

고정자 형상에 따른 IPMSM의 코깅토크와 소음 저감 연구

Reducing Noise in an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor by Minimizing Cogging Torque by Changing the Shape of the Stator

김 종 욱* · 정 순 영* · 김 진 수** · 진 성 욱*** · 윤 태 영†

Jongwook Kim*, Soonyeong Jung*, Jin Soo Kim**,

Sung Wook Jin*** and Taeyoung Yoon†

(Received April 9, 2026 ; Revised May 26, 2026 ; Accepted June 26, 2026)

Key Words : IPMSM(매입형 영구자석 동기모터), Cogging Torque(코깅토크), Back EMF(역기전력), Stator(고정자), Multiphysics Analysis(멀티피직스 해석)

ABSTRACT

This study presents a multiphysics analysis integrating electromagnetic, structural, and acoustic simulations to reduce noise and vibration in an interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) for air conditioners. Cogging torque was analyzed through electromagnetic simulations as the primary source of motor noise. The motor was designed to reduce variation in magnetic reluctance to reduce cogging torque while minimizing the output degradation associated with a decrease in magnetic flux density. To that end, four design variables related to the stator geometry were defined, and an electromagnetic-based optimization was performed to derive an optimal stator shape with reduced cogging torque. The results of the electromagnetic analysis showed that the cogging torque was reduced by approximately 73.5 % compared with the baseline model. Accordingly, the radiated noise predicted by acoustic analysis achieved a maximum reduction of 3.25 dB(A) compared to the baseline motor under a measurement condition of 1 m in the axial (Z) direction. These results indicate that the proposed multiphysics analysis contributes to the development of low-noise motors while enhancing the comfort of the user and their satisfaction with the product.

1. 서 론

최근 가전제품 시장에서는 고효율, 고성능 및 소형화를 동시에 만족하는 모터에 대한 요구가 증가하고 있다. 이러한 요구에 따라 IPMSM(interior permanent magnet synchronous motor)은 높은 출력 밀도

와 효율을 바탕으로 에어컨과 같은 가전제품용 구동 모터로 널리 적용되고 있다. 그러나 IPMSM은 영구자석이 표면에 부착된 구조인 SPMSM(surface permanent magnet synchronous motor)에 비해 소음의 전자기적 원인인 코깅토크(cogging torque)의 증가로 인해 소음 및 진동이 더 크게 발생하는 경향이 있다⁽¹⁾. IPMSM은 모터 내부에 영구자석이 매입된 구조로 인해 자속 분포의 불균일성과 자기저항 변화에 의해 코

† Corresponding Author ; Member, Changwon University, Professor
E-mail : tyoon@changwon.ac.kr

* Changwon University, Master Course

** LG Electronics, Research Engineer

*** Ohsung EM, Research Engineer

‡ Recommended by Editor Cheol Ung Cheong

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

깁토크가 발생하는데, 코깁토크는 영구자석 모터에서 영구자석과 슬롯 사이의 자기저항 변화에 의해 발생하는 대표적인 토크 리플 성분이다. 이는 모터의 전원이 인가되지 않은 상태에서도 나타나는 현상으로 운전 중에 주기적인 토크 맥동을 발생시킨다. 이러한 토크 맥동은 회전자의 미세한 회전 불균일성을 초래하고, 그 결과 기계적 진동과 소음을 증가시킨다⁽²⁾. 따라서 코깁토크 저감은 모터의 소음 저감을 위한 핵심적인 설계 요소이다. 특히 가전제품을 사용함에 있어서 사용자가 체감하는 NVH(noise, vibration, and harshness) 특성 개선의 중요성이 커지고 있다. 기존의 코깁토크 저감 연구에서는 회전자 형상 변화, 극 수와 슬롯 수 비 조절, 스큐 기법, 테이퍼링과 같은 구조적 변형을 통한 설계 기법이 주로 제안되어 왔다⁽³⁻⁹⁾.

그러나 이러한 방법은 모터의 기본 형상을 크게 변화시킬 수 있으며, 실제 제작 및 공정 측면에서 있어서 제약이 발생할 수 있다.

더불어, 전자기 해석을 통해 도출된 코깁토크 저감이 진동 및 방사 소음 개선으로 이어지는 과정을 정량적으로 분석한 연구는 상대적으로 제한적이다.

따라서 이 논문에서는 고정자 형상 변수를 기반으로 코깁토크를 저감할 수 있는 설계 기법을 제안하고, 전자기-구조-음향해석을 연계한 멀티피직스 해석을 통해 소음 저감 효과를 정량적으로 평가하였다. 이를 위해 고정자 형상과 관련된 4개의 설계 변수를 정의하고, 파라메트릭 스터디(parametric study)를 통해 코깁토크가 저감되는 형상을 도출하였다. 이후 도출된 모델에 대해 구조 및 음향해석을 수행하여 기존 모델과의 진동 및 방사 소음 특성을 비교하였다.

2. IPMSM 구조 및 코깁토크 저감 설계

2.1 IPMSM

이 연구에서 대상으로 하는 IPMSM은 Fig. 1과 같이 고정자, 회전자 그리고 영구자석 등으로 구성된다. 고정자는 회전자를 둘러싸는 고정되어있는 구조물로 12개의 슬롯이 있으며 슬롯 내부에는 코일이 감겨 전류 인가 시 자기장을 형성하게 된다. 회전자는 모터 중심부에 위치하여 회전하는 부분으로, 내부에 10개의 영구자석이 배치되어있다. 연구대상의 제원은 Table 1에 나타냈다. 이 논문에서 연구된 모터는 영구자석이 회전자 내부에 스포크 형태로 배치된 구조를

가지며, 이러한 구조는 높은 출력 토크와 소형화 측면에서의 장점이 있으나, 동시에 코깁토크가 증가하는 원인이 된다.

2.2 IPMSM의 전자기 해석

IPMSM의 코깁토크와 모터 성능의 지표로 활용되는 역기전력(이하 back EMF)을 분석하기 위해 ANSYS Maxwell 2D를 활용하였다. Fig. 2(a)와 같이 회전자와 고정자 사이의 공극에서 발생하는 자속 분포, 자기저항 변화율과 코깁토크 및 전자기력을 계산하기 위해 공극 영역, 고정자 치, 고정자 치와 마주보는 회전자 부분의 mesh를 0.5 mm로 생성하였다.

이 연구의 모터는 10극 12슬롯을 가지며, 구조 및 전자기적 대칭성에 의해 Fig. 2(b)와 같이 5극 6슬롯으로 나타낼 수 있다. 이는 해석시간의 효율성을 향상시키기 위함이다.

ANSYS Maxwell 2D에서 회전자의 회전 운동을 적용하기 위해 회전자 및 영구자석을 포함하는 영역을 회전 영역으로 정의하고, Fig. 2(b)와 같이 이를 band 영역으로 설정하였다. Band 영역은 회전자와 고정자 사이의 상대 운동을 정의하기 위한 영역으로, 회전자 영역이 정격 회전 속도로 회전하도록 하는 역할을 한다. 외곽 경계면에는 자기장 해석을 위한

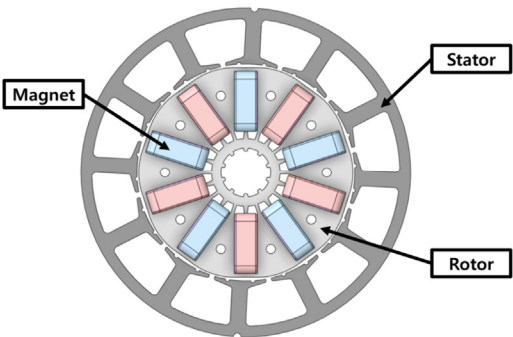
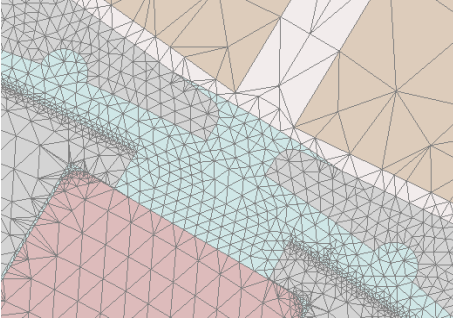


Fig. 1 Original of the IPMSM

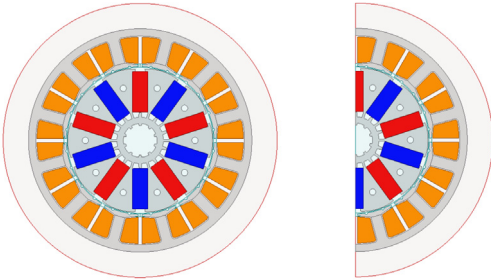
Table 1 Original of the IPMSM

Parameter	Value [mm]
Notch depth (d_n)	0.65
Notch length (l_n)	1.3
Air shoe length (l_a)	0.97
Stator shoe length (l_s)	16.37

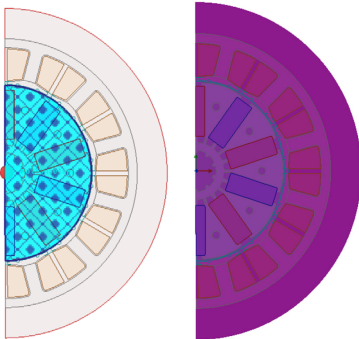
boundary 조건을 Fig. 2(c)와 같이 적용하였다. 이는 유한한 해석 영역에서 외곽 경계가 모터 내부 및 공극 영역의 자계 분포에 미치는 영향을 최소화하기 위한 것이다. 이 해석은 실제 모터 소음 측정 실험의 재현성을 위해 무부하 조건에서 회전자를 정격 회전 속도인 800 r/min으로 회전하는 조건으로 수행하였다. 따라서 이 연구에서 예측한 소음은 무부하 회전 조건에서 영구자석과 고정자 슬롯 구조의 상대 운동에 의해 발생하는 전자기력 가진에 따른 진동 및 소음 특성을 분석한 것이다.



(a) Refined mesh of air-gap, rotor and stator



(b) Full 10P/12S model and reduced 5P/6S model



(c) Band and boundary

Fig. 2 Settings for electromagnetic analysis

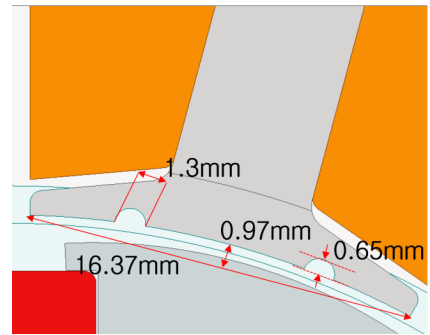
2.3 코깅토크 저감을 위한 설계 변수 선정

코깅토크는 회전자의 영구자석과 고정자 슬롯 사이에 발생하는 인력에 의해 발생하며 슬롯의 코일에 전류가 인가되지 않은 무부하 토크이다. 이는 회전자 위치에 따라 공극의 자기저항이 주기적으로 변화하면서 발생한다. 코깅토크는 공극의 자속 분포와 자기저항 변화율에 비례하며 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

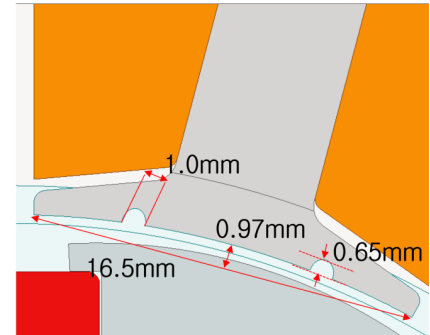
$$T_{\text{cog}} = \frac{1}{2} \Phi^2 \frac{dR_m}{d\theta} \quad (1)$$

여기서, T_{cog} 는 코깅토크를 나타내며 Φ 는 자속을, R_m 는 회전자 슬롯, θ 는 회전각을 나타내며 $\frac{dR_m}{d\theta}$ 는 회전자 위치에 따른 자기저항 변화율을 나타낸다. 일반적으로 코깅토크를 저감하기 위해 공극의 자속 분포를 감소시키는 방법이 사용될 수 있으나, 이는 모터 성능의 저하로 이어질 수 있다^(10,11).

따라서 이 연구에서는 모터 성능의 저하를 최소화하기 위해 공극의 자속 분포를 유지하면서 자기저항



(a) Original



(b) Optimized

Fig. 3 Original and optimized stator notch geometry

변화율을 감소시키는 방향으로 설계하였다.

이를 위해 코깅토크 저감을 위한 고정자 형상에 대해 설계 변수들을 정의하였다. 고정자 형상은 공극의 자기저항 분포를 변화시켜 코깅토크에 큰 영향을 미치는 요소로 작용한다.

이 연구에서는 고정자 형상과 관련된 4개의 설계 변수를 Fig. 4과 같이 notch depth(D_n), notch length(L_n), air shoe length(L_a) 그리고 stator shoe length(L_s)로 선정하였다. 각 설계 변수는 기존 모델을 기반으로 Table 2와 같이 일정 범위 내에서 일정한 간격으로 두고 전자기 해석을 통해 파라메트릭 스터디를 수행하였다.

2.4 파라메트릭 스터디 Formulation

이 연구에서는 설정된 설계 범위 내에서 코깅토크가 최소가 되는 설계 조건을 도출하기 위해 파라메트릭 스터디를 수행하였다. 설계변수, 목적함수, 제약조건은 식 (2)와 같다.

Find d_n, l_n, l_a, l_s
to $\min_x F(x) = T_{\text{cog}}(x)$
subject to $0.5 \leq d_n \leq 0.7$
 $0.65 \leq l_n \leq 1.3$
 $0.5 \leq l_a \leq 1.2$
 $16.5 \leq l_s \leq 17.0$
 $l_s \in \{16.37\}$

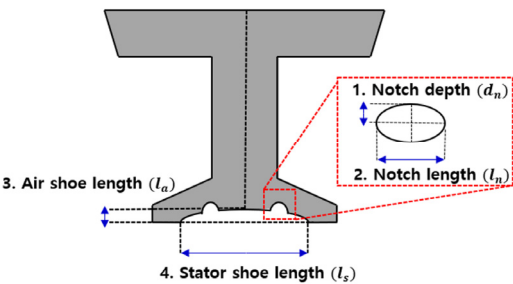


Fig. 4 Design parametric of stator

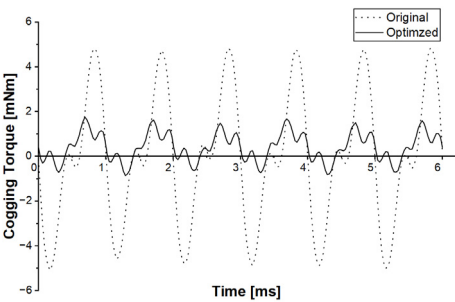
Table 2 Range and interval of stator design variables [unit: mm]

Parameter	Range	Interval
Notch depth (d_n)	0.5 ~ 0.7	0.05
Notch length (l_n)	0.65 ~ 1.3	0.05
Air shoe length (l_a)	0.5 ~ 1.2	0.05
Stator shoe length (l_s)	16.37, 16.5 ~ 17.0	0.1

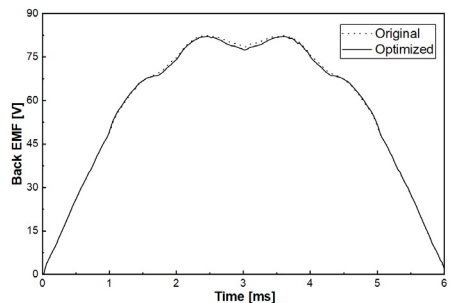
모든 조건에서 해석된 코깅토크 값을 비교하여, 이 연구에서 설정한 설계 범위 내에서 코깅토크가 최소가 되는 설계 변수의 조합을 도출하였다.

2.5 코깅토크 최대 저감 형상 도출

파라메트릭 스터디를 통해 코깅토크가 저감된 형상에 대해 기존 모터와의 코깅토크 및 역기전력(back EMF)을 비교하였다. Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)는 기존 모터와 코깅토크가 저감된 모터의 코깅토크 및 역기전력 파형을 나타낸다. 코깅토크 해석 결과, 기존 모터는 최대 9.9035 mN·m의 값을 나타낸 반면, 코깅토크가 저감된 모터는 2.6315 mN·m으로 감소하여 73.5 %의 저감 효과를 보였다. 이는 고정자의 노치 형상 및 stator shoe 형상의 최적화를 통해 공극 자기저항 변화율이 효과적으로 감소되었기 때문으로 판단된다. 또한, 역기전력 특성을 비교한 결과, 코깅토크가 저감된 모터의 back EMF는 62.06 V에서 62.35 V로 약 0.49 % 증가하였다. 이는 출력 토크 감소 없이 형상 최적화를 통해 코깅토크를 저감하였음을 확인할 수 있다. 코깅토크가 저감된 형상의 설계 변수는 Table 3



(a) Cogging torque



(b) Back EMF

Fig. 5 Cogging torque and back-EMF comparison of the original and optimized motor

과 Fig. 3에 나타내었으며 L_n 1.0 mm, D_n 0.65 mm, L_a 0.97 mm, L_s 16.5 mm에서 해당 조합이 코깅토크 저감에 가장 효과적인 것으로 나타났다.

2.6 코깅토크 저감 원인 분석

코깅토크 저감 원인을 분석하기 위해 이에 비례하는 공극 자속 밀도와 자기저항 변화율에 대해 기존 모터와 코깅토크가 저감된 모터를 비교하였다. Fig. 6(a)는 기존 모델과 코깅토크가 저감된 모터의 공극 자속 밀도를 시간에 대해 비교한 결과이다. x축은 시간에 따른 회전 속도 조건에서 회전자의 위치 변화에 대해 특정 위치의 공극 자속 밀도의 변화를 의미한다. 두 모델에는 설계 변수를 제외하고 동일한 무부하 조건, 회전 속도 그리고 전자기 해석 조건을 적용하였다. 비교 결과, 기존 모터와 코깅토크가 저감된 모터의 공극 자속 밀도를 비교한 결과 큰 차이가 나타나지 않았다. 반면, Fig. 6(b)에 나타난 자기저항 변화율 비교 결과에서는 코깅토크가 저감된 모터가 기존 모터에 비해 전반적으로 변화 폭이 감소한 것을 확인할 수 있다. 특정 구간에서 나타나는 급격한 변화폭이 13.38 A/Wb에

서 7.74 A/Wb로 감소되어 42.1 % 저감되었다. 2.2절에서 앞서 언급한 바와 같이 일반적으로 공극 자속 밀도를 감소시키는 방법은 코깅토크 저감에는 효과적일 수 있으나, 모터 성능 저하를 초래할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 공극의 자속 밀도를 저감시키지 않으면서 자기저항 변화율을 감소시키는 설계 기법을 증명하였다.

3. 멀티피직스 해석 기반 소음 분석

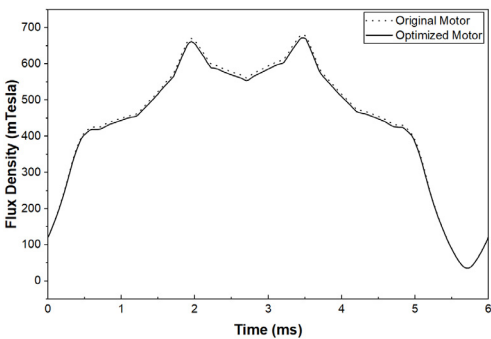
3.1 멀티피직스 해석 워크플로우

이 연구에서는 모터 구동 시 발생하는 진동 및 소음을 정밀하게 분석하기 위해 Fig. 7과 같이 전자기-구조-음향해석을 연계한 멀티피직스 해석 기법을 적용하였다. 전자기 해석을 통해 공극에서 발생한 전자기력을 추출하였다. 다음으로, 모터 구조물의 동적 특성을 파악하고 전자기력 주파수와와의 공진 가능성을 검토하기 위해 자유진동 해석을 진행하여, 고유진동수 및 모드 형상을 도출하였다. 전자기 해석에서 도출된 전자기력을 가진력으로 하여 강제진동 해석을

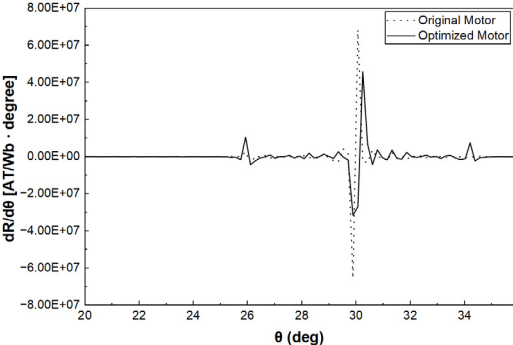
Table 3 Optimized stator design parameters compared with the original model

[unit: mm]

Parameter	Original	Optimized
Notch depth (d_n)	0.65	0.65
Notch length (l_n)	1.3	1.0
Air shoe length (l_a)	0.97	0.97
Stator shoe length (l_s)	16.37	16.5



(a) Time history of air gap flux density



(b) Reluctance variation rate

Fig. 6 Air gap flux density and reluctance variation rate of original and optimized motors

통해 가청주파수 영역에서의 진동 응답 특성을 분석하였다. 이를 통해 전자기력에 의해 유발되는 구조 진동 거동을 정량적으로 평가하였으며, 마지막으로, 구조 해석 결과로부터 얻어진 진동 응답을 바탕으로 음향해석을 수행하여 모터 구동 시 발생하는 방사 소음을 예측하였다. 이 해석 과정은 모터의 소음 발생 과정이 전자기력에 의한 가진으로 인해 발생한 구조 진동이 공기 중 음파 방사로 이어지는 다중 물리 현상을 구현한 해석 과정이다.

따라서, 이 연구의 멀티피직스 해석은 코깅토크 저감이 실제 진동 및 소음 저감으로 이어지는지를 평가하기 위함이다. 기존의 대부분 연구는 전자기 해석을 통해 코깅토크 저감에만 초점을 맞추었으나, 이 연구에서는 전자기-구조-음향해석을 연계하여 실제 소음

저감 효과까지 평가함으로써 보다 실질적인 설계 접근법을 제시하였다.

3.2 자유진동해석

이 연구에서는 전자기력에 의한 구조 진동 특성을 분석하기 위해 가청주파수 대역인 20 Hz ~ 20 KHz 범위에서 자유진동해석(modal analysis)을 수행하였다. Fig. 8에는 전체 자유진동해석 결과 중 모터 구조의 기본적인 진동 거동을 나타내는 1차부터 6차까지의 저차 모드 형상을 대표적으로 나타내었다. 그러나 강제 진동해석은 가청주파수 대역인 20 Hz ~ 20 KHz 범위 내에서 진행되므로, 고주파 영역에서의 공진 가능성을 검토하기 위해 가청주파수 범위 내의 고차 모드도 모두 확인하였다.

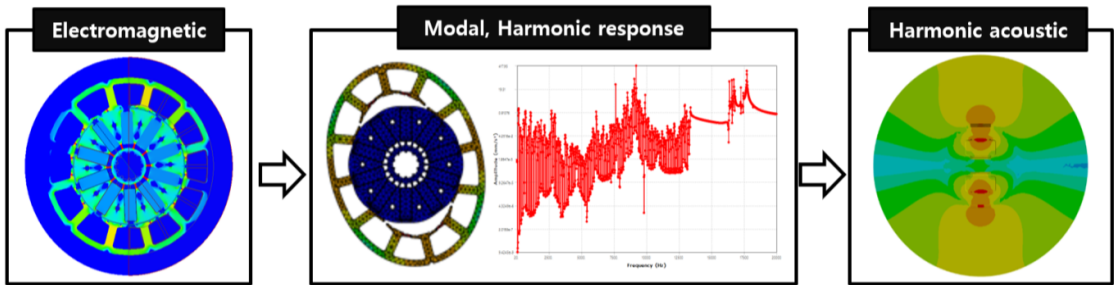


Fig. 7 Workflow of multiphysics analysis

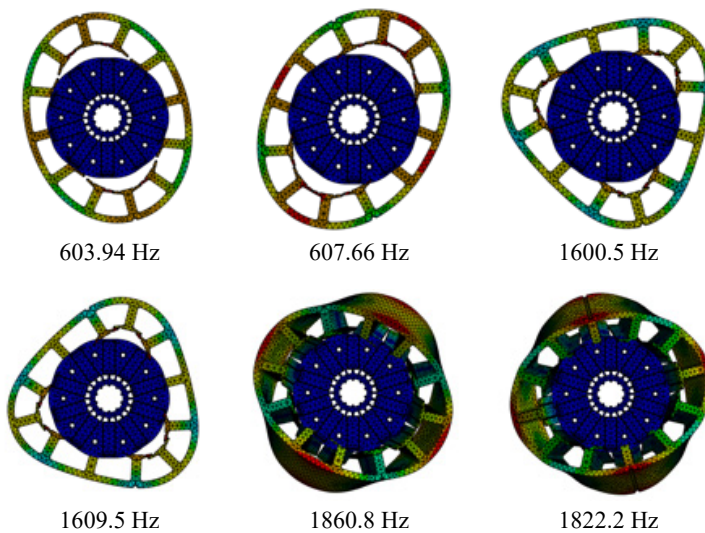


Fig. 8 Nature frequency & mode shape

3.3 전자기력 기반 가속도 응답 함수 분석

Ansys Maxwell 2D를 통해 공극에서 발생하는 전자기력을 모터의 정격 회전 속도 조건에서 회전자의 회전에 따른 공극의 전자기력 및 모멘트를 계산하였다. 모터가 회전하면서 회전자의 영구자석과 고정자 슬롯의 상대 위치가 주기적으로 변화하므로, 공극에서 발생하는 전자기력과 모멘트 또한 주기적 특성을 가진다. Maxwell solver는 식 (3)과 같이 각 시간 간격 1초에서 K 초동안 Δt 마다 고정자 치에 작용하는 전자기력과 모멘트를 저장한다.

$$\begin{aligned} F_x : F_x(0), F_x(\Delta t), \dots, F_x(K\Delta t) \\ M_x : M_x(0), M_x(\Delta t), \dots, M_x(K\Delta t) \end{aligned} \quad (3)$$

이후 시간 영역에서 추출된 전자기력 및 모멘트 데이터는 식 (4)의 비균일 시간 간격 푸리에 변환(NDFT, non-uniform discrete Fourier transform)을 통하여 주파수 영역의 전자기력과 모멘트로 변환하여 강제 진동 해석의 가진력으로 적용하였다.

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(t_n) e^{-j(t_n - t_0)k \frac{2\pi}{T}} \quad (4)$$

여기서, $x(t_n)$ 는 각 시점에서의 힘 데이터를 나타내며 N 은 데이터 수, T 는 주기를, k 는 주파수 인덱스를 나타낸다.

이렇게 도출된 전자기력은 Fig. 9와 같이 강제 진동 해석의 가진력으로 적용되었다. 강제 진동 해석을 통해 주파수 영역에 대해 가속도 응답을 분석하였으며, 이를 바탕으로 harmonic acceleration response를 도출하였다. Harmonic acceleration response는 가진력에 대한 구조의 주파수별 가속도 응답 특성을 나타내

는 지표로, 특정 주파수에서의 공진 특성을 확인하는데 활용된다. Fig. 10은 기존의 모터와 코깅토크가 저감된 모터의 harmonic acceleration response를 나타내었다. 기존 모터의 경우 약 16 kHz ~ 18 kHz 부근의 고주파 영역에서 다수의 가속도 응답 피크가 나타났으며, 이는 해당 주파수 대역에서 구조적 공진 또는 가진 응답에 의해 진동이 증가함을 의미한다. 반면, 코깅토크가 저감된 모터에서는 해당 고주파 영역의 주요 응답 피크 크기와 빈도가 감소하는 경향을 보였다. 그러나 8 kHz 부근에서 가속도의 응답이 증가했기 때문에, 전체 가청주파수 영역에서 일괄적인 진동 저감 효과가 발생하였다고 하기 어렵다. 이를 정량적으로 검토하기 위해 주파수 대역별 RMS를 비교하였다. 7.5 kHz ~ 10 kHz 대역에서 기존 모터의 RMS는 5.053 mm/s², 코깅토크가 저감된 모터의 RMS는 20.568 mm/s²로 나타났으며, 해당 구간에서는 코깅토크가 저감된 모터의 진동 응답이 기존 모터보다 증가하였다. 이는 앞서 언급한 8 kHz 부근의 가속도 응답 증가와 연관된 결과. 따라서 코깅토크가 저감된 모터가 모든 주파수 대역에서 동일하게 진동 저감 효과를 나타낸다고 보기는 어렵다. 그러나 전체 가청주파수 대역에서의 RMS를 비교한 결과, 기존 모터는 10.374 mm/s², 코깅토크가 저감된 모터는 7.479 mm/s²로 계산되었다. 이에 따라 코깅토크가 저감된 모터의 전체 RMS 응답은 기존 모터 대비 약 27.9 % 감소하였다. 이는 7.5 kHz ~ 10 kHz 대역과 같이 일부 주파수 구간에서 응답 증가가 존재함에도 불구하고, 전체 가청주파수 대역에서의 평균적인 진동 에너지 수준은 코깅토크가 저감된 모터에서 감소하였음을 의미한다. 따라서 코깅토크가 저감된 모터는 특정 주파수 대역

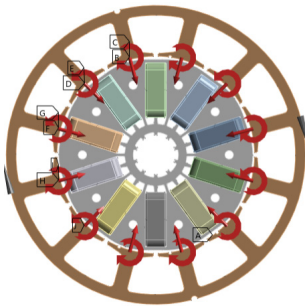


Fig. 9 Electromagnetic force in the air gap

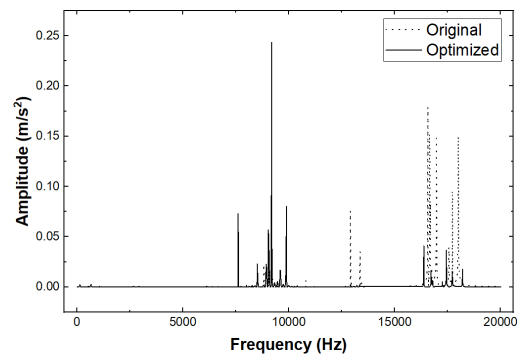


Fig. 10 Original & optimized acceleration response function

에서 응답 증폭 가능성을 보였으나, 전체 RMS에서는 기존 모터보다 낮은 진동 응답을 나타내며, 종합적으로는 진동 저감 측면에서 효과적인 설계 개선 결과를 보인다.

3.4 음향해석

구조 진동에 의해 발생하는 방사 소음을 예측하기 위해 harmonic acoustics 해석을 수행하였다. Fig. 10(a)와 같이 모터 주변에 공기로 이뤄진 음향장(acoustic region)을 생성하였다. 이후, 음향장 표면에는 radiation boundary를 적용하였다. Radiation boundary는 유한한 음향장에서 표면 경계에 도달한 음파가 다시 내부로 반사되는 영향을 최소화하고, 실제 무향실에서 소음 실험을 모사하기 위한 경계조건이다. 이후, Fig. 11처럼 강제 진동 해석을 통해 모터가 가청주파수 대역에서 진동할 때의 표면 속도 분포를 계산하였으며, 계산된 모터 표면의 진동 응답을 음향 해석으로 전달하기 위해 표면 진동 데이터(surface velocity)를 적용하였다. 진동하는 모터 표면은 주변 공기를 가진진시키는 가진원으로 작용하기 때문에 표면 진동 속도는 음

향 방사 해석에서 음압 발생의 입력 조건으로 사용되었다. 따라서 이 연구에서는 구조 해석으로부터 얻은 모터 표면의 진동 속도를 음향 해석의 surface velocity 조건으로 적용함으로써, 모터 표면의 진동에 의해 발생하는 방사 음압 및 등가소음레벨(L_{Aeq})을 계산하였다.

3.5 모터의 방사 소음 특성 분석

이 연구에서는 음향해석 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 실제 소음 측정 환경을 고려하여 측정 위치를 설정하였다. 일반적으로 모터 소음 측정은 수음자의 위치를 반영하는 것이 중요하다. 에어컨용 IPMSM은 수음자로부터 수직한 방향으로 위치하기에 이 연구에서는 모터 중심으로부터 축 방향인 Z축으로 1 m 이격된 위치에 소음 측정 지점을 설정하였다. 또한, Z축 방향은 모터의 회전축 방향에 해당하며, Fig. 12(a)와 같이 이 방향에서는 구조 및 전자기력 분포가 축을 기준으로 대칭성을 가지므로 소음 방사가 균일하게 나타나는 등방성 특성을 보인다. 반면, Fig. 12(b)에서 X축 방향은 고정자 슬롯 구조, 자석 배치 그리고 전자기력 분포의 비대칭성에 의해 방향별로 상이한 음압 분포를 나타내며, 소음 방사가 이방성으로 일어나는 것을 알 수 있다. Fig. 12(a)와 Fig. 12(b)는 동일한 회전 속도와 동일한 전자기력과 모멘트 및 주파수 범위인 가청주파수 내에서 도출된 결과이다. Fig. 13(a)는 가청주파수 영역에 대한 소음 그래프를 나타내었다. 이를 통해 제안된 모델에서 소음 저감이 두드러지는 주요 주파수 대역을 명확히 확인할 수 있으며, 기존 모터와 코깅토크가 저감된 모터의 정량적인 비교를 위해 등가소음레벨(L_{Aeq})을 계산하였다. 기존 모터는 11.523 dB(A), 코깅토크가 저감된 모터의 경우 8.272 dB(A)로 감소하였으며, 3.251 dB(A)의 소음이 저감하였다. 이는 고정자 형상 변형을 통해 전자기력이 감소한 결과가 가청 주파수 영역에서의 방사 소음 저감으로 이어졌음을 의미한다. Fig. 13(b)에 1/3 옥타브밴드 결과를 함께 제시함으로써, narrow band에서 관찰되는 세부 피크 변화뿐만 아니라 주파수 대역별 전체 소음 저감 경향을 정량적으로 비교하였다. 3.3절에서 언급한 바와 같이 코깅토크가 저감된 모터는 가청주파수 대역에서 RMS가 감소하여 진동저감 효과를 보였다. 다만 8 kHz 부근에서는 가속도 응답이 증가했고, 이 영향이 1/3 옥타브밴드의 중심 주파수 8 kHz의 소음 증가로 나타난 것으로 판단된다.

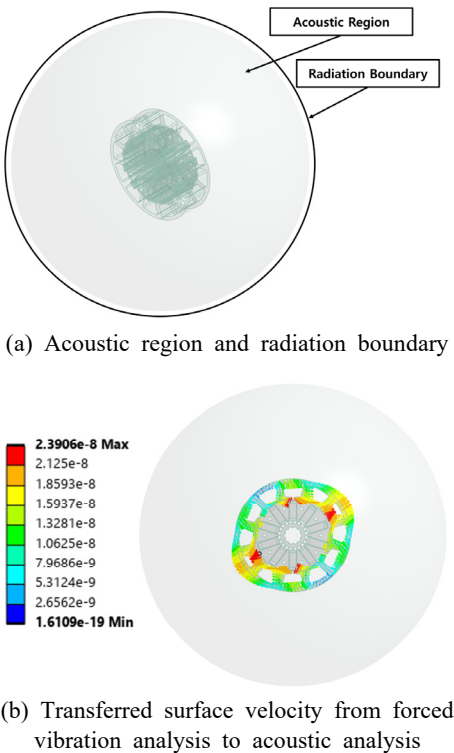


Fig. 11 Settings for acoustic analysis

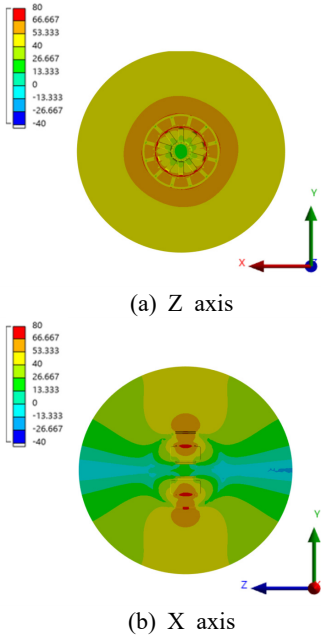
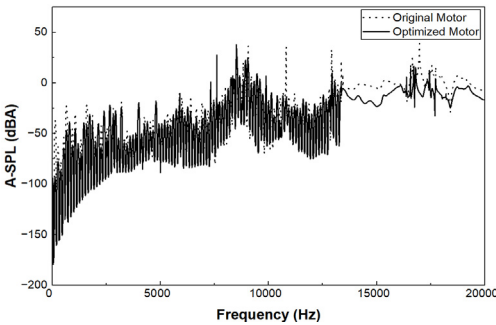
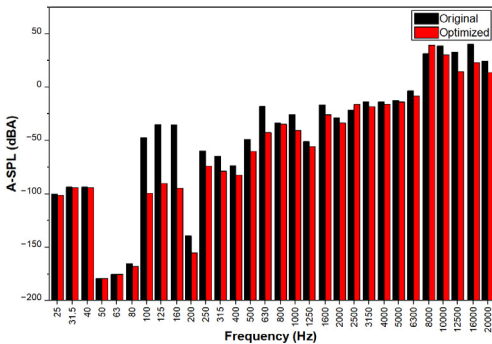


Fig. 12 Z axis & X axis sound pressure distribution



(a) Comparison of A-sound pressure level between original and optimized motors



(b) 1/3 octave band of original and optimized motor

Fig. 13 Acoustics analysis results for audible frequency

따라서, 이 연구에서 제안한 고정자 형상의 변형으로 인한 전자기력 저감을 통해 가청주파수 대역에서 구조 진동을 감소시키고, 나아가 최종적인 소음 저감 효과를 유도하는 데 효과적으로 작용함을 확인할 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 IPMSM의 소음 저감을 위해 고정자 형상 변형과 전자기-구조-음향 해석을 연계한 멀티피직스 해석 기법을 적용하였다. 코깅토크를 공극 자기 저항 변화를 관점에서 분석하고, 자속을 유지하면서 자기저항 변화율을 저감하는 설계 전략을 제안하였다. 그 결과, 코깅토크는 $9.9035 \text{ mN}\cdot\text{m}$ 에서 $2.6315 \text{ mN}\cdot\text{m}$ 으로 약 73.5 % 감소하였으며, 역기전력은 소폭 증가하여 출력 성능 저하 없이 성능 유지 및 개선이 가능함을 확인하였다. 또한 가속도 응답 함수 분석을 통해 가청주파수 대역에서 가속도 응답이 감소함을 확인하였으며, 음향해석 결과 Z축 1 m 위치에서 소음이 등가소음레벨(L_{Aeq}) 기준 약 3.25 dB(A) 감소하였다.

또한, 향후 실제 시제품 모터를 제작하여 소음 측정 실험을 수행하고, 해석 결과와의 비교 분석을 통해 이 연구의 타당성을 검증할 예정이다. 이를 통해 해석 기반 설계 기법의 신뢰성을 확보하고, 실제 적용 가능성을 더욱 명확히 할 수 있을 것으로 기대된다.

이 연구에서 제안한 고정자 형상 변형을 통한 설계 기법은 전자기력 변동 저감을 통해 구조 진동 및 방사 소음을 효과적으로 저감할 수 있음을 확인하였으며, 멀티피직스 해석 기반 접근법은 모터 설계 단계에서 소음 저감을 위한 유용한 설계 방법으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 연구(결과물)는 2025년도 교육부 및 경상남도의 재원으로 경상남도 RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다(2025-RISE-16-002).

References

- (1) Park, H. Y., Kim, G. H., Shin, K. H., Jang, S. M.

and Choi, J. Y., 2016, Comparative Analysis of Surface-mounted and Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 65, No. 6, pp. 987~994.

(2) Hwang, S. M., Eom, J. B., Hwang, G. B., Jeong, W. B. and Jung, Y. H., 2000, Cogging Torque and Acoustic Noise Reduction in Permanent Magnet Motors by Teeth Pairing, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 36, No. 5, pp. 3144~3146.

(3) Lee, K. J. and Lee, J., 2003, Effect of Pole to Slot Ratio on Cogging Torque and EMF Waveform in Permanent Magnet Motor with Fractional-slot, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers B, Vol. 52, No. 9, pp. 454~459.

(4) Kim, T. H., Kong, K. S., Park, S. G., Gu, J. H., Ahn, S. J. et al., 2018, Study on Noise Reduction during Stopping of BLDC Fan Motor in Refrigerator, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, p. 66.

(5) He, S., Zhang, P., Muir, M. and Koch, B., 2024, Rotor Optimization to Reduce Electric Motor Noise, SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility, Vol. 6, No. 1, pp. 39~47.

(6) Yang, I. J. and Lee, J., 2024, Study on Design to Reduce Iron Loss and Permanent Magnet Eddy Current Loss of IPMSM, Journal of the Korean Magnetics

Society, Vol. 34, No. 6, pp. 261~265.

(7) Islam, M. S., Islam, R. and Sebastian, T., 2014, Noise and Vibration Characteristics of Permanent-magnet Synchronous Motors using Electromagnetic and Structural Analyses, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 50, No. 5, pp. 3214~3222.

(8) Kwon, J., Kim, K., Lee, C. and Hwang, S. M., 2009, Effect of the Number of Slots on the Acoustic Noise from BLDC Motors, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 8, pp. 759~763.

(9) Kim, K. C., 2014, A Novel Method for Minimization of Cogging Torque and Torque Ripple for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 50, No. 2, pp. 793~796.

(10) Kim, S. M., Jeong, S. H., Ryu, S. H. and Kwon, B. I., 2007, Reduction of Cogging Torque of BLDC Motor by Sinusoidal Air-gap Flux Density Distribution, Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers ABCD, Vol. 56, No. 1, pp. 57~65.

(11) Baek, S. W., Kim, B. and Kwon, B., 2008, A Study of High Efficiency Design of Single-phase Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor, Proceedings of the KIEE Electrical Machinery and Energy Conversion Systems Society Annual Spring Conference, pp. 62~64.