

니켈-티타늄 와이어의 열처리에 따른 부하-변위 특성 변화

장수호^a · 임성훈^b · 김광원^c

니켈-티타늄 합금은 높은 spring-back 성질, 초탄성 효과, 형상기억 효과 등의 장점을 가지고 있으나 성형이 어렵다는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 니켈-티타늄 와이어의 굴곡을 위한 열처리 시에 나타나는 부하-변위 곡선의 변화 및 상전이 온도 변화와 같은 물성 변화 양상을 조사하고자 하였다. 수종의 니켈-티타늄 와이어를 열처리를 시행하지 않은 군, 전기저항 열처리 장치를 이용하여 와이어 단면적에 따라 제조회사에서 권장하는 전류를 기초로 하여 00.016" × 00.022" (5 A, 7 sec), 0.018" × 0.025" (6 A, 7 sec) 그리고 0.0215" × 0.028" (7 A, 8 sec) 와이어를 열처리만 시행한 실험군, 열처리를 시행하여 굴곡을 부여한 실험군 그리고 열처리 시간을 1초 증가시켜 굴곡을 부여한 실험군으로 분류하여 3점 굴곡 실험과 시차주사열량측정을 하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 0.016" × 0.022", 0.018" × 0.025" 그리고 0.0215" × 0.028" 니켈-티타늄 와이어에서 굴곡을 부여하지 않고 열처리만 시행한 실험군이 열처리를 시행하지 않은 대조군에 비해 부하-변위 곡선이 상방 이동되어 초탄성 현상에 의한 평탄역(load and unloading plateau)의 힘이 더 증가되었다. 0.016" × 0.022", 0.018" × 0.025" 그리고 0.0215" × 0.028" 와이어에서 열처리만 시행한 실험군이 열처리를 시행하지 않은 군보다 더 낮은 austenite finish (A_f) 온도를 보였다. 0.018" × 0.025" 및 0.0215" × 0.028" 와이어에서 열처리를 시행하여 굴곡을 부여한 실험군은 열처리만 시행한 실험군과 열처리를 시행하지 않은 대조군에 비해 부하-변위 곡선이 상방 이동되었으며, 열처리 시간을 1초 증가시켜 굴곡을 부여한 실험군에서 가장 높은 부하-변위 곡선을 나타냈다. 0.018" × 0.025" 그리고 0.0215" × 0.028" 와이어에서 A_f 온도는 열처리 시간을 1초 증가시켜 굴곡을 부여한 실험군에서 가장 낮게 관찰되었고 열처리를 시행하여 굴곡을 부여한 실험군, 열처리만 시행한 실험군 그리고 열처리를 시행하지 않은 대조군 순으로 높게 관찰되었다. 이상의 결과를 종합할 때, 임상에서 니켈-티타늄 합금 와이어에 굴곡을 부여하기 위해 열처리하는 경우 초탄성 특성은 유지될 수 있으나, 부하-변위 곡선의 상방 증가가 나타나므로, 와이어에 의한 교정력이 증가될 수 있음에 유의하여야 한다. (대치교정지 2006;36(5):349-59)

주요 단어: 니켈-티타늄, 3점 굴곡 시험, 부하-변위 곡선

서론

니켈-티타늄 합금은 교정 영역에서 쓰이는 스테인리스강, 베타-티타늄 등에 비해 낮은 탄성계수를 가지며, 초탄성 성질을 가지고 있어서 교정용 호선으로 널리 사용되고 있다.

니켈-티타늄 합금은 마르텐사이트와 오스테나이트

트의 두 가지 상을 지니고 있고 외력과 온도의 변화에 따른 상전이의 특성을 보인다.^{1,2} 응력에 의해 유도되는 마르텐사이트(stress-induced martensite)는 매우 가역적이며 오스테나이트와 마르텐사이트 사이의 상전이 현상에 의해 변형에 관계없이 일정한 힘을 나타내는데 이런 현상을 초탄성이라고 부른다. 또한 온도에 의한 니켈-티타늄 합금의 상전이에 의해 열탄성 현상과 위탄성 효과가 합쳐져서 형상기억 효과가 나타나게 된다.^{1,3}

니켈-티타늄 합금은 높은 spring-back 성질, 초탄성 효과, 형상기억 효과 등의 장점이 있으나 성형이 어렵고 금속끼리 접합이 어려운 단점을 가지고 있다.^{1,3} 이런 단점을 극복하고자 Miyazaki 등⁴은 염욕(salt bath)를 이용한 열처리 방법으로 니켈-티타늄 와이어

^a대학원생, ^b조교수, ^c교수, 조선대학교 치과대학 교정학교실.

교신저자: 임성훈

광주광역시 동구 서석동 421번지 조선대학교 치과대학 교정학교실.

062-220-3876; e-mail, shlim@chosun.ac.kr.

원고접수일: 2005년 12월 12일 / 원고최종수정일: 2006년 6월 3일 /

원고채택일: 2006년 6월 20일

¹이 논문은 2005년도 조선대학교 학술연구비 지원을 받았음.

Table 1. Manufacturer recommended heat treatment current intensity and time according to the wire size

Wire size	Current intensity (A)
0.016" × 0.022"	4 - 5
0.018" × 0.025"	5 - 6

Recommendation of NiTi bending machine manufacturer at 30 mm wire span of heat treatment. The NiTi bending machine manufacturer explains that ranges stated above may each vary by ± 1A. Heat treatment time was not specified.

의 모양을 변형하는 방법을 소개하였고 열처리 시간을 증가시켰을 때 와이어의 변위 시에 나타나는 힘의 크기가 감소되었음을 보고하였으나 염욕로를 이용한 열처리 방법은 임상적으로 사용하기 어려운 단점이 있었다. Miura 등⁵은 니켈-티타늄 와이어의 임상적 적용을 위해 초탄성 성질을 조절하는 것뿐 아니라 굴곡을 부여하는 것이 필요하다고 하였고, 전기 저항을 이용한 열처리(direct electric resistance heat treatment, DERHT)를 시행한 경우 단일 호선에서 각각의 치아에 이상적인 힘을 적용할 수 있고 초탄성 효과가 감소되지 않는다고 하였다. 그러나 이러한 열처리 시에 니켈-티타늄 선재의 부하-변위 곡선(load-deflection curve)이 어떻게 변화하는지에 대해서는 아직 명확히 밝혀지지 않은 상태이다.

따라서 본 연구에서는 니켈-티타늄 와이어의 굴곡을 위한 열처리 시에 나타나는 부하-변위 곡선의 변화 및 상전이 온도의 변화를 조사하고자 하였다.

연구방법

실험재료

니켈-티타늄 와이어는 현재 시판되고 있는 0.016" × 0.022", 0.018" × 0.025", 0.0215" × 0.028" Sentalloy (Tomy, Tokyo, Japan)를 사용하였다.

실험방법

시편 제작

1. 대조군(1군) 시편 제작

0.016" × 0.022", 0.018" × 0.025", 0.0215" × 0.028"

Table 2. Heat treatment current intensity and time used in this study at 25 mm wire span of heat treatment

Wire size	Current intensity (A)	Heat treatment time (sec)
0.016" × 0.022"	5	7
0.018" × 0.025"	6	7
0.0215" × 0.028"	7	8

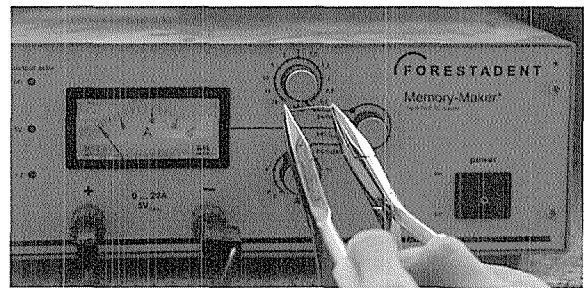


Fig 1. Ni-Ti bending machine.

와이어를 각각 10개씩 후방부위에서 25 mm 길이로 절단하여 시편을 제작하였고 열처리와 굴곡을 부여하지 않았다.

2. 실험군 시편 제작

가. 굴곡 부여 없이 열처리한 군(2군)

0.016" × 0.022", 0.018" × 0.025", 0.0215" × 0.028" 와이어를 1군에서와 동일한 방법으로 준비한 후, 전기저항을 이용한 열처리 장치(Memory Maker, Forestadent, Pforzheim, Germany)를 이용하여 전극이 연결되어 있는 Jarabak 플라이어로 각 시편의 말단을 잡아 열처리함으로써 열처리 구간이 약 25 mm 길이가 되도록 하였다. 시편의 크기에 따라 열처리 장치 제조회사(Forestadent)가 추천하는 전류값과 열처리 시간을 기초로 하여 니켈-티타늄 합금의 표면이 yellow-gold 색상을 보이는 열처리 조건을 찾아 continuous mode로 열처리를 시행하였다(Tables 1, 2 and Fig 1).

나. 굴곡을 부여한 상태에서 열처리한 군(3군)

열처리 시의 굴곡 부여 및 열처리 시간을 증가시킨 니켈-티타늄 와이어의 부하-변위 곡선 변화를 알아보기 위해 0.018" × 0.025", 0.0215" × 0.028"의 2종

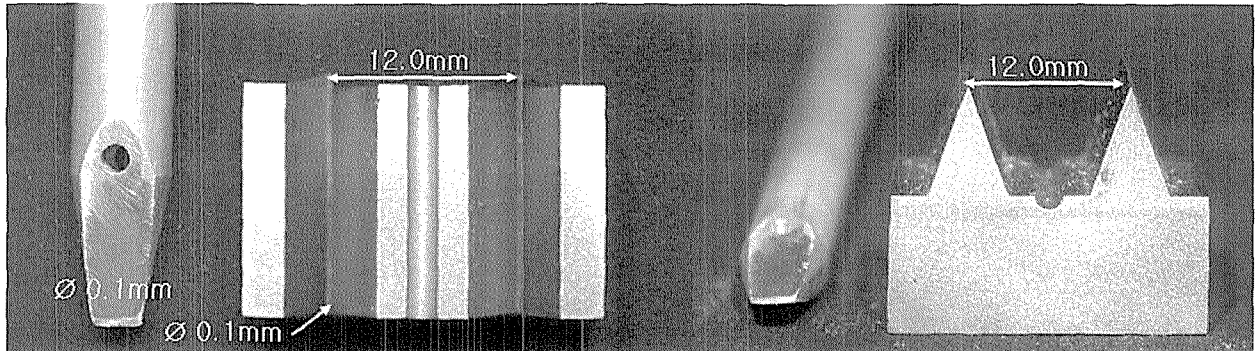


Fig 2. Upper and lower jigs for three point bending test. Wire contact area of upper and lower jigs were fabricated from a 12 mm span length half round 0.1 mm diameter wire (After ADA Spec. No. 32).

류의 와이어에서 각각 10개씩 호선의 전방부(편측의 절치 견치 부위)에서 곡선형태의 시편을 25 mm 크기로 절단하여 시편을 준비한 후, 곡선 형태의 시편이 직선이 되도록 플라이어로 굴곡을 부여한 상태에서 열처리를 시행하였다.

다. 굴곡을 부여한 상태에서 열처리 시 열처리 시간을 1초 증가시킨 군(4군)

굴곡부여 시의 열처리 시간 증가에 따른 효과를 살펴보기 위해 3군과 동일한 시편(3군 시편을 채취하고 남은 반대측의 절치 견치 부위)을 직선 형태로 변형시킨 상태에서 열처리하되 열처리 시간을 3군에서보다 1초 더 증가시켜 시편을 제작하였다. 열처리 시 와이어 표면이 보라색이 되면서 초탄성 성질이 상실되는 것을 방지하기 위해 열처리 시간을 1초만 증가시켜서 시편을 제작하였다.

3점 굴곡 실험

만능시험기(LF Plus, Lloyd, Hampshire, UK)를 이용하여 와이어의 변위에 따른 부하를 측정하였다. 시험기의 상부 지그와 3점 굴곡 시험을 위한 하부 지그에서 시편이 접촉되는 부분은 ADA Spec. No. 32의 규정에 따라 직경 0.1 mm 반원형으로 제작하였고 span 길이는 12 mm가 되도록 제작하였다 (Fig 2).⁶ 열처리에 따른 부하-변위 곡선의 변화를 알아보기 위해 직경 0.1 mm의 상부 지그를 이용하여 1 mm/min의 cross-head speed로 시편의 정 중앙에서 3 mm까지 변위시키는 3점 굴곡 시험을 각 군당 10개의 시편에서 시행하였다. 이때 온도를 유지하기 위해 전열 백열등을 설치한 아크릴 상자를 제작하고

온도 제어기를 연결하였으며, 시편을 지그에 위치시킨 후 37°C 상태로 5분 이상 유지시킨 후 3점 굴곡 실험을 시행하였다.

시차주사열량측정(Differential Scanning Calorimetry, DSC)

시차주사열량측정기(Q10, TA instruments, New Castle, DE, USA)를 이용하여 0.016" × 0.022", 0.018" × 0.025", 0.0215" × 0.028" 니켈-티타늄 와이어의 열처리를 시행한 군(2군)과 열처리를 시행하지 않은 군(1군)의 A_r (austenite finish) 온도를 측정하였다. 또한 0.0215" × 0.028" 니켈-티타늄 와이어를 대상으로 굴곡을 부여하면서 열처리를 시행한 경우(3군) 및 이와 동일하게 굴곡을 부여한 상태에서 열처리하되 열처리 시간을 1초 더 증가시킨 경우(4군)의 A_r 온도를 측정하였다. 전기저항에 의한 열처리 시 시편 중앙부분의 온도 상승이 가장 크기 때문에 중앙부분의 시편을 같은 길이로 얻을 수 있도록 하여 20 g의 시편을 준비하였고, 시차주사열량측정 시 1분당 10°C의 온도변화가 이루어지도록 하여 1회씩 실험하였다.

통계처리

동일한 크기의 와이어에서 열처리에 따른 부하-변위 곡선 변화의 유의성 평가를 위해 독립표본 t-검정을 시행하였고 0.018" × 0.025", 0.0215" × 0.028" 와이어에서 굴곡을 부여하면서 열처리를 시행한 경우(3군) 및 이와 동일하게 굴곡을 부여한 상태에서 열처리하되 열처리 시간을 1초 더 증가시킨 경우(4군)의 유의성 검정을 위해 일원배치 분산분석을 시행하

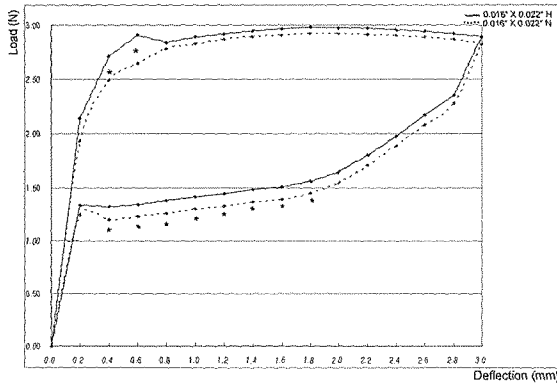


Fig 3. Load-deflection curves in three point bending test of 0.016" × 0.022" Ni-Ti wires. (H: heat treated, N: not heat treated) independent-samples *t*-test. *, *p* < 0.01

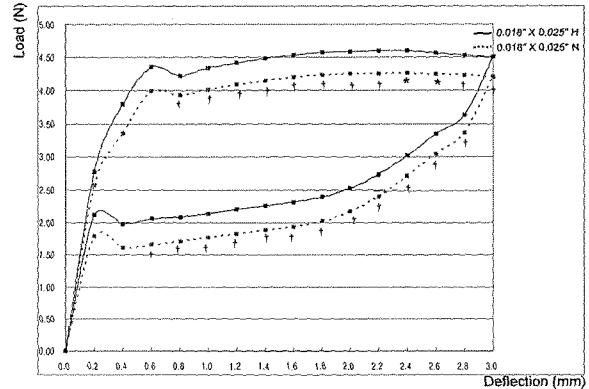


Fig 4. Load-deflection curves of 0.018" × 0.025" Ni-Ti wires. Independent-samples *t*-test. (H: heat treated, N: not heat treated); *, *p* < 0.01; †, *p* < 0.001.

였다. 모든 통계 분석은 SPSS ver. 10.1.3 통계패키지 (SPSS Inc, Chicago, USA)를 이용하여 시행하였다.

연구성적

굴곡을 부여하지 않은 상태에서 열처리에 따른 니켈-티타늄 선재의 부하-변위 곡선의 변화

0.016" × 0.022", 0.018" × 0.025", 0.0215" × 0.028" 니켈-티타늄 와이어의 3점 굴곡 시험에서 1군과 2군 모두에서 부하 시 0.6 mm 변위까지는 변이량의 증가에 따라 급속한 힘의 증가가 관찰되었고 이후에는 응력 유도형 마르텐사이트(stress-induced martensite)가 형성되기 시작함에 따라 초탄성 효과에 의해 부하 시 평탄역(loading plateau)이 3 mm 변위까지 관찰되었다 (Figs 3-5). 탈부하 시 0.016" × 0.022", 0.018" × 0.025" 와이어에서는 1.8 mm 변위 구간까지 힘의 급격한 감소가 관찰되었고 0.0215" × 0.028" 크기의 시편에서는 2.2 mm 변위 지점까지는 힘의 급격한 감소가 관찰되었고 이후 응력 유도형 마르텐사이트가 오스테나이트로 상전이 되기 시작함에 따라 탈부하 시 평탄역(unloading plateau)이 관찰되었다. 3종의 와이어 모두에서 1군에 비해 2군에서 부하 시와 탈부하 시에 부하-변위 곡선이 상방이동하여 부하 시 평탄역 및 탈부하 시 평탄역이 더 높게 관찰되었고 0.2 mm 간격으로 계측한 힘의 비교에서 부하-변위 곡선의 여러 부위들에서 통계학적으로 유의한 차이가 관찰되었다 (Figs 3-5).

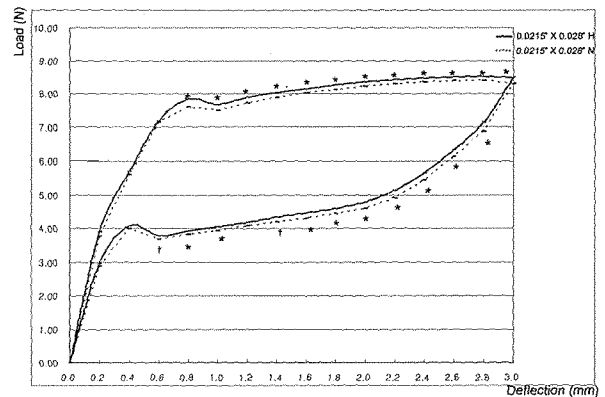


Fig 5. Load-deflection curves of 0.0215" × 0.028" Ni-Ti wires. Independent-samples *t*-test. *, *p* < 0.01; †, *p* < 0.001

굴곡을 부여한 상태의 열처리에 따른 부하-변위 곡선 변화

0.018" × 0.025" 그리고 0.0215" × 0.028" 니켈-티타늄 와이어에서 모든 경우에서 부하 시 및 탈부하 시에 평탄역(loading and unloading plateau)이 관찰되었고 4군에서 가장 높은 부하-변위 곡선이 나타났으며, 이어서 3군, 2군 그리고 1군의 순으로 부하-변위 곡선이 낮아지는 것으로 나타났다 (Figs 6 and 7). 즉, 열처리를 안한 경우보다는 열처리를 시행한 경우에, 열처리만 시행한 경우보다 굴곡을 부여하면서 열처리를 시행한 경우에, 그리고 굴곡을 부여하면서 열처리 시간을 1초 증가시켰을 때 부하-변위 곡선이

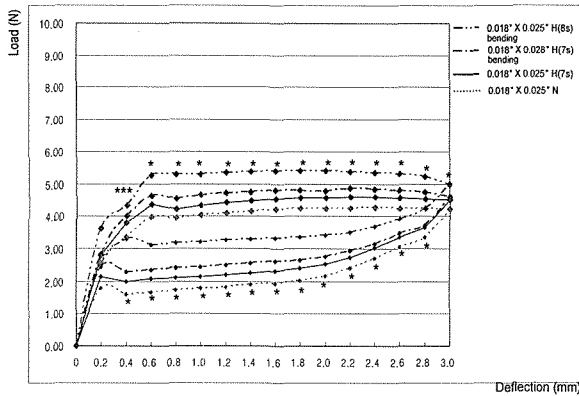


Fig 6. Load-deflection curves of 0.018" × 0.025" Ni-Ti wires with increasing heat treatment durations. One way ANOVA. *, p < 0.001.

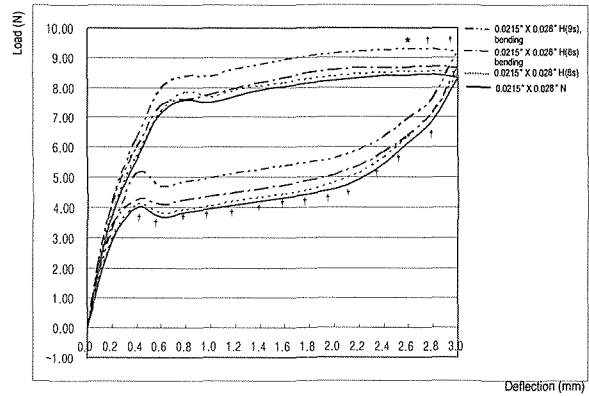


Fig 7. Load-deflection curves of 0.0215" × 0.028" Ni-Ti wires with increasing heat treatment durations. One way ANOVA. *, p < 0.01; †, p < 0.001

Table 3. Comparison of A_f temperatures before and after heat treatment

Wires	Before heat treatment (°C)	After heat treatment (°C)
0.016" × 0.022"	26.03	24.72
0.018" × 0.025"	26.24	25.84

Table 4. Comparison of A_f temperatures of 0.0215" X 0.028" wire according to various heat treatment duration and bending during heat treatment.

Wires	A _f (°C)
0.0215 × 0.028 N	28.87
0.0215 × 0.028 H, 8 sec	27.58
0.0215 × 0.028 H, 8 sec bending	25.10
0.0215 × 0.028 H, 9 sec bending	23.91

더 상방으로 이동하였다.

시차주사열량 측정

0.016" × 0.022", 0.018" × 0.025", 0.0215" × 0.028" 니켈-티타늄 와이어에서 A_f 온도를 비교한 결과 2군의 A_f 온도가 1군보다 낮게 관찰되었다 (Tables 3 and 4, Figs 8-13). 0.0215" × 0.028" 시편에서 네 군 모두에서 A_f를 측정할 결과 4군에서 A_f 온도가 가장 낮았으며, 이어서 3군, 2군 그리고 1군의 순으로 A_f

온도가 높아지는 것으로 나타났다 (Table 4, Figs 12-15).

고찰

교정용 니켈-티타늄 합금의 종류는 조성 및 제조 방법에 따라 초탄성을 보이지 않는 단순 가공 경화형 니켈-티타늄 합금(work-hardened NiTi alloy), 초탄성 니켈-티타늄 합금(superelastic NiTi alloy) 그리고 열탄성 니켈-티타늄 합금(thermoelastic NiTi alloy)으

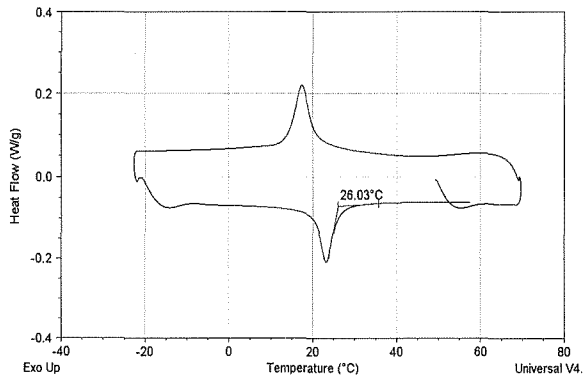


Fig 8. DSC curve of non-heat treated Ni-Ti. (0.016" × 0.022")

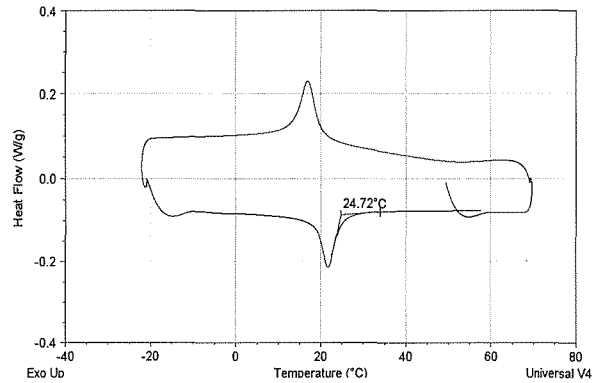


Fig 9. DSC curve of heat treated Ni-Ti. (5 A, 7 sec, 0.016" × 0.022")

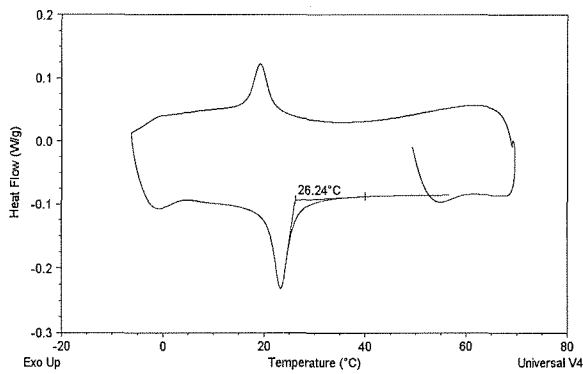


Fig 10. DSC curve of non-heat treated Ni-Ti. (0.018" × 0.025")

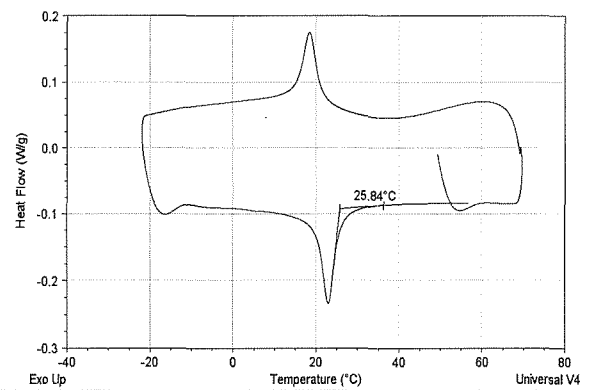


Fig 11. DSC curve of heat treated Ni-Ti. (6 A, 7 sec, 0.018" × 0.025")

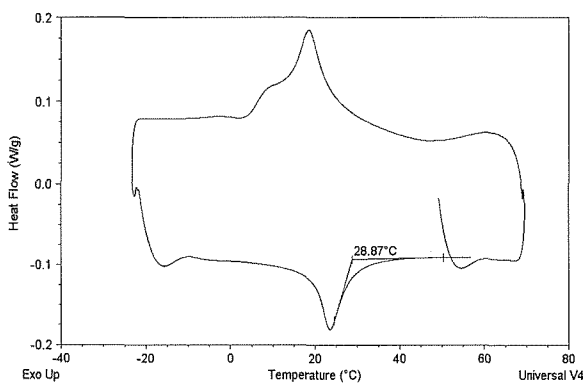


Fig 12. DSC curve of non-heat treated Ni-Ti. (0.0215" × 0.028")

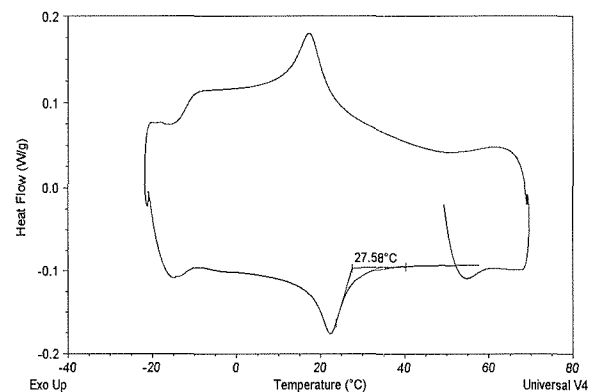


Fig 13. DSC curve of heat treated Ni-Ti. (7 A, 8 sec, 0.0215" × 0.028")

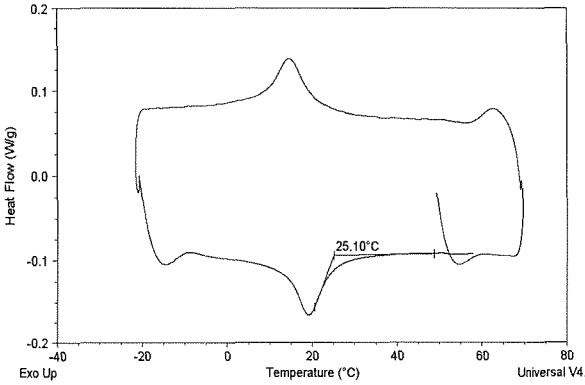


Fig 14. DSC curve of heat treated Ni-Ti. (7 A, 8 sec, 0.0215" x 0.028" bending)

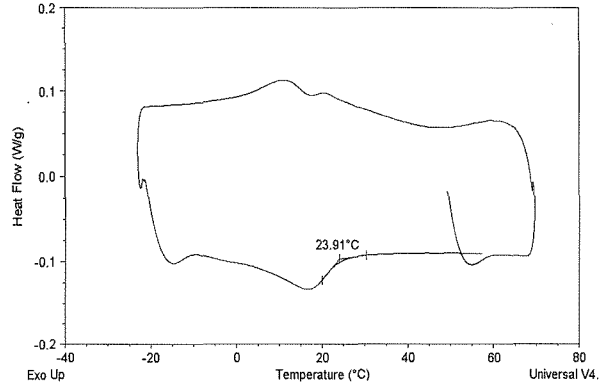


Fig 15. DSC curve of heat treated Ni-Ti. (7 A, 9 sec, 0.0215" x 0.028" bending)

로 구분할 수 있다. 가공 경화형 니켈-티타늄 합금은 1세대 니켈-티타늄 합금으로 Andreason 등⁷⁻⁹에 의해 처음 교정 영역에 소개되었으며, 마르텐사이트 결정 구조로 안정화 되어있는 형태라 하여 M (Martensitic)-NiTi라고도 하였는데 스테인리스강에 비해 낮은 탄성계수를 가졌으나 초탄성의 성질은 없었다.¹⁰

초탄성 니켈-티타늄 합금은 2세대 니켈-티타늄 합금으로 상온에서 오스테나이트 결정 구조로 안정화 되어 있어 A (Austenite)-NiTi라고도 하는데, Chinese NiTi와 Japanese NiTi가 이에 속한다.¹⁰⁻¹¹ 이 합금은 M-NiTi와 달리 초탄성의 성질을 지니고 있다.^{7,12-14} 1990년대에 3세대 니켈-티타늄 합금이 소개되었는데 열탄성 니켈-티타늄 합금이라고도 하며 상전이 온도가 구강 내 온도와 유사하거나 그 이상의 온도로 되어있어 열탄성 혹은 형상 기억 성질을 나타낸다.¹

니켈-티타늄 합금은 마르텐사이트와 오스테나이트의 두 가지 상을 지니고 있고 특별한 조건하에서 상호간에 상전이하는 특징을 가지고 있다.^{1,2} 마르텐사이트는 낮은 온도에서 안정되어 있는 금속 상으로 결정 구조가 단사(monoclinic), 삼사(triclinic) 또는 육방형(hexagonal) 격자의 형태로 되어 있고 탄성계수가 31-35 GPa로 낮다. 오스테나이트는 높은 온도에서 안정되어 있는 금속 상으로 결정 구조가 체심 입방 격자(body centered cubic)의 형태로 되어 있으며 탄성계수가 84-95 GPa로 상대적으로 높다.³ 두 상간의 전이가 일어날 때 두 상의 중간 단계의 상이 나타나는 경우가 있는데 이를 R-상이라 하며 전이성 능면체(rhombohedral) 구조를 지니고 있다.¹⁵ 오스테나

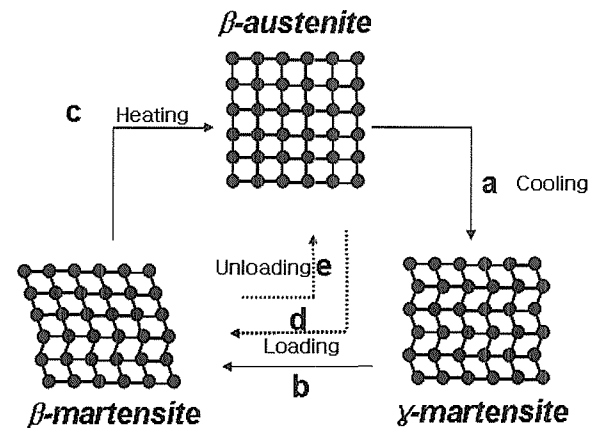


Fig 16. Phase transformation between austenite and martensite. Adapted from figure reported in reference No. 1.

이트와 마르텐사이트 간의 상전이가 일어나기 위해서는 온도 또는 힘의 변화가 일어나야 한다.^{1,2,16}

초탄성 니켈-티타늄 합금은 모상이 베타-오스테나이트 구조를 가지고 있으나 변태온도 이하로 냉각시키면 쌍정변형에 의하여 내부적으로 감마-마르텐사이트로 변태를 하게 되고(Fig 16-a) 다시 외력을 가하게 되면 베타-마르텐사이트로 변태를 하며(Fig 16-b), 변태온도 이상으로 가열을 하게 되면 다시 모상으로 돌아가게 되며(Fig 16-c) 감마-마르텐사이트를 가열하여도 모상으로 복원이 된다. 열에 의해 베타-오스테나이트 ↔ 감마-마르텐사이트 ↔ 베타-마르텐사이트가 순환과정을 거치는데 이런 성질을 열탄성이라고 하며(Fig 16-a↔b↔c), 온도 변화 없이 외

력에 의해 베타-오스테나이트 상이 베타-마르텐사이트로 변태를 하는 현상을 위소성이라고 하고(Fig 16-d) 탈부하 시 베타-마르텐사이트가 베타-오스테나이트로 변태하는 것을 위탄성이라고 하며(Fig 16-e) 교정 영역에서는 위소성과 위탄성의 성질을 초탄성(superelasticity)이라고 부른다.^{1,15}

상전이 일어나는 온도구간을 상전이 온도 범위라 하는데 합금에 함유된 니켈의 함량과 열처리 정도에 의해 영향을 받게 되고 니켈-티타늄 합금의 물리적 특성에 중요한 영향을 미치게 된다. 상전이 온도 범위는 시차열주사량계측(DSC) 또는 엑스선 회절(XRD)을 통해 계측할 수 있다.^{14,17-19}

일반적으로 마르텐사이트 형성이 시작되는 온도를 martensite start temperature (M_s), 마르텐사이트 형성이 끝나는 온도를 martensite finish temperature (M_f), 오스테나이트 형성이 시작되는 온도를 austenite start temperature (A_s), 오스테나이트 형성이 끝나는 온도를 austenite finish temperature (A_f)라고 한다. 니켈-티타늄 합금은 M_f 이하의 온도에서는 마르텐사이트가 안정화된 형태로 존재하고 A_f 이상의 온도에서는 오스테나이트가 안정화된 상태로 존재한다. DSC를 통해 관찰해 보면 마르텐사이트 결정을 가열하게 되면 열에너지를 흡수하기 시작하면서 중간상인 R-상이 나타나기 시작하고 계속적으로 하강시키면 반대로 중간상인 R-상이 나타나고 열에너지의 방출이 일어나면서 마르텐사이트로 변하게 된다.²⁰ R-상으로의 변화는 합금의 종류에 따라 나타나기도 하고 나타나지 않기도 한다. M_f 와 A_f 사이에서는 오스테나이트와 마르텐사이트가 공존한다. 상전이 온도 구간내의 두 상의 공존은 가해지는 힘에 상관없이 합금이 지속적이며 낮은 힘을 보이는데 중요한 역할을 한다.

교정용 니켈-티타늄 호선은 여러 치료 단계에서 사용되도록 고안되었고 교정 의사들은 각각의 치료 단계에 있어서 약하고 지속적인 힘을 치아 및 지지조직에 적용할 수 있게 되었다. 니켈-티타늄 합금 호선은 초탄성과 낮은 부하-변위 곡선을 가지고 있어 교정치료 초기단계에서 널리 쓰이고 있다. 전조절성 브라켓(preadjusted bracket)은 현재 여러 가지 처방으로 생산되고 있으며, 의사의 선호도와 환자의 상태에 따라 브라켓의 처방을 결정하여 사용하지만, 전조절성 브라켓을 사용하더라도 환자 개개인에 따라 많은 변이가 있기 때문에 부가적으로 치아의 위치조절을 위한 굴곡이 필요한 경우가 많다. 그러나 초탄

성 니켈-티타늄 와이어는 굴곡을 부여하기가 매우 어려우며, 굴곡을 부여하기 위해서는 열처리가 필요하다. Miura 등⁵은 전기저항을 이용한 열처리(DERHT)를 이용하여 니켈-티타늄 와이어에 굴곡을 부여하는 방법을 소개하였으며, Otsubo 등¹⁶은 굴곡을 부여한 니켈-티타늄 와이어를 glass bead로 채운 chamber 내에서 수 톤의 압력으로 고정하고 열처리하였을 때의 3차 굴곡(third order bend)의 정확성에 대해 연구하여 와이어를 고정하기 위한 압력이 높은 경우에 보다 정확한 굴곡이 가능하였다고 보고한 바 있다.

본 실험 결과 니켈-티타늄 합금에 열처리를 시행한 경우 부하-변위 곡선이 상방이동되어 초탄성 현상에 의한 평탄역의 힘이 증가하였으며 이는 Miura 등⁵의 연구와 상반되는 결과를 보였으나 Cha 등³의 보고와 같은 결과를 보여주었고 굴곡을 부여한 상태에서 열처리 시에는 더욱 상방 이동한 부하-변위 곡선을 보였다 (Figs 3-7).

니켈-티타늄 호선에 열처리를 가한 경우 실험 결과 모두 열처리를 시행하지 않은 경우보다 부하-변위 곡선(load-deflection curve)이 크게 관찰되었다. Yoneyama 등²²과 Lee 등²³은 니켈-티타늄 합금에 열처리 및 굴곡을 부여한 경우 DSC 실험에서 A_s 와 M_s 온도가 낮아진다고 하였으나 Gil 등²⁴은 A_s 및 M_s 온도가 높아진다고 하였다. 본 실험에서 DSC 결과 열처리를 시행한 군의 A_f 온도가 낮아진 것으로 관찰되었다. A_f 온도의 감소는 초탄성 현상에 의한 평탄역의 힘의 증가와 동반되어 나타났는데 이러한 현상은 A_f 온도가 감소하게 되면 A_f 온도와 3점 굴곡 시험 시의 온도인 $37 \pm 1^\circ\text{C}$ 와의 차이가 커짐에 따라 $37 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서의 오스테나이트 상의 원자 사이의 긴장도가 더 증가하였기 때문이라고 추정된다.

열처리만 시행한 군에서보다 열처리를 시행하여 굴곡을 부여한 실험군에서 더 높은 부하-변위 곡선을 보였고 또한 이때 열처리 시간을 1초 증가시켜 굴곡을 부여한 경우 부하-변위 곡선은 더욱 상방으로 이동하였는데, 이는 임상에서 굴곡을 부여하기 위해 열처리를 시행하면 열처리 전보다 니켈-티타늄 호선에 의한 교정력이 증가하게 됨을 나타내는 것이다. 의도적으로 니켈-티타늄 호선의 힘을 부분적으로 증가시키고자 할 경우에는 이러한 열처리가 바람직할 수 있지만, 힘의 증가 없이 호선에 굴곡만을 부여하고자 하는 경우에는 이러한 열처리가 바람직하지 않다고 생각된다. 니켈-티타늄 와이어의 굴곡을

위한 열처리를 위해 니켈-티타늄 와이어 bending machine의 제조회사(Forestadent)에서는 와이어의 굵기에 따른 권장 전류를 설명하고 있으며 열처리를 시행할 때 와이어가 yellow-gold 색상을 보일 때까지 열처리를 시행하도록 권장하였으나 이러한 기준은 실험에 사용한 시편들의 열처리에 대한 객관적인 기준으로 사용하기에는 어려움이 있어 본 연구에서는 사전 실험을 통하여 굴곡 형성에 적합하며 초탄성의 상실을 초래하지 않는 전류값과 시간을 조사하여 이에 따라 실험하였다. 그러나 열처리 시의 전류와 시간의 다양한 조합에 있어서 특히 전류를 낮추고 시간을 현저히 증가시킨 경우에는 본 실험 결과와 다른 결과가 나올 가능성도 배제할 수 없다고 생각되며 이러한 부분은 향후 연구에서 조사되어야 할 것이다. 또한 열처리 구간이 길어지면 동일 전류에서도 와이어에 가해지는 열의 양은 저항의 증가에 따라 더 증가하게 되므로 향후 연구에서는 열처리 구간에 따른 적정 전류 및 시간에 대해서도 연구되는 것이 바람직하다. 또한 향후 연구에서는 본 실험에서 사용된 시편보다 더 낮은 부하-변위 곡선을 가지며, A_r 온도는 더 높은 니켈-티타늄 선재 또는 다른 성분의 니켈-티타늄 와이어의 열처리 시에 니켈-티타늄 와이어의 부하-변위 곡선이 어떻게 변화하는지를 관찰하여, 굴곡을 위한 열처리 후에도 적절한 수준의 교정력을 발휘할 수 있을지의 여부를 조사하는 것이 필요하며, 최종적으로는 이러한 굴곡을 위한 열처리 시에 부하-변위 특성의 변화를 최소화할 수 있는 니켈-티타늄 선재가 개발되는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

결론

교정용 니켈-티타늄 합금 와이어의 열처리 시에 나타나는 부하-변위 곡선의 변화 및 상전이 온도의 변화를 관찰하고자 $0.016" \times 0.022"$, $0.018" \times 0.025"$, $0.0215" \times 0.028"$ 규격의 니켈-티타늄 와이어를 열처리하여 부하-변위 곡선과 DSC를 측정 한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. $0.016" \times 0.022"$, $0.018" \times 0.025"$ 그리고 $0.0215" \times 0.028"$ 니켈-티타늄 와이어에서 굴곡을 부여하지 않은 상태에서 열처리를 시행한 실험군에서 열처리를 시행하지 않은 대조군에 비해 부하-변위 곡선이 상방 이동되어 초탄성 현상에 의한 평탄역의

힘이 더 증가되었다.

2. $0.016" \times 0.022"$, $0.018" \times 0.025"$ 그리고 $0.0215" \times 0.028"$ 와이어에서 굴곡을 부여하지 않은 상태에서 열처리를 시행한 실험군이 열처리를 시행하지 않은 군보다 더 낮은 A_r 온도를 보였다.
3. $0.018" \times 0.025"$ 및 $0.0215" \times 0.028"$ 와이어에서 열처리를 시행하여 굴곡을 부여한 실험군은 굴곡을 부여하지 않은 상태에서 열처리한 실험군과 열처리를 시행하지 않은 대조군에 비해 부하-변위 곡선이 상방 이동되었으며, 열처리 시간을 1초 더 증가시켜 굴곡을 부여한 실험군에서 가장 높은 부하-변위 곡선을 나타냈다.
4. $0.018" \times 0.025"$ 그리고 $0.0215" \times 0.028"$ 와이어에서 A_r 온도는 열처리 시간을 1초 증가시켜 굴곡을 부여한 실험군에서 가장 낮게 관찰되었고 열처리를 시행하여 굴곡을 부여한 실험군, 열처리를 시행한 실험군 그리고 열처리를 시행하지 않은 대조군 순으로 높게 관찰되었다.

이상의 결과를 종합할 때, 임상에서 니켈-티타늄 합금 와이어에 굴곡을 부여하기 위해 열처리하는 경우 초탄성 특성은 유지될 수 있으나, 부하-변위 곡선의 상방 증가가 나타나므로, 와이어에 의한 교정력이 증가될 수 있음에 유의하여야 한다.

참고문헌

1. Kim YB. A reassessment of orthodontic wire selection. J Korean Gnatho-Orthod Res 1995;2:151-97.
2. William AB, Theodore E. Wire Alloy. Orthodontic materials scientific and clinical aspects 2001;4:84-104.
3. BK Cha, DS Choi, NK Lee. Simplification of orthodontic treatment procedure using superelastic Ni-Ti archwires: One wire system. Korean J Clin Orthod 2005;11:82-9.
4. Miyazaki S, Ohmi Y, Otsuka Y, Suzuki Y. Characteristics of deformation and transformation pseudoelasticity in Ti-Ni alloys. J Phys-Paris supplement 1982;255-60.
5. Miura F, Mogi M, Ohura Y. Japanese NiTi alloy wire: use of the direct electric resistance heat treatment method. Eur J Orthod 1988;10:187-91.
6. American Dental Association ASC MD 156: Restorative and Orthodontic Materials. Specification #32.
7. Andreasen GF, Hilleman TB. An evaluation of 55 cobalt substituted Nitinol wire for use in orthodontics. J Am Dent Assoc 1971;82:1373-5.
8. Andreasen GF, Brady PR. A use hypothesis for 55 Nitinol wire for orthodontics. Angle Orthod 1972;42:172-7.
9. Andreasen GF, Morrow RE. Laboratory and clinical analyses of nitinol wire. Am J Orthod 1978;73:142-51.
10. Burstone CJ, Qin B, Morton JY. Chinese NiTi wire-a new orthodontic alloy. Am J Orthod 1985;87:445-52.

11. Miura F, Mogi M, Ohura Y, Hamanaka H. The super-elastic property of the Japanese NiTi alloy wire for use in orthodontics. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1986;90:1-10.
12. Wilkinson PD, Dysart PS, Hood JA, Herbison GP. Load-deflection characteristics of superelastic nickel-titanium orthodontic wires. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2002;121:483-95.
13. Nakano H, Satoh K, Norris R, Jin T, Kamegai T, Ishikawa F, Katsura H. Mechanical properties of several nickel-titanium alloy wires in three-point bending tests. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1999;115:390-5.
14. Oltjen JM, Duncanson MG Jr, Ghosh J, Nanda RS, Currier GF. Stiffness-deflection behavior of selected orthodontic wires. *Angle Orthod* 1997;67:209-18.
15. Stamm T, Hohoff A, Wiechmann D, Sutfeld J, Helm D. Accuracy of third-order bends of nickel-titanium wires and the effect of high and low pressure during memorizing heat treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2004;126:476-85.
16. Otsubo K, Yoneyama T, Hamanaka H, Soma K. Influence of temperature on the force level of a super-elastic Ni-Ti alloy wire under strain. *J Dent Mater* 1993;12:521-7.
17. Kusy RP. A review of contemporary archwires: their properties and characteristics. *Angle Orthod* 1997;67:197-207.
18. Chen R, Zhi YF, Arvystas MG. Advanced Chinese NiTi alloy wire and clinical observations. *Angle Orthod* 1992;62:59-66.
19. Bradley TG, Brantley WA, Culbertson BM. Differential scanning calorimetry (DSC) analyses of superelastic and nonsuperelastic nickel-titanium orthodontic wires. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1996;109:589-97.
20. Abel E, Luo H, Pridham M, Slade A. Issues concerning the measurement of transformation temperatures of NiTi alloys. *Smart Mater Struct* 2004;13:1110-7.
21. Garner LD, Allai WW, Moore BK. A comparison of frictional forces during simulated canine retraction of a continuous edgewise arch wire. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1986;90:199-203.
22. Yoneyama T, Doi H, Hamanaka H, Okamoto Y, Mogi M, Miura F. Super-elasticity and thermal behavior of Ni-Ti alloy orthodontic arch wires. *Dent Mater J* 1992;11:1-10.
23. Lee JH, Park JB, Andreasen GF, Lakes RS. Thermomechanical study of Ni-Ti alloys. *J Biomed Mater Res* 1988;22:573-88.
24. Gil FJ, Manero JM, Planell JA. Effect of grain size on the martensitic transformation in NiTi alloy. *J Mater Sci* 1995;30:2526-30.

Effects of heat treatment on the load-deflection properties of nickel-titanium wire

Soo-Ho Chang, DDS,^a Sung-Hoon Lim, DDS, MSD,^b
Kwang-Won Kim, DDS, MSD, PhD^c

Objective: Nickel-titanium alloy wire possesses excellent spring-back properties, shape memory and super-elasticity. In order to adapt this wire to clinical use, it is necessary to bend as well as to control its super-elastic force. The purpose of this study is to evaluate the effects of heat treatment on the load-deflection properties and transitional temperature range (TTR) of nickel-titanium wires. **Methods:** Nickel-titanium wires of different diameters (0.016" × 0.022", 0.018" × 0.025" and 0.0215" × 0.028") were used. The samples were divided into 4 groups as follows: group 1, posterior segment of archwire (24 mm) without heat treatment; group 2, posterior segment of archwire (24 mm) with heat treatment only; group 3, anterior segment with bending and heat treatment; group 4, anterior segment with bending and 1 sec over heat treatment. Three point bending test was used to evaluate the change in load-deflection curve and obtained DSC (different scanning calorimetry) to check changes in A_f temperature. **Results:** In the three point bending test, nickel-titanium wires with heat treatment only had higher load-deflection curve and loading and unloading plateau than nickel-titanium wires without heat treatment. Nickel-titanium wires with heat treatment had lower A_f temperature than nickel-titanium wires without heat treatment. Nickel-titanium wires with heat treatment and bending had higher load-deflection curve than nickel-titanium wires with heat treatment and nickel-titanium wires without heat treatment. Nickel-titanium with heat treatment of over 1 sec and bending had the highest load-deflection curve. Nickel-titanium wires with heat treatment and bending had lower A_f temperature, Nickel-titanium wires with heat treatment of over 1 sec and bending had the lowest A_f temperature. **Conclusion:** From the results of this study, it can be stated that heat treatment for bending of Nickel-titanium wires does not deprive the superelastic property but can cause increased force magnitude due to a higher load-deflection curve. (*Korean J Orthod* 2006;36(5):349-59)

Key words: Load-deflection curve, Three point bending, Nickel-titanium, Heat treatment

^aGraduate Student, ^bAssistant professor, ^cProfessor, Department of Orthodontics, School of Dentistry, Chosun University
Corresponding author: *Sung-Hoon Lim*

Department of Orthodontics, Chosun University, Dental Hospital, Sosok-Dong 421, Dong-Gu, Gwangju 501-825, Korea.
+82 62 220 3876; e-mail, *shlim@chosun.ac.kr*.

Received December 12, 2005; Last Revision June 3, 2006; Accepted June 20, 2006.