

Chapter 9

자성체

9.4 자기 차폐

- 자기 차폐(magnetic shielding) : 어떤 물체를 투자율이 높은 강자성체로 둘러싸면 외부 자계의 영향을 어느 정도 줄일 수 있다. 이와 같이 투자율이 큰 강자성체를 사용하여 외부자계의 영향을 작게 하는 자기적인 차단을 자기 차폐라 함

- 정전 차폐와 자기 차폐의 비교

- 정전 차폐 : 완전차폐

도체를 접지하여 외부 전기장의 영향을 완전차폐 가능

- 자기 차폐 : 불완전 차폐

자기에서는 투자율이 ∞ 인 자성체가 존재하지 않기 때문에 완전히 차단하는 것은 불가능하다. 따라서 자기 차폐는 비투자율이 큰 자성체인 중공의 철구를 겹겹이 포위하여 감싸놓으면 효과적으로 줄일 수 있음

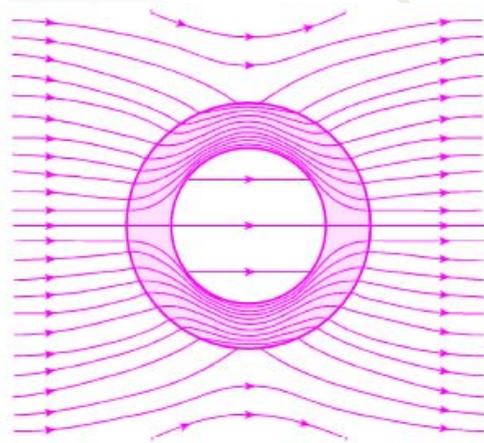


그림 9.6 ▶ 자기 차폐

TIP 정전차폐와 자기차폐 차이점

정전차폐 : 외부전기 완전 차단 가능

자기차폐 : 외부자기 완전 차단 불가능

9.5 자성체의 경계조건

정전계의 기본식

$$\oint_c E \cdot dl = 0, \quad \text{rot } E = 0, \quad \oint_S D \cdot dS = 0, \quad \text{div } D = 0 \quad (9.20)$$

정자계의 기본식

$$\oint_c H \cdot dl = 0, \quad \text{rot } H = i, \quad \oint_S B \cdot dS = 0, \quad \text{div } B = 0 \quad (9.21)$$

● 자성체의 경계조건

(1) 자속밀도는 경계면에서 법선성분이 같다. ($B_{1n} = B_{2n}$)

$$B_1 \cos\theta_1 = B_2 \cos\theta_2 \quad (B_1 = \mu_1 H_1, \quad B_2 = \mu_2 H_2)$$

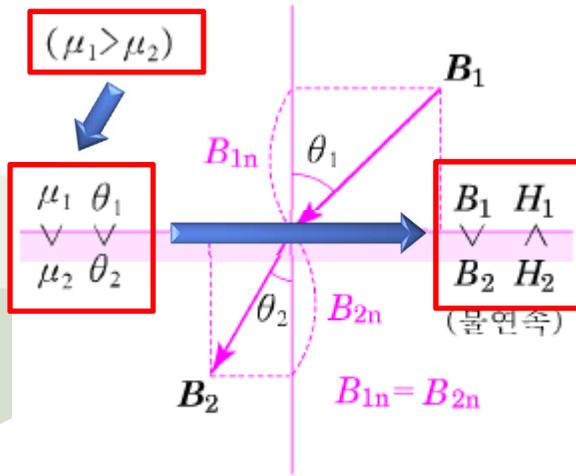
(2) 자계의 세기는 경계면에서 접선성분이 같다. ($H_{1t} = H_{2t}$)

$$H_1 \sin\theta_1 = H_2 \sin\theta_2$$

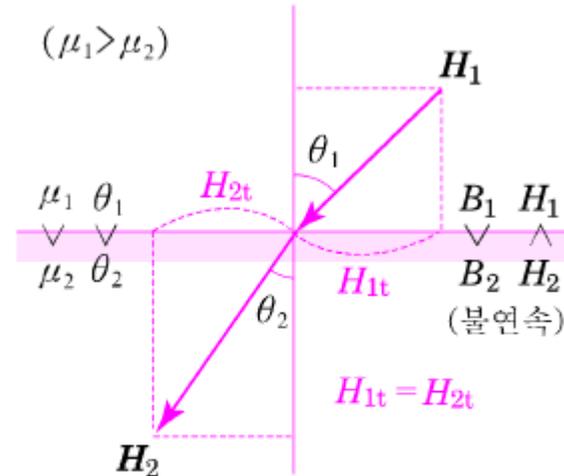
(3) 굴절의 법칙

$$\frac{\tan\theta_1}{\tan\theta_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}$$

9.5 자성체의 경계조건



(a) 자속의 굴절



(b) 자기력선의 굴절

그림 9.7 ▶ 경계면에서의 굴절 관계 (조건 : $\mu_1 > \mu_2$)

※ 굴절의 법칙에 의해서

자속은 투자율이 높은 쪽으로 모이려는 성질이 있다.

$$B_1 \cos \theta_1 = B_2 \cos \theta_2 \quad (B_1 = \mu_1 H_1, \quad B_2 = \mu_2 H_2)$$

$$H_1 \sin \theta_1 = H_2 \sin \theta_2$$

9.6 자계 에너지

- 자계에너지 밀도

$$w_m = \frac{1}{2}BH = \frac{1}{2}\mu H^2 = \frac{B^2}{2\mu} \text{ [J/m}^3\text{]}$$

- 정전계와 정자계의 대응

표 9.3 ▶ 정전계와 정자계의 대응

구 분	대응 관계	공 식
정 전 계	정전에너지 밀도	$w_e = \frac{1}{2}DE = \frac{1}{2}\epsilon E^2 = \frac{D^2}{2\epsilon} \text{ [J/m}^3\text{]}$
	정전응력	$f = \frac{1}{2}DE = \frac{1}{2}\epsilon E^2 = \frac{D^2}{2\epsilon} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad \therefore F = fS \text{ [N]}$
정 자 계	자계에너지 밀도	$w_m = \frac{1}{2}BH = \frac{1}{2}\mu H^2 = \frac{B^2}{2\mu} \text{ [J/m}^3\text{]}$
	흡인력	$f = \frac{1}{2}BH = \frac{1}{2}\mu H^2 = \frac{B^2}{2\mu} \text{ [N/m}^2\text{]}$ $\therefore F = fS \text{ [N]} \quad : \text{공극 1개 (면적 } S)$ $\therefore F = 2fS \text{ [N]} \quad : \text{공극 2개 (면적 } 2S)$

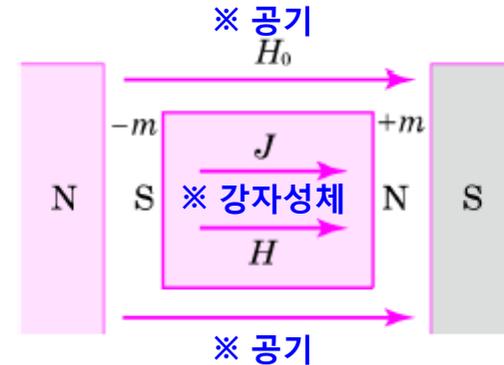
9.7 강자성체의 자화

- 상자성체 : B와 H의 선형성
※ 공기포함

$$B = \mu H \text{ (투자율 일정)}$$

- 강자성체 : B와 H의 비선형성(철, 니켈, 코발트)

$$B = \mu H \text{ (투자율 변화) ※ 외부온도}$$



9.7.1 자화곡선

- 자화곡선(또는 B-H 곡선)
- 자기포화 : 외부 자계 H가 어느 한계값 이상으로 증가시키면 자화의 세기 J는 더 이상 증가하지 않고 일정한 값으로 포화하는 현상
- 자속밀도 B는 자화의 세기 J보다 약간 큰 값을 갖게 됨

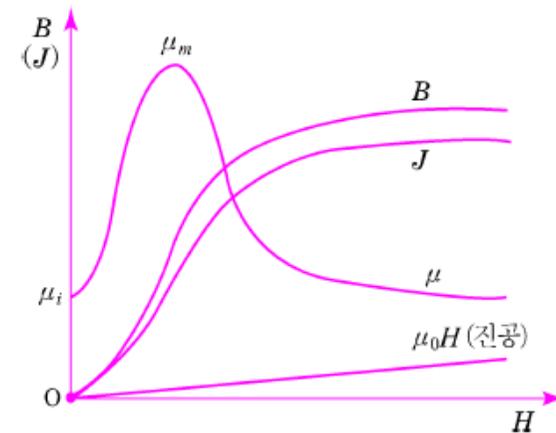


그림 9.9 ▶ 자화곡선

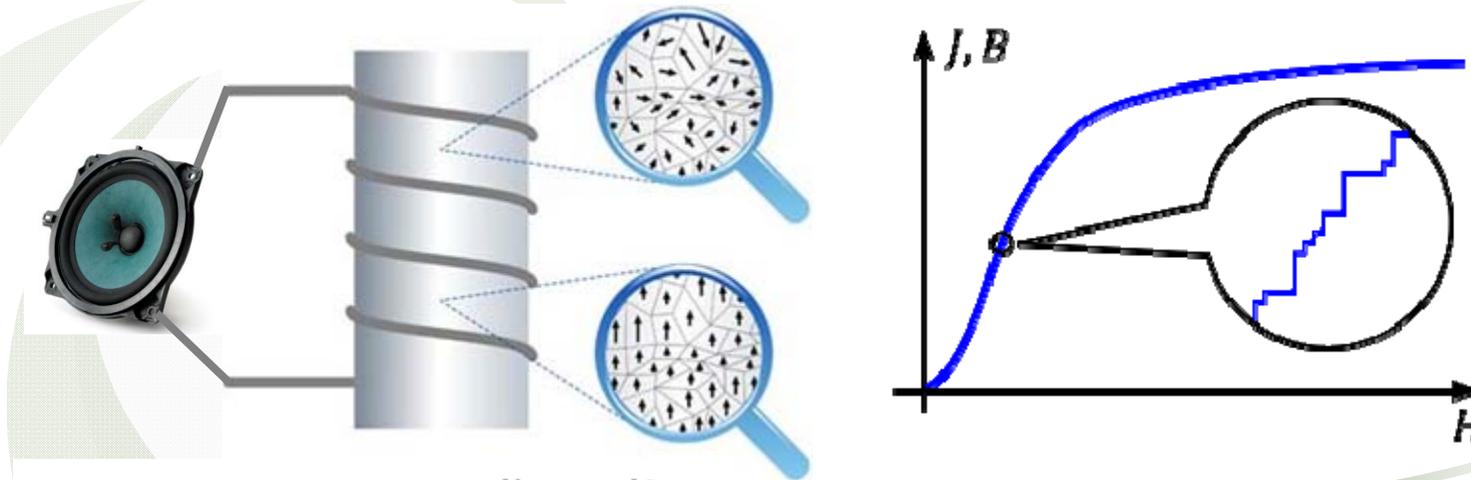
- 바크하우젠 효과 : B-H 곡선을 관찰하면 자속밀도는 매끈한 곡선이 아니고 불연속적인 계단상으로 변화하고 있음을 알 수 있다. 이것은 자구가 어떤 순간에 급격히 회전하기 때문이며, 이 현상을 바크하우젠 효과라 함(그림 9.10 확대도 참고)

9.7 강자성체의 자화

9.7.1 바크하우젠 효과



- 바크하우젠 효과 [Barkhausen effect]
 - 강자성체(強磁性體)를 자기화(磁氣化)할 때, 그 둘레에 감은 코일에 잡음전압이 발생하여 이것을 증폭하면 파동음(波動音)과 같은 잡음이 들리는 현상.
 - 강자성체의 자기화가 외부자기장의 증가에 따라 연속적으로 이루어지지 않고 불연속적으로 자속(磁束)이 변화하여 유도전압이 발생하기 때문



$$Emf(\text{Electromotive force})[V] = \frac{d\lambda}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

9.7 강자성체의 자화

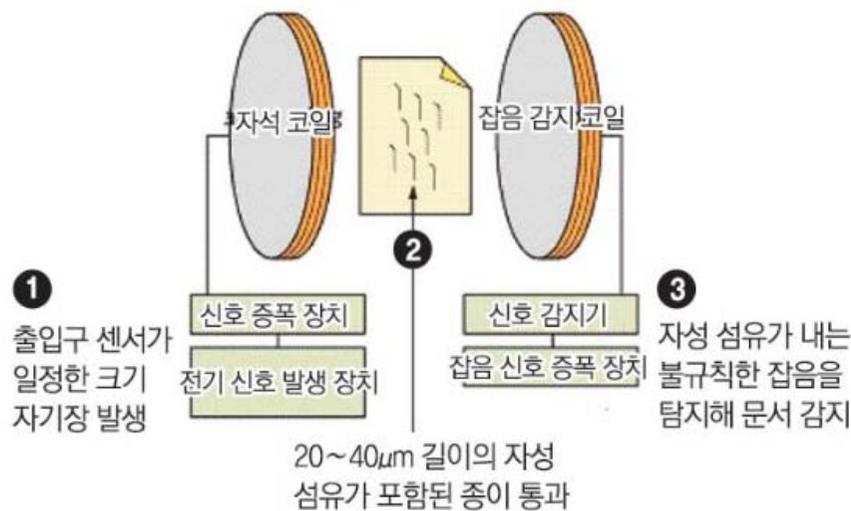
바크하우젠 효과의 응용

● 후지제록스

※ 60년대 전자복사기의 등장

- 복사기, 팩스, 프린터 등 전통적 사무기기에 활용된 기술은 공통적으로 미래 지향적이지 못하다' 는 평가로 인해 고민에 빠짐.

→ 기초 과학과 디지털 기술을 결합한 디지로그기술로 문서 혁명이 진행 中



< 시큐리티 페이퍼 >

자성(磁性) 물질을 머리카락 굵기보다 훨씬 작은 수십 μ m(마이크로미터·1 μ m는 100만분의 1m)로 잘라 종이에 섞는 방법으로 기술유출을 방지

자성물질에 발생하는 일종의 '잡음'을 읽어 들이는 방식으로 자성물질에서 일어나는 불규칙한 자기 현상인 바크하우젠 효과를 이용한 것

9.7 강자성체의 자화

9.7.2 히스테리시스 곡선 ★

● **히스테리시스 곡선(hysteresis loop)** : [자기이력 곡선]

: 자화되지 않은 강자성체에 외부자계 H를 다음과 같이 변화하였을 때, 자속밀도 B는 그림 9.10에서와 같이 반복되는 환선을 나타내는 곡선

- ① **잔류자기 B_r** : 외부에서 가한 자계의 세기를 0으로 해도 자성체에 남는 자속밀도
- ② **보자력 H_c** : 자화된 자성체 내부의 B를 0으로 하기 위하여 외부에서 자화와 반대방향으로 가하는 자계의 세기
- ③ **히스테리시스 손** : 히스테리시스 곡선을 다시 일주시켜도 항상 처음과 동일하기 때문에 히스테리시스의 면적에 해당하는 에너지는 열로 소비되는 손실

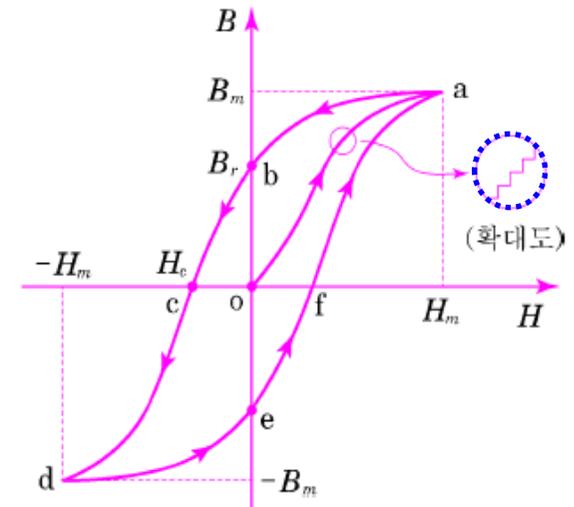


그림 9.10 ▶ 히스테리시스 곡선

$$\begin{aligned}
 w_m &= \oint_{abcdefa} H \cdot dB = \int_a^b H \cdot dB + \int_b^c H \cdot dB + \int_c^d H \cdot dB + \int_d^e H \cdot dB + \int_e^f H \cdot dB + \int_f^a H \cdot dB \\
 &= \text{히스테리시스 곡선 내의 면적}
 \end{aligned}$$

9.7 강자성체의 자화

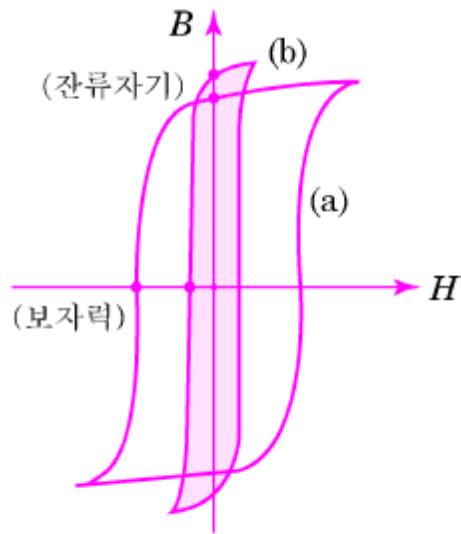
- 강자성체

① 영구자석 재료 : 잔류자기(B_r)와 보자력(H_c) 클 것

히스테리시스 곡선 면적 클 것

② 전자석 재료(자심 재료) : 잔류자기(B_r) 크고, 보자력 (H_c) 작을 것

히스테리시스 곡선 면적 작을 것



구 분	영구자석재료 그림 (a)	자심재료 그림 (b)
잔류자기 B_r	대	대
보자력 H_c	대	소
히스테리시스면적	대	소
비 고	hard iron (경철)	soft iron (연철)

그림 9.11 ▶ 히스테리시스 곡선(재질)

9.7 강자성체의 자화

- 히스테리시스 손실

변압기등의 전기기기에서는 철심을 교류에서 사용하는 경우가 많기 때문에 스타인메츠는 전기기기용 자성체를 조사하여 실험식으로 히스테리시스 손실에 의한 전력 손식을 구함 (※ η 는 히스테리시스 정수, V 는 자성체의 체적, B_m 은 최대 자속 밀도)

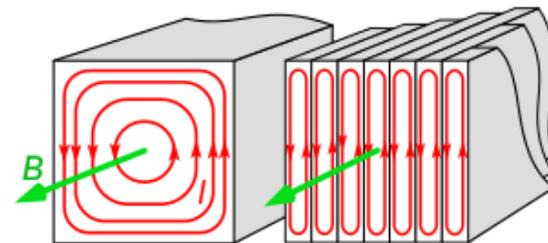
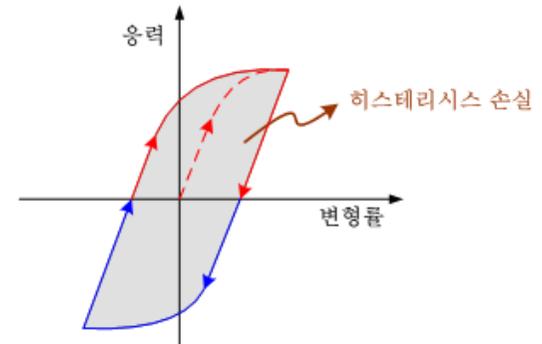
$$P_h = \eta \cdot f \cdot V \cdot B_m^{1.6} [W]$$

※ 주파수는 속도와 비례

교류용 전기기기의 손실은

1. Copper loss (=동손)
2. Hysterisis loss손실 (=철손)
3. Eddy Current loss (=와류손, 맴돌이 손실)

※ 직류에서는?



9.7 강자성체의 자화

9.7.3 소자법

- **소자법** : 강자성체에 일단 자계를 가하면 자화되어 잔류자기의 형태로 항상 자성을 보유하게 된다. 이 자화에 의한 자성을 제거하여 소실시키는 방법
 - ① **직류법** : 처음에 준 자계와 같은 정도의 직류 자계를 반대 방향으로 가하는 조작을 반복하여 감소
 - ② **교류법** : 자화할 때와 같은 정도의 교류자계를 가하고 그 값이 0이 될 때까지 점차로 감소
 - ③ **가열법** : 강자성체의 온도를 퀴리점 이상이 될 때까지 상승시킨다. 철의 경우 약 $770[^\circ\text{C}]$ 에서 강자성을 잃어버리는데, 이 온도를 **퀴리점**(Curie point)

9.8 자기회로

- 회로

- ① 전기회로(electrical circuit) : 전류가 흐르는 통로(전로)
- ② 자기회로(magnetic circuit) : 자속의 통로, 간단히 자로라 함

9.8.1 자기저항과 옴의 법칙

- 기자력 : 자속을 발생시키는 힘

$$F_m = NI [AT]$$

- 자기저항

$$R_m = \frac{l}{\mu S} [AT/Wb] \quad \left(\oint H \cdot dl = H \oint dl = Hl = \frac{\phi l}{\mu S} = \phi R_m \right)$$

- 자기저항의 역수 : 퍼미언스(permeance)

※ 전기저항의 역수인 컨덕턴스 G와 동일한 개념

- 옴의 법칙(자기회로)

$$NI = \phi R_m \quad \therefore \phi = \frac{NI}{R_m} [Wb]$$

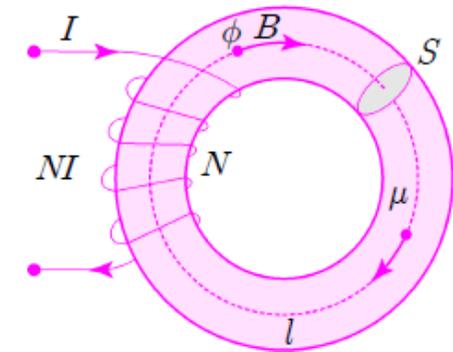


그림 9.12 ▶ 환상의 자기회로

9.8 자기회로

- 전기회로와 자기회로의 대응

표 9.4 ▶ 전기회로와 자기회로의 대응

전 기 회 로		자 기 회 로	
기 전 력	E [V]	기 자 력	F_m [AT]
전 류	I [A]	자 속	ϕ [Wb]
전 계	E [V/m]	자 계	H [AT/m]
전기저항	R [Ω]	자기저항	R_m [AT/Wb]
도 전 율	σ [S/m]	투 자 율	μ [H/m]
옴의 법칙	$E = IR$ [V] $\therefore I = \frac{E}{R}$ [A]	옴의 법칙	$F_m = \phi R_m$ [AT] $\therefore \phi = \frac{NI}{R_m}$ [Wb]

9.8 자기회로

9.8.2 전기회로와 자기회로의 차이점

- ① 전기회로는 회로의 길이에 비하여 단면적이 작은 선상도체, 자기회로는 길이에 비해 자속이 통과하는 단면적이 크므로 평균자로의 길이를 이용하여야 하므로 자기저항은 전기저항에 비해 정밀하지 못함
- ② 전기회로의 옴의 법칙에서 도전율 σ 는 일정하기 때문에 전압과 전류는 **선형성**이지만, 자기회로에서는 투자율 μ 가 변화하여 포화특성을 갖기 때문에 기자력과 자속의 관계는 **비선형성**
- ③ 전기저항에 전류가 흐르면 줄열에 의한 손실이 발생하지만, 자기저항이 있는 회로에서는 자속에 의한 손실이 발생하지 않고 철손이 일어남
- ④ 도체에서 공기에 대한 누설전류를 무시할 수 있지만 자기회로에서의 공기를 통하는 누설자속은 큼
- ⑤ 전하는 정.부의 전하가 실제로 존재하여 전하를 축적하는 콘덴서라는 소자가 있지만, 자하는 가정의 입자이므로 자하를 축적하는 소자는 없다. 또한, 전기회로에서의 인덕턴스는 중요하지만 자기회로에서는 이에 상응하는 소자는 없음

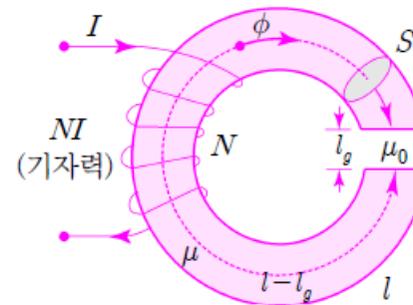
9.9 공극이 있는 자기회로

- 자기저항(철심 R_i , 공극 R_g)

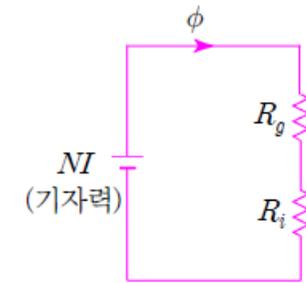
$$R_i = \frac{l-l_g}{\mu S} \doteq \frac{l}{\mu S}, \quad R_g = \frac{l_g}{\mu_0 S}$$

- 합성 자기저항(R_m)

$$R_m = R_i + R_g = \frac{l}{\mu S} + \frac{l_g}{\mu_0 S}$$



(a) 자기회로(공극)



(b) 등가 자기회로

그림 9.13 ▶ 공극이 있는 자기회로

$$\therefore R_m = \frac{l}{\mu S} \left(1 + \frac{\mu l_g}{\mu_0 l} \right) = \frac{l}{\mu S} \left(1 + \frac{l_g}{l} \mu_s \right) \quad \leftarrow \therefore \mu = \mu_0 \mu_s \text{ [H/m]}$$

- 자기저항의 비(공극 없는 경우와 공극 있는 경우)

$$\therefore \frac{R_m}{R} = 1 + \frac{\mu l_g}{\mu_0 l} = 1 + \frac{l_g}{l} \mu_s$$

- 자속 (ϕ)

$$\phi = \frac{NI}{R_m} = \frac{\mu S NI}{l \left(1 + \frac{l_g}{l} \mu_s \right)} \text{ [Wb]}$$

※ 만약 철심의 투자율(μ_s)이 1000

자로길이 1[m], 공극길이 1[mm]라고 하면

$$\Rightarrow \frac{l_g}{l} \cdot \mu_s = \frac{1}{1000} \cdot 1000$$

9.9 공극이 있는 자기회로

- 철심부와 공극부의 자계의 관계(철심 H_i , 공극 H_g)

※ 철심부와 공극부에서 자속(B)는 일정하지만, 자계(H)는 투자율에 따라서 다르다.

$$\text{철심부} : B_i = \mu H_i = \mu_0 \mu_s H_i \quad (9.47)$$

$$\text{공극부} : B_g = \mu_0 H_g \quad (9.48)$$

$$\text{경계조건} : B_i = B_g, \quad \mu_0 \mu_s H_i = \mu_0 H_g$$

$$\therefore H_g = \mu_s H_i \quad (9.49)$$

※ 공극부의 자계의 세기(H_g)는 철심부의 자계의 세기(H_i)의 비투자율(μ_s) 만큼 증가하기 때문에 자력선은 공극부에 집중하고 있음

- 철심부와 공극부에 걸리는 기자력의 관계(철심 F_i , 공극 F_g)

$$NI = \phi R_m = \phi(R_i + R_g) = F_i + F_g \quad (9.50)$$

$$F_i = \phi R_i = \frac{\phi l}{\mu S} = \frac{\phi l}{\mu_0 \mu_s S}, \quad F_g = \phi R_g = \frac{\phi l_g}{\mu_0 S} \quad (9.51)$$

$$F_g = \frac{R_g}{R_i} F_i \quad \therefore F_g = \frac{l_g}{l} \mu_s F_i \quad (9.52)$$