

Noise Reduction Design Study of Cooling Fan Motor for Hydrogen Bus Fuel Cell

Kwang-soo Kim

Department of Electrical and Electronic Education, Gyeongbuk National University, Andong 36729, South Korea

Su Yong Kim*

Korea Electronics Technology Institute, Gwangju 61011, South Korea

(Received 18 February 2025, Received in final form 11 March 2025, Accepted 11 March 2025)

This study focuses on the development and noise reduction of a cooling fan motor for hydrogen fuel cell systems. The initial design defined the basic specifications and structure of the fan motor, while the reduction of cogging torque and torque ripple, the primary sources of noise and vibration, was achieved through optimization of the rotor and stator shoe shapes. The rotor design incorporated a 3.75-degree two-step skew and optimized magnet width to minimize eddy current losses and effectively reduce cogging torque. Additionally, the stator shoe was divided into five design parameters, and a parametric analysis was conducted to minimize flux density variations, further reducing cogging torque. Experimental results demonstrated that the final model achieved a high efficiency of over 93% and a low noise level of 67.1 dB, meeting the target specifications. This research provides a noise reduction design approach for cooling fan motors that enhances the efficiency and durability of hydrogen fuel cell vehicles.

Keywords : hydrogen bus, fuel cell, cooling fan motor, noise reduction, cogging torque, torque ripple, finite element analysis (FEA)

수소버스 연료전지용 냉각팬 모터의 소음 저감 설계 연구

김광수

국립경북대학교 전기전자교육과, 경북 안동시 경동로 1375, 36729

김수용*

한국전자기술연구원, 광주광역시 북구 첨단과기로 226, 61011

(2025년 2월 18일 받음, 2025년 3월 11일 최종수정본 받음, 2025년 3월 11일 게재확정)

본 연구는 수소 연료전지용 냉각 팬모터의 개발 및 소음 저감을 목표로 수행되었다. 초기 설계를 통해 팬모터의 기본 사양과 구조를 정의하였으며, 소음과 진동의 주요 원인인 코깅 토크와 토크리플을 줄이기 위해 회전자와 고정자 슈 형상을 최적화하였다. 회전자 설계에서는 3.75도의 2단 스큐와 영구자석 폭 최적화를 통해 와전류 손실을 줄이고 코깅 토크를 효과적으로 감소시켰다. 또한, 고정자 슈는 5개의 설계 변수로 구분하여 설계 파라미터를 분석하고, 이를 통해 자속 밀도의 변화를 최소화하여 코깅 토크를 추가적으로 저감하였다. 실험 결과, 최종 설계 모델은 목표 사양인 93% 이상의 효율과 67.1 dB의 낮은 소음을 달성하였다. 본 연구는 수소 연료전지 차량의 효율성과 내구성을 향상시키는 데 기여할 수 있는 냉각 팬모터 소음 저감 설계 방안을 제시하였다.

주제어 : 수소버스, 연료전지, 냉각팬 모터, 소음저감, 코깅토크, 토크리플, 유한요소 해석법

I. 서 론

수소 연료전지를 사용하는 상용 버스는 환경친화적이며 지속 가능성 측면에서 많은 장점이 있다. 차량 운행의 안정성

을 위하여 연료전지 시스템의 열 관리는 필수적이다. 기존에는 연료전지 시스템의 냉각을 위하여 유압으로 구동되는 팬을 사용하였으나 소형화, 경량화를 위하여 팬 구동용 전동모터의 개발이 요구되고 있다. 이 팬 모터는 연료전지 냉각 시스템의 핵심이며, 그 성능이 차량의 전반적인 효율과 내구성에 큰 영향을 미친다. 특히, 팬 모터에서 발생하는 소음과 진동은 주행 중 운전자와 버스이용객들에게 부정적인 영향을 줄

수 있어, 이를 최소화하는 것이 중요하다[1]. 차량에 들어가는 팬모터의 경우 장기간 운행할 경우 탑승자의 피로도가 높아지기에 소음 저감이 필수적이다. 또한, 소음과 진동은 모터의 성능과 내구성에 중대한 영향을 미치며, 심할 경우 부품의 피로와 고장을 초래할 수 있다. 소음과 진동은 모터의 회전으로 인해 발생하며, 그 원인은 대부분 코깅토크와 토크리플에 기인한다. 각 응용 분야에 따라 다양한 설계방법을 통하여 코깅토크와 토크리플을 저감하는 연구가 되고 있다[2-6].

본 연구는 수소 트럭의 연료전지를 냉각하는 팬 모터의 소음과 진동을 줄이기 위해, 코깅토크와 토크리플의 감소를 설계 목표로 두고 회전자의 형상 설계와 고정자 슈 형상 설계를 통하여 최적의 형상을 도출한다.

II. 팬모터 설계 사양 및 설계 프로세스

Fig. 1은 수소 버스 연료전지용 팬모터 설계를 위한 프로세스

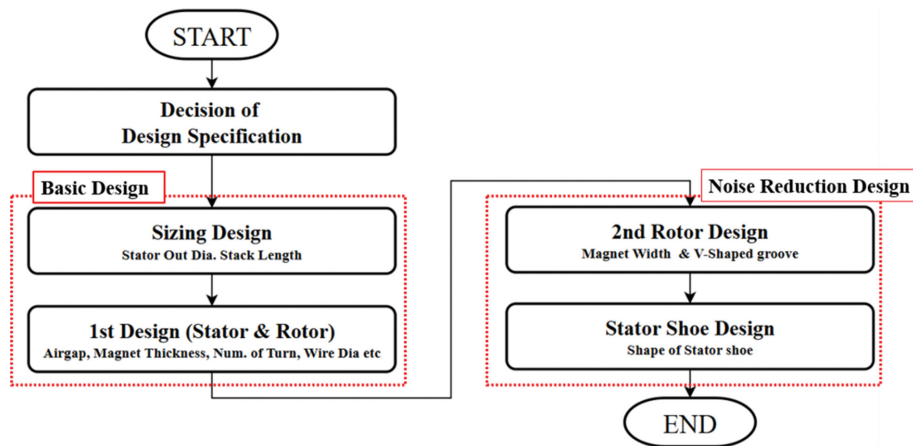


Fig. 1. Design process of fan motor.

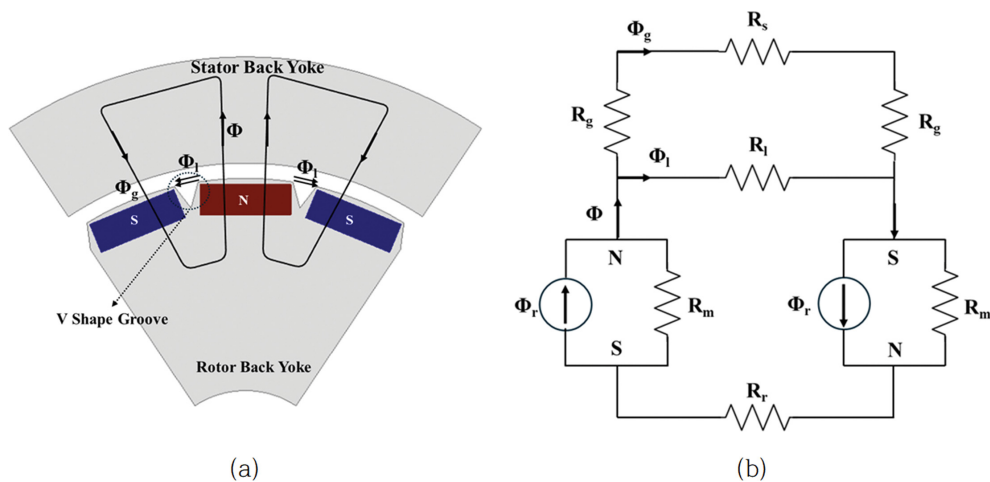


Fig. 2. (Color online) Magnetic equivalent circuit model for basic design, (a) Analysis model, (b) Magnet equivalent circuit.

스이다. 주어진 사양을 바탕으로 기초 설계를 진행한 후 소음 저감을 위한 설계를 수행하였다. 소음 저감 설계에서는 회전자 세부 형상 설계, 고정자 슈의 형상 설계를 진행하였다.

기초 설계에 있어 극수 슬롯수 조합이 선정이 중요하다. 극수 슬롯수 조합에 따라 동일 크기 내에서 고출력화가 가능하며, 또한 소음과 진동에도 큰 영향을 미친다. 기존 연구에서 극수 슬롯수에 대한 검토를 수행하여 16극 18슬롯과 16극 24슬롯을 검토하였다[7]. 본 연구에서는 16극 18슬롯의 경우 권선의 대칭성이 없어 반경 방향 가진력의 UMF(Unbalance Magnetic Force)가 발생하기 때문에 소음과 진동에 취약한 구조로 본 연구에서는 대칭성이 있는 16극 24슬롯으로 선정하여 설계를 진행하였다.

회전자 형상의 경우 소음과 진동 측면에는 SPMSM (Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor) 이 유리하나 회전자 영구자석의 비산방지를 위한 구조 적용 및 자석의 곡선 가공으로 불리한 측면이 있어 기본형상은

Table I. Design specification of fan motor.

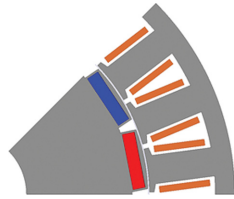
Target Specification		
Power	[kW]	30
Battery Voltage	[V]	720
Rated Speed	[rpm]	2,000
Limited Width	[mm]	300
Limited Length	[mm]	200
Pole / Slot	-	16 / 24
Efficiency	[%]	93 ↑
Noise	[dB]	70 ↓

IPMSM(Inner Permanent Magnet Synchronous Motor)으로 설계하였다. 릴럭턴스토크 성분이 소음과 진동에 영향을 크게 미치므로 회전자 형상을 Fig. 2의 (a)에서와 같이 영구자석 사이에 실제 V홀을 추가하여 SPMSM과 유사한 토크 특성을 갖도록 설계하였다. V홀 적용시 영구자석의 비산 방지뿐 아니라 다극 모터에서 발생할 수 있는 영구자석의 와전류로 인한 손실을 저감하는 효과도 얻을 수 있다.

주요 사이징 설계는 Fig. 2의 기본형상과 이에 대한 자기 등가회로인 Fig. 2의 (b)를 이용한 기초 설계를 통하여 수행되었으며 팬모터 설계를 위한 요구 사양은 Table I에 기재하였다. 이는 연료전지의 냉각 및 공간을 고려한 것이다.

사이징 설계(Sizing Design)는 Table I의 제한 폭과 길이를 기반으로 모터가 장착되는 공간의 제약으로 결정한다. Fig. 3과 같이 적층 방향으로는 권선의 엔드턴, 코어 적층길이, 레줄버 크기를 고려하고, 폭 방향으로는 수냉 자켓을 포함한 하우징을 고려하여 모터 코어의 외경과 축방향 길이를 선정하였다. 배터리 전압은 충분히 방전된 후 전압과 권선의 전압 강하의 여유분까지 고려하여 600 V에도 동작할 수 있도록 설

Table II. Initial design model and FEM result.

Initial Design Model		FEM Result	
	Power	[kW]	30.6
	Rated Torque	[Nm]	147.0
	Rated Speed	[rpm]	2,000
	Efficiency	[%]	93.7
	Cogging Torque	[Nm]	6.15
	Torque Ripple	[Nm]	10.00
	EMF THD	[%]	2.76

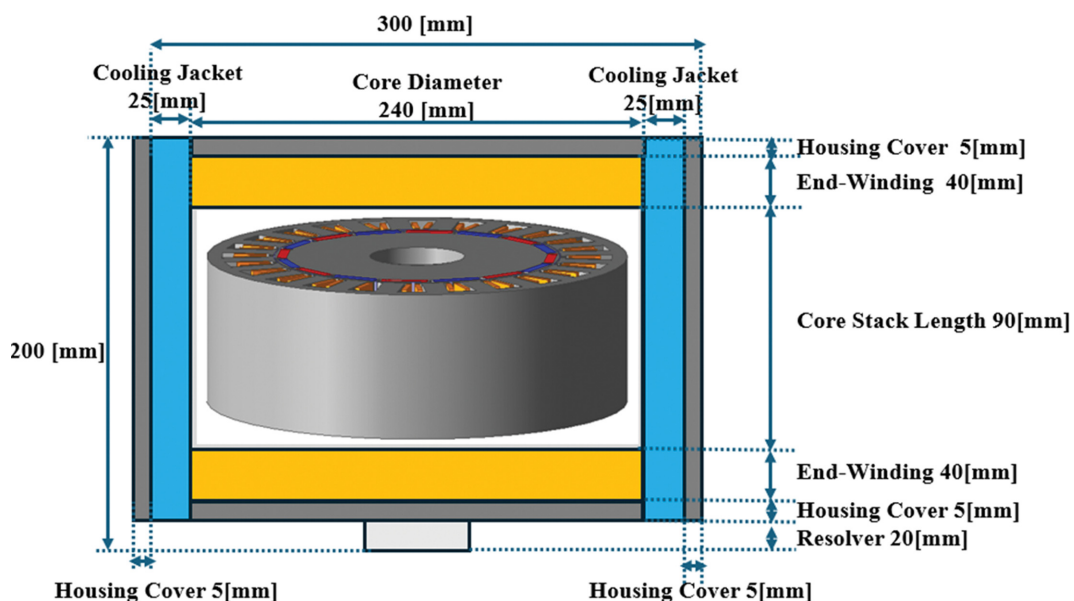
계를 진행하였다[8].

Table II는 자기등가회로법과 유한요소법을 이용한 기초설계를 통하여 도출한 초기설계 모델과 유한요소 결과를 나타낸 것이다. 초기설계를 통하여 목표 효율 및 출력은 만족하였으나 코깅토크와 토크리플이 정격토크 대비하여 비교적 크게 나타났다. 이는 소음과 직접적인 관계가 있으므로 회전자 설계 및 고정자 슈 형상설계를 통한 소음 저감 설계를 수행하였다.

III. 팬모터 소음 저감 설계

1. 회전자 형상 설계

초기 설계 모델을 바탕으로 소음 감소를 위하여 회전자 형상 설계를 진행하였다. 코깅 토크 저감, 영구자석의 와전류 손실 감소를 통한 온도상승 저감을 위하여 회전자에 2단 스큐를 적용하였다. 1단과 2단 사이의 코깅 토크 파형은 크기는 같고, 위상은 180도 차이가 나게 스큐 각도를 산정 해야한다. 그 스큐 각도는 다음 식(1)을 통하여 계산할 수 있다[9].

**Fig. 3.** (Color online) Decision of motor size.

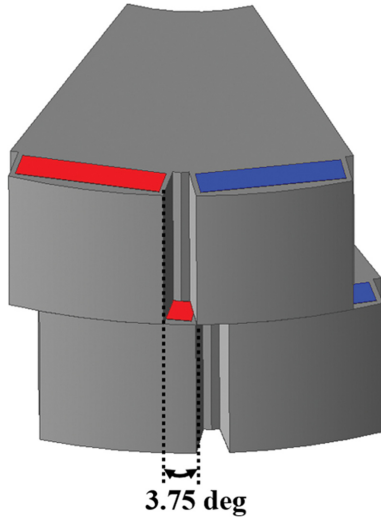


Fig. 4. (Color online) Skewed (3.75 deg) rotor of the initial model.

$$\frac{360}{LCM(N_p, N_s) \cdot 2} \quad (1)$$

여기서, LCM은 최소공배수, N_p 는 극수, N_s 는 슬롯수이다.

Fig. 4는 식(1)을 통하여 계산한 16극 24슬롯의 모터의 3.75도의 2단 스큐를 적용한 회전자를 나타내었다. Fig. 5와 Fig. 6은 2단 스큐(3.75도) 적용시 초기 설계 모델의 코깅토크와 토크리플을 나타내었다. 스큐가 적용됨으로써 코깅토크 및 토크리플이 크게 저감되는 것을 확인 할 수 있다.

회전자 설계에서는 이 2단 스큐를 기반으로 Fig. 7과 같이 회전자 설계시 영구자석 폭을 설계 파라미터로 선정하고 영구자석의 폭이 결정되면 V홈의 폭이 종속되어 결정되도록 하였다. 여기서 브릿지 폭은 제조를 고려한 최소 두께로 고정하였다.

Fig. 8, 9는 영구자석 폭에 따른 무부하 및 부하 유한요소 해석 결과를 비교한 그래프이다. 영구자석 폭이 최대일 때 코

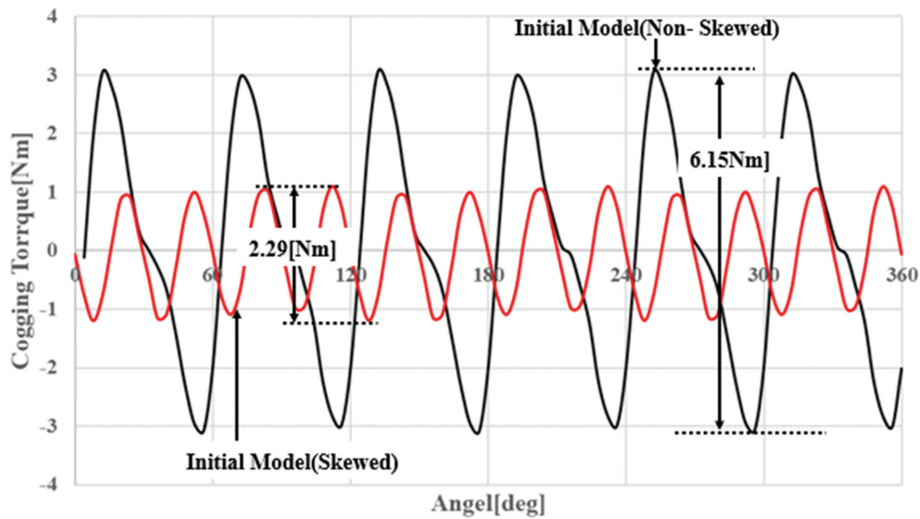


Fig. 5. (Color online) Comparison of cogging torque of initial model according to skew.

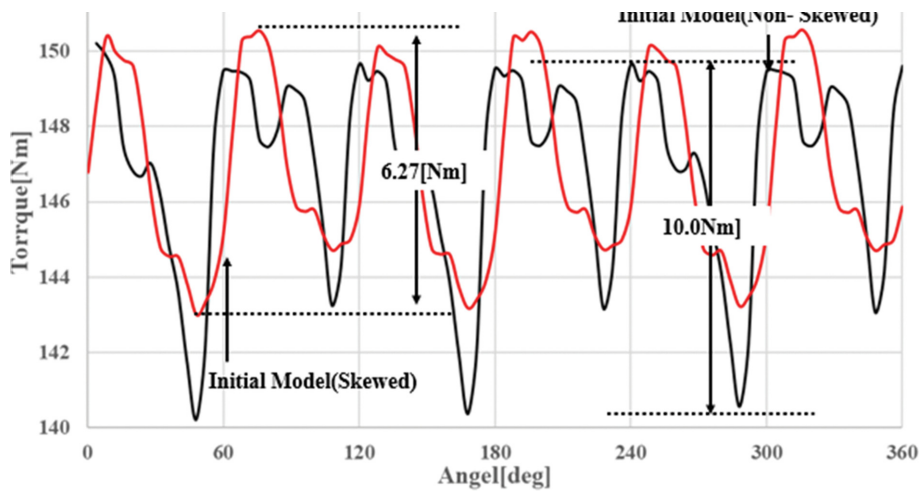


Fig. 6. (Color online) Comparison of torque ripple of initial model according to skew.

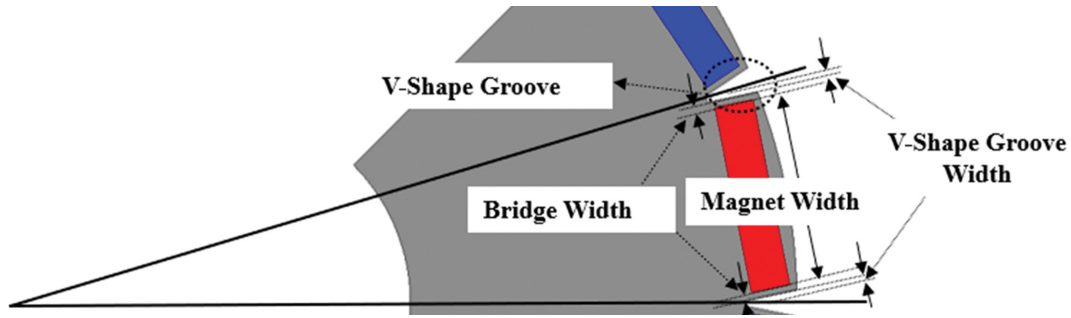


Fig. 7. (Color online) Rotor design parameter.

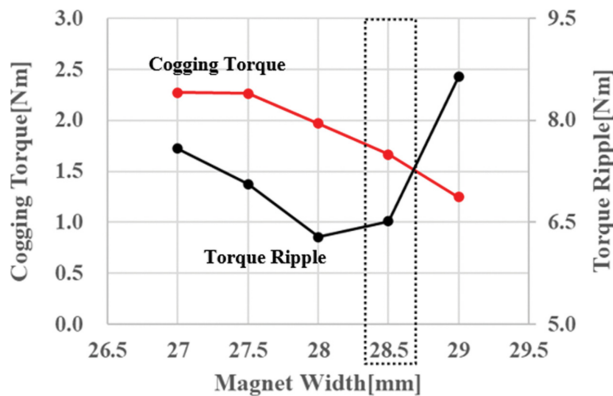


Fig. 8. (Color online) Cogging torque and torque ripple according to the magnet width.

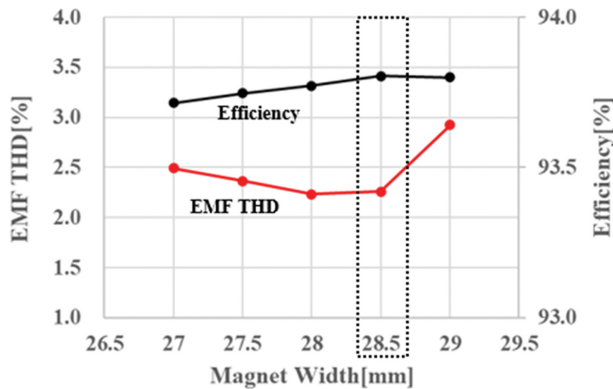


Fig. 9. (Color online) Efficiency and EMF THD according to the magnet width.

깁토크가 최소가 되나 토크리플 및 역기전력의 THD가 상승하는 것을 볼 수 있다. 따라서 Fig. 7, 8과 같이 코깅토크와 토크리플이 작고, 효율, THD를 모두 만족하는 모델을 1차 설계 모델로 선정하였다. 코깅토크, 토크리플의 최소로 되는 점은 아니나 추가 고정자 형상 설계를 통하여 개선한다. 사실, Fig. 9와 같이 영구자석의 폭을 크게 할수록 효율이 커지고 있으나 용량이 큰 모터라 그 변화폭이 크지 않아 모델 선정에 영향이 크지는 않다.

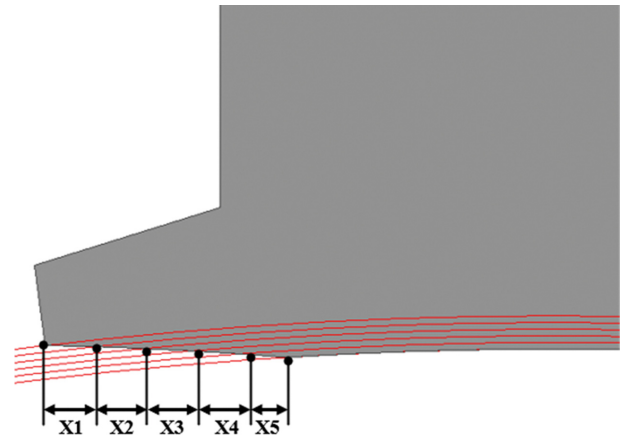


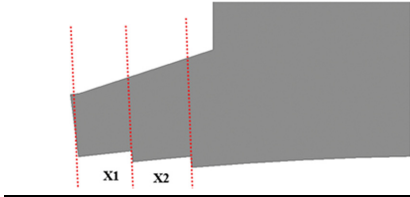
Fig. 10. (Color online) Stator shoe design parameter.

2. 고정자 슈 형상 설계

소음 저감 설계의 다음 단계로 고정자 슈의 형상 설계를 수행하였다. 고정자 슈의 형상 설계는 코깅 및 토크리플에 큰 영향을 미친다. 다양한 슈 형상 설계 방법이 있으나 본 연구에서는 Fig. 10과 같이 슈를 5개의 층으로 구분하여 각 층의 폭을 5개의 설계 파라미터로 정의하여 고정자 슈에서의 자속변화를 최적화하였다[10,11]. 여기서 각 파라미터는 4수준으로 정의하고, 1024개 모델에 대한 해석을 통하여 결과를 도출하였다. Table III은 기존 연구와 제안한 고정자 슈 설계의 차이점을 간단히 비교한 표이다. 기존 연구에서는 계단 또는 홀 형상을 활용한 연구를 많이 수행하였다. 이 경우 형상의 변화가 연속적이지 않아 설계 형상의 구현이 어려우며 자속의 변화가 모서리 부분에 급격히 일어나 코깅토크 저감에 방해요인으로 작용할 수 있다.

Fig. 11은 각 파라미터의 코깅토크, 토크리플과의 상관관계 그래프를 나타내고 있다. 토크리플은 낮은 상관관계(0.1 이하)로 파라미터에 따른 경향성이 보이지 않으나 코깅토크는 약한 상관관계를 보이고 있으며, 공극에 가까운 파라미터가 커짐에 따라 음의 상관관계를 나타내는 것을 볼 수 있다. 고정자 형상 설계의 경우 코깅토크에 보다 큰 영향을 미친다는 사실을 확인할 수 있다.

Table III. Comparison between the proposed design and existing studies.

Item	Existing studies	Proposed design
Stator Shoe Shape		
	Stepped shape	Sloped shape
Continuity of Shape	Dis-continuous	Continuous
Flux Change Characteristics	Rapidly	Smoothly

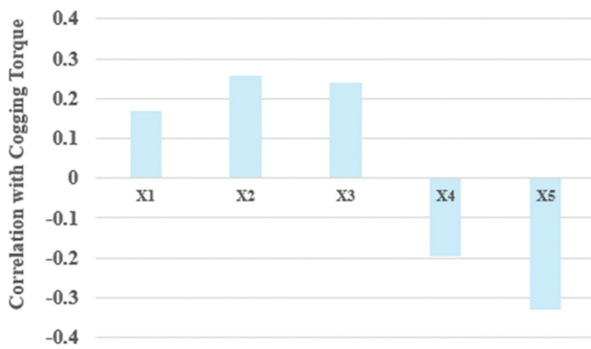


Fig. 11. (Color online) Correlation with cogging torque and torque ripple.

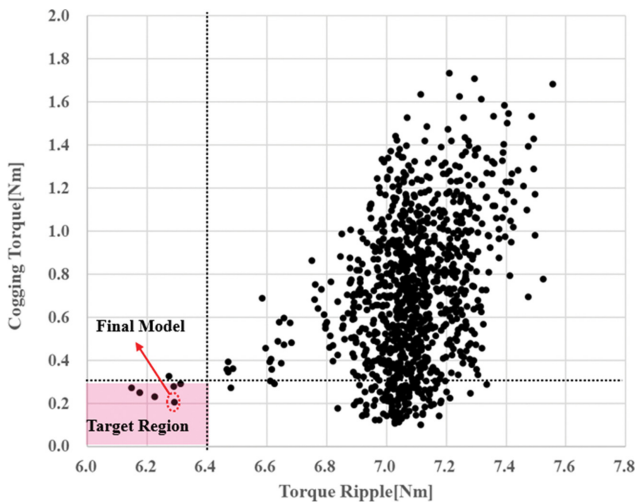


Fig. 12. (Color online) Model distribution according to cogging torque and torque ripple.

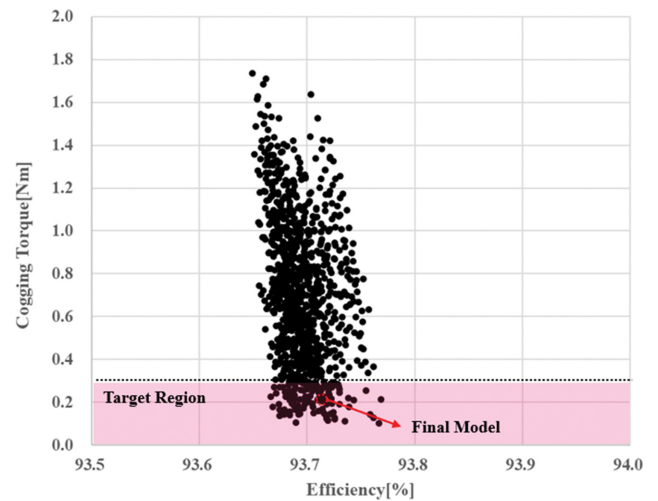


Fig. 13. (Color online) Model distribution according to cogging torque and efficiency.

Fig. 12는 각 모델의 코깅토크와 토크리플을 나타낸 그래프이다. 위 상관관계에서 나타난 것과 같이 토크리플은 파라미터에 변화에 따라 변화폭이 크지 않지만, 코깅토크는 변화폭이 상대적으로 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 12와 같이 코깅토크와 토크리플이 최소가 되는 영역을 선정하고 영역내 코깅토크가 최소인 최종 모델을 선정하였다.

Fig. 13, 14는 각 모델의 효율과 역기전력의 THD를 토크리플에 따라 나타낸 그래프이다. 그림에서 표기한 것과 같이 설계 영역 내 최종모델이 포함되는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 15, 16은 초기 설계 모델 대비 코깅토크의 크기와 토크리플을 비교한 그래프이다. 소음 저감 설계를 통하여 토크리플의 저감 비율은 크지 않으나 코깅토크는 큰 비율로 저감

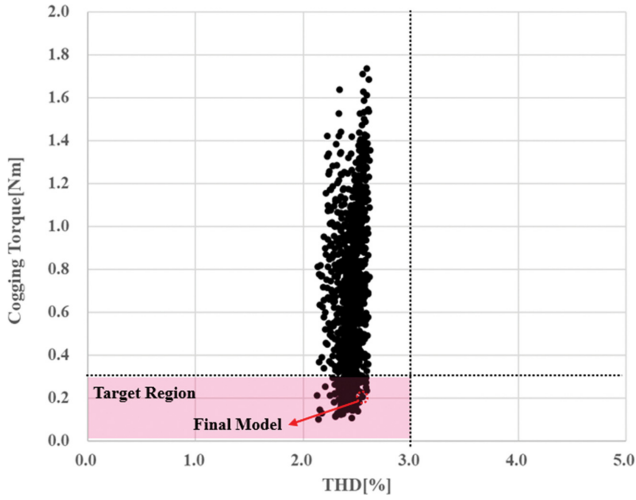


Fig. 14. (Color online) Model distribution according to cogging torque and THD.

된 것을 볼 수 있다.

IV. 모터 제작 및 시험평가

소음 저감 설계를 이용한 최적 설계된 팬모터의 실제 성능 시험을 위하여 시작품을 제작하여 해석 결과와 성능 비교를 하였다. Fig. 17은 제작된 최종 회전자와 고정자를 각각 나타내었다.

Fig. 18은 제작된 전동기의 무부하 및 부하시험을 위한 시험장비를 나타내고 있다. 서보 방식의 다이내모미터를 이용하여 시험을 수행하였다.

Fig. 19는 정격속도인 2000rpm에서의 측정된 무부하 역기 전력과 유한요소 해석을 각각 나타내고 있다.

무부하 역기전력의 해석값과 실험결과 차이는 2.4V로 오차가 2% 발생하였다. 이는 코어 및 영구자석의 재질 정보와

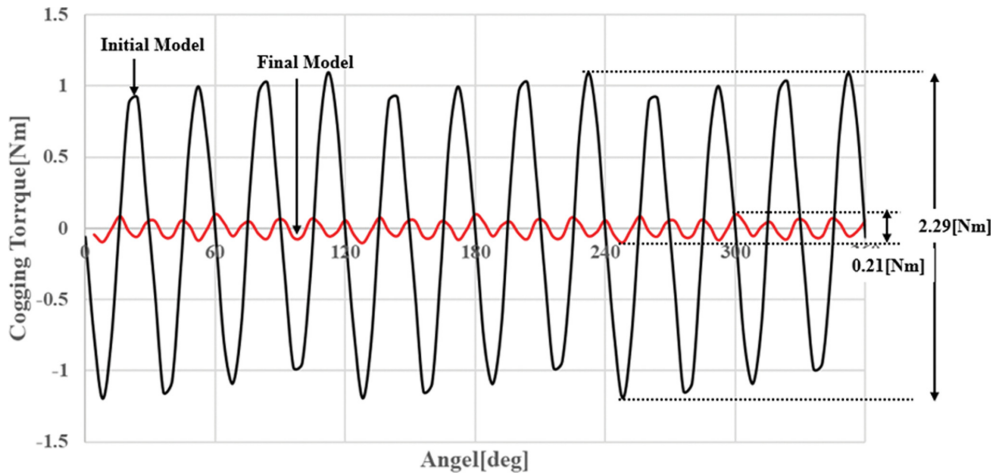


Fig. 15. (Color online) Comparison of cogging torque between initial and final model.

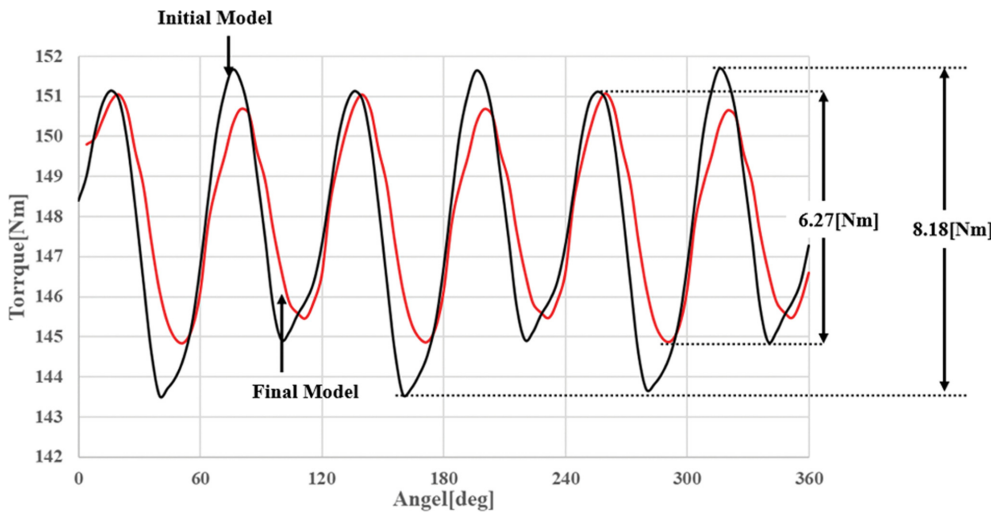


Fig. 16. (Color online) Comparison of torque ripple between initial and final model.

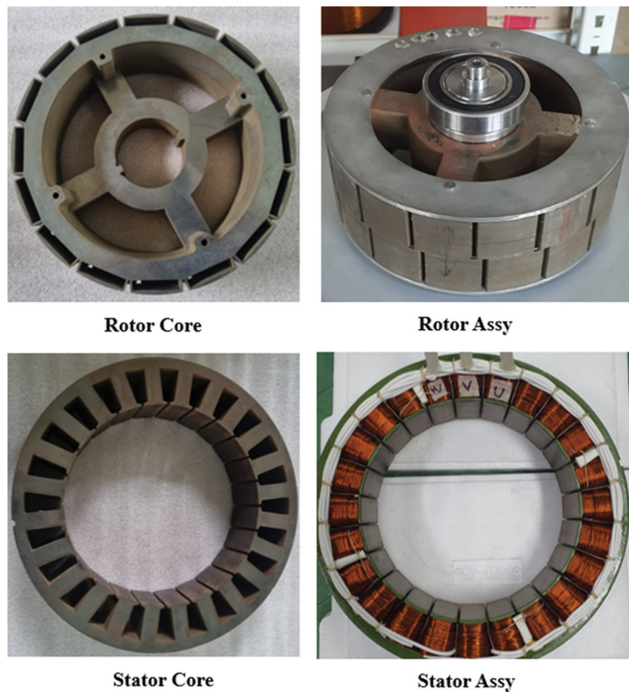


Fig. 17. (Color online) Fan motor for performance evaluation.

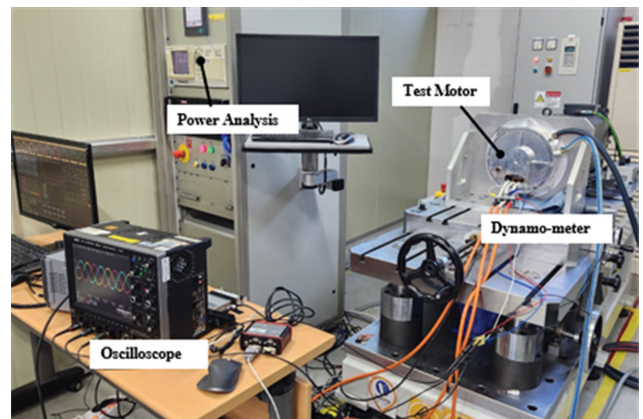


Fig. 18. (Color online) Load test equipment (Dynamo System).

제작시 발생하는 오차로 예상된다. Fig. 20은 최종 모터의 소음 시험 장비와 시험 결과를 나타내고 있다. 시험 조건은 모터와 인버터 결합 상태에서 소음을 측정하였다. 이때 배경 소음은 18 dB이며, 측정 회전수는 $2,000 \text{ rpm} \pm 10\%$ 로 마이크로폰과 모터 간의 거리는 50 cm인 상태로 마이크로폰의 위치는 각각 모터의 상, 하, 좌, 우, 위에 각각 설치하여 소음을 측

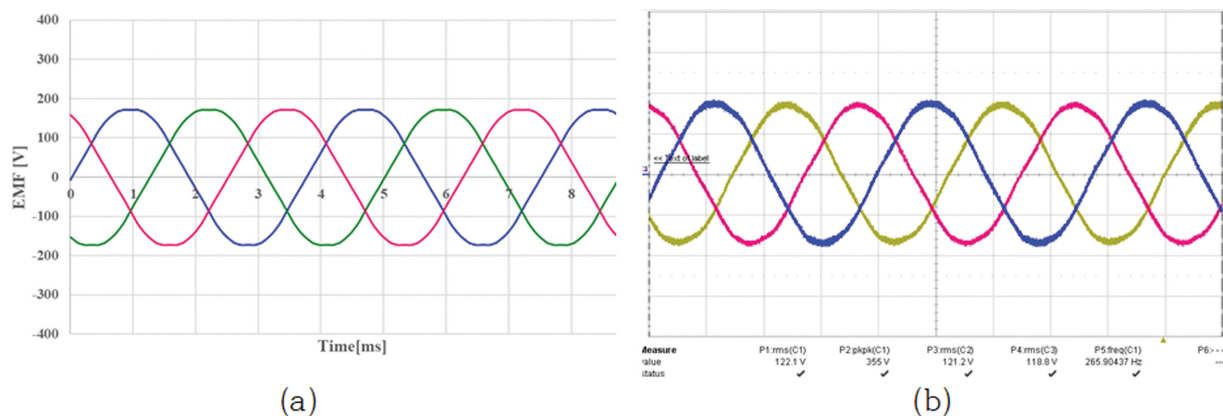


Fig. 19. (Color online) No load back EMF measurement result of the test motor (2,000 rpm), (a) Finite element analysis result, (b) Actual measurement result.

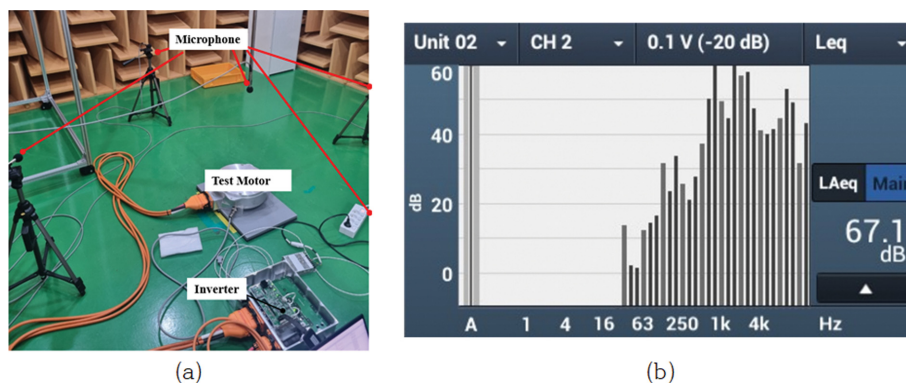


Fig. 20. (Color online) Noise test equipment and noise test result, (a) Noise test equipment, (b) Noise test result.

Table IV. Comparison of final model analysis results and test results.

Item	Unit	Analysis	Experiment
No load EMF	[Vrms]	124.9	122.4
Power	[kW]	32	31.5
Rated Speed	[rpm]	2,000	2,000
Torque	[Nm]	152.7	150.2
Current	[Arms]	91	99
Efficiency	[%]	93.7	93.3
Noise	[dB]	-	67.1

정하였다.

Table IV는 해석 결과와 실험 결과를 비교한 표이다. 영구 자석의 와류전류 및 기계적 손실 등으로 인한 영향으로 전류 증가에 따라 효율이 해석값 대비 오차가 발생하였으나 목표 값을 만족하였다.

V. 결 론

수소버스 연료 전지용 냉각 팬모터를 개발하기 위하여 기초 설계를 수행하였고, 소음 저감을 위한 소음 저감 설계를 수행하였다. 소음의 주원인인 코깅 토크와 토크리플을 최소화하기 위해 회전자 설계 및 다층의 변수를 이용한 고정자의 슈를 설계 함으로써 최적의 모델을 도출하였다. 회전자 스쿠 적용시 코깅토크를 크게 저감할 수 있었으며 고정자 슈 형상을 최적화함으로써 코깅토크를 저감할 수 있었다. 특히 고정자 슈의 설계의 경우 효율 및 출력 특성의 큰 감소 없이 개선할 수 있는 장점이 있었다. 고정자 슈를 설계하는 다양한 방법이 있지만 슈의 형상을 지속밀도의 변화를 최소로 하는 방향으로 설계 변수를 조정하여 방향성을 가질 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2024학년도 안동대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

References

- [1] S. K. Cho, W. S. Kim, K. H. Jung, K. S. Cho, and C. H. Park, The 44th KIEE Summer Conference 2013, 613 (2013).
- [2] S. H. Yun, S. I. Ro, H. M. Kim, and G. S. Park, J. Korean Magn. Soc. **26**, 86 (2016).
- [3] D. Xu, M. Lin, X. Fu, L. Hao, W. Zhang, and N. Li, IEEE Trans. Appl. Supercond. **26**, 5201305 (2016).
- [4] H. Ge, X. Qiu, B. Guo, J. Yang, C. Bai, and Z. Jin, IEEE Trans. Magn. **58**, 8102905 (2022).
- [5] D. H. Choi, D. H. Kim, H. S. Han, D. H. Jung, and W. H. Kim, IEEE Trans. Magn. **60**, 8700305 (2024).
- [6] Y. K. Kim, J. Korean Magn. Soc. **34**, 31 (2024).
- [7] S. Y. Kim, J. Y. Park, J. H. Cho, and S. I. Jeong, The KIEE Fall Conference 2022, 221 (2022).
- [8] S. Y. Kim, J. Y. Park, J. H. Cho, and S. I. Jeong, The KIEE Fall Conference 2022, 223 (2022).
- [9] S. G. Lee, The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers P. **69P**, 248 (2020).
- [10] J. Kwack, S. Min, and J. P. Hong, IEEE Trans. Magn. **46**, 2108 (2010).
- [11] Y. U. Park, J. Y. So, D. H. Chung, Y. M. Yoo, J. H. Cho, K. S. Ahn, and D. K. Kim, The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers. **62**, 1528 (2013).