

자기변형 기초강좌 (1)

이 호 철*

(대구가톨릭대학교 기계자동차공학부)

이번 기초강좌 코너에서는 앞으로 4회 혹은 5회에 걸쳐서 소위 영어로 ‘magnetostriction’ 한국말로 ‘자기변형 혹은 자왜현상’ (이하 자기변형 현상으로 통일하여 지칭함)이라고 불리는 현상에 대한 연재를 진행할 예정이다. 지능형 물질에 대한 관심이 어느 때보다 높아진 요즘에 독자들의 요구에 부합하는 시의적절한 연재물이 되기를 기대하며 때때로 필자의 근거 없는 사견이 포함되더라도 독자 여러분들의 많은 양해를 부탁드립니다.

첫 연재로 어떤 내용을 다룰 것인가를 고민하다가 딱딱한 수식이 잔뜩 들어갈 것이 불을 보듯이 뻥한 이 강좌를 시작하기에 앞서 첫 번째 연재에서는 조금 부드러운 내용을 다루기로 결정하였다. 필자를 포함하여 지능형 물질을 이용한 연구 분야에 첫발을 내딛었던 혹은 내딛는 연구자들이 경험하게 되는 용어에 대한 혼선을 정리하는 것이 연구를 진행하는데 구체적인 도움을 주지는 못할지라도 무엇인가 머릿속에서 정리되지 않은 찝찝한 느낌을 지우는 데는 도움이 되리라 믿고 이를 내용으로 정하였다. 이어질 내용을 살펴보면 용어 사용 측면에서 굳이 한국어로 번역하지 않고 영어를 그대로 적었는데 독자 여러분들이 양해해주실 것이라 믿는다. 독자 여러분들은 아래에서 설명하고 있는 piezomagnetism, piezoelectricity, electrostriction, magnetostriction 이

4가지 용어에 대해서 정확하게 구분할 수 있는가? 그 정도 내공을 가지고 있다면 이 기초강좌를 더 이상 읽으실 필요가 없는 초절정 고수라고 확신한다. 만일 그렇지 않으신 분들이라면 이번 기회에 같이 개념을 정리해보자.

- Piezomagnetism : 일부 antiferromagnetic 물질에서 나타나는 현상으로 자기장을 가해주면 기계적인 변형이 발생하는 현상을 말한다. 역방향의 현상도 가능하여 응력을 가하면 자기장의 변화가 나타난다. 하지만 뒤에 나올 magnetostriction과 달리 이 현상에서는 자기장의 방향을 바꾸면 변형도 반대 방향으로 일어난다. 또한 자기적으로 바이어스(bias)되어 있지 않은 상태에서도 외부에서 힘을 가하면 자기적인 변화가 일어나는데 이 역시 magnetostrictive 물질에서는 볼 수 없는 현상

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

기초강좌

이다. 다시 말해 외부에서 걸어주는 자기장과 발생하는 변화가 선형적인 관계를 가지고 있다. 1960년대에 fluorides of cobalt에서 처음으로 실험을 통해서 발견되었으며 자성물질의 piezoelectric effect version이라고 이해하면 좋다.

- Piezoelectricity : 수정, 일부 세라믹, 뼈, DNA 및 다양한 단백질과 같은 생체 물질들에서 나타나는 현상으로 외부에서 기계적인 힘을 가했을 때 시편의 양면에 전하의 쏠림 현상이 나타나는 것을 말한다. 원래 그리스어로 piezo 혹은 piezein이 압력을 의미하므로 이는 직역하면 압력으로 인해서 생기는 전기현상이라는 뜻이다. 역방향의 현상도 가능하며 이를 inverse piezoelectric effect라고 부르는데 시편에 전기장을 가했을 때 기계적인 변형이 일어나는 것을 지칭한다. Piezomagnetism과 마찬가지로 걸어주는 전기장과 발생하는 변위 사이의 관계가 선형적인 관계를 가져서 전기장의 방향을 바꿔주면 발생하는 변위도 반대가 된다. 일상생활에서 쉽게 접할 수 있는 이 현상을 이용한 장치로는 자동차의 후방 감지 센서에 사용되는 초음파 변환기나 라이터나 휴대용 버너 등에 사용되는 스파크 발생용 장치가 있으며 첨단기술 쪽에서는 STM, AFM 등과 같은 고배율의 특수 현미경에 사용되는 scanning probe microscopy를 예로 들 수 있다.
- Electrostriction : 모든 부도체에서 나타나는 현상으로 외부에서 전기장을 가해주는 경우에 변형을 일으키는 현상을 말한다. 즉, 이들 부도체의 양쪽에 전기장을 가해주면 양쪽면에 서로 다른 극성의 전하가 쌓이게 되고 (여기까지는 piezoelectric effect와 같다.) 이들이 서로 잡아당기기 때문에 두께가 얇아지

게 되는 현상을 지칭하는 것이다. 걸어주는 전기장의 극성을 서로 바꾼다고 해도 변형의 극성이 바뀌지는 않는다. 즉, 두께가 두꺼워지는 일은 발생하지 않는다. Piezoelectric effect는 결국 특별한 부도체에서 나타나는 현상이며 electrostriction은 모든 부도체에서 나타나는 현상이라고 말할 수 있다. Piezoelectric effect와 달리 역방향의 현상, 즉 외부에서 힘을 가한다고 해서 전기장이 발생하는 현상은 일어나지 않는다. 여기서 'striction'이라는 말은 줄어든다는 뜻을 가지고 있는데 앞서 두께가 줄어드는 현상을 나타내고 있다.

- Magnetostriction : ferromagnetic 물질에서 나타나는 현상으로 외부에서 자기장을 걸어주면 기계적인 변형이 일어나는 현상을 말한다. Joule이라는 사람이 발견하여 Joule effect라는 이름으로 불리기도 한다. 많은 magnetostrictive 물질들은 자기장이 가해지면 그 크기가 늘어난다. 그렇다면 왜 크기가 줄어든다는 의미를 가진 -striction이라는 어미를 붙였을까? 이는 대표적인 magnetostrictive 물질인 nickel이 외부에서 자기장을 가했을 때 줄어드는 성질을 가지고 있으며 Joule이 이 현상을 발견했을 때 사용한 시편이 nickel이었기 때문에 추측된다. Electrostriction과 마찬가지로(piezomagnetism 및 piezoelectricity와 달리) 입력(자기장)과 출력(기계적 변형) 사이의 관계가 2차의 관계를 가지기 때문에 외부에서 걸어주는 자기장의 방향을 바꿔도 변형의 방향은 바뀌지 않는다. 역시 electrostriction과 마찬가지로 역방향 현상은 일어나지 않는다. 즉 외부에서 힘을 가한다고 해도 자기적인 상태가 변화하지는 않는다. Electrostriction이나 magnetostriction이나

역방향의 현상이 전혀 일어나지 않는 것은 아니다. 다만 해당 물질이 자기장(magnetostriction)이나 전기장(electrostriction)이 전혀 걸려있지 않은 초기 상태에서는 역방향 현상이 일어나지 않는다는 것을 의미한다. 만일 외부에서 적절한 수준의 자기장(electrostriction의 경우 전기장)을 걸어준 상태에서 외부에서 힘을 가하면 자기적 상태(혹은 전기적 상태)가 변화하게 된다. 이를 아래에서 그림을 이용해서 조금 더 자세하게 살펴보도록 하자.

그림 1의 (a) 및 (b)는 각각 입력과 출력이 선형적인 관계를 가지는 물질과 2차의 관계를 가지는 물질을 도식적으로 표현한 것이다. 위에서 언급한 물질들의 경우 입력(input)은 자기장 혹은 전기장이 될 것이고 출력(output)은 기계적인 변형이 될 것이다. 먼저 선형적인 관계를 가지는 (a)의 경우 앞서 살펴본 piezomagnetism과 piezoelectric effect와 같이 'piezo-' 라는 접두어가 붙은 물질들이 여기에 속하는데 이 물질들은 그림에서도 알 수 있지만 아무런 입력이 가해지지 않는 평소 상태(그림에서 O)에서 "+"의 입력을 가하면 "+"의

출력이 나오고 반대로 "-"의 입력을 가하면 "-"의 출력이 나오게 된다. 그리고 이들 물질들은 입력이 가해지지 않는 평소 상태에서도 역방향의 현상이 가능하게 된다. 이에 반해서 (b)에 보인 2차의 관계를 가지는 물질들은 앞에서 언급한 'striction' 이라는 접미사가 붙는 물질들로 electrostriction과 magnetostriction이 여기에 속한다. 이들 물질은 입력의 부호가 바뀌어도 출력의 부호에는 영향을 주지 않는다는 점에서 선형관계를 가지는 piezo류의 물질과 대별된다. 또 평소 상태 즉 $X=0$ 인 상태에서는 입력을 가해주어도 거의 출력의 변화가 일어나지 않는다. 다시 말해 $(dY/dX)_{X=0} = 0$ 인 관계를 가진다. 이러한 물질들을 가진기(actuator)로 이용할 때 양방향의 변화가 모두 일어나도록 하는 방법은 (b)에서 P로 표시된 지점과 같이 미리 어느 정도의 입력을 가해주고 이 지점을 동작의 새로운 원점으로 삼는 것이다. 이렇게 하면 입력의 크기가 커지면 출력도 커지고 입력이 작아지면 출력이 작아지는 선형적인 관계와 비슷한 입출력 관계를 동작점 부근에서 얻을 수 있게 된다(그림 1(b)에 표시된 접선과 비슷한 선형적 거동을 한다). 이때 미리 가

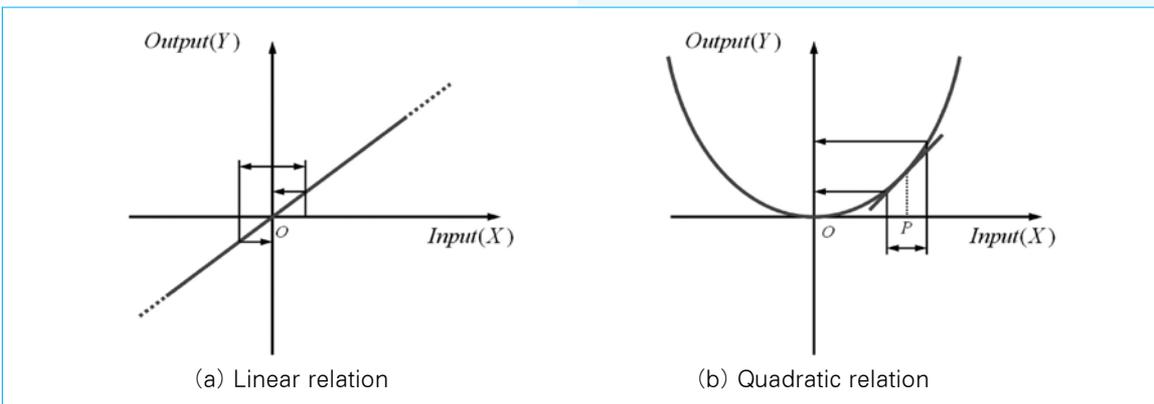


그림 1 Linear 및 quadratic 관계를 가지는 물질의 입력 및 출력 간의 관계

기초강좌

해주는 적절한 크기의 입력(그림 1(b)에서 P)을 지칭할 때 흔히 바이어스라는 단어를 사용한다. 예를 들어 magnetostrictive 물질에 바이어스 자기장을 미리 어느 정도 걸어주어 선형적인 관계를 가지는 물질과 비슷한 거동을 확보하는 것이다. 재미있는 것은 이런 관계는 역방향의 현상에서도 마찬가지로 2차의 관계를 가지는 물질은 그림 1의 (b)에서 원점 부근에서 역현상으로 사용하고자 하면 출력을 전혀 얻을 수 없게 된다. Magnetostriction을 예로 해서 설명하면 자기장을 전혀 걸어주지 않은 상태에서 외부에서 어떤 방향으로 힘을 가해도 자기적인 상태는 변화가 없게 된다. 하지만 외부에서 어느 정도의 자기장을 걸어준 상태에서 압축력 혹은 인장력을 가해주게 되면 그에 따라서 자기적인 상태가 그에 상응하는 부호를 가지고 변화하게 된다. 결국 가진기로 사용할 때나 센서로 사용할 때나 두 종류의 striction과 관련된 현상을 보이는 물질을 활용할 때는 바이어스를 만들어주는 것이 매우 중요하다.

이들 4가지 물질에서 한 가지 재미있는 점이 발견할 수 있는데 이 특징은 자기장과 전기장 사이의 관계에서 나타나는 상보적인 관계와 유사해서 검증되지 않은 사견에 불과하지만 이를 잠시 언급하고자 한다. 자기장과 전기장은 소위 전자기파(electromagnetic wave)를 구성하는 2가지 자연현상인데 이 둘은 비슷하면서도 매우 다른 특징을 보인다. 예를 들어 그 유명한 Maxwell의 전자기파 관련 식에서 알 수 있듯이 전기장의 시간에 따른 변화는 자기장을 만들어내고 자기장의 시간에 따른 변화는 전기장을 만들어낸다. 하지만 재미있는 것은 다음 식에서 보듯이 이들 관계가 완전하게 대칭적이지는 않다는 것이다(자기장의 curl에서는 일단 부호가 다르고 J_f 항이 추가된다).

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad \text{vs} \quad \nabla \times H = J_f + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1)$$

또한 시간에 따른 변화가 전혀 없는 정적인 상태를 가정하였을 때 전기장에 divergence를 취하면 전하밀도가 나오고 curl을 취하면 '0'이 됨에 비해서 자기장은 divergence를 취하면 '0'이 되고 curl을 취하면 전류밀도가 나오게 된다는 점도 비슷하면서 다른 측면이다. 이러한 전기장과 자기장의 상호 대별되는 특징과 연관이 있는지 없는지는 필자의 역량 밖의 범위여서 확인할 방법이 없으나 필자는 위에서 언급한 4가지 물질에서도 이와 비슷하다고 느껴지는 점을 발견하였다. 위에서 언급한 4가지 현상들 중에서 실제로 우리가 산업기술에 자주 응용하는 것은 2가지로 하나는 piezoelectric effect이고 다른 하나는 magnetostriction이다. 즉, 전기장을 이용하는 경우에는 선형적인 관계를 가지면서 절연체들 중에서 특정한 물질들에서만 발견되는 piezoelectric effect를 사용하고 자기장을 사용하는 것은 거의 대부분의 강자성 물질에서 발견되면서 2차의 관계를 가지는 magnetostriction을 주로 이용하는 것이다. 무엇인가 명확하게 설명할 수는 없지만 자연계가 가지는 일관된 오묘함이 느껴진다면 필자가 좀 오버하는 것일까?

Magnetostriction과 관련된 다른 현상들

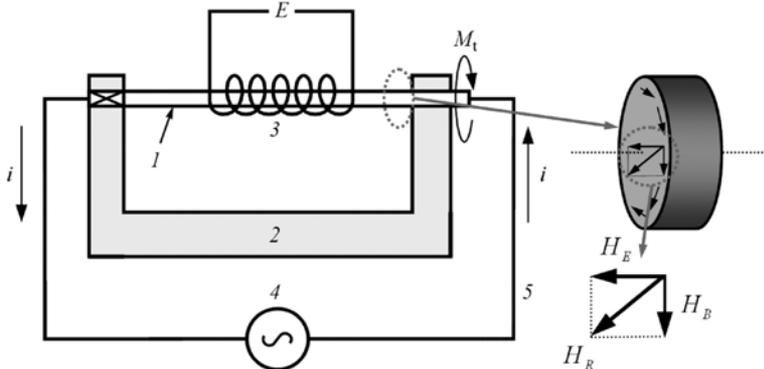
- Villari Effect : 앞서 Joule이 발견한 magnetostriction 현상의 역현상으로 바이어스 자기장을 걸어준 상태에서 외부에서 힘을 가하는 경우 대상 물질의 자기적인 상태가 변화하는 것을 말한다. 그 발견자 Villari의 이름을 따서 Villari effect라고 부른다.
- Matteucci effect : 토크 즉 비틀림을 가했을 때 나선형 방향으로 자기적인 상태가 변화

하는 현상을 나타낸다. 아래 설명하는 Wiedemann effect와 역방향의 현상이며 이를 발견한 사람의 이름을 따서 Matteucci effect라고 부른다.

- Wiedemann effect : 나선형 방향으로 자기장을 걸어주었을 때 비틀림 변형이 발생하는 현상을 나타낸다. 아래 설명하는 Matteucci effect와 역방향의 현상이며 이를 발견한 독일의 과학자의 이름을 따서 Wiedemann effect라고 부른다. Wiedemann effect와 Matteucci effect는 위의 설명만으로는 이해하기가 쉽지 않으므로 그림 2를 이용해서 설명을 해보자. Wiedemann effect란 그림 2와 같이 장치를 꾸미고 E 로 표시된 전원부에 전원을 인가하면 나선 방향의 자기장에 의해서 축에 비틀림 변형이 발생한다는 것을 의미한다. 나선 방향의 자기장이 발생하는 이유는 다음과 같다. 먼저 그림에서 4로 표시된 직류 전원에 의해서 i 라는 전류가 1번으로 표시된 축에

흐르게 되고 이는 축에 동심원 모양을 가지는 자기장 H_B 를 형성하게 된다. 여기에 E 로 표시된 코일에 전류가 흐르게 되면 이 코일에 의한 자기장 H_E 는 축 방향으로 형성되게 되며 앞서 이미 형성된 원주 방향의 자기장을 축 방향으로 약간 돌리게 되므로 나선 방향의 자기장 H_R 이 발생하게 되는 것이다.

- ΔE effect : Honda와 Terada에 의해서 알려진 현상으로 자기장을 가했을 때 탄성 계수 E 가 변화하는 현상을 말한다. Iron이나 nickel과 같은 일반적인 자성물질에서는 0.4~18% 정도가 관찰됨에 비해서 terfenol-D와 같은 대변형을 일으키는 자기변형 물질에서는 100%가 넘게 바뀐다는 보고도 있다.
- Magnetovolume effect : 자기장에 의해서 부피가 변화하는 현상을 말한다. Magnetostriction은 변형이 일어날 때는 부피가 일정하게 유지되므로 어느 한 쪽 방향으로 시편이 늘어난다면 Poisson ratio만큼의 비율로 다른 쪽의



1) Ferromagnetic rod; 2) Rod mounting unit; 3) Inductance coil;
4) Controlled power supply; 5) Closed circuit bearing current

그림 2 Apparatus for explaining the Wiedemann effect (Ref. 1)

기초강좌

치수가 줄어들게 된다는 점에서 이 현상과는 구별된다. 이 현상은 자성물질이 자기적 성질을 잃어버리는 온도인 curie 온도에서 가장 명확하게 관측된다.

- Nagaoka-Honda effect : 위의 magnetovolume effect의 역방향 현상으로 부피의 변화를 주었을 때 자기적 상태가 변화하는 것을 말한다.

Magnetostriction의 다른 이름들

Magnetostriction과 관련된 논문을 검색을 하다 보면 magnetostriction을 검색어로 사용해서는 발견되지 않는 논문이 있게 된다. 이는 관련 연구자들이 magnetomechanical effect라는 용어와 magnetoelastic effect라는 용어를 magnetostriction과 혼용해서 사용하되 아직 이 분야의 연구를 수행하는 모든 연구자들이 공유할 만한 정의가 없기 때문으로 보인다. 흔히 magnetomechanical effect라는 용어는 inverse magnetostriction과 같은 의미로 사용되는데 또 어떤 경우에는 magnetostriction 그 자체 의미로 사용되기도 한다.(Ref.2) Magnetoelastic effect 역시 inverse magnetostriction과 같은 의미로 사용되기도 하지만 때로는 앞서 언급한 자기적인 현상과 기계적인 현상이 연관되어 나타나는 모든 현상을 총칭

하기도 한다. 결국 해당 논문에서 구체적으로 이러한 단어들이 어떤 의미로 사용되었는지를 확인할 필요가 있으며 magnetostriction과 관련된 자료를 검색할 때도 위의 2가지 단어를 함께 검색해야만 비로써 완벽하게 자료조사를 마쳤다고 할 수 있다. 이와 같은 문제는 한국어에서도 발견되는데 magnetostriction을 지칭하는 용어로 '자왜(磁歪)현상' 과 '자기변형현상' 이라는 말이 혼용되고 있다. 자왜현상이라는 단어가 일본식 한자에서 비롯되었다는 이유로 최근에는 자기변형이라는 용어를 쓰려는 경향이 증가하고 있는데 어떤 식으로건 통일된 용어를 마련하여 연구자들이 보다 일관되게 연구를 수행할 수 있도록 했으면 하는 바람이 있다. 이어지는 연재에서 부터는 본격적으로 자기변형 물질에 대해서 알아보도록 하자. [KSNVE](#)

참고문헌

- (1) Koverkin, Y. B. and Gubanov, N. N., 2003, Engineering use of the Wiedemann Effect, Measurement Techniques, Vol. 46, No. 11.
- (2) Jiles, D. C., 1995, Theory of the Magneto-mechanical Effect, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 28, No. 8.