

## Optimal Design of Non-rare Earth Permanent Magnet Synchronous Motor for Personal Mobility

Ki-O Kim and Myung-Seop Lim\*

*Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, South Korea*

Du-Ha Park and Ji-Won Park

*Department of Automotive Engineering (Automotive-Computer Convergence), Hanyang University, Seoul 04763, South Korea*

Myeong Gyun Choi and Yunyong Choi

*DRIVETECH Co., Ltd., Bucheon 14558, Korea*

(Received 23 November 2023, Received in final form 15 December 2023, Accepted 19 December 2023)

This paper presents the optimal design of a 15 kW permanent magnet synchronous motor for personal mobility using non-rare earth permanent magnets (PMs) as an alternative to neodymium PMs. The characteristics of neodymium permanent magnet motors are compared with those when replaced with ferrite permanent magnets, and methods for improvement are suggested. The electromagnetic performance according to the rotor outer diameter, the shape of the PM, and the number of layers of the PM are compared, and the initial design is carried out considering the irreversible reduction characteristics and mechanical stability. Considering that it is for personal mobility, the efficiency of the main operating points for urban driving is considered, and two-step optimization is performed to reduce the number of experimental points. Based on the optimal design results of this paper, the suitability of synchronous motors using rare earth permanent magnets for personal mobility is suggested.

**Keywords :** ferrite permanent magnet, permanent magnet synchronous motor, personal mobility

## 퍼스널 모빌리티용 탈희토류 영구자석 동기모터 최적 설계

김기오 · 임명섭\*

한양대학교 미래자동차공학과, 서울시 왕십리로 222, 04763

박두하 · 박지원

한양대학교 미래자동차공학과(미래자동차-SW융합전공), 서울시 왕십리로 222, 04763

최명균 · 최윤용

드라이브텍 주식회사, 경기 부천시 조마루로 385번길 80, 14558

(2023년 11월 23일 받음, 2023년 12월 15일 최종수정본 받음, 2023년 12월 19일 게재확정)

본 논문은 네오디뮴 영구자석의 대안으로 탈희토류 영구 자석인 페라이트 영구자석을 이용하여 퍼스널 모빌리티용 15 kW급 영구자석 동기전동기의 최적 설계를 제시한다. 기존 네오디뮴 영구자석 모터의 특성과 페라이트 영구자석으로 대체했을 때의 특성을 비교, 개선 방법을 제시한다. 회전자 외경, 영구자석의 형상 및 레이어 수에 따른 전자기 성능을 비교하고, 불가역 감자 특성과 기계적 안전성을 고려하여 초기 설계가 수행된다. 퍼스널 모빌리티용임을 감안하여 도심 주행용 주 운전점의 효율을 고려하고, 실험점 개수를 줄이기 위한 2단계 최적화를 진행한다. 본 논문의 최적 설계 결과와 기존 모델의 결과 비교를 통해 탈희토류 영구자석을 이용한 동기모터의 퍼스널 모빌리티용 적합 가능성을 시사한다.

**주제어 :** 페라이트 영구자석, 영구자석 동기 모터, 퍼스널 모빌리티

## I. 서 론

차량용 구동 모터로는 한정된 공간 내에서 목표 출력과 효율을 충족해야 하기 때문에 높은 출력 밀도 및 효율 그리고 넓은 운전영역이 요구된다. 따라서 회토류 영구자석인 네오디뮴 영구자석(Nd PM)을 활용한 매입형 영구자석 동기모터(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)는 이러한 특성을 만족시키는 모터로 많은 자동차 업계에서 구동 모터로 사용되고 있다. 그러나 Nd PM은 디스프로슘(Dy)과 같은 회토류 원소가 포함되어 다른 영구자석 대비 가격이 비싸며 공급이 불안정하다. 또한 전 세계 회토류 생산량은 중국에 편향되어 있어 국제 상황에 따라 가격 변동성이 큰 문제가 있다. 이에 따라 Nd PM을 사용하는 IPMSM을 대체할 수 있는 탈회토류 또는 회토류 저감 모터에 관한 다양한 연구가 활발히 이루어지고 있다[1-3]. 대표적인 탈회토류 모터로는 유도 모터(Induction Motor IM), 권선 계자형 동기 모터(Wound Field Synchronous Motor, WFSM), 동기 릴럭턴스 모터(Synchronous Reluctance Motor, SynRM)가 대표적이다. 또한 회토류 저감 모터로는 소량의 Nd PM, 또는 페라이트 영구자석(Ferrite PM)을 사용한 영구자석 보조 동기 릴럭턴스 모터(Permanent Magnet-Assist Synchronous Reluctance Motor, PMA-SynRM), Ferrite PM 사용량을 늘려 spoke 형태로 배치한 자속집중형 동기 모터(Concentrated

Flux Synchronous Motor, CFSM), Ferrite PM을 다층으로 배치한 다층 IPMSM(Multi-Layer IPMSM, ML-IPMSM) 등이 있다. Fig. 1은 탈회토류 또는 회토류 저감 모터의 형상을 나타낸다. 그러나 대부분의 연구 결과들은 퍼스널 모빌리티용으로 사용될 수 있는 초소형 전기차의 용량을 크게 넘어선다. 전기적 입력 조건과 요구 출력에 따라 전기 모터의 형상은 달라질 수 있어, 퍼스널 모빌리티에 그대로 적용하기 어려울 수 있다. 퍼스널 모빌리티 시장이 확장됨에 따라 고성능 초소형 전기차의 수요가 증가하였고, 이에 따른 주 동력원인 고성능 전기 모터의 퍼스널 모빌리티에 적합한 설계 기술이 필요하다. 따라서 고성능 모터의 주로 사용되는 Nd PM의 수급 문제 개선과 가격 경쟁력을 갖기 위한 퍼스널 모빌리티에 적합한 탈회토류 모터 설계 연구가 필요하다.

본 논문에서는 Nd PM을 사용한 퍼스널 모빌리티용 IPMSM을 대상 모델로 Ferrite PM으로 대체하고 분석한다. 분석을 토대로 개선 설계를 진행, 단계적 최적화를 이용한 최적 설계를 수행하였다.

## II. 퍼스널 모빌리티용 구동 모터 사양

퍼스널 모빌리티용으로 사용될 수 있는 Nd PM을 사용한 기존 모터의 사양, Nd PM 및 Ferrite PM의 재질 특성을 Table I에 나타내었다. Fig. 2은 기존 Nd 모델의 형상과 특

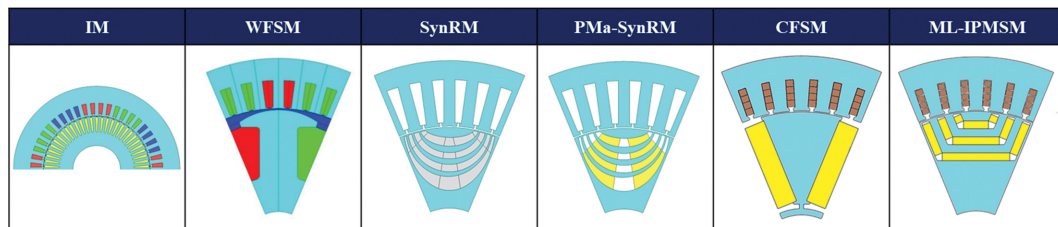


Fig. 1. (Color online) 탈회토류, 회토류 저감 모터 타입 종류.

Table I. 퍼스널 모빌리티용 모터 사양

항목			단위	값	비고
전원사양	DC 전압		Vdc	66	
	최대 선전류		Arms	400	
모터 성능	최대 출력		kW	15	
	최대 토크		Nm	60	
	기저 속도		rpm	2387	
	최대 속도		rpm	7000	
극/슬롯 수			-	8/12	
형상 정보	공극 길이		mm	0.8	
	회전자/고정자 외경 비율			0.6	
	적층 길이			1	Normalized
영구자석	Nd	잔류자속밀도	T	1.3	상온 기준
	Ferrite			0.47	

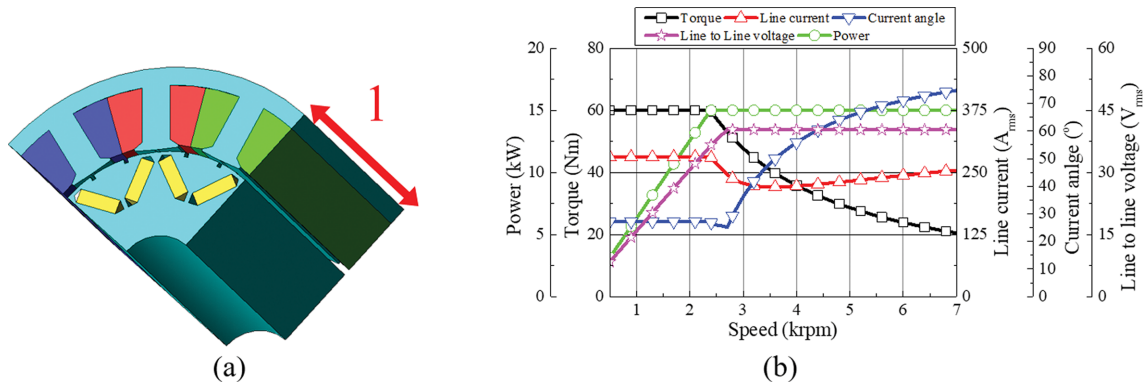


Fig. 2. (Color online) 기존 Nd 모델 형상 및 특성 해석 (a) 모델 형상 (b) 기존 모델 특성해석.

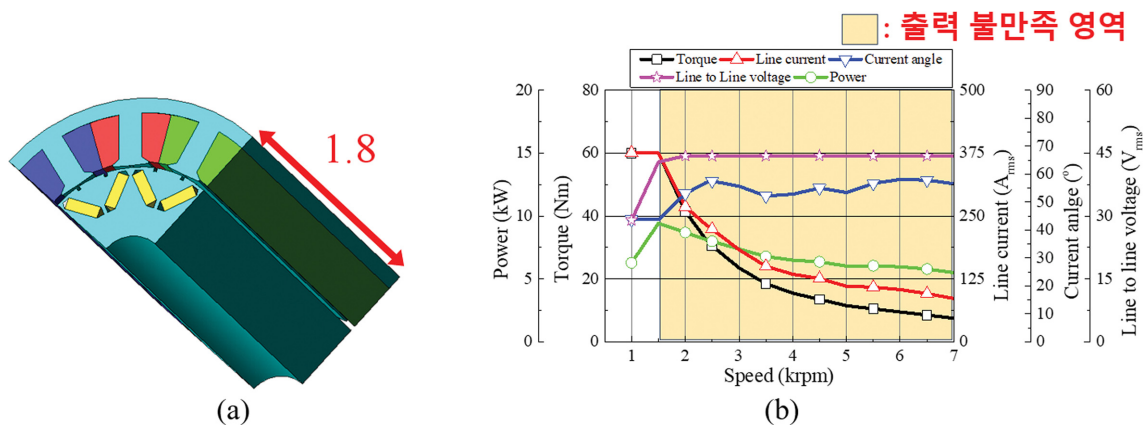


Fig. 3. (Color online) 페라이트 PM 재질 변경 형상 및 특성 해석 (a) 모델 형상 (b) 변경 모델 특성해석.

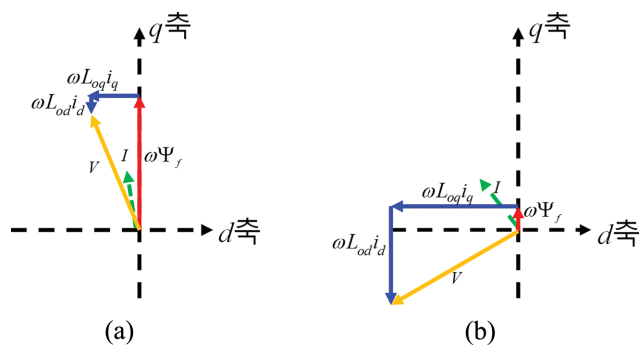


Fig. 4. (Color online) 기존 모델 특성 벡터도 (a) Nd PM 모델 (b) Ferrite PM 모델.

성 해석 데이터를 나타낸다. Fig. 3는 기존 형상에서 영구자석 재질을 Ferrite PM으로 변경, 본 논문에서 가능한 최대 적층 길이를 고려, 적층 길이를 1.8배 했을 때의 형상과 특성 해석 데이터를 나타낸다. 각각 모델에서 최대 토크 기준 전류 밀도는 약 9.3 Arms/mm<sup>2</sup>, 11.8 Arms/mm<sup>2</sup> 수준이다. Ferrite PM을 적용한 기존 모델의 경우, Nd PM 대비 낮은 잔류 자속 밀도를 고려하여 적층 길이를 증가시켰음에도 불

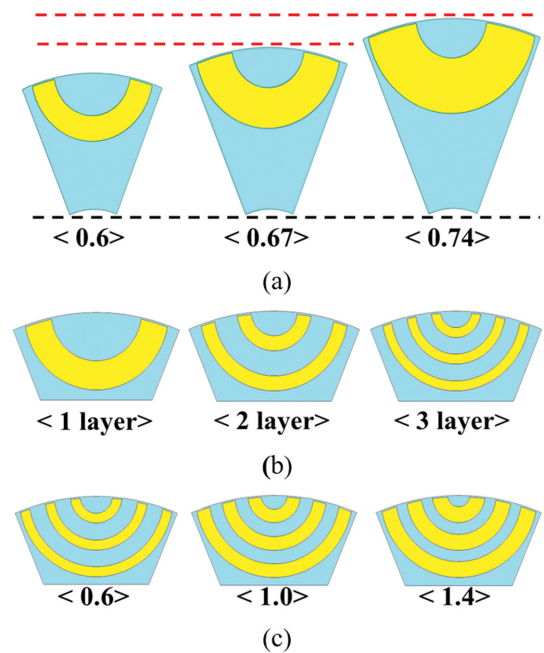


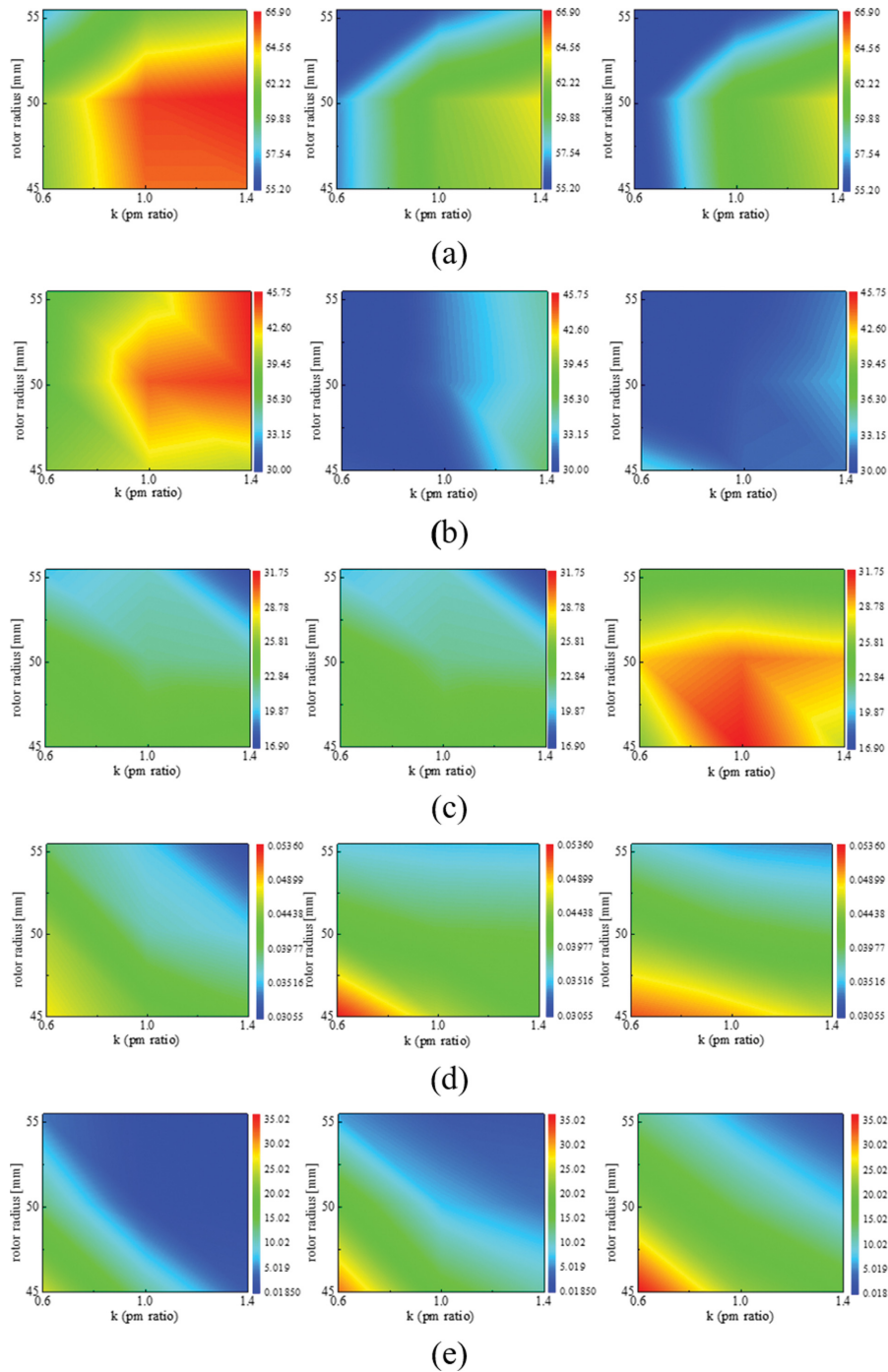
Fig. 5. (Color online) 회전자/고정자 외경 비율, PM 레이어 수, PM & Core 비율에 따른 회전자 형상 (a) 회전자/고정자 외경 비율, (b) PM 레이어 수, (c) PM & Core 비율.

구하고, 목표 토크를 만족하지 못하고, 전류 밀도 또한 증가하였으며, 출력 불만족 영역이 발생하였다.

### III. 기존 탈회토류 모터 분석 및 개선 설계

이번 장에서는 출력 불만족 원인 분석과 개선 방법을 제시

한다. Ferrite PM 적용 모델 기준, 기저 속도에서의 최대 토크 포인트(2387 rpm, 32.5 Nm)를 기준으로 Nd PM 적용 모델과의 특성 벡터도를 비교한 것을 Fig. 4에 나타내었다. Ferrite PM 모델의 벡터도의 경우 빨간색으로 나타낸 계자 쇠교자속의 값이 Nd 모델 대비 현저히 낮고 파란색으로 표시된 인덕턴스에 의한 전압 강하 성분이 Nd 모델 대비 크다.



**Fig. 6.** (Color online) 회전자/고정자 외경 비율, PM 레이어 수, PM & Core 비율에 따른 파라미터 (a) 총 토크, (b) 마그네틱 토크, (c) 릴럭턴스 토크, (d)  $d$ 축 인덕턴스 (e) 손실.



이에 따라 전압 벡터는 Nd 모델의 경우 2사분면에 위치하나, Ferrite PM 모델의 경우 3사분면에 위치한다. 따라서 Nd 모델의 경우 전압과 전류의 위상차인 역률 값이 Nd 모델의 경우 0.986이나 Ferrite PM 모델의 경우 0.494로 낮다. 결과적으로 Ferrite PM 모델이 Nd PM 모델보다 출력이 떨어지는 이유는 계자에 의한 유기 전압보다 인덕턴스에 의한 유기전압이 크며,  $d$ 축 인덕턴스에 의한 큰 유기전압으로 인해 전압 벡터가 3상한에 위치하여 낮은 역률을 갖기 때문이다.

Ferrite PM 모델의 출력을 향상시킬 수 있는 방법은 계자에 의한 쇄교자속을 증가시키고, 인덕턴스의 의한 전압 강하성분을 감소시키는 것이다. 그러한 방법으로는 첫번째로, 회전자 외경을 증가하는 것이다. 회전자 외경이 증가하면, 고정자 내반경이 커져 고정자 슬롯 면적이 작아져 고정자 기자력을 작게 할 수 있으며, 회전자 내부에 영구자석의 사용량 역시 증가시킬 수 있다. 두번째로는 기존의 V type의 영구자석 형상 대신 U-type의 영구자석을 사용하여 자석 사용량을 추가로 증가시킬 수 있다. 마지막으로 낮은 마그네틱 토크를 보완하기 위해서 영구자석의 레이어 수를 증가시키는 방법이다. Ferrite PM은 Nd PM 대비 낮은 잔류자속밀도를 갖기 때문에 Nd PM을 사용한 모델 대비 낮은 마그네틱 토크를 사용하며, 동일 회전자 사이즈 기준에서는 영구자석의 최대 사용량 제한이 있기 때문에 토크를 증가시키는 데 한계가 있다. 그러나  $d$ - $q$  축 인덕턴스 차이를 극대화할 수 있는 멀티레이어를 적용하면 토크를 증가시켜, 최대 토크를 증가시킬 수 있다. 출력 및 토크 향상을 위해 회전자 외경과 PM 레이어 수, PM과 철심의 비율 등을 결정한다. Fig. 5는 이에 따른 회전자 형상을 나타내며 최대 전류 인가 기준, 전류 위상각은  $0^\circ \sim 90^\circ$ ,  $10^\circ$  스텝 간격 중 최대 토크, 이 때의 마그

네틱 토크와 톨릭턴스 토크,  $d$ 축 인덕턴스를 계산하였다. 또한 페라이트 Nd의 저온 불가역 감자 특성을 고려하여  $-40^\circ\text{C}$ 에서 최대 전류의 1.2배, 전류 위상각  $90^\circ$  조건에서 불가역 감자 특성을 검토하였다. 불가역 감자는 식(1)과 같이 PM의 요소별 평균 감자율(Demagnetization Ratio, DR)을 기준으로 하였다[5].

$$\text{DR} (\%) = \left(1 - \frac{Br_{\text{step}}}{Br_{\text{org}}}\right) \times 100 \quad (1)$$

여기서  $Br_{\text{step}}$ 는 해석 step 시 잔류자속밀도,  $Br_{\text{org}}$ 는 해석 전 잔류자속밀도를 나타낸다. Fig. 6은 회전자/고정자 외경 비율, PM 레이어 수, PM & Core 비율에 따른 총 토크, 마그네틱 토크, 톨릭턴스 토크,  $d$ 축 인덕턴스, 그리고 감자율에 결과를 나타낸다. Fig. 6에서 보여주듯이 회전자/고정자 외경 비율이 0.67일 때, 총토크, 마그네틱 토크, 톨릭턴스 토크가 크며,  $d$ 축 인덕턴스와 감자율이 낮다. 그리고 1 PM layer 일 때, 총토크가 크고,  $d$ 축 인덕턴스와 감자율이 낮았고, PM & Core의 비율이 1.4일 때, 총 토크, 마그네틱 토크, 톨릭턴스 토크가 크고,  $d$ 축 인덕턴스와 감자율이 낮았다. 따라서 개선 설계의 회전자 형상을 회전자/고정자 비율은 0.67, PM layer 수는 1, PM과 Core의 비율은 1.4로 선정하였다.

선정된 모델에 대해서 불가역 감자 해석에 대한 결과가 Fig. 7(a)에 나타내었다. 영구자석 끝 단부에 국부적으로 불가역 감자가 발생하였고, 그 부분에 자속 장벽(Flux barrier)으로 대체하여 Fig. 7(b)에서 볼 수 있듯이, 국부적인 불가역 감자를 방지하였다. Flux barrier 삽입 모델 기준으로 기계적 안정성 검증을 위한 구조 해석을 진행하였다. 기계적 안정성은 전기장판의 항복강도 대비 최대 응력의 비를 안전 계수

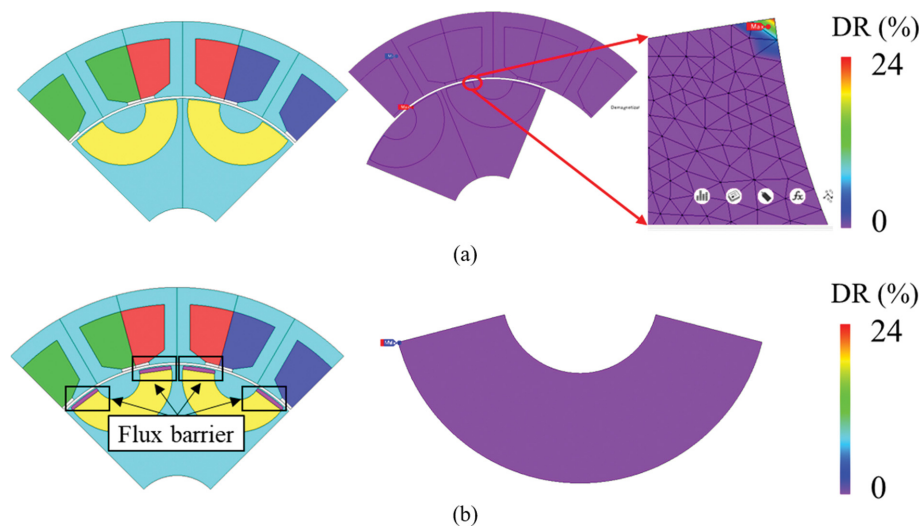


Fig. 7. (Color online) 영구자석 불가역 감자해석 (a) Flux barrier 설치 전 (b) Flux barrier 설치 후.

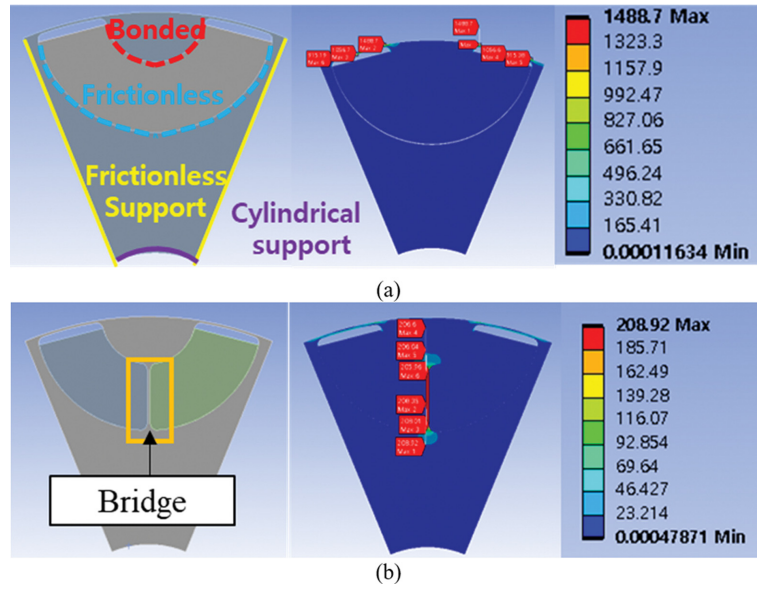


Fig. 8. (Color online) 회전자 구조해석 (a) Bridge 설치 전 (b) Bridge 설치 후.

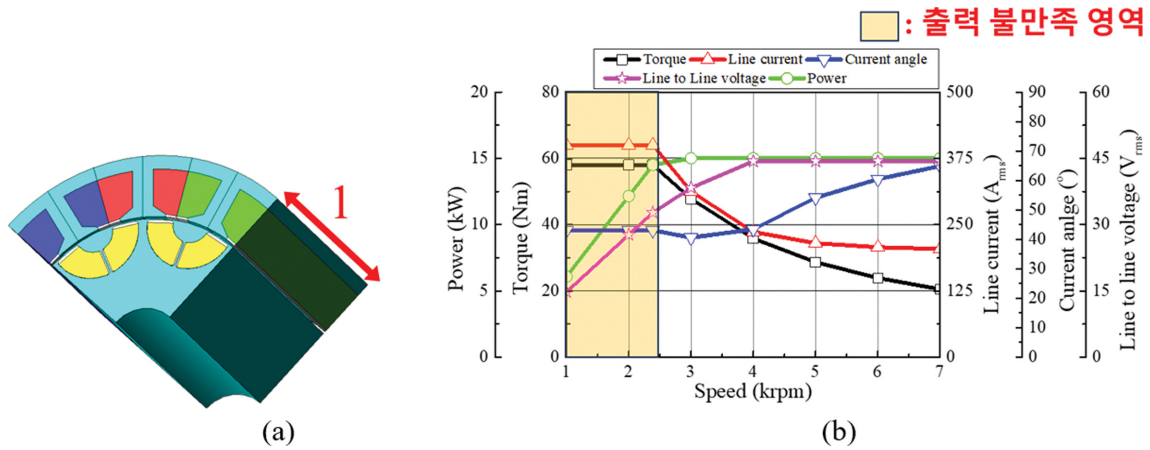


Fig. 9. (Color online) 개선 모델 형상 및 특성 해석 (a) 모델 형상 (b) 개선 모델 특성해석.

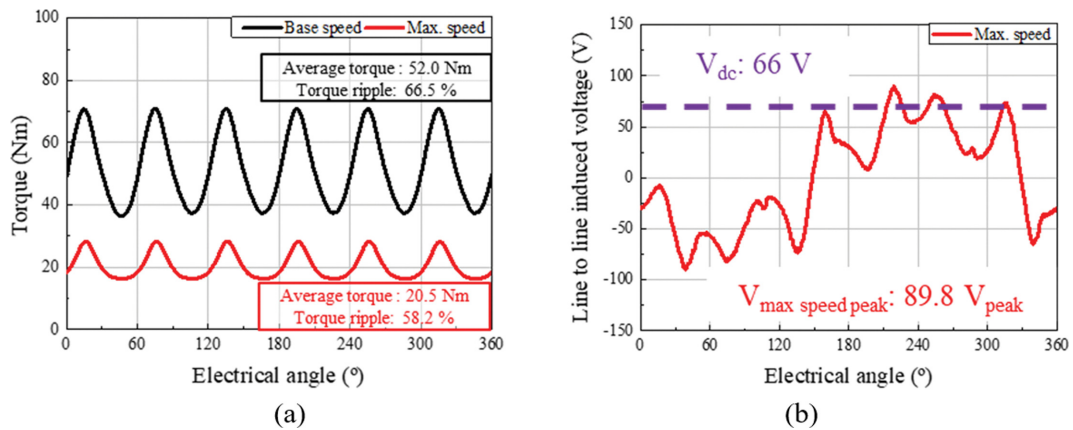


Fig. 10. (Color online) 개선 모델 부하 해석 (a) 토크 파형 (b) 선간 유기전압 파형.

(Safety factor, SF)로 정의, 최대 속도의 1.2배 회전 속도에서 안전 계수 1.2 이상 일 때, 기계적으로 안정적이다 판단하였다[1]. Fig. 8(a)에서 최대 응력이 1489 MPa 수준으로 본 설계 시 사용된 전기강판의 항복응력 380 MPa 기준, 안전 계수 0.26 수준으로 기계적으로 불안정하였고, 이에 따라 회전자 중심부 PM 영역에 Core Bridge를 삽입하여, Fig. 8(b)에서 볼 수 있듯이, 최대 응력 209 MPa 수준으로 안전 계수 1.8 이상으로 기계적 안정성을 확보하였다. 또한 회전자 중심부 PM 영역에 Bridge 삽입으로 인해 Bridge 부 국부 불가역 감자가 발생하여 Bridge 인접부에 Flux barrier를 추가 설치하여 국부 불가역 감자를 방지하였다. Fig. 8은 Bridge 부분 국부 불가역 감자를 방지하기 위한 Flux barrier 설치를 보여준다. Fig. 9는 개선 설계 형상과 특성 해석 결과를 나타낸다. 저속 영역에서 최대 선전류 제한에 따른 토크 부족으로 출력이 불만족하였으나, 기저속도 이후에서는 전 영역 출력 만족하였다. Fig. 10은 기저 속도에서의 최대 토크 부하와 최고 속도에서의 최대 토크 부하에서의 토크 파형을 나타낸다. Fig. 10에서 알 수 있듯이, 기저 속도, 최고 속도에서의 토크 리플이 각각 67%, 58% 수준이다. 또한 최고 속도 부하에서의 선간 유기전압 피크 값이  $V_{dc}$  66 V보다 높은 89.8V<sub>peak</sub>이다. 개선 모델 결과 저속 영역의 토크 향상과 기저 속도 및 최대 속도 부하에서의 토크 리플 저감, 유기전압 고조파 저감을 위한 최적 설계를 다음 장에서 진행하였다.

#### IV. 퍼스널 모빌리티용 구동용 모터 단계적 최적화

3장에서 개선 모델의 설계 결과, 토크 최대화와 부하 별 토크 리플 최소화, 유기전압 크기 최소화가 요구되었다. 토크 최대화와 토크 리플, 유기전압 크기 최소화를 동시에 진행할 수도 있으나, 동시 진행의 경우 설계 변수가 증가에 따라 실험점 개수가 과도하게 많아질 수 있다. 동시 최적화의 경우

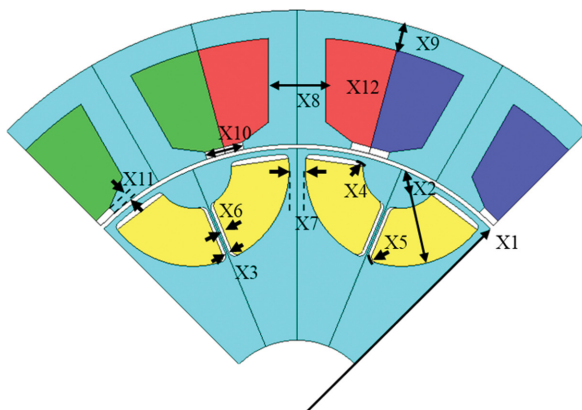
필요한 설계 변수의 개수는 22개이며, 토크 최대화를 진행 후 토크 리플 최소화를 단계적으로 진행할 경우, 각각 설계 변수는 12개, 11개 수준이다. 설계 변수에 따른 최적화 시 필요한 샘플의 수는 식(2)로 나타낼 수 있다[4].

$$N_s = \frac{(N_d + 1)(N_d + 2)}{2} \quad (2)$$

여기서  $N_d$ 는 설계 변수의 개수이다. 따라서 동시 진행의 최적화 시 필요한 샘플의 수는 276개이고, 단계적 최적화를 진행할 시에는 샘플의 수는 각각 78개, 91개이며 합은 169개이다. 단계적 최적화를 진행 시, 동시 진행의 최적화보다 적은 샘플의 수로 최적화를 진행할 수 있기 때문에 본 논문에서는 단계적 최적화를 진행하였다. 단계적 최적화 진행 시, 1차 최적화로 토크 최대화를 진행하였다. Fig. 11은 1차 최적화 설계 변수 형상과 범위를 나타낸다. 식(3)은 1차 최적화 시 목적 함수와 제한 조건을 나타낸다.

$$\begin{cases} \text{Maximize Torque} \\ \text{subject to } T_{\max \text{ speed}} \geq 20.5 \text{ Nu} \ \& \ J_{\max} \leq 10 \text{ A}_{\text{rms}}/\text{mm}^2 \\ \sigma_{\max} \leq 320 \text{ MPa} \ \& \ \text{Demag ratio} = 0\% \end{cases} \quad (3)$$

1차 최적화 결과 전류 밀도 10 A<sub>rms</sub>/mm<sup>2</sup> 이내 조건에서 최대 토크를 만족시킬 수 없어서 최대 토크를 만족하기 위해 적층 길이를 기존 대비 1.46배 증가하였다. Fig. 12은 1차 최적화 결과 형상과 특성 해석 결과이다. Fig. 12와 Fig. 13에서 볼 수 있듯이, 1차 최적 모델은 전 영역에서 출력 만족, 기계적 안정성 확보, 불가역 감자가 발생하지 않았으나, 부하시 토크 리플이 매우 크다. 따라서 토크 리플 저감을 위한 2차 최적화를 진행하였다. 2차 최적화 진행 시에는 퍼스널 모빌리티용 초소형 전기차를 모델링을 통한 주운전점을 결정하였다[4]. 목표 주행 사이클은 New York City Cycle(NYCC)



설계 변수	항목	Unit	Min	Max
X1	Rotor Outer radius	mm	47	52
X2	Core ratio	-	0.2	0.5
X3	Core bridge thickness	mm	0.5	1.2
X4	PM fillet upper radius	mm	0.5	1.5
X5	PM fillet lower radius	mm	0.5	1.5
X6	PM offset	mm	0.5	1
X7	PM distance	mm	0.5	1.5
X8	Tooth width	mm	8	12
X9	Yoke width	mm	4	8
X10	Slot opening width	mm	4	9
X11	Tooth tip thickness	mm	1	2
X12	Turns per slot	-	12	28

Fig. 11. (Color online) 1차 최적화 설계 변수 및 범위.



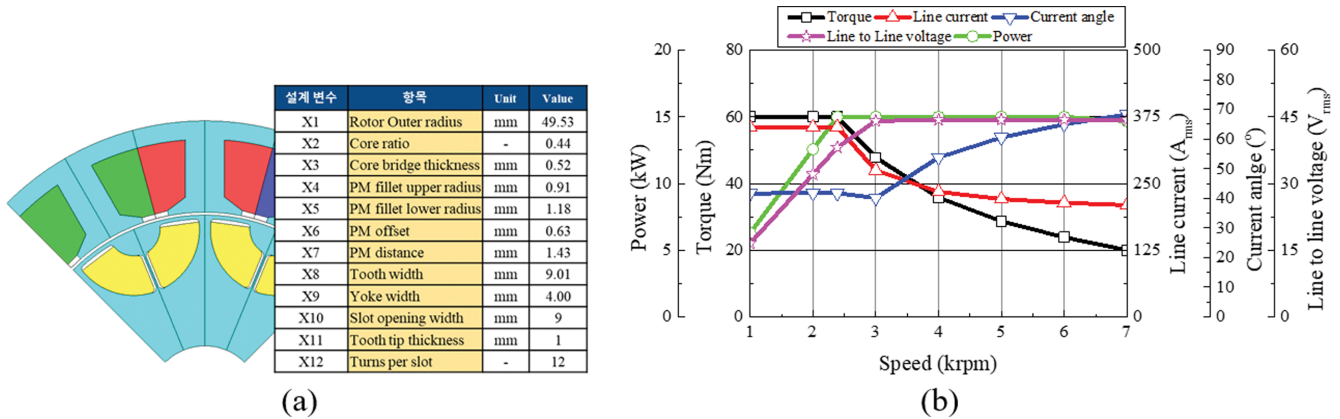


Fig. 12. (Color online) 1차 최적화 형상 및 특성 해석 결과 (a) 1차 최적화 형상 (b) 특성 해석 결과.

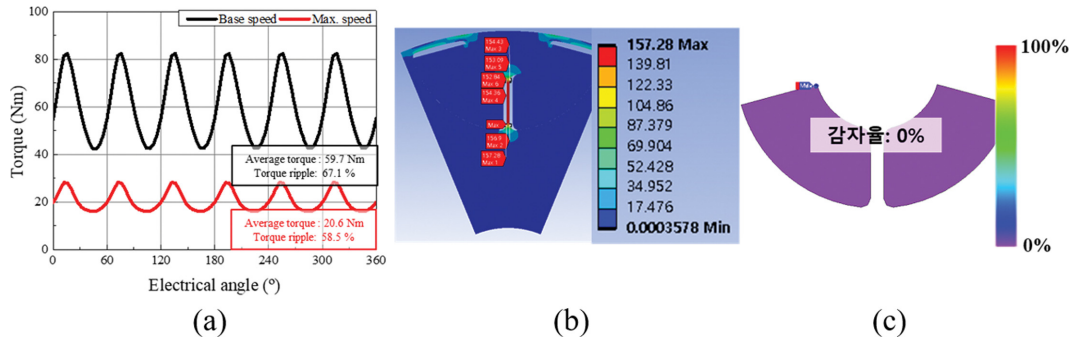


Fig. 13. (Color online) 1차 최적화 전기적, 기계적 특성 (a) 토크 파형 (b) 구조 해석 결과 (c) 감자 해석 결과.

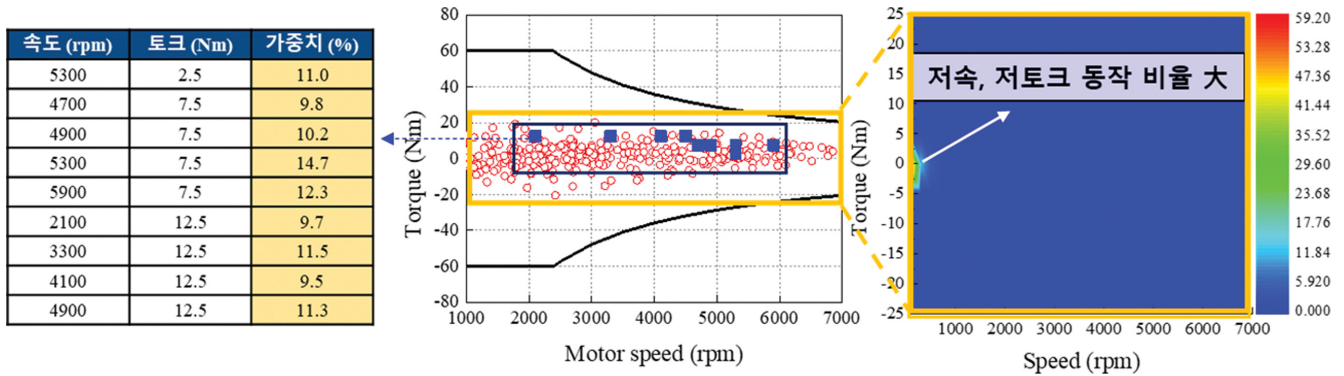


Fig. 14. (Color online) 효율 관점 주운전점 포인트와 운전영역 별 빈도수.

을 타겟으로 하였다. 주운전점은 효율 관점에서 에너지 소비를 3.5% 이상을 갖는 주운전점과 빈도수 관점에서 최대 동작 빈도 영역을 고려하였다. Fig. 14는 효율 관점의 주운전점과 빈도수 관점의 운전영역 별 빈도수를 나타낸다. 이에 따라 효율 관점의 주운전점은 총 9개의 주운전점을 채택하였고, 주운전점 관점에서는 주로 저속, 저토크 영역에서 동작 빈도가 가장 높아 코깅 토크 저감을 추가 목표로 하였다. Fig. 15는 2차 최적화 설계 변수 형상과 범위를 나타낸다. 식(4)는 2차 최적화 시 목적 함수와 제한 조건을 나타낸다.

$$\begin{cases}
 \text{Minimize } T_{\text{ripple}} (\text{Base \& Max}) \& T_{\text{cogging}} \\
 \text{Maximize } \eta_{\text{energy}} (\text{main operating point}) \\
 \text{subject to } T_{\text{base speed}} \geq 60 \text{ Nm} \& T_{\text{max speed}} \geq 20.5 \text{ Nm} \\
 V_{\text{Line-line}} \leq 80 \text{ V}_{\text{peak}}
 \end{cases} \quad (4)$$

여기서  $T_{\text{ripple}}$ 은 토크 리플을 의미하고,  $T_{\text{cogging}}$ 은 코깅 토크,  $\eta_{\text{energy}}$  주운전점 효율 값에 대한 가중치를 반영한 값이다. 2차 최적화 결과를 바탕으로 전류 밀도  $10 \text{ A}_{\text{rms}}/\text{mm}^2$  이내 조건에서 최대 토크를 만족하기 위해 적층 길이를 1배 기준에



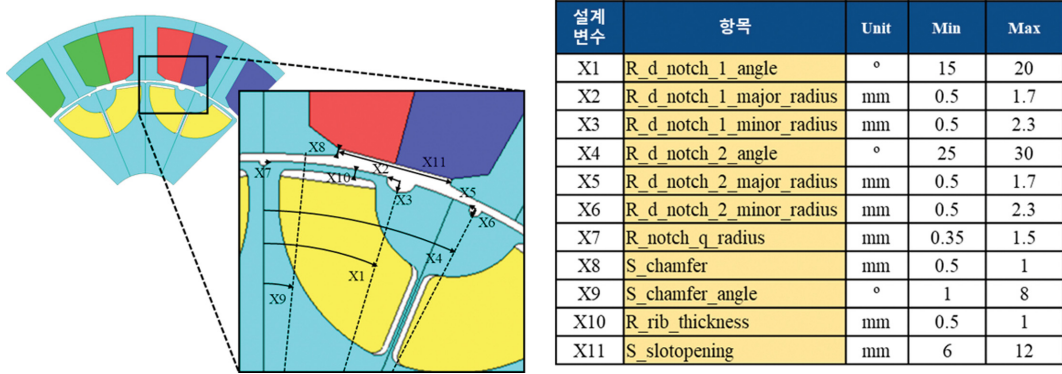


Fig. 15. (Color online) 2차 최적화 설계 변수 및 범위.

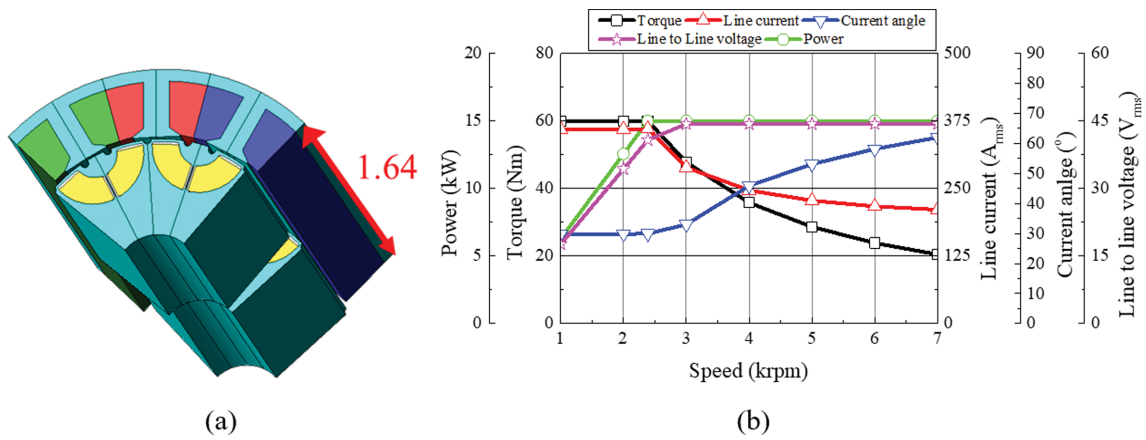


Fig. 16. (Color online) 최종 모델 결과 및 특성 해석 (a) 최종 모델 형상 (b) 특성 해석 결과.

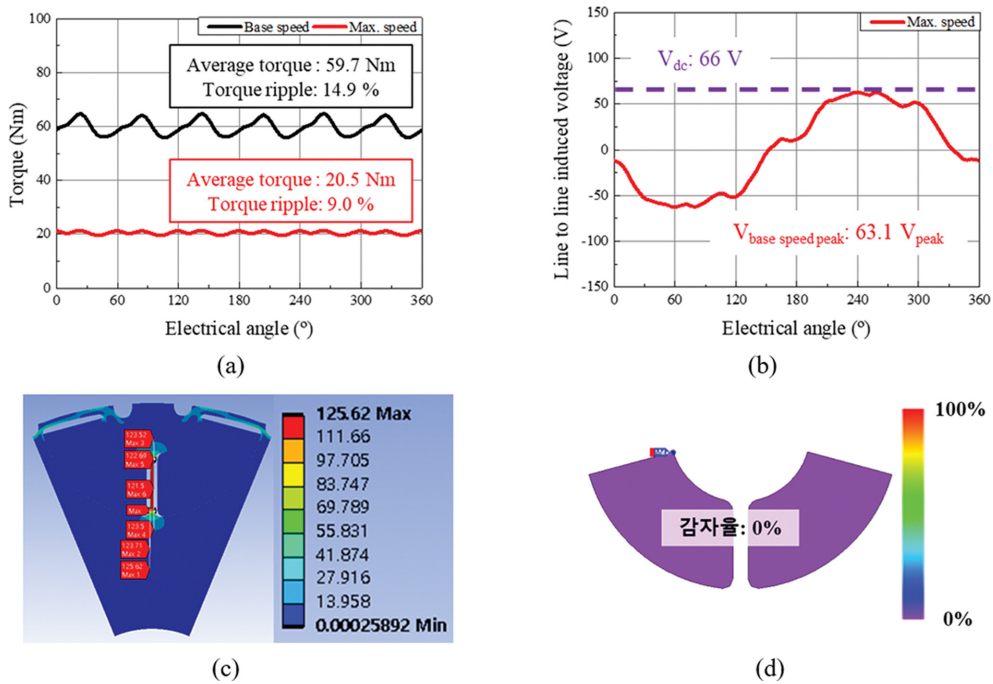


Fig. 17. (Color online) 최종 모델 전기적, 기계적 특성 (a) 토크 파형 (b) 유기 전압 파형 (c) 구조 해석 결과 (d) 영구자석 불가역 감자 해석 결과.

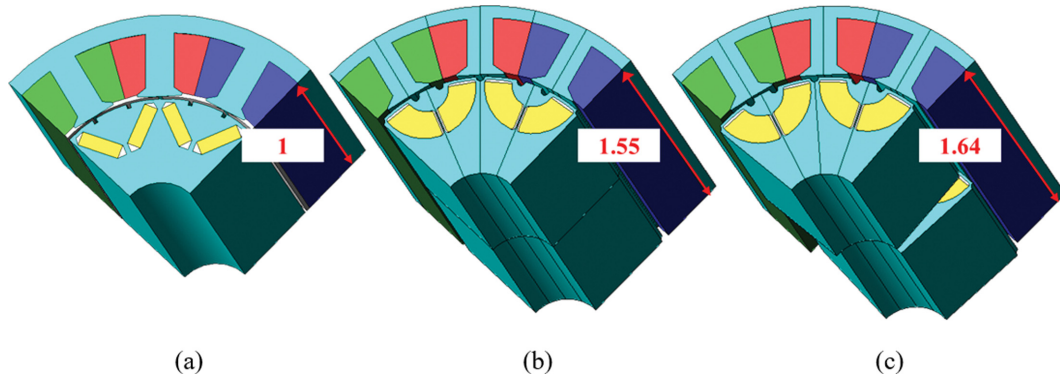


Fig. 18. (Color online) 기존 Nd PM 모델과 Ferrite PM 최적 모델 형상 비교 (a) 기존 Nd PM 모델 (b) 2차 최적화 모델 (c) 최종 모델.

Table II. 모델 별 모터 특성 비교

항목	단위	기존 Nd	2차 최적화	최종 모델	비고
모터 특성	최대 효율	%	96.56	98.1	97.9
	주운전점 에너지효율	%	92.3	97.3	97.1
	최대 전류 밀도	$A_{rms}/mm^2$	10	10	10
	코깅 토크	Nm	3.9	1.35	0.77
	토크 리플	%	6.2/16.7	26.1/15.4	14.9/9.0
	선간 유기전압 최대값	$V_{peak}$	71.4	63.2	63.1
					Base/Max Max speed

서 1.55배로 증가하였다. 각 기저 속도와 최대 속도에서 목표 부하의 토크 리플은 26.2%, 15.4%이고, 코깅 토크는 1.35 Nm이다. 추가적인 토크 리플 감소 및 코깅 토크 감소를 위해 회전자에 2단 스큐를 적용하고, 스텝 간 스큐각은 코깅 토크에 기본파를 저장할 수 있는 7.5도를 적용하였다. 스큐를 추가로 적용함에 따른 기본파 감소는 적층 길이를 1배 기준에서 1.64배로 증대시켜 보완하였다. Fig. 16은 최종 모델인 스큐가 반영된 2차 최적 모델의 설계 형상과 특성 해석 결과를 보여준다. Fig. 17은 최종 모델에 대한 Base, Max speed point에 대한 부하 해석과 구조 및 영구자석 불가역 감자 해석 결과를 보여준다. Fig. 17에서 알 수 있듯이, 최종 모델은 전 영역 출력을 만족하며, 기계적 안정성 확보, 불가역 감자 내성, 낮은 수준의 토크 리플과 최대 부하에서의 유기 전압 제한 값을 만족한다. Fig. 18은 기존 Nd PM을 사용한 모델과 Ferrite PM을 사용한 2차 최적 모델들의 형상을 보여주고, Table II에는 각 모델 별 모터 특성을 나타내었다.

## V. 결 론

본 논문에서는 퍼스널 모빌리티 구동용 영구자석 동기모터로 Nd PM 재질을 사용하여 만들어진 모터를 Ferrite PM으로 대체하여 설계하였다. 기존 모델을 Ferrite PM으로 대체하였을 때의 출력 불만족 원인을 분석하였으며, 개선 방안을 제시하였다. 개선 방안을 토대로 회전자 형상을 중심으로 재설

계를 진행하였다. 최적 설계를 단계적으로 나누어 목적에 맞는 설계 변수를 선정하여 실험점 개수를 줄였으며, 퍼스널 모빌리티용 주운전점을 반영하여 최적 설계를 진행하였다. 설계 결과를 토대로 Nd PM 대비 낮은 잔류 자속 밀도를 갖는 Ferrite PM을 사용하였을 때, 모터의 사이즈 증가에 대한 합리적인 값을 제시하였다.

## 감사의 글

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0017120, 2023년 산업혁신인재성장지원사업).

## References

- [1] Y. H. Jung, M. R. Park, K. O. Kim, J. W. Chin, and M. S. Lim, IEEE Trans. Ind. Appl. **57**, 327 (2021).
- [2] M. R. Park, J. W. Jung, D. Y. Kim, J. P. Hong, and M. S. Lim, IEEE Trans Ind. Appl. **55**, 1351 (2019).
- [3] M. S. Lim and J. P. Hong, IEEE Trans. Energy Convers. **33**, 1978 (2018).
- [4] S. Y. Im, K. Y. Cha, Y. J. Won, Y. Y. Choi, and M. S. Lim, IEEE Trans. Ind Appl. Doi: 10.1109/TIA.2023.3303860.
- [5] K. O. Kim, Y. H. Jung, J. C. Park, and M. S. Lim, IEEE Trans. Magn. **59** (2023).