

A Study on the Design of a Five-Step Divided Magnetization Yoke with Auxiliary Poles for Post-Assembly Magnetizing

Seung-Heon Lee

Department of Next Generation Energy System Convergence, Gachon University, Seongnam 13120, South Korea

Myung-Chin Kim

School of Electrical Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 28644, South Korea

Kwang-Soo Kim*

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

(Received 18 November 2025, Received in final form 22 December 2025, Accepted 22 December 2025)

Due to the high cost and unstable supply chain of rare-earth magnets, interest in ferrite-based motors has been increasing. Although ferrite magnets offer significant economic advantages, their low remanence and coercivity lead to performance degradation. To compensate for these drawbacks, spoke-type flux-concentrating structures are employed to enhance the air-gap flux density. However, assembling pre-magnetized magnets in spoke-type motors is challenging and reduces manufacturability. Therefore, post-assembly magnetization is required to improve production efficiency. In flux-concentrating rotor structures, the magnets are deeply embedded inside the rotor, making it difficult to achieve the target magnetization level after assembly. This study proposes an optimized magnetizing yoke structure with auxiliary poles that enables five-division post-assembly magnetization, fully suppresses irreversible demagnetization of non-target magnets, and achieves a magnetization rate exceeding 99%. Finite element analysis (FEA) of a 10-pole ferrite rotor confirms that the proposed structure provides excellent post-assembly magnetization performance while effectively minimizing irreversible demagnetization.

Keywords : ferrite permanent magnet motor, divided post-assembly magnetization, magnetizing yoke, auxiliary pole

보극을 적용한 조립 후 5회 분할 착자요크 설계 연구

이승헌

가천대학교 차세대스마트에너지시스템융합학과, 경기도 성남시 수정구 성남대로 1342, 13120

김명진

충북대학교 전기공학부, 충청북도 청주시 서원구 충대로 1, 28644

김광수*

국립경북대학교 전기전자교육과, 경상북도 안동시 경동로 1375, 36729

(2025년 11월 18일 받음, 2025년 12월 22일 최종수정본 받음, 2025년 12월 22일 게재확정)

높은 비용과 공급망의 불안정성으로 인해 페라이트 기반 전동기에 대한 관심이 증가하고 있다. 페라이트 자석은 경제적 장점이 크지만, 낮은 잔류자속밀도와 보자력으로 인해 성능 저하가 발생한다. 이를 보완하기 위해 공극 자속밀도를 향상시키는 스포크형 자속집중 구조가 적용된다. 그러나 스포크형 전동기에서 착자된 자석을 조립하는 것은 공정이 복잡하고 양산성이 떨어지는 문제가 있다. 따라서 생산성을 확보하기 위해 조립 후 착자(post-assembly magnetization)를 고려할 필요가 있다. 하지만 자속집중형 구조에서는 영구자석이 회전자 내부 깊숙이 삽입되어 있어 조립 후 착자 시 목표 착자율을 달성하기가 쉽지 않다. 본 연구에

서는 조립 후 5회 분할 착자를 적용하면서 미타겟 자석의 불가역 감자 현상을 완전 저감하고 99% 이상의 착자율을 확보할 수 있는 보극 기반 최적 착자요크 구조를 제안한다. 10극 페라이트 회전자를 대상으로 한 유한요소해석(FEA) 결과, 제안된 구조는 우수한 조립 후 착자 성능과 불가역 감자 저감 효과를 동시에 확인하였다.

주제어 : 페라이트 영구자석 전동기, 조립 후 분할 착자, 착자요크, 보극

I. 서 론

전동기는 현대 산업 전반에서 필수적인 동력원으로 기능하며, 산업체 전력 소비의 상당 비중을 차지한다. 이에 따라 전동기의 효율 향상은 국가적 에너지 절감과 탄소배출 저감 측면에서 매우 중요한 과제로 인식되고 있다. 각국에서는 고효율 전동기 사용을 법제화하거나 규제 수준을 지속적으로 강화하고 있어, 고효율 구동을 위한 핵심 요소 기술에 대한 요구가 점차 높아지고 있다[1,2]. 현재 고효율 전동기 설계에는 Nd, Sm 기반의 희토류 영구자석이 널리 활용되고 있으며, 이들 자석은 큰 에너지적 장점을 제공한다. 그러나 희토류 자원의 공급 위험성, 높은 가격 변동성, 원재료 의존도 문제는 산업계 전반에서 구조적 제약으로 작용하고 있다. 이러한 이유로 희토류 사용량을 줄이거나 대체할 수 있는 새로운 전동기 구조 및 자석 소재에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[3]. 그중에서도 비교적 저렴하고 대량 생산에 용이한 페라이트 영구자석은 경제성 측면에서 매력적이지만, 낮은 자기적 특성 때문에 단독으로는 고출력 특성을 확보하기 어렵다. 이를 보완하기 위한 대표적인 접근이 스포크형 자속집중(spoke-type flux-concentrating) 구조이며, 자석을 회전자 내부에 방사방향으로 배치하여 공극 자속을 집중시키는 방식이 널리 적용되고 있다[4,5]. 이러한 구조는 페라이트 자석의 한계를 극복하고 토크

및 출력 특성을 향상시키는 데 효과적이라는 연구가 다수 보고되고 있다[6,7]. 하지만 스포크형 회전자에서는 자석이 내부 깊숙한 위치에 삽입되기 때문에 조립 후 착자(post-assembly magnetization) 공정에서 충분한 자화도를 확보하기 어렵다는 문제가 존재한다[8-10]. 또한 착자 공정의 반복 횟수는 생산성, 착자장비 수명, 제조 단가와 직결되므로, 분할 착자 방식의 최적화는 실용화 관점에서 매우 중요한 기술 요소라 할 수 있다[11-13]. 이에 본 연구에서는 10극 페라이트 스포크형 회전자를 대상으로 조립 후 착자 효율을 향상시키기 위한 착자요크 구조를 체계적으로 분석하였다. 특히 분할 착자 과정에서 비의도성 자석의 불가역 감자(irreversible demagnetization)를 완전 억제하고, 타겟 자석이 99% 이상의 착자율을 달성할 수 있는 보극 기반 착자요크 형상을 제안한다. 목표 착자율을 99%로 설정한 이유는 영구자석의 잔류자속밀도가 완전 착자 상태 대비 소폭의 미착자 구간이 존재할 경우에도 공극 자속 밀도, 역기전력 및 토크 특성에 비선형적인 영향을 미치기 때문이다. 이에 본 연구에서는 설계적 마진을 충분히 고려하여 목표 착자율을 99%로 설정함으로써 안정적인 자기적 특성을 확보하고, 설계 성능 대비 오차를 최소화하고자 하였다. 본 논문에서는 전원 및 커패시터 용량 조건을 반영한 유한요소 해석(FEA)을 수행하여 제안 구조의 타당성을 검증하고, 조립 후 착자 공정의 실용적 가능성을 확인하고자 한다.

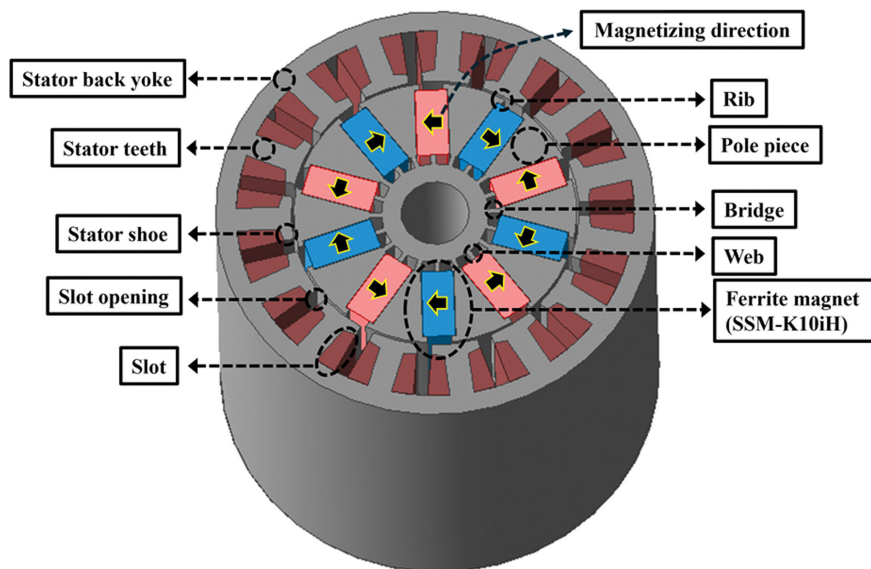


Fig. 1. (Color online) Design of 10 pole 15 slot spoke-type permanent magnet motor.

Table I. Spoke-type permanent magnet motor specifications.

	Content	Value	Unit
Material	Stator / Rotor	50PN470	-
	Coil	Copper	-
	Magnet	Ferrite (SSM-K10iH)	-
	Shaft	SUS303	-
Size	Outer / Inner diameter of stator	90 / 59	mm
	Outer / Inner diameter of rotor	58 / 14	mm
	Stack length	90	mm
Specification	Pole / Slot	10 / 15	-
	Rated speed	3,600	rpm
	No-load back EMF	165.4	V _{rms}
	Torque	2.1	N·m
	Efficiency	91.9	%

II. 스포크형 영구자석 전동기

Fig. 1은 조립 후 착자 해석에 적용되는 스포크형 영구자석 전동기의 3D 형상을 나타낸다. 해당 전동기는 10극 15슬롯 구성을 기반으로 하며, 페라이트 자석을 회전자 내부에 방사 방향으로 배치한 자속집중 구조를 통해 공극 자속밀도를 높인 것이 특징이다. 전동기의 주요 사양 및 재질은 Table I에 정리되어 있으며, 정격 속도 3,600 rpm 조건에서 165.4 V_{rms}의 상역기전력과 2.1 N·m의 정격 토크를 발휘하며, 전체 효율은 91.9%에 이른다.

III. 영구자석의 착자 및 이론

1. 영구자석 착자 원리

착자는 자성체 내부에 무질서하게 흩어져 있는 자기 모멘트(magnetic moment)를 특정 방향으로 배열되도록 만드는 과정이다. 외부에서 강한 자계(magnetic field)가 가해지면, 자성체 내부의 자기 모멘트가 그 자계의 방향에 맞추어 점차 정렬되며, 이러한 정렬 현상을 일반적으로 착자라고 정의한다[9,10]. 영구자석의 경우 결정립이 특정 방향성을 갖지 않고 무작위로 배열된 자석을 등방성 자석(isotropic magnet)이라 부른다. 이 자석은 특정 배향(orientation) 방향이 존재하지 않기 때문에 어느 방향으로 착자를 수행하더라도 비슷한 수준의 자속을 얻을 수 있다는 특징이 있다. 반면, 이방성 자석(anisotropic magnet)은 제조 시 결정 입자를 특정 방향으로 정렬시키는 공정을 거쳐 만들어진다. 이러한 자석은 배향 방향에 맞추어 착자를 수행할 때 가장 강한 자속을 얻을 수 있으며, 배향과 다른 방향에서는 착자 효율이 현저히 떨어지는 특성을 갖는다[13]. 본 연구에서는 이방성 자석을 대상으로 하여, 자석의 배향 방향과 일치하도록 자화 방향을 설정하고 착자 과정을 수행하였다.

영구자석의 자화(magnetization)와 자속 밀도(flux density)는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 J &= \mu_0 \chi_m H [T] \\
 B &= \mu H = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 (1 + \chi) H [T] \\
 &= \mu_0 H + J [T]
 \end{aligned} \quad (1)$$

식(1)에서 J 은 자화, μ_0 는 진공의 투자율(vacuum permeability)을 의미하며, χ 는 자화율(magnetic susceptibility), H 는 자계(magnetic field)를 나타낸다. 이 식은 외부 자계가 인가될 때 비로소 미착자 상태의 영구자석 내부에 자속이 생성된다는 사실을 보여준다[10]. Fig. 2는 외부 자계를 인가했을 때 미착자 영구자석에서 초기 자화곡선(initial magnetization curve)이 형성되는 과정을 개략적으로 설명한다. 우선, $H = 0$ 인 경우 자석 내부의 자기 모멘트는 무작위 방향으로 배열되어 여러 자구(domain)를 이루고 있다. 이후 외부 자계 H 가 증가하면, 내부의 자기 모멘트들이 점차 동일한 방향으로 회전하며 정렬되고, 그 결과 자속 밀도 B 가 서서히 증가한다. H 의 크기가 충분히 커져 더 이상 B 가 증가하지 않는 영역에 도달하면 자속이 포화(saturation)에 이르렀다고 판단한다. 이 시점에서는 내부 자기 모멘트가 대부분 외부 자계 방향으로 정렬된 상태이며, 이를 영구자석이 완전히 착자된 상태로 정의한다.

2. 영구자석 착자 이론

본 연구에서는 회전자 조립이 모두 완료된 상태에서 수행되는 조립 후 착자 방식을 적용하여 해석을 진행하였다. 착자 해석을 수행하기 위해서는 먼저 착자기에 사용되는 전원 사양과 권선 구성 조건을 설정해야 한다. 일반적으로 조립 후 착자 공정에서는 콘덴서 방전형(capacitor discharge type) 전압원을 기반으로 한 착자 시스템이 사용되며, 이러한 착자 회로의 전기적 거동은 다음 식으로 표현된다[11].

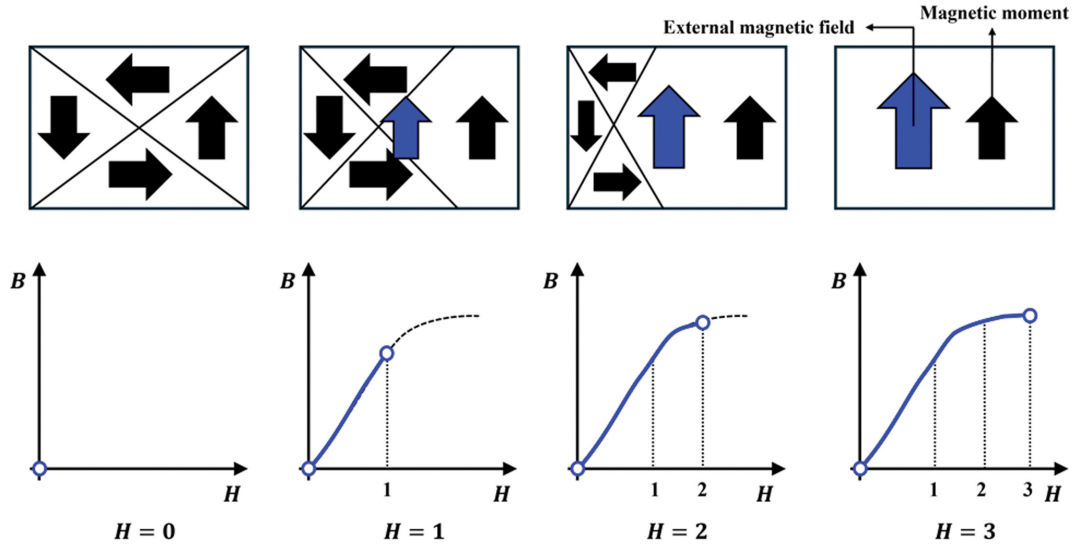


Fig. 2. (Color online) Illustration of domain magnetization progression under increasing external magnetic field.

$$i_{peak} = \frac{V_c}{\omega L_c} \cdot e^{\left(-\frac{t}{\tau}\right)} \cdot \frac{\omega \tau}{\sqrt{1 + (\omega \tau)^2}} [A] \quad (2)$$

$$\tau = \frac{2L_c}{R_c}, \omega = \sqrt{\frac{1}{L_c C} - \frac{1}{\tau^2}} \quad (3)$$

$$i_{peak} = U_c \cdot \sqrt{\frac{C}{L_c}} [A] \quad (4)$$

여기서 i_{peak} 은 착자의 최대 피크 전류, ω 는 전기적 각속도, L_c 는 착자 코일의 인덕턴스, R_c 는 착자 코일의 저항, C 는 커패시터의 초기 충전 전압을 각각 의미한다. 또한 τ 는 회로의 시정수(time constant), U_c 는 커패시터 양단의 부하전압(인가 전압)을 나타낸다. 식(2)에 식(3)를 대입하면 식(4)과 같이 착자 전원에서 인가된 전압에 의해 형성되는 최대 피크 전류

를 산출할 수 있으며, 이 전류는 커패시터의 충전 전압 및 용량이 증가할수록 커지고, 반대로 착자 코일의 인덕턴스가 클수록 감소함을 확인할 수 있다. 이러한 관계를 바탕으로 착자요크 및 회전자에 요구되는 착자 최대 피크 전류를 도출하였다. 영구자석을 완전히 자화하고 자속을 안정적으로 유지하기 위해서는 순간적으로 큰 외부 자계를 형성할 수 있는 착자 장치가 필요하다. 이러한 목적을 위해 주로 콘덴서 방전 방식(capacitor-discharge type)의 펄스 착자기(pulse magnetizer)가 사용된다[11]. 착자기의 핵심 파라미터는 착자 전압(magnetizing voltage)과 커패시터 용량(capacitance)이며, 본 연구에서는 착자 전압 3,500 V, 커패시터 용량 3,000 μF 를 적용하였다. 이후 설정된 전압을 통해 생성된 최대 피크 착자 전류(peak magnetizing current)를 착자 코일에 인가하여 착자 해석을 수행하였다.

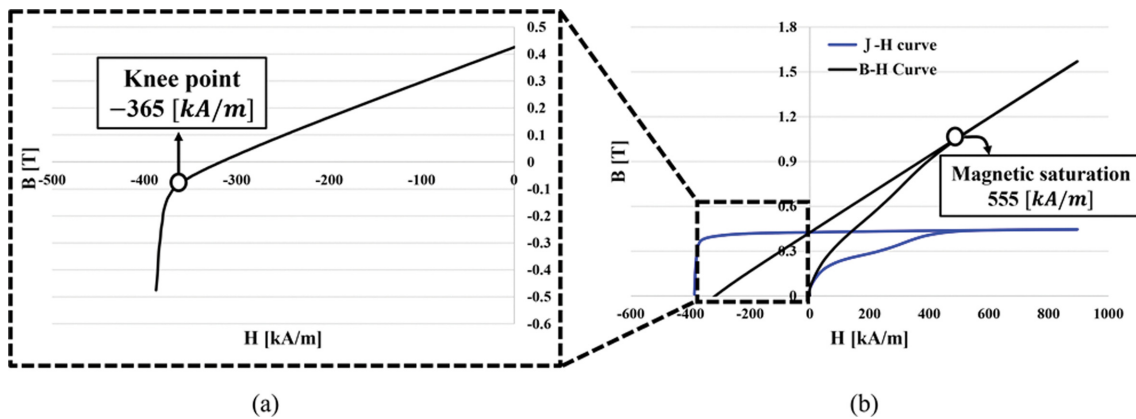


Fig. 3. (Color online) Magnetic material characteristics for magnetization analysis (a) second and third quadrant B-H curve, (b) initial magnetization B-H and M-H curve.

IV. 조립 후 착자요크 설계

1. 페라이트 자석 재질 데이터

착자 해석을 수행하기 위해서는 페라이트 자석의 초기 자화 특성이 필요하다. Fig. 3은 본 연구에서 사용된 페라이트 자석(SSM-K10iH)의 BH 특성곡선을 제시한 것이다. Fig. 3(b)에 나타난 BH 및 MH 초기 자화곡선에서 BH 곡선의 기울기는 자성체의 투자율을 의미하며, 공극 투자율을 기준으로 계산한 상대 투자율이 약 1.05(자계 555 kA/m 근방)에 도달하면 영구자석 내부의 자기 모멘트가 모두 정렬된 것으로 판단하여 착자가 완료된 것으로 본다. 한편, Fig. 3(a)에는 분할 착자 과정에서 비의도성 자석(미타겟 자석)의 거동을 평가하기 위해 적용된 제2-제3사분면 BH 곡선이 도시되어 있다. 페라이트 자석은 상온 조건에서 제3사분면에 뚜렷한 knee point가 존재하며, 역자계가 과도하게 인가되어 자석의 동작 점이 -365 kA/m 이하로 이동할 경우, 자속이 회복되지 않는 불가역 감자가 발생하게 된다.

2. 착자 요크 설계

Fig. 4는 10극 스포크형 회전자에 대해 조립 후 착자를 수행하기 위해 설계된 착자요크의 모델링 구조를 보여준다. 착자요크는 각 회전자 극 주변에 대칭적으로 배치되어, 착자 시 자계가 균일하게 분포하도록 구성하였다. 요크의 각 슬롯에는 전류가 인가되는 코일이 감겨 있으며, 이 코일을 통해 회전자 내부에 삽입된 페라이트 자석 방향으로 착자 자계를 형성하도록 설계하였다. Fig. 4에 도시된 것처럼 착자요크의 형상은 여러 설계 변수로 정의되는데, 공극 길이 A , 슈 폭 S_w , 슈 높이 S_h , 요크 치 높이 T_h , 코일 폭 C_w , 코일 높이 C_h

등이 대표적이다. 이러한 파라미터는 요크 내부 자속 경로와 포화 여부를 결정하는 중요한 요인이며, 설계 단계에서 신중한 고려가 요구된다[9]. 코일 권선을 위한 슬롯 치 높이 T_h 는 권선 외경과 절연 공간을 확보할 수 있도록 설정하고, 슈의 두께 S_h 와 폭 S_w 는 권선 지지가 가능하도록 최소 요구 강성을 반영해 설계하였다. 또한 슬롯 길이 S 는 슈와 회전자 사이의 간격을 유지해 구조적 안정성을 확보할 수 있도록 조정하였다. 착자요크의 재질은 높은 투자율을 갖는 소재를 사용하여 자속 누설(magnetic flux leakage)을 최소화하고, 포화가 발생하지 않도록 충분한 단면적을 확보하였다. 동시에 권선 공간을 확보하는 한편 요크 전체의 기하학적 대칭성을 유지하여 모든 극에서 동일한 자계 환경을 제공하도록 했다. 특히 착자 시 순간적으로 큰 전류가 흘러 권선 간 로렌츠 힘(Lorentz force)이 발생할 수 있으므로, 권선 구조는 1 Layer 방식으로 구성해 기계적 안정성을 확보하였다. 이와 같은 모델링 사양을 바탕으로, 이후 분할 착자 횟수에 따른 착자 해석이 수행되었다.

2. 조립 후 분할 착자 FEA 해석

Table II는 착자기에 사용된 재질 특성과 주요 사양을 나타내며, 장비의 수명을 고려하여 착자요크에 인가할 수 있는 최대 피크 전류를 약 14 kA로 제한하였다. Fig. 5는 10극 회전자를 대상으로 1회, 2회, 3회, 5회의 분할 착자를 적용하여 수행한 기초 착자요크 모델의 착자 및 감자 특성을 비교한 결과를 제시한다. 양산성 및 착자기 내구성을 고려하여 10회 분할 착자는 분석 대상에서 제외하였다. 모든 경우에 착자 코일 권선은 8턴으로 고정하고, 인가되는 피크 전류는 13,400 A로 동일하게 설정하여 총 기자력(NI)이 107,200 AT가 되도록

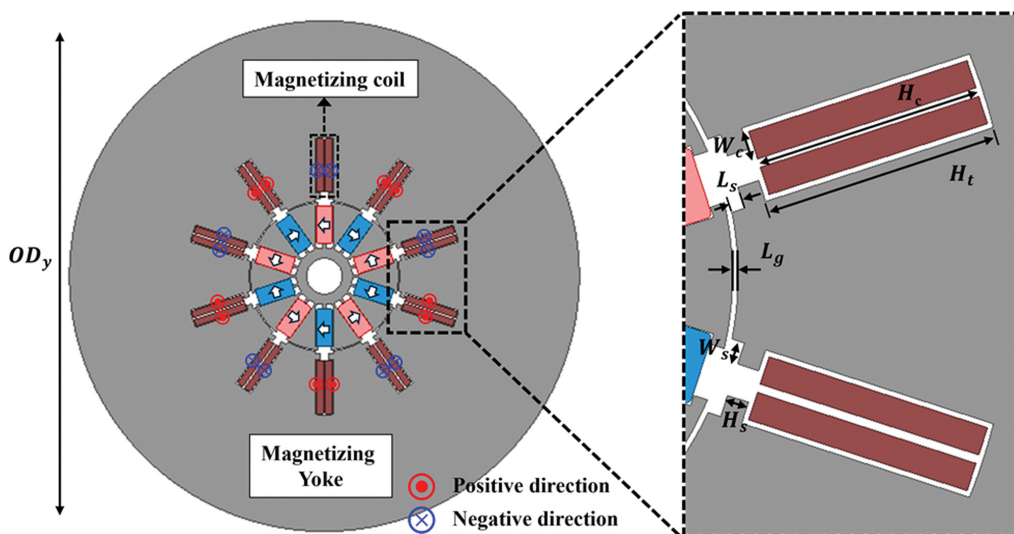


Fig. 4. (Color online) Geometric design parameters of the magnetizing yoke assembly.

Table II. Magnetization analysis specifications.

Content	Value	Unit
Magnetizing yoke core	50PN470	-
Maximum charging voltage	3500	V
Maximum condenser capacity	3000	μF
Outer Diameter of Winding (Bared / Double-Edge Chamfered)	$\varnothing 1.8 / \varnothing 2.6$	mm
Magnetizing field	555	kA/m
Demagnetization field	-365	kA/m
Maximum allowable peak current	14	kA

조건을 통일하였다. Fig. 5에서 좌측 플롯은 자속선도, 자속 밀도 분포, 자계 색상 분포를 나타내며, 색상 표시 기준은 다음과 같다: 가장 옅은 회색은 착자가 이루어진 영역, 중간 회색은 미착자 영역, 검정색은 불가역 감자가 발생한 영역이다. 해석에서는 이 색상 기준을 바탕으로 착자 및 감자 상태를 판단하였다. 해석 결과, Fig. 5(a), 5(b)의 1회 및 2회 분할 착자 조건에서는 목표 착자율에 도달하지 못하였다. 반면, Fig. 5(c), 5(d)에 제시된 3회 및 5회 분할 착자의 경우 타겟 자석의 착자율이 99% 이상으로 상승하여 매우 양호한 착자 특성을 확인할 수 있었다. 이는 착자요크 형상 변화에 따라 자속 경로가 짧아져 동일한 기자력 조건에서도 더 높은 자속

밀도를 생성할 수 있었기 때문이다. 다만, 모든 조건에서 영구자석의 중심 하단부까지 완전 착자가 이루어지지 않는 현상이 관찰되었다. 이는 자석이 회전자 내부 깊숙이 삽입되어 있으며, 코어 내부로 갈수록 단면적이 감소하여 포화가 심해지는 구조적 특성 때문으로 판단된다. 이로 인해 착자 자속이 자석 깊이는 내부까지 충분히 도달하지 못해 Fig. 5(a), (b)와 같은 비착자 영역이 나타난 것이다. 또한 분할 착자 과정에서 미타겟 자석(non-targeted magnet) 일부 영역에서 불가역 감자가 발생하는 것이 확인되었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 미타겟 자석의 감자 현상을 억제할 수 있는 보극(auxiliary pole) 개념을 착자요크 설계에 도입하였으며, 우수한 착자율을 보인 3회 분할 착자 조건을 중심으로 추가적인 분석을 수행하였다.

V. 조립 후 3회 분할 착자

1. 보극을 적용한 조립 후 3회 분할 착자 해석

Fig. 6은 3회 분할 착자를 기반으로 한 기존 착자요크 모델과, 보극(auxiliary pole)을 추가한 모델 간의 착자 특성을 비교한 결과이다. 보극(auxiliary pole)은 미타겟 자석으로 향하는 역자계를 억제하기 위해 자기저항이 작은 철심을 추가

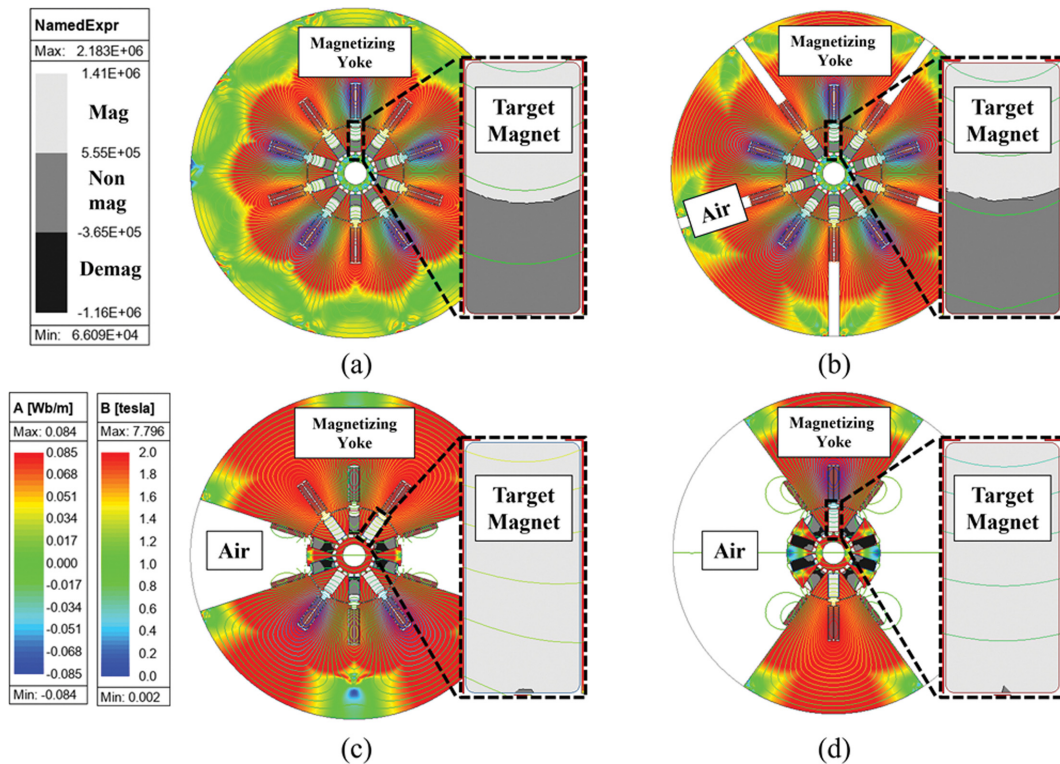


Fig. 5. (Color online) Magnetization field distribution according to the number of magnetizing steps (a) 1 time, (b) 2 time, (c) 3 time, (d) 5 time magnetization.

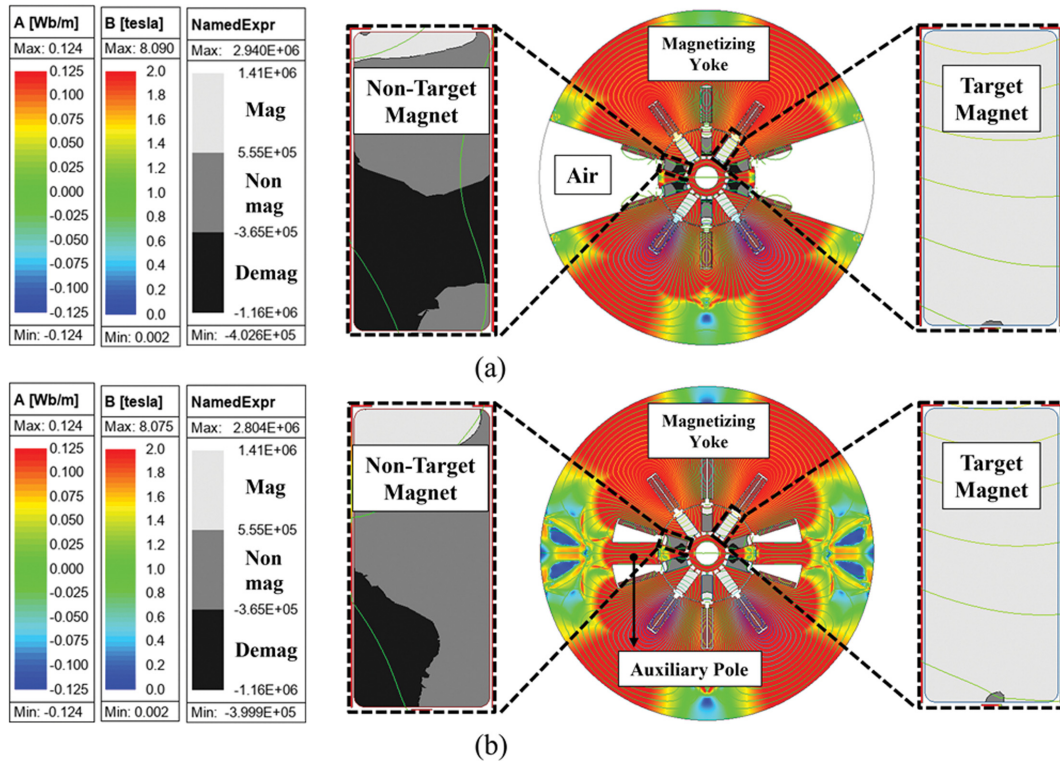


Fig. 6. (Color online) 3 time magnetization analysis result (a) conventional model, (b) model with auxiliary pole.

로 형성한 구조를 의미한다. 이 경우 자속은 상대적으로 자기저항이 작은 경로를 따라 흐르려는 특성으로 인해, 철심을 통한 자속 우회 경로가 형성된다. 그 결과 역자계 성분이 미타겟 자석으로 직접 인가되는 것이 완화되어, 미타겟 자석에 작용하는 유효 역자계가 감소하게 된다. 이에 따라 미타겟 자석의 불가역 감자는 효과적으로 저감된다. 반면, 보극 구조의 도입은 타겟 자석에 인가되는 자속의 일부를 우회시키는 효과를 동시에 유발하므로, 타겟 자석의 자화 효율이 저하될 수 있는 trade-off 관계를 형성한다. 따라서 역자계 억제와 타겟 자석의 착자 성능을 동시에 만족시키기 위해서는 적절한 착자 요크 설계가 필수적이다. Fig. 6(a)에서 확인할 수 있듯이, 기존 구조에서는 착자요크에서 생성된 자속의 일부가 인접한 미타겟 자석 방향으로 흘러지며, 이 과정에서 역자계가 발생하여 미타겟 자석 내부에 국부적인 불가역 감자 영역(검정색)이 형성된다. 반면, Fig. 6(b)의 보극 적용 모델은 착자요크 양측에 추가된 고투자율 철심이 새로운 자속 경로를 제공하여 자기저항이 낮은 방향으로 자속이 우회하도록 한다. 이로 인해 일부 자속이 타겟 자석으로 집중되지 못해 착자율은 소폭 감소하지만, 미타겟 자석 쪽으로 흘러가는 자속은 자석의 배향 방향과 일치하게 되어 역자계가 크게 줄어든다. 결과적으로 보극을 적용한 모델은 착자율이 약간 저하되는 대신 미타겟 자석에서의 불가역 감자 발생을 현저하게 억제하는

trade-off 특성을 보인다[11]. 따라서 조립 후 착자 공정에서는 타겟 자석의 착자율 확보와 미타겟 자석의 감자 방지 사이의 균형을 고려한 설계 전략이 필요하다.

2. 보극 권선을 적용한 조립 후 3회 분할 착자 해석

Fig. 7과 Table III은 보극 권선(auxiliary pole winding, APW)의 턴 수 변화에 따른 착자 특성을 비교한 결과를 나타낸다. 보극 권선은 미타겟 자석에서 발생하는 역자계를 줄이기 위해 추가된 구조로, 턴 수가 증가하면 기자력(MMF)도 함께 커지기 때문에 역자계를 보상하는 자속의 강도에도 직접적인 영향을 미치게 된다. 해석 결과, 보극 권선의 턴 수가 늘어날수록 미타겟 자석 내부에서 나타나는 불가역 감자 영역이 점차 축소되는 경향이 확인되었다. 이는 턴 수 증가로 보극에서 생성되는 기자력이 커지면서 역자계를 상쇄하는 보상 자속이 강화되기 때문으로 분석된다. 그러나 보극 권선이 7턴까지 증가한 경우, 미타겟 자석에서는 불가역 감자가 모두 제거되었음에도 불구하고 타겟 자석(target magnet)으로 유입되어야 할 자속의 일부가 분산되어 착자 자속의 세기가 약화되었고, 그 결과 착자율은 약 69.2%로써 목표 착자율(99% 이내)을 달성하지 못하는 문제가 발생하였다. 따라서 조립 후 3회 분할 착자 조건에서 적용된 착자요크 구조만으로는 착자율과 불가역 감자 억제 간의 상충 관계(trade-off)를 완전히

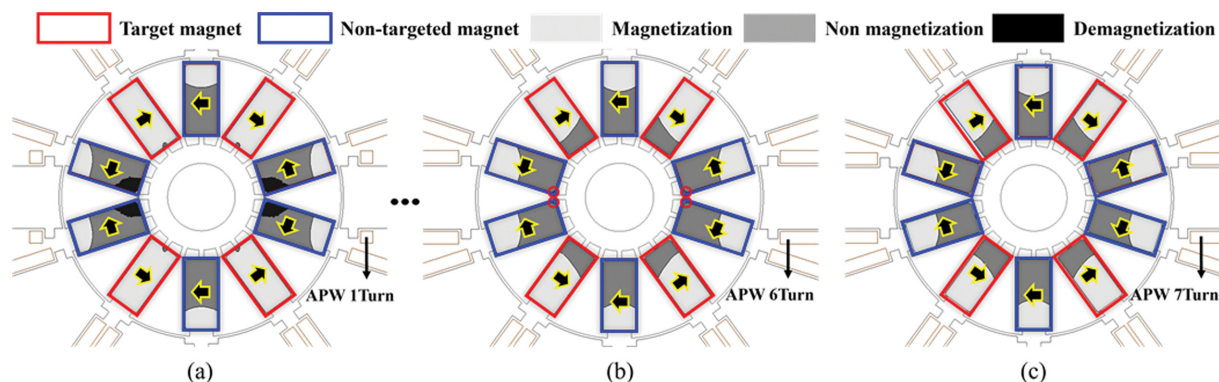


Fig. 7. (Color online) Influence of auxiliary pole winding (APW) turns on magnetization characteristics (a) 1 turn, (b) 6 turns, (c) 7 turns.

Table III. Results of magnetization analysis with applied auxiliary pole turns.

Content	1 Turn	6 Turn	7 Turn	Unit
Maximum applied peak current	14,300	128,00	12,500	A_{peak}
Post-assembly magnetization rate	99.5	71.5	69.2	%
Irreversible demagnetization rate	9.7	0.5	0	%

해소하기 어렵다는 결론에 도달하였다. 이에 본 연구에서는 5회 분할 착자(5-times magnetization) 방식을 도입하여, 타겟 자석의 착자율을 유지하면서 미타겟 자석의 불가역 감자를 효과적으로 제거할 수 있는 새로운 방안을 제안한다.

VI. 조립 후 5회 분할 착자

1. 보극을 적용한 조립 후 5회 분할 착자 해석

앞서 수행한 3회 분할 착자 요크 기반 해석에서는 타겟 자

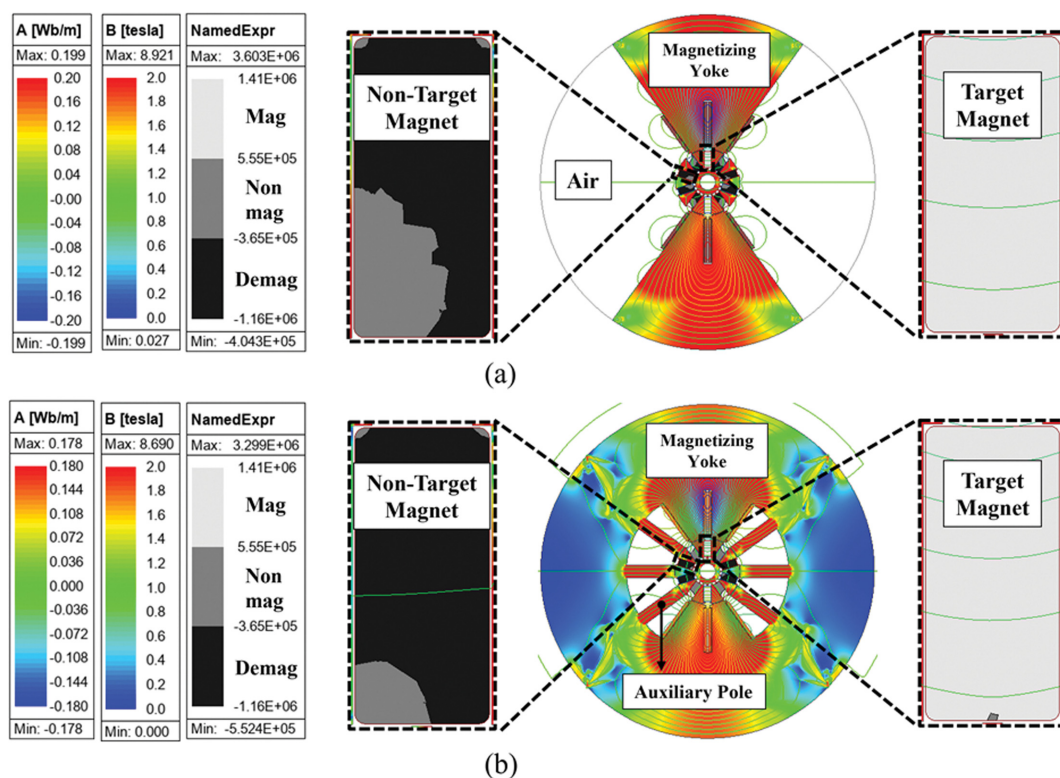


Fig. 8. (Color online) 5 time magnetization analysis result (a) conventional model, (b) model with auxiliary pole.

석의 착자율과 미타겟 자석의 불가역 감자 제거가 동시에 만족되지 않는 한계가 나타났다. 이러한 문제를 개선하기 위해, 본 연구에서는 보극을 포함한 새로운 5회 분할 착자 요크 구조를 제안하였다. Fig. 8은 (a) 기존 5회 분할 착자 모델과 (b) 보극을 반영한 착자요크의 형상을 비교하여 나타낸 것이다. 본 단계의 해석에서는 보극 권선(APW)을 적용하지 않은 상태에서 보극이 추가된 요크 형상이 갖는 구조적 효과만을 우선적으로 검토하였다. 모든 조건이 동일하도록 착자 코일의

턴 수는 15턴, 인가되는 피크 전류는 13,700 A로 일정하게 유지하였다. 그 결과, 두 모델 모두 타겟 자석에서는 목표 착자율을 달성하였으나, 미타겟 자석 내부에서는 불가역 감자 영역이 여전히 남아 있는 것으로 확인되었다. 이는 보극 요크 구조만으로는 역자계를 완전히 상쇄할 만큼의 보상 자속을 확보하기 어렵기 때문으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 8(b) 형태의 착자요크를 기반으로 보극 권선을 추가하여, 역자계를 보다 효과적으로 상쇄하고 보상 자속의 세기

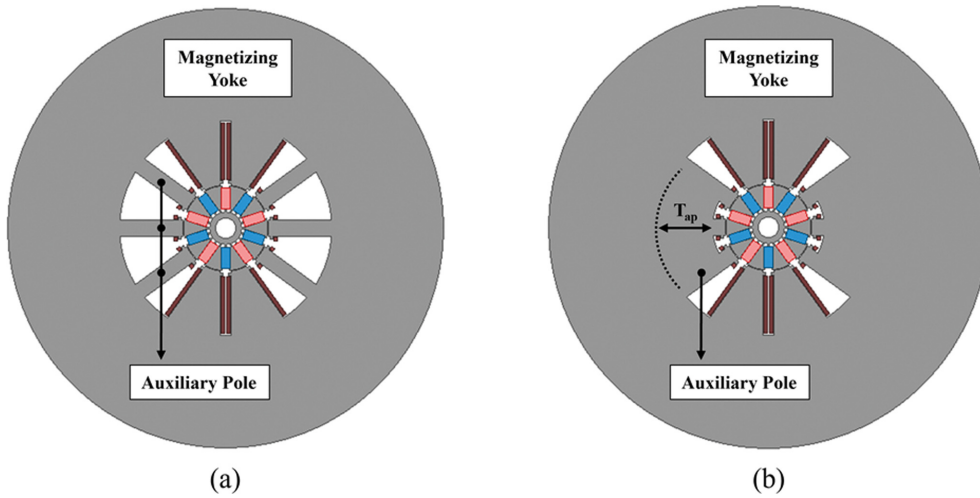


Fig. 9. (Color online) 5 time magnetizing yoke geometry (a) APW model, (b) proposed model.

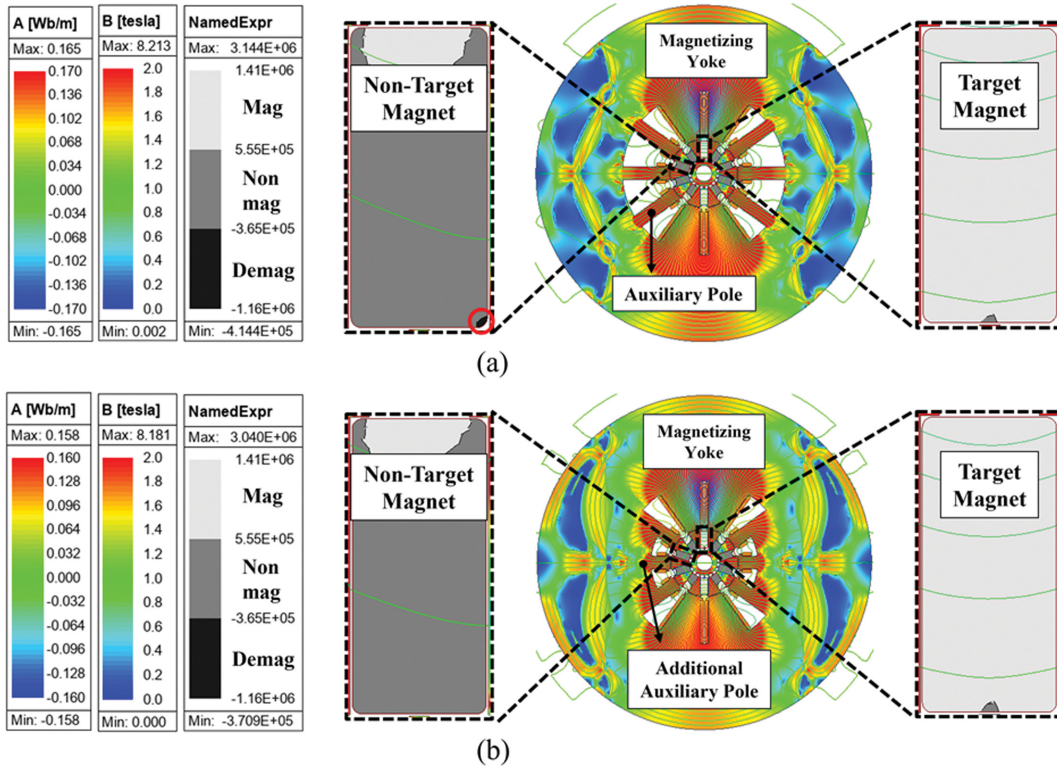


Fig. 10. (Color online) Post-assembly 5 time magnetization results with a 3 turns auxiliary pole winding (a) APW model, (b) proposed model.

를 강화하는 후속 착자 해석을 수행하였다.

2. 보극 권선을 적용한 조립 후 5회 분할 착자 요크 제안 모델

Fig. 9는 제안된 보극 턴수를 적용하여 구성된 조립 후 5회 분할 착자 요크의 형상을 나타낸 것이다. Fig. 9(a)는 기존 APM 모델로, 보극 철심을 착자 코일의 턴 길이와 동일한 치수로 형성한 구조를 보여준다. 반면 Fig. 9(b)에서는 보극 철심 두께 T_{ap} 를 추가하여, 역자계를 보상하기 위한 자속이 더욱 효율적으로 흐를 수 있는 경로와 단면적을 확보하도록 설계하였다. 이러한 보강 효과로 인해 미타겟 자석에서 발생하는 불가역 감자 현상을 억제할 수 있다. 다만, T_{ap} 가 과도하게 증가하면 타겟 자석으로 전달되어야 할 자속의 일부가 보극 방향으로 분산되어, 착자 자속의 강도가 약해지는 상충(trade-off) 문제가 발생한다. 따라서 보극 철심의 두께는 역자계 보상 효과와 타겟 자속 집중 효과 사이의 균형을 고려해 최적값을 선정하는 것이 중요하다.

타겟 자석에서 요구되는 착자율(99% 이상)을 확보함과 동시에 미타겟 자석에서 발생하는 불가역 감자를 완전히 억제하려면 보극 권선의 턴 수를 적절히 선택하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 보극 권선 1턴 및 2턴 조건에서는 미타겟 자석의 감자 억제 효과가 뚜렷하게 나타나지 않았으나, 3턴에서는 감자 감소 효과가 명확하게 확인되었다. 이에 따라 이후 해석에서는 보극 턴 수 3턴을 기준으로 Fig. 9에서 제시한 T_{ap} 의 영향을 평가하였다. Fig. 10은 보극 3턴 조건에서 수행한 착자 해석 결과를 나타낸다. Fig. 10(a)는 기존 5회 분할 착자 요크 구조에 보극 권선 3턴을 적용한 모델로, 타겟 자석은 목표 착자율을 충족하였으나 미타겟 자석 내부에는 불가역 감자 영역이 일부 남아 있는 것이 확인되었다. 이를 개선하고자 T_{ap} 를 적용한 구조(Fig. 10(b))를 제안하였다. 여기서 적용된 T_{ap} 는 타겟 자석의 착자율 저하와 미타겟 자석의 감자 억제 사이의 상충 관계(trade-off)를 고려하여, 미타겟 자석의 불가역 감자가 완전히 제거되는 두께인 24 mm로 설정하였다. 그 결과, Table IV에 정리한 바와 같이 타겟 자석은 99.6%의 착자율, 미타겟 자석은 불가역 감자율 0%를 달성하였다. 이를 통해 본 논문에서는 최적의 조립 후 5회 분할 착자 요크 형상을 제안한다.

Table IV. Results of final proposed model.

Content	3 Turn	Unit
Maximum applied peak current	12,700	A_{peak}
Post-assembly magnetization rate	99.6	%
Irreversible demagnetization rate	0	%

VII. 결 론

본 연구에서는 10극 스포크형 영구자석 동기전동기(spoke-type PMSM)를 대상으로 조립 후 착자(post-assembly magnetization)에 적합한 5회 분할 착자요크 구조를 설계하고 그 특성을 검토하였다. 먼저 착자 횟수에 따른 기본 착자요크 모델을 비교한 결과, 3회 및 5회 분할 방식에서 상대적으로 양호한 착자 성능을 확보할 수 있음을 확인하였다. 그러나 미타겟 자석에서 불가역 감자가 발생하는 문제가 여전히 존재하여 구조적 보완이 필요하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 역자계를 보상할 수 있도록 보극(auxiliary pole)과 보극 권선을 포함한 착자요크 구조를 제시하였으며, 보극 철심의 두께 변화가 착자 특성에 미치는 영향을 추가로 분석하였다. 유한요소해석(FEA)을 통해 확인한 결과, 보극과 보극 권선을 적용한 모델에서는 미타겟 자석 내부에서 발생하던 불가역 감자가 뚜렷하게 억제되는 것으로 나타났다. 그러나 3회 분할 착자 조건에서는 타겟 자석의 착자율과 미타겟 자석의 감자 억제 성능을 동시에 만족시키기 어려웠다. 이에 본 연구에서는 5회 분할 착자 구조를 기반으로 보극 형상과 권선 수를 최적화하였고, 그 결과 불가역 감자가 완전히 제거됨과 동시에 타겟 자석의 착자율이 99.6%에 도달하는 최종 설계를 도출할 수 있었다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 충청북도의 재원으로 충북RISE센터의 지원을받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다(2025-RISE-11-014-03).

References

- [1] F. J. T. E. Ferreira, G. Baoming, and A. T. de Almeida, Proc. IEEE/IAS Ind. & Commer. Power Syst. Tech. Conf. 1 (2015).
- [2] J.-W. Jung, D.-H. Jung, and J. Lee, IEEE Trans. Magn. **59**, 8200205 (2023).
- [3] C. Jeong, L. Cinti, and N. Bianchi, Energies **14**, 8058 (2021).
- [4] W. Cheng, G. Cao, Z. Deng, L. Xiao, and M. Li, IEEE Transactions on Magnetics. **58**, 1 (2022).
- [5] K.-Y. Yoon and S.-W. Baek, Appl. Sci. **10**, 6061 (2020).
- [6] J.-J. Lee, K.-D. Lee, H.-J. Kim, and M.-H. Yoon, J. Magn. **26**, 166 (2021).
- [7] H. Won, Y.-K. Hong, M. Choi, J. Platt, B. Bryant, S. Choi, S. Li, H.-S. Yoon, T. A. Haskew, J. Lee, T. Lee, and T.-W. Lim, Energies **15**, 1997 (2022).
- [8] M. Kimiabeigi, B. C. Mecrow, and A. G. Jack, IEEE Trans. Ind. Appl. **52**, 2224 (2016).
- [9] M.-J. Jeong, K.-B. Lee, S.-W. Song, S.-H. Lee, and W.-H.

- Kim, *Machines* **11**, 850 (2023).
- [10] M.-F. Hsieh, Y.-M. Lien, and D. G. Dorrell, *IEEE Trans. Ind. Appl.* **47**, 2478 (2011).
- [11] H.-S. Seol, T.-C. Jeong, H.-W. Jun, J. Lee, and D.-W. Kang, *IEEE Trans. Magn.* **53**, 1 (2017).
- [12] Y.-H. Lee and M.-F. Hsieh, *Energies* **15**, 3825 (2022).
- [13] K.-S. Kim, M.-R. Park, H.-J. Kim, S.-H. Chai, and J.-P. Hong, *IEEE Trans. Magn.* **52**, 1 (2016).