

## 8극 9슬롯과 8극 12슬롯 IPM 전동기의 진동·소음 분석

김지민, 손도, 채승희, 홍정표  
한양대학교 자동차공학과

## Analysis of acoustic noise and vibration in 8pole 9slot and 8pole 12slot IPM motor

Ji-Min Kim, Tao Sun, Seung-Hee Chai, Jung-Pyo Hong  
Department of Automotive Engineering, Hanyang University

**Abstract** - 본 논문은 매입형 영구자석 전동기(Interior Permanent Magnet Motor)에서 발생하는 진동·소음의 원인이 되는 가진원을 분석하고 실험을 통하여 진동·소음을 평가한다. 또한 시뮬레이션을 통하여 가진력에 의한 전동기의 진동량을 산출하여 실험값과 결과를 비교·분석한다. 대상 모델로 크기가 같고, 전기적인 특성이 비슷한 8극 9슬롯, 8극 12슬롯 두 전동기를 선정하여 결과를 분석하였고, 8극 9슬롯 전동기가 진동·소음에 취약함을 결론지었다.

## 1. 서 론

오늘날 우리는 인간의 생활하는데 피해를 주는 여러 가지 공해들로 몸살을 앓고 있다. 특히 진동·소음 공해는 일상생활에서 빈번하게 접하는 환경요인으로 사람들에게 스트레스를 가중시키고 있다.

전동기는 기계, 전기 등 여러 제품을 비롯하여 자동차에 이르기까지 많은 용도로 사용되고 있다. 따라서 전동기는 자연스럽게 인간의 생활과 가까워졌고 이에 따라 전동기에서 발생하는 진동·소음이 굉장히 민감한 요인이 되었다.

전동기의 고출력화 및 소형화를 위해서는 높은 출력 밀도가 요구된다. 이에 부응하는 전동기로서 Interior Permanent Magnet(IPM) 전동기가 각광받게 되었다[1]. IPM은 Surface-mounted Permanent Magnet(SPM) 전동기와 비교해서 마그네틱 토크(magnetic torque) 뿐만 아니라 릴럭턴스 토크(reluctance torque)를 함께 이용할 수 있어 높은 출력밀도를 가지는 장점이 있으나, 더 많은 소음이 발생한다는 단점이 있다.

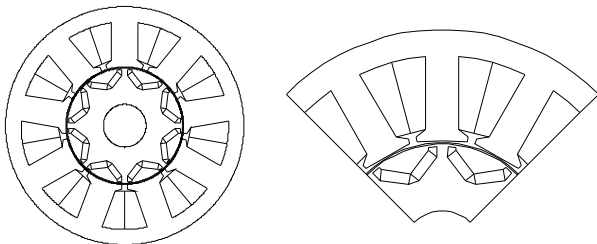
IPM 전동기에서 발생하는 소음의 주요원인은 크게 구조적 특성과 전자기 특성으로 인해 발생하는 것으로 나눌 수 있다. 구조적 특성의 경우 대부분이 구조적인 고유진동수와 연관이 있다. 전자기 특성의 경우는 전자기력을 가진원으로 볼 수 있으며, 이를 글로벌 포스(global force)와 로컬포스(local force)로 구분할 수 있다. 또한 이러한 힘들의 주파수와 전동기 고정자의 기계적인 natural frequency가 일치하여 발생하는 공진에 의한 진동·소음이 발생한다[2][3].

본 논문에서는 진동·소음특성을 평가하기 위하여 가진원인 전자기력을 분석하고 실험을 통하여 진동·소음을 측정하며 FEM시뮬레이션을 통하여 결과를 비교·분석할 것이다. 대상 모델로 8극 9슬롯, 8극 12슬롯 전동기를 선정하여 두 모델간의 비교를 통하여 진동·소음에 유리한 전동기를 판단할 것이다.

## 2. 본 론

## 2.1 전동기 모델

<그림 1>은 실험 대상 전동기들의 도면이고 <표 1>은 전동기의 사양을 나타낸다. 두 개의 전동기는 크기와 출력이 같다. 또한 코딩토크, 토크리플 등의 전기적인 특성이 큰 차이가 나지 않도록 최적화 되어있다. 두 모델은 극 수, 슬롯 수 조합의 차이 외에 다른 특성이 비슷하므로 진동·소음을 비교 평가하기에 매우 적합하다고 할 수 있다.



<그림 1> 8극 9슬롯, 8극 12슬롯 전동기 형상

<표 1> 전동기 모델 사양

	8극 9슬롯	8극 12슬롯
고정자 외경	100.4 [mm]	
회전자 외경	48.4 [mm]	
축방향 길이 (Stator/Housing)	95/156 [mm]	
최대속도/실험 속도 범위	3500 [rpm] / 100~2500 [rpm]	
정격 토크/실험 부하 토크	5.55 [Nm] / 4 [Nm]	

## 2.2 진동·소음 측정 실험

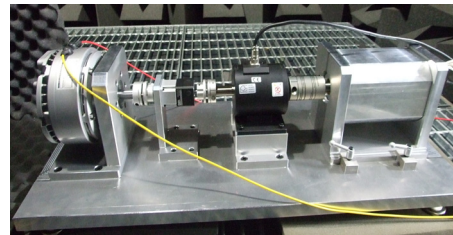
## 2.2.1 장비 구성

8극 9슬롯, 8극 12슬롯 두 전동기의 진동·소음을 측정하기 위하여 무향실에서 <그림 2>와 같이 실험 장비를 구성하였다. 전동기에서 발생하는 진동을 측정하기 위하여 전동기의 각 면에 가속도 센서를 부착하여 가속도량을 측정하였다. 전동기에서 발생하는 소음을 측정하기 위해서는 대상 전동기와 마이크로폰의 거리가 1m를 유지하도록 하여 측정하였다. 부하를 걸어주기 위하여 파워더 브레이크를 사용하고 부하에서 발생하는 소음이 측정되는 것을 방지하기 위하여 흡음 처리된 밀폐형 캐비닛을 설치하였다. 측정된 데이터들은 FFT Analyzer를 통해 레벨을 주파수대역으로 변환하여 컴퓨터에 저장하였다.

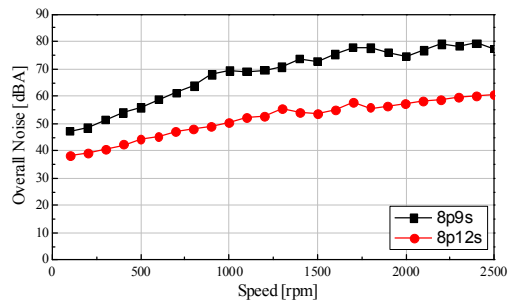
## 2.2.2 소음 측정 결과

실험은 전동기의 rpm을 일정하게 증가시키며 발생하는 소음의 크기를 측정하였다. 소음을 측정할 때 A weighting을 적용하였기 때문에 사람의 귀에 민감한 1k~5kHz 영역의 소음이 상대적으로 크게 측정되었다.

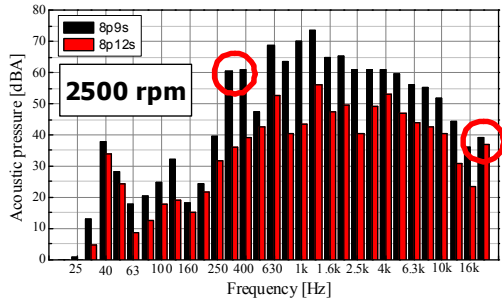
<그림 3>의 소음측정결과, 8극9슬롯 전동기가 8극12슬롯 전동기에 비해 약 10~20dB정도 크게 소음이 발생하였다. 또한 전동기의 rpm을 높여 줄에 따라 소음도 증가한다는 사실을 규명하였다. <그림 4>의 8극 9슬롯 전동기의 경우 Local force 기본파 주파수 영역(333.3Hz)의 소음이 크게 발생하였으며 20kHz 주파수 영역에서 PWM 고조파에 의한 소음이 발생하였다.



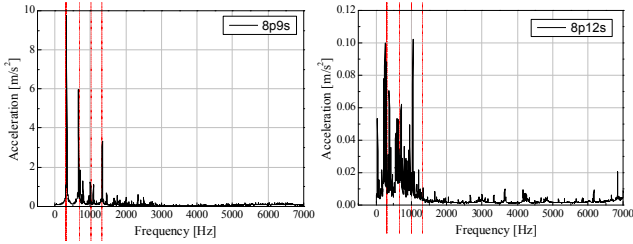
<그림 2> 진동·소음 측정 실험 구성



<그림 3> 속도별 소음 측정 결과



〈그림 4〉 2500rpm에서의 소음 측정 결과 (1/3 Octave band)



〈그림 5〉 2500rpm에서의 진동 측정 결과

### 2.2.3 진동 측정 결과

소음측정과 마찬가지로 두 전동기 사이에 매우 큰 차이의 진동량이 발생하였다. 또한 Local force의 기본파와 고조파에 해당하는 주파수에서 진동량이 상대적으로 매우 크게 발생함을 확인할 수 있었다.

결과를 분석해 보면, 8극12슬롯 전동기에 비해 8극 9슬롯 전동기의 진동량은 Local force의 기본파 주파수 영역에서 약 100배정도 크게 발생함을 알 수 있다.

8극 9슬롯 모델의 경우 Local force 기본파와 2고조파 주파수 영역에서, 8극 12슬롯 모델의 경우 Local force 기본파와 3고조파에 해당하는 주파수 영역에서 가장 큰 진동량이 발생하였다.

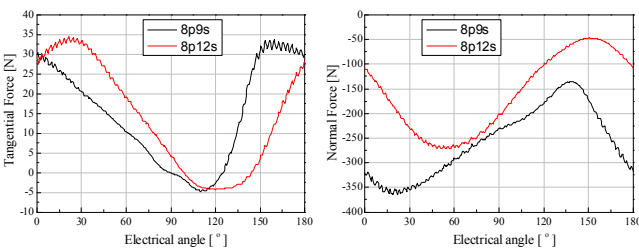
## 2.3 FEM을 이용한 진동 해석

### 2.3.1 Local force 산정

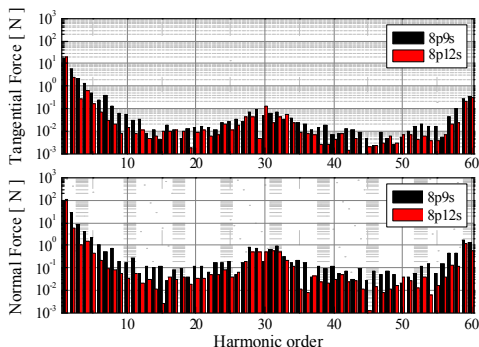
실험에서 측정한 전류를 이용하여(PWM 고조파가 반영) Normal Force와 Tangential Force를 FEM으로 산정하였다.

〈그림 6〉은 전류를 이용하여 시뮬레이션한 Normal Force와 Tangential Force이고 〈그림 7〉은 산정한 Tangential force, Normal force에 대하여 고조파 분석을 수행한 결과이다.

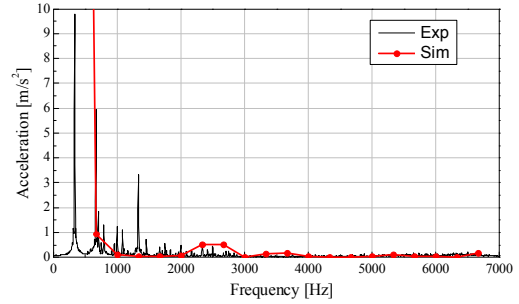
PWM주파수(10kHz)영역과 그 두 배의 영역에서 큰 고조파들이 발생하였음을 확인할 수 있다.



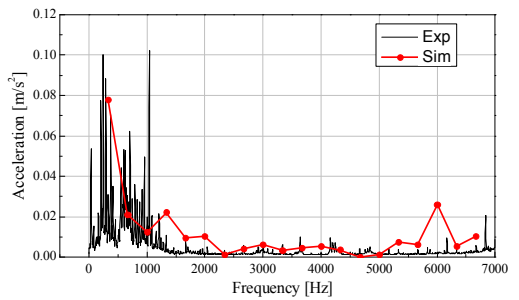
〈그림 6〉 Tangential force와 Normal force



〈그림 7〉 Tangential force와 Normal force의 고조파 분석 결과



〈그림 8〉 8극 9슬롯 가속도량 결과 비교 (2500 rpm)



〈그림 9〉 8극 12슬롯 가속도량 결과 비교 (2500 rpm)

〈그림 7〉에서 볼 수 있듯이 8극 9슬롯 Local force의 고조파 성분들이 8극 12슬롯보다 전반적으로 큰 것을 알 수 있다. 따라서 8극 9슬롯의 진동량이 더 크게 발생할 것이라 예상할 수 있다.

### 2.3.2 진동 시뮬레이션

고조파 분석을 통하여 산정한 Local force의 기본파와 각 고조파를 이용하여 FEM 시뮬레이션을 통하여 진동량을 산정하였다. 위상차를 고려하여 각 전동기의 치에 힘을 인가하였고 주파수 영역에 대하여 가속도량을 산정하였다.

〈그림 8〉과 〈그림 9〉는 각 전동기에 대하여 가속도량을 실험값과 시뮬레이션 값을 함께 나타낸 그래프다. 8극 9슬롯의 경우 구속조건이 없는 상태에서 발생하는 가속도량이 local force의 기본파 영역에서 과다하게 평가되었고, 8극 12슬롯의 경우에는 3고조파의 영역에서 실험값과 시뮬레이션 값에 큰 오차가 발생하였다. 이는 전동기의 결합상태에 따라 발생한 고유진동수에 의한 공진이라 예상된다.

## 3. 결 론

전동기에서 발생하는 진동·소음의 원인을 파악하기 위하여 실험을 통하여 측정하고 결과를 분석하였다. 또한 시뮬레이션을 통하여 산정된 값과 실험값과의 비교도 하였다.

전동기의 진동·소음을 측정하는데 전동기를 감싸고 있는 두꺼운 하우징이 방해가 되었고, 전동기 외적인 파우더 브레이크, 기어 등에 의해 발생하는 진동·소음에 의하여 시뮬레이션과의 많은 오차가 발생하기도 하였다. 하지만 결과분석을 통하여 전동기의 진동·소음이 local force의 기본파 및 고조파 주파수 영역에서 매우 크게 측정됨을 확인하였고, 이에 따라 전동기의 진동·소음을 발생시키는 주요 원인이 local force에 있음을 밝혀낼 수 있었다. 또한 8극 9슬롯과 8극 12슬롯 전동기의 상대적인 비교를 통하여 8극 12슬롯 전동기의 진동·소음 측면에서의 우수성을 확인할 수 있었다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Poornima, K. A. and Hsu, T. S., "Moving magnet loudspeaker system with electronic compensation", IEE Proc-Circuits Devices Syst, Vol. 148, No. 148, 2001
- [2] Sang-Ho Lee, Jung-Pyo Hong, Sang-Moon Hwang, Ji-Young Lee, and Young-Kyoun Kim, "Optimal Design for Noise Reduction in Interior Permanent Magnet Motor", Industry Applications Society 40th Annual meeting, 2006
- [3] M. Berkouk, V. Lemarquand, and G. Lemarquand, "Analytical Calculation of Ironless Loudspeaker Motors", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 37, No. 2, 2001