

영구자석을 포함한 자기회로에서의 누설 자속 모델링

Modeling of Flux Leakage in a Magnetic Circuit with Permanent Magnet

김승종[†] · 김우연* · 이종민* · 배용채**

Seung-Jong Kim, Woo-Yeon Kim, Jong-Min Lee and Yong-Chae Bae

1. 서론

액추에이터나 마그네틱 베어링에 삽입되는 영구자석의 적절한 설계를 위해서 흔히 자기회로(magnetic circuit) 해석 기법이 이용되는데, 이 때 영구자석은 자속 소스(flux source)와 내부 자기저항이 병렬로 구성되는 모델로서 표현된다. 그러나 자속의 프링징(fringing) 효과나 누설 자속을 적절히 고려하지 않으면, 이 모델에 의한 해석 결과는 상당히 큰 오차를 갖게 된다.

본 논문에서는 영구자석이 포함된 ㄷ자형 코어가 평판과 일정한 공극을 유지하고 있는 경우에 대해서 누설 자속 및 프링징 효과를 간단히 모델링하는 방법을 제안한다.

2. 영구자석 해석모델

2.1 누설 자속 미포함 모델

본 논문에서 고려하는 구조는 자성체 평판과 일정한 공극을 유지하는 ㄷ자형 영구자석 코어이다. 영구자석이 삽입되는 위치는 Fig. 1의 (a)와 (b)와 같이 코어의 중앙부이거나 공극과 대면하는 코어 단부일 수 있다. 강자성체인 철심에서의 자기저항을 무시하고 누설 자속이 없다고 가정하면, 두 가지 코어에 대한 자기회로는 동일하게 Fig. 1의 (c)와 같이 도시된다. 그림에서, 공극에서의 자기저항 R 과 영구자석 내부저항 R_m 은 다음과 같이 정의된다.

$$R = \frac{g}{\mu_0 A}, \quad R_m = \frac{l_m}{\mu_0 \mu_m A_m} \quad (1)$$

여기서, μ_0 는 공기 중의 투자율($= 4\pi \times 10^{-7}$ H/m), μ_m 은 영구자석 재료의 상대투자율($= 1.05$)이고, g 는 공극의 크기, l_m 은 영구자석의 길이, A 와 A_m 은 각각 공극과 영구자석의 단면적이다. 그러면 영구자석에서나와 공극을 지나가는 자속 ϕ_m 과 공극에서의 자속밀도

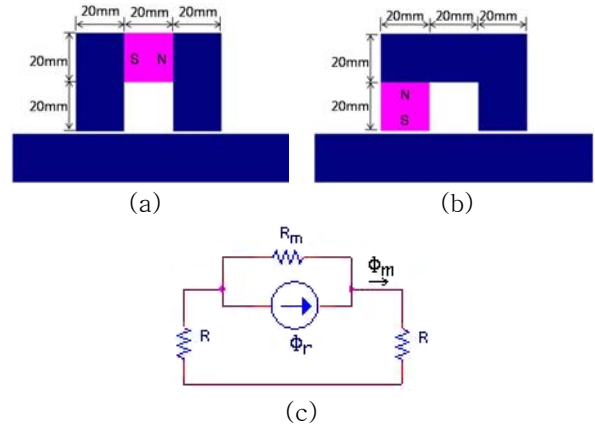


Fig. 1 Magnetic circuit consisting of a permanent magnet and air gaps

B_g 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$B_g = \frac{\phi_m}{A} = B_r \frac{A_m}{A} \frac{R_m}{R_m + 2R} \quad (2)$$

여기서 B_r 은 영구자석의 고유특성인 잔류자속밀도이다. 식(1)을 (2)에 대입하고, Fig. 1에 표시한 치수들을 대입하면 공극의 크기가 1 mm일 때, B_g 는 1.13 T로 계산된다.

한편, Fig. 1(a)와 (b)에 대해서 FEM 해석을 수행한 결과, 공극에서의 자속밀도 분포를 나타낸 그림이 Fig. 2의 (a)와 (b)이다. Fig. 1(a)의 공극에서의 자속밀도는 0.815 T로 얻어지는데, 이에 비하면 위에서 구한 자기회로 해석결과는 약 38%나 큰 값이다. 게다가 Fig. 2(b)에서 보이듯이, 영구자석이 직접 공극에 노출되는 경우는 공극 자속밀도가 1.083 T로서 철심 코어 측의 0.819 T보다 32% 크게 나타

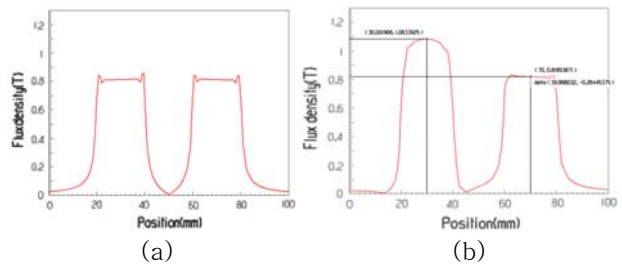


Fig. 2 Flux density distribution on the surface of plate for the cases of Fig. 1 (a) and (b)

[†] 정희원, 한국과학기술연구원
E-mail : sjongkim@kist.re.kr
Tel : (02) 958-5610, Fax : (02) 958-5659
* 한국과학기술연구원
** 한국전력공사 전력연구원

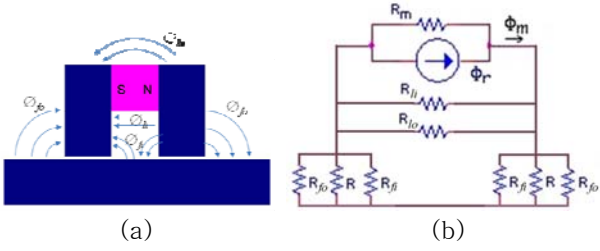


Fig. 3 Flux leakage in Fig. 1(a) and its magnetic circuit

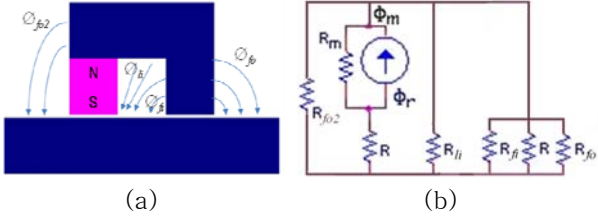


Fig. 4 Flux leakage in Fig. 1(b) and its magnetic circuit

난다. 이는 Fig. 1(c)의 자기회로 모델에서는 예측할 수 없는 현상이다.

2.2 누설 자속 모델

Fig. 1의 (a)와 (b)의 구조에서 누설 자속이 흐르는 경로는 쉽게 예측 가능하다. Fig. 3(a)와 Fig. 4(a)가 이를 도시한 그림이며, 각각에 대한 자기회로는 Fig. 3(b)와 Fig. 4(b)와 같이 표시될 수 있다. 이제, 누설자속을 고려한 공극에서의 자속밀도를 계산하기 위해서, 먼저 Fig. 3에서의 누설자속 경로에서의 도자율(permeance)을 다음과 같이 가정한다.

$$P_{fo} = \frac{1}{R_{fo}} = \frac{2\mu_0 T}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi H}{g}\right) \quad (3-1)$$

$$P_{fi} = \frac{1}{R_{fi}} = \frac{2\mu_0 T}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi x_f}{2g}\right) \quad (3-2)$$

$$P_{lo} = \frac{1}{R_{lo}} = \frac{\mu_0 T}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi H}{l_m}\right) \quad (3-3)$$

$$P_{li} = \frac{1}{R_{li}} = \frac{\mu_0 T(H - x_f)}{l_m} \quad (3-4)$$

여기서 T 는 코어의 두께(= 20 mm)이고, H 는 코어 및 영구자석의 폭(= 20 mm)이며, x_f 는 공극에서 프링징 효과가 나타나는 높이인데, FEM 해석으로 구한 자속선도를 참조하면 두 코어 사이의 거리의 반(= 10 mm)으로 가정될 수 있다. 식(3)과 공극에서의 도자율 $P_g (= 1/R)$ 를 이용하면 영구자석을 나눈 자속에 대한 전체 자기저항은 다음과 같이 표현된다.

$$R_{tot} = \frac{1}{P_{tot}} = \frac{1}{P_{lo} + P_{li} + 0.5(P_{fo} + P_{fi} + P_g)} \quad (4)$$

그리고, 공극에서의 자속밀도 B_g 는

$$B_g = \frac{A_m}{A_g} \cdot \frac{R_{tot}}{2R} \cdot \frac{R_m}{R_m + R_{tot}} B_r \quad (5)$$

와 같이 얻어진다.

마찬가지 방법으로, Fig. 4(b)에 대한 자기저항은 아래 식과 같이 유도된다. P_{fo} 와 P_{fi} 는 식(3-1)과 (3-2)와 동일한 형태로 나타나는데 x_f 가 코어와 영구자석간 거리로 바뀌는 것만 달라진다.

$$P_{fo2} = \frac{1}{R_{fo2}} = \frac{2\mu_0 T}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi H}{2l_m}\right) \quad (6-1)$$

$$P_{li} = \frac{1}{R_{li}} = \mu_0 T \ln\left(\frac{H + \sqrt{H^2 + l_m^2}}{l_m}\right) \quad (6-2)$$

$$R_{tot} = \frac{1}{P_{tot}} = \frac{1}{P_g} + \frac{1}{P_{fo} + P_{fi} + P_{fo2} + P_{li} + P_g} \quad (7)$$

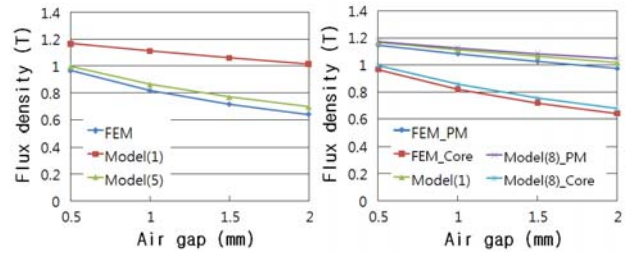
Fig. 4(b)의 경우는 영구자석측 공극과 코어측 공극의 자속밀도가 서로 다른 값을 갖게 된다.

$$B_{g-PM} = B_m = \frac{R_m}{R_m + R_{tot}} B_r \quad (8-1)$$

$$B_{g-core} = \frac{A_m}{A_g} \cdot \frac{R_{tot}}{R} \cdot \frac{R_m}{R_m + R_{tot}} B_r \quad (8-2)$$

3. 공극 자속밀도 해석결과

Fig. 5(a)와 (b)는 각각 식(5)와 식(8)로부터 구한 공극 자속밀도와 FEM 해석으로 구한 결과를 공극의 크기를 변화시키면서 비교한 그림이다. 누설자속을 고려하는 경우, 오차가 대단히 감소하여 약 5%내 임을 확인할 수 있다.



(a) Fig. 3(a) model (b) Fig. 4(a) model
Fig. 5 Comparison of flux densities

4. 결론

본 논문은 영구자석 모델을 보다 정확히 세우기 위해서 누설 자속을 고려하는 방법을 제시하였다. 여전히 5% 정도의 오차는 존재하지만, 영구자석 설계를 위해 번거로운 유한요소해석 대신 활용 가능한 수준의 결과를 얻었다.

후 기

본 연구는 전력산업연구개발사업의 일환으로 전력연구원의 지원을 받아 수행하였기에 감사 드립니다.