

차량용 전기모터 하우징의 진동 저감에 관한 연구

Study on Vibration Reduction in Electric Motor Housing for Vehicle

이 현 우* · 장 우 재* · 김 재 성** · 정 진 태†
Hyunwoo Lee*, Woojae Jang*, Jaesung Kim** and Jintai Chung†

(Received December 7, 2023 ; Revised January 29, 2024 ; Accepted January 29, 2024)

Key Words : Permanent Magnet Synchronous Motor(영구자석형 전동기), Modal Analysis(모드해석), Finite Element Analysis(유한요소해석), Motor Vibration(모터 진동)

ABSTRACT

In this study, we experimentally investigated the vibration generated in the housing of a permanent magnet synchronous motor and proposed a design guideline for reducing this vibration by establishing a finite element model of the motor. We acquired the frequency spectra of the vibration signals at various rotational speeds of the motor and identified the excitation frequencies induced by the electromagnetic force of the motor. In addition, the natural frequencies and mode shapes of the motor were obtained through modal testing, and an operational deflection shape analysis was conducted to analyze the dynamic behavior of the motor during operation. The resonance of the motor housing was identified using signal and dynamic characteristic analyses. To reduce vibration, a finite element model that considered the main components and structure of the motor was established, and a vibration reduction method was proposed that involved improving the motor housing structure.

1. 서 론

영구자석형 전동기는 높은 토크와 출력밀도를 지니며 에너지 효율이 높아 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다. 하지만 모터에서 발생하는 진동은 효율을 저하시키고 부품 손상을 유발할 수 있으며 소음을 발생시켜 사용자에게 불편함을 초래할 수 있다. 따라서 모터에서 발생하는 진동 및 소음의 주요 원인을 파악하는 것이 중요하며 이에 관해 모터의 진동/소음 성능을 개선하기 위한 다양한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

현재까지 모터의 진동/소음에 관한 연구는 모터의 전자기력에 의한 진동 특성을 분석하고 코깅토크 및 토크리플을 저감시키는 연구가 다수이다. Sun et al.⁽¹⁾은 영구자석 모터의 극수와 슬롯수의 조합에 따른 전자기력 및 진동 특성에 관한 연구를 수행하였으며, Hong et al.⁽²⁾은 BLDC와 BLAC 구동 방식에 따른 모터의 전자기적 특성과 효율을 비교하여 진동/소음 성능을 분석하는 방법을 제시하였다. Kim et al.⁽³⁾은 모터 하우징과 고정자의 구조해석과 전자기 해석을 통해 전자기력에 의해 발생하는 모터의 진동 특성에 대해 분석하였다. 코깅토크 및 토크리플을 저감시키기 위해 Park et al.⁽⁴⁾은 고정자 코어의 sub-slot 설계

† Corresponding Author ; Member, Hanyang University, Professor
E-mail : jchung@hanyang.ac.kr
* Hanyang University, Student
** Higen RNM, Researcher

‡ Recommended by Editor Seunghun Baek
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

기법을 제시하여 기존 방식과의 비교를 통해 형상의 경제성과 효율성 등을 분석하였으며, Seo et al.은⁽⁵⁾ 고정자 치 형상의 변경이 토크리플 저감에 미치는 효과에 관하여 연구를 수행하였다. 또한, Islam et al.은⁽⁶⁾ 스쿠용 회전자와 영구 자석의 모양에 따른 코깅토크 저감 효과를 유한요소해석과 실험을 통해 분석하였으며 Lee et al.은⁽⁷⁾ 반응표면법을 이용한 고정자 설계 변수들의 최적설계를 진행하여 고정자 치 하나가 받는 반경방향 힘의 고조파 성분을 저감시켜 모터의 소음 개선 방안을 제시하였다.

한편, 모터의 코깅토크 및 토크리플 저감에 관한 연구 외에도 구조적 설계 변경을 통한 진동 저감에 관해 연구들이 진행되어왔다. Shin과 Kim은⁽⁸⁾ 진동 및 소음 저감을 위해 모터 플레이트의 두께를 증가시켜 강성을 높이는 방향으로 설계를 개선하는 방법을 제시하였다. Won et al.은⁽⁹⁾ 고주파 방사 소음 저감을 위하여 하우징 리브 형상의 최적 설계 방안을 제시하였다. 모터의 구조해석을 위해 Hattori et al.은⁽¹⁰⁾ 고정자의 코일 질량 효과 및 요소 유형을 고려한 유한요소 모델링 방법을 제시하였으며, Yin et al.은⁽¹¹⁾ 고정자 코어의 등가 물성을 적용해 유한요소 모델을 구축하는 방법에 관하여 연구를 수행하였다.

모터의 전자기적 해석을 통한 코깅토크 및 토크리플 저감에 관한 연구가 많이 진행되었지만 상대적으로 모터의 구조적 설계를 통한 진동 및 소음 저감 효과에 대한 연구는 부족하다. 코깅토크와 토크리플의 감소는 모터의 전반적인 성능 향상에 기여할 수 있지만, 진동 및 소음 수준 감소에 효과적이라고 단정할 수는 없다.⁽¹²⁾ 또한, 모터의 구조해석을 위해 구축된 모델은 모터의 특정 부품만을 고려한 경우가 많기 때문에 주요 부품들을 포함한 종합적인 해석 모델의 구축이 필요하다.

이 연구에서는 모터 하우징에서 발생하는 진동을 실험적으로 규명하고 모터의 주요 부품들을 고려한 유한요소해석 모델을 구축하여 진동 저감 방안을 제시하였다. 먼저 모터의 회전속도 별 진동신호의 주파수 스펙트럼을 실험을 통해 획득하고 주요 가진 성분에 대해 분석하였다. 그리고 모드실험을 통해 하우징의 공진을 유발하는 고유진동수와 고유모드에 대해 파악하였으며 모터의 ODS 분석을 통해 모터 하우징의 공진 발생 메커니즘을 규명하였다. 마지막으로 구축된 해석 모델을 이용하여 모터 하우징의 구조 개선을 통해 진동 저감 방안을 제시하였다.

2. 진동신호 측정 및 분석

이 연구의 대상인 모터의 구조는 전면브라켓(front bracket), 후면브라켓(rear bracket), 하우징(housing), 고정자(stator), 회전자(rotor), 샤프트(shaft)로 구성되어 있다. 모터의 하우징과 전면브라켓 및 후면브라켓이 결합되어 외부 구조를 형성하며, 고정자에는 코일이 감겨있어 전류가 흐르면서 자기장을 형성하여 영구자석이 매입되어 있는 회전을 회전시킨다. 샤프트는 회전자의 회전을 외부로 전달하며 베어링을 통해 브라켓과 연결된다. Fig. 1에 모터의 전체적인 구조를 도시하였다.

모터 작동 시 발생하는 진동 수준 평가를 위해 모터의 회전속도에 따라 진동신호를 측정하고 주파수 분석을 진행하였다. 실험 장치는 Fig. 2와 같이 구성하였으며, 모터 구동을 위해 측면부를 지그에 고정된 뒤 실험을 진행하였다. 모터의 진동이 전달되는 하우징에서 상대적으로 변형이 지배적으로 나타날 수 있

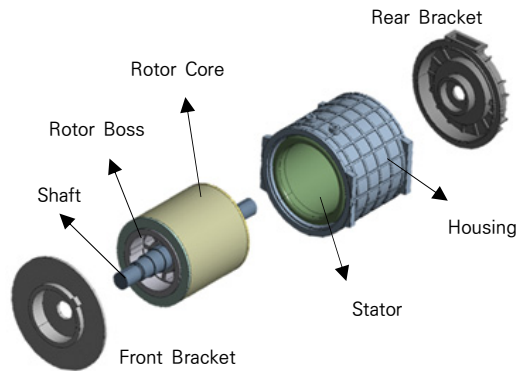


Fig. 1 Permanent magnet synchronous motor system

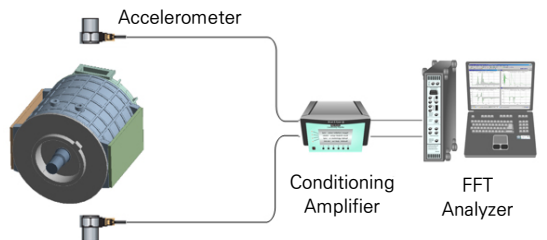


Fig. 2 Experimental setup for measuring the vibration

는 하우징 상부와 측면 상부, 측면 하부에 단축 가속도계(B&K 4383)를 부착하여 진동신호를 측정하였고 증폭기(B&K Nexus)를 통해 신호를 증폭시켰다. 모터의 회전속도는 0 r/min부터 3500 r/min까지 100 r/min 단위로 증가시켜가며 실험을 진행하였으며, 주파수분석기(B&K 3560C)를 통해 진동신호의 주파수 스펙트럼을 획득하였다.

다음으로 모터에서 발생하는 주요 가진 성분을 파악하기 위해 워터폴 플롯(waterfall plot)을 통해 회전 속도 별로 획득한 진동신호의 주파수 스펙트럼을 3차원으로 가시화하여 분석을 진행하였다. Fig. 3은 모터 하우징에서 측정된 진동신호의 워터폴 플롯이다. 워터폴 플롯의 가로축은 주파수를 나타내며 세로축은 모터의 회전속도를 나타낸다. 1, 12, 24, 36X의 고조

파 성분을 확인하였으며, 이를 분석하기 위해 모터의 전자기력에 의한 가진주파수 성분을 계산하였다. 모터 회전자의 극수와 고정자의 슬롯수에 의하여 자기력의 특성이 변하고 이로 인해 다양한 고조파가 발생되며, 발생 가능한 고조파 성분은 식 (1)과 같다.

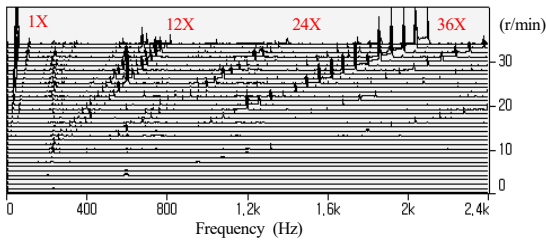
$$f = (N_p \times n \pm N_s \times m)X \tag{1}$$

여기서 n 과 m 은 임의의 정수이며, N_p 는 회전자의 극수, N_s 는 고정자의 슬롯수이다. 대상 모터의 극수와 슬롯수는 12극 72슬롯으로, 12X의 배수 성분들이 극수와 슬롯수의 조합으로 인한 전자기적 가진원인을 확인하였다. 또한 모터의 회전속도가 증가함에 따라 질량 불평형 또는 회전축의 편심에 의한 1X 성분의 진동 수준이 커지는 것을 확인하였으며, Fig. 3(b)와 Fig. 3(c)에서 공통적으로 560 Hz의 공진이 의심되는 주파수가 발생하였다.

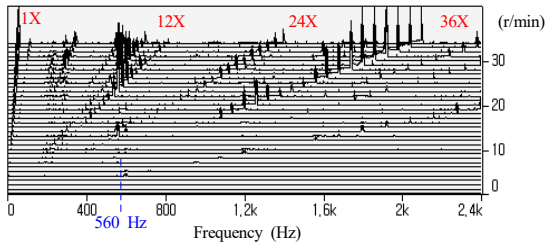
3. 모터의 공진 발생 메커니즘 규명

모터의 특정 주파수에서 발생하는 공진의 원인을 규명하기 위해 모드실험을 수행하여 모터 하우징의 고유진동수와 고유모드를 획득하였다. Fig. 4에 나타난 것처럼 실험 장비를 구축하고 모터 하우징의 양단을 줄로 매달아 자유 경계조건(free-free) 상태로 실험을 진행하였다. 또한 모터의 구조를 고려하여 반경 방향으로 총 80개의 점을 임팩트 해머(B&K 8104)를 이용해 가진하고, 한 점에 가속도계를 부착하여 진동 응답을 측정하였다. 가진력과 가속도 응답 사이의 관계를 나타내는 주파수응답함수(frequency response function)를 획득하여 Fig. 5에 나타내었으며, 주파수 응답함수의 커브피팅을 통해 하우징의 고유진동수와 모드형상을 추출하여 Fig. 6에 3개의 고유모드를 나타내었다. 각각의 고유진동수는 479 Hz, 514 Hz, 560 Hz이며, 워터폴 플롯에서 관찰된 공진이 의심되는 주파수인 560 Hz가 하우징의 대각 방향으로 변형하는 모드의 고유진동수와 일치하는 것을 확인하였다.

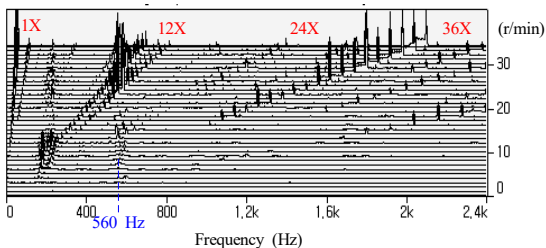
그 다음으로 모터 작동 중 560 Hz에서 크게 발생하는 진동이 모터 하우징의 고유모드에 의해 발생되는 것인지 여부를 확인하기 위해 운전 중 변형 형상(operational deflection shape, ODS) 평가를 수행하였다. ODS 평가는 모터 작동 시 변형 형상을 확인하



(a) Top of the motor housing



(b) Side top of the motor housing



(c) Side bottom of the motor housing

Fig. 3 Waterfall plots of the vibration spectra

기 위한 방법으로, 기준점과 응답점을 선정하고 각 측정 위치에서의 진폭과 상대적인 위상차를 오토스펙트럼(auto spectrum)과 크로스스펙트럼(cross spectrum)을 통해 획득하여 관심 주파수에서 시스템의 동적 거동을 분석할 수 있다. ODS 평가를 위해 총 15개의 가속도계를 모터 하우징에 반경 방향으로 Fig. 7과 같이 부착하였으며, 그 중 한 점을 기준점으로 선정하였다. 모터의 회전속도가 2400 r/min일 때 12X의 전자기적 가진원에 의해 560 Hz의 진동 피크가 발생하므로 동일한 회전속도의 정상 상태(steady state)에서 10초 동안 진동신호를 측정하였으며, 각 측정 위치에서의 진폭과 위상 정보를 통해 하우징의 변형 형상을

추출하였다. 모드실험을 통해 획득한 모드형상과 모터 작동 중 변형 형상을 나타내는 ODS를 비교했을 때 Fig. 8에 나타난 것과 같이 두 형상이 일치하였다. 이를 통해 모터 작동 시 560 Hz에서 하우징의 대각 방향으로 변형하는 모드의 고유진동수가 전자기 가진 주파수와 일치하여 공진이 발생하고 진동이 증폭되는 것을 확인하였다.

4. 모터의 유한요소해석 모델 구축

모터 하우징의 변형에 의해 발생하는 진동 저감 방안을 제시하기 위해 모터의 유한요소해석 모델을 구축하였다. 모터의 주요 부품인 전면브라켓과 후면브라켓, 회전자 코어와 회전자 보스, 하우징과 고정자의 철심 및 코일, 샤프트를 포함해 모터의 실제 구조를

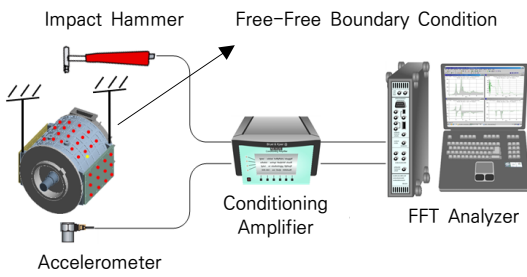


Fig. 4 Experimental setup for the modal testing

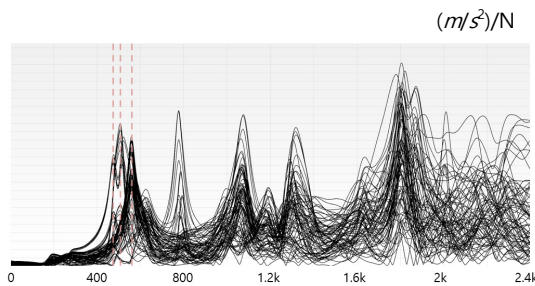


Fig. 5 Frequency response function of the motor housing

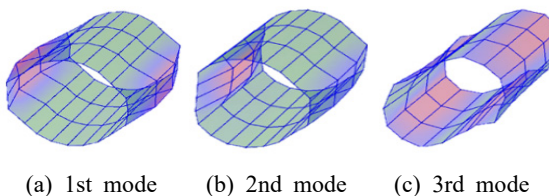
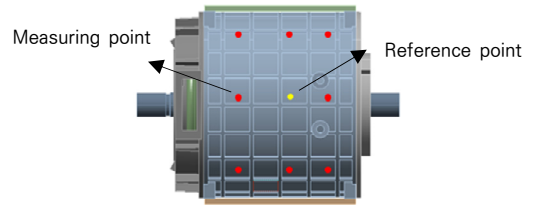
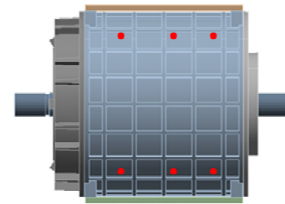


Fig. 6 Mode shapes of the motor housing



(a) Top of the motor housing



(b) Bottom of the motor housing

Fig. 7 ODS measurement points

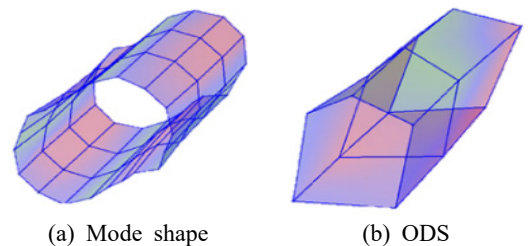


Fig. 8 Comparison of mode shape and ODS

반영할 수 있도록 해석 모델을 구축하였으며, 시뮬레이션은 상용 소프트웨어인 ANSYS를 이용하였다. 복잡한 캐드 모델의 경우 요소의 개수가 지나치게 많아 지거나 좋은 품질의 요소가 생성되지 않을 수 있기에 해석의 정확도와 수렴성을 높이고 해석 시간을 단축시키기 위해 모델의 단순화를 진행하였다. 또한 구조물의 변형을 정확하게 표현하기 위하여 알맞은 요소 크기를 선정할 필요가 있다. 요소가 조밀해질수록 물체의 자유도가 증가하기에 고유진동수는 하강하며, 어느 시점에서 수렴해간다. 계산 시간 및 정확도를 고려하여 적당한 크기의 요소를 형성해야하며 각 부품별로 요소 크기에 따른 고유진동수 수렴성을 조사하여 해석 모델의 요소 크기를 선정하였다. 하우징과 고정자의 요소 수렴성 조사 결과를 Table 1에 나타내었다. 노드 수가 118 940개일 때부터 고유진동수가 수렴해가는 것을 알 수 있으며, 구축된 해석 모델의 요소는 총 184 302개, 노드는 337 241개가 사용되었다. 다음으로 각 부품들의 실제 중량에 맞춰 모델의 밀도를 조정하였으며, 재료의 강성도를 나타내는 영

률(Young's modulus)을 구하기 위해 단품 모드실험과 모드해석 결과의 고유진동수를 비교하여 상당영률을 획득하였다. 각 부품들은 자유 경계조건 상태로 실험을 진행하였으며 실험 결과와 해석 결과의 1, 2, 3차 모드의 고유진동수 오차 rms 값이 최소가 되는 영률을 도출하였다. Fig. 9의 실선은 각 부품들의 모드실험 결과를 나타내며, 점선은 모드해석 결과이다. 결과적으로 고유진동수 오차율은 평균 3.8 % 이내로 계산되었다. 물성치를 적용한 후 각 부품들의 결합 상태를 고려하여 접촉 조건(contact-bonded)을 정의하였으며, 브라켓과 샤프트 사이에 위치한 베어링은 등가 강성으로 대체하였다. 최종으로 구축된 해석 모델 1, 2, 3차 모드의 모드형상을 Fig. 10에 나타내었다. 고유진동수는 각각 481 Hz, 498 Hz, 571 Hz이며 실험 결과와의 오차율은 0.4 %, 3.1 %, 2.0%로 실제 시스템을 잘 반영한다는 것을 알 수 있다.

5. 진동 저감 방안 도출

구축된 유한요소해석 모델을 활용하여 모터 하우징에서 발생하는 진동을 저감시키기 위한 방안을 제시하였다. 하우징의 고유모드에 의해 공진이 발생하며, 대각 방향으로 변형하는 형상을 억제하기 위해 Fig. 11과 같이 강성을 보강하는 설계 개선안을 도출

Table 1 Mesh convergence test of housing and stator

Nodes	1st mode [Hz]	2nd mode [Hz]	3rd mode [Hz]
38648	428.8	518.3	1062.4
50847	414.0	504.0	1020.1
118940	406.7	498.7	1002.1
157352	406.0	498.1	1000.5
212298	405.4	497.7	999.2

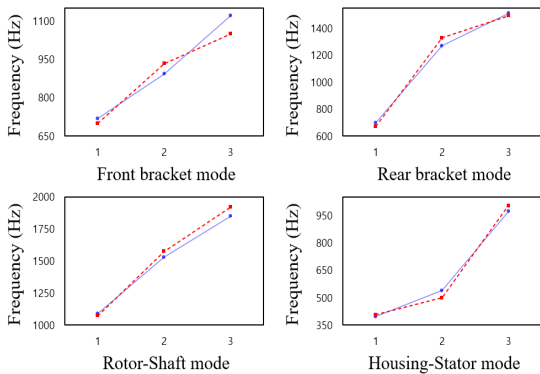


Fig. 9 Comparison of natural frequencies of each part

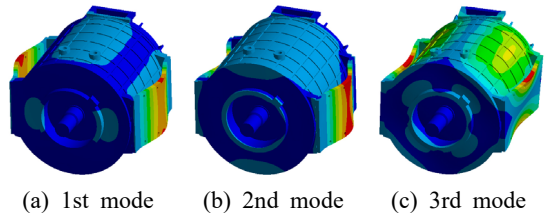


Fig. 10 Mode shapes of FE model for the motor

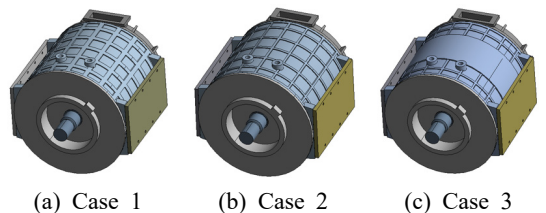


Fig. 11 Structural improvement models of the motor housing

하였다. Fig. 11(a)는 하우징 십자형 리브의 너비를 10 mm 증가시켰으며, Fig. 11(b)는 하우징의 전체 두께가 반경 방향으로 2 mm 증가한 모델이다. 또한, Fig. 11(c)는 하우징 중간 부분을 원형으로 둘러싸는 두께 2 mm의 리브가 추가된 모델이다. 케이스 3개의 강성 보강 효과를 비교한 결과 Fig. 11(a)는 공진을 발생시키는 모드의 고유진동수가 571 Hz에서 576 Hz로 5 Hz가 증가하였고, Fig. 11(b)는 580 Hz로 9 Hz가 증가하였다. 마지막으로 Fig. 11(c)의 고유진동수는 584 Hz로 13 Hz가 증가하였으며, 이를 통해 하우징의 고유모드에 의한 거동을 억제하기 위해 제시된 세 가지 케이스 중 원형 리브를 추가한 모델이 반경 방향으로의 강성을 가장 효과적으로 보강한다는 것을 검증하였다.

6. 결 론

이 연구에서는 모터 하우징의 공진 발생 메커니즘을 규명하고 진동 저감을 위한 구조 개선안을 제시하였다. 모터가 작동할 때 회전속도에 따라 하우징의 진동신호를 측정하고 위터폴 플롯을 통해 주파수 분석을 수행하였다. 또한, 하우징의 모드형상과 운전 중 변형 형상이 일치하는 것을 실험을 통해 확인하였다. 이를 통해 하우징의 공진이 전자기 가진주파수와 특정 모드의 고유진동수가 일치하여 발생했다는 것을 규명하였으며, 공진 발생 시 하우징의 거동을 확인하였다. 결론적으로 하우징의 변형 형상에 대해 반경 방향으로의 강성 증대가 필요하다고 판단하였으며, 모터의 실제 시스템과 유사한 유한요소해석 모델을 개발하여 구조 개선안을 제시하고 개선안에 따른 강성 보강 효과를 비교하였다.

후 기

이 연구는 산업통상자원부 소재부품기술개발사업 ‘자동차 제조장비용 전류응답 6.2kHz급 및 전원회생 서보시스템 기술개발(No. 20017351)’으로 수행된 연구입니다.

References

(1) Sun, T., Kim, J.-M., Lee, G.-H., Hong, J.-P. and

Choi, M.-R., 2011, Effect of Pole and Slot Combination on Noise and Vibration in Permanent Magnet Synchronous Motor, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, No. 5, pp. 1038~1041.

(2) Hong, J.-P., Lee, S.-J., Kim, D.-J., Lee, B.-H. and Jang, W.-K., 2012, Characteristics Comparison of PM Motor according to the Driving Method, *Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference*, pp. 522~527.

(3) Kim, S.-U., Ryu, S.-M., Jeong, W.-B. and Hong, C., 2018, Analysis of Vibration of Electric Motors with the Consideration of One-way Electro-mechanical Coupling, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 28, No. 5, pp. 589~599.

(4) Park, I. H., Kim, D. S. and Park, G. S., 2010, A Study on Reducing Cogging Torque by Core Shapes in Permanent Magnet Motors, *Journal of the Korean Magnetics Society*, Vol. 20, No. 2, pp. 61~67.

(5) Seo, K.-S., Kim, Y.-J. and Jung, S.-Y., 2014, Stator Teeth Shape Design for Torque Ripple Reduction in Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor, *Proceedings of 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pp. 387~390.

(6) Islam, R., Husain, I., Fardoun, A. and McLaughlin, K., 2009, Permanent-magnet Synchronous Motor Magnet Designs with Skewing for Torque Ripple and Cogging Torque Reduction, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 45, No. 1, pp. 152~160.

(7) Lee, H.-J., Kwon, J.-H., Lee, C.-M., Hwang, G.-Y. and Hwang, S.-M., 2009, Analysis of Noise Characteristic Considering Magnetic Force of IPM Motor, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 19, No. 5, pp. 439~446.

(8) Shin, H. J. and Kim, R. E., 2017, Acoustic FEA Analysis and Modification for Robot Joint BLDC Motor, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 27, No. 3, pp. 353~359.

(9) Won, J., Jung, Y., Kim, B., Kang, B. and Park, K., 2011, EV Traction Motor Housing Design for Noise Reduction, *Proceeding of the KSAE Annual Autumn Conference*, pp. 2920~2923.

(10) Hattori, T., Narita, K., Yamada, T., Sakashita, Y., Hanaoka, K. and Akatsu, K., 2009, Modeling Method of Vibration Analysis Model for Permanent Magnet Motor Using Finite Element Analysis, *Proceedings of*

International Conference on Electrical Machines and Systems, pp. 1~6.

(11) Yin, H., Ma, F., Zhang, X., Gu, C., Gao, H. and Wang, Y., 2019, Research on Equivalent Material Properties and Modal Analysis Method of Stator System of Permanent Magnet Motor with Concentrated Winding, IEEE Access, Vol. 7, pp. 64592~64602.

(12) 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.



Hyunwoo Lee received his B.S. degree in mechanical engineering from Hanyang University, Ansan, Korea in 2023. He is currently a M.S. student in the Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Korea. His research interests are structural

dynamics, vibration and noise.



Jintai Chung received his B.S. and M.S. degree in mechanical engineering from Seoul National University, Seoul, Korea in 1984 and 1986, respectively, and a Ph.D. degree in mechanical engineering from the University of Michigan, Ann Arbor, USA in 1992.

He is now a professor in the Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Korea. His research fields are structural dynamics, vibration and noise.