

2007년 2월
박사학위논문

교정용 초탄성 니켈-티타늄
와이어의 전기저항 열처리를
이용한 굴곡 부여 후의
하중-변위 특성 변화

조선대학교 대학원

치의학과

김관중

2007년 2월
박사학위논문
권영호초탄성니켈-티타늄와이어의전기저항열처리이용한굴곡부여후의하중-변위특성변화
김관중

교정용 초탄성 니켈-티타늄
와이어의 전기저항 열처리를
이용한 굴곡 부여 후의
하중-변위 특성 변화

*Effects of Bending with
Direct Electric Resistance Heat Treatment
on Load-Deflection Characteristics of
Superelastic NiTi Orthodontic Wires*

2006년 10 월 일

조선대학교 대학원

치 의 학 과

김 관 중

교정용 초탄성 니켈-티타늄
와이어의 전기저항 열처리를
이용한 굴곡 부여 후의
하중-변위 특성 변화

지도교수 김 광 원

이 논문을 치의학 박사학위신청 논문으로 제출함.

2006년 10월 일

조선대학교 대학원

치 의 학 과

김 관 중

김관중의 박사학위 논문을 인준함.

위원장	조선대학교	교수	이상호	인
위원	전남대학교	교수	황현식	인
위원	조선대학교	교수	국중기	인
위원	조선대학교	교수	임성훈	인
위원	조선대학교	교수	김광원	인

2006년 10 월 일

조선대학교 대학원

목 차

표목차	iii
도목차	iv
영문초록(<i>ABSTRACT</i>)	v
I. 서론	1
II. 연구재료 및 방법	3
A. 연구재료	3
B. 연구방법	3
C. 통계처리	7
III. 연구 성적	8
A. 3점 굴곡 시험	8
B. 시차주사열량 측정	13
IV. 총괄 및 고안	19
A. 열처리 없이 NiTi 와이어에 굴곡을 부여하는 경우	19
B. 열처리 온도	19
C. 열처리시 DSC 측정값의 변화	20
D. DERHT를 이용한 굴곡 부여시의 진류값과 열처리 시간	21
E. DERHT 열처리시 초탄성 구간의 힘 변화	23
F. DERHT 열처리시 3점 굴곡시험 후 영구변형량의 변화	24
V. 결론	26

참고문헌 ----- 27

표 목 차

Table 1.	Recommended DERHT current intensity for wires up to 30 mm long -----	4
Table 2.	DERHT current intensity and time used in this study -----	5
Table 3.	Load/deflection characteristics of .016" x .022" Sentalloy with the inter-group rank -----	9
Table 4.	Load/deflection characteristics of .016" x .022" L&H Titan with the inter-group rank -----	10
Table 5.	Load/deflection characteristics of .018" x .025" Sentalloy with the inter-group rank -----	11
Table 6.	Load/deflection characteristics of .018" x .025" L&H Titan with the inter-group rank -----	12
Table 7.	Transformation temperature ranges of .016" x .022" wires --	13
Table 8.	Transformation temperature ranges of .018" x .025" wires --	16

도 목 차

Figure 1. NiTi bending machine used in this study -----	5
Figure 2. Upper & lower jigs for three-point bending test -----	6
Figure 3. Load-deflection curves of .016" x .022" Sentalloy -----	9
Figure 4. Load-deflection curves of .016" x .022" L&H Titan -----	10
Figure 5. Load-deflection curves of .018" x .025" Sentalloy -----	11
Figure 6. Load-deflection curves of .018" x .025" L&H Titan -----	12
Figure 7. DSC thermograms of .016" x .022" Sentalloy -----	14
Figure 8. DSC thermograms of .016" x .022" L&H Titan -----	15
Figure 9. DSC thermograms of .018" x .025" Sentalloy -----	17
Figure 10. DSC thermograms of .018" x .025" L&H Titan -----	18

ABSTRACT

Effects of Bending with Direct Electric Resistance Heat Treatment on Load-Deflection Characteristics of Superelastic NiTi Orthodontic Wires

Kwan-Joong, Kim, D.D.S., M.S.D.

**Advisor : Prof. Kwang-Won, Kim,
D.D.S., M.S.D., Ph.D.**

Department of Dentistry

Graduate School, Chosun University

In order to investigate the effects of bending with direct electric resistance heat treatment (hereafter DERHT) on the load-deflection characteristics of superelastic NiTi alloy orthodontic wires, bilateral step bends were formed using DERHT, and then the step bends were removed by unbending using DERHT. .016" x .022" and .018" x .025" Sentalloy and L&H Titan wires were used in this study. The load-deflection characteristics were examined using three point bending tests. The results were as follows.

1. Bending step bends with DERHT significantly lowered loading and unloading plateau forces of the load-deflection curves of NiTi

wires except .016" x .022" Sentalloy. The forces decreased because the step bends increased the amount of wires placed between the wire supports of lower jigs. The patterns of superelastic plateaus of the load-deflection curves were largely unchanged.

2. Unbending the step bends with DERHT caused recovery of loading and unloading plateau forces of load deflection curves to the force levels of unbent NiTi wires (control group), but the loading force of .018" x .025" Sentalloy was significantly less than the control, and the unloading force was significantly greater than the control.
3. Bending step bends and unbending the step bends with DERHT both increased the amount permanent deformation after three point bending test. This indicates that the bending with DERHT decreased the spring-back of NiTi wires.
4. Differential Scanning Calorimetry showed decreased heat flow of peaks, indicating decreased transformation characteristics.

In conclusion, bending NiTi wires with DERHT deteriorated spring-back property and transformation characteristics, but largely did not deteriorate the superelastic characteristics of load-deflection curves, When bending NiTi wires, slight overbending is recommended to compensate the decreased spring-back.

I. 서론

교정학 분야에 처음 소개된 니켈-티타늄 합금(이후 NiTi) 와이어는 1970년대에 Andreasen¹⁾과 Unitek사의 노력으로 도입된 NITINOL(3M Unitek, Monrovia, CA)이다²⁾. 이 와이어는 일반적인 형상기억 NiTi와 동일한 조성인 니켈과 티타늄의 원자비가 동일한 등원자 조성으로 제조되었으나, 형상기억 성질이나 초탄성(superelasticity) 성질은 갖지 못하였는데, 그 이유는 와이어의 인발 과정에서 8-10% 이상 냉간가공되면서 초탄성을 상실하였기 때문이다³⁾. 이 때문에 이러한 종류의 NiTi를 가공경화형(work-hardened) NiTi로 부르기도 하며, 또는 구강내 온도 범위에서 마르텐사이트상으로부터 오스테나이트상으로 변태될 수 없다고 하여 마르텐사이트 NiTi로 불리기도 한다. 1980년대에는 2세대 NiTi가 소개되었는데^{4,5)}, 2세대 NiTi의 특징은 초탄성이었다⁶⁾. 초탄성 NiTi는 오스테나이트상에서의 상전이가 완료되는 온도(Austenite finish temperature: 이후 A_f 온도)가 구강내 온도와 유사하거나 낮으며, 여기서 초탄성이란 하중-변위 곡선에서 탈하중시 거의 수평적인 구간(superelastic region), 즉 평탄부(plateau)가 나타나는 성질을 뜻한다⁶⁾. 초탄성 NiTi를 A_f 온도 이상에서 변형시키면 응력유기변태(stress-induced transformation)가 발생하여 오스테나이트상이 응력유기 마르텐사이트(stress-induced martensite)로 변태되기 시작하면서⁷⁾ 고무의 탄성거동과 비슷한 초탄성 효과가 나타나는데, 이는 일반적인 금속재료에 있어서의 탄성한계를 10여배 이상 초과해서 크게 변형시키더라도 변형력을 제거하면 고무와 같이 원래의 형태로 되돌아가는 성질이다⁸⁾. 이러한 초탄성 효과는 치열교정에 있어서 와이어의 작동범위를 늘려줄 뿐만 아니라 와이어의 변위량 증감에 따른 하중의 변화를 적게 하여 불규칙한 치아가 교정되면서 변위량이 감소하여도 치아에 가해지는 교정력이 일정하게 유지될 수 있게 한다.

교정치료 시에는, 특히 마무리 단계에서 치아의 위치조절을 위해 step bend와 같은 굴곡이 필요한 경우가 많다. 그러나 NiTi의 초탄성 성질은 NiTi 와이

어에 굴곡을 부여하는 것을 어렵게 하며, 또한 A_f 온도가 상온보다 높은 NiTi 와이어의 경우에는 어느 정도의 굴곡이 부여되었는지를 상온에서 확인하기 어려운 문제점이 있다. 초탄성이 없는 가공경화형 NiTi 와이어의 경우에도 와이어의 연성이 좋지 않아 굴곡 부여시 잘 끊어지는 문제점 때문에 굴곡을 부여하기 어렵다.

Miyazaki 등⁹⁾은 염욕로(salt bath)를 이용한 열처리 방법으로 NiTi 와이어의 모양을 변형하는 방법을 소개하였고 열처리 시간을 증가시켰을 때 와이어의 변위 시에 나타나는 힘의 크기가 감소되었음을 보고한 바 있다. 그러나 염욕로를 이용한 열처리 방법은 굴곡을 부여하기 어렵고 열처리 시간이 많이 소요되는 등 임상적으로 사용하기 어려운 단점이 있었다¹⁰⁾. Miura 등¹⁰⁾은 NiTi 와이어의 임상적 적용을 위해 초탄성 성질을 조절하는 것뿐만 아니라 굴곡을 부여하는 것이 필요하다고 하였으며, 전기 저항을 이용한 열처리(Direct Electric Resistance Heat Treatment, 이후 DERHT)를 시행한 경우 단일 호선에서 각각의 치아에 이상적인 힘을 적용할 수 있고 초탄성 효과가 감소되지 않는다고 하였다. 장 등¹¹⁾은 NiTi 와이어에서 25 mm 간격에서 DERHT를 이용하여 열처리를 시행한 경우 하중-변위 곡선이 상방 이동되어 초탄성 현상에 의한 평탄부의 힘이 증가하였고, A_f 온도가 낮아졌다고 보고하였다. 그러나 이들의 연구는 호선의 형태를 수정하는 경우 및 역 스피드 만곡(reverse curve of Spee)을 부여하는 경우를 가정한 25 mm 구간에서 완전한 굴곡을 부여하는 실험으로, 개개 치아의 이동을 위한 굴곡 부여시의 NiTi 와이어의 하중-변위 곡선의 변화는 아직 찾아볼 수 없다.

따라서 본 연구에서는 DERHT를 이용하여 교정용 초탄성 NiTi 와이어에 좁은 범위의 굴곡을 부여하였을 때의 하중-변위 특성의 변화를 조사하고자 하였으며, 이를 위해 DERHT를 이용하여 step bend를 부여하였을 때 및 부여된 step bend를 다시 DERHT를 이용하여 직선 상태로 복원시킨 경우의 하중-변위 곡선의 변화 및 영구변형량의 변화를 조사하였다.

II. 연구재료 및 방법

A. 연구재료

NiTi 와이어로는 .016" × .022" 및 .018" × .025" 규격의 Sentalloy 및 L&H Titan(이상 Tomy Inc, Tokyo, Japan)을 사용하였다. Sentalloy에는 힘의 크기에 따라 세 가지 종류가 있는데, 본 연구에서는 이들 중 중간 정도의 힘을 발휘하는 Sentalloy Medium(yellow)을 사용하였다. 와이어 종류별로 동일 batch의 호선만을 실험에 사용하였다.

B. 연구방법

B-1. 시편 제작

각 와이어 종류 당 8개의 호선에서 호선 양쪽의 최후방 부위에서 30 mm 길이로 절단하여 시편을 제작하였다. 각각의 호선에서 절단된 좌우 두 개의 시편 중 한 개는 대조군으로, 반대쪽 한 개는 실험군으로 사용하였다. 각 와이어 종류 당 8개씩의 호선을 실험에 사용하였다. 실험군은 다시 step-bend 군과 unbend군으로 나누었는데, step-bend군에서는 DERHT를 이용하여 step bend를 부여하였으며, unbend군에서는 step-bend군의 와이어에서 다시 DERHT를 이용하여 step bend를 펴서 직선 상태로 회복시켰다. 이에 따라 대조군, step-bend군, unbend군은 각각 와이어 종류별로 8개씩의 시편으로 구성되었다.

B-2. Step bend 부여 및 제거

NiTi 와이어에 굴곡을 부여하는 경우와 제거하는 경우 모두에서 DERHT를 이용하는 NiTi bending machine(Memory Maker, Bernhard Förster GmbH, Pforzheim, Germany)을 사용하였다(Fig 1). 이 장치에는 전선이 연결된 bird beak plier 한 쌍이 부착되어 있어서, 이 plier로 와이어를 잡고 열처리하면서 굴곡을 부여할 수 있도록 되어 있다(Fig 2). Step-bend군에서는 치

아를 정출 또는 압하시키기 위해 양측으로 대칭적인 step bend를 부여하는 경우를 가정하여 대칭적인 두 개의 step bend를 부여하였으며, 이때 양측의 step bend 사이의 거리가 4 mm가 되도록 하였으며, 한 개의 step bend를 이루는 두 굴곡부 사이의 거리가 2 mm가 되도록 하고, 이 부위가 와이어 직선부에 대해 45°가 되도록 하였다. 이때 굴곡이 가능한 좁은 부위에 걸쳐 형성되도록 하기 위해 와이어를 고정하는 두 plier 사이의 거리가 최소가 되도록 하였다. NiTi bending machine 제조회사에서 권장하는 전류¹¹⁾는 Table 1과 같으나 이는 약 30 mm 간격까지의 와이어를 열처리할 때의 권장값으로 step bend를 부여하기 위해 매우 좁은 부위에 열처리하는 경우에 적용하기에는 너무 낮은 전류값이었다. 따라서 본 연구에서는 예비 실험 과정에서 시편의 종류 및 크기에 따라 step bend 형성이 용이하게 이루어지는 열처리 조건을 찾았으며, 실험군들은 이 조건으로 continuous mode로 열처리되었다(Table 2, Fig 1). Unbend군에서는 step bend 부여시와 동일한 방법으로 와이어를 잡되 굴곡이 펴지는 방향으로 와이어를 고정하여, step bend 부여시와 동일한 열처리 조건으로 열처리하였다.

Table 1. Recommended DERHT current intensity for wires up to 30 mm long

Wire size	Current intensity (A)
.016" × .022"	4-5
.018" × .025"	5-6

Recommendation of NiTi bending machine (Memory Maker) manufacturer¹²⁾. The manufacturer explains that the ranges stated above may vary by ± 1 A. Heat treatment time was not specified.

Table 2. DERHT current intensity and time used in this study

Product name	Wire size	Current intensity (A)	Heat treatment time (sec)
Sentalloy	.016" × .022"	17	3
	.018" × .025"	19	3
L&H Titan	.016" × .022"	15	3
	.018" × .025"	17	3

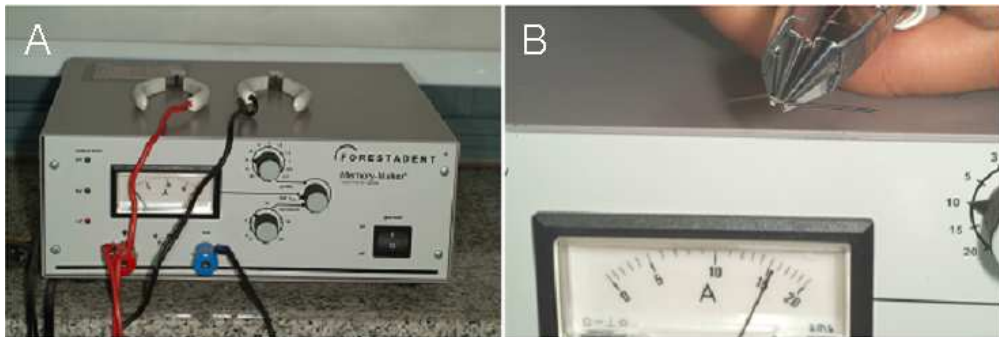


Fig 1. NiTi bending machine used in this study. A, Two pliers are connected to the NiTi bending machine; B, Formation of step bend at 15A.

B-3. 3점 굴곡시험

만능물성시험기(LF Plus[®], Lloyd Co., Hampshire, UK)를 이용하여 와이어의 변위에 따른 하중 변화를 측정하였다. 시험기의 상부 지그와 3점 굴곡 시험을 위한 하부 지그에서 시편이 접촉되는 지지부는 ADA Spec. No. 32¹²⁾의 규정에 따라 직경 0.1 mm 반원형으로 제작하였고 하부 지그 양측의 와이어 지지부 사이의 길이는 12 mm가 되도록 하였다(Fig 2). 상부 지그는 온도변화에 따른 지그의 수축, 팽창을 최소화하기 위해 티타늄으로 제작된 지그 기

저부에 석영 봉을 부착하여 제작하였으며, temperature chamber에서 발생한 열기가 loadcell에 전달되는 것을 최소화하기 위해 상부 지그의 길이를 28 cm로 충분히 길게하였다. 2 kg 용량의 load cell을 사용하였으며, 0.5 mm/min의 cross-head speed로 실험하였다. 먼저 각 시편에서 3.0 mm까지 변위시킨 후 다시 원위치시키는 3점 굴곡시험을 temperature chamber를 37°로 유지시킨 상태에서 시행하였다. 이때 시편을 지그에 위치시킨 후 37°C 상태로 5분 이상 유지시킨 후 3점 굴곡 실험을 시행하였다.

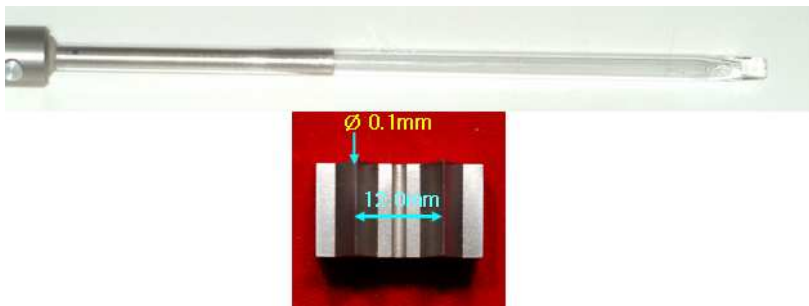


Fig 2. Upper and lower jigs for three-point bending test.

B-4. 시차주사열량 측정 (Differential Scanning Calorimetry: DSC)

시차주사열량계(Q10, TA Instruments, New Castle, DE)를 이용하여 각 와이어 종류별로 시차주사열량을 측정하였으며, 이로부터 A_f , A_s (Austenite start), M_s (Martensite start), M_f (Martensite finish) 온도를 계측하였다. 3점 굴곡시험을 한 와이어에서 step-bend군과 unbend군에서는 열처리한 부위가 포함되도록 하여 약 20 mg의 시편을 준비하였고, ADA spec No. 32에 따라 시차주사열량 측정 시 1분당 10°C의 온도변화가 이루어지도록 하였고, 100°C로부터 시작하여 -40°C까지 냉각시킨 후 다시 100°C로 가열하여 냉각, 가열 시의 상전이를 관찰하였다.

C. 통계처리

와이어 종류별로 one-way ANOVA로 굴곡 부여에 따른 변화를 검정하였으며, Levene의 등분산성 검정에서 등분산이 인정된 항목에서는 Tukey로, 등분산성이 기각된 항목에서는 Tamhane T2로 사후 검정을 시행하여 군간의 순위를 결정하였다. 모든 통계 분석은 SPSS ver. 10.1.3 통계패키지(SPSS Inc, Chicago, USA)를 이용하여 시행하였다.

III. 연구성적

A. 3점 굴곡시험

Sentalloy와 L&H Titan 와이어들이 3점 굴곡시험의 1.5mm 변위 지점에서 발휘하는 힘의 평균을 비교하면, .016" x .022" 와이어에서는 Sentalloy에 비해 L&H Titan은 23 cN 더 낮은 291 cN의 하중시 힘과 21 cN 더 높은 177 cN의 탈하중시 힘을 나타냈으며, 결과적으로 응력 이력값은 L&H Titan에서 44 cN 더 작은 114 cN이었다. .018" x .025" 와이어에서는 하중시 힘은 Sentalloy에 비해 L&H Titan이 87 cN 더 낮은 393 cN이었으며, 탈하중시 힘은 15 cN 더 낮은 224 cN이었으며, 응력 이력값은 71 cN 더 작은 170 cN이었다(Tables 3-6).

Step-bend군 및 unbend군 모두에서 하중/변위 곡선상의 초탄성 평탄부(superelastic plateau)는 유사한 양상으로 나타났으나, step-bend군에서는 .016" x .022" Sentalloy를 제외하고는 통계적으로 유의하게 하중시 및 탈하중시 초탄성 구간의 힘이 감소하는 것으로 나타났다(Figs 3-6, Tables 3-6). Unbend군에서는 대부분 대조군과 동일한 초탄성 구간의 힘을 보였으나 .018" x .025" Sentalloy의 하중시의 경우에는 힘이 유의하게 감소하였으며, .016" x .022" L&H Titan의 탈하중시의 경우에는 힘이 유의하게 증가 하였다. 또한 응력 이력값에 있어서 step-bend군의 Sentalloy에서는 이력값이 유의하게 감소하였으며, step-bend군의 L&H Titan에서는 이러한 이력값의 감소가 관찰되지 않았다(Tables 3-6).

3점 굴곡시험 후 잔존 변형량(영구변형량)에 있어서는 step-bend군과 unbend군이 대조군보다 유의하게 더 큰 영구변형량을 보였다. step-bend군과 unbend군의 영구변형량을 비교하면 .016" x .022" Sentalloy를 제외하고는 unbend군에서 영구변형량이 더 컸으나 step-bend군과 unbend군 사이의 영구변형량 차이는 네 가지 와이어 모두에서 통계적으로 유의하지 않았다(Tables 3-6).

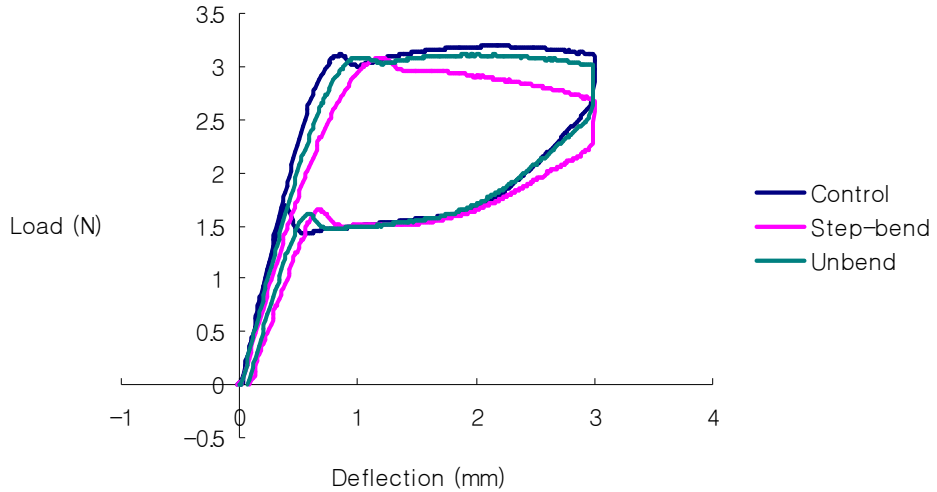


Fig 3. Load-deflection curves of .016" x .022" Sentalloy.

Table 3. Load/deflection characteristics of .016" x .022" Sentalloy with the inter-group rank

	Loading (cN)	Unloading (cN)	Hysteresis (cN)	Rank	Deformation (μm)	Rank
Control	314 \pm 7	156 \pm 6	158 \pm 3	b	10 \pm 5	a
Step-bend	296 \pm 20	152 \pm 18	143 \pm 3	a	74 \pm 16	b
Unbend	308 \pm 7	155 \pm 3	153 \pm 5	b	63 \pm 31	b
<i>p</i> -value	NS	NS	<.001		<.001	

Means \pm standard deviations were shown. NS: Not statistically significant.
a: lowest rank; b: highest rank.

Variables with the same rank are not significantly different.

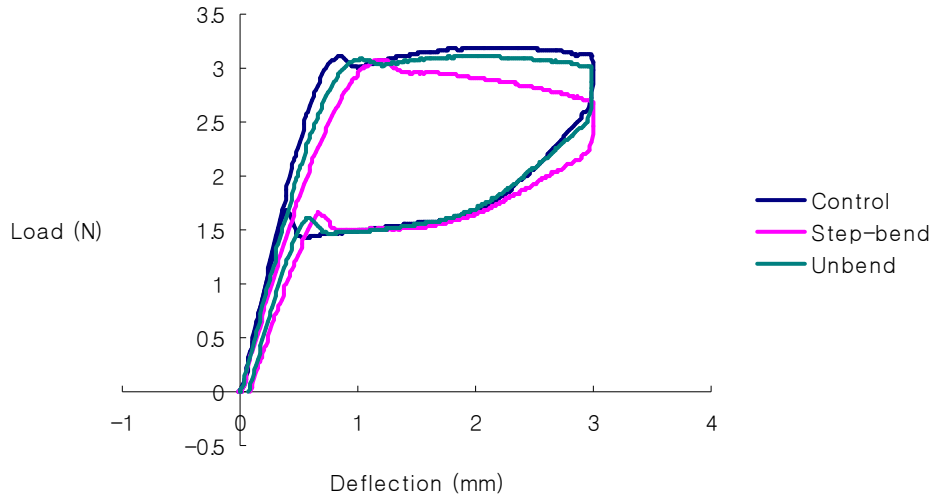


Fig 4. Load-deflection curves of .016" x .022" L&H Titan.

Table 4. Load/deflection characteristics of .016" x .022" L&H Titan with the inter-group rank

	Loading (cN)	Rank	Unloading (cN)	Rank	Hysteresis (cN)	Deformation (μ m)	Rank
Control	291 \pm 3	b	177 \pm 3	b	114 \pm 2	9 \pm 4	a
Step-bend	276 \pm 6	a	162 \pm 8	a	115 \pm 3	45 \pm 14	b
Unbend	296 \pm 7	b	185 \pm 3	c	111 \pm 5	50 \pm 14	b
<i>p</i> -value	<.001		<.001		NS	<.001	

Means \pm standard deviations were shown. NS: Not statistically significant.
a: lowest rank; c: highest rank.

Variables with the same rank are not significantly different.

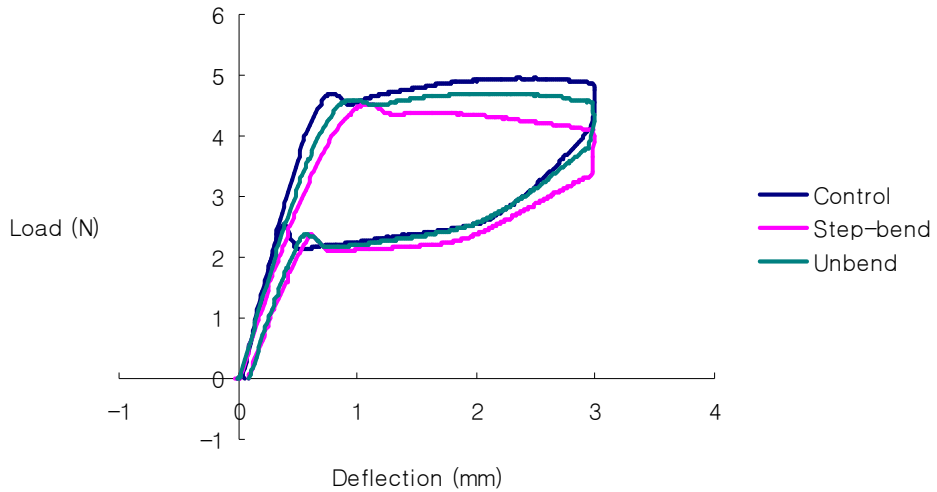


Fig 5. Load-deflection curves of .018" x .025" Sentalloy.

Table 5. Load/deflection characteristics of .018" x .025" Sentalloy with the inter-group rank

	Loading (cN)	Rank	Unloading (cN)	Rank	Hysteresis (cN)	Rank	Deformation (μ m)	Rank
Control	480 \pm 10	c	239 \pm 7	b	241 \pm 4	c	8 \pm 5	a
Step-bend	439 \pm 13	a	219 \pm 10	a	220 \pm 6	a	65 \pm 15	b
Unbend	462 \pm 10	b	234 \pm 8	b	228 \pm 10	b	83 \pm 39	b
<i>p</i> -value	<.001		<.001		<.001		<.001	

Means \pm standard deviations were shown. NS: Not statistically significant.
a: lowest rank; c: highest rank.

Variables with the same rank are not significantly different.

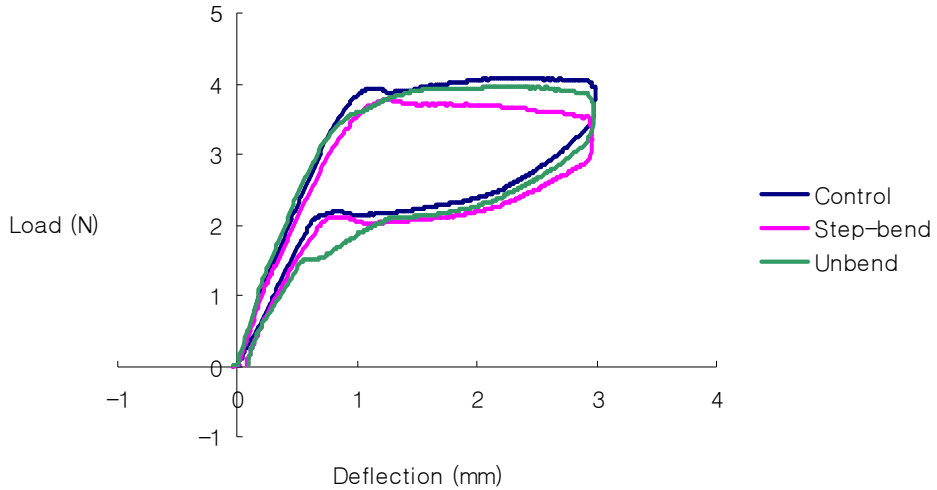


Fig 6. Load-deflection curves of .018" x .025" L&H Titan.

Table 6. Load/deflection characteristics of .018" x .025" L&H Titan with the inter-group rank

	Loading (cN)	Rank	Unloading (cN)	Rank	Hysteresis (cN)	Deformation (μ m)	Rank
Control	393 \pm 10	b	224 \pm 6	b	170 \pm 8	6 \pm 7	a
Step-bend	371 \pm 16	a	207 \pm 12	a	165 \pm 8	46 \pm 16	b
Unbend	409 \pm 26	b	225 \pm 10	b	184 \pm 20	76 \pm 32	b
<i>p</i> -value	.003		.002		NS	<.001	

Means \pm standard deviations were shown. NS: Not statistically significant.
a: lowest rank; b: highest rank.

Variables with the same rank are not significantly different.

B. 시차주사열량 측정

시차주사열량 측정 결과 .016" x .022" Sentalloy와 L&H Titan에서는 대조군에 비해 실험군(step-bend군과 unbend군)에서 변태시 피크의 heat flow가 감소하는 것으로 나타났으며, .016" x .022" L&H Titan의 경우 step-bend군에 비해 unbend군에서 피크의 heat flow가 더욱 감소하였다. .016" x .022" 와이어의 상전이 온도범위(transition temperature range)에 있어서는 Sentalloy와 L&H Titan 모두에서 대조군과 실험군 사이에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다(Table 7, Figs 7, 8). .018" x .025" 와이어에서는 .016" x .022" 와이어에 비해 Sentalloy와 L&H Titan 모두에서 대조군에 비해 실험군의 변태시 피크의 heat flow가 더 현저히 감소하는 것으로 나타났다. .018" x .025" 와이어의 상전이 온도범위에 있어서는 Sentalloy와 L&H Titan 모두에서 상전이 온도범위가 더 넓어지는 것으로 나타났다(Tables 8, Figs 9, 10).

Table 7. Transformation temperature ranges of .016" x .022" wires

Unit: °C

NiTi wire	Heating				Cooling				
	R _s	R _f	A _s	A _f	R _s	R _f	M _s	M _f	
Control	-	-	20.7	26.0	-	-	21.2	15.7	
Sentalloy	Step-bend	-	-	18.3	26.7	-	-	22.5	14.3
	Unbend	-	-	18.3	26.7	-	-	23.4	14.5
L&H Titan	Control	-	-	31.4	35.4	-	-	31.3	24.8
	Step-bend	-	-	31.5	37.1	-	-	31.6	21.3
	Unbend	-	-	31.4	37.0	-	-	31.8	25.8

A_s: Austenite Start temperature; A_f: Austenite Finish temperature;

M_s: Martensite Finish temperature; M_f: Martensite Finish temperature.

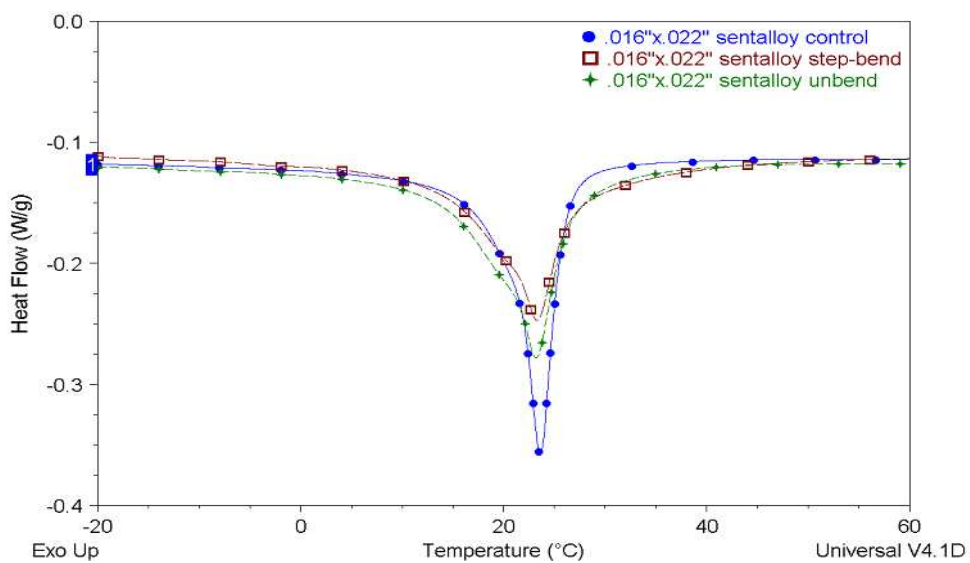
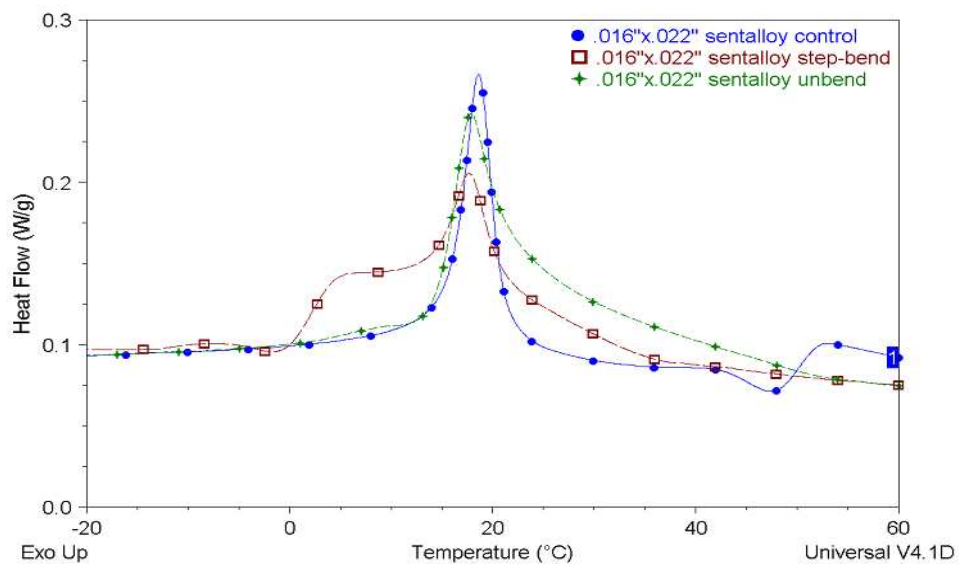


Fig 7. DSC thermograms of .016" x .022" Sentalloy. Top, Forward transformation (cooling phase); Bottom, Reverse transformation (heating phase).

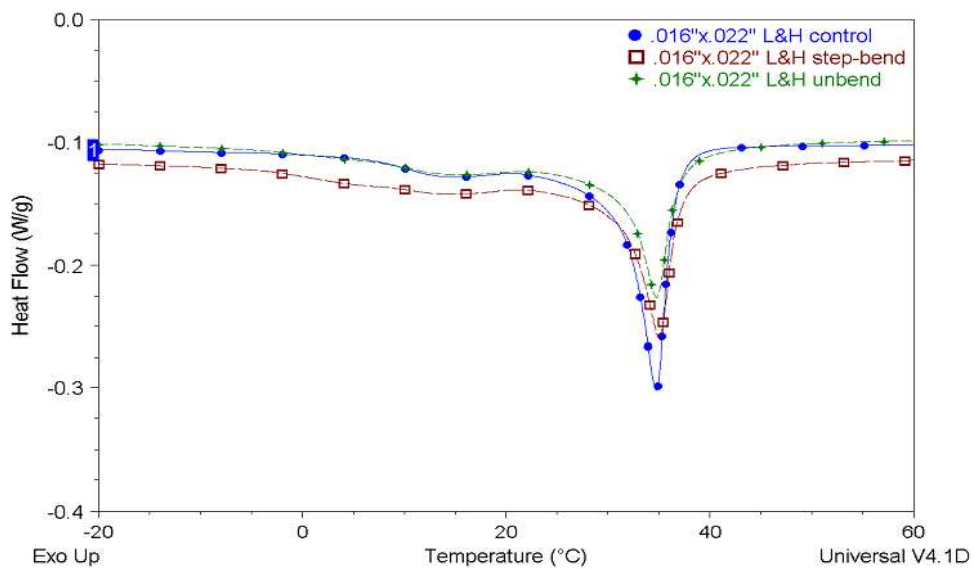
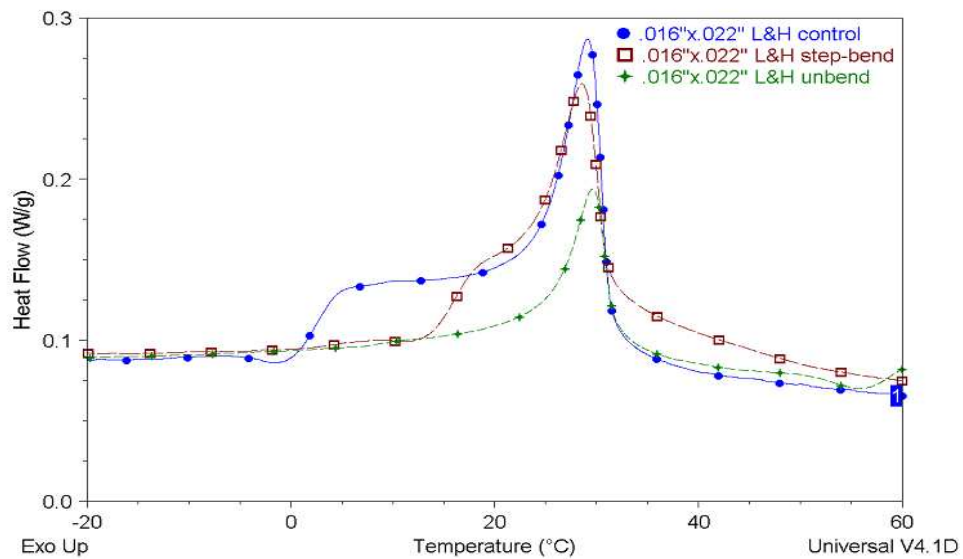


Fig 8. DSC thermograms of .016" x .022" L&H Titan. Top, Forward transformation (cooling phase); Bottom, Reverse transformation (heating phase).

Table 8. Transformation temperature ranges of .018" x .025" wires

Unit: °C

NiTi wire	Heating				Cooling			
	R _s	R _f	A _s	A _f	R _s	R _f	M _s	M _f
Control	-	-	20.1	25.6	-	-	20.9	15.4
Sentalloy Step-bend	-	-	12.5	29.6	-	-	27.9	13.7
Unbend	-	-	16.2	28.7	-	-	22.4	14.9
Control	9.4	21.6	35.4	39.0	-	-	34.4	28.9
L&H Titan Step-bend	16.7	22.1	34.8	44.1	-	-	37.0	26.2
Unbend	-6.9	10.8	34.9	40.1	-	-	34.4	27.1

A_s: Austenite Start temperature; A_f: Austenite Finish temperature;
M_s: Martensite Finish temperature; M_f: Martensite Finish temperature.

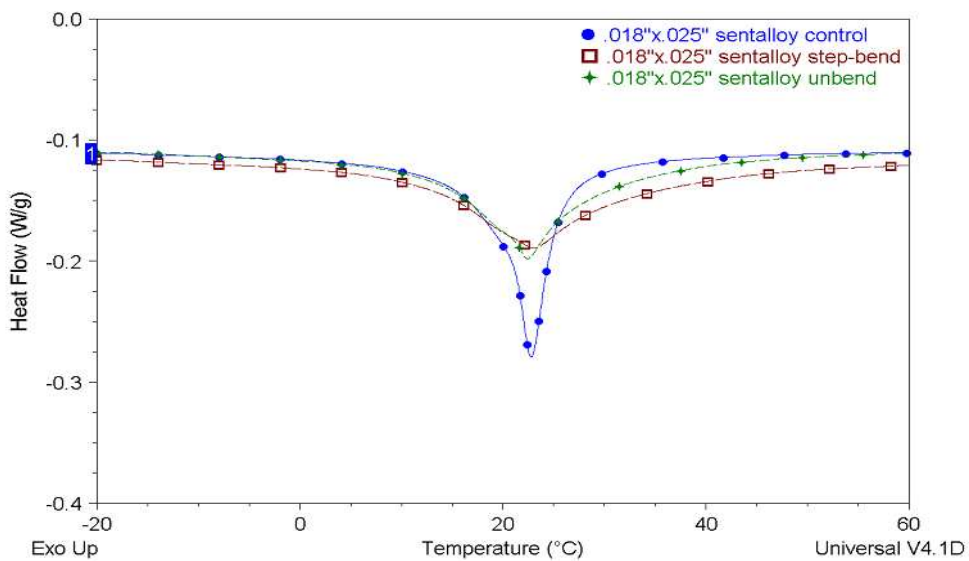
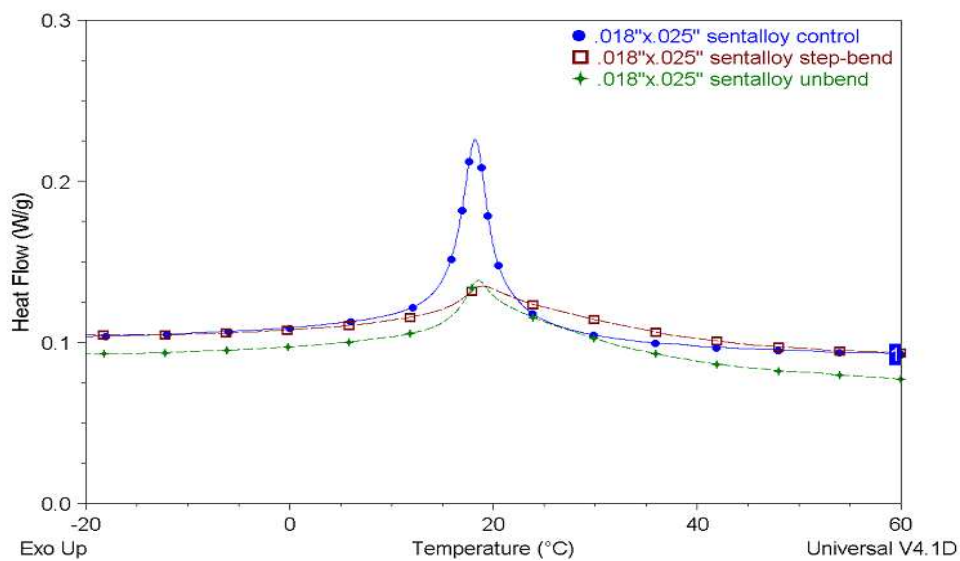


Fig 9. DSC thermograms of .018" x .025" Sentalloy. Top, Forward transformation (cooling phase); Bottom, Reverse transformation (heating phase).

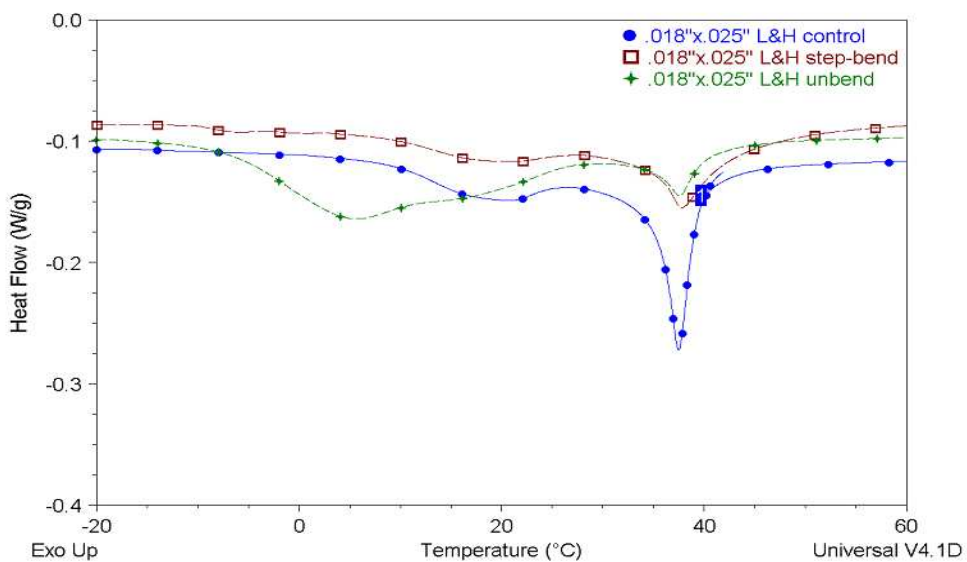
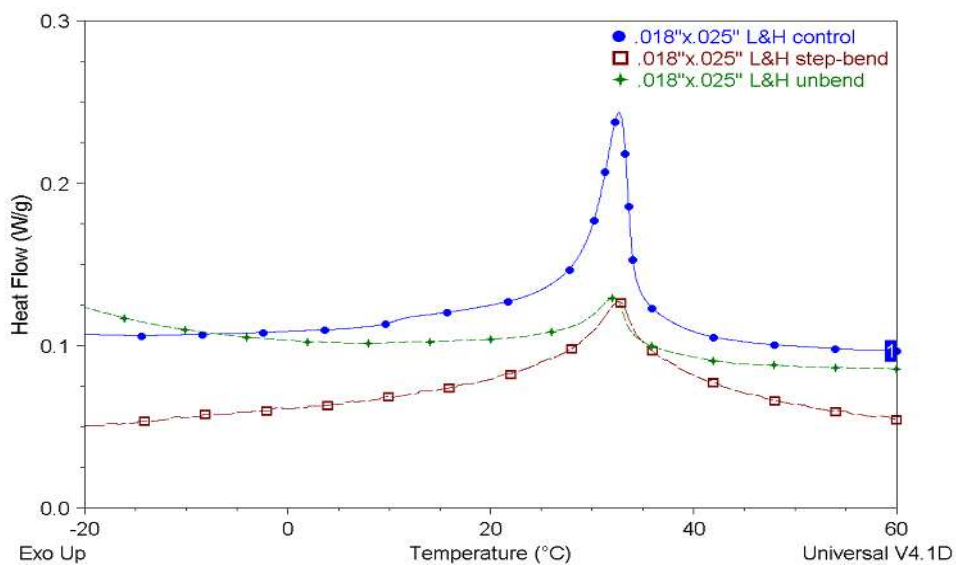


Fig 10. DSC thermograms of .018" x .025" L&H Titan. Top, Forward transformation (cooling phase); Bottom, Reverse transformation (heating phase).

IV. 총괄 및 고안

이전의 연구¹⁰⁾에서는 DERHT로 굴곡을 부여한 NiTi 와이어와 굴곡을 부여한 다른 소재의 와이어들의 하중-변위 특성을 비교하였을 뿐 굴곡을 부여하기 전의 NiTi 와이어와 굴곡을 부여한 NiTi 와이어를 비교하지는 못하였는데, 그 이유는 굴곡 부여에 따라 형상이 바뀐 후에는 동일한 실험조건에서 실험하여 비교할 수 없기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 먼저 DERHT를 이용하여 step bend를 부여한 후 이 step bend를 다시 DERHT를 이용하여 펴서 대조군과 unbend군의 와이어 형태가 동일한 상태에서 굴곡 부여를 위한 DERHT 열처리에 따른 하중-변위 곡선의 변화 양상을 조사하였다.

A. 열처리 없이 NiTi 와이어에 굴곡을 부여하는 경우

Miura 등¹⁰⁾은 DERHT로 NiTi 와이어에 90° 굴곡을 부여하였을 때에는 spring-back 성질이 나빠지지 않으나 three beak plier로 90° 굴곡을 부여하였을 때에는 spring-back 성질이 현저히 나빠짐을 보고하였다. 이 등¹⁴⁾에 따르면 이러한 냉간가공은 전위(dislocation) 밀도를 높이게 되며, 전위 밀도의 증가는 하중-변위 곡선에서 초탄성을 나타내는 수평 부위의 경사도를 높게 만들뿐만 아니라¹⁵⁾ 상변태와 재배열 과정에 작용하는 상 경계에서의 계면운동성을 저하시켜 응력유기 마르텐사이트 변태와 재배열 과정에 필요한 응력을 증가시킨다고 하였다.

B. 열처리 온도

1986년 Miura 등⁵⁾은 교정용 초탄성 NiTi(Japanese NiTi: Sentalloy)의 기계적 성질을 변화시키기 위해 nitrate salt bath를 이용한 열처리를 시행하는 방법을 소개하였는데, 300°C 이하에서 열처리할 경우에는 기계적 성질의 변화가 없으며, 400°C 및 500°C에서 열처리할 경우에는 열처리 시간이 5분에서 120분으로 길어질수록 초탄성 구간의 힘이 감소하며, 600°C에서 열처리시에는 5분간의 열처리만으

로도 초탄성과 spring-back 성질이 나빠진다고 하였다.

이와 유사하게 박 등¹⁶⁾은 Sentalloy와 국산 NiTi 와이어(ORTHOLLOY, 진성, 성남, 한국)를 전기로를 이용하여 400℃, 500℃에서 10분~30분간 열처리 시 초탄성 구간의 힘이 낮아졌으며 열처리시간이 길수록 힘이 더욱 낮아졌으나, 600℃에서는 10분간의 열처리로 초탄성이 소실되었다고 하였으며, 이 등¹⁴⁾은 치과용 도재소성로를 이용하여 1시간 동안 진공상태에서 열처리할 경우 350℃, 450℃, 550℃ 모두에서 초탄성 구간의 힘이 감소하였으나, 550℃에서는 모든 NiTi 선재에서 영구변형이 나타남을 보고하였으며, 이때 M_s (Martensite start temperature)와 A_s (Austenite start temperature)가 350℃로 열처리시에는 높아졌고, 450℃, 550℃로 열처리시에는 낮아졌다고 하였다. 또한 Sachdeva 등¹⁷⁾도 350℃, 450℃, 550℃로 열처리 시 세 온도 모두에서 마르텐사이트 변태가 개시되는 데 필요한 임계응력(critical stress for inducing martensite)과 역변태가 개시되는 데 필요한 임계응력(critical stress for inducing reverse transformation)이 감소하였으며, 특히 열처리 온도가 높은 경우에 더 많이 감소하였다고 하였다.

C. 열처리 시 DSC 측정값의 변화

본 연구에서는 Sentalloy와 L&H Titan 모두에서 대조군에 비해 실험군에서 흡열, 발열 피크의 heat flow가 감소하는 것으로 나타났는데(Tables 7, 8, Figs 7-10), 이는 온도변화에 따른 변태 현상이 감소함을 나타내는 것으로, 이 경우 초탄성 특성이 나빠지는 것으로 볼 수 있다. 특히 .018" x .025" 와이어에서는 실험군에서 피크가 낮아지면서 상전이 온도범위가 넓어져서 변태 현상이 덜 뚜렷하게 나타났으므로, .018" x .025" 와이어에서 DERHT를 이용한 굴곡 부여가 초탄성 특성을 더 뚜렷하게 악화시켰다고 볼 수도 있다. 그러나 3점 굴곡시험 결과는 이러한 시차주사열량 측정 결과와는 다르게 초탄성 성질이 본 실험에서 설정하였던 3mm까지의 변위량에서는 뚜렷하게 영향 받지 않는 것으로 나타났으며, 영구변형량이 실험군에서 다소 증가하였으나 .016" x .022" 와이어에 비해 .018" x .025" 와이어에서 영구변형량이 평균적

으로는 근소하게 더 작은 것으로 보아 실험군에서 나타나는 시차주사열량 측정상의 변태 현상의 감소가 NiTi 와이어의 하중-변위 특성을 현저히 손상시키지는 않는 것으로 생각된다.

여러 연구들이 NiTi의 열처리시에 DSC 측정값이 변화함을 보고한 바 있는데, Yoneyama 등¹⁸⁾과 Lee 등¹⁹⁾은 NiTi 합금에 열처리 및 굴곡을 부여한 경우에 DSC 측정시의 A_s 와 M_s 온도가 낮아진다고 하였으나 Gil 등²⁰⁾과 장 등¹¹⁾은 A_s 및 M_s 온도가 높아진다고 하였다. 또한 이 등²¹⁾은 NiTi 와이어에 DERHT를 이용하여 90도로 굴곡을 부여했을 때 M_s 온도는 $2.0^{\circ}\text{C} \sim 6.9^{\circ}\text{C}$, A_s 온도는 $0.1^{\circ}\text{C} \sim 0.6^{\circ}\text{C}$ 증가하였다고 하였으며, 이들은 이렇게 상전이 온도가 증가하는 이유는 굴곡을 주면 굴곡된 부위의 결정 구조가 변하게 되는데 굴곡된 부위에서 생긴 결함으로 야기된 내부 응력이 마르텐사이트상의 형성을 도와주어 마르텐사이트로의 변태를 도와주고, 반대로 역변태시에는 성장계면사이의 마찰력이 발휘하는 전위 고정현상을 극복하고 마르텐사이트 결정계면의 손실이 수반되면서 변태되어야 하는데 굴곡 부위의 결함은 이러한 역변태를 방해하는 요인이 될 수 있기 때문이라고 주장하였다. 또한 이들은 굴곡 부여시에 DSC 상에서 상전이 과정의 흡열, 발열량이 감소하게 됨을 보고하였는데, 이는 장 등¹¹⁾의 연구에서 굴곡 부여를 위한 열처리 시간을 증가시켰을 때 흡열, 발열량이 감소한 현상과 동일한 것으로 생각된다. 그러나 장 등은 이 경우에도 3점 굴곡 시험 상의 초탄성 특성은 악화되지 않는 것을 보여준 바 있다. 상전이 온도는 와이어의 종류 및 열처리 온도에 따라 다르게 변화하는 것으로 보인다.²²⁾

본 연구에 사용된 NiTi 와이어와 같은 등원자 구성에 가까운 NiTi 합금에서 25% 냉간가공 후 400°C 에서 어닐링 열처리할 경우 마르텐사이트 변태 과정에서 중간상인 R상이 출현할 수 있는데, 이는 가공열처리에 의해 전위가 도입되기 때문이라고 알려져 있다²³⁾.

D. DERHT를 이용한 굴곡 부여시의 전류값과 열처리 시간

Miura 등¹⁰⁾은 1988년 DERHT를 이용하여 NiTi 와이어에 굴곡을 부여하는 방법을 소개하면서 NiTi 와이어의 굴곡 부여를 위해서는 열처리 시간이 길수록 필

요한 전류값이 작아지며, 와이어의 두께가 감소할수록 필요한 전류값이 작아진다고 하였다. 또한 NiTi 와이어에 굴곡을 부여하기 위해 필요한 전류값이 열처리 시간이 1초로부터 3초로 증가될 때까지는 급격히 감소하나, 열처리 시간이 3초를 초과할 때부터는 열처리 시간이 증가하여도 필요한 전류값이 완만하게 감소함을 보여주었다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서는 DERHT를 이용한 굴곡 부여 시 열처리 시간을 3초로 설정하였는데, 이는 실제 임상에서 굴곡을 부여할 때의 시간적 효율성도 고려한 것이었다. 본 연구에 사용된 NiTi bending machine(Memory Maker)의 제작사(Bernhard Förster GmbH)에서는 약 30 mm까지의 와이어 길이에서 열처리시 와이어의 굵기에 따른 권장 전류값을 설명하고 있으며(Table 1), 열처리 시간에 있어서는 와이어가 gold-yellow 색상을 보일 때까지, 또는 pulsed mode를 사용하는 경우에는 와이어를 잡고 있는 plier에 가해지는 반발력이 감소될 때까지 열처리를 시행하도록 권장하고 있다¹¹⁾. 또 다른 NiTi bending machine(Bender Soarer-II)의 제작사(Tomy Inc)에서는 3~5 mm 와이어 길이에서 3~5초간 열처리할 것을 권장하고 있으며, 와이어가 옅은 갈색(light brown) 색상을 보이게 되면 열처리가 적절하다고 설명하고 있다²³⁾. 이러한 기준은 본 연구에 사용된 시편들의 열처리 기준으로 사용하기에는 어려움이 있어 본 연구에서는 예비 실험을 통하여 3초간의 열처리 시간에서 안정적인 굴곡 형성을 가능케 하며 초탄성을 손상시키지 않는 최소의 전류값을 조사하여 이에 따라 실험하였다(Table 2).

본 연구에서는 NiTi bending machine에 연결된 두 개의 plier로 굴곡을 부여하는 데 필요한 최소 간격으로 NiTi 와이어를 잡고 15-17A의 높은 전류값으로 3초간 열처리하였는데 이는 장 등¹¹⁾이 같은 크기의 Sentalloy 와이어에서 25 mm 간격에서 열처리시 사용한 전류값인 5~6A보다 훨씬 높은 것이나, 열처리 시간은 장 등¹¹⁾이 사용한 7초보다 짧은 것이었다. DERHT를 이용한 열처리시 발생하는 열은 저항에 비례하며, 저항은 와이어의 길이가 길어질수록 더 커지므로 본 연구에서와 같이 매우 짧은 거리에서는 저항이 감소하여 발열량이 감소되므로 본 연구에 사용된 높은 전류값이 과도한 온도 상승을 야기하지는 않았을 것으로 생각된다.

E. DERHT 열처리시 초탄성 구간의 힘 변화

1.5 mm 변위 지점(초탄성 구간)의 힘은 대조군의 경우 하중시 힘은 L&H Titan에서 더 낮았으나 탈하중시 힘은 .016" x .022"에서는 오히려 L&H Titan에서 더 큰 것으로 나타났다. 응력 이력값에 있어서는 L&H Titan에서 일관되게 더 작게 나타났다.

Miura 등¹⁰⁾은 NiTi 와이어를 낮은 전류값에서 15분 이상 열처리한 경우 초탄성 구간의 힘이 감소하였다고 보고하였으며, 장 등¹¹⁾은 NiTi 와이어에서 25 mm 간격에서 5-7A로 7초간 열처리를 시행한 경우 하중-변위 곡선이 상방 이동되어 초탄성 구간의 힘이 증가하였고, A_f 온도가 낮아졌다고 보고하였는데, 이러한 차이가 나타나는 이유는 장 등¹¹⁾은 보다 짧은 시간 동안 열처리하기 위해 보다 높은 전류값을 사용하여, 열처리온도가 더 높았던 것으로 생각된다. 장 등¹¹⁾은 특히 단순히 열처리만 한 경우보다 열처리를 통해 호선의 전치부 굴곡을 펴는 경우에 하중-변위 곡선이 더 상방 이동되었으며, 특히 굴곡을 부여하면서 열처리 시간을 1초 더 증가시킨 경우에는 하중-변위 곡선이 더욱 상방으로 이동하였고, DSC 상에서 변태에 따른 흡열량 및 발열량이 감소하여 초탄성 성질이 나빠졌다고 보고하였다.

본 연구 결과 step-bend군에서는 지그의 지지점 사이에 위치하는 와이어의 길이가 증가하게 되어 초탄성 구간의 힘이 낮아졌으며, unbend군에서는 대부분 대조군과 비슷한 힘을 보여 열처리에 따른 힘의 변화가 뚜렷하지 않았다 (Tables 3-6, Figs 4-7). 이러한 결과는 장 등¹¹⁾의 보고와 같이 열처리가 이루어진 step bend를 구성하는 네 개의 굴곡부에서의 힘은 증가하였다고 하더라도 이 부위가 매우 좁은 범위였기 때문에 12 mm 거리의 와이어의 하중-변위곡선을 그다지 변화시키지 못한 것 때문으로 생각된다. 다만 unbend군의 018" x .025" Sentalloy의 하중시의 힘은 유의하게 감소하였으며, .016" x .022" L&H Titan의 탈하중시의 힘은 유의하게 증가하였는데, 이렇게 Sentalloy와 L&H Titan에서 다소 상이한 양상이 나타나는 것은 Sentalloy의 경우에는 제조과정에서 500℃에서 한 차례만 열처리하였고, L&H Titan의 경

우에는 먼저 600°C에서 5분간 열처리한 후 다시 280°C에서 3시간 동안 열처리하는 이 단계 열처리법²⁴⁾을 사용하여 제조하였기 때문에 추가적인 열처리에 따른 힘 변화 양상이 다소 달라진 것으로 생각된다.

F. DERHT 열처리시 3점 굴곡시험 후 영구변형량의 변화

이 등¹⁴⁾은 도재소성로를 이용하여 진공상태에서 열처리한 경우 550°C로 열처리하였을 때 모든 NiTi 와이어에서 3점 굴곡시험 후 영구변형이 발생하였으나, 350°C, 450°C로 열처리하였을 때에는 소수의 NiTi 와이어에서만 영구변형이 발생하였다고 하였다. 이때 550°C로 열처리시 3점 굴곡시험 후 영구변형이 발생한 것은 NiTi 합금을 500°C 이상으로 열처리시 재결정화가 일어나기 때문이며, 재결정화에 의해 미끄럼(slip)에 대한 임계 응력이 저하되어 쉽게 영구변형된다고 하였다. 이와 유사하게 Otsubo²⁴⁾도 530°C 이상으로 열처리를 하면 소성변형이 일어난다고 한 바 있다.

본 연구에서도 굴곡을 부여한 경우에 3점 굴곡시험 후 영구변형량이 증가하였는데, 이는 DERHT를 이용한 열처리에 재결정화가 일어나거나 Ti₃Ni₄와 같은 석출물이 생성되었기 때문²⁵⁾으로 생각되며, 이는 짧은 시간동안 열처리하여 형태를 부여하고자 하는 경우에는 피하기 어려운 문제점으로 생각된다. 만약 열처리시의 전류와 시간의 다양한 조합에 있어서 특히 전류를 낮추고 시간을 현저히 증가시킨다면 spring-back 성질의 악화 없이 굴곡을 부여할 수 있을 것으로 예상되나, 하나의 본 실험에서 사용한 것과 같은 양축성의 step bend를 부여하기 위해서는 네 개의 열처리를 이용한 굴곡이 필요하며, 마무리 과정에서는 대개 한 개 이상의 step bend를 부여하게 되는 경우가 많다는 점을 고려할 때 낮은 전류로 오랜 시간 열처리하는 방법은 임상에서 적용되기 어렵다고 생각된다.

Sachdeva 등¹⁷⁾은 NiTi 와이어의 탈하중 과정의 마지막 단계에서 교정력이 적정 수준 이하 또는 역치 이하로 낮아지는 문제를 해결하기 위하여 스테인리스강과 같이 spring-back이 좋지 않은 전통적인 와이어에서 시행되었던 것과 같이 와이어를 overbend(필요한 치아 이동량보다 더 많이 굴곡을 부여하는 것)을 부여할 것을 추천한 바 있다. Sachdeva 등¹⁷⁾의 주장과 같이 열처리를 하지 않은 NiTi에

서도 overbend가 바람직하지만, 특히 DERHT를 이용한 열처리 부여 시에 발생되는 spring-back 성질의 악화를 극복하기 위해서는 임상에서 overbend를 부여하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 본 연구에서 지그 사이의 길이가 12 mm일 때 3점 굴곡시험을 3 mm 변위시까지 시행한 후의 영구변형량은 .018" x .022" Sentalloy에서 가장 커서 평균 83 μ m, 표준편차 39 μ m 수준으로 나타났는데 (Table 4), 이는 총 변위량 3 mm의 2.8% 수준의 영구변형량에 해당하는 것으로, overbend는 소량만 부여하여도 충분할 것으로 생각된다.

향후 연구에서는 NiTi 와이어에 굴곡을 부여하면서 spring-back 성질의 악화를 최소로 할 수 있는 방법을 개발하는 것이 바람직하며, 다양한 NiTi 와이어의 종류 및 두께, 그리고 열처리 구간의 길이에 따른 DERHT를 이용한 굴곡 부여시의 적절한 전류값과 열처리 시간을 조사하고, 이때 부여된 굴곡의 열순환 후의 형태안정성에 대해서도 조사하는 것이 바람직하다. 또한 일반적으로 굴곡을 부여하는 부위 치아의 교정적 이동을 위해서는 굴곡을 부여한 부위의 견성이 감소되는 것이 바람직한 경우가 많으므로 스테인리스강의 경우 굴곡 부여와 함께 루프를 형성하여서 견성을 낮추기도 하는데, 열처리를 이용한 NiTi 와이어의 굴곡 부여시에도 초탄성 구간의 힘을 낮출 수 있는 열처리 방법을 개발하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

NiTi를 공기 중에서 500 $^{\circ}$ C로 열처리한 경우에는 진공조건에서 열처리한 경우에 비해 표면의 Ti이 산화되어 두꺼운 산화막이 생성되면서 아주 큰 표면손상이 생기며, Ti의 산화로 인해 NiTi 2원합금의 체적비가 감소되어 응력유기 마르텐사이트 및 가역 변형의 평탄부 응력 수준이 낮아지고 회복변형률이 감소된다는 것이 보고된 바 있는데²²⁾, DERHT를 이용한 열처리는 모두 공기 중에서 이루어지므로 이러한 Ti 산화 등의 문제가 있을 수 있다. 따라서 향후에는 DERHT를 이용한 굴곡 부여 후의 부식저항성 변화나 생체적합성 변화에 대해서도 연구되어야 할 것으로 생각된다.

V. 결론

DERHT를 이용하여 NiTi 와이어에 굴곡을 부여할 경우의 하중-변위 특성 변화를 조사하기 위하여 .016" x .022" 및 .018" x .025"의 Sentalloy와 L&H Titan에서 DERHT를 이용하여 양측으로 step bend를 부여한 군 및 부여된 step bend를 다시 DERHT를 이용하여 편 군의 하중-변위 특성과 3점 굴곡 시험 후의 영구변형량을 아무런 처리를 하지 않은 대조군과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. DERHT를 이용한 굴곡 부여시 하중/변위 곡선상의 초탄성 평탄부는 동일한 양상으로 나타나 초탄성 성질이 유지되는 것으로 나타났으나, step bend를 부여한 군에서는 지그의 지지점 사이에 위치하는 와이어의 길이가 증가하게 되어 .016" x .022" Sentalloy를 제외한 모든 와이어에서 대조군에 비해 하중시 및 탈하중시 힘이 모두 감소하였다.
2. DERHT를 이용하여 step bend를 다시 편 군에서는 대부분 대조군과 동일한 힘을 보였으나 .018" x .025" Sentalloy의 하중시 힘은 감소하였으며, .016" x .022" L&H Titan의 탈하중시 힘은 증가하였다.
3. 3점 굴곡시험 후 영구변형량에 있어서 step bend를 부여한 군과 step bend를 다시 편 군은 대조군보다 더 큰 영구변형량을 보였으며 이는 spring-back이 저하되었을 나타낸다.
4. 시차주사열량 측정 결과 DERHT를 이용하여 굴곡을 부여한 군과 다시 편 군에서 변태시 피크의 heat flow가 감소하여 변태 특성이 저하된 것으로 나타났다.

따라서 임상에서 DERHT를 이용하여 NiTi 와이어에 굴곡을 부여하는 술식은 변태 특성을 저하시킬 수 있으나 NiTi 와이어의 하중-변위 특성을 손상시키지 않으면서 적용될 수 있으며, 다만 spring-back이 다소 저하되므로 이를 고려하여 overbend하는 것이 추천된다.

참 고 문 헌

1. Andreasen GF, Hilleman TB. An evaluation of 55 cobalt substituted Nitinol wire for use in orthodontics. J Am Dent Assoc 1971;82:1373-5.
2. Kusy RP. A review of comtemporary archwires: Their properties and characteristics. Angle Orthod 1997;67:197-208.
3. Kusy RP, Wilson TW. Dynamic mechanical properties of straight titanium alloy arch wires. Dent Mater 1990;6:228-36.
4. Burstone CJ, Qin B, Morton JY. Chinese NiTi wire: A new orthodontic alloy. Am J Orthod Dentofacial Orthop 1985;87:445-52.
5. Miura F, Mogi M, Ohura Y, Hamanaka H. The superelastic property of the Japanese NiTi alloy wire for use in orthodontics. Am J Orthod Dentofacial Orthop 1986;90:1-10.
6. Mullins WS, Bagby MD, Norman T. Mechanical behavior of thermo-responsive orthodontic archwires. Dent Mater 1996;12:308-14.
7. 형상기억합금개발위원회 저, 편집부 역. 형상기억합금과 그 사용방법. 서울: 기전연구사; 1991.
8. 鈴木雄一 저, 이근길, 김용주 역. 실용형상기억합금. 서울: 기전연구사; 1989.
9. Miyazaki S, Ohmi Y, Otsuka Y, Suzuki Y. Characteristics of deformation and transformation pseudoelasticity in Ti-Ni alloys. Journal de physique, Colloque C4 supplement au n12, 1982;43:255-60.
10. 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.
11. 장수호, 임성훈, 김광원. NiTi 와이어의 열처리에 따른 부하-변위 특성 변화. 대치교정지 2006;36:349-59.

12. Operating instructions for Forestadent Memory Maker designed by Prof. Snader. Pforzheim:Forestadent[®], Bernhard Förster GmbH;2003.
13. American Dental Association ASC MD 156: Restorative and orthodontic materials. Specification #32.
14. 이진숙, 김광만, 김경남. 치과교정용 NiTi 합금계 선재의 탄성과 상변태 거동에 대한 열처리 효과. 대한치과기재학회지 1997;24:7-21.
15. Filip P, Mazanec K. Influence of work hardening and heat treatment on the substructure and deformation behavior of TiNi shape memory alloys, Scripta Met Materialia 1995;32:1375-80.
16. 박동욱, 권오원. 국산 Ni-Ti 합금 교정용 선재의 특성에 관한 연구. 대치교정지 1995;25:187-200.
17. Sachdeva RCL., Miyazaki S. Biomechanical considerations in the selection of NiTi alloys in orthodontics and variable transformation temperature orthodontics with copper NiTi. In: Sachdeva RCL editor. Orthodontics for next millenium. Glendora: ORMCO; 1997. p. 228-46.
18. Yoneyama T, Doi H, Hamanaka H. Bending properties and transformation temperature of heat treated Ni-Ti alloy wire for orthodontic appliances. J Biomed Mater Res 1993;27:399-402.
19. Lee JH, Park JB, Andreasen GF, Lakes RS. Thermomechanical study of NiTi alloys. J Biomed Mat Res 1988;22:573-88.
20. Gil FJ, Manero JM, Planell JA. Effect of grain size on the martensitic transformation in NiTi alloy. J Mater Sci 1995;30:2526-30.
21. 이유현, 임범순, 이용근, 김철위. 전기저항 열처리로 굴곡한 니켈-티타늄 교정용 호선의 시차주사열량 분석. 대한치과기재학회지 2002;29:129-37.
22. 여동진. 어닐링 열처리 조건에 따른 NITINOL 형상기억합금의 재료 특성 평가, 2004년 금오공과대학교 석사학위논문. p. 31-4.
23. Bender Soarer-II for orthodontic bending and heat treating instruction manual. Tokyo:Tomy international Inc.

24. Otsubo K. Development of the super-elastic Ti-Ni alloy wire appropriate to the oral environment. J Jpn Orthod Soc 1994;53:641-50.
25. 김태연, 남태연. Ti-Ni계 형상기억합금 열처리 기술. 열처리공학회지 2003;16:349-55.

저작물 이용 허락서

학 과	치의학과	학 번	20057467	과 정	박사
성 명	한글: 김관중 한문 : 金官重 영문 : Kim kwan Joong				
주 소	서울 특별시 서초구 서초4동 아크로비스타 B동 309				
연락처	02) 523-0537		E-MAIL	gjk61@nate.com	
논문제목	한글 : 교정용 초탄성 니켈-티타늄 와이어의 전기저항 열처리를 이용한 굴곡 부여 후의 하중-변위 특성 변화				
	영어 : Effects of Bending with Direct Electric Resistance Heat Treatment on Load-Deflection Characteristics of Superelastic NiTi Orthodontic Wires				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함.
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(O) 반대()

2007년 01월 08일

저작자: 김 관 중 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하