

자기변형 물질의 소개

이 호 철*

(대구가톨릭대학교 기계자동차공학부)

자기변형(magnetostriction)에 관한 연재물 2번째로 이번 호에서는 자기변형 현상을 보이는 각종 물질에 대해서 알아보기로 한다. 편익상 별도의 합금을 만드는 과정을 거치지 않아도 자연계에서 얻을 수 있는 비희토류계 물질과 특별한 공정을 통해서만 만들어낼 수 있는 희토류계 물질로 나누었다. 자기변형 현상에 대한 물리적인 이해는 3번째 연재물부터 진행할 것을 밝힌다.

1. 비희토류계 물질

앞서 이번 연재의 첫 번째(소음진동 21권 2호) 글에서 밝힌 바와 같이 자기변형 현상은 자기장 속에 놓인 물질이 기계적인 변형을 일으키는 현상을 지칭한다. 이는 자연계에 존재하는 자성물질에서 정도의 차이가 있을망정 공통으로 발견되는 물리적 현상이다. 하지만 여기서는 가장 대표적인 물질인 철과 니켈 그리고 Hyperco 대해서만 알아보도록 한다. 한 가지 사전에 언급해야 할 사실은 뒤에 나오는 인공적으로 개발된 희토류계의 합금의 경우 정확하게 정의된 상업적 목적에 의해서 만들어졌기 때문에 각종 물성치가 명확하게 제시되어있는 것이 보통이며 이를 구하는 것 또한 어렵지 않음에 비해서 비희토류계 물질 혹은 이들의 합금은 보통은 자기변

형이 아닌 다른 목적으로 사용되며 그 조성비나 열처리 등에 의해서 자기적인 특성 및 자기변형과 관련된 특징이 매우 크게 바뀌기 때문에 이에 대한 단일한 데이터를 구하기가 매우 어렵다는 것이다.

(1) Iron(Fe)

철은 산업계는 물론이고 일반 가정용 제품에서도 가장 넓게 사용되는 금속이고 가장 대표적인 자성체이기 때문에 당연히 자기변형 현상을 보인다. 안타깝게도 혹은 다행이게도 철이 보이는 자기변형 현상은 대략 10 ppm 정도로 매우 작기 때문에 특별한 경우를 제외하고는 상업적으로는 큰 의미가 없다. 여기서 안타깝다는 다행이라는 철을 자기변형의 용도로 사용하기에는 너무 작은 자기변형 현상을 보이고 있음을 말하며 다

* E-mail : holee21@cu.ac.kr / Tel : (053) 850-2712

행이란 의미는 철이 다른 목적으로 사용될 때는 자기변형 현상이 장애물로 작용할 수 있기 때문이라는 점을 말한다. 예를 들어 변압기에 들어가는 규소강판의 자기변형 현상 때문에 변압기에서 ‘웅~’ 하는 소음이 들리는 것을 들 수 있다. 만일 철이 보이는 자기변형 현상이 매우 크다면 이 소음문제는 훨씬 더 심각했을 것이다. 철이 다른 자기변형 물질과 비교했을 때 특이한 점은 ‘Villari reversal’ 이라고 불리는 현상을 보인다는 것이다.(1회 연재에서 언급한 자기변형 현상의 역현상인 ‘Villari effect’와는 완전히 다른 현상을 지칭하므로 주의한다.) 이는 ‘+’의 자기변형을 보이던 철이 대략 4000 A/m(500 Oe)의 자기장 부근에서 ‘-’의 자기변형, 즉 줄어들게 되는 현상을 말한다(그림 1 참고). 여기서 언급하지는 않으나 cobalt라는 강자성 물질의 경우 casting에 의해서 만들어지는 경우 철과는 반대의 현상을 보인다. 즉, 처음에는 ‘-’의 변형을 보이다가 나중에 ‘+’의 변형을 나타낸다(그림 1 참고). 철은 일반적으로 그대로 사용되지 않는다. 주로 탄소를 섞어서 강철(steel)의 형태로 사용한다. 자기변형 관점에서 보면 앞서 언급한 바와 같이 탄소가 섞인 양이

자기변형과 관련된 특성에 큰 영향을 줄 뿐 아니라 같은 조성비를 가진다고 해도 열처리 방법 에 따라서 매우 다른 자기변형 특성을 보임을 염두에 두어야 한다(그림 1 참고).

(2) Nickel(Ni)

니켈은 Joule이 처음으로 자기변형 현상을 발견했을 때 사용했던 물질이기도 하다. Joule이 이 현상을 발견했을 때의 계측 장비의 성능을 고려했을 때 앞서 언급한 철에 비해서 비교적 큰 변형률을 보이는 것이 Joule이 자기변형 현상을 발견할 수 있었던 이유였을 것이다. 풀림을 한 순수 cobalt와 마찬가지로 음의 자기변형을 보이는데 일반적으로 희토류계를 제외한 순물질 중에서는 가장 큰 변형률을 보여 최대 50 ppm 정도의 변형률을 얻을 수 있다(그림 1 참고). 니켈은 비교적 큰 자기변형 현상을 보이면서도 기계적인 가공이 뒤에 나오는 Hyperco나 희토류계 물질에 비해서 매우 좋다는 장점과 동시에 가격적인 측면에서도 매우 유리하기 때문에 공진모드에서 사용되는 초음파 발생용 액추에이터에 유용하게 사용할 수 있다.

(3) Hyperco

Hyperco는 코발트와 철의 합금으로 순수한 니켈에 비해서도 상대적으로 큰 100 ppm 정도의 자기변형을 보인다. 하지만 상대적으로 니켈에 비해서 취성이 강해서 가공 측면에서는 좋지 않다.

(4) Metglas

Metglas는 철을 기반으로 한 자성물질로 매우 작은 자기변형을 가지고 있어 액추에이터로 사용하기에는 좋지 않지만 core loss가 매우 작고 투자율이 매우 커서 센서에 사용하기에는 매우 좋

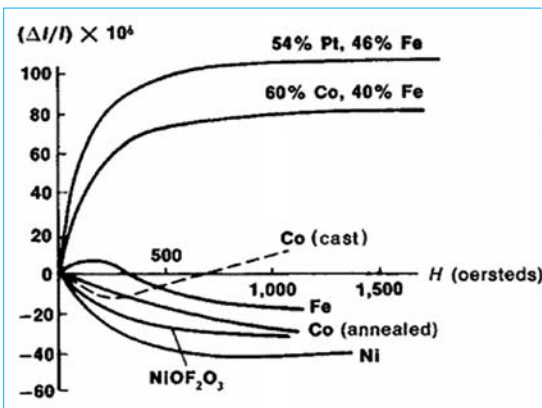


그림 1 몇 가지 강자성체에 대한 자기변형 곡선

기초강좌

은 물질이다(annealed metglas의 경우 약 600,000의 투자율을 보인다.). 자세한 내용은 www.metglas.com을 참고하도록 한다.

철, 니켈, 코발트 그리고 몇 가지 철 합금에 대한 자기변형을 그림 1에 보였다. 앞서 언급한 바와 같이 코발트의 경우 어떻게 만들어졌는가에 따라서 매우 다른 특성을 보임을 알 수 있다. 또한 별도로 데이터를 제시하지는 않았으나 이들 비회로류 물질들은 공통적으로 희토를 물질에 비해서 'electromechanical coupling factor'의 크기가 작다는 공통적인 단점도 가지고 있는데 이는 보통 이들 물질이 만들어진 목적이 자기변형이 아니기 때문에 당연한 결과라고 할 수 있다.

2. 희토류계 합성 물질

(1) Terfenol-D

Terfenol-D는 $Tb_xDy_{1-x}Fe_2$ (여기서 x 는 0.3 근처)의 공식으로 표시되는 희토류(Tb: terbium, Dy: dysprosium)와 철의 합금으로 1970년대 Naval Ordnance Lab.(이름에 보이는 'no'는 이 lab의 약자다.)에 의해서 처음 개발되었다. 초기에 Nickel 등의 자기변형 금속이 초음파 생성에 사용되다가 피에조 물질이 개발되면서 대부분의 시장이 이 물질에게 넘겨지게 되었는데 다시 자기변형 물질에 관심을 불러일으킨 대표적인 자기변형 물질이다. 이 물질은 상용화를 위한 제조공법이 1980년 Ames Lab.에 의해서 개발되면서 본격적으로 각종 응용분야에 활용되기 시작하였다. 이 물질을 상업적으로 생산하는 대표적인 업체인 Etrema에서 제공하는 공식적인 사양은 표 1과 같다(참고로 최근 Etrema에서 Terfenol-D 구매를 시도했었는데 대응이 매우 느렸다. 이런 경우 구매를 원한다면 중국에 있는 중소 관련 업체를 이용할 것을 권한다.). 표에는 1200 ppm의 변형률을

표 1 Terfenol-D의 물성치 (www.etrema.com)

Group	Properties	Value
Mechanical	Young's modulus	25~32 GPa
	Sound speed	1640~1940 m/s
	Tensile strength	28 MPa
	Compressive strength	700 MPa
Thermal	Coefficient of thermal expansion	12 ppm/°C
	Specific heat	0.35 kJ/kg-K
	Thermal conductivity	13.5 W/m-k
Electrical	Resistivity	$58 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
	Curie temperature	380 °C
Magnetostrictive	Strain(estimated linear)	800~1200 ppm
	Energy density	14~25 kJ/m ³
Magnetomechanical	Relative permeability	3~10
	Coupling factor	0.75



그림 2 유리창 등에 장착하여 사용하는 FeONIC사의 평면 스피커(왼쪽)와 Etrema사의 연구용 액추에이터

얻을 수 있다고 나왔으나 최대 포화 변형률은 대략 2000 ppm으로 알려져 있다. 피에조 물질에 비해서 상대적으로 강력한 힘과 변형률을 바탕으로 평면 스피커(그림 2) 등에서 처음으로 상업적인 성공을 거둔 바 있고 디젤 엔진의 연료 분사장치에 응용이 고려된 바 있으나 그 이후에는 아직 강력한 상업용 킬러 어플리케이션을 찾지 못하고 있다.

(2) Galfenol

Galfenol은 자기변형 현상을 이용할 수 있도록 개발된 물질 중에서 가장 최근에 발명된 것으로 NSW-CD(Naval Surface Warfare Center-Cardero Division)의 Magnetic Material 그룹에 의해서 1998년에 제안되었다. Terfenol-D의 예와 마찬가지로 이름에서 그 성분을 예측할 수 있는데 갈륨(gallium)과 철(iron : 원소 기호 Fe)의 합금이다. 이 물질이 보이는 자기변형 현상의 양은 앞서 언급한 Terfenol-D와 비교했을 때 1/3~1/4 수준에 불과하지만 Terfenol-D와 비교했을 때 상대적으로 강건하고 안정적이다. Galfenol의 특징을 정리하면 다음과 같다.

- Terfenol-D의 경우 매우 취성이 강해서 상온에서 작은 힘만으로도 부스러지지만 Galfenol은 충분한 연성을 가지고 있어서 선반 작업이나 밀링 작업 등 일반적인 표준 절삭가공이 가능할 뿐 아니라 용접도 가능하다고 알려져 있다. 이점은 Terfenol-D가 인장력에 약하기 때문에 이러한 힘을 받는 부재로는 사용이 되기 힘들거나 추가적인 작업(예 압을 가해주는 방법)이 필요함을 말하지만 Galfenol은 그대로 사용할 수 있음을 의미한다. 그림 3은 그러한 예들 중에서 기계가공과 용접의 예를 보여주고 있다.
- 넓은 온도 범위에서 안정적인 성능을 보이는데 인장력을 받는 상황에서도 100~150° 범위까지도 동작을 할 수 있으며 압축력을 받는 경우에는 이보다 훨씬 높은 온도 범위에서도 동작이 가능하다. 또 변형률의 온도에 따른 변화가 0.5 ppm/°C로 작다.
- 변형 가능한 최대 변형을 나타내는 포화 변형률은 대략 300~400 ppm이며 상대적으로

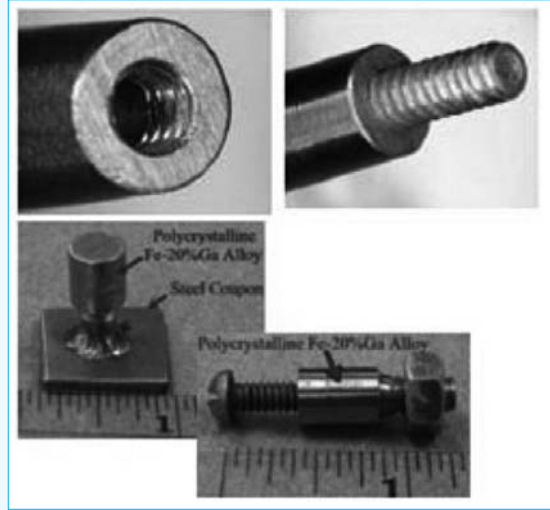


그림 3 Galfenol의 가공 예 : 위쪽 2개 절삭가공 아래 왼쪽은 용접의 예

낮은 전압에서 얻을 수 있는 것으로 알려져 있는데 이는 일반적인 Galfenol에서 얻을 수 있는 양은 아니고 단결정(single crystal) 합금에서 얻을 수 있는 양이다. 가격이 상대적으로 저렴한 다결정(polycrystalline) 합금에서 얻을 수 있는 양은 이보다 조금 작아서 250~300 ppm이다.

- 인장 강도가 400~500 MPa(58~75 psi)로 기계적으로 강하다. 앞서 보았지만 Terfenol-D의 경우 압축강도는 700 MPa임에 반해서 인장강도는 28 MPa 밖에 안 된다. 참고로 대표적인 강철인 S45C는 569 MPa이다.
- 상대 투자율이 100에 이를 정도로 높으며 포화자기장의 세기도 1.8T 정도로 높은 편이다. 게다가 히스테리시스도 상대적으로 작다. ($\Delta H_{hyst} = 10 \text{ Oe}$) KSNVE