

# 매입형 영구자석 전동기의 전자기력을 고려한 소음특성 분석

## Analysis of Noise Characteristic Considering Magnetic Force of IPM Motor

이홍주\*·권중학\*·김광석\*·황건용\*\*·황상문†

Hong-Joo Lee, Joong Hak Kwon, Kwang-Suk Kim, Gun-Yong Hwang and Sang-Moon Hwang

**Key Words** : acoustic noise (소음), interior permanent magnet motor (매입형 영구자석 전동기), electromagnetic force (전자기력)

### ABSTRACT

Noise sources in electric machines are broadly categorized as magnetic, mechanical, electronic and aerodynamic. Especially, there are several kinds of noise sources due to the change of reluctance by rotor position in IPM motor. To separate acoustic noise by mechanical structure and electromagnetic sources, resonance frequency and the effect of vibration and acoustic noise by electromagnetic sources are analyzed. And then, the structural and electromagnetic designs to reduce acoustic noise are performed. The relevance about the study on noise reduction of IPM motor is verified by noise experiment, noise and vibration analysis.

## 1. 서론

소음은 문명이 발전되면서 우리 생활과 밀접한 분야가 되었다. 기계, 전기 등 여러 제품을 비롯하여 교통수단이 되는 자동차, 철도, 항공기 그리고 선박에 까지도 소음과 밀접한 관계가 있으며, 소음 공해는 우리 사회의 심각한 문제로 대두되었음을 알 수 있다. 특히 가전기기의 소음문제는 우리의 일상생활과 직접적으로 연관되어 있기 때문에 민감한 문제로 다루어지고 있다. 소음원의 대표적인 가전기기로는 에어컨을 들 수 있으며, 에어컨의 기본은 냉방 기능이다. 하지만 요즘은 업체들 간에 냉방 기술 수준이 상향평준화되면서 공기정화 능력, 절전 기능, 전문 설비 등 부가적인 요건들이 에어컨 선택의 중요한 기준이 되고 있으며, 여기에서 간과될 수 없는 사항이 소음 문제이다. 소음에 민감한 사람은 에어컨의 저소음 기능을 고려하여, 조용한 독서실 수준의 소음인 40 dB 이하 제품을 선호한다. 진동과 소음은 소비자의 생활의 불편을 초래하는 것 외에 시스템의 효과적인 운전과 시스템 수명에도 직접적인 영향이 있으므로, 소음을 최소화 하는 설계가 반드시 고려되어야 한다. 고출력화 및 소형화 추세에 맞춰 이를 구성하는 전동기 또한 높은 출력 밀도가 요구됨에 따라, 이에 부응하는 전동기로서 매입형 영구자석 (Interior Permanent Magnet: IPM) 전동기가 각광받게 되었다<sup>(1)</sup>. IPM 전동기는 영구자석에 의한 전자기 토크뿐만 아니라 릴럭턴스 토크를 이용함에 따라 높

은 출력 밀도를 가지는 장점이 있으나, 릴럭턴스 변화로 인해 유도기 또는 표면부착형 영구자석 (Surface-mounted Permanent Magnet: SPM) 전동기에 비해 더 많은 소음원을 가진다는 단점이 있다<sup>(1,2)</sup>. IPM 전동기에서 발생하는 소음의 주요 원인은 크게 전자기적인 원인, 기계적인 원인, 그리고 공기 역학적인 원인으로 분류할 수 있다<sup>(3)</sup>. 이러한 원인 중에서 회전자 이동에 따른 릴럭턴스의 변화는 고정자와 회전자에 작용하는 반경방향의 힘의 변화를 야기하여 전동기의 구조물을 진동시키는 주요한 원인이 된다. 이는 소음의 전자기적인 원인으로 고정자와 회전자 형상뿐만 아니라 권선 방식과 운전 방식에 따라서 그 영향이 달라지므로, 이를 고려한 신 설계 및 해석 기술 확보가 시급하게 요구된다<sup>(4)</sup>. 따라서 본 논문에서는 소음 실험 및 해석 그리고 전자기적 가진원과 소음과의 상관관계 분석을 통하여 전동기 소음에 미치는 소음원을 규명하고 IPM 전동기에서 발생하는 소음을 저감시키기 위한 구조적 및 자기적 설계를 병행하였다. 그리고 시작기와 소음이 저감된 모델에 대한 소음 실험을 통하여 IPM 전동기의 소음 저감 연구 방법에 대한 타당성을 검증하였다.

## 2. 전동기 성능평가

### 시작기의 성능평가

그림 1 과 표 I 은 IPM 전동기의 소음 저감 설계를 위한 시작기의 형상 및 사양을 나타낸 것이다.

† 황상문; 부산대학교 기계공학부  
E-mail : shawng@pusan.ac.kr

Tel : (051) 510-3204, Fax : (051) 581-3104

\* 부산대학교 기계공학부

\*\* 영산대학교 컴퓨터공학과

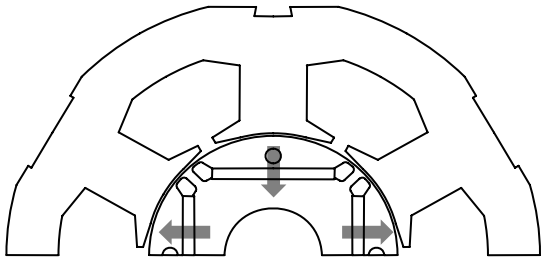


Fig. 1. Configuration of prototype model

Table I. Specification of prototype model

item	value
rated speed	3000 rpm
rated torque	80 kgf·cm
rated power	3 HP
coil diameter	1.2 mm
turns	55 (parallel 2)
rated current	16 Arms
driver	6step 120°
stack length	70 mm
residuals of PM	1.1 T
relative permeability of PM	1.05
material of core	S18

### 전동기 운전속도 변화에 따른 소음 측정

전동기의 소음은 구조적인 원인으로 발생하는 소음과 전자기력에 의해 발생하는 소음이 합쳐져서 전동기 전체의 소음으로 나타난다. 전자기력에 의한 소음은 전동기의 운전속도에 비례하므로 주파수 특성에 따라 변화하며 공진에 의한 소음은 주파수 특성이 일정하므로 본 실험을 통하여 전자기력에 의한 소음과 공진에 의한 소음을 분해하였다. 그림 2는 전동기의 운전 속도 변화에 따른 소음의 주파수 특

성을 나타낸 것이다. 운전 속도 범위는 30~50Hz 이고, 1m 떨어진 지점에서 수음한 소음의 크기를 색으로 나타내었다. 운전속도가 변할 때 소음의 크기가 일정하게 변하는 주파수 대역과 운전 속도 변화에 상관없이 소음의 크기가 큰 주파수 대역을 1.8~2.4, 4kHz 로 나눌 수가 있다. 소음의 크기가 일정하게 변하는 주파수 대역의 경우 운전 속도의 4X 배의 간격으로 소음이 발생하므로 전자기적 가진력이 소음에 영향을 미치는 것이다. 주파수 4kHz 에서 운전 속도 변화와 무관하게 소음이 발생하는 것은 제어기의 스위칭 주파수에 의한 것이다. 또한 주파수 1.8~2.4, 4kHz 에서의 소음은 전동기 및 전동기를 지지하고 있는 구조물의 공진영향이다<sup>5)</sup>.

### 소음의 지향성 측정

전동기 운전시 소음에 문제가 되는 주파수 대역 및 소음의 지향성을 확인하고 소음의 특성을 확인해야 한다. 그림 3은 소음의 지향성을 측정하기 위해 소음을 측정할 위치를 나타낸 것이다. 무부하 상태로 3000rpm 의 속도로 운전하면서 전동기 표면의 각 위치별 소음을 측정한다. 각도는 15°간격으로 24 개의 포인트이고 고정자의 중양을 기준으로 각각 좌, 우 5cm 간격으로 15cm 까지 7 개 포인트 위치에서 소음을 측정하였으며, 마이크로 폰과의 간격은 고정자의 표면에서 10cm 이다. 총 168(24×7)점의 위치에서 1/3 옥타브밴드로 측정했을 때 2, 4kHz 에서 소음이 지향성을 갖고 있었다. 그림 4는 주파수별 소음의 지향성을 분석한 결과를 나타낸 것이다. 그림 4, (a)는 2kHz 에 대한 소음특성을 나타낸 것으로서 전동기의 C 상의 권선이 감기는 치를 기준으로 45° 위치부터 90° 간격으로 4 곳의 위치에서 소음이 가장 큰 양상을

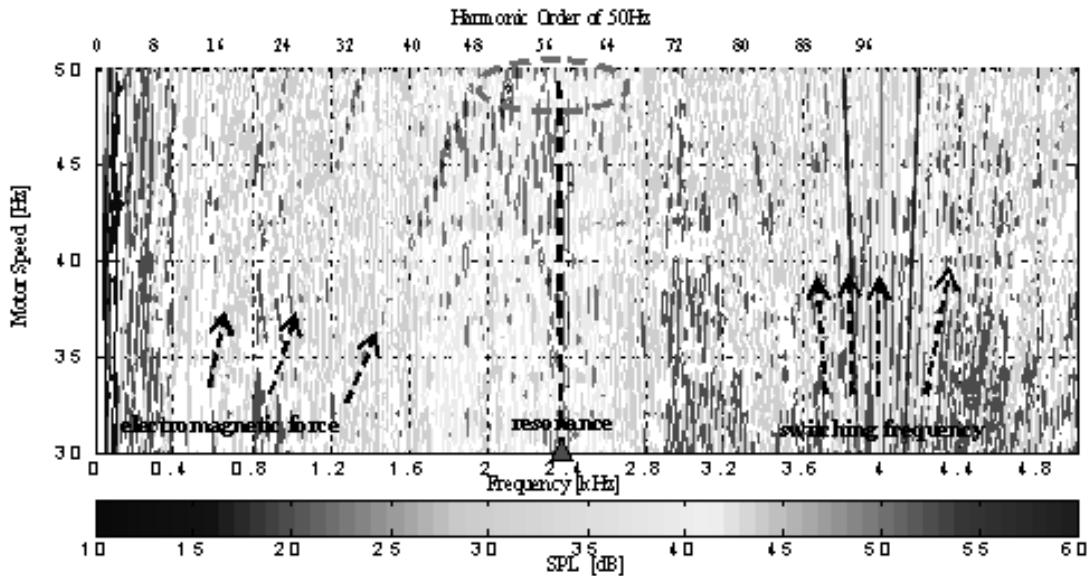


Fig. 2. Noise spectra according to motor speed

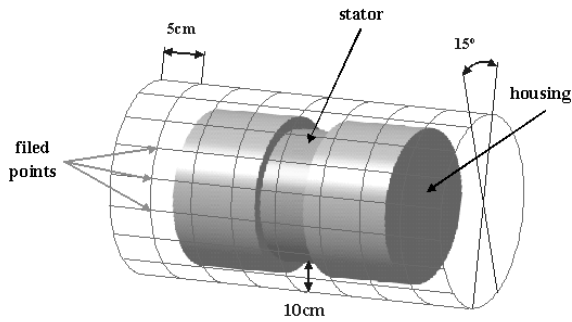


Fig. 3. Measurement of noise directivity

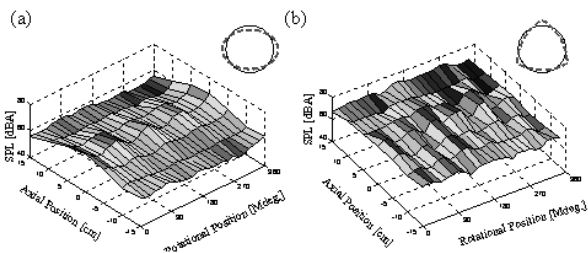


Fig. 4. Experiment results for noise directivity of prototype model; (a) 2kHz, (b) 4kHz

보였다. 그림 4, (b)는 4kHz 에 대한 소음특성이며 약 60° 간격으로 6 곳의 위치에서 소음이 큰 양상을 나타낸다.

### 모드 실험 및 해석

본 실험의 목적은 앞선 소음 실험 결과에서 공진에 의해서 발생하는 소음의 원인을 규명하고 시스템을 이루는 각각의 요소별로 모드 실험을 함으로써 각각의 공진 주파수가 어떤 요소의 것인지 확인하는데 있다. 각각의 요소를 줄에 매달아 거치대에 고정해두고 충격 해머로 가진시킨 것과 소음실험에서와 동일한 상태로 지그에 고정하여 충격 해머로 가진시킨 것을 가속도계로 진동신호를 측정하여 주파수 응답 함수 (Frequency Response Function: FRF)를 구하였다. 전동기를 구성하는 각각의 부품별로 모드 실험을 하였다. 그 결과 그림 5 와 같이 고정자의 공진주파수는 1.5kHz 이지만 모터단품(고정자와 하우징이 결합된 상태)의 경우 공진주파수는 1.8kHz 로 약 300Hz 정도 증가하는 경향을 보였다. 회전자와 축의 영향은 모터단품의 공진에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 측정되었다. 또한 모터단품을 지그에 고정한 후 실험한 결과는 2.6kHz 로 나타났다. 이는 하우징과 지그가 고정자의 표면 일부를 감싸고 있어서 고정자의 변위가 제한되고 있어 하우징과 지그가 고정자의 강성을 증가시키는 역할을 한다. 이 결과로 소음 실험에서 나타난 1.8~2.6kHz 의 공진주파수는 전동기의 고정자가 그 원인임을 알 수 있다. 전동기의 구조적인 동특성을 분석하기 위해 유한 요소 해석 (Finite Element Analysis : FEA)을 하였다. 그림 6 을 보면 모드해석을 통한 시작기의 공진주파수가 그림 5 의 실험 결과와 거의 일치한다.

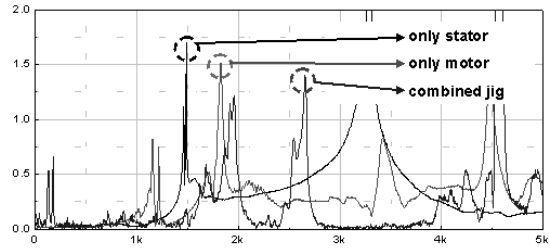


Fig. 5. Results of modal test

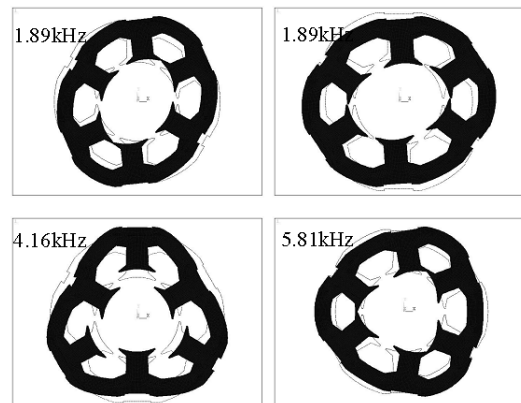


Fig. 6. Simulated mode shape

1550, 1558Hz 에서 서로 직교하는 타원형 모드를 확인 할 수 있는데 실제로 소음을 측정할 때는 하우징 및 지그 결합에 의한 공진 주파수 증가를 고려해줘야 한다. 소음의 지향성 측정 실험 결과와 비교하여 볼 때 2kHz 부근에서 90°간격으로 소음이 커지는 것은 바로 1550, 1558Hz 에서 고정자의 공진에 의한 것이다. 그리고 4kHz 부근의 60°간격으로 소음이 커지는 결과는 3449Hz 의 3 각형 모드와 일치하였다.

### FEA 를 이용한 전자기력 분석

소음을 분석하기 위해서는 소음의 원인이 되는 진동을 분석할 필요가 있으며, 진동의 원인 중 하나인 전자기력을 분석할 필요가 있다. 본 논문에서는 진동 해석을 위해 다음과 같이 가정하였다. 첫째, 고정자 표면에 접한 공기층의 운동에너지가 소음에너지로 변환된다. 둘째, 하우징 및 지그 결합으로 인한 강성의 증가를 물성치 변화로 FEA 에 반영한다. FEA 로 계산된 전자기력을 가진력으로 이용한다. 전자기력의 기본 주파수인 200Hz 간격으로 해석을 수행하였다. 그림 7 은 2.2kHz 에서의 진동 모드 형상을 나타낸 것이다. 진동해석 결과를 이용해서 소음 특성을 파악하기 위하여 고정자 표면 공기층의 운동 에너지가 모두 소음에너지로 변환된다고 가정할 때 운동에너지의 고조파 분석을 그림 8 에 나타내었다. 진동 해석 결과로부터 전동기 운전 중에 발생하는

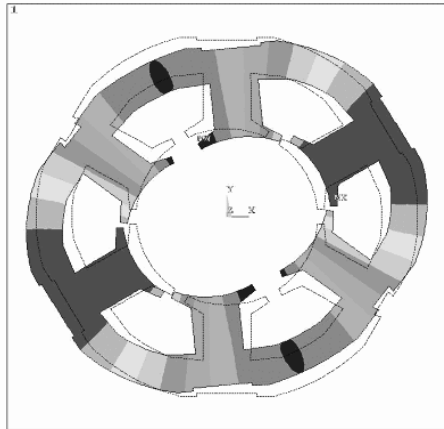


Fig. 7. Resonance mode shape at the 2.2kHz

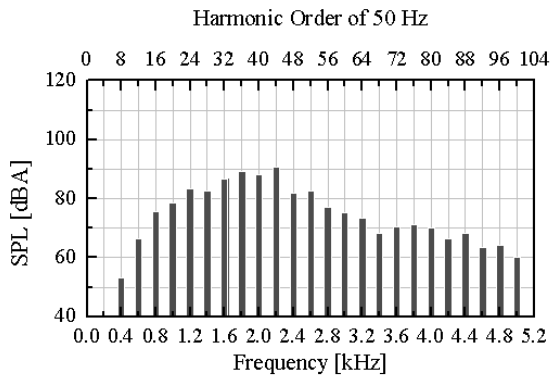


Fig. 8. Result of noise analysis

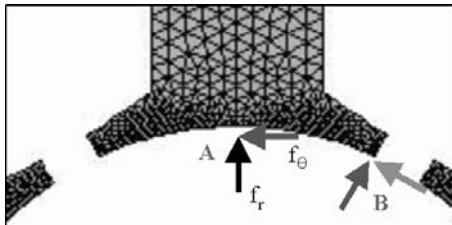


Fig. 9. Location and direction of unit force

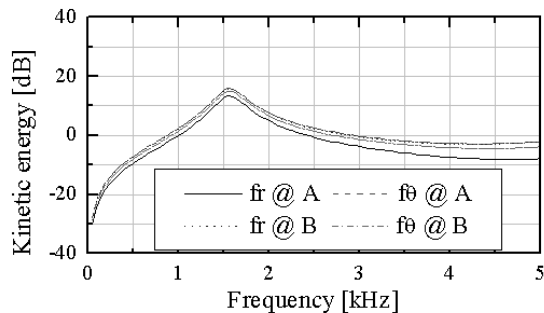


Fig. 10. The vibration effect by the unit force

2kHz 부근의 소음은 고정자 진동 모드에 의해 발생한다는 것을 알 수 있다. 전자기력의 가진 위치와 방향별로 진동에 미치는 영향을 규명하기 위하여 그림 9와 같이 위상차를 고려한 단위 힘(1N)을 가진력

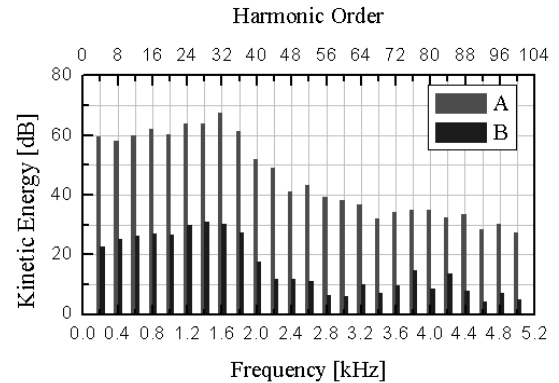


Fig. 11. Comparison of vibration according to local magnetic force

으로 진동해석을 수행하였다. 그림 10은 단위 힘이 진동에 미치는 영향을 나타낸 것이며 가진 위치와 방향에 따라 진동량이 크게 변하지 않는다는 것을 알 수 있고, 고정자 표면의 진동에 가장 크게 영향을 미치는 모드는 타원형 모드라는 것을 알 수 있다.

전자기력을 분석하기 위해서는 2D FEA와 맥스웰 응력 텐서법을 이용되었다. FEA를 통해 구해진 전자기력을 가진력으로 진동해석이 가능하며, 치의 공극면과 옆면에 작용하는 전자기력의 효과를 비교하였다. 그림 11은 치의 공극면에 작용하는 전자기력(A)이 옆면에 작용하는 전자기력(B)에 비해 50dB(300배)정도 큰 진동량을 발생시키는 것을 보여주고 있다. 이는 옆면에 작용하는 힘이 공극면에 작용하는 힘에 비해 매우 작기 때문에 진동에도 동일한 양상을 보여준다. 소음 해석의 가진력으로 진동해석으로 구해진 고정자의 표면 속도를 사용하였고 고정자의 표면 속도에 의한 음압을 경계요소법(Boundary Element Method: BEM)으로 해석하였다.

### 3. 소음 저감 설계

#### 개선기 설계

전동기의 소음을 저감시키기 위하여 구조적 설계와 자기적 설계를 병행하였다. 구조적 설계안은 고정자의 공진점 및 강성을 증가를 목적으로 하고 자기적 설계는 반경방향 힘의 고조파 성분 저감을 목적으로 하였다. 그림 12는 고정자 설계변수 및 치수 변화 정도를 나타낸 것이고 표 II는 설계변수에 대한 모드 해석 결과를 나타낸 것이다. 변수 A, B, C에 의한 1차 공진 주파수는 시작기에 비해 큰 변화가 없으나, 변수 D와 E에 의한 1차 공진 주파수는 각각 1843, 1579Hz로 시작기보다 증가하였다. 이 결과로부터 설계변수 D와 E는 고정자의 공진 주파수를 변화시키는 주요 인자임을 알 수 있다. 설계

변수 변화에 따라 고정자의 공진에 의한 소음의 변화 양상을 알아보기 위해 FRF 를 비교하였다. 해석 조건은 단위 힘을 치 표면 중심에 가진력으로 사용하는 것이다. 그림 13 은 공진 주파수가 높아질수록 진동량이 감소한다는 것을 나타내고 있다. 특히 설계 변수 D 인 요크 두께를 2mm 증가시켰을 때 고정자의 강성 증가로 인하여 진동량이 크게 감소하여 소음이 감소하였다. 그림 14 는 시작기에 비해 구조적으로 1 차 공진 주파수가 높아지고 강성이 증가한 고정자 형상을 나타낸 것이고, 표 III 은 구조적으로 새로 설계된 고정자와 시작기의 고정자의 공진주파수를 측정 한 결과이다.

시작기와 동일한 출력 조건에서 구조적으로 재설계된 고정자 형상을 이용하여 전동기 소음 저감을 위한 자기적 설계를 하였다. 전동기 소음의 주요 원인이 되는 반경방향 힘의 고조파 성분을 반응값으로 실험계획법(Design Of Experiments: DOE)을 수행하고 반응표면법(Response Surface Method: RSM)을 이용한 최적 설계를 수행하였다. 그림 16 은 DOE 및 RSM 을 이용한 최적설계를 수행하는데 사용되는 설계변수를 나타낸 것이며, A, B 는 각각 pole arc, slot open 이다. 치 하나가 받는 반경방향 힘 분포 및 전동기 출력에 기여하는 토크 성분은 pole arc 와 slot open 에 의해 큰 영향을 받으므로 설계 변수로 선택하였다. IPM 전동기는 회전자의 위치에 따라 인덕턴스가 변한다. 반경방향 힘의 고조파 성분을 반응값으로 DOE 를 수행하면서 정도 높은 결과를 얻기 위해서는 실제 운전 상태를 반영한 해석 조건이 필요하며, 다음과 같은 과정을 통해 수행하였다. 첫째, 3000rpm 에서의 무부하시 역기전력을 산정한다. 둘째, 운전 상태에서 각 상의 인덕턴스를 산정한다. 셋째, BLDC 인버터의 구동 원리를 반영한 동특성 해석을 통해 DOE 수행에 필요한 전자기적 가진원인 전류를 산정한다. RSM 을 이용한 최적설계를 수행하였으며, 목적 함수는 반경방향 힘의 고조파 성분이다. FEA 를 통해 산정된 반경방향 힘의 고조파 성분에 대하여 A-weighting factor 와 시작기의 소음 발생 주파수 대역에 가중치를 부여한다. 그림 16 은 반경방향 힘의 고조파 성분에 가중치를 부여하는 정도를 나타낸 것이다. 반경방향 힘의 고조파 성분에

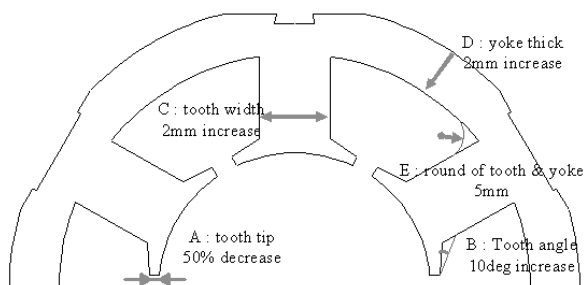


Fig. 12. Design factors for mechanical design

Table II. Modal analysis results according to design factors

resonance(Hz)	proto	A	B	C	D	E
first	1503	1523	1492	1503	<b>1843</b>	<b>1579</b>
second	3370	3454	3325	3339	4265	3459
third	4339	4387	4311	4436	5257	4872

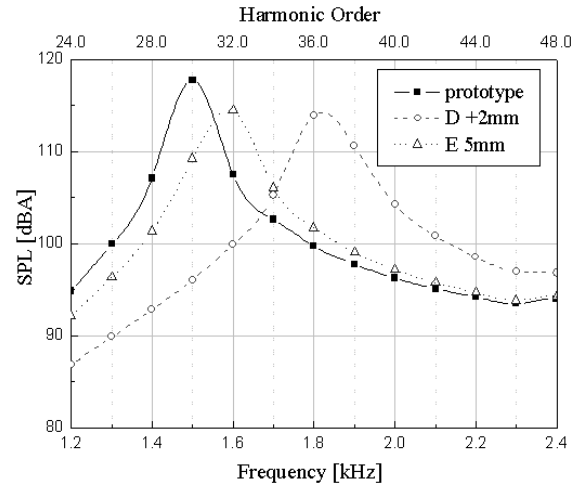


Fig. 13. Noise analysis according to design factors

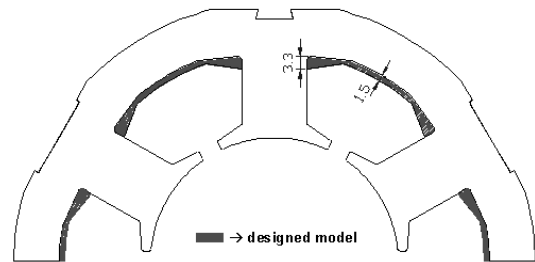


Fig. 14. Design result for structure.

Table III. Comparison of resonance frequency

resonance (Hz)	prototype	designed model
first	1550	1888
second	3449	4164
third	4643	5814

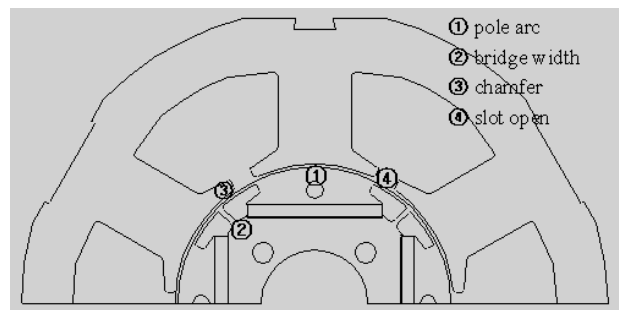


Fig. 15. Design factors for magnetic design

대한 목적함수를 설정하는 방법은 다음과 같다. 첫째, FEA 를 통해 산정된 반경방향 힘의 고조파 성분을 dB 단위로 나타낸다. 둘째, A-weighting factor 와 소음 영역에 가중치 factor 를 고려한다. 셋째,

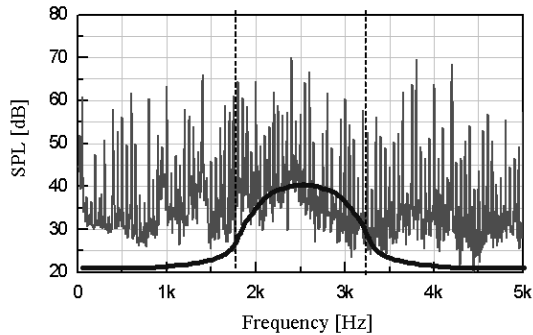


Fig. 16. Degree of weighting factor for noise area

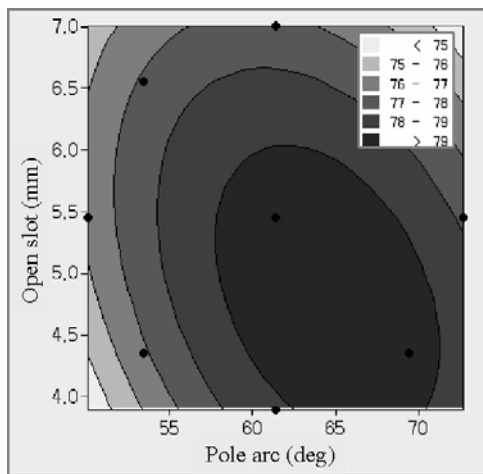


Fig. 17. Result of RSM for pole arc and slot open

weighting factor 가 고려된 힘을 선형 스케일로 나타낸다. 넷째, 소음은 음압의 제곱의 합에 비례하므로 이를 반영한다. 그림 18 은 pole arc 와 slot open 을 이용하여 13 번의 실험을 수행하고 반경방향 힘의 고조파 성분에 대한 RSM 결과이다. 전동기 소음에 영향을 미치는 반경방향 힘의 고조파 성분을 저감시키는 위해서는 slot open 을 최소화시키고 pole arc 를 해석영역에서 최대 또는 최소로 했을 때 반경방향 힘의 고조파 성분이 저감된다. 이러한 해석 결과를 바탕으로 개선기를 제작하여 소음을 측정 한 결과 전체소음이 시작기에 비해 4.9dB 저감시켰다.

#### 4. 결론

전동기 소음을 저감시키기 위해서는 먼저 소음 실험을 통한 소음원을 규명해야 한다. 이를 위해서는 구조물의 각 위치별 소음 실험 및 modal test 등을 통해서 구조물 공진에 의한 소음과 전자기적 가진원에 의한 소음을 구분해야 한다. 그리고 진동과 소음 간의 상관관계 및 전자기적 가진원과 소음과의 상관관계를 분석해야 한다. 전동기에서 발생하는 진동이 소음에 영향을 미친다는 것을 소음 해석 결과로부터

확인하였다. IPM 전동기는 고효율화 및 소형화 추세에 맞춰 높은 출력 밀도를 갖는 기기이다. 공극에서 발생하는 반경방향 힘의 고조파 성분은 회전방향 힘에 비하여 상대적으로 매우 크다. 소음을 저감시키기 위해서는 전동기의 구조적인 측면과 전자기적 측면에 대한 개선이 동시에 필요하다. 구조적인 측면에서는 전동기 구조물의 공진 주파수 변화, 강성 증대 그리고 기구적 안정성을 증대시키는 고정자 설계가 요구된다. 그리고 전자기적 측면에서는 반경방향 힘의 고조파 성분을 저감시킬 수 있는 설계가 필요하다. 본 논문에서 기술된 설계안을 토대로 자기 회로를 설계하고 소음 실험을 한 결과 시작기와 개선기의 전체소음은 각각 74.6, 69.7dBA 로 시작기에 비해 개선기의 전체 소음이 4.9dBA 감소되었다. 그리고 소음 실험시 측정된 전류를 이용해서 산정된 반경방향 힘의 고조파 분석과 소음 해석 결과의 경향이 소음 실험 결과와 유사함을 보였다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

#### 참 고 문 헌

- (1) Sung-Il Kim, Ji-Young Lee, Jung-Pyo Hong, Yoon Hur and Yeon-Hwan Jung, "Optimization for Reduction of Torque Ripple in Interior Permanent Magnet Motor by Using Taguchi Method," IEEE Trans. Magn., vol. 41, No. 5, pp.1796-1799, May 2005.
- (2) Y. Okada, Y. Kawase and S. Sano, "Development of optimizing method using quality engineering and multivariate analysis based on finite element method," in Proc. ISEF 2003, vol. 2, pp. 737-739, Nov. 2003.
- (3) M. N. Anwar and Iqbal Husain, "Radial Force Calculation and Acoustic Noise Prediction in Switched Reluctance Machines," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 36, No. 6, pp. 1589-1597, Nov./Dec. 2000.
- (4) A. Strassis and A. M. Michaelides, "The Design of low vibration doubly salient motors," Electric Machines and Power system, vol. 27, pp. 967-981, 1999.
- (5) Lee, D. I., Shin, H. J., Lim, J. Y. and Han, S. D., 2002, "Acoustic Noise Reduction of A SRM for Fan in Air conditioner", Proceedings of the KSNVE Annual Fall Conference, pp. 816-821.