

# 단결정 및 다결정 Ni<sub>2</sub>MnGa 합금에서의 자기장 유기 변형특성

정순중, 민복기

한국전기연구원 전자기소자 연구그룹

## Magnetic field-induced deformation in single- and poly- crystalline Ni<sub>2</sub>MnGa

Soon-Jong Jeong, Bok-Ki Min

Korea Electrotechnology Research Institute

### Abstract

강자성 형상기억합금은 기존의 압전재료 및 열적 형상기억합금을 이용한 전기-열-기계적 거동의 액츄에이터 재료를 대신할 수 있는 새로운 고성능 액츄에이터 재료로서 각광을 받고 있다. 그러한 강자성 형상기억합금들 중의 한 종류로서 단결정 및 다결정 Ni<sub>2</sub>MnGa 합금을 이용하여 자장인가시 변형을 관찰하였다. 거대 자장 유기 변형률을 설명하기 위하여 두 모델이 제안되었다. 변태 온도보다 낮은 온도에서는 마르텐사이트 상의 재배열에 의하여 변형이 일어났으며, 그 변태온도보다 높은 온도에서는 상변태에 의한 변형이 일어났다. 미세구조 관찰을 통하여 인가 자장의 방향에 따라 우선적으로 형성되는 마르텐사이트상을 관찰하였다.

**Key Words** : Ferromagnetic Shape Memory Alloy, Ni<sub>2</sub>MnGa, Magnetic Field-induced Strain, Variant Domain Motion, Phase Transformation

## 1. 서 론

기존의 형상기억합금의 약점중의 하나인 응답 속도를 높일 수 있다는 점에서 자기장 유기 형상기억합금에서의 기억능은 매우 큰 관심을 받고 있다. 그러한 합금들중 Ni<sub>2</sub>MnGa 강자성 형상기억합금은 높은 전력밀도와 빠른 응답성을 지닌 액츄에이터로서 사용될 수 있으리라고 예상되고 있다. 마르텐사이트 변태와 자기특성사이의 관계를 이해하기 위하여 구조 및 자기특성에 관련된 많은 연구가 진행되었다<sup>1)~3)</sup>. 그 연구에서 마르텐사이트 변태는 자기특성, 특히 포화자화와 투자율에 크게 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다.<sup>2) 3)</sup> 그러한 자기특성에 관한 변태의 영향과 더불어, 자기장은 마르텐사이트 베리언트의 재배열<sup>4)~7)</sup>과 변태<sup>8)</sup>와 관련된 형상변화를 일으킬 수 있다고 제안되었다. 이전의 연구<sup>4,5,7)</sup>에서는 그 형상변화는 M<sub>f</sub>이하의 온도에서 자화거동의 결과로서 설명되었다. 높은 자기이방성이 그러한 자기장 유기 형상변화에 대한 주

요인자로서 고려되었다. 하지만, 만약 자기장에 의해 일어난 자기에너지가 마르텐사이트 베리언트 구조와 변태에 상당한 영향을 미친다면 그 자장 유기변형에서는 여러 종류의 자기 및 기계 에너지 인자들이 고려되어야 한다.

본 연구에서는 자기장 유기 변형거동을 설명하는 두 기구와 관련된 에너지들을 살펴보고 M<sub>f</sub> 이하와 A<sub>f</sub> 이상의 온도들에서 그 형상변화를 관찰하였다. 이러한 형상변형에 대한 기준 및 관련 에너지 인자의 연관성을 조사하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시료 제조

99.99% Ni과 99.9%Mn과 99.999%Ga을 아크용해법으로 녹여서 합금을 만들었다, 그합금은 석영관에 진공봉입시킨후 균질화 열처리를 900℃에 2시간동안 하였다. 그런 다음 합금을 상온으로 수냉시켰다. 그 균질화된 합금은 EDM을 사용하여 2×2×6mm의 직육면체 형태로 가공되었다. 그런 다음 900

℃에 30분간 열처리한 후 수냉시켰다. 마르텐사이트 변태들은 DSC로 측정되었고 미세구조는 광학 현미경을 사용하여 관찰되었다.

Bridgeman법을 이용하여 직경 130mm과 길이 60mm의 Ni-22at%Mn-27at%Ga 단결정을 제작하였다. 결정성장 속도와 시료의 무게는 2mm/hr, 90g 이었다. 그 단결정의 결정 방위는 Electron Backscattering diffraction을 이용하여 결정하였다. 본 연구에서는 연구된 여러 조성의 합금들중 두 합금 Ni-19.5at% Mn-27at%Ga 다결정과 Ni-23at%Mn-27at%Ga 단결정 시료를 선택하여  $M_f$  이하와  $A_r$  이상의 두 온도에서 자기장 유기 변형을 관찰하였다. 마이크로 스트레인 게이지(EA-06-015LA-120)을 시료 표면에 부착하고 자기장 강도를 변화시키면서 그 변형율을 측정하였다. 이 실험에서는 그 게이지는 가해지는 자기장의 방향에 수직인 방향으로 변형율을 측정하였다.

## 2.2 시료 측정

DSC, 중성자 회절법, VSM을 이용하여 위의 두 시료의 상변태 및 자기적 특성을 측정하였다. 각각의 특성을 표1에 나타내었다.

표 1. 단결정 및 다결정 시료의 특성

specimen	Ni-22at% Mn-27at% Ga single crystal	Ni-19.5at% Mn-27at% Ga polycrystal
Transformation temperatures, $M_s, M_f, A_s, A_r$ (°C)	-2, -13, 0, 10	52, 42, 51, 64
Curie temperature (°C)	>130	67
Enthalpy(J/g)	2.1	1.92
saturation magnetization in martensite phase (Gauss)	6000	6000
saturation magnetization in austenite phase (Gauss)	4000	0
permeability of austenite	--	1.257
permeability of martensite	--	--

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 단결정 시료에서의 자기장 인가에 따른 변형률 변화

그림 1은  $M_f(-13^\circ\text{C})$  이하의  $-23^\circ\text{C}$ 에서 단결정 Ni-19.5at%Mn-27at%Ga의 자기장변화에 따른 변형률을 보여주고 있다. 오스테나이트상 방향  $[2\ 2\ 1]$ 으로 변형률은 측정되었고 자기장은  $[\bar{6}\ \bar{7}\ 2]$  방향으로 인가되었다. 그림 3에서 보듯이 자기장이 인가됨에 따라 변형률은 포물선형태로 증가되었다. 10kOe의 최대 인가 자장에서는 0.16%의 변형률이 관찰되었다. 그 비교적 큰 변형률은 마르텐사이트 베리언트 경계면의 이동에 의한 것이다.

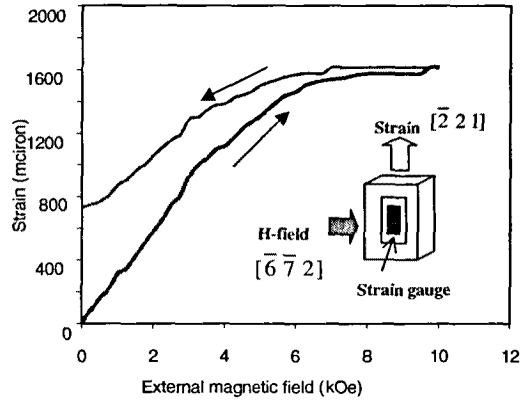


Figure 1. Strain of a Ni-22at%Mn-27at%Ga single crystal as a function of magnetic field at  $-23^\circ\text{C}$  below  $M_f(-13^\circ\text{C})$ .

### 3.2. 다결정 시료에서의 자기장 인가에 따른 변형률 변화

그림 2는 다결정 Ni-19.5at%Mn-27at%Ga에서  $A_r$  이상의 온도  $73^\circ\text{C}$ 에서는 10kOe의 자기장이 인가됨에 따라 마르텐사이트 변태가 일어났으며 126MPa의 압축응력하에서 그 변형률은 0.82%이었다.

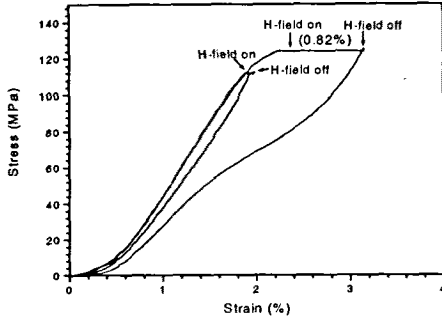


Figure 2. Changes in strain in response to a magnetic field of 10kOe of polycrystalline Ni-19.5Mn-27Ga under compressive stresses at 73°C (10°C above A<sub>r</sub>).

### 3-3. 에너지 고찰

M<sub>r</sub>이하의 온도에서는 자구 에너지와 변태와 관련된 탄성 에너지를 포함하는 전체 에너지가 최소화되는 조건에서 마르텐사이트 베리언트들이 형성된다. 만약 마르텐사이트 베리언트의 경계를 이동하는데 필요한 에너지가 자기 모멘트를 회전하는데 사용되는 에너지보다 적다면 그 베리언트의 경계이동으로 자화가 형상 변형과 함께 일어난다. 즉, 자화 과정의 결과로써 우선 방향의 베리언트가 성장한다고 예상된다. 이 조건에서는 전체 에너지 E<sub>total</sub>는 베리언트 경계면의 이동에 필요한 에너지 E<sub>domain motion</sub>와 정자기 에너지 E<sub>magnetostatic</sub>으로 구성된다.

$$E_{total} = E_{magnetostatic} + E_{domain motion} \quad (1)$$

이 전체 에너지 E<sub>total</sub>이 일반적인 자기 모멘트 회전에 의한 자기이방성 에너지 E<sub>anisotropy</sub>보다 적으면 베리언트 경계 이동이 일어난다.

$$E_{magnetostatic} + E_{domain motion} < E_{anisotropy} \quad (2)$$

A<sub>r</sub>이상의 온도에서는 자기장 인가에 의해 마르텐사이트가 형성된다고 예상된다. 마르텐사이트 변태가 자화 과정에 기여를 하게 될 때, 세가지 에너지 인자, 정자기 에너지, 자기탄성 에너지, 상변태 에너지들을 고려하여야 한다. 만약 변태에 도움이 되는 외부 응력이 시료에 가해지면 그에 관련된 에너지 E<sub>applied stress</sub>도 고려되고 전체 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{total} = E_{magnetostatic} + E_{magnetoelastic} + E_{transformation} + E_{applied stress} \quad (3)$$

이러한 에너지합이 자기장인가에 의한 에너지 E<sub>magnetic</sub>보다 적으면 자기장 유기 변태 E<sub>magnetic</sub>가 일어날 수 있다.

$$E_{total} < E_{magnetic} \quad (4)$$

## 4. 결론

변태 온도보다 저온에서 단결정 Ni-22at%Mn-27at%Ga와 고온에서 다결정 Ni-19.5at%Mn-27at%Ga에서 자기장 유기 형상 변형이 관찰되었으며 이는 베리언트 재배열과 변태와 관련되어 있다.

## 참고 문헌

- [1] P.J. Webster, K.R.A. Ziebeck, S.L. Town and M.S. Peak, *Phil. Mag.* B49, 295, 1984.
- [2] V.V. Kokorin and V.A. Chernenko, *Phys. Met. Metall.*, vol.63, no.6, 111, 1987.
- [3] V.V. Kokorin, V.A. Chernenko, V.I. Val'kov, S.M. Konoplyuk and E.A. Khapalyk, *Phys. Solid State*, vol.37, no.12, 2049, 1995.
- [4] K. Ullako, J.K. Hung, C. Kantner and R.C. O'Handely, *Appl. Phys. Lett.*, vol.69, no.23, 1988, 1996.
- [5] O'Handely, *J. Appl. Phys.*, vol.83, no.6, 3263, 1998.
- [6] R.D. James and M. Wuttig, *Phil. Mag. A*, vol.79, no.5, 1273, 1998.
- [7] R. Tickle and R.D. James, *J. Mag. Magn. Mater.* vol.195, 627, 1999.
- [8] K. Inoue et al., *Proc. Int. Conf. Solid-Solid Phase Trans.'99(JIMIC-3)*, 1120, 1999.