

IPM 전동기의 진동소음에 대한 연구

이상호, 김지민, 김도진, 홍정표
한양대학교 자동차공학과

Study on Noise and Vibration in the Interior Permanent Magnet Motor

Sang-Ho Lee, Ji-Min Kim, Do-Jin Kim, Jung-Pyo Hong
Department of Automotive Engineering, Hanyang University

Abstract - This paper deals with the analysis of noise sources in interior permanent magnet (IPM) motor considering the natural frequencies of stator and electromagnetic forces. In order to analyze the noise generated from the vibration of stator, measured acceleration of stator is compared with calculated acceleration using electromagnetic forces and harmonic analysis.

1. 서 론

진동과 소음은 기계, 전기 등 여러 제품을 비롯하여 교통수단이 되는 자동차, 철도, 항공기 그리고 선박에까지도 관계가 깊으며, 오늘날에는 하이브리드 자동차 등 동력원으로써 전동기의 사용이 증가하고 있는 추세이다. 또한, 많은 소음원이 전동기에 있는 경우가 상당히 많아서 동력원을 전동기로 하는 기계류의 소음원을 분석하기 위해서는 전동기의 소음 특성을 분석하는 것이 필수적이다. 특히, 고출력화 및 소형화 추세에 맞춰 이를 구성하는 전동기 또한 높은 출력 밀도가 요구된다. 이에 부응하는 전동기로서 interior permanent magnet (IPM) 전동기가 각광받고 있는데[1] 유도기나 surface-mounted permanent magnet (SPM) 전동기에 비해 영구자석에 의한 마그네틱 토크에 톨러턴스 토크를 이용하므로 출력 밀도가 높은 장점이 있는 반면에, 더 많은 소음원을 가진다는 단점이 있다 [1]-[3]. IPM 전동기에서 발생하는 소음의 주요 원인은 고정자의 natural frequency와 전자기력에 의한 공진 때문에 발생한다.

따라서 본 논문에서는 IPM 전동기의 소음원을 살펴보기 위하여 구조적인 원인과 전자기적 원인에 의한 것으로 구분한다. 구조적인 원인으로써 고정자의 고유 주파수를 이론적인 방법과 실험 등을 통하여 산정/비교한다. 그리고 유한요소법을 이용하여 치 하나에 미치는 전자기력을 산정한 후 조화해석(harmonic analysis)을 통해 치의 변형량에 의한 가속도를 산정하여 전동기 소음에 지배적인 소음원을 살펴본다.

2. 본 론

2.1 Modal analysis

n 자유도계의 운동 방정식은 n 개의 2차 상미분 방정식으로 구성되어 n 이 클 때, 또는 가진함수 (forcing function)가 비주기일 경우 상당히 복잡하게 된다. 이 경우 모드 해석이 문제를 해결하는데 유용하게 사용된다.

m차 진동모드의 고정자 시스템의 고유진동수는 아래와 같다.

$$f_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_m}{M_m}} \quad (1)$$

식 (1)에서 K_m (N/m)은 강성요소를 M_m (kg)은 stator의 질량요소를 나타낸다.

본 논문은 링 형상의($L_i/D_c \leq 1$) 고정자 시스템을 분석하였다. 식 (2)는 링 형상의 Stator System 의 고유진동수를 구하는 식이다 [4].

$$f_m = \frac{2}{\pi} \frac{1}{D^2} \sqrt{\frac{E_c}{\rho_c k_i k_{md}}} \sqrt{\frac{I_c}{h_c I_i}} \frac{m(m^2 - 1)}{\sqrt{m^2 + 1}} k_a F_m \quad (2)$$

여기서 m 은 진동모드의 차수, D 는 stator의 직경, I_c 는 stator의 관성 모멘트, E_c 는 탄성계수, h_c 는 stator yoke 의 두께, I_i 는 stator의 축방향 길이이다.

식 (2)를 이용하여 2차 진동모드에서 Stator System의 고유진동수를 구하여 보면, 2.2 kHz 임을 알 수 있으며 이는 표 1에서 modal test 실험값과 비교할 때 유사함을 알 수 있다.

2.2 Forced vibration

고정자 시스템에 조화 가진력이 작용할 때 진동의 크기는 다음과 같이 표현된다 [4].

$$A_m = \frac{F_m / M}{\sqrt{(\omega_m^2 - \omega_r^2)^2 + 4\zeta_m^2 \omega_r^2 \omega_m^2}} = \frac{\pi D_{in} L_i P_{mr} / M}{\sqrt{(\omega_m^2 - \omega_r^2)^2 + 4\zeta_m^2 \omega_r^2 \omega_m^2}} \quad (3)$$

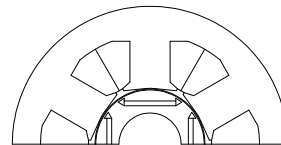
또 진동문제의 해석의 편의성을 위하여 Magnification factor h_m 을 사용하는데 이는 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$h_m = \frac{A_m}{F_m / M \omega_m^2} \quad (4)$$

공진대역에서의 조화해석을 위하여 damping을 고려하여야 하며 그림 2는 주파수대역에 따른 damping 요소의 크기 변화를 나타낸 것이다. 그러므로 본 논문에서 damping 요소의 크기는 0.022로 반영하였다.

2.3 Vibration and Noise test

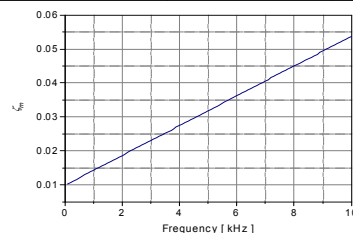
IPM 전동기의 진동/소음을 측정하기 위하여 소음이 31.3 dBA 인 무향실에 그림 3과 같이 실험 장비를 구성한다. 전동기에서 발생하는 소음을 측정하기 위하여 대상 전동기의 tooth 상단부와 마이크로폰이 평행하게 1m를 유지하도록 한다. 부하에서 발생하는 소음이 측정되는 것을 피하기 위하여 흡음 처리된 밀폐형 box를 설치한다. Stator, Housing, Jig에 각각 가속도 센서를 부착하여 Driver에서 진동을 측정하고 Microphone으로 소음을 측정하여 FFT Analyzer를 통해 소음의 레벨을 주파수대역으로 변환하여 컴퓨터에 저장한다. 그림 4 (a)를 보면 일정한 값을 가지는 stator의 공진주파수에 의한 소음과 대각선의 전자기적 가진력의 의한 소음이 나타난다. 2차 진동모드에서 가장 큰 소음이 발생하며, 그림 4 (b)는 가속도 센서에 의해 측정된 가속도를 나타낸 것으로 소음과 비슷한 양상을 보임을 알 수 있다. 이에 본 논문에서는 2차 진동모드의 가속도를 해석하여 소음원을 규명한다.



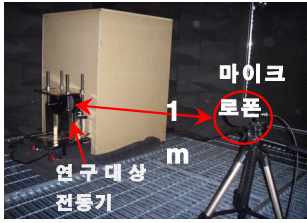
<그림 1> 해석 모델

<표 1> 결합 상태에 따른 고정자의 공진 주파수

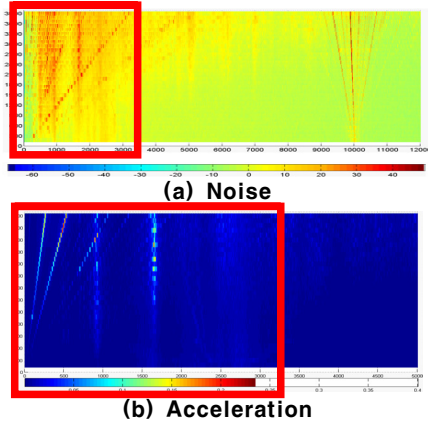
	1차 공진주파수 (kHz)	
	실험값	이론값
Stator Only	2.2	2.6
Stator + Housing	2.6	.
Stator + Housing + Jig	2.8	.



<그림 2> variation of ζ_m with frequency



〈그림 3〉 Configuration of noise experiment



〈그림 4〉 Noise and acceleration versus motor speed

2.3 Local force 산정

그림 5는 대상모델이 1800 rpm 으로 운전시 측정된 전류 파형을 나타낸 것이다. 고정자의 형상 및 재질 properties를 입력하고 측정된 전류 파형 및 등가자화전류법을 이용하여 치 하나에 미치는 local force를 산정한다 [2]. 그림 6은 회전자 위치 변화에 따라 치 하나에 미치는 local force 분포 및 주파수 분석 결과를 나타낸 것이다.

2.4 전자기력을 이용한 조화 해석

조화 해석에서는 시간에 따라 전자기적 가진력이 작용할 때 구조물의 동적 응답 특성해석이 필요하므로 앞서 산정된 local force를 이용하여 하여 조화 해석을 수행하였다.

프레임과 지그와의 결합으로 인한 강성의 증가를 재료의 물성치인 영 계수(Young's modulus)에 반영하고 측정된 전류파형을 고려하여 유한요소해석으로 계산된 전자기력을 가진력으로 이용하였다. 전자기력의 기본 주파수인 60 Hz 간격으로 해석을 수행하였다.

그림 7은 치 표면을 기준으로 시뮬레이션을 통해 산정된 normal 방향 가속도와 tangential 방향의 가속도이다. 시뮬레이션 결과를 살펴보면 3의 배수 고조파 성분의 가속도 값이 매우 작은 것을 알 수 있다. 이는 다른 성분과 달리 각 치가 받는 local force의 위상차가 존재하지 않아 가속도에 주는 영향이 작기 때문이다. normal 방향 가속도는 고정자의 공진 주파수 대역인 2.7 ~ 2.8 kHz 사이에서 가장 큰 값을 나타낸다. 이는 고정자의 구조적 특성인 고유 주파수에 의한 공진현상 때문이다.

전 구간의 normal 성분과 tangential 성분의 법선방향 가속도를 비교해 보면 normal 성분이 tangential 성분에 비해 매우 큰 값을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 전자기적 특성인 전자기력에서는 치 하나에 미치는 normal force가 지배적인 소음원임을 알 수 있다.

2.5 결과비교

전동기 소음에 미치는 진동에 지배적인 요소가 normal 방향의 전자기력에 의한 가진임을 확인하기 위하여 가속도에 대한 해석/실험값을 비교하였다.

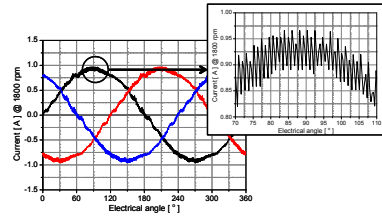
그림 8은 치 표면에서 측정된 가속도와 시뮬레이션으로 산정된 normal 방향의 가속도를 상대비교(normalizing) 한 것이다. 시뮬레이션을 이용하여 산정된 normal 방향의 가속도는 측정된 가속도와 유사한 경향을 나타내고 있다. 약 1600 Hz 구간에서 측정값과 해석값이 다른 양상을 보이는데 이는 Jig의 영향을 받은 것으로 본 논문에서는 이를 무시하였다.

3. 결 론

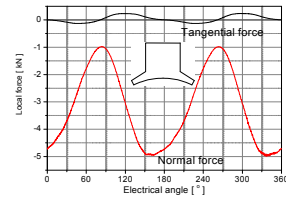
전동기의 소음에 영향을 미치는 소음원을 규명하기 위해서는 고정자의 고유 주파수와 전자기력간의 관계를 고려해야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 해석적인 방법 및 modal test 등을 통하여 고정자의 고유 주파수를 산정하였으며 측정된 전류파형을 이용하여 치 하나에 미치는 local force 산정 및 조화해석을 통해 치 표면에서의 가속도를 산정하였다. 이를 통해 치 하나에 미치는 normal force가 tangential force 보다 전동기 진동/소음에 지배적으로 작용한다는 것을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

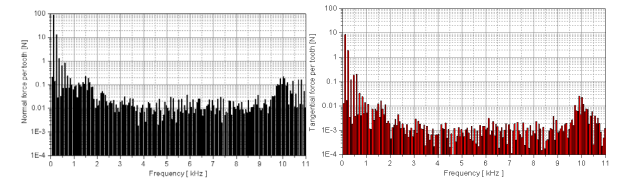
- [1] Poornima, K. A. and Hsu, T. S., "Moving magnet loudspeaker system with electronic compensation", IEE Proc-Circuits Devices Syst., Vol. 148, No. 148, August 2001.
- [2] Sang-Ho Lee, Jung-Pyo Hong, Sang-Moon Hwang, Ji-Young Lee, and Young-Kyoun Kim, "Optimal Design for Noise Reduction in Interior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



〈그림 5〉 current shape @ 1800 rpm

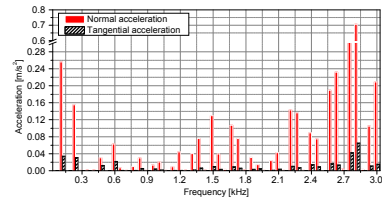


(a) Distribution of local force versus rotor position

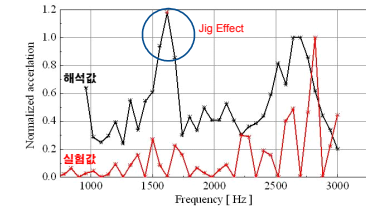


(b) FFT of normal force (c) FFT of tangential force

〈그림 6〉 Characteristics of local force



〈그림 7〉 Normal&tangential 방향 가속도



〈그림 8〉 측정된 가속도와 유한요소 해석을 통한 가속도의 비교