

# 영구자석형 전동기의 코깅토크에 의한 구조음 예측의 실험적 검증

## Experimental Verification for Structural Noise Prediction of Permanent Magnet Motor by Cogging Torque

박영수† · 박세홍\* · 김진\*\* · 빈재구\*\*\* · 공영경\*\*\*\*  
 Young-Su Park, Sea-Hong Park, Jin Kim, Jae-Goo Bin and Yeong-Kyung Kong

### 1. 서론


최근에 전동기를 사용하는 대부분의 산업분야에서 전동기 설계 조건으로서 고효율, 고출력, 인버터 제어 그리고 소형화를 요구함에 따라 높은 출력 밀도를 발생시킬 수 있는 영구자석형 전동기가 각광을 받고 있다. 특히, 선박, 풍력발전기 등의 산업분야를 중심으로 영구자석형 전동기의 수요가 증가하고 있으며, 대형화 되고 있는 추세이다. 그러나, 기본설계 단계에서 영구자석형 전동기에 대한 신뢰할 수 있는 소음진동 예측 및 저감 방법에 대한 연구는 아주 미흡한 상태이다.

본 연구에서는 Prototype 전동기를 제작하여 코깅토크에 의한 구조음 예측방법의 타당성을 실험을 통하여 검증하고자 한다.

### 2. 전자기적 원인에 의한 가진력

#### 2.1 대상전동기 사양

**Table 1** 대상전동기 사양

대상전동기	PM Motor	대상전동기 형상
최대 회전수	150rpm	
정격 회전수	30~60rpm	
출력	60KW	
극	36	
슬롯	12	
상	12 상	

† 교신저자; ㈜효성 중공업 PG 특수기설계팀  
 E-mail : parkyoungnsu@hyosung.com

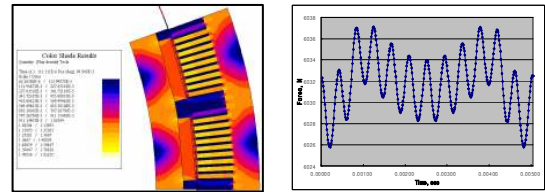
Tel : (055) 279-7017, Fax : (055) 268-9835

\* 공동저자의 소속 : ㈜효성 중공업 PG 연구소  
 \*\* 공동저자의 소속 : ㈜효성 중공업 PG 특수기설계팀  
 \*\*\* 공동저자의 소속 : 국방과학연구소  
 \*\*\*\* 공동저자의 소속 : 국방과학연구소

#### 2.2 코깅토크에 의한 가진력

영구자석형 전동기의 경우 전자기력에 의한 가진력은 코깅토크에 의한 힘(Cogging force), 극 통과에 의한 힘(Pole passage force), 전류에 의한 힘(Armature)에 의해서 구조음을 발생한다. 이들 토크 중에서 구조음 발생 원인의 가장 지배적인 힘은 코깅 토크에 의해 발생되어지는 힘이라고 알려져 있다.

따라서, 전자기력에 의한 가진력(=코깅토크에 의해 발생된 고정자의 반경반향 힘)을 Flux2D 전자계상용해석 프로그램을 활용하여 구하였다.



**Fig. 1** 코깅토크에 의한 가진력

선정된 대상 전동기는 동기 전동기 형태이며, 구조적 특성상 기본적으로 영구자석과 철심에 의한 힘이 항상 존재하게 된다. 이러한 힘은 토크에 대한 영향으로 고정자 치와 회전자에 설치된 영구자석의 상호 인력 변화에 따라서 코깅토크를 발생하게 된다. 코깅토크는 영구자석 전동기에서 주요한 가진원이 되며, 코깅토크 주파수는 극수와 슬롯수의 최소 공배수에 의해서 결정된다.

$$f_c = k \times l_{cm} \times \frac{N}{60} \quad (1)$$

여기서,  $f_c$  : 코깅토크 주파수

$k$  : 정수(1,2,3.....)

$l_{cm}$  : 극수와 슬롯 수의 최소 공배수

$N$  : 회전수

### 3. 구조음 예측 및 실험적 검증

#### 3.1 해석모델의 검증

대상전동기의 고유모드를 측정하여 해석치와 실험

치의 고유모드 벡터 값을 비교하여, MAC=0.7 이상 되도록 해석모델의 신뢰성을 확보하였다.

$$MAC_{ij} = \frac{\left| \left\{ \psi_i^{test} \right\} \left\{ \psi_j^{FE} \right\}^* \right|^2}{\left[ \left\{ \psi_i^{test} \right\} \left\{ \psi_i^{test} \right\}^* \right] \left[ \left\{ \psi_j^{FE} \right\} \left\{ \psi_j^{FE} \right\}^* \right]} \quad (2)$$

여기서,  $MAC_{ij}$ : Modal Assurance Criteria

$\psi_i^{test}$ : 실험으로 구한 Modal Vector

$\psi_j^{FE}$ : 해석으로 구한 Modal Vector

### 3.2 진동

#### (1) 진동해석

영구자석형 전동기의 코깅토크에 의한 진동특성을 예측하기 위하여 전동기가 1 회전하는 동안 시간영역에 대한 코깅토크에 의해 발생하는 가진력을 고정자에 적용하여 전동기 표면 및 고정자 상단에서의 진동응답을 구하였다. 모드해석은 상용해석 프로그램인 Ansys, 강제진동해석은 LMS.Virtual Lab 을 활용하였다. 그 결과 고정자 상단 부분의 최대 진동치가 코깅토크 주파수인 500Hz 부근에서 약 0.14G 로 나타났다.

#### (2) 진동측정

진동측정은 고정자와 영구자석형 전동기표면에 3축 가속도 센서를 설치하여 실시하였으며, 해석조건과 동일한 회전속도에서 진행을 하였다. 전동기 운전은 무부하 운전상태에서 진행하였으며, 해석모델의 검증을 위해서 고유진동수 측정을 동시에 진행하였다. Fig.4 는 전동기의 회전속도를 60~70rpm 사이에서 측정한 결과로서 약 0.12~0.14G 로 나타남을 알 수 있다.

진동측정결과와 해석결과를 비교해 보면 진동 최대값이 코깅토크 주파수에서 발생하며 진동치의 크기와 경향이 유사함을 알 수 있다. 따라서, 영구자석형 전동기의 경우 코깅토크 주파수를 회피하여 설계하는 것이 매우 중요함을 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

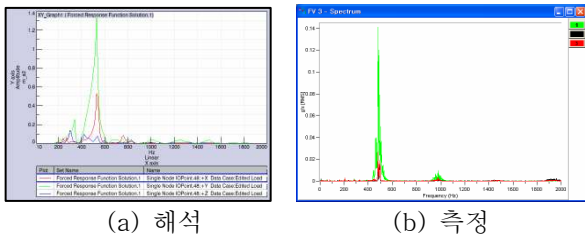


Fig. 2 진동치 비교

### 3.3 구조음

#### (1) 소음해석

전동기 소음해석은 BEM 방법을 사용하였으며, 메쉬의 크기는 관심 있는 최대 주파수 파장에 6 개의

경계요소가 필요하도록 균일한 요소 크기를 가지도록 모델링 하였다. 또한, 진동해석에서 얻어진 전동기 표면의 진동치를 음향해석 모델의 표면에 적용하기 위하여 식(3)과 같은 Data Transfer 방법을 활용하였다.

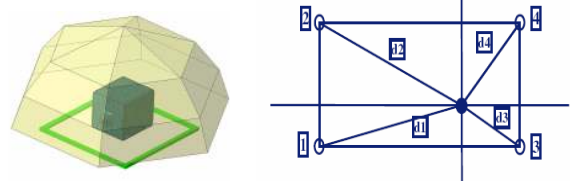


Fig. 3 소음해석모델

$$P_{Target} = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{P_i^{Source}}{d_i}}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{d_i}} \quad (3)$$

#### (2) 소음측정

장제진동해석 결과를 토대로 소음해석을 수행한 결과 대상전동기 소음도는 85dB(A), 소음측정 결과값은 83.7dB(A)로 거의 동일한 결과값을 나타내었다. 또한, 1/3octave 주파수 분석 결과 타 주파수에 비해 상대적으로 500Hz 부근에서 가장 큰 소음도를 나타내고 있는 결과를 얻을 수 있었다. 이것은 코깅토크 주파수대역으로 진동치 뿐만 아니라 소음도 높게 나타남을 알 수 있었다.

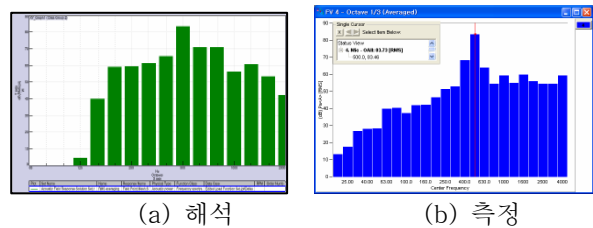


Fig. 4 소음도 비교

무부하 운전상태(60~70rpm)조건에서 대상전동기 소음이 83dB(A)이상 높게 나타나는 것은 설계검증을 위하여 코깅토크 주파수와 공진을 유발하도록 설계 및 제작을 수행하였기 때문이며, 고유진동수 측정 결과 고정자 및 전동기 외벽들이 30~150rpm 이 내의 코깅토크 주파수 근처에서 모두 존재하였다.

## 4. 결론

영구자석형 전동기 설계단계에서 코깅토크에 의한 구조음을 예측할 수 있는 절차 및 방법론을 정립하였으며, 그 타당성을 시제품을 제작한 후 실험을 통하여 검증하였다. 영구자석형 전동기의 경우 진동 및 소음을 최소화하기 위해서는 코깅토크 주파수에 대한 구조물의 공진회피설계가 충분히 고려되어야 한다는 사실 또한 본 연구결과 알 수 있었다.