

전기 기본이론 (Basic Theories of Electrical Engineering) - II

2. 전기와 자기

연재목록

1. 전류
2. 전기와 자기
3. 임피던스
4. 발전기
5. 전동기
6. 변압기
7. 전력
8. 접지
9. 전기안전
10. 노이즈
11. 무정전 전원설비

전기공학의 본질은 전기(電氣)와 자기(磁氣)에서 시작된다. 영국의 마이클 패러데이(Michael Faraday)가 1831년에 패러데이의 전자유도법칙을 발견하기 전까지, 인류는 전기 또는 자기 각각에 대해서는 알고 있었으나 전기와 자기는 서로 아무런 관계가 없는 별개의 물리적 성질이라고만 알고 있었고, 전기와 자기가 상호 밀접한 관계를 가지고 있다는 사실을 알지 못했다. 패러데이가 전류가 흐르는 도체 주위에는 자기장이 형성되고, 코일과 자속이 쇄교하면 전압이 유기된다는 것을 실험적으로 밝혀냄으로써 인류는 비로소 전기와 자기는 상호 불가분의 관계가 있다는 것을 알게 되었고 패러데이의 전자유도법칙이 세상에 알려지게 되었다.

현대에 사용되는 거의 모든 발전기의 발전원리와 전동기가 회전하는 원리가 패러데이의 전자유도법칙에 근거를 두고 있다는 점을 생각하면, 패러데이는 참으로 위대한 업적을 이루었다고 해야 할 것이다.

힘과 일 및 전력의 단위

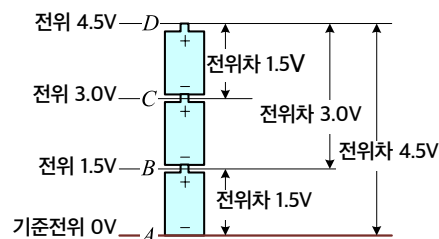
힘의 단위 뉴턴[N]은 일정한 속도[m/s]로 운동하는 질량 1[kg]의 물체에 1초[s] 동안 힘을 가해서 그 물체의 속도가 1[m/s]만큼 증가하게 하는 힘의 크기를 1[N]으로 정의한 것이다. 예를 들어 10[m/s]의 속도로 운동하는 질량 1[kg]의 물체를 1초 동안 밀어서 그 물체의 속도가 11[m/s]로 증가했다면, 속도가 1[s] 동안에 1[m/s] 증가했으니까 $1[m/s/s]=1[m/s^2]$ 의 **가속도**가 생긴 것이다. 따라서 힘의 단위 “1[N]은 질량 1[kg]의 물체에 $1[m/s^2]$ 의 가속도가 생기게 하는 힘의 크기”라고 말할 수도 있다. 단위는 1[kg]의 물체에 $1[m/s^2]$ 의 가속도가 생겼으니까 $1[kg] \times 1[m/s^2]=[kg \cdot m/s^2]$ 이 된다.

일의 단위 줄[J]은 1[N]의 힘으로 어떤 물체를 1[m]만큼 밀고 갔을 때 한 일의 양을 1[J]이라고 정의한 것이다. 따라서 줄[J]의 단위는 $[N \cdot m]=[kg \cdot m/s^2 \times m]=[kg \cdot m^2/s^2]$ 이 된다. 1[J]을 열에너지로 환산하면 0.24[cal]가 된다.

전력의 단위 [W]는 1초[s] 동안에 발전되거나 소비되는 에너지의 양 줄[J]로 정의한다. 즉, $1[W]=1[J/s]$ 이다. 예를 들어 어떤 발전기 출력이 1000[kW]라고 하면 이는 1000[kJ/s]로 1초 동안에 1000[kJ]의 일을 할 수 있는 능력을 갖춘 발전기라는 것을 의미한다.

기전력과 전위 및 전위차

기전력은 “전기를 일으키는 힘”이라는 뜻으로 영어로는 **e.m.f.** (Electro-Motive Force)라고 하는데 이는 “전자를 움직이게 해주는 힘”이라는 뜻이다. 즉, 도체 내부에 **전위차**를 만들고 전하가 이동해서 전류가 흐르게 하는 원동력을 **기전력**이라 한다. 전기회로에 전위차를 발생시키는 것을 **전압**을 가한다고 표현한다. 즉, 전압은 전기회로에서 어느 두 점 사이의 **전위차**를 의미한다. **전위**(電位)라는 말은 기준점의 전위를 0[V]로 두고 그 기준점과 임의의 점 사이의 전위차를 의미한다.



예를 들어 그림과 같이 1.5[V] 건전지 3개를 직렬로 접속하고 A점을 기준전위로 했을 때 B, C, D 점의 전위는 각각 1.5[V], 3[V], 4.5[V]가 되고, C-D점 사이의 전위차는 1.5[V], B-D점 사이의 전위차는 3[V]가 된다. 물이 수위(水位)가 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르는 것과 같이, 전류도 전위가 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐른다.

전압의 단위

도체에 전압을 가해서 전하가 이동하면 전하는 이동하면서 일을 한다. 이때 전하가 이동하면서 한 일의 양은 가해진 전압의 크기에 비례한다. 그래서 어떤 전압으로 1[C]의 전하를 이동하게 해서 그때 한 일의 양[J]으로 전압의 단위를 정의한다. 즉 **전압의 공학적 단위**는 1[V]=1[J/C] 이다.

예를 들어 어떤 저항선에 전압을 인가해서 1초 동안 1[C]의 전하가 저항을 통해서 이동했는데, 즉 1초 동안 저항에 1[A]의 전류가 흘렀는데, 그때 저항선에서의 발열량이 24[cal]=100[J]이었다면 그때 가해진 전압은 100[V]가 되는 것이다. 결국 같은 양의 전하가 이동해도, 즉, 같은 크기의 전류가 흘러도 전압의 크기에 따라 그 전류가 흐르면서 하는 일의 양은 달라진다.

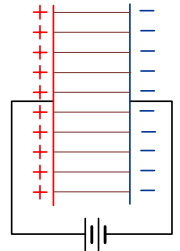
그러니까 예를 들어 10[Ω]의 저항에 10[V]의 전압을 가해도 1[A]가 흐르고, 100[Ω]의 저항에 100[V]의 전압을 가해도 1[A]가 흐르는 마찬가지이지만, 10[Ω]의 저항에 10[V]의 전압을 가해서 1[A]가 흐를 때 소비하는 전력은 $P=EI[W]=10 \times 1[W]$ 밖에 안되지만, 100[Ω]의 저항에 100[V]의 전압을 가해서 1[A]가 흐를 때는 $P=EI[W]=100 \times 1[W]$ 가 되는 것이다.

전속과 전속밀도

콘덴서에 그림과 같이 전압이 가해지면 (+)극판의 자유전자들이 전압에 의해서 (-)극판으로 이동한다. 즉, (+)극판에는 정공들이 생기고, (-)극판에는 (+)극판에서 끌려온 **전자**들이 있게 되는데, 이렇게 된 상태를 “콘덴서가 **충전**되었다”고 한다. 양쪽에 충전되어 있는 (+) (-)전하들은 **쿨롱의 법칙**에 의해서 다음 식으로 표시되는 힘으로 서로 끌어당긴다.

$$f = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

식에서 ϵ_0 는 진공의 유전율(8.855×10^{-12} [F/m]), Q_1, Q_2 는 양쪽 극판에 충전된 전하량[C], r 은 두 극판 사이의 거리[m]이다. 양쪽 극판에 충전된 전하는 크기는 같고 부호가 반대이므로 그림에서와 같이 서로 1:1로 잡아당긴다. 이렇게 서로 잡아당기는 가상의 선을 **전기력선**이라고 한다.



또 이들은 서로 1:1로 대응되어 있기 때문에 (1:1로 맺어져 있기 때문에)이들을 **전기력선속**이라고 하고 이를 간단히 **전속**이라고 한다. 충전되는 전하량은 전압에 비례한다. 높은 전압을 인가하면 충전되는 전하량이 많아짐과 동시에 전속도 많아진다. **전속밀도**는 두 극판 사이의 단위면적을 통과하는 전속이 몇 [C] 인가를 나타내는 것으로 단위는 [C/m²]를 사용한다.

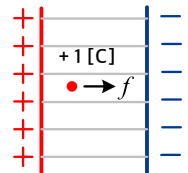
전계의 세기

전기력선이 존재하는 공간을 **전기장**(Electric Field) 또는 **전계**라고 한다. 전계 내에 그림과 같이 (+) **단위전하**를 두면 이 전하는 쿨롱의 힘에 의해 (-)극 방향으로 끌려가려는 힘을 받게 된다. 전계의 세기는 이때 단위전하에 가해지는 힘의 크기로 정의한다. 즉 **전계의 세기**는 [N/C]의 단위로 표시된다.

전계의 세기는 가해진 전압의 크기에 의해서만 결정되는 것이 아니라, 전극 간의 거리에 반비례한다. 전계의 단위 [N/C]은 다음과 같이 [V/m]로 환산할 수 있다

$$E = \left[\frac{N}{C} \right] = \left[\frac{N \cdot m}{C \cdot m} \right] = \left[\frac{J}{C \cdot m} \right] = \left[\frac{V}{m} \right]$$

즉, 전계의 세기는 [N/C] 또는 [V/m] 두 가지를 모두 사용할 수 있는데 일반적으로는 [V/m]을 사용한다.

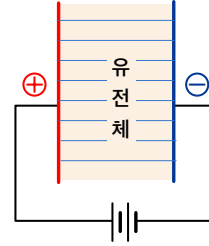


유전율

같은 크기의 전계가 가해지고 있어도, 전극 사이에 있는 절연체(유전체)의 종류에 따라 통과하는 전속의 양이 달라지게 되는데, 이와 같이 유전체가 전속을 통과시키는 정도를 표시하기 위해서 사용되는 것이 **유전율**이다. 유전율은 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_s$ 를 사용하는데 ϵ_0 는 진공(공기)의 유전율로 $8.854 \times 10^{-12} [F/m]$ 이고, ϵ_s 는 **비유전율**로 다른 물질의 유전율이 진공 또는 공기의 유전율의 몇 배가 되는가 하는 정도를 나타내는 상수이다. 즉, 유전체 속을 통과하는 전속밀도는 전계의 세기와 유전율에 비례해서 다음과 같이 표시된다.

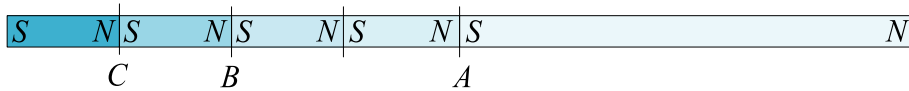
$$D = \epsilon E [C/m^2]$$

전계의 세기가 크다는 것은 **전속밀도**가 크다는 것을 의미한다.



자화현상

긴 막대자석을 A점에서 자르면 N극 또는 S극만 남는 것이 아니라 N-S극을 가진 두 개의 자석이 된다

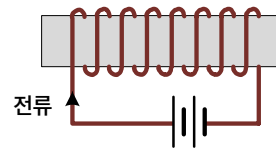
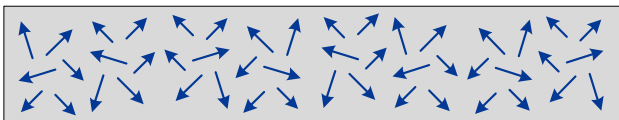
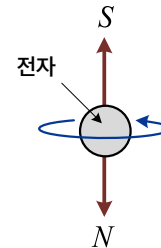


B의 위치에서 또 잘라도, C의 위치에서 또 잘라도 모두 N-S극을 가진 두 개의 자석이 된다. 이렇게 무한히 자르면 최후에는 원자가 남게 되는데 Niels Bohr의 원자모형에 의하면 원자는 원자핵과 그 주위를 도는 전자로 구성되어 있다. 전자는 원자핵 주위를 도는 것과 동시에 자신이 자전(Spin)하는데 양자역학에 의하면 전자가 Spin 하면 옆의 그림과 같이 자계가 형성된다고 한다. 이는 마치 지구가 자전하면서 북쪽에 S극, 남쪽에 N극의 **지자기**를 만드는 것과 유사하다.

나침반의 N극은 지자기의 S극에 끌려 북쪽을 향하고 반대로 S극은 남쪽을 향한다.

철의 **원자번호**는 26이다. 원자번호가 26이라는 말은 원자 한 개당 26개의 전자를 가지고 있다는 것을 의미한다. 철의 원자량은 55.847g/mol이고, 1[mol]에는 아보가드로의 수 6.022×10^{23} 개의 원자가 있으므로 철 55.847g 속에는 $6.022 \times 10^{23} \times 26 = 1.57 \times 10^{25}$ 개의 전자가 있는데 이들이 모두 미소자석이다.

그렇다면 모든 물질은 원자로 이루어져 있고, 원자 속에는 모두 전자가 있으므로 모든 물질은 자석이 되어야 할 것 아닌가? 하는 생각을 할 수 있다. 연철막대 속에는 수많은 미소자석이 있지만 이들의 방향이 다음 그림과 같이 뒤죽박죽이어서 그들의 벡터 합은 0이 되어 자성을 띠지 못한다.



그러나 오른쪽 그림과 같이 코일을 감고 전압을 인가해서 전류를 흘려주면 전류가 만드는 자기장에 의해서 미소자석들이 한쪽 방향으로 정렬해서 전자석이 된다. 하나의 원자 내에 있는 모든 전자의 자기방향(N-S 방향)이 한쪽 방향으로 정렬되면 그 원자가 하나의 미소자석이 되었다고 할 수 있다.

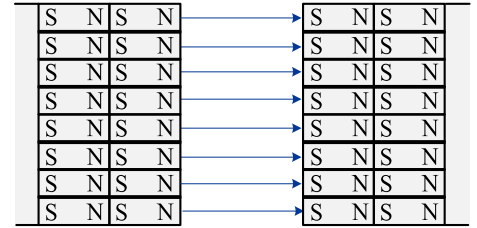
철(Fe), 코발트(Co), 니켈(Ni) 등은 자계를 가해 줌으로써 쉽게 전자석이 되어 개개의 원자가 자석과 같은 역할을 한다. 이와 같이 외부 자기장에 의해 전자들이 일정한 방향으로 정렬되는 것을 **자화**라고 하고, 이런 물질을 **강자성체**라고 한다.

반면에 알루미늄(Al)이나 구리(Cu), 플라스틱 등의 전자들은 “고집이 세어서” 외부에서 아무리 강한 자기장을 걸어 주어도 전자들이 한 방향으로 정렬하지 않아서 자석이 되지 못하는데 이런 물질을 **비자성체**라고 한다.

기자력과 자속

기자력은 자기장을 만드는 힘을 말한다. 연철심에 코일을 감아서 전자석을 만들 때 자기장을 세게 하는 방법은 코일에 흐르는 전류 [A]를 크게 하거나, 코일의 권회수[Turn]을 많게 하면 된다. 그래서 기자력의 단위는 [AT: Ampere-Turn]으로 표시된다.

말굽자석의 N-S극을 그림과 같이 마주보게 하면 자극 내부에서 양쪽의 미소 자석들은 서로 1:1로 잡아당긴다. 이와 같이 잡아당기는 가상의 선을 **자기력 선**이라고 하는데 이들은 서로 1:1로 맺어져 있기 때문에 맺어진다. 의미의 속(束)자를 붙여서 **자기력선속** 또는 간단히 **자속**이라고 한다.

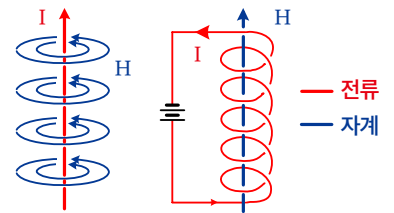


암페어의 오른 나사 법칙

암페어의 오른 나사법칙은 도체에 전류가 흐를 때 그 전류가 만드는 **자계의 방향**을 정의한 것이다.

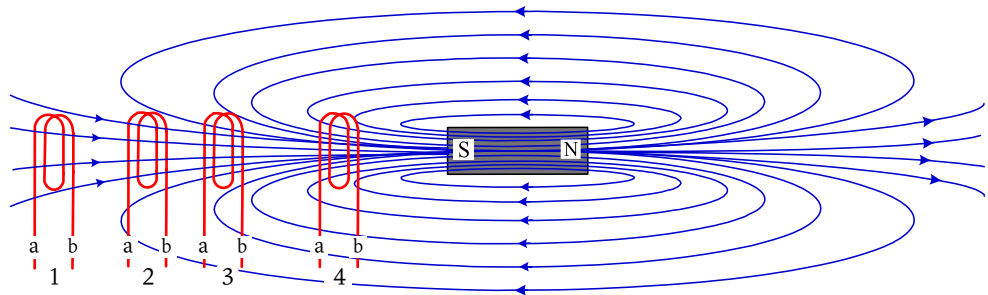
그림과 같이 무한장 직선전류에 화살표 방향으로 전류가 흐르면, 전류방향을 엄지 손가락으로 방향으로 했을 때 자계는 나머지 4손가락의 방향으로 도체 주위에 환상으로 형성된다.

반대로 오른쪽 그림과 같이 코일(솔레노이드)에 오른 손의 4손가락 방향으로 전류가 흐르면 엄지손가락 방향으로 자계가 형성되는데 이것이 **암페어의 오른나사 법칙**이다.



코일과 자속의 쇄교

막대자석의 주위에는 다음 그림의 화살표 방향으로 자계(자속)가 형성된다. 코일이 자속과 **쇄교**한다는 것은 코일을 관통하는 자속이 시간에 따라 변화한다는 것을 의미한다. 즉, 코일을 관통하는 **자속의 시간에 대한 변화율**이 0이 아니면, 즉, $d\phi/dt \neq 0$ 이 되면 코일은 자속과 쇄교하는 것이다.



그림에서 1번 위치에 있는 코일을 통과하는 자속은 적고, 4번 위치의 코일을 관통하는 자속은 많다. 코일이 그림의 어느 하나의 위치에 정지해 있으면 코일을 관통하는 자속의 양은 변하지 않으니까 코일을 관통하는 자속의 시간에 대한 변화율 $d\phi/dt = 0$ 이 되어 코일과 자속 사이의 자속쇄교는 없다.

그러나 코일이 1→2→3→4→3→2→1의 위치로 이동하면 코일을 관통하는 자속의 양이 많아졌다 적어졌다 하면서 시간에 따라 변화하니까 자속의 시간에 대한 변화율이 0이 아니어서, 즉, $d\phi/dt \neq 0$ 이 되어 코일과 자속이 쇄교하고 코일에는 전압이 유기된다.

질량을 가진 물체는 운동하는 **속도를 일정하게 유지하려는 관성**을 가지고 있다. 이에 비해 **인덕턴스**를 가진 코일은 자신을 관통하는 자속의 양을 일정하게 유지하려는 관성을 가지고 있다.

앞의 그림에서 코일이 4→3→2→1 방향으로 이동할 때 코일을 관통하는 자속은 감소해간다. 이때 코일은 자신이 자속을 만들어서 감소해 가는 자속을 보충하기 위해 전압을 유기하고 이 전압에 의해 코일의 a→b 방향으로 전류가 흐르게 해서 암페어의 오른 나사법칙에 따라 막대자석의 자속 방향으로 자속을 만들어서 감소해가는 자속을 보충한다.

반대로 코일이 1→2→3→4 방향으로 이동할 때는 코일을 관통하는 자속은 증가해 간다. 이때 코일은 자신이 막대자석의 자속 방향과 반대방향의 자속을 만들어서 증가해 가는 자속을 상쇄하기 위해 전압을 유기하고 이 전압에 의해 코일의 b→a 방향으로 전류가 흐르게 해서 암페어의 오른 나사법칙에 따라 막대자석 자속의 반대방향으로 자속을 만든다.

물론 이때 코일의 a-b 점이 단락되어 있어야 전류가 흘러서 코일이(인덕턴스가) 원하는 대로 자속을 일정하게 유지할 수 있다. 그러나 a-b 점이 개방되어 있어도 전압은 유기된다.

1831년에 영국의 **Faraday**는 수많은 실험을 통해서 코일에 유기되는 전압은 자속의 시간에 대한 변화율 $d\phi/dt$ 와 코일의 권회수 N 에 비례하고, 코일에 전류가 흐르면 유기되는 전압의 크기는 전류의 시간에 대한 변화율 di/dt 와 코일의 인덕턴스 L [H (헨리)]에 비례한다는 것을 발견하였다. 패러데이의 전자유도법칙은 다음식으로 표시된다.

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$

식에서 N 은 코일의 권회수, L 은 코일의 인덕턴스, $d\phi/dt$ 는 자속의 시간에 대한 변화율, di/dt 는 코일에 흐르는 전류의 시간에 대한 변화율이다. (-)부호가 붙은 것은 코일이 “청개구리”처럼 자신을 관통하는 자속이 증가할 때는 그 자속이 감소하는 방향으로, 반대로 감소할 때는 증가하는 방향으로 전류가 흐르도록 전압을 유기한다는 의미인데, 이를 따로 **렌츠의 법칙**이라고 한다.

전자유도법칙의 식에서 양변을 적분하면

$$-N \frac{d\phi}{dt} = -L \frac{di}{dt} \rightarrow N \frac{d\phi}{dt} = L \frac{di}{dt} \rightarrow N\phi = LI \rightarrow L = \frac{N\phi}{I}$$

가 되므로 인덕턴스는 코일에 흐르는 단위 전류에 의해 만들어지는 자속의 양으로 정의된다. 즉, 인덕턴스의 공학적 단위는 다음과 같이 표시된다.

$$L[H] = \frac{\phi[Wb]}{I[A]}$$

자속의 단위와 자속밀도

자속의 단위 1[Wb: Weber]는 그림과 같이 1[Turn]의 코일에 어떤 양의 자속이 관통하고 있는 상태에서, 이 자속을 1초 동안에 일정한 비율로 0까지 감소시킬 때 패러데이의 전자유도법칙에 의해서 그 코일에 1[V]의 전압이 유기될 때, 자속을 감소시키기 전에 원래 코일을 관통하고 있던 자속의 양으로 정의된 것이다.

단위면적 1[m²]당 몇 [Wb]의 자속이 통과하는가 하는 정도를 **자속밀도**라고 하고

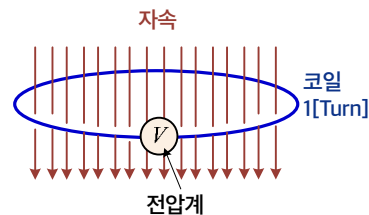
[Wb/m²]의 단위를 사용하는데 이를 1[Tesla] 라고도 하고, 또 이의 1/10000을 1[Gauss]라고 한다.

$$1[\text{Tesla}] = 1 [\text{Wb}/\text{m}^2] = 10^4 [\text{Gauss}]$$

A[m²]의 면적에 ϕ [Wb]의 자속이 지나간다면 자속밀도는

$$B = \frac{\phi}{A} [\text{Wb}/\text{m}^2] \quad \text{이다.}$$

자속밀도의 단위로 [Tesla] 나 [Wb/m²] 또는 [Gauss]는 너무 큰 단위이기 때문에 일반적으로는 마이크로 테슬라 [$\mu\text{Tesla} = 10^{-6} \text{Tesla}$] 또는 밀리 가우스[m Gauss= 10^{-3}Gauss]가 많이 사용된다.



자계의 세기

동일한 기자력을 가진 자석이라도 N-S극 사이의 거리가 멀어지면 작용하는 힘이 작아지고, 가까워지면 커진다. 즉 작용하는 힘의 크기는 거리에 반비례한다. 자계의 세기는 자계 내에 1[Wb]의 **점자하**를 두었을 때 여기에 얼마만큼의 힘[N: Newton]이 작용하는가로 정의한다. 즉 자계의 세기는

$$H = \left[\frac{N}{Wb} \right]$$

기자력[AT]은 그 기자력이 1[Wb]의 자극에 할 수 있는 일의 양으로 정의한다. 즉

$$[AT] = \left[\frac{J}{Wb} \right]$$

자계의 세기 $H=[N/Wb]$ 의 분모분자에 [m]을 곱해서 변형하면,

$$\left[\frac{N}{Wb} \right] = \left[\frac{N \cdot m}{Wb \cdot m} \right] = \left[\frac{J}{Wb \cdot m} \right] = \left[\frac{AT}{m} \right]$$

결국 자계의 단위는 [N/Wb]와 [AT/m] 두 가지가 되는데, 실용적으로는 [AT/m]가 많이 사용된다.

투자율

자석의 N-S 극이 서로 같이 마주보고 있을 때는 **자속**이 N극으로부터 나와서 S극으로 들어간다고 정의한다. 자계가 강할수록 더 많은 자속이 N극에서 S극으로 간다. 자계의 세기가 강하다는 말은 결국 두 자극 사이의 **자속밀도**가 크다는 것을 의미한다.

자계 [H]의 세기가 동일해도 두 자극 사이에 채워져 있는 물질에 따라서 N극에서 S극으로 가는 자속이 많아질 수도 있고 적어질 수도 있다. 이때 두 자극 사이에 채워진 물질이 자속을 얼마나 잘 통과시키는지 하는 정도를 나타내는 것이 **투자율**이고 기호로는 [μ (뮤)]를 사용한다. 따라서 자속밀도의 크기는 자계의 세기에만 비례하는 것이 아니라, 자속이 통과하는 **자로**(磁路)물질의 투자율에도 비례한다. 즉

$$\text{자속밀도 } B = \mu H = \mu_0 \mu_s H \text{ [Wb/m}^2\text{]}$$

이 식에서 μ_0 는 진공 또는 공기의 투자율 $4\pi \times 10^{-7}$ [H/m] 이고, μ_s 는 다른 물질의 투자율이 진공의 투자율의 몇 배가 되는가 하는 배수이다. 

