

# 선박 자세안정성 향상을 위한 Anti-heeling Pump용 100kW급 IPM 전동기의 편심에 의한 전자기 가진력 분석

논 문
60-12-9

## Analysis of Electromagnetic Vibration Sources in 100kW Interior Permanent Magnet Motor for Ship Anti-heeling Pump Considering Eccentricity

이 선 권\* · 강 규 홍<sup>†</sup> · 허 진\*\*  
(Sun-Kwon Lee · Gyu-Hong Kang · Jin Hur)

**Abstract** - The purpose of this paper is to provide the unbalanced magnetic force and vibration mode comparison between two large interior permanent magnet machines(IPM) with different pole-slot combination considering stator and rotor eccentricity. Due to the punching tolerance, the mixed eccentricity of air-gap is inevitable. It will generate the asymmetric magnetic flux density in air-gap, which makes the unbalanced magnetic pull and vibration. The study is focused on the unbalanced magnetic force and their harmonic components according to eccentricity conditions such as static, dynamic and mixed. When the high vibration is produced especially resonance, the obtained results provide clues what eccentricity condition occurs in the machine.

**Key Words** : IPM, Unbalanced magnetic force, Vibration, Eccentricity

### 1. 서 론

과도한 적재로 인한 선박의 전복사고를 방지하고, 항상 일정한 각도 이내를 유지하도록 도와주는 시스템을 Anti-heeling system이라고 한다. 일반적으로 Anti-heeling system은 선박의 Rolling 현상을 방지하기 위하여 선체 좌우측면의 ballast tank내 물을 선박이 기우는 반대방향으로 이동시켜 선박의 자세 안전성을 확보하는 역할을 한다. 기존의 Anti-heeling system용 pump는 일반적인 양방향 프로펠러 펌프를 사용하였으나, 최근 모터를 pump의 hub내에 삽입하여 방쪽에 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 약계자 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 구동용으로 연구가 활발히 진행 중이다.

분수슬롯 구조의 영구자석 전동기는 짧은 엔드코일 길이 구현이 가능하여 소형화에 용이하고, 그에 따라 고효율, 고평평도를 가지는 장점이 있다 [1-8]. 특히, 영구자석전동

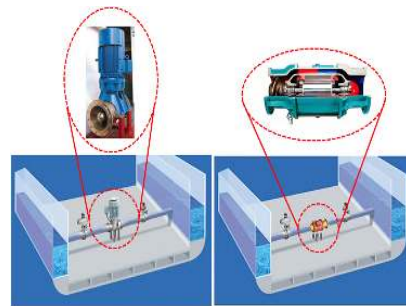


그림 1 선박의 Anti-heeling system  
Fig. 1 Anti-heeling system of ship

기의 주요 진동 소음원으로 알려진 코깅토크와 토크리플 특성은 pole/slot 피치 구조특성에 의해 스쿠 등의 저감 기법 없이도 매우 낮게 확보할 수 있다. 따라서 집중권 분수슬롯 구조는 고효율과 저진동이 요구되어지는 선박분야 적용이 확대될 것으로 예상된다.

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 연구가 많이 이루어지고 있다 [1-10]. 특히 stator와 rotor 간에 발생하는 상호 작용력인 radial force가 SPM대비 상대적으로 높아 편심이 발생할 경우 높은 불평형 자기력이 발생한다. 특히 편심에 의해 발생하는 비대칭 자속밀도 분포가 rotor 전체가 받는 불평형 자기력을 발생시킨다. 이러한 불평형 자기력에 의해 진동이 증가하고 베어링 마모를 가속화하여 기계적인 수명을 단축시킨다. Dorrell 등은 편심에 의한 불평형 자기력을 연구하였으나, 비대칭 권선배치에 집중하였다 [2]. Yoon은 SPM

\* 정 회 원 : 한국조선해양기자재연구원 선임연구원

울산대 전기전자정보시스템공학부 박사과정

\*\* 시니어회원 : 울산대 전기전자정보시스템공학부, 조교수

† 교신저자, 정회원 : 한국조선해양기자재연구원 책임연구원

E-mail : ipmsm@korea.com

접수일자 : 2011년 9월 18일

최종완료 : 2011년 11월 16일

전동기에 대해 slot angle에 따라 발생하는 편심에 의한 불평형 자기력을 분석하였다 [4]. 다수의 연구들은[2-3, 9] 해석적인 방법과 극 슬롯수 조합에 따른 특성비교를 하였고, 비대칭 영구자석 오버행 효과에 대해 연구되었다 [10].

본 논문에서는 선박 Anti-heeling system용 100kW급 IPM 전동기의 편심에 의한 불평형 자기력을 2차원 유효요소법을 이용하여 해석하였다. 8극 12슬롯과 10극 12슬롯 특성을 비교 하였고, 정적편심(static eccentricity), 동적편심(dynamic eccentricity), 혼합편심(mixed eccentricity) 등 다양한 편심 조건에 따른 불평형 자기력 특성을 비교하였다. 해석 결과의 타당성은 불평형 자기력의 고조파 성분분석과 진동실험 결과의 비교를 통해 검증하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 해석모델

본 논문에서는 선박의 Anti-heeling system 시스템에 적용하기 위한 100kW급 IPM 전동기의 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, 공극 길이, Rotor외경은 동일하게 설계하였다. Stator Core의 구조 및 치수는 완벽히 동일하게 설계되었고, 극수에 따라 권선 배치구조는 변경되었다. 영구자석은 잔류자속밀도 1.25(T)의 희토류 자석을 적용하였으며 비교모델의 경우 동일한 역기전력 수준으로 확보하였다. 비교 대상 전동기의 주요 사양은 표 1과 같다.

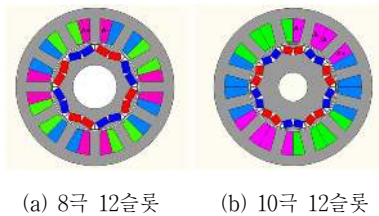


그림 2 해석대상 전동기의 자기회로 구조  
Fig. 2 Cross section of comparative models

표 1 해석대상 전동기의 주요사양

Table 1 Main specifications

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 rotor의 회전에 대해서도 공간적으로 동일한 위치에서 공극길이가 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. 대상모델의 이론 공극길이는 2.0mm이고, 최대 편심량은 0.5mm로 가정하였다.

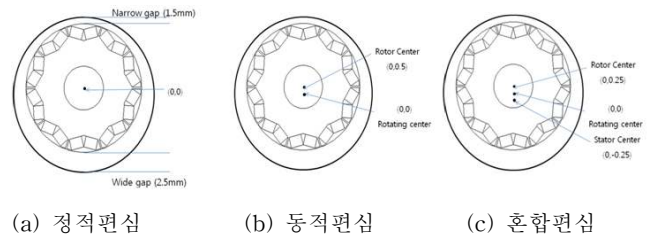


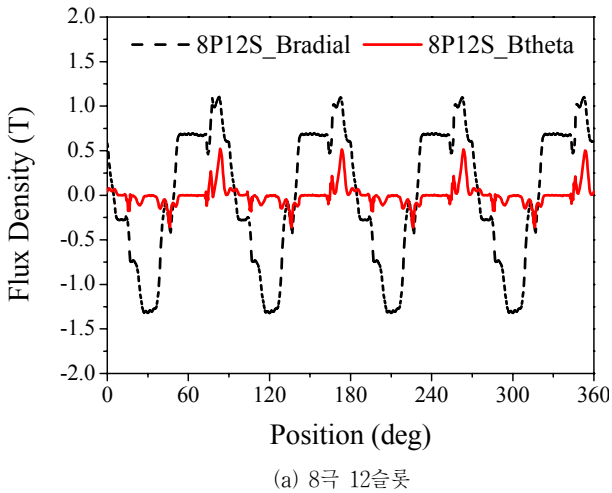
그림 3 편심 모델링  
Fig. 3 Modeling of eccentricity

### 2.2 해석결과

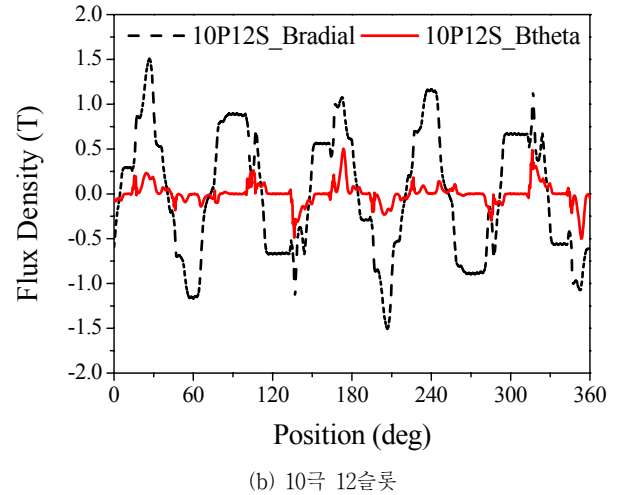
8극 12슬롯, 10극 12슬롯 모델의 불평형 자기력 특성을 2D FEA를 이용하여 비교해석 하였다. 편심특성을 해석하기 위하여 full 모델링을 수행하였고, 맥스웰 응력법을 이용하여 공극 중심 경로에서의 응력 분포를 해석한 후 x, y 성분으로 분석 후 중첩하여 회전자 전체가 받는 비대칭 전자기력의 결과를 얻었다.

#### 2.2.1 무부하 조건

무부하 공극자속밀도 분포특성을 그림 4에 나타내었다. Fractional 슬롯 구조의 전동기는 복잡한 자속밀도 분포 특성을 나타냄을 알 수 있다. 8극 12슬롯모델 대비 10극 12슬롯 모델의 공극자속밀도 분포특성의 공간적 비대칭성이 상대적으로 크게 나타났다. 하지만 구조적으로는 대칭적인 분포를 가지기 때문에 편심이 없는 정상적인 상태에서는 불평형 자기력이 발생하지 않는다. 무부하 조건에서의 편심 조건에 따른 불평형 자기력 해석결과를 그림 5에 나타내었다. 불평형 자기력의 크기는 유사한 수준이나 극 슬롯 조합의 차이에 의해 주파수 특성은 다르게 나타났다. 편심량을 동일하게 가정하여 해석하였기 때문에 각 편심에 따른 불평형 자기력 크기는 동등하다. 정적편심의 경우 rotor의 회전과 무관하게 동일한 위치에 좁은 공극이 위치하므로, 불평형 자기력의 방향은 일정하다. 반면 동적편심에서는 rotor의 회전에 따라 불평형 자기력의 방향도 회전하게 된다. 혼합편심의 경우 rotor 회전에 따라 편심량과 위치가 변화하게 되므로 불평형 자기력의 크기도 위치에 따라 변화하게 되어 주파수 특성이 달라진다.



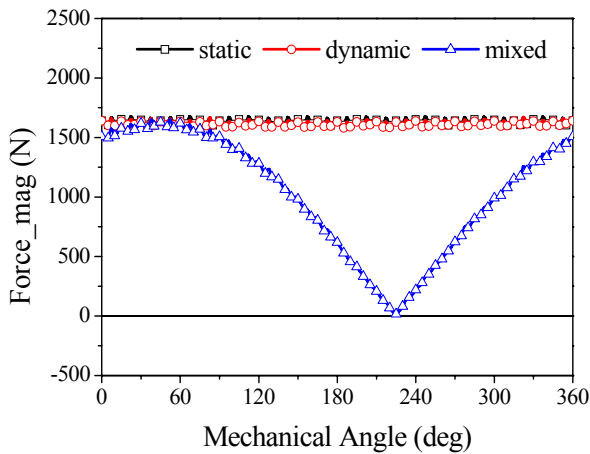
(a) 8극 12슬롯



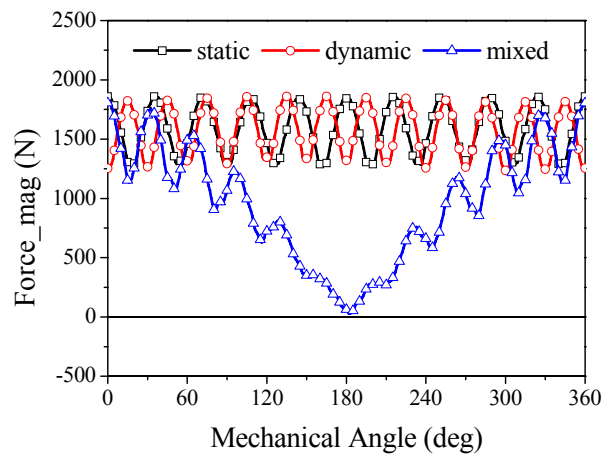
(b) 10극 12슬롯

그림 4 공극자속밀도 분포특성

Fig. 4 Magnetic flux density distribution



(a) 8극 12슬롯



(b) 10극 12슬롯

그림 5 무부하 조건에서의 편심에 따른 불평형 자기력

Fig. 5 Unbalanced magnetic forces at no load with eccentricity

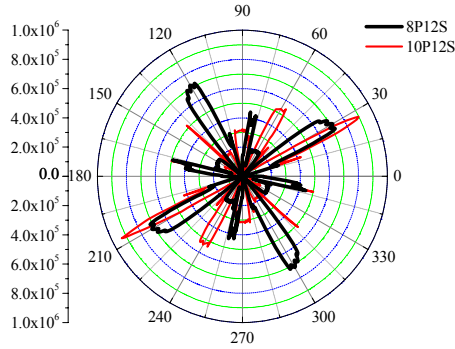
### 2.2.2 정격부하조건

10극 12슬롯 모델의 경우 권선 고조파의 영향으로 다소 복잡한 공극자속밀도 특성을 나타낸다. 편심에 의해 발생하는 자속밀도의 비대칭성분이 중첩되어 공극의 radial force 분포가 변화하게 되고 그로 인해 불평형 자기력이 발생한다. 그림 6은 공극에서의 radial force 분포 특성을 나타낸다. 8극 12슬롯 모델은 4방향으로 힘이 분포되고 있는데 반해 10극 12슬롯 모델은 2방향 힘이 발생하고 있음을 볼 수 있다. 정적편심 조건에서 정격부하전류 인가 시 불평형 자기력과 주파수 분석결과를 그림 7에 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 경

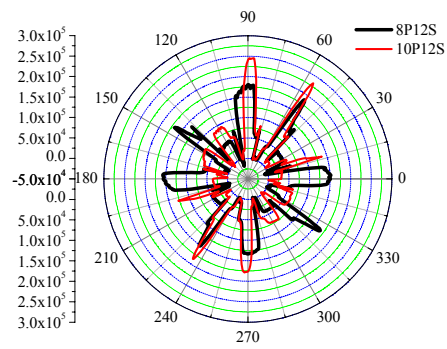
우 그림 8에서 보는 바와 같이 10극의 경우 슬롯수 배인 12X 성분이 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 9과 같이 혼합 편심 조건에서는 정적편심과 동적편심의 성분이 결합되어 10X, 11X, 12X 성분이 발생하고 특히 저주파 영역(1X, 2X) 성분의 두드러진 증가를 볼 수 있다.

### 2.3 실험결과

실험을 위한 시제품과 Test 플랫폼 구성을 그림 10에 나타내었다. 시제품 제작은 10극 12슬롯 모델이 선정되어 진행되었고, 다이노모 부하 인가 조건에서 가속도 센서를 부착하여 신호를 분석하였다. 이때, 전류벡터는 MTPA 조건에서 시험하였다. 그림 11은 진동 Test 결과이며, 동일부하 조건(동일 전류벡터)에 대해 rpm에 따른 진동특성을 분석하였다. 시험된 모든 rpm 조건에서 120Hz, 240Hz, 360Hz 성분이 나타났으며, 이는 시스템 전체의 고유치와 연관이 있는



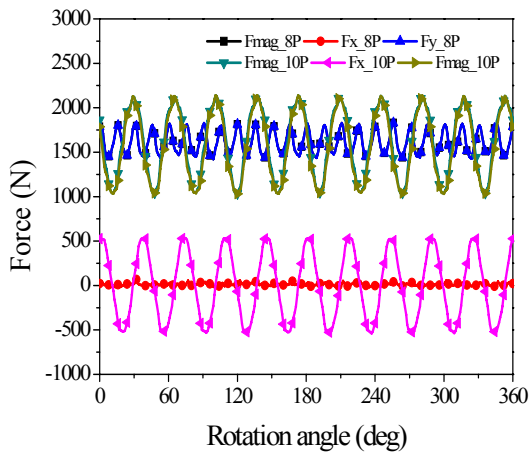
(a) 편심 = 0mm



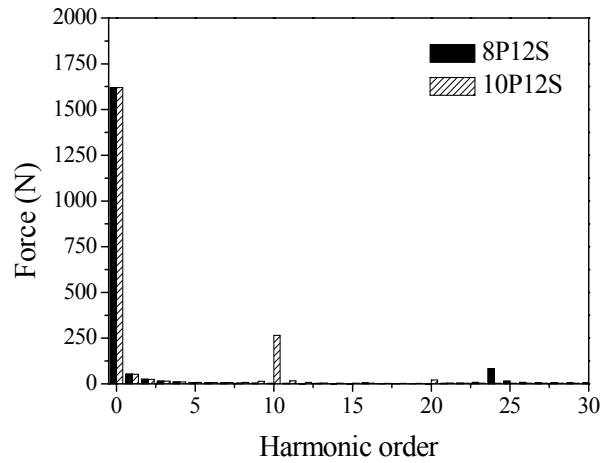
(b) 편심 = 0.5mm

그림 6 공극에서의 Radial force 특성 (unit : Pa)

Fig. 6 Radial force distribution (unit : Pa)



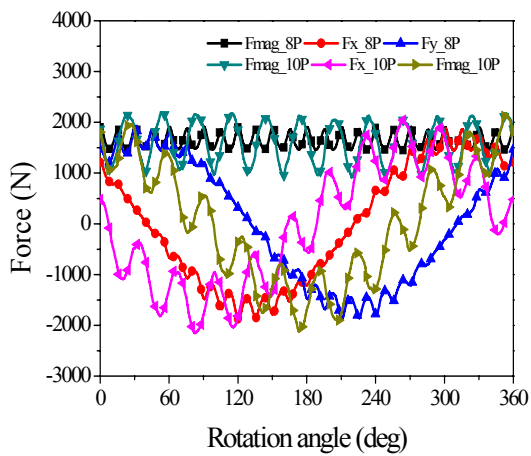
(a) Unbalanced Magnetic Force



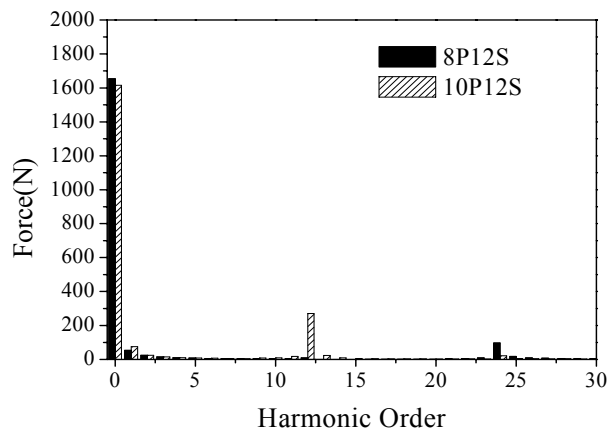
(b) Harmonic Components

그림 7 정적편심에서의 불평형 자기력 해석결과 (정격부하)

Fig. 7 Unbalanced magnetic force at full load with static eccentricity



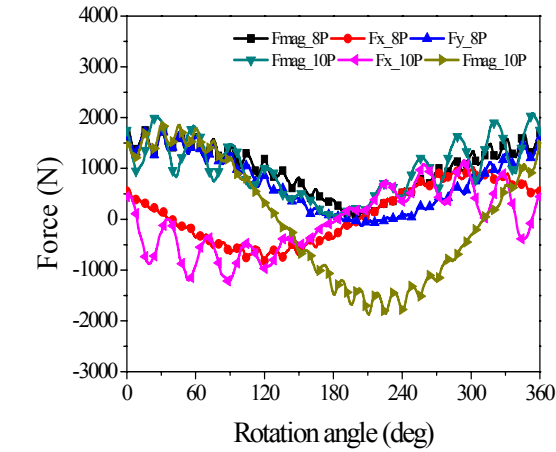
(a) Unbalanced Magnetic Force



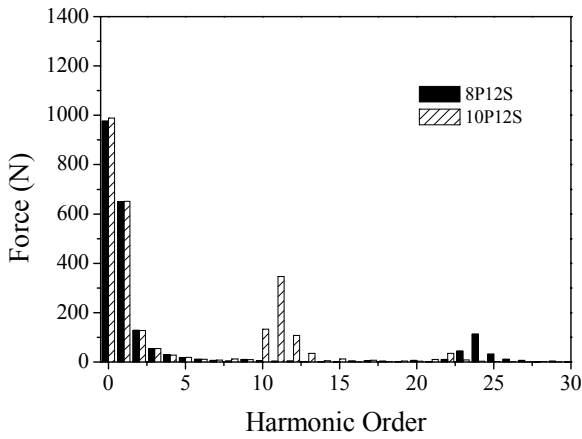
(b) Harmonic Components

그림 8 동적편심에서의 불평형 자기력 해석결과(정격부하)

Fig. 8 Unbalanced magnetic force at full load with dynamic eccentricity



(a) Unbalanced Magnetic Force



(b) Harmonic Components

그림 9 혼합편심에서의 불평형 자기력 해석결과(정격부하)  
Fig. 9 Unbalanced magnetic force at full load with mixed eccentricity

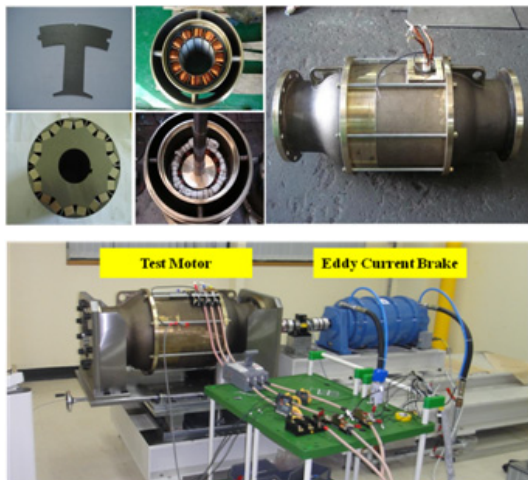
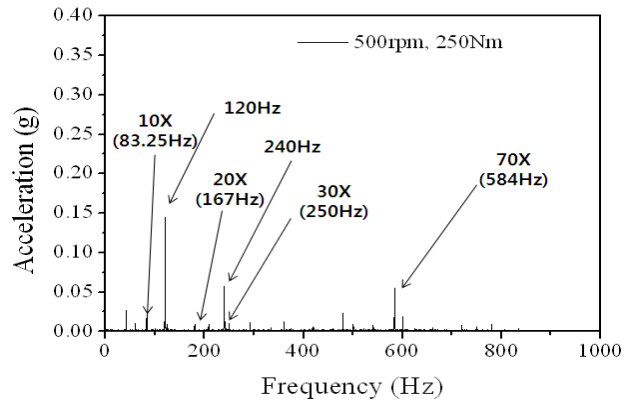
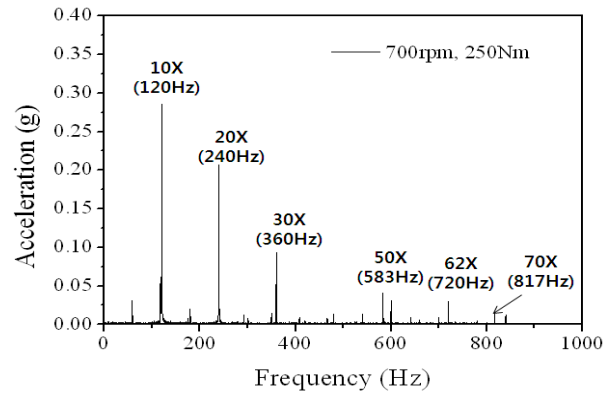


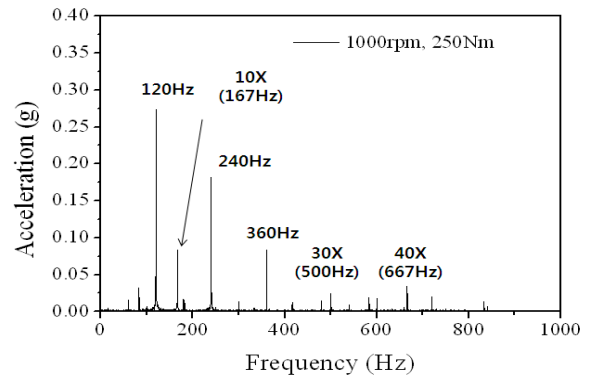
그림 10 시제품과 Test 플랫폼  
Fig. 10 Test sample and set up



(a) 500rpm



(b) 700rpm



(c) 1000rpm

그림 11 진동 시험 결과  
Fig. 11 Vibration test results

것으로 판단된다. 회전주파수에 대한 10X성분은 모든 조건에서 발생함을 볼 수 있다. 시스템 고유치와 가진력의 주파수가 일치하는 원인으로 700rpm의 가속도 수준이 1000rpm보다 높게 나타나고 있다. 10X성분은 편심에 의한 불평형 자기력과 radial force 특성에 의해 나타난 것으로 판단하였다. 30X성분은 불평형 자기력의 주파수 성분과 토크리플 성분의 중첩으로 발생하는 것으로 분석하였다. 10극 12슬롯 모델의 토크리플은 매우 낮은 수준으로 가속도의 30X 성분도 10X대비 낮게 나타남을 알 수 있다.

### 3. 결 론

선박 Anti-healing pump 적용을 위한 100kW급 IPM 전동기에 대한 편심에 의한 전자기 가진력 분석을 2D FEA를 이용하여 수행하였다. 8극 12슬롯모델과 10극 12슬롯 모델의 정적편심, 동적편심 그리고 혼합편심에 따른 불평형 자기력 특성을 해석하고 FFT를 통해 주파수 분석을 실시하였으며, 진동시험을 통해 시험 검증하였다. 10극 12슬롯모델의 자기적 복잡성으로 인해 8극 12슬롯 모델 대비 많은 불평형 자기력의 고조파 성분을 함유하고 있음을 알 수 있다. 편심은 제조상 피할 수 없다는 것을 고려할 때, 편심의 유형에 따른 불평형 자기력 특성을 면밀히 분석함으로써 대상모델의 진동소음 현상과 편심발생의 유형과의 관계를 파악하는데 유용할 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

[1] TJE Miler, "Design of brushless Permanent Magnet Motor", Clarendon press, Oxford, 1994

[2] 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 Trans. on Magnetics, Vol. 46, No7, pp.2675~2685, July 2010

[3] Z.Q. Zhu, Z.P. Xia, L.J. Wu, and Geraint W. Jewell, "Analytical Modeling and Finite-Element Computation of Radial Vibration Force in Fractional-Slot Permanent Magnet Brushless Machines", IEEE Trans. on Industry Applications, vol 46, no. 5, pp. 1908~1918, 2010

[4] Taeyong Yoon, "Magnetically Induced Vibration in a Permanent-Magnet Brushless DC Motor with Symmetric Pole-Slot Configuration", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 41, no. 6, pp.2173~2179, 2005

[5] G. H. Kang, J. Hur, B. W. Kim, and B. K. Lee, "The Shape Design of Interior Type Permanent Magnet BLDC Motor for Minimization of Mechanical Vibration", IEEE Conf. Energy Convers., pp.2409~2414, 2009

[6] F. Magnussen and H. Lendenmann, "Parasitic Effects in PM Machines with Concentrated Winding", in Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting, Hong Kong, pp.1044~1049, Oct. 2-6, 2005

[7] A. M. El-Raefae, T.M. Jahns, and D. Novotny, "Analysis of Surface PM Machines with Fractional-Slot Concentrated Windings", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol.21, pp.34~43, 2006

[8] Y. S. Chen, Z.Q. Zhou, and D. Howe, "Vibration of Permanent Magnet Brushless Machines having a Fractional Number of Slots per Pole", IEEE Trans. on Magnetics, vol.42, no.10, pp.3395~3397, 2006

[9] Z.Q.Zhu, Dahanman Ishak, David Howe, and Jintao Chen, "Unbalanced Magnetic Forces in Permanent-Magnet Brushless Machines with Asymmetric Phase Windings", IEEE Trans. on Industry Applications, vol.43, no.6, pp.1544~1553, 2007

[10] G.H. Kang, Y.D. Son, and G.T. Kim, "The Noise and Vibration Analysis of BLDC due to Asymmetrical Permanent-Magnet Overhang Effects", IEEE Trans. on Industrial Application, vol.44, no.5, pp.1569~1577, 2008

### 저 자 소 개



#### 이 선 권 (李 宣 權)

2002년 공학석사, 창원대(전기공학), 2001년~2010년 LG전자 모터연구실 책임연구원, 2010년~현재 한국조선해양기자재연구원 그린전력IT 연구센터 선임연구원, Tel : 051-400-5122 E-mail : sunkwonlee@komeri.re.kr



#### 강 규 홍 (姜 圭 洪)

2001년 공학박사, 창원대(전기공학), 1994년~1998년 LG전자(주) 주임연구원. 2001년~2004년 창원대학교 BK교수, 2005년~2007년 (주)모터벳인터내셔널 연구소장, 2009년~현재 한국조선해양기자재연구원 그린전력IT 연구센터 센터장, 2006년~현재 IEEE Senior Member. 2011년~현재, 대한전기학회 B부문 학술이사. Tel : 051-400-5121 E-mail : ipmsm@korea.com



#### 허 진 (許 眞)

1999년 공학박사, 한양대(전기공학), 1999년~2000년 Texas A&M Univ. Post-doctoral Research Associate, 2000년~2001년 한양대 연구교수, 2002년~2008년 전자부품연구원 지능메카트로닉스연구센터장/책임연구원, 2008년~현재 울산대 전기전자정보시스템 공학부 조교수, 2004년~현재 IEEE Senior Member, 2006년~현재, Associate Editor, IEEE Trans. on Power Elec., 2008년~현재, Associate Editor, IEEE Trans. on Vehicular Technology. 2008년~현재, IEEE Intelec 2009 Conference, Publication Chair. 2009년~현재, KIEE Senior Member 및 B부문 편집이사. Tel : 052-259-1282 E-mail : jinhur@ulsan.ac.kr