

Magnetic Field Analysis of a Magnetic Gear using Analytical Method

Hoon-Ki Lee, Tae-Kyoung Bang, Jeong-In Lee, Jong-Hyeon Woo, and Jang-Young Choi*

Department of Electrical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

(Received 26 May 2021, Received in final form 10 June 2021, Accepted 11 June 2021)

This paper deals with the magnetic field analysis of a magnetic gear. A simplified analysis model was presented through assumptions for applying the analytical method. Then, the governing equation and general solution for each analysis region were derived using definition of the magnetic vector potential, and the general solutions were transformed to obtain a more accurate analysis results. We derived the undetermined coefficients of the general solutions through appropriate boundary conditions. All analytical results were validated with two-dimensional finite element analysis.

Keywords : Magnetic gear, analytical method, Magnetic field characteristic

해석적 방법을 이용한 마그네틱 기어의 자계 해석

이훈기 · 방태경 · 이정인 · 우종현 · 최장영*

충남대학교 전기공학과, 대전시 유성구 대학로 99, 34134

(2021년 5월 26일 받음, 2021년 6월 10일 최종수정본 받음, 2021년 6월 11일 게재확정)

본 논문은 해석적 방법을 이용한 마그네틱 기어의 자계 특성 도출 방법에 대해 다룬다. 해석적 방법을 적용하기 위한 가정들을 통해 단순화된 해석모델을 제시하였다. 그리고 자기벡터포텐셜의 정의를 이용하여 각 해석 영역에 대한 지배방정식 및 일반해를 도출하였으며, 보다 정확한 해석 결과를 얻기위해 전달관계 꼴로 일반해를 변환하였다. 그리고 적절한 경계조건을 통해서 일반해의 미정계수를 도출하였다. 해석적 방법을 통해 도출된 결과는 유한요소법과 비교하여 해석 결과의 타당성을 검증하였다.

주제어 : 마그네틱 기어, 해석적 방법, 자계 해석

I. 서 론

기어는 가전제품이나 자동차 시스템 그리고 풍력 발전기, 컨베이어 벨트, 고속 및 저속으로 회전하는 기기 등 많은 산업분야에서 사용되고있는 기계적 장치로 일반적으로 기어는 1차축 톱니와 2차축 톱니가 서로 맞물리며 동력이나 회전을 전달하는 원리를 가진다. 기계식 기어는 주로 금속 재질을 이용하여 제작되며 톱니의 물리적인 접촉으로 인해 기계적인 마찰을 가진다. 이로 인해 기어의 동작 시 진동 및 소음이 발생하고 심한 경우 비틀림 힘에 의한 파손 및 마모가 발생하여 시스템의 수명을 단축시킨다[1]. 따라서 이를 방지하기 위한 주기적인 유지보수를 해야하는 단점을 갖는다. 이러한 기계식 기어의 대안으로 자기적 힘의 상호작용으로 동력을 전

달하는 마그네틱 기어의 연구가 다양한 분야에서 진행 되고 있다. 1900년대 후반부터 스퍼기어, 워기어, 베벨기어 같은 기존의 기계식 기어의 동력 전달 구조를 단순히 모방한 비접촉식 마그네틱 기어가 제안되어 왔다[2-4]. 자기에너지 전달에 의해 구동되는 비접촉식 마그네틱 기어는 소음 및 진동 저감, 마찰 손실 제거, 과부하 시 자체보호기능 등의 장점을 지녔으나, 전체 영구자석 중 일부만이 동력 전달에 사용되는 비효율적인 구조를 가진다는 큰 단점이 존재했다. 또한 기계식 기어에 비해 전달되는 토크 밀도가 현저히 낮아 산업분야의 관심을 얻지는 못하였다. 그러나 2001년 영국의 Sheffield 대학의 K. Atallah 교수에 의해 동축 상에 놓인 내, 외축 회전자에서 나오는 자계를 다수의 변조 철심을 통해 변조시켜 두 회전자간의 기어비를 만들어 내는 동축 마그네틱 기어가 제안되었다[5]. 변조 철심은 다수 개의 강자성체 자극 편으로 이루어져 있으며, 고정되어 두 회전자의 영구자석에서 발생하는 자계를 변조시키는 역할을 한다. 이러한 변조 철심과 동

축 구조를 통해 모든 영구자석이 동력전달에 사용되어 전달 토크 밀도 또한 크게 향상되었다. 이후 영구자석 형상 및 자화 배열 등을 변경하여 동축 마그네틱 기어의 전달 토크를 높이려는 노력이 계속 되어 왔다[6].

이러한 동축 마그네틱 기어를 해석 및 설계하는 방법에는 일반적으로 알려진 전자계 해석 방법인 수치해석법과 해석적 방법이 존재한다. 수치해석법 중의 하나의 유한요소법은 재질의 비선형 특성을 고려할 수 있을 뿐만 아니라 보다 정확하게 복잡한 형상의 해석이 가능하다. 그러나 해석시간이 길고 요소 분할 조건 및 설계자의 숙련도가 해석 결과에 영향을 줄 수 있다. 이에 반해, 해석적 방법은 수치해석법에 비해 해석 시간이 짧고 설계 변수 변화에 대한 특성 변화를 이해하는데 보다 유리하다[7-12]. 해석적 방법을 이용한 마그네틱 기어의 해석 및 설계를 하기 위해서는 변조 철심 구조로 인해 구분되는 슬롯 영역을 고려하는 것이 필수적이다. 마그네틱 기어는 공극에서 자기장을 통한 에너지 변환을 통해서 1차측에서 2차측으로 동력을 전달한다. 따라서 슬롯 영역에 의한 자계의 왜곡을 고려해야만 전달 토크를 알 수 있으며, 이러한 전달 토크를 분석하기 위해서는 먼저 자계 해석이 선행되어야 한다[13-17].

따라서 본 논문에서는 해석적 방법 중 하나인 서브도메인법을 이용하여 마그네틱 기어의 자계 해석을 수행하였다. 몇 가지 가정을 통해서 해석 모델을 단순화 하였으며, 각 해석 영역에 대한 지배방정식 도출하고, 각 해석영역에서 영역에서의 자계 특성을 해석하였다. 해석 결과는 유한요소 해석 결과와 비교함으로써 제시된 해석 방법의 타당성을 검증하였다.

II. 해석적 방법을 이용한 마그네틱 기어의 자계 해석

1. 해석모델

Fig. 1은 마그네틱 기어의 단순화된 해석모델을 나타낸다.

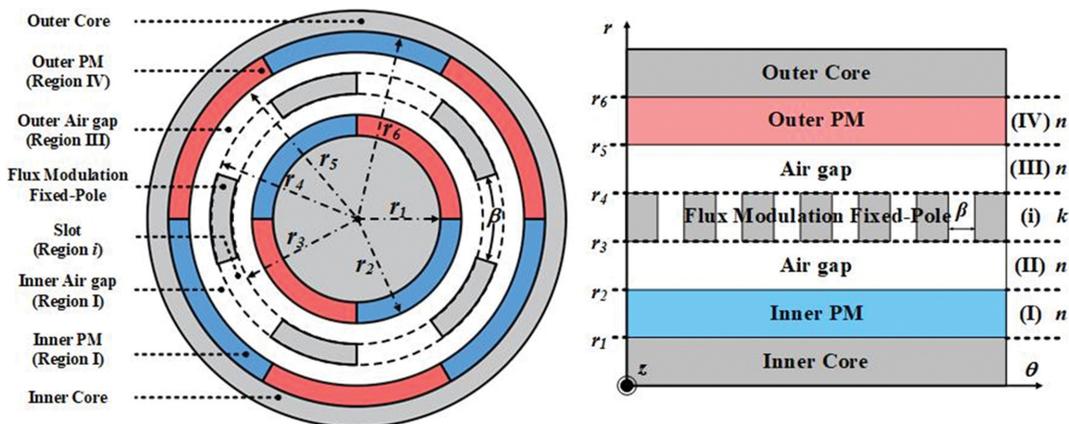


Fig. 1. (Color online) The simplified analysis model.

해석 방법을 설명하기 위해서 예시로 내측 4극, 외측 6극, 그리고 5개의 변조 철심을 가지고 있는 모델을 나타낸다. 동축 마그네틱 기어의 형상을 (r, θ) 좌표계에서 표현된다. 이를 단순화 하기 위해서 반경 방향의 슬롯으로 단순화하였다. r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 그리고 r_6 는 각각 내측 요크, 내측 영구자석 표면, 내측 변조 철심 표면, 외측 변조 철심 표면, 외측 영구자석 표면, 그리고 외측 요크까지의 반지름을 의미한다. β 는 슬롯이 차지하는 각을 의미한다.

$$\theta_i = -\frac{\beta}{2} + \frac{2\pi i}{Q} \text{ with } 1 \leq i \leq Q \quad (1)$$

θ_i 는 i 번째 슬롯의 위치를 의미하며 Q 는 슬롯 수를 나타낸다. 해석적 방법을 적용하기 위해서 해석모델을 단순화하는 과정이 필요하며 다음의 가정이 필요하다[18].

- 단부 효과는 무시된다.
- 철심의 비투자율은 무한대의 값을 가진다.
- 자석의 비투자율은 1이다.
- 슬롯 형상은 반경방향 슬롯을 가진다.

해석모델은 5개의 영역으로 구분되고 내측 영구자석 영역 (Region I), 내측 공극 영역 (Region II), i 번째 슬롯 영역 (Region i), 외측 공극 영역 (Region III), 외측 영구자석 영역 (Region IV)으로 구분된다. 설명된 가정에 따라 5개의 영역은 z -방향에 대해 대칭적인 구조를 가지고, $r - \theta$ 좌표계에서 표현된다.

2. 자기벡터포텐셜

자속밀도 \mathbf{B} , 자계의 세기 \mathbf{H} , 자화 \mathbf{M} 은 식(2)과 같은 관계를 갖는다.

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (2)$$

식(2)의 양변에 curl을 취한 후 정리하면 식(3)을 얻을 수 있다.

$$A(r, \theta) = R_0(r) \cdot \Theta_0(\theta) + \sum_{n, k=1}^{\infty} R_{n, k}(r) \Theta_{n, k}(\theta) \quad (12)$$

식(12)에서 n, k 은 각 영역의 공간고조파를 나타낸다.

$$A_{zn}^I = A_0^I + B_0^I \ln r + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(A_n^I r^{-n} + B_n^I r^n + W_{s, I}(r)) \sin(n\theta)}{(C_n^I r^{-n} + D_n^I r^n - W_{c, I}(r)) \cos(n\theta)} \right] \mathbf{i}_z \quad (13.a)$$

$$A_n^{II} = A_0^{II} + B_0^{II} \ln r + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(A_n^{II} r^{-n} + B_n^{II} r^n) \sin(n\theta)}{(C_n^{II} r^{-n} + D_n^{II} r^n) \cos(n\theta)} \right] \mathbf{i}_z \quad (13.b)$$

$$A_n^{III} = A_0^{III} + B_0^{III} \ln r + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(A_n^{III} r^{-n} + B_n^{III} r^n) \sin(n\theta)}{(C_n^{III} r^{-n} + D_n^{III} r^n) \cos(n\theta)} \right] \mathbf{i}_z \quad (13.c)$$

$$A_{zn}^{IV} = A_0^{IV} + B_0^{IV} \ln r + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(A_n^{IV} r^{-n} + B_n^{IV} r^n + W_{s, IV}(r)) \sin(n\theta)}{(C_n^{IV} r^{-n} + D_n^{IV} r^n - W_{c, IV}(r)) \cos(n\theta)} \right] \mathbf{i}_z \quad (13.d)$$

$$A_k^i = A_0^i + B_0^i \ln r + \sum_{k=1}^{\infty} \left[\left(A_k^i r^{\frac{k\pi}{\beta}} + B_k^i r^{-\frac{k\pi}{\beta}} \right) \cos\left(\frac{k\pi}{\beta}(\theta - \theta_0)\right) \right] \mathbf{i}_z \quad (13.e)$$

식(13)은 각 변수분리법을 통해 도출한 각 해석영역의 일반해를 나타낸다.

$$W_{s, I}(r) = \begin{cases} \frac{\mu_0}{2} r \ln r M_n \cos(n\theta_{0, i}) & (n=1) \\ \frac{r \mu_0 n}{(n^2 - 1)} M_n \cos(n\theta_{0, i}) & (n \neq 1) \end{cases} \quad (14.a)$$

$$W_{c, I}(r) = \begin{cases} \frac{\mu_0}{2} r \ln r M_n \sin(n\theta_{0, i}) & (n=1) \\ \frac{r \mu_0 n}{(n^2 - 1)} M_n \sin(n\theta_{0, i}) & (n \neq 1) \end{cases} \quad (14.b)$$

$$W_{s, IV}(r) = \begin{cases} \frac{\mu_0}{2} r \ln r M_n \cos(n\theta_{0, o}) & (n=1) \\ \frac{r \mu_0 n}{(n^2 - 1)} M_n \cos(n\theta_{0, o}) & (n \neq 1) \end{cases} \quad (14.c)$$

$$W_{c, IV}(r) = \begin{cases} \frac{\mu_0}{2} r \ln r M_n \sin(n\theta_{0, o}) & (n=1) \\ \frac{r \mu_0 n}{(n^2 - 1)} M_n \sin(n\theta_{0, o}) & (n \neq 1) \end{cases} \quad (14.d)$$

식(14)는 Region I과 Region IV의 특이해를 나타낸다. $M_n = M_m + M_o/n$ 을 의미하고, $\theta_{0, i}$ 와 $\theta_{0, o}$ 는 각각 내측 영구자석과 외측 영구자석의 초기 위치를 의미한다.

5. 일반해 변환

해석적 방법을 통해서 보다 정확한 해석 결과를 얻기 위해서는 전달관계꼴을 갖는 일반해로 변환해야한다. Region I의 일반해인 식(13)에서 $\sin(n\theta)$ 의 r 에 대한 성분은 A_{zn}^I 로 정의

하고 $r=r_1$ 그리고 $r=r_2$ 를 대입하면 식(15)와 (16)으로 정리된다.

$$A_{zn}^I(r_1) = A_n^I r_1^{-n} + B_n^I r_1^n + W_{s, I}(r_1) \quad (15)$$

$$A_{zn}^I(r_2) = A_n^I r_2^{-n} + B_n^I r_2^n + W_{s, I}(r_2) \quad (16)$$

또한 미정계수 A_n^I 와 B_n^I 에 대해 연립방정식을 되면 다음과 같다.

$$A_n^I = \frac{A_{zn}^I(r_1)r_2^n - A_{zn}^I(r_2)r_1^n - W_{s, I}(r_1)r_2^n + W_{s, I}(r_2)r_1^n}{\begin{pmatrix} r_2^n & r_1^n \\ r_1^n & r_2^n \end{pmatrix}} \quad (17)$$

$$B_n^I = \frac{A_{zn}^I(r_2)r_1^{-n} - A_{zn}^I(r_1)r_2^{-n} - W_{s, I}(r_2)r_1^{-n} + W_{s, I}(r_1)r_2^{-n}}{\begin{pmatrix} r_2^n & r_1^n \\ r_1^n & r_2^n \end{pmatrix}} \quad (18)$$

식(17)과 (18)을 통해서 A_{zn}^I 를 정리한 후 r 에 대한 변수를 미정계수로 정리하면 식(19)로 도출된다.

$$A_{zn}^I(r) = A_n^I \left(\left(\frac{r_1}{r} \right)^n - \left(\frac{r}{r_1} \right)^n \right) + B_n^I \left(\left(\frac{r_2}{r} \right)^n - \left(\frac{r}{r_2} \right)^n \right) + W_{s, I}(r) \quad (19)$$

$$Y_n(x, y) = \left(\frac{y}{x} \right)^n - \left(\frac{x}{y} \right)^n \quad (20)$$

기술된 과정 및 식(20)의 함수를 통해서 각 영역의 일반해를 식(21)로 정리할 수 있다.

$$A_{zn}^I = A_0^I + B_0^I \ln r + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(A_n^I Y_n(r, r_1) + B_n^I Y_n(r, r_2) + W_{s, I}(r)) \sin(n\theta)}{(C_n^I Y_n(r, r_1) + D_n^I Y_n(r, r_2) + W_{c, I}(r)) \cos(n\theta)} \mathbf{i}_z \quad (21.a)$$

$$A_{zn}^{II} = A_0^{II} + B_0^{II} \ln r + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(A_n^{II} Y_n(r, r_2) + B_n^{II} Y_n(r, r_3)) \sin(n\theta)}{(C_n^{II} Y_n(r, r_2) + D_n^{II} Y_n(r, r_3)) \cos(n\theta)} \mathbf{i}_z \quad (21.b)$$

$$A_{zn}^{III} = A_0^{III} + B_0^{III} \ln r + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(A_n^{III} Y_n(r, r_4) + B_n^{III} Y_n(r, r_5)) \sin(n\theta)}{(C_n^{III} Y_n(r, r_4) + D_n^{III} Y_n(r, r_5)) \cos(n\theta)} \mathbf{i}_z \quad (21.c)$$

$$A_{zn}^{IV} = A_0^{IV} + B_0^{IV} \ln r + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(A_n^{IV} Y_n(r, r_5) + B_n^{IV} Y_n(r, r_6) + W_{s, IV}(r)) \sin(n\theta)}{(C_n^{IV} Y_n(r, r_5) + D_n^{IV} Y_n(r, r_6) + W_{c, IV}(r)) \cos(n\theta)} \mathbf{i}_z \quad (21.d)$$

$$A_k^i = A_0^i + B_0^i \ln r + \sum_{k=1}^{\infty} \left(A_k^i Y_{\frac{k\pi}{\beta}}(r, r_3) + B_k^i Y_{\frac{k\pi}{\beta}}(r, r_4) \right) \cos\left(\frac{k\pi}{\beta}(\theta - \theta_i)\right) \mathbf{i}_z \quad (21.e)$$

6. 경계조건

Table I은 각 해석 영역에서의 경계조건을 나타낸다. $r=r_1$ 일 경우 노이만 경계조건에 의해서 Region I의 원주방향 자속밀도는 0이 되며 $r=r_2$ 인 경우 연속경계 조건이 적용되어 Region I과 Region II의 반경 방향 및 원주 방향 자속밀도가 같다. $r=r_3$ 인 경우 $\theta_i < \theta < \theta_i + \beta$ 의 구간에서 연속 경계 조건과 노이만의 경계조건이 적용되며 Region II와 Region I의 원주방향 및 반경방향 자속밀도가 같다. 그리고 $\theta_i < \theta <$

$\theta_i + \beta$ 를 제외한 영역에서는 Region II의 원주방향 지속밀도가 0이 된다. Region I와 Region III의 경계인 $r=r_4$ 인 경우

$r=r_3$ 인 경우와 동일한 조건의 경계조건이 적용된다. $r=r_5$ 인 경우 연속 경계조건에 따라 Region III와 Region IV의 반경 방향 및 원주방향 지속밀도가 같다. $r=r_6$ 인 경우 노이만의

Table I. Boundary condition

| | | |
|--|--------------------------------------|--|
| $r=r_1$ | $B_{\theta}^I = 0$ | - |
| $r=r_2$ | $B_{\theta}^I = B_{\theta}^{II}$ | - |
| | $B_r^I = B_r^{II}$ | - |
| $r=r_3$ | $B_r^{II} = B_r^i$ | $\theta_i < \theta < \theta_i + \beta$ |
| | $B_{\theta}^{II} = B_{\theta}^i$ | $\theta_i < \theta < \theta_i + \beta$ |
| | $B_{\theta}^{II} = 0$ | otherwise |
| $r=r_4$ | $B_r^i = B_r^{III}$ | $\theta_i < \theta < \theta_i + \beta$ |
| | $B_{\theta}^{III} = B_{\theta}^i$ | $\theta_i < \theta < \theta_i + \beta$ |
| | $B_{\theta}^{III} = 0$ | otherwise |
| $r=r_5$ | $B_r^{III} = B_r^{IV}$ | - |
| | $B_{\theta}^{III} = B_{\theta}^{IV}$ | - |
| $r=r_6$ | $B_{\theta}^{IV} = 0$ | - |
| $\theta = \theta_i, \theta = \theta_i + \beta$ | $B_r^i = 0$ | $r_3 < r < r_4$ |

Table II. Parameters of the Model 1

| Symbol | Value | Unit |
|------------|-----------------------|------|
| r_1 | 42 | mm |
| r_2 | 45 | mm |
| r_3 | 46 | mm |
| r_4 | 51 | mm |
| r_5 | 52 | mm |
| r_6 | 55 | mm |
| Inner pole | 6 | - |
| Outer pole | 64 | - |
| Q | 35 | - |
| β | $360/Q/2$ | Deg. |
| B_r | 1.31 | T |
| μ_0 | $4\pi \times 10^{-7}$ | H/m |

Table III. Parameters of the Model 2

| Symbol | Value | Unit |
|------------|-----------------------|------|
| r_1 | 45 | mm |
| r_2 | 50 | mm |
| r_3 | 55 | mm |
| r_4 | 65 | mm |
| r_5 | 70 | mm |
| r_6 | 75 | mm |
| Inner pole | 6 | - |
| Outer pole | 26 | - |
| Q | 16 | - |
| β | $360/Q/2$ | Deg. |
| B_r | 1.2 | T |
| μ_0 | $4\pi \times 10^{-7}$ | H/m |

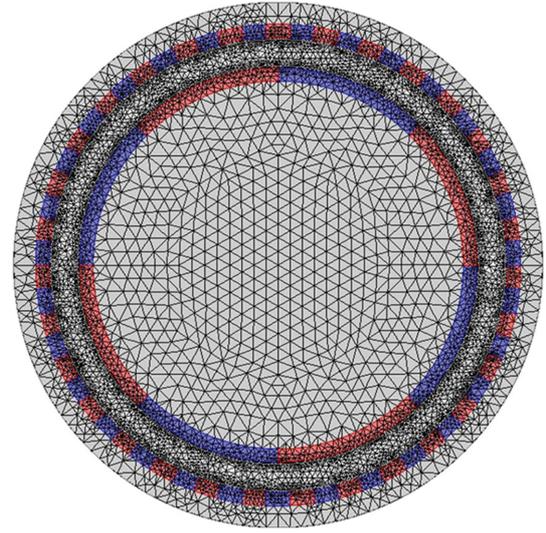


Fig. 3. (Color online) The mesh plot of Model 1.

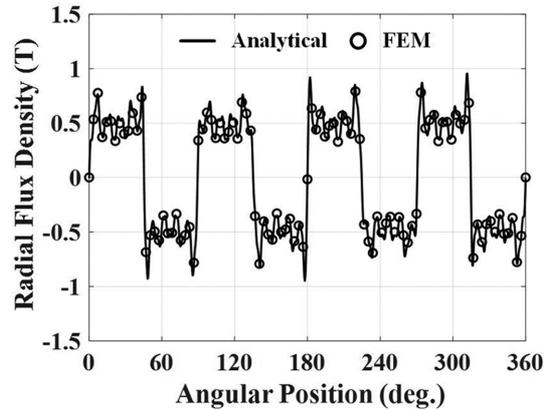


Fig. 4. The radial magnetic flux density of Model 1 at $(r_2 + r_3)/2$.

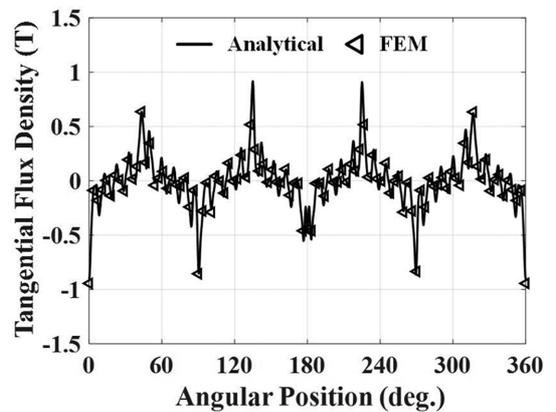


Fig. 5. The tangential magnetic flux density of Model 1 at $(r_2 + r_3)/2$.

경계조건에 따라 Region IV의 원주방향 자속밀도가 0이된다. 이에 따라 일반해를 적용하여 연립방정식을 풀게 되면 각 영역 일반해의 미정계수를 도출할 수 있으며 식(5)의 정의에 의해서 자속 밀도를 도출할 수 있다.

III. 해석결과 및 비교

Table II와 III은 2절에서 설명된 해석적 방법을 통한 마그

Table IV. Analysis Time of analytical method and FEM

| Symbol | Model 1 | | | Model 2 | | |
|--|---------|----|-----|---------|-----|-----|
| Number of mesh | 19231 | | | 13670 | | |
| Analysis time of FEM (s) | 4 | | | 3 | | |
| n, k | 50 | 75 | 100 | 50 | 75 | 100 |
| Analysis time of analytical method (s) | 2.3 | 6 | 12 | 0.6 | 1.4 | 2.9 |

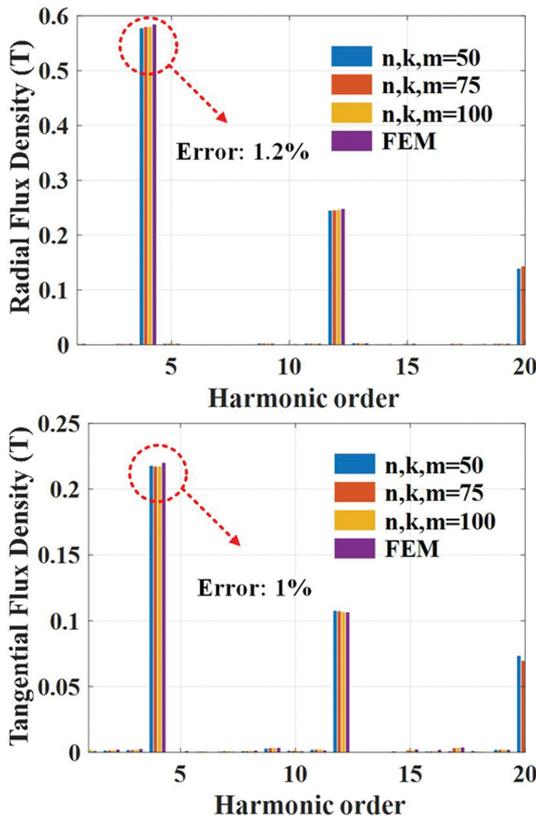


Fig. 6. (Color online) Spatial harmonic spectra of the inner air gap flux density of Model 1.

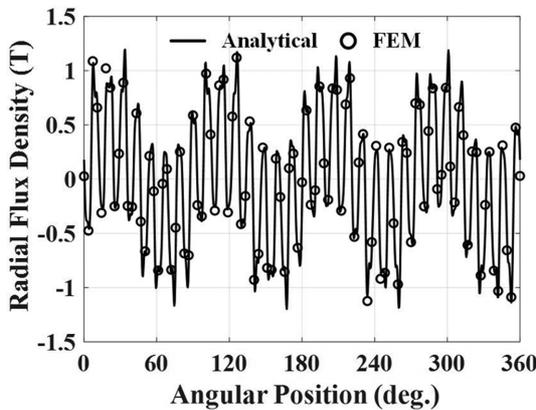


Fig. 7. The radial magnetic flux density of Model 1 at $(r_4 + r_5)/2$.

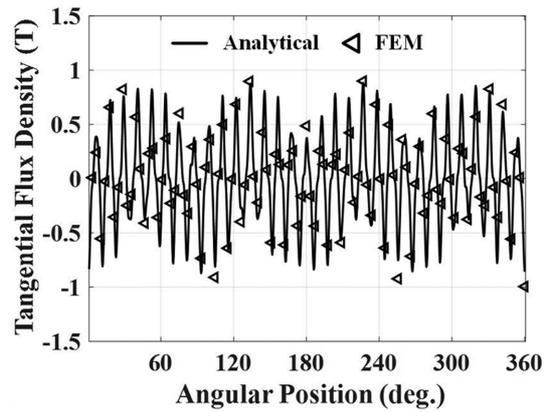


Fig. 8. The tangential magnetic flux density of Model 1 at $(r_4 + r_5)/2$.

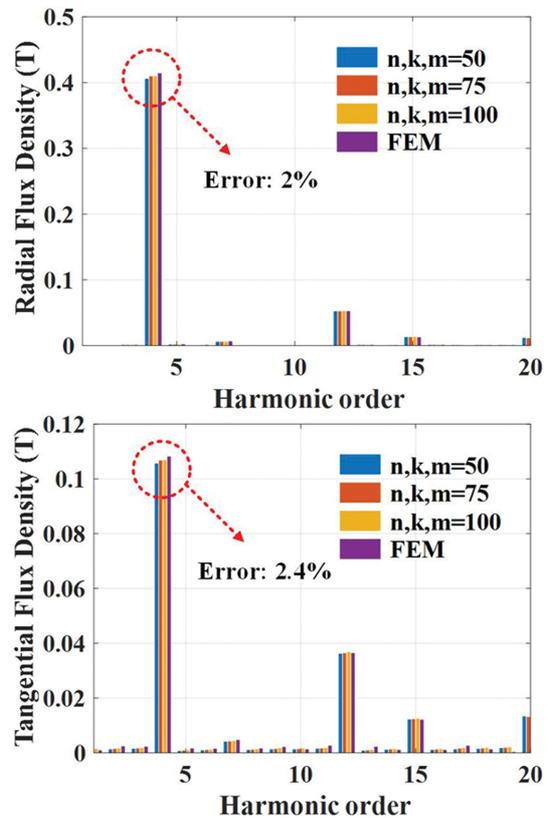


Fig. 9. (Color online) Spatial harmonic spectra of the outer air gap flux density of Model 1.

네틱 기어의 자계 해석법을 검증하기 위한 해석모델의 설계 사양을 나타낸다. Model 1은 내측 8극, 외측 62극과 35개의 변조 철심을 가지고 있는 마그네틱 기어이며, Model 2는 내

측 6극, 외측 26극과 16개의 변조 철심을 가지고 있는 마그네틱 기어를 나타낸다. Table IV는 수행된 해석적 방법과 유한요소법의 해석 조건 및 해석 시간을 나타낸다. 해석적 방법의 경우 공간고조파를 50, 75 그리고 100 고조파에서 수행되었으며, 유한요소법은 Model 1과 Model 2의 요소 수는 각각 19231과 13670으로 수행되었다. Fig. 3은 Model 1의 요소 분할 결과를 나타내며, Fig. 4, 5 그리고 Fig. 7과 8은 각각 Model 1의 내측과 외측의 공극자속밀도를 나타낸다. 그

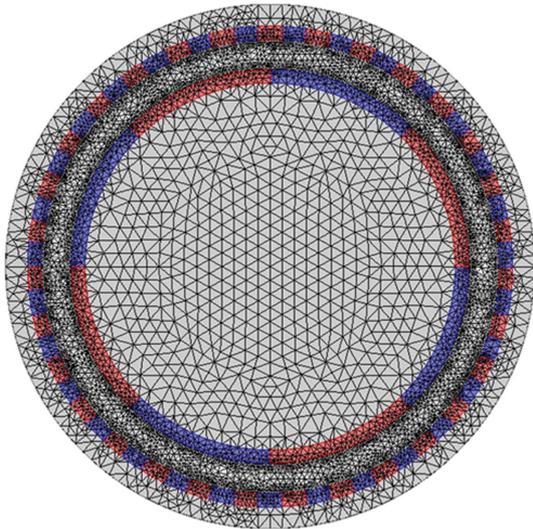


Fig. 10. (Color online) The mesh plot of Model 2.

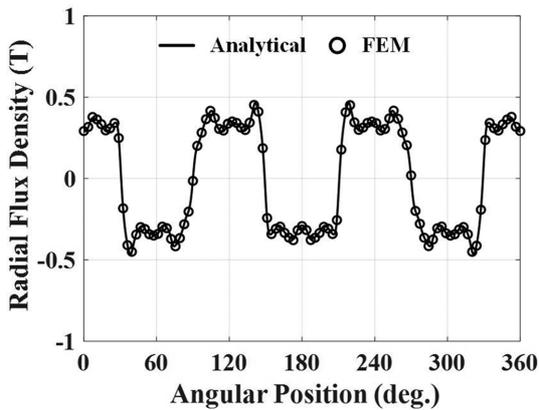


Fig. 11. The radial magnetic flux density of Model 1 at $(r_2 + r_3)/2$.

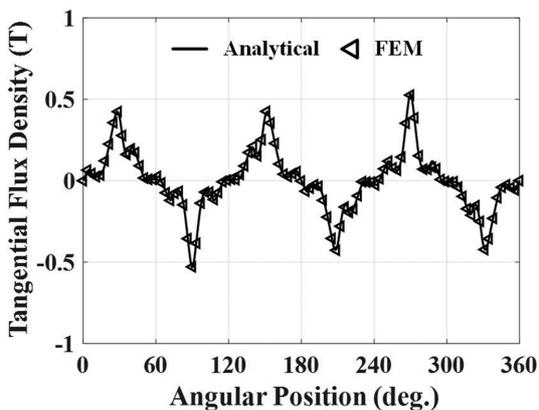


Fig. 12. The tangential magnetic flux density of Model 2 at $(r_2 + r_3)/2$.

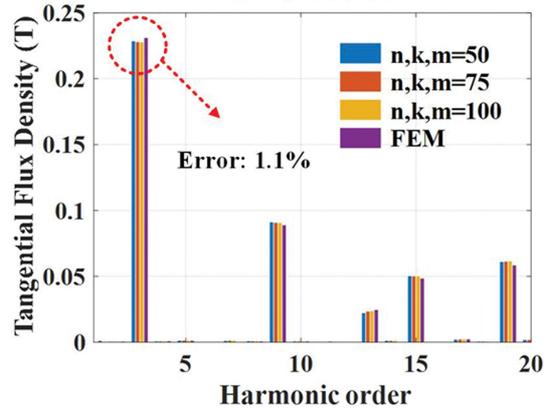
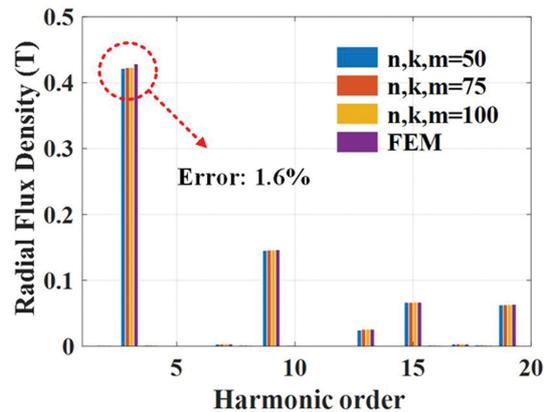


Fig. 13. (Color online) Spatial harmonic spectra of the inner air gap flux density of Model 2.

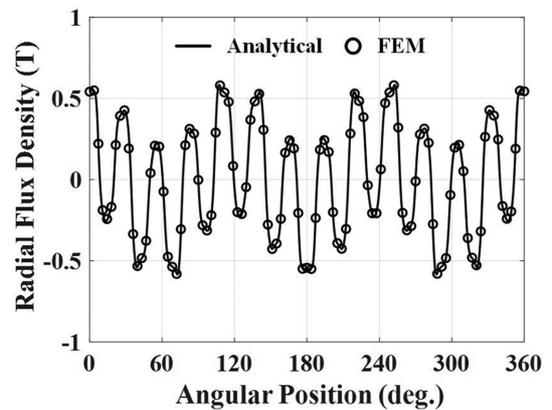


Fig. 14. The radial magnetic flux density of Model 2 at $(r_4 + r_5)/2$.

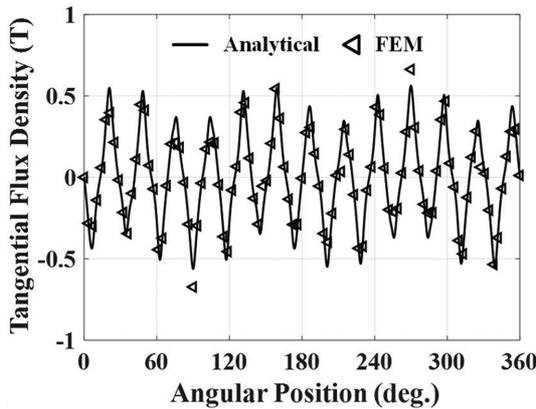


Fig. 15. The tangential magnetic flux density of Model 2 at $(r_4 + r_5)/2$.

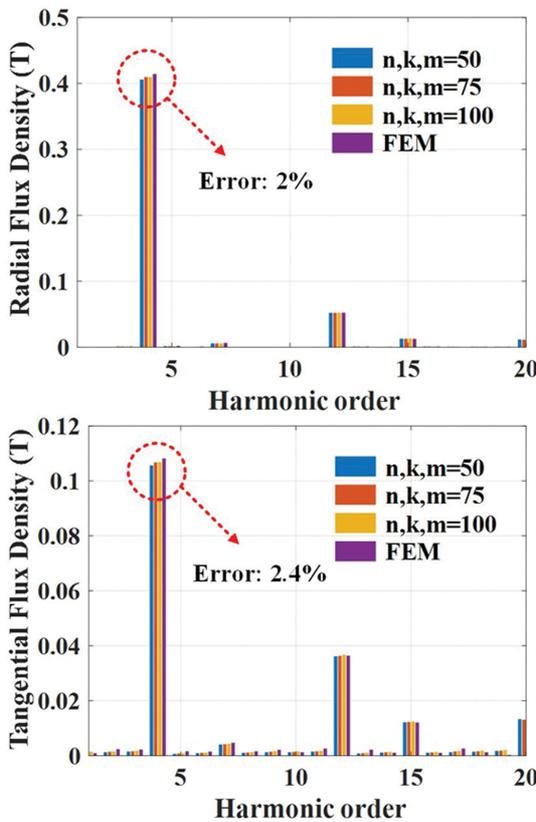


Fig. 16. (Color online) Spatial harmonic spectra of the outer air gap flux density of Model 2.

리고 Fig. 6과 9는 각각 내측과 외측 공극 자속밀도에 대한 FFT 분석 결과를 나타낸다. 최대 자속밀도 크기를 가지는 고조파에서 내측 공극자속 밀도는 유한요소법 해석 결과와 최대 1.2%의 오차가 발생하였으며, 외측 공극 자속 밀도는 2.4%의 오차가 발생하였다. Fig. 10은 Model 2의 요소 분할 결과를 나타낸다. Fig. 11, 12 그리고 Fig. 14, 15는 각각 Model 2의 내측 및 외측 공극자속밀도를 나타내며, Fig. 13과 14는 내측 및 외측 자속 밀도에 대한 FFT 해석 결과를

나타낸다. 유한요소법 해석 결과와 비교하였을 때 최대 1.6%와 2.4%의 오차를 확인하였다. 결과적으로 해석적 방법을 이용한 해석시 고려하는 고조파가 증가할수록 유한요소법 해석 결과와 오차율은 감소하지만 해석 시간은 증가하는 것을 제시된 데이터 및 Table IV에서 확인할 수 있다. 또한 해석 시간이 가장 짧은 50고조파까지 고려하더라도 유한요소법 해석 결과와 3% 이내의 오차를 보이므로 본 논문에서 수행한 해석적 방법의 결과가 타당함을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 해석적 방법을 이용하여 마그네틱 기어의 자계 해석을 수행하였다. 각 해석 영역의 지배방정식 및 일반해를 도출하였으며, 적절한 경계조건을 통해서 자계 분포 특성을 도출하였다. 또한 고려되는 공간고조파에 따른 자속밀도의 고조파 해석결과와 유한요소해석 결과와 비교를 통해 해석 결과의 타당성을 검증하였다. 본 논문의 연구결과는 초기 설계시 마그네틱 기어의 특성 해석에 도움이 될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 2019년 충남대학교 해외과건 연구비 지원에 의한 결과입니다.

References

- [1] J. I. Lee, Master Thesis, Chungnam National University, Korea (2016).
- [2] D. E. Hesmondhalgh and D. Tipping, IEEE Proc. Elect. Power **127** (1980).
- [3] K. Tsurumoto and S. Kikushi, IEEE Trans. Magn. **23** (1987).
- [4] K. Ikuta, S. Makita, and S. Arimoto, Proc. IEEE Conf. on Micro Electro Mechanical System **37** (1991).
- [5] Atallah K and Howe D, IEEE Trans. Magn. **37** (2001).
- [6] H. M Shin, Masters Thesis, Dong-A National University, Korea (2015).
- [7] Z. Q. Zhu, D. Howe, and C. C. Chan, IEEE Trans. Magn. **38** (2002).
- [8] T. Lubin, S. Mezani, and A. Rezzou, IEEE Trans. Magn. **46** 2036257 (2010).
- [9] Z. J. Liu and J. T. Li, IEEE Trans. Magn. **43**, 903417 (2007).
- [10] Z. J. Liu and J. T. Li, IEEE Trans. Energy Convers. **23**, 926034 (2008).
- [11] F. Dubas and C. Espanet, IEEE Trans. Magn. **45**, 2013245 (2009).
- [12] T. Lubin, S. Mezani, and A. Rezzoug, Prog. Electromagn. Res. B **25**, 293314 (2010).

- [13] L. J. Wu, Z. Q. Zhu, D. Staton, M. Popescu, and D. Hawkins, IEEE Trans. Magn. **47**, 2116031 (2011).
- [14] L. J. Wu, Z. Q. Zhu, D. Staton, M. Popescu, and D. Hawkins, IEEE Trans. Magn. **47**, 2104969 (2011).
- [15] K. H. Shin, Masters Thesis, Chungnam National University, Korea (2016).
- [16] T. Lubin, S. Mezani, and A. Rezzoug, IEEE Trans. Magn. **47**, 2095874 (2011).
- [17] Z. Q. Zhu and D. Howe, IEEE Trans. Magn. **29**, 920460 (1993).
- [18] Z. J. Liu and J. T. Li, IEEE Trans. Energy Convers. **23**, 926034 (2008).
- [19] D. Zarko, D. Ban, and T. A. Lipo, IEEE Trans. Magn. **44**, 908652 (2008).
- [20] L. J. Wu, Z. Q. Zhu, D. Staton, M. Popescu, and D. Hawkins, Int. Conf. Electr. Mach. **59**, 2143379 (2010).
- [21] H. K. Lee, Master Thesis, Chungnam National University, Korea (2020).