사다리꼴 요소를 이용한 3차원 등가자기회로망 해석에 관한 연구

論 文
51B-8-5

A Study on 3D Equivalent Magnetic Circuit Network Method Using Trapezoidal Element

金 솔* · 李 柱**
(Sol Kim · Ju Lee)

Abstract - 3D Equivalent magnetic Circuit Network Method (EMCNM) is comparatively the easy way that analyzes 3D models of Electric Machine by using permeance as a distributive magnetic circuit parameter under the existing magnetic equivalent circuit method and Numerical Method. The existing 3D EMCNM could not correctly describe the shape of an analysis target when using rectangular shape element or fan shape element, so it made errors when calculating permeance. Therefore, this paper proposes the trapezoidal element contained rectangular element, fan-shape element, and quadrilateral element to express a shape. The proposed method in this research was confirmed as a useful and an accurate method through comparing with the analysis result of SRM model that is sufficiently guaranteed by 2D-Analysis.

Key Words : Equivalent Magnetic Circuit Network, Switched Reluctance Motor, Trapezoidal Element

1. 서 론

컴퓨터 성능의 비약적인 발전으로 인해 해석모델의 복잡한 형상, 재질의 비선형성을 고려할 수 있는 수치해석 방법이 전자계 해석에 많이 이용되고 있다. 특히 유한요소법은 해의 정확성과 유용성이 검증되어 전기기기의 해석에 필수적인 도구로 자리 잡아가고 있다. 그러나 3차원 동특성 해석에 유한요소법을 이용할 경우 계산 시간이 길어지고 모터의 회전을 고려할 때 요소 재분할이 복잡해지는 단점을 가지고 있다. 이러한 유한요소법과 같은 수치해석 방법의 계산시간의 단점을 보완하기 위하여 간단한 자기회로법과 수치해석방법의 장점을 부합시킨 자속튜브(Flux Tube)의 개념이 1984년에 Valdeo Ostovic에 의하여 제안되었다[3]. 자속튜브를 이용한 방법은 특히, 동특성 해석 시에 계산시간이 감소되는 장점을 가지므로 기기의 과도특성해석 등에 강력한 해석방법으로서 사용되어져 왔다. 그러나, 자속의 흐름이 제한되지 않는 FEM과는 달리 자속튜브에서는 단지 두 방향의 자속만을 계산하므로 누설을 고려하지 못하고, 치와 슬롯부분에서의 수직한 주 자속성분만을 구하므로 정확도가 떨어진다는 단점을 갖는다. 따라서 보다 정확한 해석을 위하여 자속의 경로를 제한하지 않는 방법에 대한 연구가 필요하게 되었다. 최근에는 3차원 유한요소법에 비해 회전자 또는 이동자의 이동시 요소 재분할이 필요 없고, 해를 얻기 위한 계행렬의 이산도 역시 우수하여 해석시간이 현저히 단축되며, 또한 그 해의 정밀도 면에서도 신뢰할 수 있는 3차원 등가자기회로망법이 여러 논문에서 발표되고 있다[1][2]. 그러나, 이러한 3차원 등가자기회로망해석에서는 사각형요소나 부채꼴요소를 이용하였으나 기기의 형상을 정확하게 표현할 수 없으므로 그에 따른 해석오차가 수반되게 된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 선형기기와 회전기기에 모두 적용 가능한 사다리꼴 요소를 제안하였다. 사다리꼴 요소는 자속의 주된 통로가 되는 회전자와 고정자의 치 형상을 왜곡 없이 표현할 수 있으며, 기존의 사각형 요소와 부채꼴 요소의 계산과정을 모두 포함하여 계산할 수 있다. 또한, 비대칭의 사각형 형상은 이를 사다리꼴 요소로 근사화하여 퍼미언스를 계산 할 수 있다.

본 논문에서는 제안한 방법의 타당성 검토를 위하여 2중 돌극 구조로 인해 요소분할시 형상표현에 어려움이 있는 SRM에 대하여 사다리꼴 요소를 이용한 3차원 등가회로망법을 사례연구에 제시하였으며, 3차원 등가회로망법의 해석결과를 FEM의 해석결과와 비교함으로써 타당성을 검토하였다.

2. 해석 방법

2.1 퍼미언스의 계산

3차원 등가자기회로망법에서의 요소는 육면체이다. 이는 자속의 경로를 마주보는 두 면 사이로 가정하기 때문이다. 요소에서 퍼미언스 및 자기저항은 다음과 같이 계산된다.

$$P = \frac{\mu A}{L} \tag{1}$$

$$\mathcal{R} = \frac{L}{\mu A} \tag{2}$$

여기서 A는 자속이 통과하는 단면을, L은 자속의 경로

* 正 會 員 : 漢陽大 電氣工學科 博士課程
** 正 會 員 : 漢陽大 電子電氣工學部 助敎授
接受日字 : 2002年 4月 2日
最終完了 : 2002年 5月 15日

를 표현하며, μ는 요소의 재질에 따른 투자율이다.

만약 매우 작은 체적소를 자속이 통과한다고 할 때, 자속이 통과하는 단면이 미소 면적이거나 자속의 통과 경로가 미소 경로일 것이다. 이 경우 퍼미언스나 자기저항은 다음과 같다.

<미소면적>:

$$dP = \frac{\mu dA}{L} \tag{3}$$

<미소경로>:

$$d\mathcal{R} = \frac{dL}{\mu A} \tag{4}$$

2.1.1 사다리꼴 요소

기존의 3차원 등가자기회로망법은 요소형상에 따라 선형기기엔 사각형 요소를 회전기기엔 부채꼴 요소를 사용하여 기기 형상의 표현에 제약을 갖는다[4-6]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 선형기기와 회전기기에 모두 적용 가능하며, 해석 대상인 SRM을 왜곡 없이 표현할 수 있는 요소가 필요하다. 이를 만족하는 요소가 그림 1의 사다리꼴 요소이며 그 퍼미언스 계산과정은 다음과 같다.

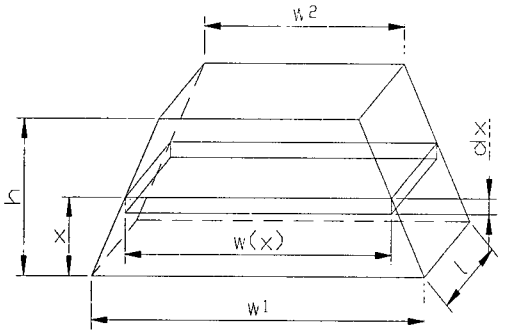


그림 1 사다리꼴 요소

Fig. 1 Trapezoidal Element

자속 경로를 직교좌표계상 x방향으로 가정할 때 요소 내 미소 체적의 퍼미언스는 다음과 같다.

$$dP_x = \mu \frac{ldx}{w(x)} \quad \left(w(x) = w_1 + \frac{w_2 - w_1}{h} x \right)$$

여기서, μ는 요소 재질에 따른 투자율을, w_1은 요소 밑면의 폭을, w_2은 요소 윗면의 폭을, x는 요소 내 임의 높이를, dx는 미소 체적소의 높이를, h는 요소의 높이를, l은 요소의 깊이를 표현한다. 따라서 요소의 퍼미언스는 다음과 같다.

$$P_x = \int_0^h dP_x = \mu l \frac{h}{w_2 - w_1} \int_{w_1}^{w_2} \frac{dw(x)}{w(x)}$$

$$= \mu \frac{lh}{w_2 - w_1} \ln \frac{w_2}{w_1} \tag{5}$$

(단, $w_1 \neq w_2$. $w_1 = w_2$인 경우 사각형 요소와 동일)

같은 방법으로 자속 흐름이 각각 y, z방향일 경우 사다리꼴 요소의 퍼미언스는 식 (6), 식 (7)과 같다.

$$d\mathcal{R}_y = \frac{dx}{\mu l w(x)},$$

$$\mathcal{R}_y = \int_0^h d\mathcal{R}_y = \frac{h}{\mu l (w_2 - w_1)} \ln \frac{w_2}{w_1}$$

즉,

$$P_y = \mu \frac{l(w_2 - w_1)}{h \ln \frac{w_2}{w_1}} \tag{6}$$

$$dP_z = \mu \frac{w(x)dx}{l},$$

$$P_z = \int_0^h dP_z = \mu \frac{(w_1 + w_2)h}{2l} \tag{7}$$

2.1.2 사각형 요소와 사다리꼴 요소

사다리꼴 요소의 실용 가능성을 보이기 위해 사다리꼴 요소의 퍼미언스로부터 사각형 요소와 사다리꼴 요소의 퍼미언스를 도출해 보고자 한다.

사각형 요소는 사다리꼴 요소에서 $w_1 = w_2$인 경우이다.($(w_1 - w_2) \to 0$) 다음은 사다리꼴 요소의 퍼미언스 식에서 사각형 요소의 퍼미언스를 얻을 수 있음을 보여 준다.

$$P_x = \lim_{w_0 \to 0} \mu \frac{lh}{-w_0} \ln \left(1 - \frac{w_0}{w_1}\right)$$

$$= \mu \frac{lh}{w_1} \lim_{w_0 \to 0} \ln \left(1 - \frac{w_0}{w_1}\right)^{-\frac{w_1}{w_0}} = \mu \frac{lh}{w_1}$$

(단, $w_0 = w_1 - w_2$)

$$P_y = \lim_{w_0 \to 0} \mu \frac{-lw_0}{h \ln \left(1 - \frac{w_0}{w_1}\right)} = \mu \frac{lw_1}{h}$$

$$P_z = \mu \frac{(w_1 + w_2)h}{2l} = \mu \frac{w_1 h}{l}$$

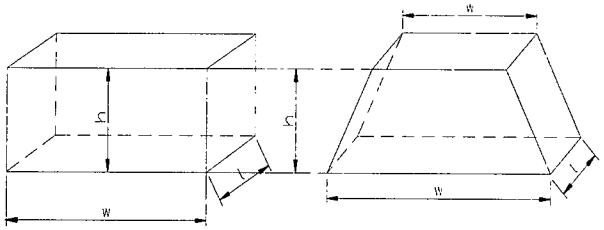


그림 2 사각형 요소와 사다리꼴 요소

Fig. 2 Rectangular Element and Trapezoidal Element

2.1.3 부채꼴 요소와 사다리꼴 요소

사각형 요소의 비교와 같이 치수만 바꿔 사다리꼴 요소를 부채꼴 요소로 만들 방법은 없다. 따라서 그림 5와 같이 형태를 변형시켜 각 변에 대응되는 길이를 얻는다.

$$P_x=\mu\frac{lh}{w_2-w_1}\ln\frac{w_2}{w_1}=\mu\frac{lr_2}{r_1\theta-(r_1+r_2)\theta}\ln\frac{r_1\theta}{(r_1+r_2)\theta}$$
$$=\mu\frac{l}{\theta}\ln(1+\frac{r_2}{r1})=P_\theta$$

$$P_y=\mu\frac{l(w_2-w_1)}{h\ln\frac{w_2}{w_1}}=\mu\frac{l\{r_1\theta-(r_1+r_2)\theta\}}{r_2\ln\frac{r_1\theta}{(r_1+r_2)\theta}}$$
$$=\mu\frac{l\theta}{\ln(1+\frac{r_2}{r_1})}=P_r$$

$$P_z=\mu\frac{(w_1+w_2)h}{2l}=\mu\frac{\{(r_1+r_2)\theta+r_1\theta\}r_2}{2l}$$
$$=\mu\frac{\theta}{2l}\{(r_1+r_2)^2-r_1^2\}=P_z$$

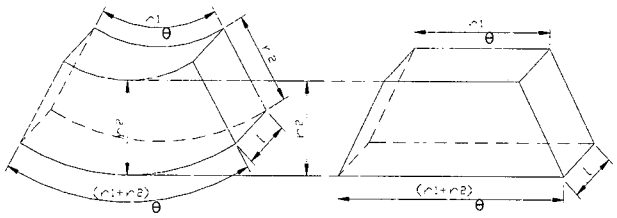


그림 3 부채꼴 요소와 사다리꼴 요소

Fig. 3 Fan Shaped Element and Trapezoidal Element

2.1.4 일반 사각형 요소의 근사 방법

SRM과 같은 회전기의 경우 자속의 주된 통로인 치를 기준으로 사다리꼴 요소를 이용하여 요소 분할을 할 경우 분할된 요소가 사다리꼴이 아닌 일반 사각형 형상으로 분할되는 경우가 있다. 따라서 사다리꼴 요소의 퍼미언스 계산 결과를 포함하는 일반 사각형 요소의 근사 방법이 필요하다. 일반 사각형 요소를 사다리꼴 요소로 근사화하는 방법은 다음과 같다.

그림 4의 왼쪽에 나타난 일반 사각형 요소를 오른 쪽과 같이 변형 시켜 계산하면 자속의 통과 면적이나 자속의 경로를 일정하게 할 수 있다. 이러한 변형 과정은 먼저 마주보는 두 쌍의 변 중 더 평행에 가까운 두 변을 찾는다. ($\frac{\overrightarrow{AB}\times\overrightarrow{CD}}{|\overrightarrow{AB}||\overrightarrow{CD}|}\le\frac{\overrightarrow{AD}\times\overrightarrow{BC}}{|\overrightarrow{AD}||\overrightarrow{BC}|}$인 경우 $\overline{AB}$와 $\overline{CD}$) 다음으로 두 변 중 길이가 짧은 변을 찾아 중점을 M이라 하고 M에서 나머지 변에 내린 수선의 발을 H라 하자. 이제 $\overline{MH}$를 기준으로 이 변에 걸리는 미소체적소의 변을 긴 변에 평행하게 회전시키면 그림 4의 우측과 같은 결과를 얻을 수 있다.

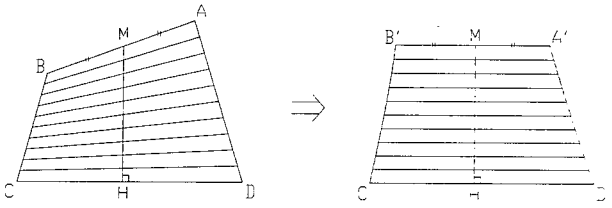


그림 4 일반 사각형 요소의 근사 방법

Fig. 4 Approximation of Tetragonal Element

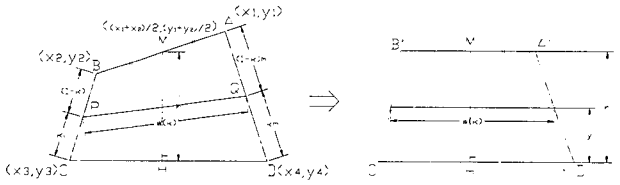


그림 5 방법일반 사각형 요소

Fig. 5 Tetragonal Element

그림 5와 같이 좌표를 정할 경우 점 P와 점 Q는 다음과 같다.

$$P(x_3+k(x_2-x_3),\ y_3+k(y_2-y_3),\ z_3+k(z_2-z_3))$$
$$Q(x_4+k(x_1-x_4),\ y_4+k(y_1-y_4),\ z_4+k(z_1-z_4))$$

따라서 $\overline{PQ}$의 길이를 $w(k)$라 할 때 직교좌표계상 x, y 방향으로 흐르는 자속 경로에 따른 미소체적소의 퍼미언스는

$$dP_x=\frac{\mu l\,dy}{w(k)}=\mu lh\frac{dk}{w(k)}$$
$$dP_y=\frac{\mu l\,w(k)}{dy}=\frac{\mu l}{h}\frac{w(k)}{dk}$$
$$(\,d\mathcal{R}_y=\frac{h}{\mu l}\frac{dk}{w(k)}\,)$$

이다.

여기서 $w(k)$는 아래와 같이 표현된다.

$$w(k)=\sqrt{(\alpha_1+k\alpha_2)^2+(\beta_1+k\beta_2)^2+(\gamma_1+k\gamma_2)^2}$$

$$\begin{pmatrix}\alpha_1=x_4-x_3,\ \ \alpha_2=x_1-x_2+x_3-x_4\\ \beta_1=y_4-y_3,\ \ \beta_2=y_1-y_2+y_3-x_4\\ \gamma_1=x_4-x_3,\ \ \gamma_2=x_1-x_2+x_3-x_4\end{pmatrix}$$

$$=\sqrt{(\alpha_2^2+\beta_2^2+\gamma_2^2)k+2(\alpha_1\alpha_2+\beta_1\beta_2+\gamma_1+\gamma_2)k+(\alpha_1^2+\beta_1^2+\gamma_1^2)}$$

$p=\alpha_2^2+\beta_2^2+\gamma_2^2$라고 하면

i) $p=0$인 경우

$$p=0\Leftrightarrow(\alpha_2=0)\wedge(\beta_2=0)\wedge(\gamma_2=0)$$

$$\Leftrightarrow(\frac{x_1+x_3}{2}=\frac{x_2+x_4}{2})\wedge(\frac{y_1+y_3}{2}=\frac{y_2+y_4}{2})$$

$$\wedge(\frac{z_1+z_3}{2}=\frac{z_2+z_4}{2})$$

$\Leftrightarrow$(대각선의 중심이 일치)

$\Leftrightarrow$(평행사변형 (직사각형))

$$w(k)=\sqrt{\alpha_1^2+\beta_1^2+\gamma_1^2}$$

$$P_x=\int_0^1\mu lh\frac{dk}{w(k)}=\frac{\mu lh}{\sqrt{\alpha_1^2+\beta_1^2+\gamma_1^2}} \quad (8)$$

$$\mathcal{R}_y=\int_0^1\frac{h}{\mu l}\frac{dk}{w(k)}=\frac{h}{\mu\sqrt{\alpha_1^2+\beta_1^2+\gamma_1^2}}$$

즉,

$$P_y=\frac{\mu N\sqrt{\alpha_1^2+\beta_1^2+\gamma_1^2}}{h} \quad (9)$$

ii) $p\neq0$인 경우

$$q=\frac{\alpha_1\alpha_2+\beta_1\beta_2+\gamma_1\gamma_2}{\alpha_2^2+\beta_2^2+\gamma_2^2},$$

$$r=\sqrt{\frac{\alpha_1^2+\beta_1^2+\gamma_1^2}{\alpha_2^2+\beta_2^2+\gamma_2^2}-\left(\frac{\alpha_1\alpha_2+\beta_1\beta_2+\gamma_1\gamma_2}{\alpha_2^2+\beta_2^2+\gamma_2^2}\right)^2}$$

$$=\sqrt{\frac{(\alpha_1\beta_2-\alpha_2\beta_1)^2+(\beta_1\gamma_2-\beta_2\gamma_1)^2+(\gamma_1\alpha_2-\gamma_2\alpha_1)^2}{\alpha_2^2+\beta_2^2+\gamma_2^2}}$$

이라고 하면,

$$w(k)=\sqrt{p}\sqrt{k^2+2qk+q^2+r^2}=\sqrt{p}\sqrt{(k+q)^2+r^2}$$

$$P_x=\int_0^1\mu lh\frac{dk}{w(k)}=\frac{\mu lh}{\sqrt{p}}\int_0^1\frac{dk}{\sqrt{(k+q)^2+r^2}}$$

$$=\frac{\mu lh}{\sqrt{p}}\int_q^{1+q}\frac{dm}{\sqrt{m^2+r^2}} \quad (\text{단, } m=k+q)$$

$$\mathcal{R}_y=\int_0^1\frac{h}{\mu l}\frac{dk}{w(k)}=\frac{h}{\mu N\sqrt{p}}\int_0^1\frac{dk}{\sqrt{(k+q)^2+r^2}}$$

$$=\frac{h}{\mu N\sqrt{p}}\int_q^{1+q}\frac{dm}{\sqrt{m^2+r^2}} \quad (\text{단, } m=k+q)$$

iii) $r=0$인 경우

$$P_x=\frac{\mu lh}{\sqrt{p}}\int_q^{1+q}\frac{dm}{|m|}=\frac{\mu lh}{\sqrt{p}}\ln\left|1+\frac{1}{q}\right|$$

$$\mathcal{R}_y=\frac{h}{\mu N\sqrt{p}}\int_q^{1+q}\frac{dm}{|m|}=\frac{h}{\mu N\sqrt{p}}\ln\left|1+\frac{1}{q}\right|$$

$$P_y=\frac{\mu N\sqrt{p}}{h}\left(\ln\left|1+\frac{1}{q}\right|\right)^{-1}$$

iv) $r\neq0$인 경우

$$P_x=\frac{\mu lh}{\sqrt{p}}\left[\ln(m+\sqrt{m^2+r^2})\right]_q^{1+q}$$

$$=\frac{\mu lh}{\sqrt{p}}\ln\frac{1+q+\sqrt{(1+q)^2+r^2}}{q+\sqrt{q^2+r^2}}$$

$$\mathcal{R}_y=\frac{h}{\mu N\sqrt{p}}\left[\ln(m+\sqrt{m^2+r^2})\right]_q^{1+q}$$

$$=\frac{h}{\mu N\sqrt{p}}\ln\frac{1+q+\sqrt{(1+q)^2+r^2}}{q+\sqrt{q^2+r^2}}$$

즉,

$$P_y=\frac{\mu N\sqrt{p}}{h}\left(\ln\frac{1+q+\sqrt{(1+q)^2+r^2}}{q+\sqrt{q^2+r^2}}\right)^{-1}$$

x, y방향으로 흐르는 자속 경로에 퍼미언스와는 달리 z방향으로의 퍼미언스는 일반 사각형 요소에서도 정확한 값을 구할 수 있다. 그 과정은 다음과 같다.

$$P_z=\frac{\mu A_z}{l}=\frac{\mu}{l}(S_1+S_2)=\frac{\mu}{2l}(2S_1+2S_2) \quad (10)$$

여기서 A_z는 자속 경로가 Z방향일 경우 단면적이며, S_1, S_2는 일반 사각형을 2개의 삼각형으로 나눌 경우 두 삼각형의 면적이다.

$$2S_1=\sqrt{(a_xb_y-a_yb_x)^2+(a_yb_z-a_zb_y)^2+(a_zb_x-a_xb_z)^2}$$

$$2S_2=\sqrt{(c_xd_y-c_yd_x)^2+(c_yd_z-c_zd_y)^2+(c_zd_x-c_xd_z)^2}$$

$$\vec{a}=(a_x,a_y,a_z)=(x_2-x_1,y_2-y_1,z_2-z_1)$$

$$\vec{b}=(b_x,b_y,b_z)=(x_4-x_1,y_4-y_1,z_4-z_1)$$

$$\vec{c}=(c_x,c_y,c_z)=(x_4-x_3,y_4-y_3,z_4-z_3)$$

$$\vec{d}=(d_x,d_y,d_z)=(x_2-x_3,y_2-y_3,z_2-z_3)$$

2.1.5 회전자의 이동을 고려하는 방법

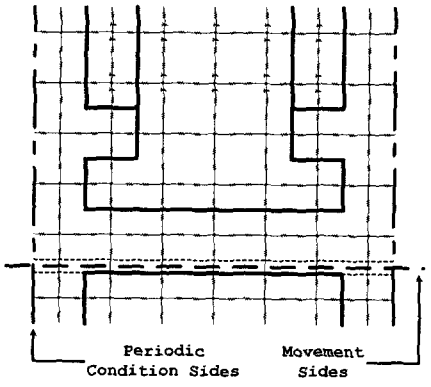
3차원 등가자기회로망법은 3차원 유한요소법에 비해 회전자 또는 이동자의 이동시 요소 재분할이 필요 없어 계산 시간이 현저히 단축되는 장점을 갖고 있다. 즉, 이동시 회로의 연결 상태만을 바꾸어 이동을 고려하므로 퍼미언스의 재계산 과정이 필요하지 않다. 그림 6 (a)은 이동 전을, 그림 6 (b)은 이동 후를 나타낸다. 그림 6 (b)에서와 같이 이동 후 회로 연결이 끊어진 요소는 주기 조건으로 처리해 연결 상태를 재정리한다.

3 사례연구

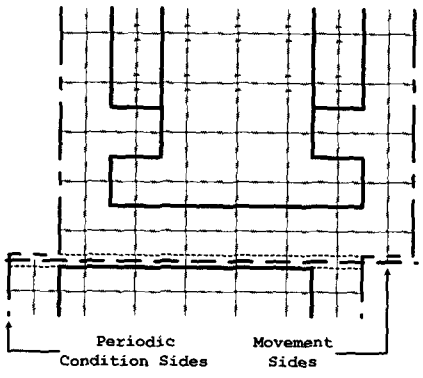
3.1 퍼미언스의 계산

본 논문에서 제시한 방법의 타당성 검토를 위하여 스위치드 릴럭턴스 모터(SRM)를 사다리꼴 요소를 이용한 3차원 등가자기회로망법을 적용하여 해석하였다. SRM은 축방향의

누설자속성분이 적어 2차원 해석시에도 비교적 정확한 해석이 가능하나 본 논문에서는 제시한 방법의 타당성을 검토하고자 3차원 등가자기회로망법을 적용하여 해석하고, 이 결과를 2차원 유한요소법의 결과와 비교 검토하였다.



(a) 이동 전



(b) 이동 후

그림 6 이동 해석

Fig. 6 Analysis with Movement

표 1 기본설계 모델의 주요사양

Table 1 Specification of Analysis Model

항 목	값	단위	항 목	값	단위
정격 출력	22	W	코어 재질	S18	
정격 전압	12	V	고정자 극호	30	°
정격 전류	6	A	회전자 극호	30	°
동작 속도	500	rpm	고정자 요크 두께	6	mm
상 수	3	Phase	회전자 요크 두께	6	mm
고정자 극수	6	Pole	고정자 지름	50×2	mm
회전자 극수	4	Pole	회전자 지름	20×2	mm
턴 수	80	T/Pole	Shaft 지름	4×2	mm
권선 저항	1.0	Ω	공극 길이	0.3	mm
코일 선경	0.75	mm	적층 폭	40	mm

3.2 해석 모델

해석 대상인 SRM은 직류전동기의 고정자 권선법과 같은 집중권을 갖는 고정자와 권선이 없는 브러시리스형 회전자로 이루어져 있다. 정격 전압 12V, 정격 전류 6A, 정격 출력 22W인 해석 대상은 3상 6-4극 구조를 갖으며 고정자 및 회전자 극호가 모두 30°인 모델이다. 자세한 사양은 표 1에 나타나 있다.

3.3 해석 결과

그림 7은 해석 대상의 요소분할도이다. 총 90,720개의 사다리꼴 요소가 사용되었고, 효율적인 해석을 위하여 1/2 모델로 구성, 반주기조건을 사용하여 해석하였다. 또한 회전자의 이동은 요소의 재분할이 없이 자기회로의 연결만을 바꾸는 방법을 사용하여 실용적인 이동 해석을 시행하였다. 요소 분할은 토오크 계산의 기준이 되는 공극을 중심으로 이루어졌으며, 공극을 반경방향으로 3층으로 나누고 매 3°마다 하나의 요소를 생성하였다.

3차원 해석은 z축 방향에 따른 자속의 흐름을 관찰하여, 이에 의한 기기 특성을 고찰함에 그 목적이 있다. SRM의 회전자와 고정자의 치가 완전 정렬되었을 시 z축 방향의 위치에 따른 자속의 양을 확인하여 z축 방향의 프린징과 누설성분을 알아보았다.

해석 대상은 적층 폭이 40㎜이며 z축 -20㎜에서 20㎜에 위치한다. 그림 8 (a)는 z가 19㎜인 위치(기기 내부)에서, 그림 8 (b)는 z가 21.5㎜인 위치(기기 표면)에서의 자속밀도 분포도이다. 이 그림에서 자속의 프린징 현상을 관찰할 수 있으며 이를 수치로 표현한 것이 그림 9 (a) - (d)이다. 그림 9 (a)의 비교로부터 SRM은 프린징과 누설 성분이 그리 크지 않은 기기임을 알 수 있다.

따라서 새로운 요소의 3차원 등가자기회로망법에 의한 SRM의 해석 결과는 2차원 유한요소법의 해석 결과와의 비교를 통해 그 정확성을 살펴보아도 될 것이다.

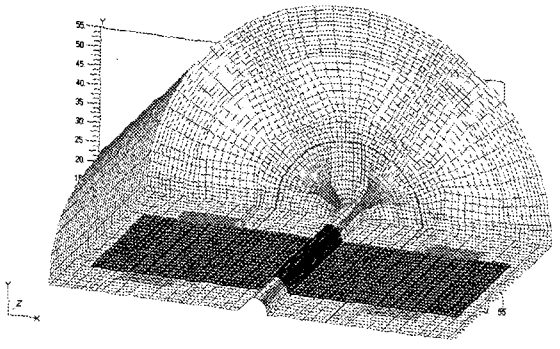
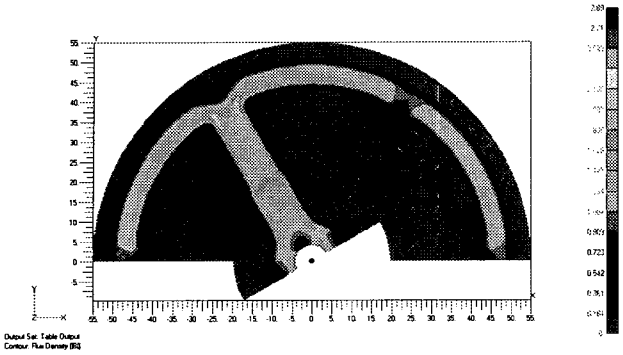
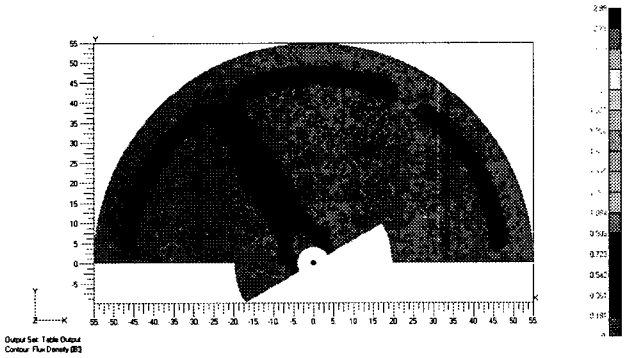


그림 7 SRM의 요소분할도

Fig. 7 Meshed SRM Model



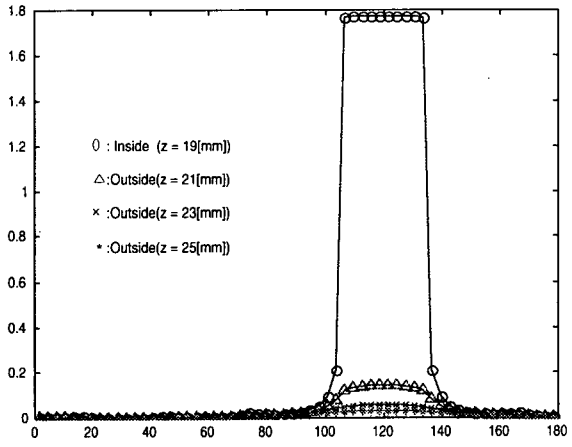
(a) z = 19mm, 기기 내부



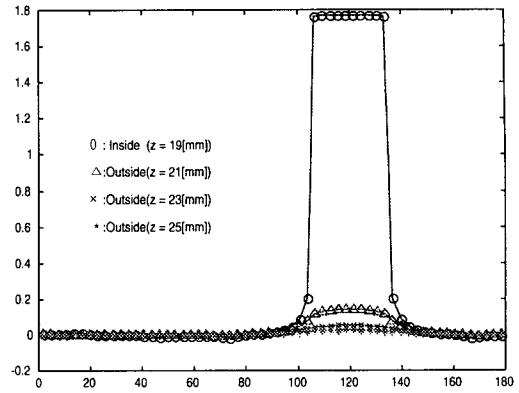
(b) z = 21.5mm, 기기 표면

그림 8 치 정렬시 자속밀도

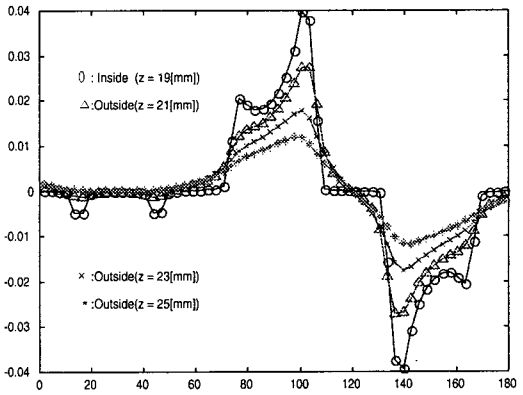
Fig. 8 Flux Density on Aligned Position



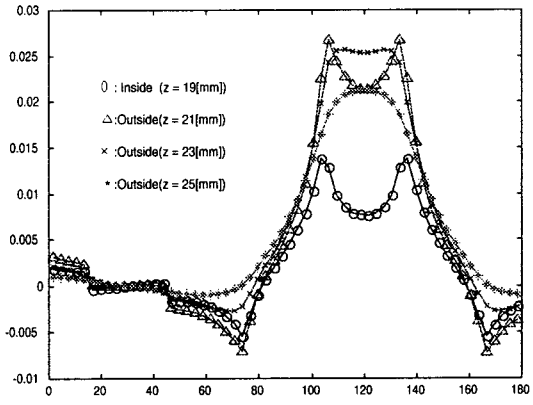
(a) |B|



(b) B_r



(c) B_θ



(d) B_z

그림 9 치 정렬시 z값에 따른 공극 자속밀도

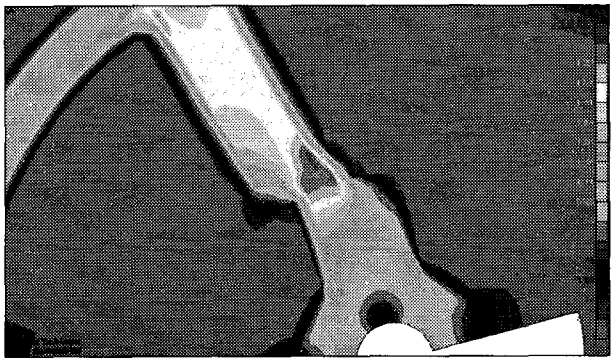
Fig. 9 Air-gap Flux Density on z Position When Aligned

3.4 유한요소법과의 비교

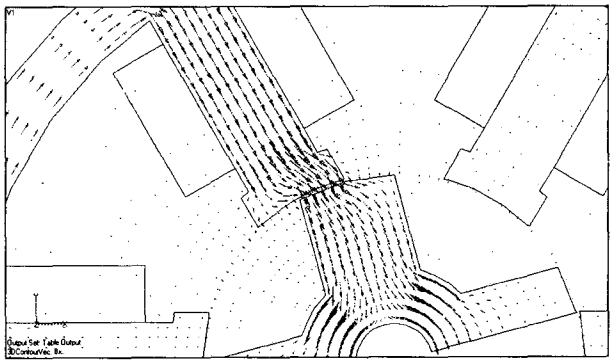
3차원 등가자기회로망법과 비교를 위해 2차원 유한요소 모델은 공극을 3층 3°로 분할하여 구성되었다.(참고로 공극을 동일 각도로 나눌 경우 공극상의 2차원 삼각형 요소의 개수는 z축 한 층의 3차원 사다리꼴 요소 개수의 2배이다.)

두 해석 결과의 비교는 자속밀도와 토오크의 비교를 통하여 시행되었다. 먼저 회전자의 위치가 15°인 경우, 즉 회전자와 고정자의 치가 15° 정렬된 상태에서의 자속 밀도를 비교해 보았다. 그림 10 (a)은 3차원 등가자기회로망법에 의한 자속밀도 분포도이며, 그림 10 (b)은 자속밀도 벡터도이다.

그림 11 (a)는 두 해석법에 의한 자속밀도 값을 비교한 것이며, 그림 11 (b)과 12 (c)은 각각 자속밀도의 r성분과 θ 성분을 비교한 그림이다. 세. 그림의 비교를 통해 두 해석 결과의 차이는 거의 없음을 알 수 있으며, 사다리꼴 요소를 적용한 등가자기회로망법의 결과를 충분히 인정할 수 있다. 두 번째로 a상만 전류를 인가하여 회전자와 고정자 치가 정렬되지 않은 상태에서 완전 정렬되는 상태까지 30°동안 매 3°마다의 토오크를 계산하여 비교하였다. 그림 12에서와 같이 두 해석법의 결과는 거의 일치하며 그 평균 오차는 약 1.1%인 것으로 나타났다.



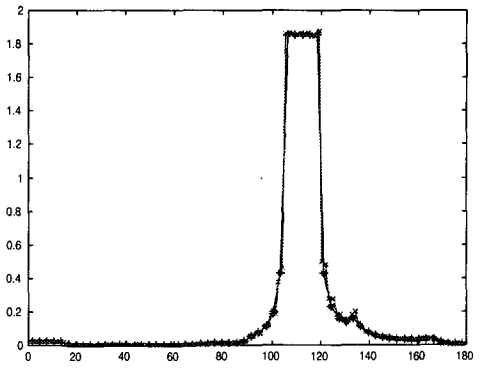
(a)



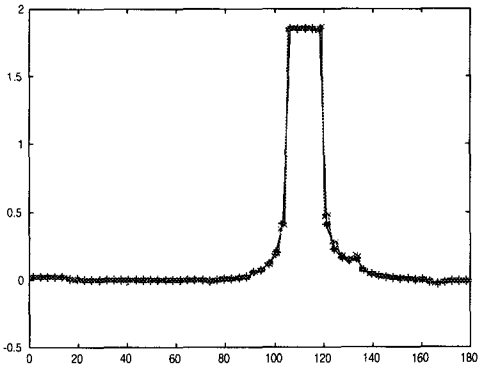
(b)

그림 10 15° 정렬시 자속밀도 (z = 0 mm)

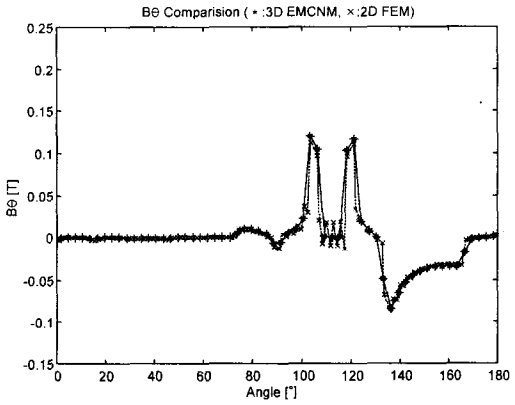
Fig. 10 Flux Density on 15° Aligned (z = 0 mm)



(a) |B|



(b) B_r



(c) B_θ

그림 11 3차원 자기등가회로망법과 2차원 유한요소법에 의한 공극자속밀도의 비교

Fig. 11 Air-gap Flux Density Comparison with 3D EMCNM and 2D FEM

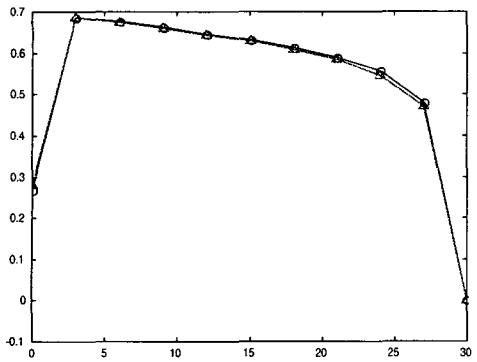


그림 12 3차원 자기등가회로망법과 2차원 유한요소법에 의한 토오크 특성의 비교

Fig. 12 Torque Comparison with 3D EMCNM and 2D FEM

4. 결 론

3차원 수치해석 기법으로서의 등가자기회로망법은 유한요소법에 비해 시간적 이득은 컸으나 형상 표현의 한계로 인해 그 적용이 쉽지 않았다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 사다리꼴 요소를 사용하였으며 이 요소가 이중 돌극구조인 SRM을 왜곡 없이 표현하여 해석할 수 있음을 사례연구를 통해 보여 주었다.

사다리꼴 요소는 기존의 선형기기 해석시 사용되었던 사각형 요소와 회전기기 해석시 사용되었던 부채꼴 요소를 모두 포괄하며, 복잡한 형상의 기기를 해석할 경우 요소분할시 발생될 수 있는 오차를 크게 줄임으로써 해석을 보다 정확하게 하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] Jin Hur, "A method for reduction of cogging torque in brushless DC motor considering the distribution of magnetization by 3D EMCN", IEEE Trans. on Magnetics, Vol 34 p.3532 -3535 , 1998.

[2] Jin Hur, Yen-Do Chun, Ju Lee, Dong-Seok Hyun, "Dynamic analysis of radial force density in brushless DC motor using 3-D equivalent magnetic circuit network method", IEEE Trans. on Magnetics Vol. 34 p.3142 -3145, 1998

[3] Vlado Ostovic, "Dynamics of Saturated Electric Machines", Springer-Verlag, 1989

[4] 임 달호, 홍 정표, "3차원 등가자기회로망법에 의한 영구자석모터의 자계해석", 전기학회 논문지 43권 9호, pp.1432-1439, 1994년 9월

[5] 허 진, "3차원 정자계 해석을 위한 등가자기회로망법에 관한 연구", 한양대학교 대학원 박사학위논문, 1999년 2월

[6] 전 연도, "3차원 등가자기회로망법을 이용한 Brushless DC Motor의 특성 해석", 한양대학교 대학원 석사학위 논문, 1998년 2월

[7] T. J. E Miller, "Switched Reluctance Motors and Their Control," Oxford Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1993.

[8] Peter Cambell, "Permanent Magnet Materials and Their Application", Cambridge University Press, 1994.

[9] 안 진우, 황 영문, "스위치드 릴럭턴스 전동기 구동과 응용", 신지서원, 1998

[10] S. J. Salon, "Finite Element Analysis of Electrical Machines", Kluwer Academic Publishers, 1995.

저 자 소 개

김 솔 (金 솔)

1970년 6월 10일 생. 1997년 한양대 전기공학과 졸업. 1999년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 02-2290-0349

Fax : 02-2295-7111

E-mail : slamsol@ihanyang.ac.kr

이 주 (李 柱)

1963년 8월 30일 생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 SYSTEM 정보과학연구과 졸업(공박). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 공대 전자전기공학부 조교수.

Tel : 02-2290-0342

Fax : 02-2295-7111

E-mail : julee@hanyang.ac.kr