

## 論文

## 어닐링 열처리 조건에 따른 NITINOL 형상기억합금의 상변환 특성 연구

윤성호<sup>\*+</sup>, 여동진<sup>\*\*</sup>

### Effects of Annealing Heat Treatment Conditions on Phase Transformation of Nitinol Shape Memory Alloy

Sung Ho Yoon<sup>\*+</sup>, Dong Jin Yeo<sup>\*\*</sup>

#### ABSTRACT

Phase transformation behaviors and crystal structures of Nitinol shape memory alloy (54.5Ni-45.5Tiwt%) are investigated by varying annealing heat treatment conditions through DSC (Differential Scanning Calorimetry) and XRD (X-Ray Diffraction). Annealing heat treatment conditions were considered as heat treated times of 5min, 15min, 30min, and 45min, as well as heat treated temperatures of 400°C, 500°C, 525°C, 550°C, 575°C, 600°C, 700°C, 800°C, and 900°C. According to the results, annealing heat treatment conditions such as heat treated times and heat treated temperatures were found to affect significantly on phase transformation behaviors and crystal structures of Nitinol shape memory alloy.

#### 초 록

본 연구에서는 시차주사열량분석장치와 X-선 회절장치를 이용하여 어닐링 열처리 조건에 따른 니티놀 형상기억합금의 상변환 특성과 결정구조를 조사하였다. 어닐링 열처리 조건으로는 열처리 시간과 열처리 온도를 고려하였으며 특히 열처리 시간은 5분, 15분, 30분, 45분 그리고 열처리 온도는 400°C, 500°C, 525°C, 550°C, 575°C, 600°C, 700°C, 800°C, 900°C를 적용하였다. 연구결과에 따르면 열처리 시간과 열처리 온도 등의 어닐링 열처리 조건은 니티놀 형상기억합금의 상변환 특성과 결정구조에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

**Key Words:** 상변환(Phase transformation), 결정구조(Crystal structure), 니티놀 형상기억합금(NITINOL shape memory alloy), 어닐링 열처리 조건(Annealing heat treatment conditions), 시차주사열량분석장치(DSC), X-선 회절장치(XRD)

#### 1. 서 론

기존의 형상기억합금 중에서 니켈과 티타늄으로 구성된 NITINOL 형상기억합금은 주위 온도와 작용하중에 따라 오스테나이트 상의 체심입방체인 B<sub>2</sub>상, 사방육면체인 R상, 마르텐사이트 상의 사방정계구조인 B<sub>19</sub>상, 마르텐사이트 상의 단사정계구조인 B<sub>19'</sub>상 간의 비확산적인 상변환으로 인

해 일반 금속재에서는 나타나지 않는 특이한 열적/기계적 특성을 갖는다[1-3]. 이때 오스테나이트 상에서 마르텐사이트 상으로의 변하는 과정을 순방향 상변환 (Forward Phase Transformation)이라 하며 마르텐사이트 상에서 오스테나이트 상으로 변하는 과정을 역방향 상변환 (Reverse Phase Transformation)이라고 한다. 또한 오스테나이트 상인 B<sub>2</sub>상에서 부정합 과정을 거쳐 나타나는 R상은 니켈 과잉 상태

\*+ 금오공과대학교 기계공학부, 교신저자(E-mail:shyoon@kumoh.ac.kr)

\*\* 금오공과대학교 기계공학부 대학원

에서 노화되는 경우, 냉간가공 후 낮은 온도에서 어닐링 처리를 하는 경우, 제3의 원소를 첨가하는 경우에 주로 관찰되며 상변환 과정시 히스테리시스가 거의 나타나지 않고 비교적 작은 온도 변화에 의해 높은 구동력을 얻을 수 있는 장점을 가진다[4-6]. 형상기억합금은 형상회복력, 피로저항성, 진동감쇠성, 부식저항성 등의 특성이 우수하여 각종 마이크로 센서 및 마이크로 작동기의 개발을 위한 스마트 재료로 활용되고 있으며 최근에는 항공우주, 의공학, 가전제품 등의 고부가가치 산업에 응용하기 위한 연구가 행해지고 있다[7].

형상기억합금은 동일한 조성 성분을 가진 경우라도 어닐링 열처리 조건, 주위 온도, 작동하중 등에 따라 서로 다른 결정구조를 가질 수 있기 때문에 형상기억합금을 구조물에 효율적으로 적용하기 위해서는 이들 인자에 따른 상변환 특성이 체계적으로 규명되어야 한다. Huang 등은 300~700℃에서 30분 열처리한 다음 공기 중에서 냉각시키는 어닐링 열처리 조건이 형상기억합금에서의 초탄성 효과와 상변환 특성에 미치는 영향을 조사하였다[8]. Yoon 등은 상변환 온도가 50~110℃의 범위에 있는 형상기억합금에 대해 DSC (Differential Scanning Calorimetry)와 DMA (Dynamic Mechanical Analyzer)를 이용하여 열처리 효과를 조사하기 위해 열적 및 기계적 특성을 평가하였다[9]. Uchil 등은 특정한 조건으로 열처리된 형상기억합금에 가해진 변형률이 형상기억합금에서의 상변환 상태, 상변환 온도, 상변환 에너지에 미치는 영향을 조사하였다[10]. Liu 등은 DSC를 통해 시효처리 효과가 형상기억합금의 상변환에 미치는 영향을 조사하였으며 형상기억합금을 400℃에서 시효처리하는 경우 R상 및 다단계 순방향 상 상변환 등과 같은 매우 복잡한 상변환이 관찰됨을 보였다[11].

본 연구에서는 DSC와 XRD (X-ray Diffraction)를 통해 어닐링 열처리 조건에 따른 형상기억합금 와이어의 상변환 특성을 고찰하였다. 이때 형상기억합금 와이어는 석영관에 넣고 진공으로 밀봉처리한 다음 열처리 온도와 열처리 시간 등의 열처리 조건을 다양하게 변화시켰으며 DSC를 통해 형상기억합금에서의 상변환 온도와 상변환 에너지를 평가하고 XRD를 통해 주위 온도에 따른 형상기억합금에서의 결정구조를 조사하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 어닐링 열처리

Table 1에는 본 연구에 적용한 형상기억합금 와이어 (Nitinol SM495, 54.5Ni-45.5Tiwt%, ϕ 1.0mm, Nitinol Devices &

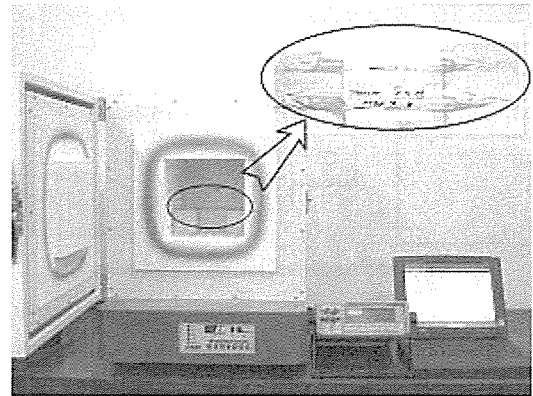


Fig. 1 Electrical furnace and data acquisition system.

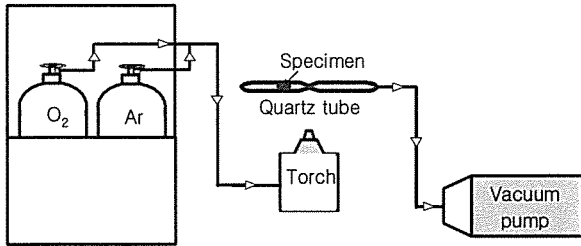
Table 1 Material properties of Nitinol SM495

physical & mechanical properties	
melting point (°C)	1310
specific weight	6.5
electrical resistivity (μΩ-cm)	76
modulus of elasticity (GPa)	40
coeff. of thermal expansion (1/°C)	6.6×10 <sup>-6</sup>
ultimate tensile strength (MPa)	1150
total elongation (%)	10
compositions	
nickel (wt%)	54.5
titanium (wt%)	balance
oxygen (wt%)	0.05
carbon (wt%)	0.02

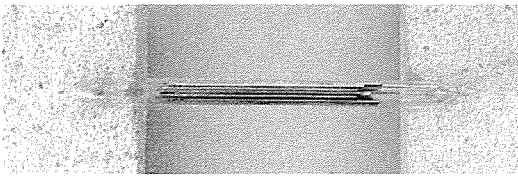
Components)의 재료특성이 나타나 있다. 이때 비중은 6.5, 탄성계수는 40GPa, 인장강도는 1150MPa, 최대 변형률은 10%이다.

Fig. 1에는 어닐링 열처리를 위한 전기로 (Lindberg, General Signal Company), 온도측정장치 (SA 32, AOIP), 자료수집장치 등으로 구성된 실험장치가 나타나 있다. 어닐링 열처리 조건에 따른 상변환 특성을 조사하기 위해 열처리 온도와 열처리 시간을 변화시켰으며 열처리 온도의 정확한 측정을 위해 시료의 인접 부위에 열전대 (K-type, Omega)를 부착하였다. 특히 열처리 온도는 열처리 시간을 30분으로 고정한 상태에서 (1) 400℃ (2) 500℃ (3) 525℃ (4) 550℃ (5) 575℃ (6) 600℃ (7) 700℃ (8) 800℃ (9) 900℃ 등으로 변화시켰으며 열처리 시간은 열처리 온도를 700℃로 고정한 상태에서 (1) 5분 (2) 15분 (3) 30분 (4) 45분 등으로 변화시켰다.

Fig. 2에는 석영관에 밀봉된 형상기억합금 와이어를 열처리하기 위한 실험장치가 나타나 있다. 전기로 내에서 형상기억합금을 진공처리하지 않은 상태로 어닐링 열처리하는 경우 시료의 표면에 산화막이 형성되어 형상기억합금의



(a) Schematic diagram for vacuum sealed treatment



(b) SMA wires in the quartz tube

Fig. 2 Nitinol SMA wires in the quartz tube for vacuum sealed heat treatment.

열적/기계적 특성에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 시료 표면에 산화막이 형성되는 것을 최소화하기 위해 석영관 속에 형상기억합금 와이어를 넣고 진공으로 밀봉처리한 다음 전기로 내에서 열처리를 하였다.

## 2.2 DSC 실험

Fig. 3에는 어닐링 열처리된 형상기억합금의 상변환 온도를 평가하기 위한 DSC (Pyris 1, Perkin Elmer)가 나타나 있다. DSC는 시료가 담긴 팬과 시료가 담기지 않은 기준팬에서의 상대적인 열흐름 차이를 감지하여 일정한 온도 상승시키는데 필요한 열량을 측정하는 장치로서 하중이 작용되지 않은 상태에서의 상변환 온도를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 상변환 온도를 측정하기 위해 먼저 120℃로 상승시켜 3분 정도 유지한 후 10℃/min의 온도변화율로 -50℃까지 냉각시키고 뒤이어 -50℃에서 다시 3분 정도 유지한 후 10℃/min의 온도변화율로 120℃까지 다시 상승시키는 조건을 적용하였다.

## 2.3 XRD 실험

Fig. 4에는 형상기억합금의 결정구조를 조사하기 위한 XRD (D/MAX-RC, RIGAKU)가 나타나 있다. XRD는 X선 회절현상을 이용하여 시료의 결정면 방향에 따른 격자 간격의 측정하는 장치로서 40kV와 100mA의 파위를 적용하여 20~100° 범위를 분당 3°로 스캔하였다. 본 연구에서는 (1) 상온에서 초기의 결정구조가 R상을 갖도록 오스테나이트 종료온도보다 높은 온도까지 가열한 후 상온으로 유지시킨

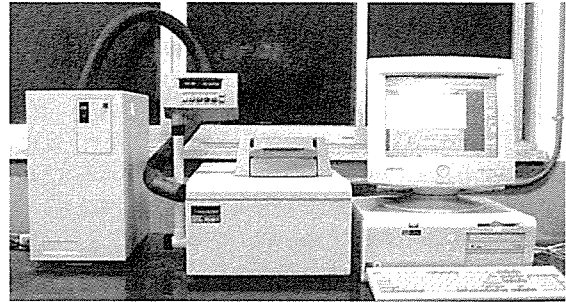


Fig. 3 Experimental equipment of DSC.

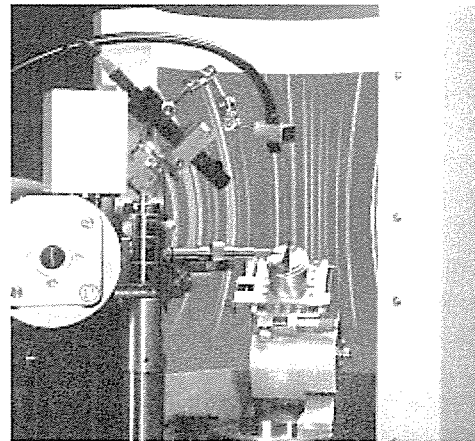


Fig. 4 Experimental equipment of XRD.

as-received 시료 (2) 상온에서 초기의 결정구조가 마르텐사이트 상을 갖도록 마르텐사이트 종료온도보다 낮은 온도까지 냉각한 후 상온으로 유지시킨 as-received 시료 (3) 600℃로 어닐링 열처리한 후 상온으로 유지시킨 시료 등을 고려하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 5에는 DSC를 통해 얻어지는 형상기억합금의 흡열 및 발열반응 선도가 나타나 있으며 이들 결과를 통해서 상변환 온도 및 열흐름 크기가 얻어진다. 특히 시료를 냉각시킬 때 얻어지는 발열반응 선도에서는 R상 개시온도인  $R_s$ , R상 정점온도인  $R_p$ , R상 종료온도인  $R_f$ , 그리고 마르텐사이트 개시온도인  $M_s$ , 마르텐사이트 정점온도인  $M_p$ , 마르텐사이트 종료온도인  $M_f$ 가 결정되며, 시료를 가열시킬 때 얻어지는 흡열반응 선도에서는 오스테나이트 개시온도인  $A_s$ , 오스테나이트 정점온도인  $A_p$ , 오스테나이트 종료온도인  $A_f$ 가 결정된다.

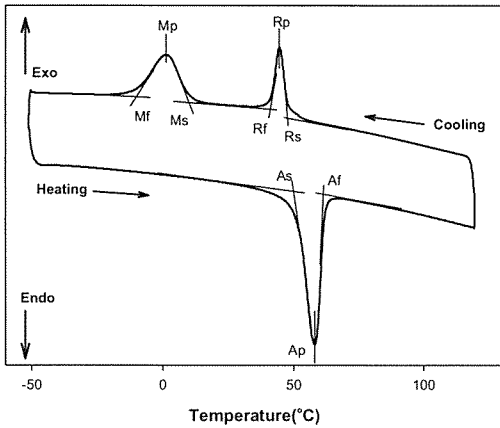


Fig. 5 Typical DSC results showing determination of phase transformation temperatures.

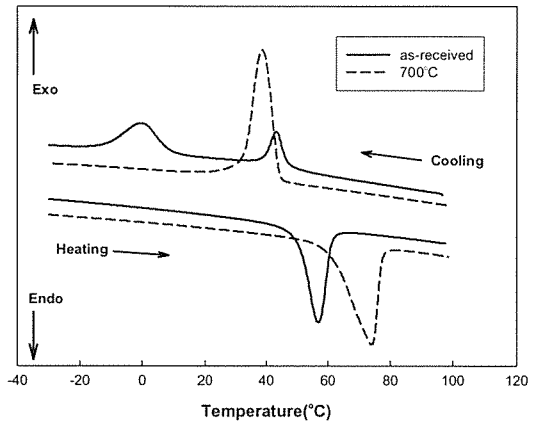


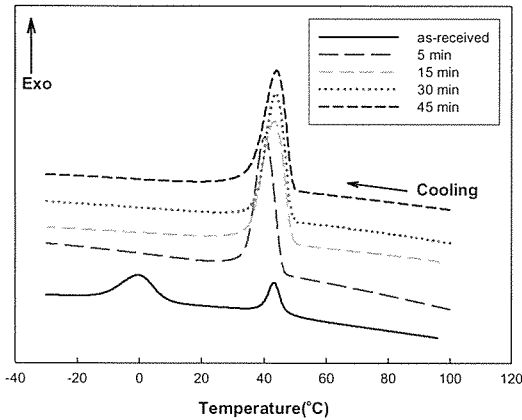
Fig. 6 DSC results for as-received and 700°C heat treated specimens.

Fig. 6에는 열처리하지 않은 as-received 시료와 700°C로 30분간 어닐링 열처리된 시료에 대해 수행된 DSC 결과가 나타나 있다. 여기에서 보면 열처리하지 않은 as-received 시료를 오스테나이트 종료온도보다 높은 온도에서 마르텐사이트 종료온도보다 낮은 온도까지 냉각시키면 2개의 정점을 갖는 발열반응이 나타나고 마르텐사이트 종료온도보다 낮은 온도에서 오스테나이트 종료온도보다 높은 온도까지 가열시키면 1개의 정점을 갖는 흡열반응이 나타난다. 이때 발열반응 선도에서는  $R_s$ 가 46.9°C,  $R_p$ 가 43.2°C,  $R_f$ 가 39.0°C,  $M_s$ 가 8.6°C,  $M_p$ 가 -0.4°C,  $M_f$ 가 -12.5°C로 결정되며 흡열반응 선도에서는  $A_s$ 가 50.4°C,  $A_p$ 가 56.8°C,  $A_f$ 가 61.0°C로 결정된다. 그러나 700°C로 어닐링 열처리된 시료를 오스테나이트 종료온도보다 높은 온도에서 마르텐사이트 종료온도보다 낮은 온도까지 냉각시키면 열처리하지 않은 as-received 시료와는 달리 1개의 정점을 갖는 발열반응 선도가 나타나고 마르텐사이트 종료온도보다 낮은 온도에서 오스테나이트 종료온도보다 높은 온도까지 가열시키면 1개의 정점을 갖는 흡열반응 선도가 나타난다. 이때 발열반응 선도에서는  $M_s$ 가 44.1°C,  $M_p$ 가 38.7°C,  $M_f$ 가 32.8°C로 결정되고 흡열반응 선도에서는  $A_s$ 가 61.0°C,  $A_p$ 가 74.0°C,  $A_f$ 가 77.2°C로 결정된다. 이로 미루어 보면 동일한 조성의 형상기억합금도 어닐링 열처리 조건에 따라 상변환 특성이 달라짐을 알 수 있다.

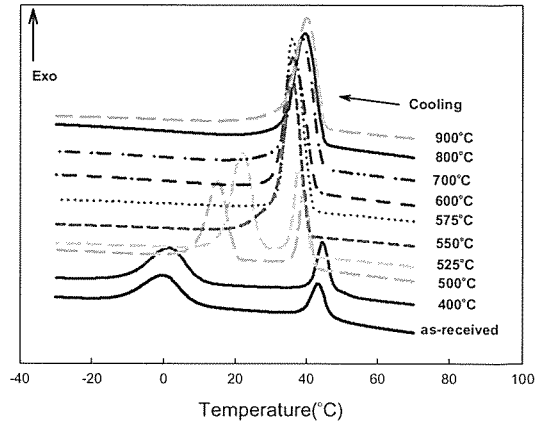
Fig. 7에는 어닐링 열처리 온도를 700°C로 고정하고 다음 열처리 시간을 (1) 5분 (2) 15분 (3) 30분 (4) 45분으로 변화시킨 경우의 DSC 결과가 나타나 있다. (a)는 오스테나이트 종료온도보다 높은 온도에서 마르텐사이트 종료온도보다 낮은 온도까지 냉각시킨 경우로서 초기의 결정구조가 오스테나이트

상인 시료를 냉각시키면 내부에 저장된 에너지가 방출되며 마르텐사이트 상으로 상변환이 발생한다. 이때 열처리 시간을 5분 적용한 경우  $M_s$ 가 44.0°C,  $M_p$ 가 38.6°C,  $M_f$ 가 32.9°C, 15분 적용한 경우  $M_s$ 가 46.3°C,  $M_p$ 가 40.4°C,  $M_f$ 가 33.6°C, 30분 적용한 경우  $M_s$ 가 46.1°C,  $M_p$ 가 40.6°C,  $M_f$ 가 34.4°C, 45분 적용한 경우  $M_s$ 가 46.3°C,  $M_p$ 가 40.9°C,  $M_f$ 가 33.2°C로 나타난다. (b)는 마르텐사이트 종료온도보다 낮은 온도에서 오스테나이트 종료온도보다 높은 온도까지 가열시킨 경우로서 초기의 결정구조가 마르텐사이트 상인 시료를 가열하면 내부로 에너지가 흡수되어 오스테나이트 상으로 상변환이 발생한다. 이때 열처리 시간을 5분 적용한 경우  $A_s$ 가 61.6°C,  $A_p$ 가 74.0°C,  $A_f$ 가 77.2°C, 15분 적용한 경우  $A_s$ 가 61.8°C,  $A_p$ 가 75.6°C,  $A_f$ 가 79.0°C, 30분 적용한 경우  $A_s$ 가 61.6°C,  $A_p$ 가 75.5°C,  $A_f$ 가 78.5°C, 45분 적용한 경우  $A_s$ 가 60.7°C,  $A_p$ 가 75.0°C,  $A_f$ 가 78.7°C로 결정된다. 이로 미루어 보면 700°C로 어닐링 열처리된 시료의 경우 15분 이상의 열처리를 하면 비교적 안정된 상변환이 일어짐을 알 수 있다.

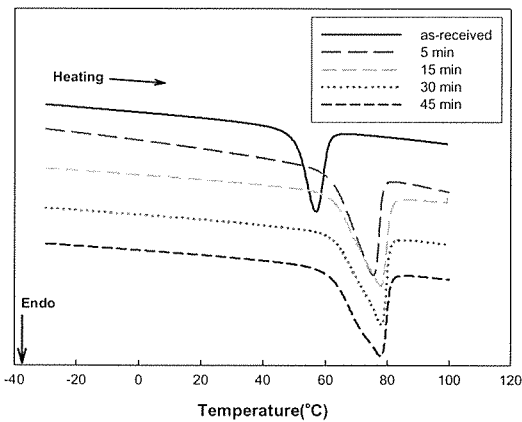
Fig. 8에는 열처리 시간을 30분으로 고정한 다음 열처리 온도를 (1) 400°C (2) 500°C (3) 525°C (4) 550°C (5) 575°C (6) 600°C (7) 700°C (8) 800°C (9) 900°C로 변화시킨 경우의 DSC 결과가 나타나 있다. (a)는 오스테나이트 종료온도보다 높은 온도에서 마르텐사이트 종료온도보다 낮은 온도까지 냉각시킨 경우로서 550°C 이하로 열처리하면 발열반응 선도는 초기의 오스테나이트 상이 R상을 거쳐 마르텐사이트 상으로 변하는 2개의 정점을 갖지만 열처리 온도를 점차 증가시키면  $R_p$ 와  $M_p$ 와의 온도 차이는 점차 감소하다가 550°C 이상의 열처리 온도를 적용하면 R상과 마르텐사이트 상이 합쳐져 1개의 정점을 가지며 600°C까지 열처리 온도를 증가시켜도 정점온도는 거의 변하지 않는다. 그러나



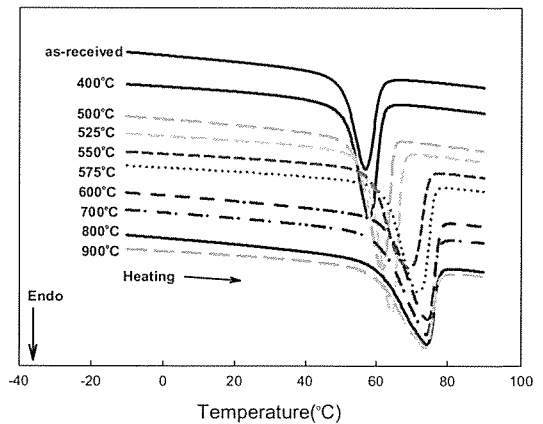
(a) In case of cooling



(a) In case of cooling



(b) In case of heating



(b) In case of heating

Fig. 7 DSC results by varying with heat treated time.

Fig. 8 DSC results by varying with heat treated temperature.

700°C 이상으로 열처리하면 550°C에서 600°C까지의 열처리 온도를 적용한 경우에 비해 정점온도는 다소 높게 나타나지만 열처리 온도의 변화에는 큰 영향을 받지 않고 거의 일정하게 나타난다. (b)는 마르텐사이트 종료온도보다 낮은 온도에서 오스테나이트 종료온도보다 높은 온도까지 가열시킨 경우로서 초기의 마르텐사이트 상이 오스테나이트 상으로 변하는 1개의 정점을 가지며 정점온도는 열처리 온도가 증가함에 따라 점차 높아지지만 일정 온도 이상에서 열처리를 하는 경우 정점온도는 안정화된 상변환으로 인해 큰 변화는 나타나지 않는다.

Fig. 9에는 열처리 온도에 따른 상변환 온도의 변화가 나타나 있다. 여기에서 보면 400°C로 열처리한 경우에는 열처리하지 않은 as-received 시료의 경우에 비해 상변환 온도가

크게 달라지지 않지만 열처리 온도를 600°C까지 증가시키는 경우 열처리 온도가 높아짐에 따라  $A_s$ 와  $A_f$ ,  $M_s$ 와  $M_f$ 는 증가하고  $R_s$ 와  $R_f$ 는 감소하는 양상이 나타난다. 특히  $A_f$ 와  $A_s$ 와의 차이는 점차 커지고  $M_f$ 와  $M_s$ 와의 차이는 점차 작아진다. 또한 400°C로 열처리한 경우  $R_s$ 와  $R_f$ 는 as-received 시료의 경우와 거의 비슷하며 열처리 온도를 525°C까지 증가시키면  $R_s$ 와  $R_f$ 는 거의 선형적으로 감소하는 양상이 나타난다. 그러나 600°C 이상으로 열처리하면 상변환 온도는 열처리 온도에 큰 영향을 받지 않고 거의 일정하게 나타난다.

Fig. 10에는 열처리 온도에 따른 상변환 정점온도의 변화가 나타나 있다. 여기에서 보면 400°C의 열처리 온도를 적용하는 경우에는 열처리하지 않은 as-received 시료와 비교할 때

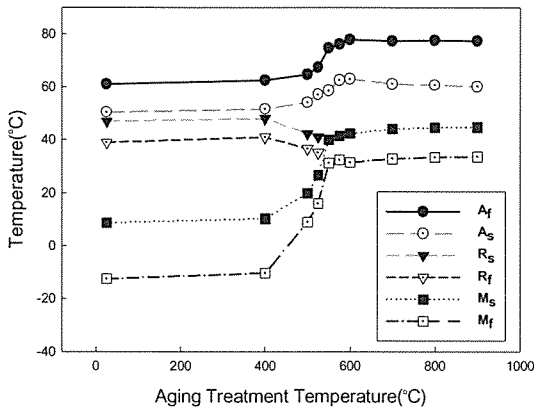


Fig. 9 Phase transformation temperatures as a function of heat treated temperature.

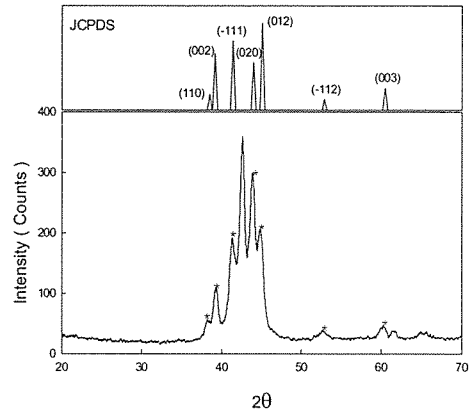


Fig. 11 XRD results for initially martensite phase of as-received specimen.

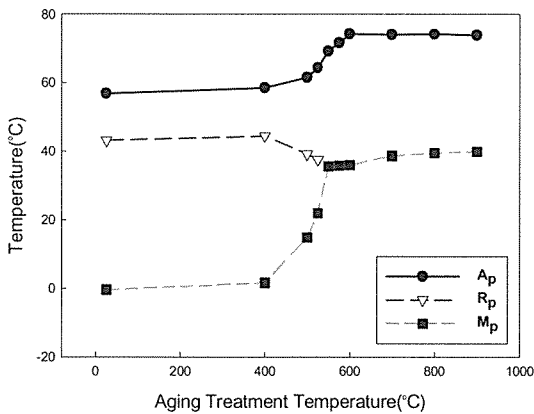


Fig. 10 Peak values of phase transformation temperatures as a function of heat treated temperature.

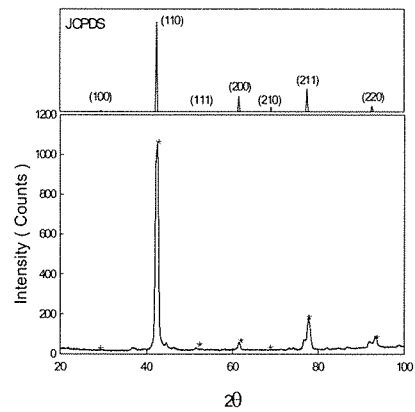


Fig. 12 XRD results for initially R phase of as-received specimen.

$A_p$ ,  $M_p$ ,  $R_p$  등의 상변환 정점온도는 열처리 온도에 큰 영향을 받지 않고 거의 일정하게 나타나지만 600°C까지 열처리 온도를 증가시키면  $A_p$ 와  $M_p$ 는 점차 증가하고  $R_p$ 는 감소하는 양상이 나타난다. 이때 525°C 이상으로 열처리를 하게되면 R상은 소멸되어  $R_p$ 가 관찰되지 않는다. 600°C 이상으로 열처리 온도를 증가시키면  $A_p$ 와  $M_p$ 는 열처리 온도에 무관하게 거의 일정하게 나타난다.

Fig. 11에는 마르텐사이트 종료온도보다 낮게 냉각한 다음 상온으로 유지하여 초기의 결정구조가 마르텐사이트 상을 갖는 as-received 시료에 대한 XRD 결과가 나타나 있다. 이때 XRD를 통해 얻은 결정구조는 JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards)에 근거한 표준 시편의 모노클리닉 결정구조와 일치함으로 미루어  $M_s$ 가 8.6°C,  $M_f$ 가

-12.5°C,  $A_s$ 가 50.4°C인 as-received 시료를 마르텐사이트 종료 온도보다 낮게 냉각하였다가 다시 상온으로 유지시키는 경우 초기의 상이 상온에서 마르텐사이트 결정구조임을 XRD를 통해 검증할 수 있다.

Fig. 12에는 오스테나이트 종료온도보다 높게 가열하였다가 다시 상온으로 유지하여 초기의 결정구조가 R상을 갖는 as-received 시료에 대한 XRD 결과가 나타나 있다. 이때 XRD를 통해 얻은 결정구조는 JCPDS에 근거한 표준 시편의 큐빅 결정구조와 일치한다. 여기에서 보면  $A_f$ 가 61.0°C,  $R_f$ 가 39.0°C,  $M_s$ 가 8.6°C인 as-received 시료를 오스테나이트 종료 온도보다 높게 가열하였다가 상온으로 유지하는 경우 초기의 상은 R상을 갖지만 XRD를 통해서만 오스테나이트 상이 초기의 상으로 나타난다. 이에 대한 정확한 원인을 현재로서는

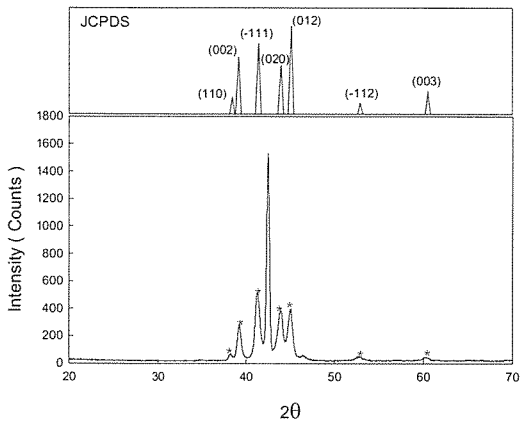


Fig. 13 XRD results for initially martensite phase of 600°C heat treated specimen.

단정할 수는 없지만 시료를 가열하였다가 상온을 유지하더라도 시료 전체에는 완전한 R상이 형성되지 않고 R상과 오스테나이트 상이 공존하는 복합된 상이 나타나는 경우 그리고 시료에 형성된 R상을 XRD로 관찰하기가 어려운 경우의 두 가지로 추정할 수 있다. 따라서 시료에 형성되어 있는 R상의 존재를 검증하기 위해서는 보다 체계적인 분석이 요구된다[12,13].

Fig. 13에는 마르텐사이트 종료온도보다 낮게 냉각하였다가 상온으로 유지하여 초기의 결정구조가 마르텐사이트상을 갖는 600°C로 열처리한 시료에 대한 XRD 결과가 나타나 있다. 이때 XRD를 통해 얻은 결정구조는 JCPDS에 근거한 표준 시편의 모노클리닉 결정구조와 일치한다. 이로 미루어 볼 때 Ms가 42.4°C, Mf가 31.4°C, As가 62.9°C인 600°C로 열처리된 시료를 오스테나이트 상 종료온도 이상으로 가열하였다가 다시 상온으로 유지시키는 경우 XRD를 통해 초기의 상이 상온에서 마르텐사이트 결정구조임을 검증할 수 있다.

#### 4. 결론

어닐링 열처리 조건에 따른 형상기억합금 와이어(54.5Ni-45.5Tiwt%, Nitinol Devices & Components)의 상변환 특성에 대한 연구를 통해 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 어닐링 열처리하지 않은 as-received 시료와 일정 온도로 어닐링 열처리된 시료에 대해 수행된 DSC 결과로 미루어 보면 형상기억합금의 상변환 온도는 어닐링

열처리 조건에 영향을 받는다. 일정 온도로 열처리된 형상기억합금에 대해 비교적 안정된 상변환 특성을 얻기 위해서는 15분 이상의 열처리 시간이 필요하며 고정된 열처리 시간에 대해서는 상변환 특성은 열처리 온도에 따라 달라짐을 알 수 있다. 특히 열처리 온도에 따라 R상과 마르텐사이트 상의 두 정점을 갖는 형상기억합금은 한 정점의 마르텐사이트 상을 갖는 상변환을 하게 되며 일정 온도 이상으로 열처리를 하게 되면 상변환 온도는 열처리 온도에 큰 영향을 받지 않고 거의 일정해진다.

- (2) 주위 온도에 따른 결정구조를 조사하는 경우 초기의 상이 마르텐사이트 상을 갖게 되면 XRD를 통해 결정구조를 정확하게 검증할 수 있지만 초기의 상이 R상을 갖거나 시료 전체에 완전한 R상이 형성되어 있지 않고 R상과 오스테나이트 상이 공존하는 경우에는 XRD를 통해 결정구조를 정확하게 추정하기가 어렵다. 이와 같이 초기의 상이 R상을 갖는 경우에는 R상의 존재를 검증하기 위해 부가적인 실험장치를 이용한 체계적인 분석이 요구된다.

#### 후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문임.

#### 참고문헌

- 1) Duerig, T.W., Melton, K.N., Stöckel, D., and Wayman, C.M., *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*, Butterworth-Heinemann, 1990.
- 2) Otsuka, K. and Wayman, C.M., *Shape Memory Materials*, Cambridge University Press, 1998.
- 3) Funakubo, H., *Shape Memory Alloys*, Gordon and Breach Science Publishers, 1987.
- 4) Lin, H.C., Wu, S.K., Chou, T.S., and Kao, H.P., "The effects of Cold Rolling on the Martensitic transformation of an Equiatomic NiTi Alloy," *Acta Metallurgica et Materialia*, Vol. 39, 1991, pp. 2069-2080.
- 5) Miyazaki, S., Igo, Y., and Otsuka, K., "Effects of Thermal Cycling on the Transformation Temperatures of Ti-Ni Alloys," *Acta Metallurgica*, Vol. 34, 1986, pp. 2045-2051.
- 6) Hwang, C.M. and Wayman, C.W., "Electron Microscopy Studies of Martensitic Transformations in Ternary TiNiAl

- Alloys," *Acta Metallurgica*, Vol. 17, 1983, pp. 1449-1453.
- 7) Duerig, T., Pelton, A., and StÖckel, D., "An Overview of Nitinol Medical Applications," *Materials Science and Engineering*, Vol. A273-275, 1999, pp. 149-160.
  - 8) Huang, X. and Liu, Y., "Effect of Annealing on the Transformation Behavior and Superelasticity of NiTi Shape Memory Alloy," *Scripta Materialia*, Vol. 45, 2001, pp. 153-160.
  - 9) Yoon, S.H., Krishnan, S., and White, S.R., "Thermo-mechanical Characterization of High Temperature NITINOL Shape Memory Alloy," *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 19, 2002, pp. 52-59.
  - 10) Uchil J., Mahesh, K.K., and Kumara, K.G., "Calorimetric Study of the Effect of Linear Strain on the Shape Memory Properties of Nitinol," *Physica B*, Vol. 305, 2001, pp. 1-9.
  - 11) Liu, Y., Yang, H., and Voigt, A., "Thermal Analysis of the Effect of Aging on the Transformation Behaviour of Ti-50.9at% Ni," *Materials Science and Engineering*, Vol. A360, 2003, pp. 350-355.
  - 12) Cai, W., Murakami, Y., and Otsuka, K., "Study of R-phase Transformation in a Ti-50.7at%Ni Alloy by In-situ Transmission electron Microscopy Observations," *Materials Science and Engineering*, Vol. A273-275, 1999, pp. 186-189.
  - 13) Stroz, D., "TEM Studies of the R-phase Transformation in a NITi Shape Memory Alloy after Thermomechanical Treatment," *Materials chemistry and Physics*, Vol. 9807, 2003, pp. 1-3.