트계보다 기계적 연성이 우수하며, 내식성이 우수한 특징을 갖고 있다.

Kusy와 Greenberg³³는 스테인레스 강선재를 구성성분에 따라, 크롬계와 크롬니켈계로 분류하였으며, Howe²⁵등은 교정용 선재로 부식저항성이 우수한 크롬-니켈계인 오스테나이트 SUS 302, 304, 316의 3종류가 주로 사용된다고 하였다.

본 연구에서는 성분분석결과 SUS 304에 해당되는 스테인레스 강선재로 판명되었으며, DT-TGA를 이용하여 선재의 열처리 온도 범

위를 결정하는 시험을 시행하였다.

실험결과 SUS 304 오스테나이트계 스테인레스 강선재의 발열 및 흡열반응 그리고 상변태를 일으키는 범위가 400°C에서 700°C로 나타난 결과, 보다 정밀한 열처리 온도를 알기 위하여 50°C씩 구분하여 열처리를 시행하였다.

스테인레스 강선재의 인장 강도에 관한 보고에서 Kusy와 Greenberg³³는 253.9 kg/mm², Craig¹² 등은 191.9 kg/mm², Twelftree⁴⁶ 등은 203.9~333.4 kg/mm², 박과 유⁵¹는 0.018" 선재의 인장강도는 208.8 kg/mm², 권과 손⁵⁰은 true-chrome 선재의 인장강도는 213.4±7.07 kg/mm²으로 다양하게 보고하였으며, 항복 강도에 관한 보고에서 Craig¹²등은 0.1% offset 항복강도가 141.8 kg/mm², Twelftree⁴⁶ 등은 0.1% offset 항복강도가 117.4~198.9 kg/mm²으로 보고하였고, 박과 유⁵¹는 149.4 kg/mm², 권과 손⁵⁰은 157.5±8.57 kg/mm²으로 보고하였다.

그러나 본 인장시험결과 열처리 하지 않은 선재의 최대인장 강도는 원형인 경우 206.9±1.3 kg/mm², 각형인 경우는 198.2±1.5 kg/mm²으로서 열처리를 함으로서 점차 증가하다가 원형인 경우 500°C 3분, 6분, 9분에서 각형인 경우 400°C 9분, 450°C 9분 및 500°C 3분, 6분에서 가장 높게 나타났으며, 700°C 이상부터는 수치가 급격하게 감소하는 양상을 나타냈다. 또한 항복강도에서는 열처리하지 않은 선재의 경우 원형에서는 176.8±2.2 kg/mm², 각형인 경우에는 141.1±1.5 kg/mm²으로 열처리를 함으로써 증가하다가 원형인 경우 500°C 3분, 6분, 9분에서 가장 높았으며, 각형인

경우 500°C 3분, 6분에서 가장 높게 나타났고, 700°C 이상에서 급격히 감소하는 양상을 나타냈으며, 열처리 시간보다는 열처리 온도가 더욱 영향을 미치는 것으로 판명되었다.

이러한 결과로 볼때 700°C부터 선재의 재결정(recrystallization)이 일어나는 것으로 볼 수가 있으며, 1100°F부터 선재의 열풀림(annealing)이 시작되며, 가공경화 현상이 풀리고 잔류응력이 소멸된다는 Kohl²⁷⁾의 보고와 일치하고 있으므로, 적절한 열처리 효과로 인해 선재내부의 재결정이 일어나지 않고 잔류응력의 일부제거로 인하여 형태의 안정성을 부여할 수 있다는 점에서는 500°C에서 열처리 하는 것이 바람직하다고 할 수 있겠다.

또한 굽힘시험에 대한 보고에서는 정과 양⁵⁵⁾은 스테인레스 강선재인 경우 500°C부근에서, 코발트-크롬계인 경우 600°C 부근을 가장 적당한 열처리 온도로 보고하였으며, 700°C 이상인 경우에는 강도 및 탄성이 감소된다고 보고하였다. 또한 Drake¹⁴⁾ 등은 0.016" 스테인레스 강선재의 탄성계수가 $0.96 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$, 0.017" \times 0.025"에서는 $1.25 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ 으로 측정되었으며, 복원력은 스테인레스 강선재가 최소로, 니켈-티타늄 선재가 최고로 나타났고, 탄성율은 스테인레스 강선재가 최고로, 니켈-티타늄 선재가 최소로 나타난 것을 보고하였으며, 스테인레스 강선재의 복원력에 대하여 Yoshikawa⁴⁹⁾ 등은 178.6 kg/mm^2 , Brantley^{5,6,7)} 등은 $196.8 \sim 253.1 \text{ kg/mm}^2$, Goldberg²¹⁾ 등은 $196.8 \sim 203.9 \text{ kg/mm}^2$ 으로 보고하였으나, 본 굽힘시험에서는 열처리하지 않은 원형선재인 경우 최대 굽힘력은 $368.0 \pm 5.5 \text{ gm}$, 복원력은 $234.0 \pm 5.7 \text{ gm}$, 강성율은 $47.5 \pm 1.8 \text{ gm/mm}^2$ 으로, 각형 선재인 경우 최대 굽힘력은 $846.0 \pm 4.5 \text{ gm}$, 복원력은 $450.0 \pm 7.1 \text{ gm}$, 강성률은 $194.2 \pm 4.7 \text{ gm/mm}^2$ 으로 나타났으며, 열처리를 함으로써 최대굽힘력, 복원력 모두 원형 및 각형 선재인 경우 500°C 6분에서 가장 높게 나타났으며, 700°C 이상에서 급격히 감소하는 양상을 나타냈으며, 강성률에서는 원형인 경우 550°C 9분에서 각형인 경우에는 500°C 6분에서 가장 높았으며, 700°C

이상에서 급격히 감소하는 양상을 보였다.

또한 비틀림 시험에 대한 보고에서는 성¹¹⁾ 등은 국산 S.K사의 0.016" 스테인레스 원형 강선재의 비틀림 횡수를 18.6 ± 5.36 회로 측정하였으며, Drake¹⁴⁾ 등은 원형 및 각형 선재 비틀림 시험에서 스테인레스 강선재의 탄성율이 가장 우수하며, 니켈-티타늄 선재가 가장 낮은 것으로 나타났으나, 본 비틀림 시험에서는 열처리 하지 않은 경우의 각형 선재에서 16.4 ± 2.2 회로 측정되었으나, 열처리를 함으로써 점점 감소하다가, 500°C 6분에서 가장 최소로 나타났으며, 그후 다시 점차 증가하는 양상을 보였으며 700°C 이상부터 급격히 증가하는 양상을 보였다.

또한 인장, 굽힘, 비틀림시험 모두 다 열처리 시간보다는 열처리 온도가 더욱 영향을 미치는 것으로 판명되었으며, 열처리 온도가 증가되면서 입계 석출에 의한 시효현상이 두드러지는 것으로 추정할 수 있으며, 이번 실험에서도 석출 및 시효현상에 의해 500°C 부근에서 인장, 굽힘, 비틀림 시험의 결과가 가장 우수한 것으로 나타났다.

반면 스테인레스 강선재의 열처리 효과에 대하여 Howe²⁵⁾ 등은 399~510°C에서 5분간 열처리 하였을 때 기계적 성질이 우수하다고 보고하였으며, Backofen⁴⁾은 750°F~800°F에서 10분간 열처리할 경우에 elastic strength가 가장 우수하다고 하였고, Wilkinson⁴⁷⁾은 600°C로 열처리시 비례한계(Proportional limit)가 40%로 감소한다고 하였으며, Funk¹⁷⁾는 850°F에서 3분간 열처리시 호선의 탄성이 증가한다고 하였고, Kemler²⁶⁾는 700°F~800°F 15분을, Marcotte³⁷⁾는 750°F에서 11분간 열처리시에 Elastic Spring back이 최고로 나타난다고 하였다.

또한 Elgiloy선재에 대한 보고에서, Fillmore와 Tomlinson¹⁵⁾은 1100~1200°F에서 5분간 열처리시 영구변형에 대한 저항성이 증가된다고 하였으며, Mahler³⁶⁾는 750°F에서 10분간, Martin³⁸⁾ 등은 900°F에서 7~12분간 열처리시 호선의 항복강도가 증가된다고 보고 하였으며, 최와 이⁵⁶⁾는 1000°F 9분간 열처리시 0.016" \times

0.022" 선재의 인장강도가 가장 높게 나타났으며, 오와 성⁵³⁾ 등은 0.016" 원형선재에서 550° 6분에서 인장강도가 가장 높게 나타난 것을 보고하였다.

그러나 열처리 온도와 시간에서 약간씩 차이가 나는 이유는 선재 제작시의 가공경화의 차이와, 제조회사에 따른 미량원소의 차이, 사용한 furnace의 종류 및 열처리 온도의 항온성 유지시의 어려움, 인장시험기 사용시의 조건변화에 따른 차이점등이 이유인 것으로 생각된다.

일반적으로 스테인레스 강선재가 코발트-크롬계 합금보다, 강도가 크게 나타나나, 열처리에 의한 결과는 코발트-크롬계합금이 스테인레스 강선재보다 강도가 현저하게 증가되는 것으로 나타남바, 열처리에 의한 효과는 스테인레스 강선재보다는 코발트-크롬계 선재가 큰 것^{53,54)}으로 생각된다.

교정용 스테인레스 강선재를 열처리함으로써 강도가 증가하는 성질이 나타나나, 이에 따라서 하중변위율(load edfleclion rate)도 증가하므로 치료초기에 이러한 선재를 사용하면 너무 큰 힘이 치아에 작용하여 부작용을 초래할 수 있으므로 교정치료 중간이나 치료말기에 사용하는 것이 바람직하며, 열처리에 의해 교정용 선재의 기계적 성질은 증가되지만 열처리 온도 및 시간증가에 따른 선재의 부식 및 부식산물과 유리된 금속의 증가는 오히려 인체에 해를 초래할 수 있으므로⁵⁶⁾ 가능한한 선재의 기계적 성질과 내식성이 유지되는 범위내에서 금속의 열처리 온도 및 시간을 결정할 필요가 있다고 사료된다.

V. 결 론

본 연구는 SUS 304 오스테나이트계 스테인레스 강선재인 0.016" 및 0.016"×0.022" 선재에 온도 및 시간 변화를 주어, 400°C에서 700°C까지 각 50°C 간격으로 3, 6, 9분간 열처리 한 뒤 원형 및 각형 선재의 물리적 성질을 열처리 전과 비교함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 최대 인장강도 및 항복 강도는 원형인 경우 500°C에서 가장 높았으며, 각형인 경우 최대 인장강도는 400°C, 450°C 9분 및 500°C 3분, 6분에서 항복강도는 500°C 3분, 6분에서 가장 높았다.

2. 최대 굽힘력과 복원력은 원형 및 각형 선재모두 500°C 6분에서 가장 높았으며, 강성률은 원형인 경우 500°C 9분, 각형인 경우 500°C 6분에서 가장 높았다.

3. 비틀림 파절횟수는 각형 선재에서 500°C 6분에서 최소로 나타났다.

4. 인장시험, 굽힘시험, 비틀림시험 모두에서 700°C 이상으로 열처리한 경우 선재의 연화가 일어나는 것으로 나타났다.

5. 인장시험, 굽힘시험, 비틀림시험 모두에서 선재의 물리적 성질에는 열처리 시간보다는 열처리온도가 더욱 영향을 미치는 것으로 판명되었다.

참 고 문 헌

1. Andreasen, G.F. and Brady, P.R.: A use hypothesis for 55 nitinol wire for orthodontics, *Angle Orthod.*, 42:172-177, 1972.
2. Andreasen, G.F. and Hilleman, T.B.: An evaluation of 55 cobalt substituted nitinol wire for use in orthodontics, *J. Am. Dent. Ass.*, 82:1373, 1375, 1971.
3. Andreasen, G.F. and Morrow, R.E.: Laboratory and clinical analyses of nitinol wire, *Am. J. Orthod.*, 73:142-151, 1978.
4. Backofen, W.A. and Gales, G.F.: Heat treating stainless steel for orthodontics, *Am. J. Orthod.*, 38:755-765, 1952.
5. Brantley, W.A.: Comments on stiffness measurements for orthodontic wires, *J. Dent. Res.*, 55:705, 1976.
6. Brantley, W.A. and Myers, C.L.: Measurement of bending deformation for small diameter orthodontic wires, *J. Dent. Res.*, 58:1696-1700, 1979.

7. Brantley, W.A., et al.: Bending deformation studies of orthodontic wires, *J. Dent. Res.*, 57:609-615, 1978.
8. Burstone, C.J.: Variable modulus orthodontics, *Am. J. Orthod.*, 80:1-16, 1981.
9. Burstone, C.J. and Goldberg, A.J.: Beta titanium, *Am. J. Orthod.*, 77:121-132, 1980.
10. _____: Maximum forces and deflections from orthodontic appliances, *Am. J. Orthod.* 84:95-103, 1983.
11. Craig, R.G.: *Dental Materials*, Saint Louis, The C.V. Mosby Co., pp. 217-225, 1978.
12. Craig, R.G., Slesnick, H.J. and Peyton, F.A.: Application stainless steel in dentistry, *J. Dent. Res.*, 44:587-595, 1965.
13. Donovan, M.T., et al.: Weldability of beta titanium arch wires, *Am. J. Orthod.*, 85: 207-216, 1984.
14. Drake, S.R., et al.: Mechanical properties of orthodontic wires in tension, bending, and torsion, *Am. J. Orthod.*, 82:206-210, 1982.
15. Fillmore, G.M. and Tomlinson, J.L.: Heat treatment of Cobalt-Chromium alloy wire, *Angle Orthod.*, 46:187-195, 1976.
16. _____: Heat treatment of cobalt-chromium alloys of various tempers, *Angle Orthod.*, 49:126-130, 1979.
17. Funk, A.C.: The heat-treatment of stainless steel, *Angle Orthod.*, 21:129-138, 1951.
18. Gardiner, J.H. and Aamodt, A.C.: Some aspects of soldering stainless steel, *Dent. Practit.*, 20:65-76, 1969.
19. Gaston, N.G.: Chrome alloy in orthodontics, *Am. J. Orthod.*, 37:779-797, 1951.
20. Goldberg, A.J. and Burstone, C.J.: An evaluation of beta titanium alloys for use in orthodontic appliances, *J. Dent. Res.*, 58:593-600, 1979.
21. Goldberg, A.J., Morton, J. and Burstone, C.J.: The flexure modulus of elasticity of orthodontic wires, *J. Dent. Res.*, 62:856-858, 1983.
22. Goldberg, A.J., Vanderby, R. and Burstone, C.J.: Reduction in the modulus of elasticity in orthodontic wires, *J. Dent. Res.*, 56: 1227-1231, 1977.
23. Hazel, R.J., Rohan, G.J. and West, V.C.: Force relaxation in orthodontic arch wires, *Am. J. Orthod.*, 86:396-402, 1984.
24. Hocevar, R.A.: A compendium of means to gentle resilient fixed appliances, *Am. J. Orthod.*, 80:237-255, 1981.
25. Howe, G.L., Greener, E.H. and Crimmins, D.S.: Mechanical properties and stress relief of stainless steel orthodontic wire, *Angle Orthod.*, 38:244- 249, 1968.
26. Kemler, E.A.: Effect of low temperature heat treatment on the the physical properties of orthodontic wire, *Am. J. Orthod.*, 42:793, 1951.
27. Kohl, R.W.: Metallurgy in orthodontics, *Angle Orthod.*, 34:37-52, 1964.
28. Kusy, R.P.: Comparison of nickel-titanium and beta titanium wire sizes to conventional orthodontic arch wire materials, *Am. J. Orthod.*, 79:625-629, 1981.
29. _____: On the use of monograms to determine the elastic property ratios of orthodontic arch wires, *Am. J. Orthod.*, 83:374-381, 1983.
30. Kusy, R.P. and Dille, G.J.: Elastic modulus of a triple-stranded stainless steel arch wire via three and four point bending, *J. Dent. Res.*, 63:1232-1240, 1984.
31. _____: Elastic property ratios of a triple-stranded stainless steel arch wire, *Am. J. Orthod.*, 86:177-188, 1984.
32. Kusy, R.P. and Greenberg, A.R.: Com-

- parison of the elastic properties of nickel-titanium and beta titanium arch wires, *Am. J. Orthod.*, 82:199-205, 1982.
33. _____: Effects of composition and cross section on the elastic properties of orthodontic wires, *Angle Orthod.*, 51:325-341, 1981.
 34. Lawrence H. Van Black: Elements of material science and engineering, 5th ed., Addison-Wesley Publishing Co.
 35. Lopez, I., Goldberg, J. and Burstone, C.J.: Bending characteristics of nitinol wire. *Am. J. Orthod.*, 75:569-575, 1979.
 36. Mahler D.B., and Goldwin, L.: An evaluation of small diameter orthodontic wires, *Angle Orthod.*, 37:13, 1967.
 37. Marcotte, M.R.: Optimum time and temperature for stress relief heat treatment of stainless steel wire. *J. Dent. Res.*, 52:1171-1175, 1973.
 38. Martin, R.L., Sarkar, L.K., and Schwaninger, B.: Effect of heat treatment on various properties of blue elgiloy, *J. Clin. Orthod.*, 18:432, 1984.
 39. Mueller, H.J., Greener, E.H. and Marker, B.C.: Corrosion by external polarization of soldered orthodontic wires in cleanser solutions, *Am. J. Orthod.*, 76:555-564, 1979.
 40. O'Brien, W.J. and Ryge, G.: An outline of dental materials and their selection, Philadelphia, W.B. Saunders Co., 307-319, 1978.
 41. Park, H.Y. and Shearer, T.R.: In vitro release of nickel and chromium from simulated orthodontic appliances, *Am. J. Orthod.*, 84:156-159, 1983.
 42. Phillips, R.W.: Science of dental materials, 7th ed., Philadelphia, W.B. Saunders Co., 653-654, 1973.
 43. Richman, G.Y.: Practical metallurgy for the orthodontic, *Am. J. Orthod.*, 42:573-587, 1956.
 44. Schwaninger, B., Sarkar, N.K. and Foster, B.E.: Effect of long term immersion corrosion on the flexure properties of nitinol, *Am. J. Orthod.*, 82:45-49, 1982.
 45. Thurow, R.C.: Edgewise orthodontics, 3rd ed., Saint Louis, The C.V. Mosby Co., pp. 29-34, 320-325, 1972.
 46. Twelftree, C.C., Cocks, G.J. and Sims, M.R.: Tensile properties of orthodontic wire, *Am. J. Orthod.*, 72:682-687, 1977.
 47. Wilkinson, J.V.: Some metallurgical aspects of orthodontic stainless steel, *Am. J. Orthod.*, 48:194-206, 1962.
 48. Williams, B.R., Caputo, A.A. and Chaconas, S.J.: Orthodontic effects of loop design and heat treatment, *Angle Orthod.*, 48:235-239, 1978.
 49. Yoshikawa, D.K., et al.: Flexure modulus of orthodontic stainless steel wires, *J. Dent. Res.*, 60:139-145, 1981.
 50. 권오원, 손병화: 교정용 스테인레스 강선재의 물리적 성질에 관한 비교연구, 대한치과교정학회지. 15: 163-174, 1985.
 51. 박대한, 유영규: 교정용 철사의 인장 특성에 관한 연구, 연세치대 논문집. 3: 513-519, 1985.
 52. 성재현 외: 국산 스테인레스 강선계 교정용선재의 개발과 물리적 성질에 관한 연구, 대한치과교정학회지. 19: 7-24, 1989.
 53. 오용화, 성재현: 교정용선재의 기계적 성질에 미치는 열처리의 영향, 경북치대 논문집. 2: 208-213, 1985.
 54. 이기대, 권오원, 성재현: 치과교정용선재의 물리적 성질에 미치는 열처리의 영향, 경북치대 논문집. 2: 399-409, 1986.
 55. 정미, 양규호: 수중 교정용선재의 열처리 효과에 관한 연구, 전남치대 논문집

1 : 303-317.

56. 최철민, 이병태 : 열처리한 교정용 호선의

기계적 성질과 금속유리에 관한 연구, 대한치과교정학회지. 20 : 471-480, 1990.

— ABSTRACT —

THE EFFECTS OF HEAT TREATMENT OF ORTHODONTIC WIRES

Myeung-Suck Lee, Byung-Hwa Sohn

Department of Orthodontics, College of Dentistry, Yonsei University

The purpose of this study was to evaluate the effect of heat treatment on physical properties of 0.016" and 0.016" x 0.022" stainless steel wires. Temperature of heat treatment had intervals of 50°C from 400°C to 700°C, and time of heat treatment were 3, 6 and 9 minutes. Tensile tests were measured by ultimate tensile strength and yield strength. Bending tests were assessed by maximum bending force, recovery force, and stiffness. Torsion test was evaluated by torsion cycle until wires were fractured.

The results were as follows:

1. In round wires, the highest value of ultimate tensile strength and yield strength were recorded of heat treatment at 500°C.
In rectangular wires, the highest value of ultimate tensile strength were after 9 minutes at 400°C, 450°C and 3, 6 minutes of heat treatment at 500°C, yield strength were the highest value after 3, 6 minutes of heat treatment at 500°C.
2. In both round and rectangular wires, maximum bending force and recovery force were the highest values after 6 minutes of heat treatment at 500°C.
In round wires, highest value of stiffness were formed after 9 minutes at heat treatment at 550°C.
In rectangular wires, the highest value of stiffness were for 6 minutes in 500°C.
3. In rectangular wires, torsion cycle was minimum after 6 minutes of heat treatment at 500°C.
4. In all of tension, bending, and torsion tests, the heat treated wires were softened over at 700°C.
5. In all of tension, bending, and torsion tests, physical properties of the wires were more influenced by the temperatures than the duration of the heat treatment.