

# 100kW급 IPM 전동기의 전자기 가진력 분석

이선권\*, 강규홍\*, 허 진\*\*  
 (재)한국조선해양기자재연구원\*, 울산대학교\*\*

## Analysis of Electromagnetic Vibration Sources in 100kW Interior Permanent Magnet Motor

Sun-Kwon Lee\*, Gyu-Hong Kang\*, Jin Hur\*\*  
 Korea Marine Equipment Research Institute\*, University of Ulsan\*\*

**Abstract** - 본 논문에서는 선박의 Rolling 현상을 능동적으로 저감할 수 있는 Anti heeling system에 적용되는 100kW급 매입형 영구자석 전동기의 가진력을 2차원 FEA를 이용하여 해석하였다. 고효율 소형화를 위해 집중권을 채택했고, 극수 슬롯수 조합에 따른 특성을 비교하였다. 타발작업 및 조립작업 시 편심은 항상 발생하게 되고, 그 수준과 형태에 따라 다양한 Unbalanced magnetic force(UMF)가 발생하여 진동특성에 영향을 미친다. 8극 12슬롯과 10극 12슬롯 구조의 여러 가지 편심조건에 따른 UMF를 비교하였으며, 진동 실험을 통해 해석결과의 타당성을 검증하였다.

### 1. 서 론

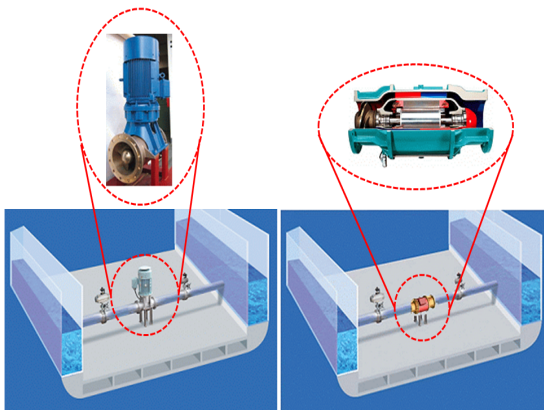
과도한 적재로 인한 선박의 전복사고를 방지하고, 항상 일정한 각도 이내를 유지하도록 도와주는 시스템을 anti heeling system이라고 한다. 일반적으로 anti heeling system은 선박 좌우측 ballast tank내의 물을 선박이 기울어질 때 반대로 이동시켜 balance를 유지시키는 역할을 한다. 기존의 anti heeling system용 pump는 일반적인 양방향 프로펠러 펌프를 사용하였으나, 최근 모터를 pump의 hub내에 삽입하여 방폭에 자유롭고, 효율이 높으며 compact한 pump의 개발이 증가하고 있다. 그림 1은 pump의 구조를 나타내고 있으며 가변속 제어 요구 증대와 compact화 대응을 위해 매입형 영구자석 전동기 적용을 검토하였다.

매입형 영구자석 전동기(IPM)는 약제자 운전 시 넓은 속도범위를 가지고 d-q축 인덕턴스 차에 의한 돌극성으로 릴럭턴스 토크가 부가되며 원심력에 의한 영구자석의 비산을 방지하는 장점이 있어 차량, 가전 및 산업용 구동원으로 연구가 활발히 진행 중이다. [1, 2]

그러나 돌극 집중권 구조의 IPM 전동기는 코깅토크와 토크리플 및 역기전력의 고조파 성분 등과 같은 가진원들의 발생으로 기존의 유도전동기나 표면부착형 영구자석 전동기(SPM)에 비해 진동 저감에 대한 연구 Issue들이 많다. [1, 2, 3]

전동기의 선박 적용을 위해서는 선급규격을 만족해야 탑재가 가능하다. 특히 선박에서는 전자와 규격이 엄격하여 진입장벽으로 작용하고 있으며, 이를 만족하기 위해 진동 저감 설계가 필수적이다.

본 논문에서는 선박 anti heeling system용 100kW급 IPM 전동기의 가진력을 2차원 FEA를 이용하여 해석하였다. 여러 가지 가진력 중 편심에 의한 UMF 분석에 집중하였다. 8극 12슬롯과 10극 12슬롯 특성을 비교 하였고, 정적편심(static eccentricity), 동적편심(dynamic eccentricity), 혼합편심(mixed eccentricity) 등 다양한 편심 조건에 따른 UMF 특성을 비교하였다. 해석 결과의 타당성은 UMF의 고조파 성분 분석과 진동실험 결과의 비교를 통해 검증하였다.



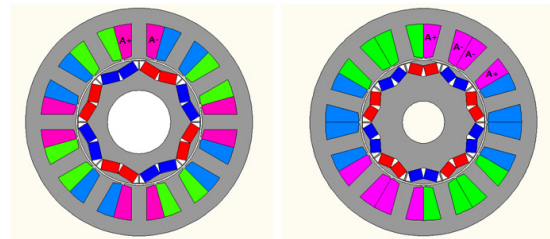
〈그림 1〉 선박의 Anti heeling system

### 2. 본 론

#### 2.1 해석모델

본 논문에서는 100kW급 IPM의 극수 슬롯수 조합과 다양한 편심 조건에 대한 가진력 해석을 수행하였다. 비교해석 대상 모델은 8극 12슬롯, 10극 12슬롯 구조를 선정하였다.

해석대상 전동기의 자기회로 구조와 권선구조를 그림 2에 나타내었다. Stator외경, Air-gap 길이, Rotor외경은 동일하게 설계하였다. Stator Core의 구조 및 치수는 완벽히 동일하게 설계되었고, 극수에 따라 권선 구조는 변경되었다. 영구자석은 잔류자속밀도 1.25(T)의 희토류 자석을 적용하였으며 비교모델의 경우 동일한 역기전력 수준으로 확보하였다, 비교 대상 전동기의 주요 사양은 표 1과 같다.



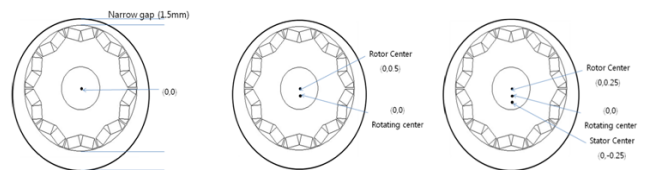
(a) 8극 12슬롯 (b) 10극 12슬롯

〈그림 2〉 해석대상 전동기의 자기회로 구조

〈표 1〉 해석대상 전동기의 주요사양

Item	8극 12슬롯	10극 12슬롯	단위
Stator OD	324	324	mm
Air gap	2	2	mm
Stack length	270	270	mm
Br	1.25	1.25	T
PM Width	25.1	18.7	mm
PM Thickness	15	15	mm
Rated Torque	500	500	Nm
Rated Output	100	100	kW

정적편심, 동적편심, 혼합편심의 모델링 개념을 그림 3에 나타내었다. 정적편심은 회전자의 형상 중심과, 회전중심은 동일하게 하고 Stator의 중심을 y축으로 0.5mm 이동하였다. 정적편심 상태에서는 공간적으로 동일한 위치에서 공극길이 차이가 좁아지게 된다. 동적편심은 그림 3의 (b)와 같으며, 회전자가 회전함에 따라 좁은 공극의 위치도 회전하게 된다. 혼합편심의 개념은 그림 3의 (c)와 같고, 정적편심과 동적편심의 결합된 형태가 된다. 혼합편심의 경우 정적편심 0.25mm, 동적편심 0.25mm를 결합하여 가장 좁아지는 공극의 길이는 0.5mm가 되어 각 편심 조건간의 최대 편심량을 동일하게 가정하여 비교하였다.



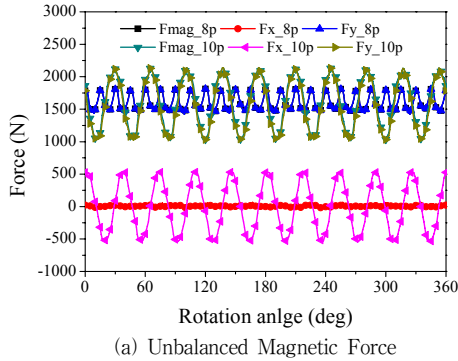
(a) 정적편심 (b) 동적편심 (c) 혼합편심

〈그림 3〉 편심 모델링

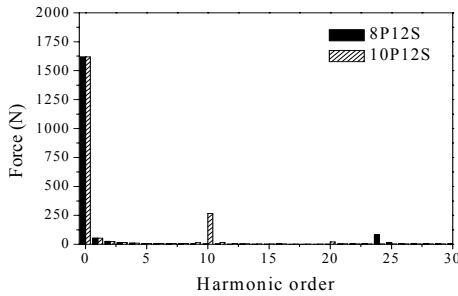
## 2.2 해석결과

8극 12슬롯, 10극 12슬롯 모델의 UMF 특성을 2D FEA를 이용하여 비교해석 하였다. 편심특성을 해석하기 위하여 full 모델링을 수행하였고, 맥스웰 응력법을 이용하여 공극 중심 경로에서의 응력 분포를 해석한 후 x, y 성분으로 분석 후 중첩하여 회전자 전체가 받는 비대칭 전자기력의 결과를 얻었다.

정적편심 조건에서 정격부하전류 인가시 UMF와 주파수 분석결과를 그림 4에 나타내었다. FFT를 통한 주파수 분석은 회전자에 미치는 힘의 Amplitude에 대해 비교 하였다. 8극 12슬롯의 경우 24X 성분이 나타났지만 10극 12슬롯의 경우 10X 성분이 강하게 나타났다. 좁은 공극 부분이 y축 부분에 고정되어 있어 1회전 시 극수배의 힘 불균형이 나타나기 때문인 것으로 분석하였다. 동적편심인 경우 그림 5에서 보는 바와 같이 10극의 경우 슬롯수 배인 12X 성분이 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 6과 같이 혼합편심 조건에서는 정적편심과 동적편심의 성분이 결합되어 10X, 11X, 12X 성분이 발생하고 특히 저주파 영역(1X, 2X) 성분의 두드러진 증가를 볼 수 있다.

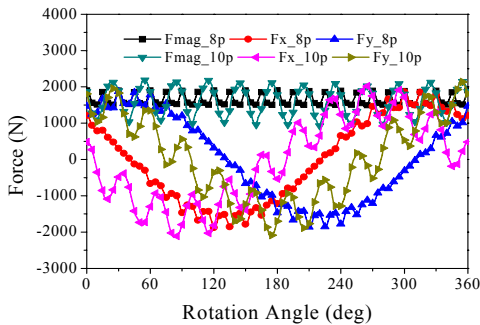


(a) Unbalanced Magnetic Force

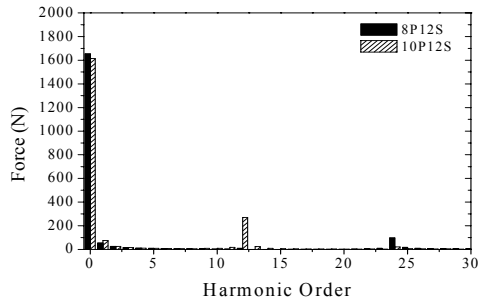


(b) Harmonic Components

〈그림 4〉 정적편심에서의 Force 해석결과

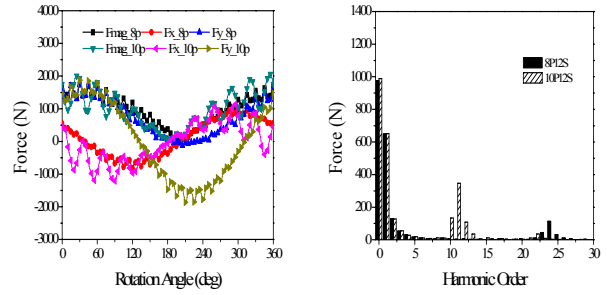


(a) Unbalanced Magnetic Force

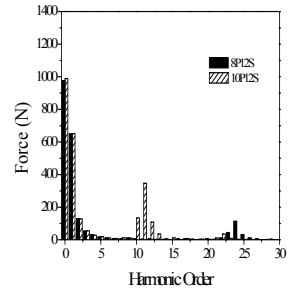


(b) Harmonic Components

〈그림 5〉 동적편심에서의 Force 해석결과



(a) Unbalanced Magnetic Force



(b) Harmonic Components

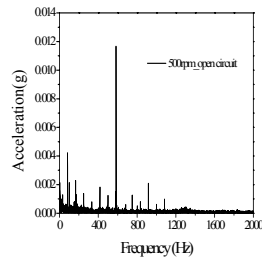
〈그림 6〉 혼합편심에서의 Force 해석결과

## 2.3 실험결과

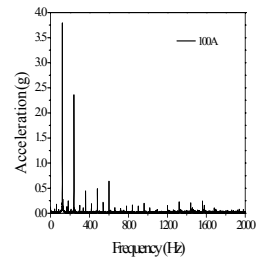
실험을 위한 시제품과 Test 플랫폼 구성을 그림 7에 나타내었다. 시제품 제작은 10극 모델이 선정되어 진행되었고, Open circuit조건과 다이나모 부하 인가 조건에서 가속도 센서를 부착하여 신호를 분석하였다. 이때, 전류백터는 MTPA 조건에서 시험하였다. 그림 8은 진동 Test 결과이며, Open circuit조건에서는 10X, 50X, 70X성분의 진동모드가 나타났다. 이는 동적편심에 의한 UMF가 원인임을 해석결과와 같이 유추할 수 있다. 전류가 인가되어 증가됨에 따라 전류의 영향을 받으며 100A 조건에서 15X, 29X 등 10X의 주변 성분이 증가함을 알 수 있다.



〈그림 7〉 시제품과 Test 플랫폼



(a) Open circuit



(b) 100A load

〈그림 8〉 진동 Test 결과

## 3. 결 론

선박 Anti heeling pump 적용을 위한 100kW급 IPM 전동기에 대한 가진력 분석을 2D FEA를 이용하여 수행하였다. 8극 12슬롯모델과 10극 12슬롯 모델의 다양한 편심에 따른 UMF를 해석하고 FFT를 통해 주파수 분석을 실시하였으며, 진동시험을 통해 시험 검증하였다. 편심은 제조상 피할 수 없다는 것을 고려할 때, 편심의 유형에 따라 UMF 특성을 면밀히 분석함으로써 대상모델의 진동소음 현상과 편심발생의 유형과의 관계를 파악하는 데 유용할 것으로 기대된다.

## [참 고 문 헌]

- [1] 류진욱, 허진, 김병우, 강규홍, “공극자속밀도수정을 통한 IPM type BLDC Motor의 진동저감”, 2010년 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.710~711, 2010
- [2] TJE Miler, “Design of brushless Permanent Magnet Motor”, Clarendon press, Oxford, 1994
- [3] David G. Dorrell, Mircea Popescu, Dan M. Ionel, “Unbalanced Magnetic Pull Due to Asymmetry and Low-Level Static Rotor Eccentricity in Fractional-Slot Brushless Permanent-Magnet Motors With Surface-Magnet and Consequent-Pole Rotors”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 46, No7, pp2675~2685, July 2010