

고온용 NITINOL 형상기억합금의 열적/기계적 특성 평가

윤성호*, Sridhar Krishnan**, Scott R. White**

Thermo-mechanical Characteristics of High Temperature NITINOL Shape Memory Alloy

Sung Ho Yoon*, Sridhar Krishnan** and Scott R. White**

ABSTRACT

The thermo-mechanical characteristics of high temperature NITINOL shape memory alloy were evaluated using DSC with small samples and DMA with three-point bending specimens. The shape memory alloy of 54.4Ni/45.5Ti wt.% was used so that the phase transformation temperatures were in the range of 50~110°C. Two types of sample were tested in the experiments corresponding to as-received and annealed conditions. Simple beam bending theory was used to calculate the dynamic moduli of the shape memory alloy. According to the results, a large discrepancy in transformation temperatures was found between DSC and DMA techniques. Annealing treatment was found to suppress the R-phase transformation during cooling and the secondary plateau in the austenite transformation. Such a heat treatment was also significantly influenced to raise the transformation temperatures and the moduli of the shape memory alloy.

Key Words : Thermo-mechanical characteristics (열적/기계적 특성), High temperature shape memory alloy (고온용 형상기억합금), Phase transformation temperature (상변환 온도), Austenite transformation (오스테나이트 상변환), Dynamic moduli (동적 탄성계수), Annealing treatment (풀림 처리)

1. 서론

최근 들어 일반 금속재에서 나타내지 못하는 고유한 특성인 형상기억 효과와 초탄성 효과를 갖는 형상기억합금을 항공우주, 자동차, 전자, 의공학 등의 고부가가치 산업에 응용하려는 많은 시도가 행해져 왔다. 형상기억합금의 열적/기계적 거동은 높은 온도에서는 잘 변형되지 않는 오스테나이트 상과 낮은 온도에서 쉽게 변형되는 마르텐사이트 상 사이의 비확산적인 상변환에 의해 지배

된다. 형상기억 효과는 규정된 온도보다 낮은 온도 상태에서 하중을 받는 경우 일반 금속재에서 나타내지 못하는 큰 변형률이 발생하며 작용된 하중을 완전히 제거하더라도 발생된 변형률은 그대로 남게 되지만 일정 이상의 온도를 다시 가하게 되면 완전히 소멸되어 원래의 형상으로 복원되는 현상이다. 초탄성 효과는 규정된 온도 이상에서 형상기억합금에 큰 하중을 작용시키면 작용하중에 대응되는 큰 변형률이 유발되지만 작용된 하중을 다시 제거하면 원래의 형상으로 다시 복원되는 현

☞ 2001년 9월 12일 접수

* 금오공과대학교 기계공학부

** Dept. of Aero. & Astro. Eng., Univ. of Illinois at Urbana-Champaign

상이다. 이와 같은 형상기억합금을 구조물에 효율적으로 응용하기 위해서는 형상기억합금의 열적/기계적 거동에 대한 명확한 이해 뿐 만 아니라 하중과 온도에 따른 열적/기계적 특성의 정량적인 평가가 필요하다.

Cross 등은 마르텐사이트 상변환 종료온도 (M_f)보다 낮은 온도에서 오스테나이트 상변환 종료온도 (A_f)보다 높은 온도까지 온도를 변화시키며 NITINOL 형상기억합금의 강성과 마르텐사이트 상변환에 필요한 임계응력 등의 기계적 특성을 조사하였다¹. Wick 등은 정적 굽힘시험을 통해 불균일한 응력상태가 NITINOL 형상기억합금의 기계적 특성에 미치는 영향을 조사하였으며 정적 굽힘하중을 받는 경우가 단축 하중을 받는 경우보다 상변환을 유발하는 임계응력은 높다고 하였다². Bidaux 등은 DSC 와 DMA 를 이용하여 NITINOL 형상기억합금이 삽입된 복합재 보의 상변환 거동을 조사하고 이들 결과를 NITINOL 형상기억합금 자체의 결과와 비교하였다³. Kim 등은 형상기억합금 스프링의 반응속도와 작동범위에 대한 실험을 수행하였으며 초소형 액추에이터에 형상기억합금을 적용할 수 있는 가능성을 조사하였다⁴.

본 연구에서는 DSC 와 DMA 를 이용하여 고온용 형상기억합금의 열적/기계적 특성을 평가하였다. 이때 고온용 형상기억합금은 54.4Ni/45.5Ti wt.%의 NITINOL 로서 상변환 온도는 50~110°C의 범위에 있으며 형상기억합금에서의 열처리 효과를 조사하기 위해서는 as-received 경우와 annealed 경우를 고려하였다.

2. 실험방법 및 고찰

2.1 재료의 사양

형상기억합금은 그림 1 과 같이 일정 이상의 온도에서는 오스테나이트 상을 갖지만 규정된 값보다 낮은 온도에서는 twinned 마르텐사이트 상으로 변하며 온도를 다시 높이면 오스테나이트 상으로 변하게 된다. 또한 오스테나이트 상이나 twinned 마르텐사이트 상으로 되어 있는 형상기억합금이 외부에서 하중을 받으면 이러한 상들은 dewinned 마르텐사이트 상으로 변하게 되고 온도를 증가시키면 다시 오스테나이트 상으로 변하게

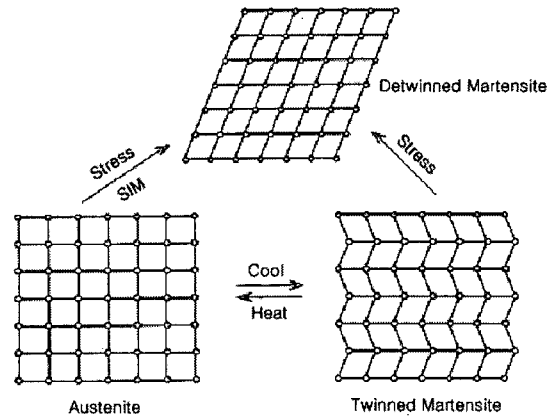


Fig. 1 Stress and temperature effect for shape memory alloy

된다. 이와 같은 형상기억합금은 열처리 조건에 따라 열적/기계적 특성이 달라지기 때문에 형상기억합금을 구조물에 효율적으로 적용하기 위해서는 열처리 조건을 결정하기 위한 성형공정의 구체적인 정보가 필요하다.

본 연구에 적용한 형상기억합금은 SMA Inc.에서 공급된 127 μm 을 갖는 얇은 판 형태로서 열처리되지 않은 as-received 경우와 특정한 열처리 조건이 적용된 annealed 경우의 두 종류를 고려하였다. 특히 annealed 시편은 as-received 시편을 공기 중에서 500°C로 가열하여 105 분 유지한 다음 상온으로 서서히 냉각시키는 열처리 조건을 적용하였다. 이때 열처리 온도는 형상기억합금의 공급업체인 SMA Inc.에서 추천하였으며 열처리 지속시간은 실험을 통해 경험적으로 결정하였다.

2.2 DSC (Differential Scanning Calorimetry)

응력이 작용되지 않은 무부하 상태의 형상기억합금에 대한 상변환 온도를 측정하기 위해 DSC 를 이용한 열분석을 수행하였다. DSC 는 그림 2 와 같이 시료에 열을 가함으로써 시료를 담고 있는 팬과 시료를 담고 있지 않은 기준 팬에서의 상대적인 열흐름 차이를 시간 또는 온도의 변화에 따라 측정하는 방법이다. 본 연구에서는 DSC 측정을 위해 Polymer Laboratories PL-DSC 를 사용하였다. 시료는 as-received 경우와 annealed 경우에 대해 각각 5.8~8.5 mg 정도를 준비하여 알루미늄

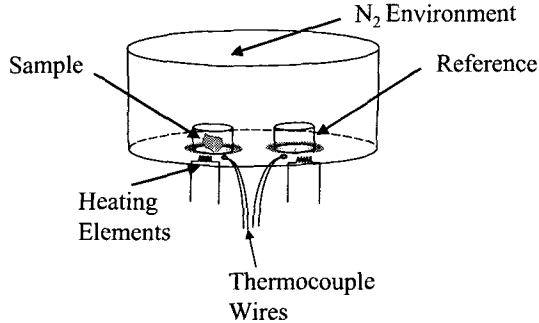


Fig. 2 Schematic diagram of DSC test set-up

용기에 준비된 시료를 넣고 압축기로 압착시킨 다음 시료가 담긴 팬과 시료가 담기지 않은 팬을 각각 챔버에 넣고 열을 가하였다. 온도는 상온에서 150°C까지 상승시키고 이 온도에서 1 분 정도를 유지한 다음 다시 150°C에서 상온으로 감소시켰다. 이때 온도상승률 및 온도하강률은 10°C/min 로 설정하였다.

그림 3 에는 as-received 경우의 시료에 대한 온도상승시 및 온도하강시의 열흐름 변화들이 나타나 있다. 온도상승시의 상변환은 마르텐사이트 상에서 오스테나이트 상으로 변하게 되며 이때의 열흐름은 흡열 반응으로서 오스테나이트 상변환의 시작온도 (A_s)와 종료온도 (A_f)를 얻을 수 있다. 여기에서 보면 오스테나이트 상변환이 종료되기 직전에는 국부적으로 완만해지는 영역이 나타나는데 이는 시료를 채취하기 위한 기계적 절단으로 인해 시료의 절단면 부위에 발생한 detwinned 마르텐사이트 상의 영향으로 판단된다. 이러한 현상에 대해 Prader 등은 detwinned 마르텐사이트 상이 형성되어 있는 형상기억합금의 경우 오스테나이트 상으로 변환할 때는 두 단계에 걸친 상변환가 나타난다고 지적하였다⁵. 또한 온도하강시에는 오스테나이트 상에서 마르텐사이트 상으로 변환하게 되고, 오스테나이트 상과 마르텐사이트 상의 중간 상태인 R-상도 관찰된다고 하였다⁶. 온도하강시의 상변환은 오스테나이트 상에서 마르텐사이트 상으로 변하게 되며 이때의 열흐름은 발열 반응으로 마르텐사이트 상변환의 시작온도 (M_s)와 종료온도 (M_f), R-상변환의 시작온도 (R_s)와 종료온도 (R_f) 등을 얻을 수 있다.

그림 4 에는 annealed 시료에 대한 온도상승시

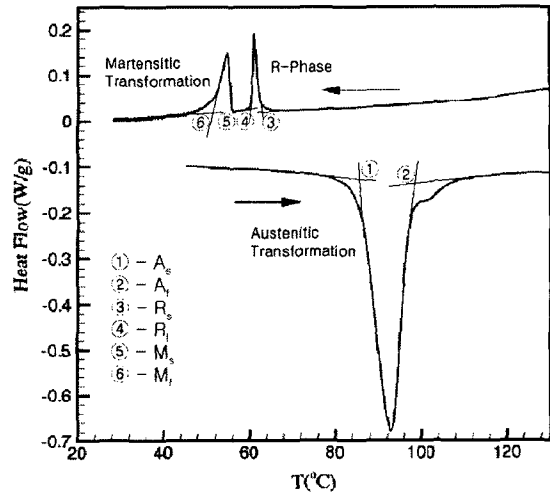


Fig. 3 DSC heating and cooling results for as-received sample

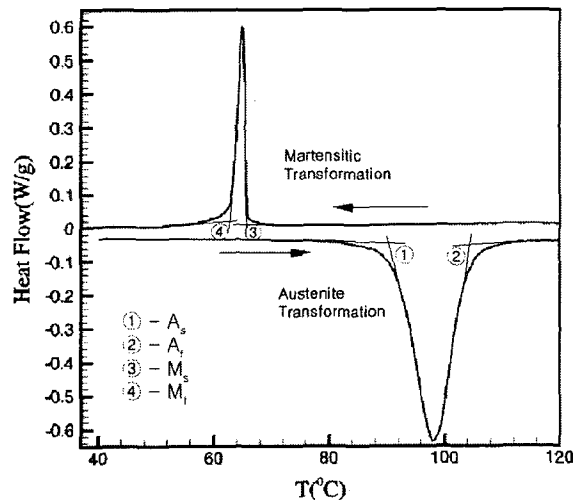


Fig. 4 DSC heating and cooling results for annealed (500°C, 105min) sample

및 온도하강시의 열흐름 변화들이 나타나 있다. 이때 열처리하는 500°C에서 105 분간 유지시킨 다음 상온으로 공기 중에서 서서히 냉각시키는 경우를 적용하였다. 여기에서 보면 annealed 시료의 열흐름 변화는 as-received 시료의 경우와는 달리 온도상승시 오스테나이트 상변환 종료 직전의 국부적으로 비교적 완만한 영역과 온도하강시 나타나는 R-상변환은 관찰되지 않았다. 이는 as-received 시료의 경우 500°C 이상으로 열처리하게 되면 R-상

Table 1 Summary of DSC test results

Parameter	As-received (°C)	Annealed (°C)
M_f	52.0	62.8
M_s	55.8	65.7
R_f	60.0	-
R_s	62.6	-
A_s	85.3	91.1
A_f	97.4	105.0

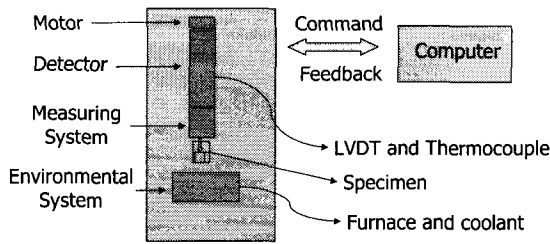


Fig. 5 Schematic diagram of DMA test set-up

자체는 매우 불안정하게 되어 더 이상 R-상을 유지할 수 없게 되어 내부적인 상변환이 발생한다. 이로 인해 마르텐사이트 상변환의 시작온도 (M_s)는 R-상변환의 시작온도(R_s)보다 높아짐을 알 수 있다. 표 1 에는 as-received 경우와 annealed 경우에 대해 DSC 를 통해 얻은 상변환 온도들이 나타나 있다.

2.3 DMA (Dynamic Mechanical Analyzer)

DMA 를 이용하여 응력이 작용된 상태에서의 형상기억합금에 대한 상변환 온도를 측정하였다. DMA 는 규정된 온도조건에 노출되어 있는 시편에 반복적인 동적 하중을 작용시키고 시간, 온도, 주파수 등에 따른 저장 탄성계수와 손실 탄성계수를 측정하는 방법이다.

그림 5 에는 시편이 장착된 DMA 의 개략적인 형상도가 나타나 있다. 본 연구에 적용한 DMA 는 Perkin-Elmer DMA-7 이고 시편은 길이가 18 mm, 폭이 2 mm, 두께가 127 μ m인 얇은 보 형태로서 10 mm의 스패를 갖도록 3 점 굽힘시험치구에 장착하였다. 하중은 일정 크기의 정적 하중에 규정된 주파수를 갖는 동적 하중이 중첩되어 있는 경우를 적용하였다. 이때 정적 하중은 11 mm N 이고 동적 하중은 1 Hz의 주파수를 가진 진폭 10 mm N 으로서

정적 하중을 동적 하중의 진폭보다 크게 설정하여 실험하는 동안 시편에 항상 하중이 작용되도록 하였다. 온도조건은 마르텐사이트 상변환의 종료온도 M_f 보다 충분히 낮은 온도에서 오스테나이트 상변환의 종료온도 (A_f)보다 충분히 높은 온도까지 올린 다음 다시 마르텐사이트 상변환의 종료온도 (M_f)보다 낮은 초기의 온도까지 변화시키는 경우를 고려하였다. 이때 온도상승률 및 온도하강률은 5°C/min 를 적용하였다.

재료 자체가 탄성 거동을 나타내고 증립축에 대한 인장 탄성계수와 압축 탄성계수가 대칭이라고 가정할 단순 보 굽힘이론을 적용하면 동적 하중을 받는 시편의 스프링 상수 K_s , 저장 탄성계수 E' , 손실 탄성계수 E'' 등은 실험에서 측정된 시편중양부에서의 변위에 의해 식(1)-식(3)과 같이 표현된다⁷.

$$K_s = \frac{F_T \cos \theta'}{y^o} + \omega^2 M \tag{1}$$

$$E' = \frac{\sigma^o}{\epsilon^o} \cos \delta \tag{2}$$

$$E'' = \frac{\sigma^o}{\epsilon^o} \sin \delta \tag{3}$$

여기에서 F_T 는 작용하중, y^o 는 동적 변위의 진폭, δ 는 시편의 위상차 (rad), θ' 는 시편의 위상차 (degree), ω 는 각속도 (rad/sec), M 은 구동부의 질량, σ^o 는 동적 응력의 진폭, ϵ^o 는 동적 변형률의 진폭을 나타낸다.

그림 6 에는 온도에 따른 as-received 시편의 저장 탄성계수 선도가 나타나 있다. 여기에서 보편 저장 탄성계수는 상온에서 41GPa 을 갖지만 온도를 서서히 증가시키면 저장 탄성계수는 점차 감소하다가 오스테나이트 상변환이 시작하기 직전인 100°C 근처에서 37GPa 로 감소된다. 그러나 오스테나이트로 상변환이 시작되면 저장 탄성계수는 급격히 증가하여 오스테나이트 상변환의 종료온도 근처에서 58GPa 로 증가한다. 그러나 오스테나이트 상변환의 종료온도 이상으로 온도를 증가시키더라도 저장 탄성계수는 거의 변하지 않고 일정하게 나타난다. 온도를 다시 감소시키는 경우 저장 탄성계수는 온도의 변화에 큰 영향을 받지 않고

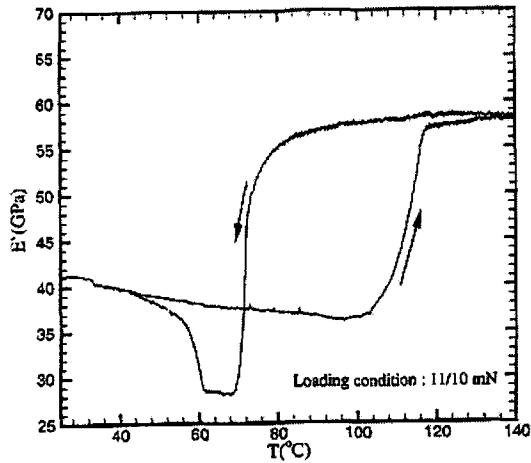


Fig. 6 Variation of storage modulus with temperature for as-received specimen

거의 일정한 값을 갖지만 80°C 근처에 도달하게 되면 급격히 감소하여 28GPa 정도의 최소값에 도달한다. 그러나 온도가 더욱 감소되어 상온에 도달하게 하면 저장 탄성계수는 초기값으로 회복하게 된다. 이와 같이 온도를 감소시키는 경우 특정 온도 근처에서 저장 탄성계수가 급격히 감소하여 국부적인 최소값을 갖는 양상은 R-상변환과 마르텐사이트 상변환이 동시에 발생하기 때문으로 형상기억합금은 이러한 온도 근처에서 탄성적으로 매우 유연해지거나 또는 서로 다른 R-상 사이의 경계면에서 미끌어짐이 쉽게 발생한다.

그림 7 에는 annealed 시편의 저장 탄성계수 선도가 나타나 있다. 이때 열처리 조건은 as-received 시편을 500°C에서 105 분간 유지시킨 다음 공기 중에서 상온으로 서서히 냉각시키는 경우를 적용하였다. 여기에서 보면 저장 탄성계수의 변화는 as-received 시편에서와 유사한 양상을 나타내지만 특정 온도 근처까지 온도를 감소시키는 경우 as-received 시편과는 달리 저장 탄성계수는 최소값을 나타내지 않는다. 이는 형상기억합금에 특정 조건의 열처리를 하게 되면 R-상은 매우 불안정하게 되고 R-상변환의 시작온도보다 높은 온도에서 마르텐사이트 상변환이 발생하기 때문이다. 이러한 현상은 특정 온도 근처에서 R-상변환이 관찰되지 않는 DSC 결과와 일치한다. 또한 형상기억합금을 열처리한 경우 마르텐사이트 상과 오스테나이트

Table 2 Summary of DMA test results

Parameter	As-received (°C)	Annealed (°C)
M_f	58.0	72.0
M_s	62.0	81.0
R_f	68.0	-
R_s	80.0	-
A_s	100.0	108.0
A_f	120.0	130.0

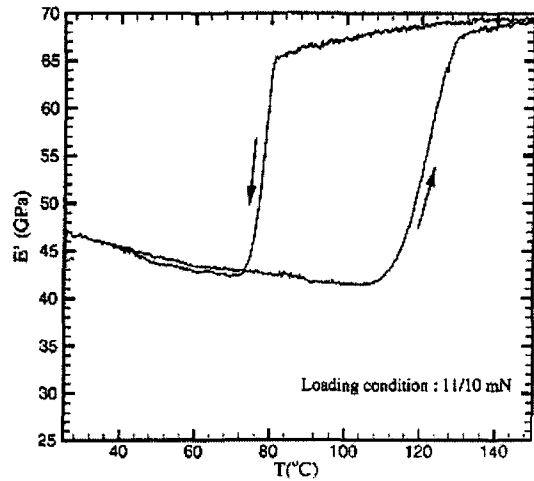


Fig. 7 Variation of storage modulus with temperature for annealed (105°C, 105min) specimen

상의 저장 탄성계수는 as-received 경우보다 현저히 증가함을 알 수 있다.

표 2 에는 as-received 경우와 annealed 경우의 시편에 대해 DMA 를 수행하여 얻은 상변환 온도들이 나타나 있으며 그림 8 에는 온도 변화에 따른 as-received 시편의 정적 변위 선도가 나타나 있다. 이때 하중은 11 mm N 의 정적 하중과 진폭이 10 mm N 이고 주파수가 1 Hz인 동적 하중을 중첩시킨 경우로서 동일한 시편에 대해 2 회 반복하여 실험을 수행하였다. 1 회째 실험결과에서 보면 상온에서 서서히 온도를 증가시킨 경우 하중작용점에서의 변위는 오스테나이트 상변환의 시작온도 근처에 도달할 때까지 거의 일정하지만 오스테나이트 상변환의 시작온도보다 높은 온도인 경우 마르텐사이트 상에서 오스테나이트 상으로 변환되어

강성이 증가하고 상대적인 변위 감소가 나타난다. 그러나 오스테나이트 상변환의 종료온도보다 높은 온도 범위에서는 오스테나이트 상을 그대로 유지하기 때문에 강성의 변화가 거의 없고 하중작용점에서의 변위도 거의 일정한 값을 갖는다. 시편에 작용되는 온도를 상온으로 다시 감소시키는 경우 마르텐사이트 상변환의 시작온도 근처까지는 오스테나이트 상을 그대로 유지하여 강성의 변화는 거의 없으며 하중작용점에서의 변위도 거의 일정하게 나타난다. 그러나 시편에 작용되는 온도가 마르텐사이트 상변환의 시작온도 근처에 도달하면 점차 마르텐사이트 상으로 변환되고 이로 인한 강성 저하로 하중작용점에서의 변위는 급격히 증가한다. 또한 온도가 초기의 상태로 회복되더라도 하중작용점에서의 변위는 원래의 상태로 복원되지 않음을 알 수 있다. 2 회째 실험결과에서 보면 상온에서 점차 온도를 증가시키면 오스테나이트 상변환의 시작온도 근처에 도달할 때까지 하중작용점에서의 변위는 크게 변하지 않지만 오스테나이트 상변환의 시작온도보다 높은 온도에 도달하게 되면 오스테나이트 상으로 변환하기 시작하여 하중작용점에서의 변위는 상대적으로 감소한다. 그러나 오스테나이트 상변환의 종료온도보다 높은 온도범위에서는 강성의 변화가 거의 없기 때문에 하중작용점에서의 변위는 일정하게 나타난다. 상온으로 온도를 다시 감소시키는 경우에는 마르텐

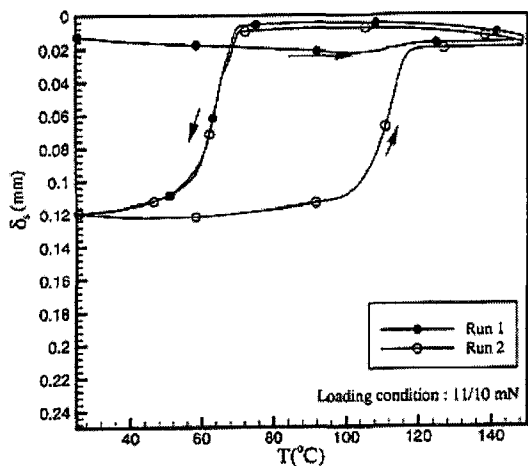


Fig. 8 Variation of static displacement with temperature for as-received specimen

사이트 상변환의 시작온도 근처까지 오스테나이트 상을 유지하기 때문에 하중작용점에서의 변위는 거의 일정하지만 마르텐사이트 상변환의 시작온도 근처에 도달하면 점차 마르텐사이트 상으로 변환되어 하중작용점에서의 변위는 급격히 증가한다. 그러나 1 회째 실험의 경우와는 달리 초기의 온도로 회복되면 하중작용점에서의 변위는 원래의 상태로 복원됨을 알 수 있다.

그림 9 에는 온도에 따른 annealed 시편의 정적 변위 선도가 나타나 있다. 이때 하중조건은 as-received 경우와 동일하며 각 시편에 대해 2 회 반복하여 실험을 수행하였다. 여기에서 보면 형상기억합금에 annealed 열처리를 한 경우에는 상온에서 오스테나이트 상변환의 시작온도 근처까지 온도를 증가시키더라도 하중작용점에서의 변위는 크게 변하지 않지만 오스테나이트 상변환의 시작온도보다 온도를 높이면 형상기억합금의 강성 증가로 인해 하중작용점에서의 변위는 상대적으로 감소된다. 또한 오스테나이트 상변환의 종료온도보다 높은 온도범위에서는 형상기억합금의 강성은 거의 변화가 없어 변위는 일정한 값을 갖는다. 온도를 상온으로 다시 감소시키는 경우 마르텐사이트 상변환의 시작온도 근처까지는 오스테나이트 상을 유지하여 하중작용점에서의 변위는 거의 일정한 값을 갖지만 온도가 마르텐사이트 상변환의 시작온도 근처에 도달하면 점차 마르텐사이트 상으로 변환되어 강성은 급격히 낮아지고 하중작용점에서의 변위는 증가한다. 그러나 온도가 상온으로 다시 회복되더라도 하중작용점에서의 변위는 원래의 상태로 복원되지 않는다. 2 회째 실험결과에서 보면 상온에서 온도를 점차 증가시키면 오스테나이트 상변환의 시작온도 근처에 도달할 때까지 하중작용점에서의 변위는 큰 변화를 나타내지 않지만 오스테나이트 상변환의 시작온도에서 종료온도까지의 하중작용점에서의 변위는 상대적으로 감소한다. 오스테나이트 상변환의 종료온도보다 높은 온도범위에서는 하중작용점에서의 변위가 거의 일정하며 온도를 상온으로 다시 복원하는 경우 마르텐사이트 상변환의 시작온도 근처까지는 오스테나이트 상을 유지하여 변위는 거의 일정해진다. 그러나 마르텐사이트 상변환의 시작온도 근처에 도달하면 마르텐사이트 상변환이 발생하여 변위는 급격히 증가한다. 이와 같은 annealed 경우의 처짐은 as-received 경우에서와 마찬가지로 1 회째 실험에서

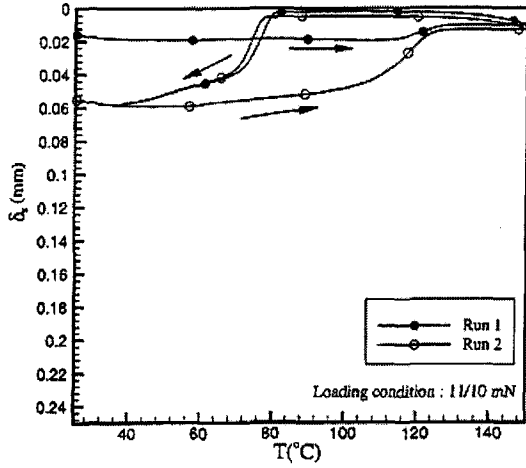


Fig. 9 Variation of static displacement with temperature for annealed (105 °C, 105min) specimen

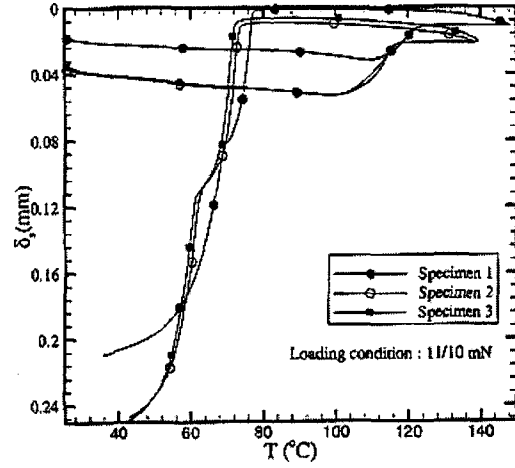


Fig. 10 Static displacement for first loading cycle for annealed (105 °C, 105min) specimen after heating above A_f in unconstrained configuration

는 원래대로 복원되지 않지만 2 회째 실험에서는 원래대로 복원되는 양상을 나타내었다. 이로 미루어 판단하면 상온에서 온도를 증가시켰다가 다시 초기의 온도로 감소시키는 경우 하중작용점에서의 변위는 초기의 상태로 복원되지 않음은 형상기억합금에 가해지는 열처리 조건과는 무관함을 알 수 있다.

그림 10 에는 동일한 조건으로 열처리된 3 가지 경우의 annealed 시편에 대한 온도에 따른 정적 변위 선도가 나타나 있다. 하중조건은 11 mm N 의 정적 하중과 주파수가 1 Hz인 진폭 10 mm N 의 동적 하중을 중첩시킨 경우를 고려하였다. 여기에서 보면 상온에서 온도를 점차 증가시켜도 오스테나이트 상변환의 시작온도 근처에 도달할 때까지는 하중작용점에서의 변위는 크게 변하지 않지만 오스테나이트 상변환의 시작온도보다 높아지면 오스테나이트 상변환으로 인해 형상기억합금의 강성은 증가하고 하중작용점에서의 변위는 상대적으로 감소한다. 그러나 상온으로 온도를 다시 감소시키는 경우 마르텐사이트 상변환의 시작온도 근처까지는 오스테나이트 상을 유지하여 변위는 거의 일정하게 나타난다. 온도가 마르텐사이트 상변환의 시작 온도 근처에 도달하면 마르텐사이트 상으로 변화되어 강성은 저하되고 하중작용점에서의 변위는 급격히 증가한다. As-received 인 경우와 마찬가지로

로 온도가 초기의 상온 상태로 회복되어도 하중작용점에서의 변위는 원래의 상태로 복원되지 않음을 알 수 있다.

그림 11 에는 annealed 시편에 대해 하중조건을 변화시키며 2 회 반복 실험한 경우 2 회째 실험에서 얻은 온도에 따른 정적 변위 선도가 나타나 있다. 하중조건은 각각 5 mm N 의 정적 하중과 진폭이 4 mm N 인 동적 하중이 중첩된 경우, 11 mm N 의 정적 하중과 진폭이 10 mm N 인 동적 하중이 중첩된 경우, 110 mm N 의 정적 하중과 진폭이 100 mm N 인 동적 하중이 중첩된 경우를 고려하였다. 이때 동적 하중의 주파수는 모두 1 Hz인 경우를 적용하였다. 여기에서 보면 하중작용점에서의 정적 변위는 상온에서 오스테나이트 상변환의 종료온도보다 높은 온도까지 증가시킨 다음 다시 상온으로 온도를 감소시키는 경우 작용하중의 정도에 따라 변위의 증가 또는 감소하는 정도가 달라지지만 하중작용점에서의 변위는 하중조건에 무관하게 초기의 상태로 복원됨을 알 수 있다.

3. 결론

54.4Ni/45.5Ti wt.%의 조성비를 갖는 고온용 NITINOL 형상기억합금에 대해 열처리하지 않은 as-received 경우와 열처리한 annealed 경우의 열적/

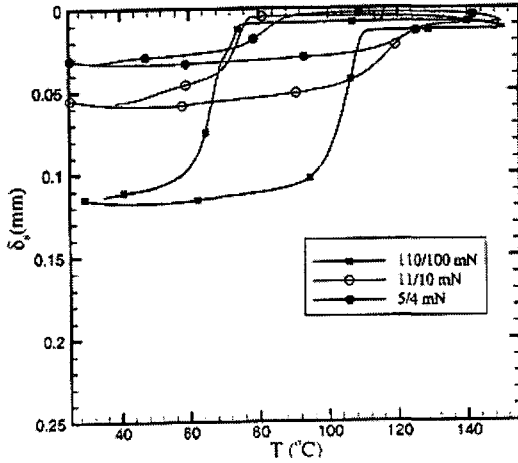


Fig. 11 Static displacement for second loading cycle for annealed (105°C, 105min) specimen after heating above A_f in unconstrained configuration

기계적 특성을 DSC 와 DMA 를 적용하여 평가하였다. DMA 를 통해 측정된 상변환 온도는 DSC 의 경우에 비해 통상적으로 높게 나타나는데 이는 DSC 와 DMA 의 장치적인 차이에 기인하는 것으로 판단된다. DMA 에서 얻은 상변환 온도를 DSC 에서 얻은 결과와 비교하기 위해서는 DMA 에서 얻은 상변환 온도를 무부하 상태로 외삽하는 과정이 필요하다. 일반적으로 DSC 에서의 상변환 온도는 형상기억합금의 선정 기준을 제시하며 주며 DMA 에서의 상변환 온도는 형상기억합금의 열적/기계적 거동을 예측하기 위한 정보를 제공해 준다. As-received 경우의 DSC 선도에서는 온도상승시 오스테나이트 상변환 종료 직전에 국부적인 완만한 영역이 관찰되며 온도하강시 오스테나이트 상과 마르텐사이트 상의 중간 상태인 R-상이 관찰되었다. 그러나 열처리를 적용한 annealed 경우는 as-received 경우와 달리 온도상승시의 국부적인 완만한 영역과 온도하강시의 R-상은 관찰되지 않았다. 이러한 현상은 DMA 에서 얻은 온도에 따른 저장 탄성계수의 변화를 통해서도 확인이 가능하였다. As-received 경우 특정한 온도 근처에서 저장 탄성계수는 급격히 감소하여 국부적인 최소값을 갖는데 이는 R-상변환과 마르텐사이트 상변환으로 인해 탄성적으로 매우 유연해지거나 또는 서로 다른 R-상 사이의 경계면에 미끄러짐이 쉽게 발생하게

되기 때문으로 판단된다. 형상기억합금의 열적/기계적 특성은 열처리 조건 등에 민감한 영향을 받기 때문에 효율적인 활용을 위해서는 경험적인 방법과 형상기억합금의 공급업체에서 제공된 정보 등을 활용하여 적절한 열처리가 행해져야 한다.

참고문헌

1. Cross, W., Kariotis, A., and Stimler, F., "Nitinol Characterization Study," NASA CR-1433, 1969.
2. Wick, A., Vorringer, O., and Pelton, A.R., "The Bending Behavior of NiTi," J. De Physique IV, Vol. 8(C1), pp. 789-794, 1995.
3. Bidaux, J.E., Bataillard, L., Mason, J.A., and Gotthardt, R., "Phase Transformation Behavior of Thin Shape Memory Alloy Wires Embedded in a Polymer Matrix Composite," J. De Physique IV, Vol. 3(C7), pp. 561-564, 1993.
4. Kim, K.S., Kim, B.W., and Cho, D.I., "Shape Memory Alloy Microactuators," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 13(6), pp. 54-61, 1996.
5. Prader, P. and Kneissl, A.C., "Deformation Behavior and Two-Way Shape Memory Effect of NiTi Alloys," Zeitschrift fur Metallkunde, Vol. 88(5), pp. 410-415, 1997.
6. Stachowiak, G.B. and McCormick, P.G., "Shape Memory Behavior Associated with R and Martensitic Transformations in a NiTi Alloy," Acta Metall., Vol. 36(2), pp. 291-297, 1988.
7. Dynamic Mechanical Analyzer DMA7/DMA7e Method Guide Version 0.1, Thermal Analysis, Perkin Elmer.