

## IPMSM 표면 전자기력 발생 매커니즘에 관한 연구

박경재\*, 이동수\*, 김용재\*\*, 문재원\*\*\*, 정상용\*

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과\*, 조선대학교 전기공학과\*\*, 한국기계전기전자시험연구원\*\*\*

### Research on the Mechanism of Surface Electromagnetic Force Production on IPMSM

Gyeong-Jae Park\*, Dongsu Lee\*, Yong-Jae Kim\*\*, Jae-Won Moon\*\*\*, Sang-Yong Jung\*  
Sungkyunkwan University\*, Chosun University\*\*, Korea Testing Certification\*\*\*

**Abstract** - 본 논문에서는 모터의 방사계 소음·진동에 영향을 미치는 표면전자기력의 발생 매커니즘을 확인하고자 한다. 고정자 표면에서 발생하는 전자기력 가운데 토크에 기여하지 않는 성분을 구분하기 위해 전자기력 성분을 Radial과 Tangential방향으로 나눈다. 이 중 토크에 기여하지 않는 Radial방향의 힘을 발생시키는 Tangential Flux Density 성분의 분포를 확인하고, 자속 포화도 분포와 어떠한 관계가 있는지 확인한다. 모터의 자속밀도 및 전자기력에 대한 계산은 유한요소해석을 기반으로 한 수치 해석기법을 통해 수행하였다.

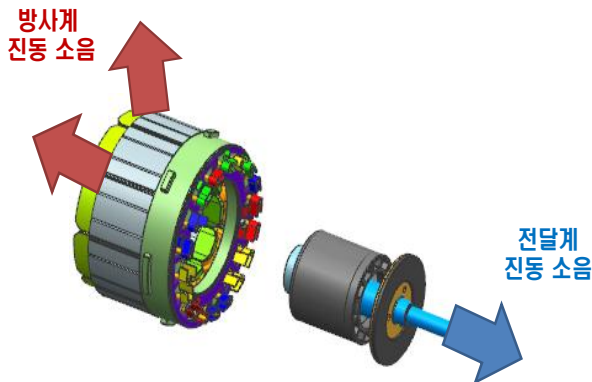
#### 1. 서 론

환경규제가 강화되고, 요구 효율 목표가 높아짐에 따라 전 세계적으로 하이브리드 자동차를 비롯한 다양한 친환경차의 개발이 진행됨에 따라 핵심 부품인 구동모터의 발달이 요구되고 있다. 요구되는 사양 또한 성능은 물론 효율 및 사용자 인터페이스 등의 부분까지 점차 확장되고 있다. 특히, 구동모터에서 발생하는 소음 및 진동은 운전자에게 불편함을 줄 뿐만 아니라, 기계 부품의 마모, 효율의 감소 등을 야기할 수 있다. 따라서 이러한 진동 및 소음 문제를 해결하기 위한 다양한 방안이 연구되고 있다.

구동모터에서 발생하는 소음 및 진동은 그 발생 경로에 따라 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 한 가지는 회전자가 회전하는 가운데 발생하는 진동이 구동축을 통해 시스템에 전달되는 전달계 소음·진동이고, 다른 한 가지는 높은 주파수를 가지는 코어의 떨림에 의해 방사방향으로 발생하는 방사형 소음·진동이다.

전달계 진동·소음의 경우, 토크에서 발생하는 맥동이 구동축에 전달되는 경우가 많은 부분을 차지하므로 낮은 주파수의 진동·소음을 발생시키며, 토크 맥동을 저감하는 설계를 통해 전달 소음의 저감이 가능하다. 방사소음의 경우, 고정자의 표면에 발생하는 전자기력이 코어를 진동하여 발생하게 되므로 주로 높은 주파수의 진동·소음이 발생하게 되는데, 이에 표면전자기력의 분포 및 특성이 중요한 영향을 미친다.

본 논문에서는 방사계 진동·소음에 영향을 미치는 표면 전자기력의 발생 매커니즘을 파악하기 위해 자속밀도 분포와 표면 전자기력간의 상관관계를 규명하고자 한다. 토크에 기여하지 않는 전자기력인 Radial Force와 자속 포화도의 관계를 확인하고자, 유한요소법을 기반으로 한 수치해석을 수행하며, 포화도가 높은 치와 낮은 치에서의 Tangential Flux Density 분포를 확인한다. 또한 각 치에서의 표면 전자기력을 수치해석적 기법을 통해 계산하고 이 가운데 Radial Force를 분리하여, 이를 Tangential Flux Density와 비교하여 결과를 확인한다.



<그림 1> 진동 및 소음의 분류

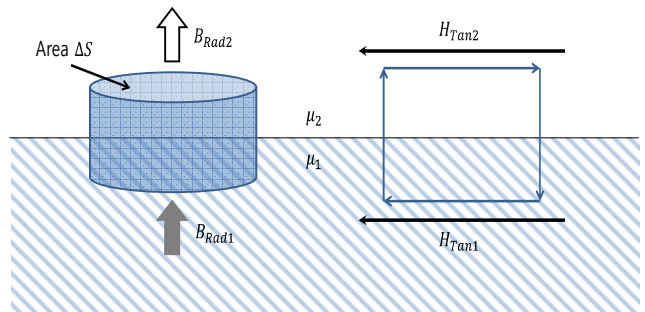
#### 2. 본 론

##### 2.1 지배 방정식

방사계 소음·진동원인 표면 전자기력의 분석을 위해 고정자 표면에서 발생하는 전자기력은 로렌츠 법칙에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (1)$$

여기서 F는 발생하는 힘을 나타내고, J는 전류밀도, B는 자속밀도를 의미한다. Tangential방향으로 발생하는 힘은 Torque에 기여하므로, 방사계 소음·진동에 기여하는 것은 Radial 방향의 힘이다. 전류가 흐르는 방향이 적층방향이므로, 식 (1)에 따라 Radial 방향으로 힘이 발생하기 위해서는 Tangential방향으로의 자속밀도가 영향을 미치게 된다.



<그림 2> 경계 조건

고정자 표면에 발생하는 자속밀도는 매질의 경계조건에 따라 그림 2과 같이 나타낼 수 있다. Radial 방향으로 발생하는 자속밀도의 경우, 가우스 법칙에 따라 식(2)-(3)과 같이 매질과 관계없이 일정하다.

암페어 법칙에 따라 정의하면, 고정자 표면에 흐르는 전류가 없으므로 식(4)와 같이 정리될 수 있다. Radial 방향의 폐곡선의 길이가 매우 작다고 가정하면 tangential방향의 자기계기는 식(5)와 같이 정리할 수 있다. 따라서 다른 매질에 따라 표면의 발생하는 tangential 자속밀도의 양은 매질의 비투자율과 비례함을 알 수 있다.

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2)$$

$$B_{Rad1} = B_{Rad2} \quad (3)$$

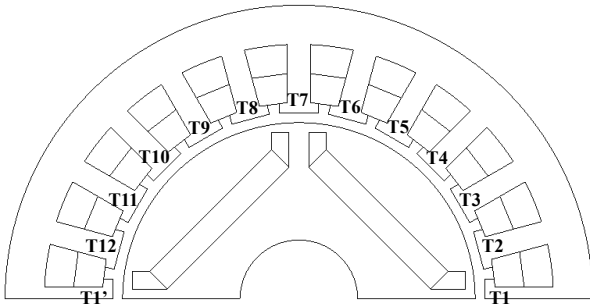
$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{L} = I = 0 \quad (4)$$

$$H_{Tan1} = H_{Tan2} \quad (5)$$

$$B_{Tan1} : B_{Tan2} = \mu_1 H_{Tan1} : \mu_2 H_{Tan2} = \mu_1 : \mu_2 \quad (6)$$

##### 2.2 유한 요소 해석

유한 요소해석을 이용한 검증에 4극 24슬롯의 매입형 영구자석 전동기를 사용하였으며, 도면 및 설계 사양은 그림 3 및 표 1에 나타내었다. 고정자 치는 Tangential Flux와 Radial Force의 크기를 비교하기 위하여 각각 T1-T12로 구분하였다.

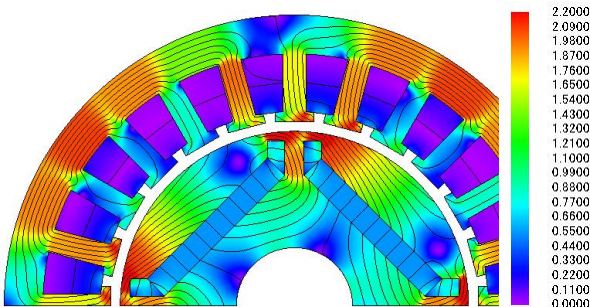


〈그림 3〉 해석 모델 도면

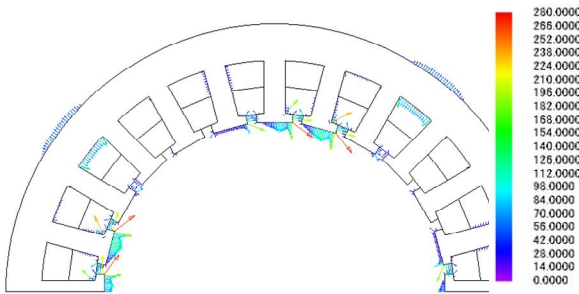
〈표 1〉 설계 사양

구분	내용
모터 타입	IPMSM
자석	Nd-Fe-B
극/슬롯 수	4극/24슬롯
전류입력	200 Apk
회전속도	3000 RPM

기본적인 유한요소해석을 수행한 자속밀도 분포 및 표면 전자기력을 그림 4에 나타내었다. 자속밀도 분포를 보면, T1, T6-T8, T12에서 높은 자속밀도분포를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 동시에 표면 전자기력을 보면 앞서 자속밀도가 높게 나타난 치에서 표면 전자기력 역시 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.



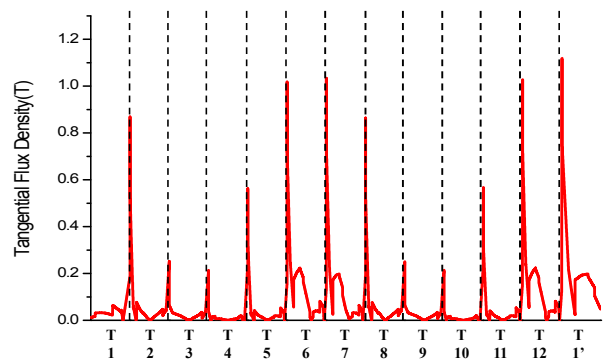
(a) 자속밀도 분포



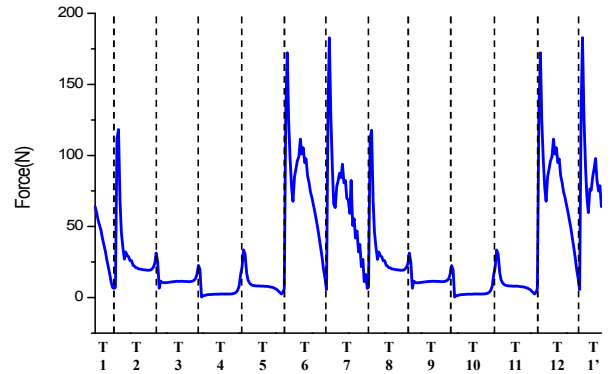
(b) 표면 전자기력 분포

〈그림 4〉 자속밀도 분포 및 표면 전자기력

전자기력을 Tangential과 Radial의 벡터로 분리할 경우, Tangential 방향의 전자기력은 토크에 기여하는 힘이므로 Radial 방향의 힘이 방사계 소음·진동에 영향을 미치게 된다. 앞서 논의한 지배방정식에 따라, Radial 방향의 Flux Density는 연속적이므로 경계면을 통과하여도 그 값이 일정하고, Tangential 방향의 Flux Density는 매질의 비투자율과 비례하는 값을 가지게 된다. 그림 4의 자속밀도 분포를 보면 자속밀도가 높게 나타나지 않은 치(T2-T5, T9-T11)에서도 Tangential 방향의 자속 선도를 확인할 수 있으나, 이 Flux Density는 경계면을 통과하면서 비투자율의 비만큼 작아져 낮은 값을 나타내게 된다. 반면, 자속의 포화가 심한 치(T1-T2, T6-T8, T12)의 경우, 포화에 따라 금속의 비투자율이 공기중과 유사한 값이 되기 때문에 Tangential 방향의 Flux Density가 상대적으로 크게 나타나게 된다. 이의 검증을 위해 유한요소해석을 통해 계산한 Tangential Flux Density와 Radial Force를 그림 5에 나타내었다.



(a) Tangential Flux Density



(b) Radial Force

〈그림 5〉 Tangential Flux Density와 Radial Force

### 3. 결 론

본 논문에서는 IPMSM 해석 모델을 이용하여 자속포화도와 표면 전자기력의 관계를 규명하고자 하였다. 매질의 경계조건을 활용하여 지배방정식을 구성하고, 유한요소해석을 이용하여 자속밀도와 표면 전자기력을 계산하였으며 자속의 포화도가 높은 곳에서 높은 표면 전자기력을 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 포화에 따라 매질 간, 즉 강판과 공기간의 비투자율의 차이가 감소함에 따라 Tangential 방향의 자속밀도가 커져, 이 결과 로렌츠 법칙에 따라 높은 Radial Force가 발생하게 될 것으로 예상하였으며, 각 치에서 발생하는 Radial Flux Density와 전자기력을 측정하여, 토크에 기여하는 값을 제외한 Radial 성분만을 추출하여 Tangential 방향의 자속과 비교하여 유사한 경향을 보임으로써 이를 검증하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 주광정, 최홍순, 이상필, 홍정표, 한승엽, “코깅 토오크 저감이 기계 진동·소음에 미치는 영향”, 1992년도 하계학술대회 논문집 B, 563-566, 1992.7
- [2] 원종식, 정영호, 김병환, 강병희, 박경호, “전기자동차 구동용 모터 소음 저감을 위한 하우징 설계”, 2011년 한국자동차공학회 학술대회 및 전시회, 2920-2923, 2011.11
- [3] 정재우, 전성민, 김중현, 윤계섭, 김도진, 홍정표, 김현, 김기남, “하이브리드 전기 자동차용 ISG의 진동 및 소음 개선에 관한 연구”, 2011 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 796-797, 2011.7
- [4] 황요한, 김용철, 이주, “모터 소음 진동 저감 설계에 관한 연구”, 2013 대한전기학회 제 44회 하계학술대회 논문집, 875-846, 2013
- [5] 정태석, 이경득, 조규원, 김규탁, “IPM type BLDC 전동기의 진동 및 소음 저감을 위한 가진력 평형화 설계(I)”, 2013 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템 부문회 춘계학술대회 논문집, 155-158, 2013.4
- [6] William H. Hayt, Jr., John A. Buck, “Engineering Electromagnetics”, McGraw-Hill