

표면부착형 영구자석 전동기의 정현파 공극자속밀도 연구

論 文

56-9-9

A Study on Sinewave Air Gap Flux Density of Surface Type Magnet Motor

金 現 哲[†] · 金 長 睦^{*} · 金 喆 遇^{**}

(Hyun-Cheol Kim · Jang-Mok Kim · Cheul-U Kim)

Abstract - This report describes the analytical characteristic of sinewave air gap flux density for the brushless AC motor with surface permanent magnet. The analysis of sinewave air gap flux density is the key to expect the performance of back EMF for the design of brushless AC motor. The numerical analysis and FEM analysis are performed to adopt radial and parallel flux magnetization of magnet on the rotor. And it is also executed to vary the magnet arc angle and arc radius for the condition of constant and non constant air gap. This report is focused on the characteristic of sinewave air gap flux density for permanent magnet of surface brushless AC motor. This results also have more reliable data against the previous paper which had the representative numerical analysis of air gap flux density[1][2].

Key Words : Air Gap Flux Density, Sinewave Air Gap Flux Density, Surface Magnet

1. 서 론

영구자석을 고정자 또는 회전자 표면에 부착하는 방식인 표면부착형 영구자석을 갖는 브러시리스 전동기는 영구자석의 위치 또는 형상에 따라 공극자속밀도가 다양한 모양으로 나타난다.

표면부착형 영구자석 전동기에 사용되는 공극자속밀도는 직류기 특성을 갖는 사다리형 역기전력에 필요한 사다리형 공극자속밀도와 교류기 특성을 갖는 정현파 역기전력에 필요한 정현파 공극자속밀도가 필요하게 된다. 표면부착형 영구자석은 부착하는 위치에 따라 크게 2가지로 나눌 수 있다. 일반적으로 고정자에 부착하는 영구자석은 브러시가 있는 영구자석형 직류(PMDC, Permanent Magnet DC) 전동기가 있다. 회전자에 부착하는 영구자석은 사각과 상전류 및 사다리형 역기전력을 갖는 브러시리스 직류(BLDC, Brushless DC) 전동기와 정현파 상전류 및 정현파 역기전력을 갖는 브러시리스 교류(BLAC, Brushless AC) 전동기가 있다. 또한 표면부착형 영구자석을 갖는 브러시리스 전동기는 착자에 따라 경방향 착자(radial flux magnetizing)와 평행방향 착자(parallel flux magnetizing)를 할 수 있다. 경방향 착자는 영구자석의 내/외면 표면과 직각되게 자속이 착자가 된다. 평행방향 착자는 영구자석 내/외면에 극방향을 가지며 자속이 서로 평행하게 착자가 된다.

브러시리스 교류 전동기는 정현파의 역기전력과 상전류의 곱에 의해 일정한 출력이 만들어 진다. 정현파 역기전력을 만들기 위해서는 공극자속밀도가 정현파가 되어야 하며 표면부착형 영구자석을 갖는 브러시리스 교류 전동기에 대해 영구자석 형상에 따른 정현파 공극자속밀도 분석이 필요하다. 브러시리스 교류전동기의 역기전력과 전기자 전류가 이상적인 정현파가 아닌 경우는 토크 맥동이 발생되며, 이를 줄이기 위해 역기전력 파형의 근원인 공극자속밀도를 가능한 정현파에 가깝게 구현을 하여야 한다. 회전자에 부착되는 표면부착형 영구자석인 경우는 착자, 형상가변, 극수변화에 의해 원하는 공극자속밀도 구현을 할 수 있다. 극수변화에 의한 방법은 이미 N. Boules에 의해 그 특성이 알려져 있다[1].

본 논문은 표면부착형 영구자석 전동기의 회전자에 부착되는 영구자석에 의해 만들 수 있는 정현파 공극자속밀도에 대한 수치적 해석을 위해 이미 발표된 공극이 일정한 경우 [1]와 영구자석의 표면형상 변경한 경우 [2] 등을 활용하여 정현파 공극자속밀도 특성을 분석해 보았다. 공극이 일정한 경우의 기 발표된 논문에서는 해석결과 등의 결과를 일부 활용하였고, 영구자석의 표면형상 변경 경우의 기 발표된 논문에서의 시뮬레이션 결과 등이 명확하지 않는 부분에 대해 본 논문에서는 완전한 결과 등을 도출하였다.

분석은 정현파 공극자속자속밀도를 만들 가능성이 있는 모델을 구분하여 분석을 해 보았다. 분석을 위한 모델은 다음과 같다.

- 1) 영구자석의 회전자 부착(공극 일정)
 - 평행방향 착자
- 2) 영구자석의 회전자 부착(공극 비일정)
 - 경방향 착자
 - 평행방향 착자

[†] 교신저자, 學生會員 : 國防科學研究所 研究員

E-mail : hckim@add.re.kr

^{*} 正 會 員 : 釜山大 電子電氣通信工學部 教授 · 工博

^{**} 正 會 員 : 釜山大 電子電氣通信工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2007年 5月 31日

最終完了 : 2007年 7月 31日

2. 공극자속밀도의 이론적 해석

2.1 공극자속밀도의 해석적 모델링

브러시리스 전동기의 공극자속밀도 해석을 위해 전기자 권선이 놓여 있는 요소들을 매끈한 실린더라고 가정을 한다. 슬롯효과를 해석을 간단히 하기 위해 생략한다. 브러시리스 전동기의 해석적 모델은 그림 1과 같이 나타낼 수 있으며, 영구자석은 고정자 또는 회전자에 부착할 수 있으며 식으로는 $c_1 = b$ 또는 $c_2 = a$ 로 대치하여 얻을 수 있다.

해석을 위해 다음과 같은 가정을 한다.

- 1) 단부 효과(end effect)는 무시한다.
- 2) 회전자와 고정자에서 철부분의 투자율은 무한하다고 가정한다.
- 3) 모델의 모든 영역의 전도율은 0 이라고 가정한다.
- 4) 영구자석은 자화방향에 대해 무방향성, 등방성 및 선형적 감자 특성을 갖는다고 가정한다.

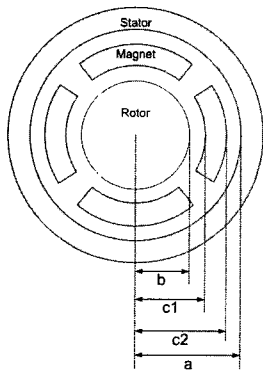


그림 1 브러시리스 전동기의 해석적 모델
Fig. 1 Analytical model of brushless motor

그림 2는 투자율이 무한대인 2개의 동심 실린더(고정자와 회전자) 사이에 $r=c$ 인 곳에 위치한 한 코일에 전류 i 가 흐를 때의 자속밀도는 2차원 스칼라포텐셜(Ω)에 대한 라플라스 방정식의 해를 구해서 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \Omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Omega}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Omega}{\partial \theta^2} = 0 \quad (1)$$

식 (1)의 해를 구하면 식 (2), (3)과 같다.

$r < c$ 에 대해서는

$$\Omega = -4i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \frac{a^n}{b^n} \left(\frac{c^{2n} + a^{2n}}{a^{2n} - b^{2n}} \right) \left(\frac{r^n}{b^n} - \frac{b^n}{r^n} \right) \sin(n\xi) \cos(n\theta) \quad (2)$$

$r > c$ 에 대해서는

$$\Omega = -4i \left[\xi + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \frac{a^n}{b^n} \left(\frac{c^{2n} + b^{2n}}{a^{2n} - b^{2n}} \right) \left(\frac{a^n}{r^n} - \frac{r^n}{a^n} \right) \right] \sin(n\xi) \cos(n\theta) \quad (3)$$

영구자석은 $2p$ 개의(p 는 극짝수) 코일로 나타낼 수 있으며, 중첩의 원리에 의해 개개의 코일에 의해 발생하는 자속 밀도를 더함으로써 구할 수 있다. 고정자 표면에서 자속밀도의 경방향 성분은 식 (4), (5)와 같다.

(1) $r = a$ 에서

$$B_{ra} = \sum_{m=0}^{\infty} 2p F_{1n} \cos(n\theta) \quad (4)$$

(2) $r = b$ 에서

$$B_{rb} = \sum_{m=0}^{\infty} 2p F_{2n} \cos(n\theta) \quad (5)$$

여기서 $n = (2m + 1)p$

$$F_{1n} = \frac{2}{\pi} \frac{\mu_0 i}{a} \frac{a^n}{c^n} \frac{c^{2n} + b^{2n}}{a^{2n} - b^{2n}} \sin(n\xi) \quad (6)$$

$$F_{2n} = \frac{2}{\pi} \frac{\mu_0 i}{a} \frac{b^n}{c^n} \frac{c^{2n} + a^{2n}}{a^{2n} - b^{2n}} \sin(n\xi) \quad (7)$$

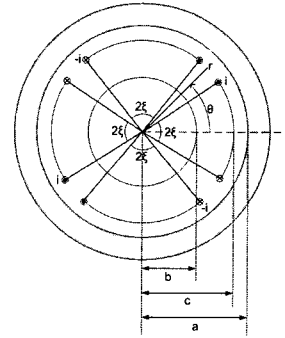


그림 2 공극에 2p개의 코일 존재할 때 해석적 모델
Fig. 2 Analytical model with 2p coils in air gap

2.2 평행방향 자화

평행방향 자화는 그림 3에서와 같이 영구자석의 중심에 평행되는 자화로서 벡터 \vec{M} 과 \vec{n} 는 영구자석 측면(ab와 cd)을 따라 크기와 방향이 일정하기 때문에 측면을 따른 전류는 일정하며 같은 크기를 갖는다. 측면 평행방향 자화의 등가전류는 식 (8)과 같다.

$$K_{mL} = M \sin(90 + \frac{\alpha}{2}) = k_m \frac{B_r}{\mu_0} \cos \frac{\alpha}{2} \quad (8)$$

영구자석 곡면(bc와 ad)에서 단위 벡터 \vec{M} 과 \vec{n} 사이의 각은 연속적으로 변하면 결과적으로 변하는 전류가 만들어진다. 곡면 평행방향 자화의 등가전류는 식 (9)와 같다.

$$K_{mC} = M \sin \theta = k_m \frac{B_r}{\mu_0} \sin \theta \quad (9)$$

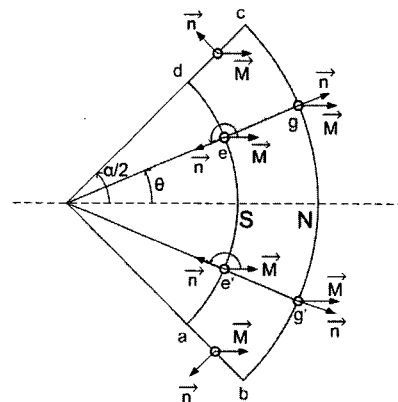


그림 3 영구자석에 대한 평행방향 자화의 해석적 모델
Fig. 3 Analytical model magnetized in parallel direction for permanent magnet

2.3 경방향 자화

경방향으로 자화된 영구자석은 그림 4에서와 같이 경방향으로 어떤 점에서도 자화 벡터 \vec{M} 을 갖는다. 그래서 곡면에서 \vec{M} 과 \vec{n} 은 전류와 나란하게 정렬되어져 있다. 곡면 경방향 자화의 등가전류는 식 (10)과 같다.

$$K_{mC} = \vec{M} \times \vec{n} = 0 \tag{10}$$

측면을 따라 \vec{M} 과 \vec{n} 사이의 각은 항상 극호각에 상관없이 90°와 같다. 측면 경방향 자화의 등가전류는 식 (11)과 같다.

$$K'_{mL} = k_m \frac{B_r}{\mu_0} \tag{11}$$

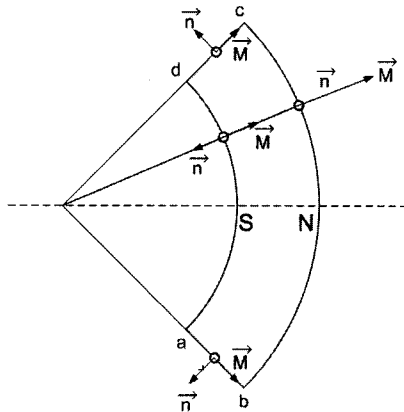


그림 4 영구자석에 대한 경방향 자화의 해석적 모델
Fig. 4 Analytical model magnetized in radial direction for permanent magnet

2.4 자극형상 변화에 따른 공극자속밀도 해석

1) 공극자속밀도 해석 모델

공극이 일정하지 않은 경우는 영구자석의 표면의 반경이 원점에 있지 아니한 경우에 해당된다. 이러한 영구자석 형상은 공극자속밀도를 정현파에 가깝게 만들기 위해 그 목적이 있다. 종래의 전자석에 의해 자극을 만들었던 동기기에 많이 행하여져 왔었다.

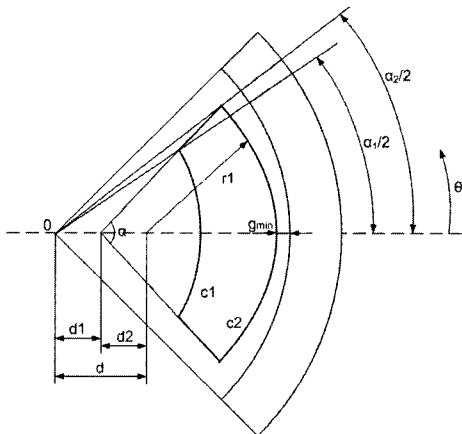


그림 5 공극이 일정하지 않은 경우의 해석적 모델
Fig. 5 Analytical model with non constant air gap

그림 5는 본 논문에서 제시하고자 했던 공극이 일정하지 않은 영구자석의 공극자속밀도의 모델이다. c1은 영구자석의 내반경, c2는 영구자석의 외반경이다. c2는 반경의 중심이 원점이 아니라 원점에서 거리 d만큼 떨어진 점에서 반경의 중심을 갖는다. alpha는 원점에서 d1만큼 거리가 떨어진 점에서 영구자석의 각도를 나타낸다. 즉, alpha는 순수 영구자석의 각이다. alpha1은 원점을 기준으로 해서 alpha의 c1점에 대한 영구자석의 각이다. alpha2는 원점을 기준으로 해서 alpha의 c2점에 대한 영구자석의 각이다.

2) alpha각에 따른 alpha1각, alpha2각의 관계

그림 6에서 보듯이 c2의 반경 중심이 원점이 아니면 원점을 중심으로 한 alpha1각과 alpha2각이 필요하게 된다. 원점을 중심으로 회전자가 각으로 회전을 하게 되면 영구자석의 공극자속밀도가 영향을 미치는 것은 원점을 기준으로 한 공간각이 그 영향을 미치게 된다. 따라서 alpha각에 따른 alpha1각과 alpha2각의 관계가 필요하게 된다.

그림 6에서 다음과 같은 식이 만들어 진다.

(가) c2

$$c2 = d \cdot \cos\theta + \sqrt{r_1^2 + (d \cdot \sin\theta)^2} \tag{12}$$

(나) alpha1각, alpha2각

$$\left[\left(d1 + \left(\frac{x_1}{\tan(\alpha_1/2)} \right) \right)^2 + x_1^2 \right] = c1^2 \tag{13}$$

$$\left[\left(d1 + \left(\frac{x_2}{\tan(\alpha_2/2)} \right) \right)^2 + x_2^2 \right] = c2^2 \tag{14}$$

c2는 공극이 일정하지 않은 경우에 대해 영구자석 외곡면의 반경을 나타낸다.

alpha1각은 평행방향 자화에 대한 공극자속밀도에서 내곡면 c1에 적용되는 공극자속밀도 각도로 적용을 하며, alpha2각은 외곡면 c2에 적용되는 공극자속밀도 각도로 적용을 하며, alpha각은 측면 L에 적용되는 공극자속밀도 각도로 적용을 한다.

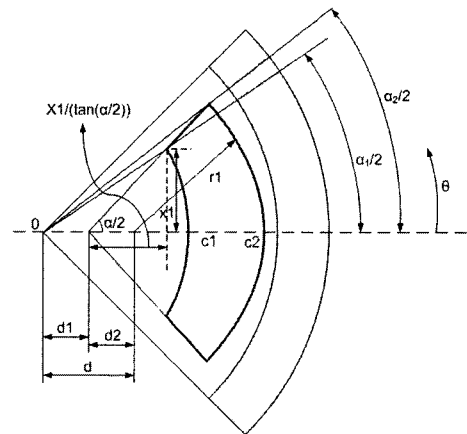


그림 6 alpha각에 따른 alpha1각, alpha2각의 관계
Fig. 6 Relations of angle alpha1, alpha2 by angle alpha

3. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 표면부착형 영구자석 전동기의 정현파 공극자속밀도 연구

변환에 따른 특성을 연구해 보았다. 자극형상 변환에는 영구자석의 극당 각도를 변화하는 방법과 영구자석의 내/외부 표면을 변화하는 방법이 있는데, 본 논문에서는 영구자석의 내/외부 표면을 변화하는 방법에 대해 고찰해 보았다.

시뮬레이션을 위한 모델에 적용된 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 전동기 파라미터(공극 일정)

Table 1 Motor parameters(constant air gap)

a : 0.03674 [m]	b : 0.02687 [m]
c1 : b	c2 : 0.03587 [m]
Br : 0.635 [Tesla]	p : 4극
recoil permeability : 1.22	

3.1 공극이 일정한 경우의 시뮬레이션 결과

공극이 일정한 경우 및 영구자석이 회전자에 부착된 경우에 대해 영구자석의 각도 변화에 따른 평행방향 자화에 의한 공극자속밀도는 영구자석에 대해 측면(L), 곡면(C1) 및 곡면(C2)의 자속밀도를 다한 결과가 공극자속밀도가 된다. 측면(L), 곡면(C1) 및 곡면(C2)의 자속밀도 및 합성된 공극자속밀도 결과는 그림 7과 같다.

회전자에 부착된 영구자석의 각도 변화에 따른 평행방향 자화에 의한 공극자속밀도의 시뮬레이션 수행한 결과는 그림 8과 같고, 관련된 FEM 해석결과는 그림 9와 같다.

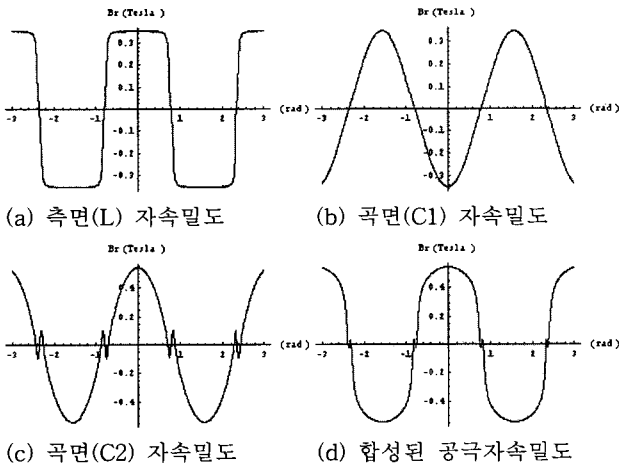


그림 7 공극자속밀도 결과(평행방향 자화, 극호각 85도)

Fig. 7 The result of air gap flux density(parallel direction magnetization/85° pole arc)

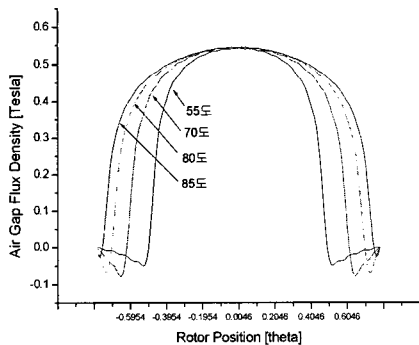
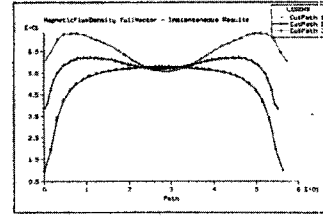
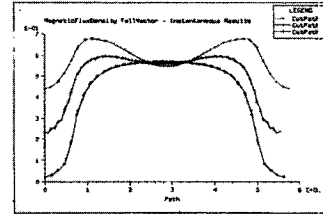


그림 8 공극자속밀도 결과 모음 (평행방향 자화)

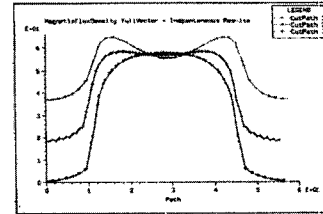
Fig. 8 The results of air gap flux density(parallel direction magnetization)



(a) 극호각 80도



(b) 극호각 70도



(c) 극호각 55도

그림 9 FEM 해석 결과(회전자 부착/평행방향 자화)

Fig. 9 The result of FEM analysis(rotor adhesion/parallel direction magnetization)

시뮬레이션 특성 결과에 의해 다음과 같이 판단할 수 있다.

가) 회전자에 부착되는 영구자석의 평행방향 자화는 결과적으로 가장 정현파에 가까운 공극자속밀도를 만들고 있다.

나) PMSM에 사용되는 정현파 공극자속밀도로 이용할 수 있음을 확인할 수 있다.

다) 시뮬레이션 결과와 FEM 해석결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

3.2 공극이 일정하지 않은 경우의 시뮬레이션 결과

시뮬레이션을 위한 모델에 적용된 파라미터는 표 2와 같다.

표 2 전동기 파라미터(공극 비일정)

Table 2 Motor parameters(non constant air gap)

a : 0.03674 [m]	b : 0.02687 [m]
c1 : b	c2 : 0.03587 [m]
d1 : 0.005 [m]	d2 : 0.002 [m]
Br : 0.635 [Tesla]	p : 4극
recoil permeability : 1.22	

3.2.1 경방향 자화

공극이 일정하지 않으며 영구자석이 회전자에 부착된 경우 및 경방향 자화가 된 공극자속밀도의 시뮬레이션 결과는 그림 10과 같다. 또한 FEM 해석 결과는 그림 11과 같다.

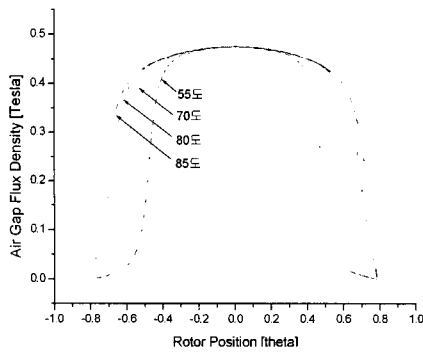
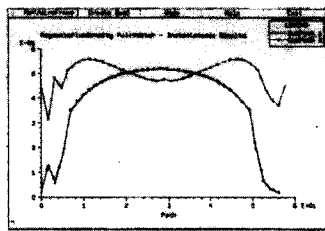
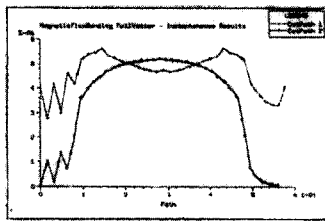


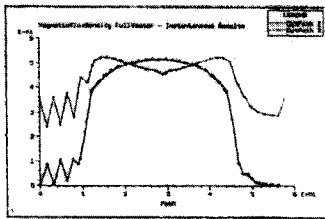
그림 10 공극자속밀도 결과모음(경방향 자화, 자극형상변화)
 Fig. 10 The results of air gap flux density(radial direction magnetization, non constant air gap)



(a) 극호각 85도



(b) 극호각 70도



(c) 극호각 55도

그림 11 FEM 해석 결과(회전자 부착/경방향 자화)
 Fig. 11 The result of FEM analysis(rotor adhesion/radial direction magnetization)

자극형상 변화에 따라 시뮬레이션시에는 1극만 그 특성을 분석할 수 밖에 없다. 왜냐하면 공극이 일정하지 않기 때문이다. 시뮬레이션 특성 결과에 의해 다음과 같이 판단할 수 있다.

가) 공극이 일정한 경우의 경방향 자화에 의한 공극자속 밀도는 사각파 공극자속밀도에 가까운 반면 공극이 일정하지 않은 경우의 경방향 자화에 의한 공극자속밀도는 정현파 모양에 가깝다.

나) PMSM에 사용되는 정현파 공극자속밀도로 이용할 수는 있으나 완벽한 정현파가 되지 않음을 확인할 수 있다.

다) 시뮬레이션 결과와 FEM 해석결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

3.2.2 평행방향 자화

공극이 일정하지 않으며 평행방향 자화에 의한 공극자속 밀도는 영구자석에 대해 측면(L), 곡면(C1) 및 곡면(C2)의 자속밀도를 더한 결과가 공극자속밀도가 된다. 측면(L), 곡면(C1) 및 곡면(C2)의 자속밀도 및 합성된 공극자속밀도 결과는 그림 12와 같다.

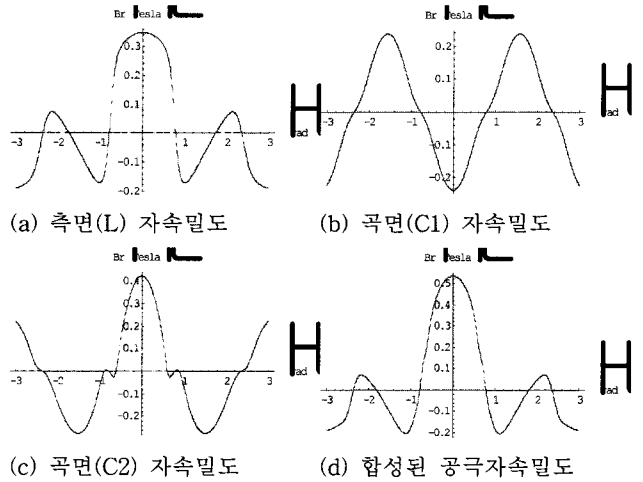


그림 12 공극자속밀도 결과(평행방향 자화, 극호각 85도)

Fig. 12 The result of air gap flux density(parallel direction magnetization, non constant air gap, 85 degree)

공극이 일정하지 않은 조건에서 회전자에 부착된 영구자석의 각도 변화에 따른 평행방향 자화에 의한 공극자속밀도의 시뮬레이션 수행한 결과는 그림 13과 같고, 관련된 FEM 해석결과는 그림 14와 같다.

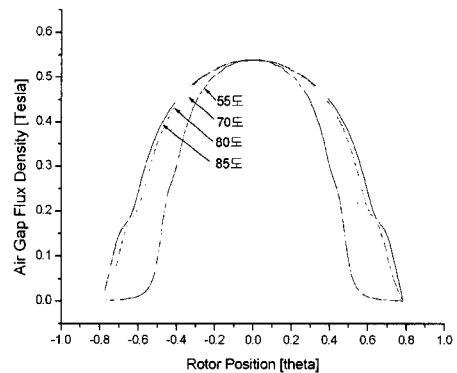
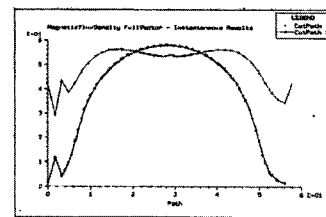
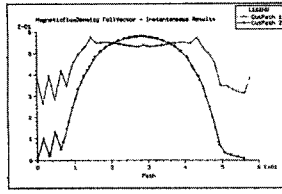


그림 13 공극자속밀도 결과 모음(평행방향 자화)

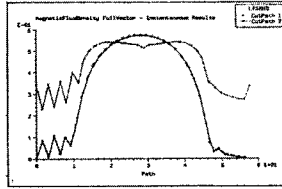
Fig. 13 The results of air gap flux density(parallel direction magnetization, non constant air gap)



(a) 극호각 85도



(b) 극호각 70도



(c) 극호각 55도

그림 14 FEM 해석 결과(회전자 부착/평행방향 자화)

Fig. 14 The result of FEM analysis(rotor adhesion/parallel direction magnetization)

자극형상 변화에 따라 시뮬레이션시에는 1극만 그 특성을 분석할 수 밖에 없다. 왜냐하면 공극이 일정하지 않기 때문이다. 시뮬레이션 특성 결과에 의해 다음과 같이 판단할 수 있다.

가) 공극이 일정한 경우의 경방향 자화에 의한 공극자속 밀도는 사각과 공극자속밀도에 가까운 반면 공극이 일정하지 않은 경우의 경방향 자화에 의한 공극자속밀도는 정현파 모양에 가깝다.

나) 공극이 일정한 경우에 비해 자극형상 변화에 의해 만들어진 공극자속밀도가 가장 정현파에 가까움을 확인할 수 있으며, PMSM에 사용되는 정현파 공극자속밀도에 가장 적합함을 확인할 수 있다.

다) 시뮬레이션 결과와 FEM 해석결과의 경향이 잘 일치함을 알 수 있다.

라) 그림 13에서 나타나는 파형 측면에서의 찌그러짐 현상은 그림 5에서 α_1 각, α_2 각 영향 및 공극이 일정치 않은 영향 등으로 판단이 되며, 향후 찌그러짐이 없는 형상에 대한 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다. FEM 해석에서도 그 영향이 있을 것으로 판단되며 향후 좀 더 정밀한 모델 해석을 통해 비교 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 표면부착형 영구자석 전동기의 정현파 공극자속밀도 연구를 위해 공극이 일정한 경우 및 형상변화에 따른 공극이 일정치 않은 경우에 대해 영구자석의 극호각 변화에 따른 연구를 고찰해 보았으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 공극이 일정한 경우는 평행방향 자화가 정현파 공극자속밀도를 만들 수 있다. 도출된 결과는 완벽한 정현파 공극자속밀도를 만들지는 못해도 어느 정도 달성하고 있다. 이 경우는 제작이 간단하기 때문에 저가의 PMSM용 영구자석에 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다.
- 2) 자극형상 변화에 따른 공극이 일정하지 않은 경우의 경방향 자화의 경우, 공극이 일정한 경우의 평행방향 자화의 공극자속밀도와 그 특성 유사하지만 정현파를

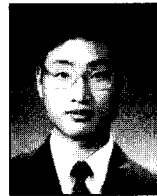
구현하기 목적의 경우에는 특성상 경방향 자화의 공극자속밀도가 불리함을 알 수 있다.

- 3) 자극형상 변화에 따른 공극이 일정하지 않은 경우의 평행방향 자화의 경우, PMSM에 가장 적합한 것으로 판단되며 자극형상 변화에 의해 완벽에 가까운 정현파를 구현할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] N. Boules, "Prediction of No Load Flux Density Distribution in Permanent Magnet Machines," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-21, No. 4, pp. 633-643, 1985.
- [2] 윤종신, 원중수 "정현파 구동 영구자석 AC 서보모터의 자석치수의 최적설계," 대한전기학회 논문지, No. 42.5, pp. 12-19, 1993.

저 자 소 개



김 현 철 (金賢哲)

1963년 5월 5일 생. 1989년 부산대 전기공학과 졸업. 1991년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992~현재 국방과학연구소 선임연구원
Tel : 055-540-6144
E-mail : hckim@add.re.kr



김 장 목 (金長睦)

1961년 8월 6일생. 1988년 부산대 전기공학과 졸업. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년~2001년 한전 전력연구원 선임연구원. 2001년 5월~현재 부산대 컴퓨터 및 정보통신연구소 연구원. 2001년 3월~현재 부산대 전자전기정보컴퓨터 공학부 조교수.
Tel : 051-510-2366
E-mail : jmok@pusan.ac.kr



김 철 우 (金喆우)

1942년 12월 5일생. 1969년 부산대 전기공학과 졸업. 1974년 일본 전기통신대학 전자공학과 졸업(석사). 1982년 일본 동경공업대 전기전자공학과 객원교수. 1986년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 부산대 전자전기정보컴퓨터공학부 교수.
Tel : 051-510-2368
E-mail : kimcu@pusan.ac.kr