

공간고조파해석을 이용한 설계 파라미터 분석

김용호\*, 손 도\*, 권순오\*, 방 량\*, 김해중\*, 홍정표\*  
한양대학교\*

Design Parameters Analysis Using Space Harmonic Analysis Methods

Yong-Ho Kim\*, Sun Tao\*, Soon-O Kwon\*, Fang Liang\*, Hae-Joong Kim\*, Jung-Pyo Hong\*  
Hanyang University\*

**Abstract** - 이 논문은 해석적 방법인 공간고조파 해석 기법을 이용하여 surface type permanent magnet synchronous machine(SPM)의 역기전력과 total harmonic distortion(THD) 등 중요한 설계 parameters에 대해 연구하였다. pole arc, slot opening 그리고 극 수/슬롯 수 등을 설계요소로 선택하여 모델의 형상 변화에 따라 parameters에 끼치는 영향을 분석하였다. 일반적으로 사용되는 유한요소해석법은 모델링, 요소분할, 해석시간 그리고 데이터 처리 등 전처리 후 작업 시간이 많이 필요하다. 제시된 방법은 쉽고 빠르게 결과를 확인 할 수 있으며, 설계변수의 변화에 따라 해석 결과를 map으로 나타낼 수 있어 SPM 초기 설계 시, 설계자에게 넓은 통찰력을 가지고 설계변수의 영향을 판단할 수 있도록 제시해 준다. 극 수/슬롯 수 2대3 구조에 대한 모델들을 검토하여 향후 같은 구조에 대해 설계하는 설계자에게 모델 형상 변화에 따른 영향도 및 THD 최적 지점을 제시해준다.

1. 서 론

SPMSM 초기 설계 시, 역기전력과 역기전력 THD는 모터의 성능에 영향을 끼치는 중요한 설계 parameters 이다. 전동기의 원하는 성능을 만족시키기 위해서 역기전력의 크기가 결정되며 THD 성분이 크게 발생하면 정현파 역기전력의 왜곡현상이 발생하기 때문에 이러한 성분들은 토크리플 같은 현상으로 나타나게 된다. 따라서 전동기의 형상 변화에 따라 역기전력 및 THD를 연구하여 목표성능 만족하며 THD 성분이 최소가 되는 전동기의 형상을 연구해야 한다. 극 수/슬롯 수는 일반적으로 많이 사용되는 2대3 구조를 선택하여 16극24슬롯, 12극18슬롯 그리고 8극 12슬롯에 대해서 해석적 방법을 이용하여 설계 변수인 pole arc, slot opening의 변화에 따라 분석하였다. 앞에서 제시한 구조에 대해 해석결과를 분석하면 설계 parameters에 극 수/슬롯 수의 영향을 확인할 수 있다. 이와 같은 방법은 설계형상의 변화에 따라 결과를 빠르게 확인할 수 있고 그 영향에 의한 설계 parameters의 경향을 쉽게 파악할 수 있다. 극수의 변화에 따라서 설계변수의 변화를 분석하기 위해 slot opening 과 pole arc를 전기각으로 표현하였다. 이렇게 설계 변수를 표현하면 극수의 변화에 따라 길이의 변화를 정규화 하여 나타낼 수 있다. 이렇게 해석적 방법을 이용하여 연구된 결과는 FEA를 통해서 그 타당성을 증명 하였다.

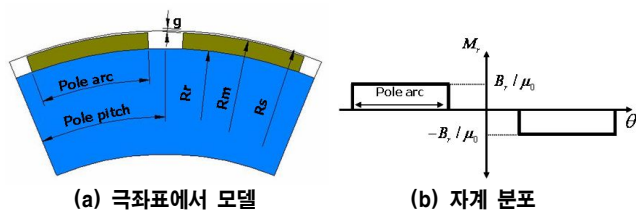
2. 본 론

2.1 공간고조파해석 방법

설계 변수의 변화에 따라 해석적 방법인 공간고조파 방법을 사용하기 위해서는 다음과 같은 가정들이 필요하다.  
(가정)

1. 철심재료의 permeability는 무한대이다.
2. 포화에 의한 영향은 무시한다.
3. 자계 시스템의 비선형 특성은 고려하지 않는다.
4. End effect는 무시한다.
5. 영구자석의 자화 방향은 parallel로 한다.

극좌표에서 SPM의 모델은 그림 1(a)와 같이 나타낼 수 있고 radial 방향으로 자계 분포는 그림 1(b)와 같이 표현할 수 있다.



<그림 1> 해석적 방법에 사용되는 모델

공기와 자석에서 자계 분포는 식 (1), (2)로 나타낼 수 있다.

$$\vec{B}_1 = \mu_0 \vec{H}_1 \quad (\text{공기영역}) \quad (1)$$

$$\vec{B}_2 = \mu_m \vec{H}_2 + \mu_o \vec{M} \quad (\text{영구자석영역}) \quad (2)$$

극좌표에서 2차원 자계를 풀이하기 위해서, 식 (3), (4)에서 제시한 연속 방정식을 풀어야 한다.

$$\frac{\partial^2 \Omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Omega}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial \theta^2} = 0 \quad (\text{공기영역}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \Omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Omega}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial \theta^2} = \frac{M_r}{r \mu_r} \quad (\text{영구자석영역}) \quad (4)$$

공기영역과 영구자석영역에서 자계분포를 얻기 위해서 경계조건을 고려하여 지배방정식을 풀이한다.

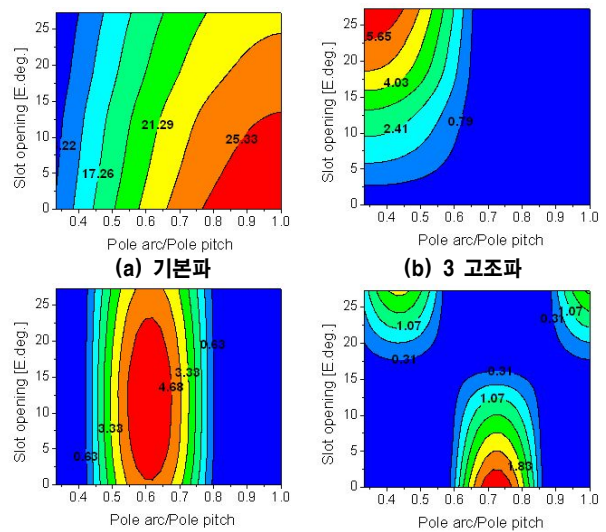
2.2 공간고조파를 이용한 parameters 분석

앞에서 제시한 해석적 방법을 이용하여 SPM의 parameters를 분석한다. 이를 위해 전동기의 specification이 제시되어야 한다. <표 1>은 설계 변수 및 대상 전동기의 형상을 나타낸다.

<표 1> 해석조건 및 대상 전동기 주요형상

목록	값
극 수/슬롯 수	16/24
자화 방향	Parallel
영구자석 두께 [mm]	4
고정자 내경/회전자 외경 [mm]	200/201.6
Br [T]	1
Recoil permeability	1.05
slot opening [E. deg.]	0-27
Pole arc/Pole pitch	0.3-1
적층길이 [mm]	30

위에서 제시한 설계변수의 범위에서 공간고조파를 이용하여 아래와 같은 결과를 얻었다.



<그림 2> 해석적 방법을 이용한 역기전력 및 THD 결과

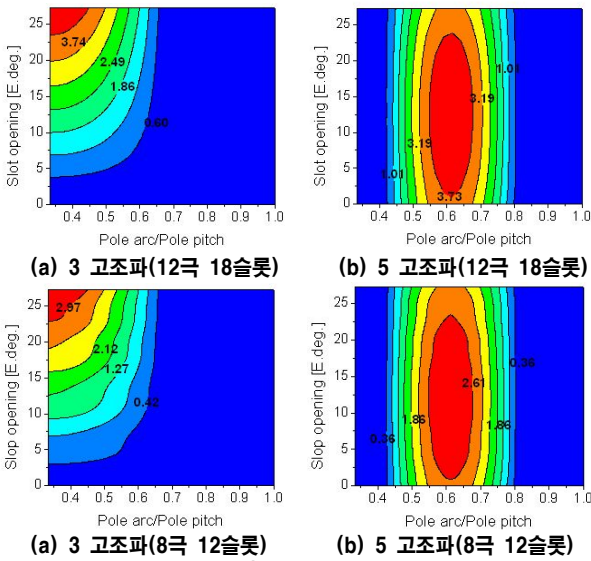
위의 결과 역기전력과 THD에 큰 영향을 끼치는 설계 변수는 Pole arc 임을 확인 할 수 있다. 고조파 성분이 크게 발생하는 범위에 대해서 식 (5)를 이용하여 전기각으로 표현하면 <표 2>와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{전기각} = \text{Pole arc} \times \text{Pole Pair} \times \text{Harmonic order} - 360n \quad (5)$$

<표 2> 해석조건 및 대상 전동기 주요형상

Harmonic order	Pole arc/Pole pitch	전기각 [deg.]
3 <sup>rd</sup>	0.30-0.46	162.0-248.4
5 <sup>th</sup>	0.55-0.68	135.0-252.0
7 <sup>th</sup>	0.68-0.77	136.8-250.2
9 <sup>th</sup>	0.53-0.60	138.6-252.0

위의 결과를 보면 각 고조파 성분이 공통적으로 135-250 [deg.] 범위에서 큰 영향을 끼친다. 이러한 현상이 극 수/슬롯 수 2대3 구조에서 다른 모델에서도 동일하게 나타나는지 확인하기 위해서 12극18슬롯, 8극12슬롯에 대해서 확인하였다.

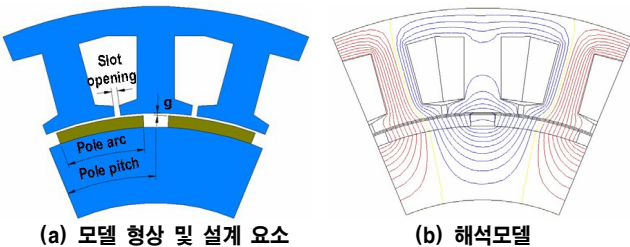


<그림 3> 극 수/슬롯 수 변화에 따른 해석 결과

<그림 3>은 극 수/슬롯 수 변화에 대해 해석한 결과이다. map에서 나타난 것처럼 16극 24슬롯, 12극 18슬롯, 8극 12슬롯 등 극 수/슬롯 수 변화에 따라 고조파 성분의 크기는 차이가 있지만 설계 변수의 변화에 따라 경향은 동일하게 발생하는 것을 확인하였다. 앞에서 제시한 극 수/슬롯 수 2대3 구조에서 극이 많아지면 역기전력 및 고조파 성분의 크기가 증가하는 경향을 갖는다.

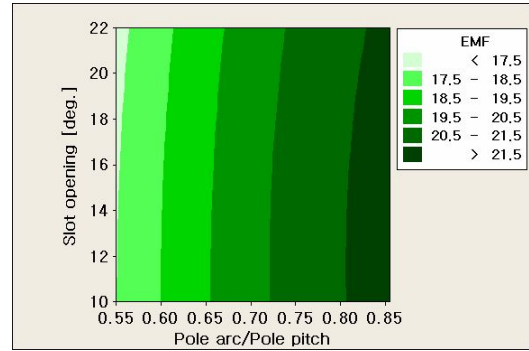
### 2.3 FEA를 이용한 parameters 분석

앞에서 제시한 해석적 방법의 결과에 대한 신뢰성을 확인하기 위해서 동일한 모델에 대해 FEA 결과와 비교하여 검증한다. Response Surface Method(RSM)을 이용하여 FEA를 실행 시, 해석모델의 주요 형상 사이는 앞에서 제시한 표1과 동일하게 하였고 해석 모델은 그림 4에 나타내었다.

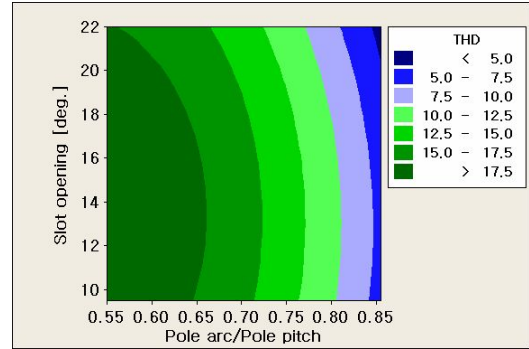


<그림 4> FEA 모델

RSM의 정확도를 높이기 위해서 slot opening과 pole arc의 설계 범위는 해석적 방법 보다 작은 범위(Pole arc/Pole pitch:0.45-0.86, Slot opening:9.5-22.5)에서 실행 하였다.



(a) 기본파



(b) THD

<그림 5> FEA를 이용한 해석결과

<그림 5>는 FEA를 이용한 해석결과를 나타낸 것이며, 결과에서 보여 주듯이 slot opening과 pole arc/pole pitch의 변화에 따른 역기전력과 THD의 경향은 공간고조파 해석 방법을 사용한 해석결과와 유사함을 확인 하였다. 해석적 방법의 정확성을 확인하기 위해서 선택된 전동기의 형상에 대해서 두 가지 방법으로 확인한 결과는 <표 3>에서 나타내었다.

<표 3> 해석적 방법과 FEA 결과 비교

비교 포인트	공간고조파해석 방법	FEA	Error
Slot opening =18.2 [E.deg] Pole arc/pole pitch =0.8	23.20 [V <sub>rms</sub> ]	21.35 [V <sub>rms</sub> ]	7.97 [%]

공간고조파해석 방법이 약 8% 정도 오차를 가지고 있지만 설계 변수의 변화에 따른 결과의 경향은 잘 반영하기 때문에 정밀한 해석결과를 요구하지 않는 초기 모델을 결정할 때 유한요소해석 방법을 사용하는 것보다 시간과 노력을 줄일 수 있다.

### 3. 결 론

SPMSM 초기 설계 시, 역기전력과 THD에 대한 설계 변수의 영향을 파악하기 위해서 해석적 방법을 사용하면 모델링 및 해석 시간을 줄일 수 있고, 설계자가 넓은 안목을 가지고 결과에 대한 선택을 할 수 있다. 극 수/슬롯 수 2대3 구조는 극 수 변화에 따라 역기전력 및 고조파 성분의 크기는 변하지만 설계 변수에 의한 영향은 동일하다. 설계 변수를 전기각으로 표현하여 정규화 시킨 해석결과와 설계자가 고조파 성분이 발생하는 공통 범위를 파악하여 모델의 형상을 결정할 때 참고할 수 있도록 도움을 줄 수 있다.

### [참 고 문 헌]

[1] NANCY BOULES, "Prediction of NO-Load Flux Density Distribution in Permanent Magnet Machines", IEEE Trans. on Industry application, vol IA-21, No. 4, May/June, 1985.  
 [2] 권순오, 홍정표 "Space Harmonic Analysis for Magnetic Field Distribution", ICEMS International Conference, pp-20, October/November 2004.