



Environmental Potentials

Power Quality For The Digital Age

자기의 양극성, 히스테리시스 및 철심손

An Environmental Potentials White Paper

자기의 양극성, 히스테리시스 및 철심손에 대하여

전기 도체에 전류가 흐르면 주위에 자장이 생긴다. 이 자장의 자력은 전류 방향의 직각 방향이다. 이 자계는 토크 회전력(torque force)으로 시각화 할 수 있다. 이 토크 힘과 중심까지의 거리는 지렛대 거리로 작용한다. 지렛대 거리와 토크 힘으로 쌍극 자력 모멘트(magnetic dipole moment)가 형성된다. 자석철, 비디오 테이프 등 모든 자성물질은 전자가 있기 때문에 자성을 가질 수 있다. 전자는 고유한 회전력이 있다. 이를 자전력(spin angular moment 또는 spin)이라 한다. 따라서 전자는 고유한 쌍극자성 자전력(spin magnetic dipole moment)을 가진다. 원자 안의 전자는 각각 쌍극자성 자전력에 더하여 궤도 회전력을 가진다. 따라서 원자 내의 전자는 고유한 쌍극자성 궤도공전력(orbital magnetic dipole moment)을 가진다. 그러므로 원자내의 전자는 궤도 쌍극자성 공전력과 자전 쌍극자성 자전력의 벡터 합성력을 가진다. 각각의 전자가 가지고 있는 이 벡터 합성력과 원자내 다른 전자가 동일하게 갖고 있는 합성력의 결과치 그리고 다른 원자들이 동일하게 가지고 있는 결과치의 총합으로 그 물질의 쌍극자력에 의한 자장이 형성되며 이것이 그 물질이 자성체가 되는 원리이다.

자성체는 세 종류가 있다: 반자성체(反磁性體), 상자성체(常磁性體), 강자성체(強磁性體)

1. 반자성체는 많은 일반 물질에서 보이는 바와 같이 자성이 없거나 약한 물질이다.
2. 상자성체는 원자의 전자가 가지고 있는 자전 및 공전 쌍극 자력이 벡터 합으로 원자의 쌍극 자력을 크게 한다. 외부 자장이 없으면 이 원자의 쌍극력은 방향이 무작위적이므로 그 물질의 자력 쌍극성은 0 이 된다. 그러나 이 물질의 물체가 어떤 외부 자장에 놓이면, 그에 따라 쌍극 자력이 정렬하게 되며 그 물체는 쌍극 자력을 가지게 된다.
3. 강자성체는 강한 영구자력을 가진다. 철, 코발트, 니켈, 가돌리늄, 디스프로슘 및 이들 원소의 합금들은 교환결합작용(exchange coupling)이라고 하는 양자물리효과로 인하여 강한 자성을 가진다. 교환결합 작용이란 한 원자의 전자의 자전력과 인접한 원소의 전자자전력 간의 작용으로서 그 결과로 원자간 충돌이 무작위적임에도 불구하고 원자의 쌍극 자력모멘트가 정렬을 하게 된다. 이 정렬로 인하여 그 물질은 영구적 강자성을 가지게 된다.

만일 이 강자성체가 큐리(Curie)온도라 하는 어떤 한계온도 이상으로 열을 받으면 교환결합 작용이 해제된다. 이렇게 되면 강자성체가 상자성체로 변하여 쌍극성이 외부 자장 영향을 받아 정열이 달라지고 열의 영향을 더 받게 된다.

요약하면 강자성체가 외부 자장에 놓이면 그 자장의 방향에 따라 강한 쌍극력을 보인다. 만일 자장이 고르지 않으면 강자성체는 자장이 약한 곳에서 강한 쪽으로 끌린다. 어느 도체나 그것이 시간가변자장에 놓이면 전위(voltage)가 생긴다. 이 전위는 회로의 인덕턴스 요소에 따라 전위차로 전류를 흐르게 한다. 인덕턴스의 단위는 헨리로 L 로 표시되며 회로도에서는 도선의 코일로 표시되는데 이는 인덕턴스가 도체가 자장에 연계되었을 때 생기는 것을 상기시킨다.

인덕터 단자간의 단위 전하당 일(work)인 전압강하는 다음 식으로 표현된다:

$$V = L di/dt$$

V : 볼트, L : 헨리, t : 초

여기서 유도전압이 주파수의 함수임을 곧 알 수 있다. 전류가 시간에 따라 변하기 때문이다. 또한 이 관계식으로부터 L 값이 일정하다면 di/dt 가 전압 발생의 촉진제임을 알 수 있다. 그러므로 주파수가 높아지면 유도전압이 증가한다. 전류는 단위 시간당 전하 이므로 di/dt 도 전압 발생 촉진제 이다. 이는 또 L 에 의하여 전압 즉 단위 전하당 일(에너지)에 비례한다. L 은 기계적 물체처럼 관성력을 가지며 전류 크기의 시간 변화에 저항한다. 따라서 유도 전압은 기계적 힘과 비교된다. 결국, 인덕터란 에너지를 자장 형태로 보관하는 장치이다.

자장이 철과 같은 매개물에 침잠하면 에너지 보관 능력이 증가한다. 보관용량의 크기를 자화율(permeability)이라 하며 μ 로 표시한다. 자화율은 자장(flux라고도 함)을 통과시키는 능력으로 표현할 수도 있다. 여기서 여러 가지 철심 재료 및 철손(core loss)등에 대하여 좀더 알기 위하여 복합 자화율(complex permeability) μ 의 개념을 살펴보기로 한다. μ_0 는 자유공간($4\pi \times 10^{-7}$)의 자화율이고, μ_r 은 자유공간이 아닌 곳의 자화율에 상대적 자화율이다. 철심 손실은 편의상 복합자화율의 일부로 가정한다.

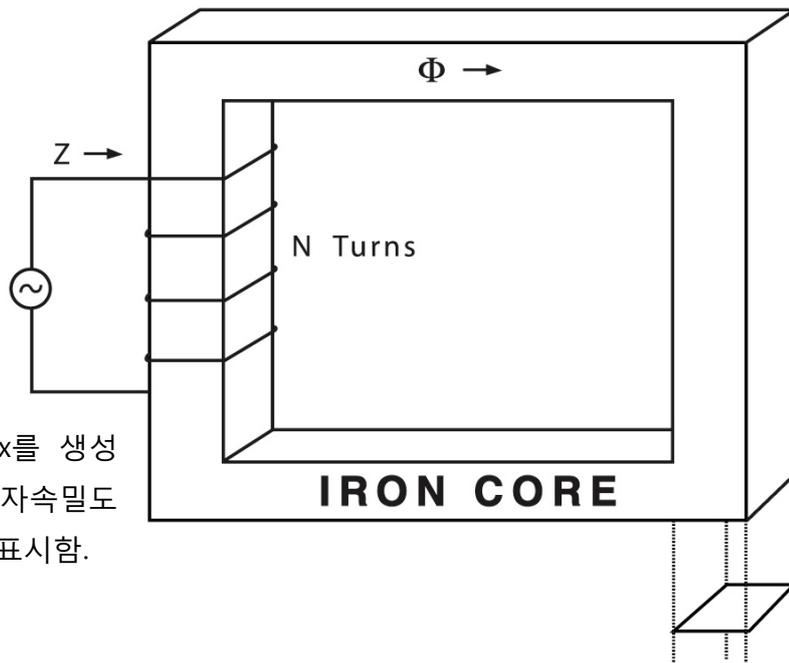
$$\mu^* = \mu_0 \mu R^* = \mu_0(\mu' - j\mu'')$$

이 관계식은 주어진 철심 재료의 손실 탄젠트를 정의한다. 여기서 μ^* 는 μ' 와 μ'' 의 벡터 합이다. 손실부분 즉 μ' 와 μ'' 간의 각도의 탄젠트 값, δ 는 μ'/μ'' 로 정의된다.

하기에서 보는 바와 같이 철심 코일에 교류 전류를 흘리면 전류 I 와 코일 감은 수 N 에 비례하는 자력 H 가 생긴다:

$$H = kNI$$

Ampere 법칙에서 $k=0.4\pi/l$



자화력은 철심에 자속 flux를 생성 시킴. 단면적당 자속을 자속밀도 (flux density)라 하고 B로 표시함.

그림1. 자속밀도

자속밀도 B와 자화력 H와의 관계가 철심 재료에 따른 자화커브 또는 포화커브로써 다음 그림과 같이 보여진다 :

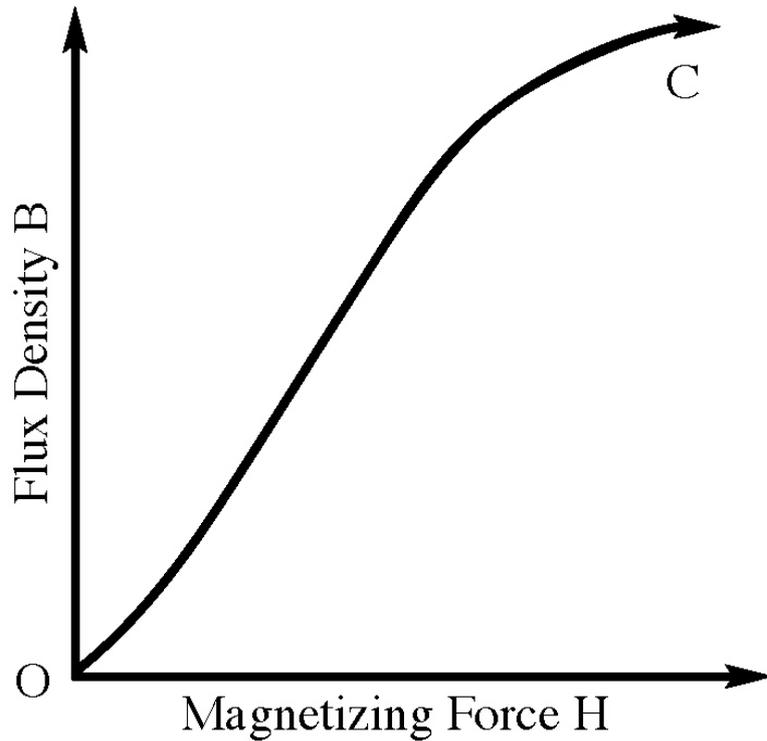


그림2. 자력을 없앤 재료를 자화할 때의 B, H 관계도

상기 커브의 각 지점에서의 기울기가 그 지점에서의 자화율이 된다. 따라서 자화율은 $\Delta B/\Delta H$ 이며 μ 로 표시한다. μ 는 복합적 숫자로서 상수가 아니고 비례하는 숫자도 아니다.

복합 자화율의 철심에 정현파 자장이 걸리면,

$$H = H_{\text{applied}} \cos \omega t,$$

H_{applied}: 주어진 자화력,

$B = \mu \cdot H$ 라고 하면,

$$B = \mu_0 H_{\text{applied}} (\mu' \cos \omega t + \mu'' \sin \omega t).$$

이 관계식은 한 타원을 그리는데 손실 성분인 μ' 와 μ'' 가 그 타원의 비만도를 표시한다.

B-H 커브는 포화과정을 잘 알게 해준다. H값이 어느 점을 지나면(위 그림에서 C

점) H값이 더 커져도 B값이 증가하지 않는다. 이 철심은 거의 포화된 상태이다. 이때 μ 는 0 이거나 아주 작은 상태이다. 더 자화될 여유가 없기 때문이다.

이는 철심이 포화가 되면 인덕턴스가 아주 작은 상태가 됨을 의미한다. 만일 철심에 걸린 자장이 커져서 철심이 포화가 되었다가 다음에 감소한다면 자속밀도 B는 감소할 것이지만 이 감소 속도는 앞서 자화 되었을 때보다 늦다. 따라서 H값이 0이 되더라도 아직 B값은 남아있게 되고 이 잔여 자속 B_r 만큼 철심은 아직 자화되어 있다.

B를 0으로 되게 하려면 부(“-“) 방향의 자력 $-H_c$ 가 강제로 주어져야 한다. H값이 “-“ 방향으로 증가되면 철심의 극성이 반대로 자화된다. “-“자화도 처음에는 잘 되지만 포화에 가까워지면 어려워진다. 이때도 $-H$ 값이 0이될 때 자속은 $-B_r$ 값 만큼 남아있게 되며 이를 0으로 되게 하려면 강제로 H를 “+“방향으로 주어야 한다. 자장이 증가함에 따라 철심은 원래의 극성으로 포화된다.

자화가 되었다가 반대 방향으로 될 때 H값보다 B값이 지연되어 자화 증가시 커브와 감소시 커브가 동일하지 않은 현상을 히스테리시스(Hysteresis)라고 한다.

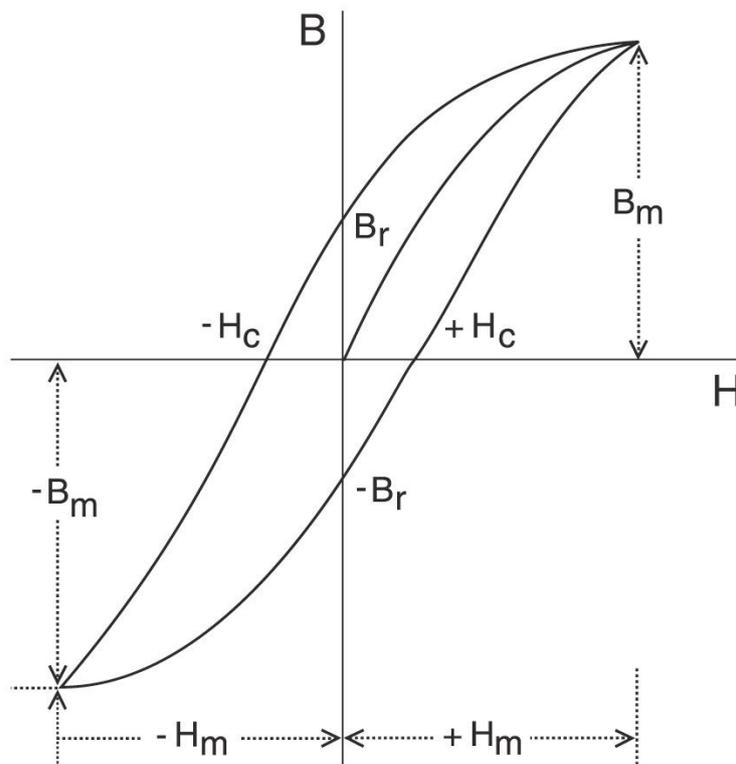


그림3. 히스테리시스 곡선

이 히스테리시스 곡선은 자화마찰저항의 일종으로 코아에서의 에너지 손실을 말한다. 이 커브는 일단 자화가 된 후에는 자화력 H가 주어져도 자속 B가 항상 늦게 생긴다는 것을 보여준다. 여기에 철심손 발생의 핵심이 있는 것이다. 또 이 커브는 재료의 자화 상태가 지금 주어지는 자화력 뿐만 아니라 이전의 자화상태에 따라 달라짐을 보여준다. 일종의 자화마찰로서 와류손실에 추가되는 손실이다. 히스테리시스 곡선에 둘러싸인 곳의 면적은 히스테리시스 손실의 크기를 알려준다. 이 손실은 철심에 걸리는 전압이 매 반 사이클 마다 방향이 반대가 되는 것에 따른 철심 내 에너지 소비 때문에 생기는 것이다. 에너지란 기본적으로 일(work)로서 어떤 힘으로 어떤 거리만큼 움직였느냐 하는 것인데, 마찬가지로 전압도 필요한 전위만큼 올리기 위하여 소요된 단위 전하당 일 이므로, B-H 커브에 관계된 강제력은 이 커브를 완성시키는데 들어간 일이다.

이 손실부분 즉 히스테리시스 손실 P_h 는 실험을 통하여 다음과 같은 것으로 알려져 있다:

$$P_h = 150.7 V_e f B_m^{1.6} \text{ watts}$$

V_e: 철심의 부피, f: 주파수, B_m: 최대 자속밀도

철심에서 자장의 방향이 바뀌어 자장이 철심을 관통할 때 마다 철심에 와류전압이 생기게 한다. 이는 철심 안에서 순환하는 와류전류를 생기게 한다. 또 철심을 감고 있는 동권선을 연결시키는 자력선 또한 철심을 통과하면서 철심에 전류 발생을 유도한다. 이들 와류전류는 철심에 열이 생기게 하며 손실전력의 일부이다.

맥스웰 공식에 따라 자속밀도의 시간 변화율은 반드시 전장(Electricity Field)을 수반한다.

$$\nabla \times E = -\delta B / \delta t$$

위 식을 적분 형태로 보면 자속에 시간변수가 있으면 언제나 전압강하가 생김을 보여준다.

$$\int E dl = - \frac{d\phi}{dt}$$

좌변은 한번 감은 것의 유도전압 크기이다. 이는 철심 주위의 전기자장의 적분치이다.

이 적분 형태는 다음에 보인 암페어 회로 전류법칙(Ampere's Circuital current law)의 수식과 유사하다.

$$\oint dl I = I_{enclosed}$$

만일 통로가 자속이 변하는 자화철심 안에 있고 철심이 도체이면, 전압이 전류를 발생시킬 것이다. 이 전류도 앞서 언급된 와류전류이다.

와류전류는 자속변화의 반대방향으로 흐르고자 한다. 즉 와류전류로 인한 자장 H는 적용 자장과 방향이 반대가 된다. 그러므로 철심의 내부를 적용 자장의 영향을 덜 받게 설득시킬 필요가 있다.

와류전류 손실은 다음과 같은 것으로 정하고 있다:

$$P_e = 1.65 V_e B^2 f^2 t^2 / r$$

t : 철심 라미네이션 두께, m r : 철심재료의 저항, ohm

변압기나 모터 등 어느 것이다 그 내부의 철심은 기본 주파수에서 작동하도록 설계된다. 이 기본 주파수에서도 철심의 재료나 형태에 따라서 히스테리시스 손실이 생긴다. 이는 B-H 커브에서 보는 바와 같이 자기 보존력 때문에 어쩔 수 없는 일이다.

그런데 회로에 고주파 노이즈가 첨가되면 각 주파수 주기마다 부차적으로 히스테리시스 손실이 생기므로 상당량의 에너지가 소비된다. 결과적으로 철심의 총 자

화력이 감소되어 철심 효율이 떨어지며 에너지가 열로 방산된다. 회로의 스위치 등은 더 많은 전류를 감당하지 않으면 안되게 된다.

히스테리시스 손실과 와류손실은 전압의 주파수가 커지면 그의 자승으로 증가됨을 분명히 알 수 있다.

히스테리시스 및 와류전류 장애를 최소화 함으로써 전기설비의 효율을 높일 필요가 있다.

전기설비의 최대 효율적 작동은 전원이 깨끗한 정현파의 전압과 전류로 공급될 때 얻어진다. 그러나 현실적으로는 그것이 전뢰나 정전기 등 자연적 원인으로부터이든, 모터, 변압기, 솔레노이드, 스위치 등 인공적인 원인으로부터이든, 전원이 깨끗하지 못한 것이 현실이다.

현존의 디지털 논리 제어시스템은 이진법 비트의 조합으로 되어있다. 불시의 충격적 노이즈는 이 비트를 왜곡시키거나 없어야 할 곳에 생기게 하여 이상 동작을 유발시킨다. 디지털 신호의 안전한 보호를 위하여 전원품질 상태를 확인하고 필요한 조치를 취하여야 한다.

전원품질 문제는 지속적으로 관리하여야 할 장기적 과제이다.