

## Design of an Axial Flux Motor Magnetizer Incorporating a Rotor Separation Structure for Multiple Magnetizations

Hyung-Sub Han

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

Won-Ho Kim\*

Department of Electrical Engineering, Gachon University, Seongnam 13120, Republic of Korea

(Received 18 September 2025, Received in final form 27 October 2025, Accepted 27 October 2025)

This study introduces the design of a magnetizer tailored for axial flux permanent magnet machines (AFPMs). In contrast to conventional radial flux motors, AFPMs require a magnetizer configuration optimized for manufacturability within the confined geometry of the rotor yoke and teeth. To address structural challenges in maintaining the air gap during magnetization, a separation jig was implemented to enhance the mechanical integrity of both the rotor and the magnetizer during post-magnetization disassembly. Experimental validation of the proposed unilateral AFPM magnetizer was performed by comparing the measured air-gap flux density of the post-assembled rotor with finite element analysis (FEA) results, demonstrating excellent agreement and confirming the robustness of the proposed magnetizer design.

**Keywords :** AFM (Axial flux motor), post-assembly magnetizer, AFM magnetizer, magnetizing fixture, rotor separation structure

## 다회착자를 고려한 회전자 분리용 구조체를 포함한 축 방향 자속 전동기 착자기 설계

한형섭

가천대학교 차세대 에너지 시스템 융합학과, 경기도 성남시 수정구 성남대로 1342, 13120

김원호\*

가천대학교 전기공학과, 경기도 성남시 수정구 성남대로 1342, 13120

(2025년 9월 18일 받음, 2025년 10월 27일 최종수정본 받음, 2025년 10월 27일 게재확정)

본 연구는 축 방향 자속 전동기용 착자기 설계를 다룬다. 기존 방사 방향 자속 전동기와는 다른 구조적 특징으로 제한된 회전자 요크 및 치 구조 공간을 활용하여 착자기 제작성을 고려한 최적의 착자기 형태를 결정한다. 이후 착자 시 공극 관리가 어려운 구조적 특성을 개선하고자 착자 후 분리 시 회전자와 착자기의 수명을 고려한 분리형 지그를 구성해 수명을 확보하였다. 편측형 축 방향 착자기 최적 설계 후 시험평가를 통해 착자 후 조립된 회전자와 공극자속 밀도를 비교하여 FEA 해석의 타당성을 입증하였다.

**주제어 :** 축 방향 자속 전동기, 조립 후 착자기, 축 방향 자속 전동기 착자기, 착자용 고정물, 회전자 분리용 구조체

## I. 서 론

최근 차량용 구동모터, 로봇 관절, 인휠모터, 냉각용 펌프/팬 구동 등에서 고출력밀도 요구가 높아졌다[1-3]. 그로인해 컴팩트한 축 치수 및 박형화 구조에서 높은 토크·출력밀도를 제공하는 축 방향 자속 전동기가 빠르게 대두되고 있다. 요구가 다변화될수록 양산성이 핵심 과제가 되며, 어 고정자 코어를 제작함에 있어 연자성 분말 및 밀이형 강판을 적용하여 제작성 및 효율 높이는 연구가 진행되고 있다. 영구자석 전동기가 양산이 되기 위해서는 회전자 제작도 간단화 되어야 한다. 회전자의 경우 회전자 코어와 영구자석으로 이루어지는 이때 영구자석은 높은 잔류 자속 밀도를 가지고 있어 투자율이 높은 코어에 강한 흡입력을 발생한다. 이는 결국 제작의 속도 및 제작안정성에 큰 영향을 미친다. 이를 개선하고자 방사형 자속 전동기는 착자기를 설계하여 조립 후 착자를 진행 한다. 전용 착자기 설계(요크 형상·코일 간극·분할 착자 등)는 착자율 및 에너지 효율을 높이는데 목표로 한다[4]. 본 연구는 이러한 배경에서 AFPM 양산 적용을 위한 착자기 설계 필요성과 설계 및 회전자 및 착자기 수명을 위한 지지구조의 필요성을 서술한다.

## II. 착자기 설계 기초이론

### 1. 착자 기초 이론

본 연구는 Nd 소결형 영구자석을 사용한 축 방향 자속 전동기의 조립 후 착자를 위한 착자기 설계에 관한 논문으로, Nd 소결형 영구자석을 중심으로 설명하고자 한다. Nd 소결형 영구자석은 네오디뮴(Nd), 철(Fe), 붕소(B) 등 주요 성분에 디스프로슘(Dy), 터븀(Tb) 등 보자력 향상을 위한 희토류

원소를 합금하여 분쇄한 분말로 만든다. 이때 각 분말은 높은 결정 이방성을 가지므로, 성형 시 외부 자기장을 인가하여 Fig. 1과 같이 c축 방향으로 배향시킨다.

그 결과, 자석의 자기 이방성이 확보되어 착자가 원활히 이루어질 수 있다. 이후 영구자석은 높은 외부 자기장을 인가하여 착자를 진행해야 한다. 착자란 자성체 입자들의 자속 방향을 외부에서 강한 자기장을 가해 외부 자기계와 동일한 방향으로 정렬시키는 과정을 의미한다. 이 착자 시점에 따라 영구자석 동기 전동기 회전자의 제작 방식이 구분된다. 회전자와 영구자석을 부착하는 시점을 기준으로 ‘착자 후 조립’과 ‘조립 후 착자’로 나눌 수 있다. 착자 후 조립의 경우, 영구자석의 높은 잔류 자속 밀도로 인해 투자율이 높은 회전자 요크에 달라붙어 제작성이 저하된다. 그 결과, 제작 기간이 길어져 대량 생산 측면에서 매우 불리하다. 따라서 영구자석 동기 전동기의 양산을 위해서는 조립 후 착자를 위한 착자기 설계가 필수적이다.

### 2. 착자 전원 기초 이론

영구자석을 착자하기 위해서는 강한 외부 자기장이 필요하다. 이러한 강한 자기장은 코일에 직류 전류를 흘려 생성하며, 주로 커패시터 방전 방식을 활용한다. 착자 시스템을 간이 등가회로로 표현하면 Fig. 2와 같다.

커패시터 C와 순환다이오드 D, 착자코일 R, L로 나타냈으며  $S_1$ ,  $S_2$ 는 각각 충전용 스위치, 방전용 스위치이다.  $S_1$ 이 도통되어 커패시터를 충전시키고  $S_2$ 가 도통되어 임펄스 형태의 전류가 인가되며 방전을 한다. 해당 회로를 통해 나오는 전류는 정현파감쇄 형태로 나타나며 이는 회로정수에 기인한다. 직렬회로의 과도현상 분석 통해 임펄스 전류 해석이 가능하다. R, L, C 회로의 전류  $i$ 를 시간  $t$ 에 대한 회로의 과도응

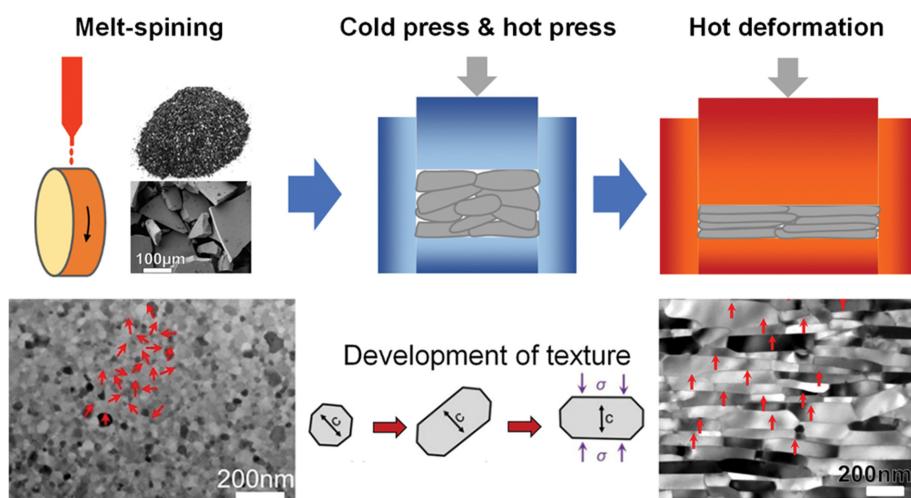


Fig. 1. (Color online) Nd sintered permanent magnet manufacturing process.

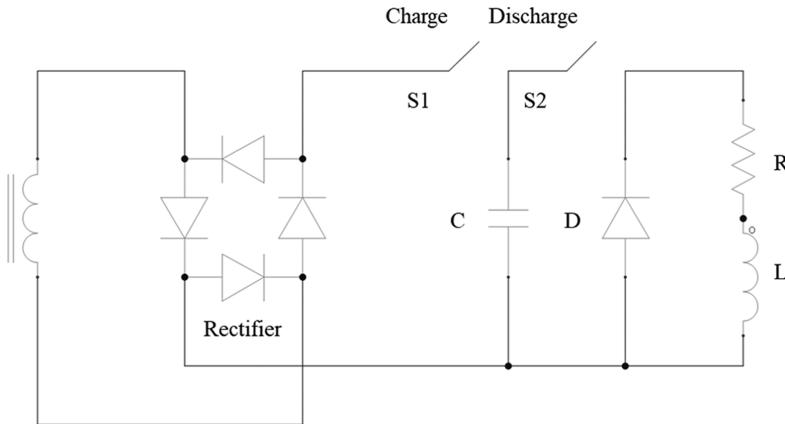


Fig. 2. Capacitor discharge magnetizing circuit.

답은 전형적인 제2차 미분방정식으로 표현하면 식(1)과 같다.

$$L \frac{d^2 i_c(t)}{dt^2} + R i_c(t) + \frac{1}{C} \int i_c(t) dt = 0 \quad (1)$$

위 미분방정식의 해는 감쇠비( $\zeta$ )의 크기에 따라 세 가지 형태(과감쇠, 임계감쇠, 감쇠진동형)로 분류된다. 착자기의 경우 짧은 시간 내 최대 전류를 형성해야 하므로 일반적으로 감쇠진동 상태로 설계된다. 강한 외부 자기장을 형성하기 위해서는 높은 전류가 필요하므로 저항이 낮아야 유리하다. 그러므로 식(2)는 착자 회로의 감쇠 조건을 정의하며, 회로의 손실이 작고 인덕턴스가 충분히 큰 경우 임펄스 형태의 감쇠진동 전류가 형성된다. 또한 높은 전류로 인해 이미 착자요크는 포화되기에 착자코일 인덕턴스  $L_c$ 는 상수화 시킬 수 있다. Fig. 3과 같이 임펄스 전류의 각 구간을  $t$ (전류의 최대치 발생 시간),  $t^*$ (스위치가 다시 열리는 시간)에서 시간에 따른 전류  $i$  회로의 일반해는 식(3), 식(4)와 같다. 식(3)은 스위치 S2가 도통된 동안 착자코일에 흐르는 전류로, 시간에 따라 지수적으로 감쇠하면서 사인파 형태로 진동한다.

스위치가 차단된 이후( $t > t^*$ )에는 전류가 점차 소멸하며,

그 해는 식(4)로 주어진다. 이는 착자코일 내 잔류전류가 열손실에 의해 소멸하는 구간으로, 실제 착자 과정에서의 자기에너지 잔류 및 소거 구간에 해당한다.

$$R < 2 \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

$$i_c(t) = \frac{V_c}{\omega L} e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)} \sin \omega t, (0 \leq t \leq t^*) \quad (3)$$

$$i_c(t) = i_c(t^*) e^{\left(\frac{-t-t^*}{\tau}\right)}, (t^* < t \geq \infty) \quad (4)$$

착자효율의 핵심은 전류의 최대치, 즉  $i_{c,peak}$ 을 얼마만큼 크게 형성할 수 있는가에 있다. 커패시터 방전회로에서 최대 전류는 전류파형의 미분을 0으로 두어 구할 수 있으며, 결과적으로 식(5)와 같다.

$$i_{c,peak} = \frac{V_c}{\omega L} e^{\left(\frac{-t^*}{\tau}\right)} \frac{\omega \tau}{\sqrt{1 + (\omega \tau)^2}} \quad (5)$$

$$\left( \tau = \frac{2L}{R}, \tau = \frac{L_c}{R_c}, \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{\tau^2}}, L = L_c + L_{ch}, R = R_C + R_{ch} \right)$$

식(5)는 착자코일 및 초크코일의 등가 인덕턴스와 저항이 전류의 최대치에 미치는 영향을 정량적으로 나타낸다. 즉, 인덕턴스가 증가하면 전류 상승 속도가 느려지고, 저항이 증가하면 지수 감쇠가 빨라져  $i_{c,peak}$ 가 감소한다. 반면 커패시터의 용량을 증가시키면 방전 에너지가 증가하여 더 큰 피크전류를 형성할 수 있다. 따라서, 식(2)부터 식(5)의 관계는 착자회로 설계에서 전류 응답 속도( $\tau$ ), 감쇠 주기( $\omega$ ),  $i_{c,peak}$ 간의 상호작용을 설명한다. 식(5)를 간단하게 표현하기 위해 착자코일 저항  $R_c$  및 초크코일의 저항과 인덕턴스  $R_{ch}$ ,  $L_{ch}$ 를 상수화 시키면 식(6)과 같이 정리가 되어 착자용 치에서 목표 자

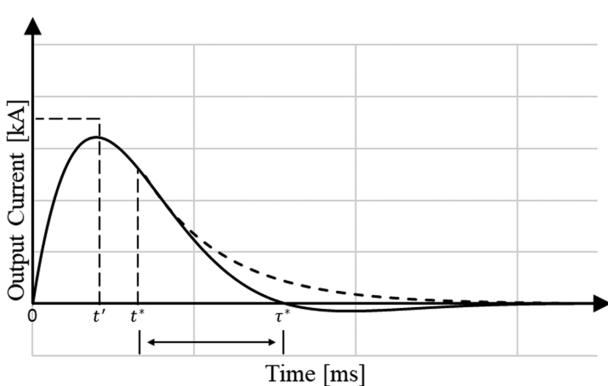


Fig. 3. Typical current waveform.

석을 착자시키기 위해 발생되는 최대 기자력은 식(7)과 같이 표현이 된다.  $p$ 는 극쌍수,  $a$ 는 병렬회로 수,  $N_p$ 는 치당 턴 수,  $\lambda_c$  퍼미언스계수이다.

$$i_{c \text{ peak Math}} = U_C \sqrt{\frac{C}{L_C}} \quad (6)$$

$$i_{c \text{ peak Math}} N_p = U_C \sqrt{\frac{a^2 C}{\mu_0 2 p \lambda_c}} \quad (7)$$

식(7)을 통해 알 수 있듯이 기자력은 전류와 턴 수에 비례하므로 타겟 영구자석이 착자가 되기 위한 기자력을 형성해 줄 전류와 턴 수를 선정하면 된다. 턴 수가 증가하면 저항과 인덕턴스는 증가하게 된다. 또한 전류의 최대치가 나오는 시간도 지연된다. 이는 결국 효율에 영향을 준다. 착자 시 효율은 식(8), 식(9)와 같이 전기에너지가 자기에너지로 변환되는 과정에서 확인할 수 있으며 간략하게는 실제 측정되는  $i_{c \text{ peak}}$ 와 수식으로 확인할 수 있는  $i_{c \text{ peak Math}}$ 의 비율로 효율을 확인할 수 있다.

$$W_c = \frac{C V_c^2}{2} \quad (8)$$

$$W_m = \frac{L_c i_{c \text{ max}}^2}{2} \quad (9)$$

착자기를 제작할 경우 전동기의 양산에 목적이 있기 때문에 전동기 회전자 한 개를 착자시킴에 있어 시간이 절대적으로 중요하다. 이 시간은 열과 밀접한 관계를 갖는다. 착자기의 온도가 올라갈 경우 저항이 올라가고 이는 착자전류의 감소를 야기하기 때문에 허용 온도 이상에서는 작동을 중지해야 한다. 그러므로 다음과 같은 이론을 중심으로 착자기 설계를 진행해야 한다.

### 3. 기준 방사 방향 착자기 기초 이론 및 설계 방법

대부분의 양산 공정에서는 영구자석 전동기를 자동화된 생산 라인을 통해 제작하며, 자석은 미착자 상태로 회전자에 조립된 후 Post-assembly 착자 과정을 거친다[5]. 이 방식은 영구자석과 회전자 코어 사이의 강한 흡인력이 발생하지 않으므로 제작성을 향상시킨다[6]. 착자기는 주로 방사 방향 자속 전동기 가운데 페라이트 자석을 사용하는 Spoke형 영구자석 전동기에서 사용된다[7,8]. Spoke형 구조는 회전자 코어와 자석의 대칭적 배치로 인해 착자요크에서 발생한 자속이 분할되어, 표면 부착형 영구자석 전동기에 비해 착자가 더욱 까다롭다[9-14]. 이를 극복하기 위해 착자 자속을 증가시켜도, 이는 높은 자기포화로 이어져 입력 대비 착자에 유효한 자속으로 전달되는 비율이 낮아져 효율이 저하된다[15,16]. 이에

분할착자를 적용하여 문제를 해결한다. 전체 자석을 한 번에 착자하지 않고 일부 구간으로 나누어 착자함으로써, 기자력을 특정 자석에 집중시키는 방식이다. 착자기에서 전원을 공급하는 방식에 대한 이해도 필요하다. 착자전원이 허용하는 최대 전압과 커패시턴스가 존재하더라도, 실제 착자 시에는 전압을 낮게 사용하는 것이 바람직하다. 즉, 최소의 전기에너지로 최적의 자기에너지를 형성하여 목표 자석을 착자하는 것이 중요하다. Spoke형 회전자를 위한 방사 방향 착자기 설계 시 고려해야 할 사항으로는 첫째, 자석과 코일 간 거리를 최소화하여 자속 누설을 억제하는 것, 둘째, 착자요크의 립과 치 형상을 최적화하여 자속 집중과 포화 사이의 균형을 확보하는 것이다. 최근 연구를 보면, 페라이트 기반 Spoke형 영구자석 전동기에서 요크 구조를 최적화하여 코일-자석 간 거리를 줄이고 립 두께를 조정함으로써 착자 효율을 약 17.1% 개선할 수 있었다. 소용량 풍력 발전기용 Spoke형 영구자석 동기 발전기 설계에서는 착자 성능과 코킹 토크를 동시에 고려할 필요성을 제시한다.

## III. 축방향 자속 전동기용 착자기 설계

### 1. 축방향 자속 전동기 착자 타입 분석

축방향 자속 전동기의 경우 방사 방향 자속 전동기와 다르게 회전자의 형태로서 종류가 다양하기 보다는 자속의 방향과 회전자 및 고정자의 수에 따라 종류가 나뉜다[17]. Fig. 4는 축방향 자속 전동기의 종류를 나타낸 것으로 위에는 Core Type 밑에는 Coreless Type을 나타낸 그림이다.

축방향 자속 전동기의 경우, 표면 부착형 영구자석 전동기의 회전자 타입을 사용하면 방사 방향 자속 전동기의 착자에 비해 착자가 까다롭지 않다. 그러나 축방향 자속 전동기는 구조적 특성으로 인해 몇 가지 문제점이 발생한다. 방사 방향 자속 전동기에 비해 회전자 코어 두께가 얇아 포화에 취약하다. 또한 착자 요크의 치 두께가 회전자 지름 크기로 제한되어, 치의 포화도와 권선 가능 턴 수가 제한받는다. 본 논문은 축방향 자속 전동기용 착자기의 타입에 대한 연구를 진행한다. Fig. 5는 SSSR 타입의 자기 등가회로를 나타내며, 여기서 스테이터가 착자 요크로 바뀌면 편측 착자 요크가 된다. 따라서 착자 요크는 DSSR 타입과 같은 형태도 가능하다[18-21].

편측 착자 요크를 기준으로 몇 가지 타입을 분석하려 한다. 착자기를 해석하기 위해서는 우선 타겟 자석의 BH 곡선을 통해 니 포인트를 확인해야 하며, 초기 자화 곡선을 통해 영구자석이 충분히 포화되는 지점을 파악해야 한다. Fig. 6은 타겟 영구자석인 N45UH의 BH 곡선 2, 3사분면을 나타낸 것이다.

이를 기준으로 착자 및 감자 여부를 확인하는 착자 해석과

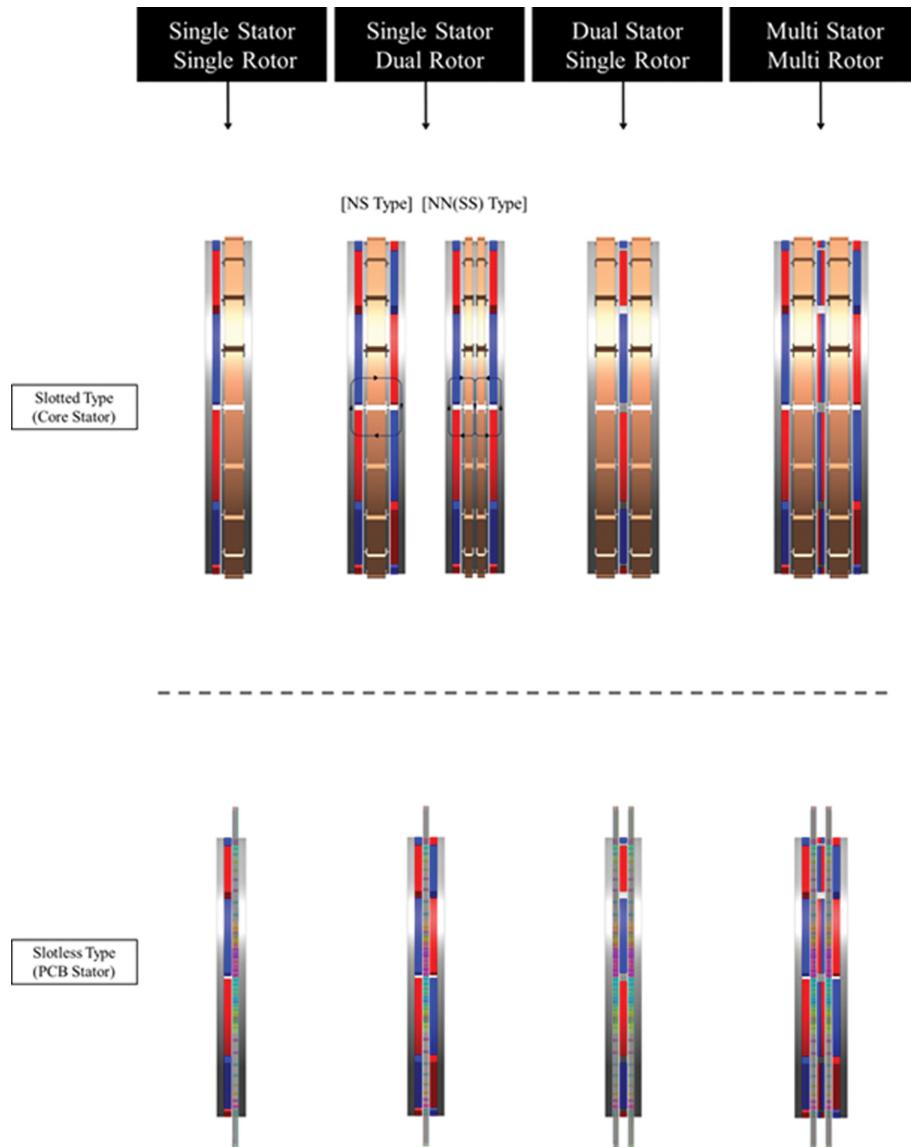


Fig. 4. (Color online) Summary of axial flux motor types.

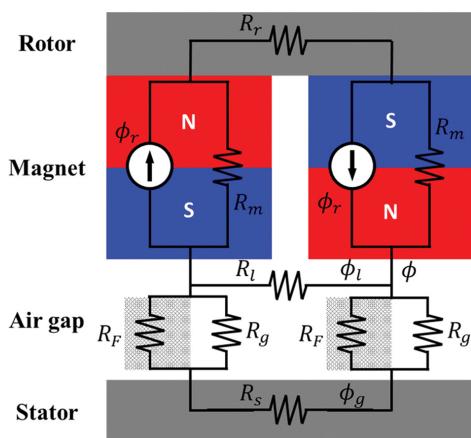


Fig. 5. (Color online) Axial flux motor SSSR type magnetic equivalent circuit.

감자 해석을 진행해야 한다. 1회 착자의 경우 착자 해석을 통해 확인할 수 있지만, 2회 착자 이상부터는 해당 착자 자체이 타겟 자석을 착자시키는 동안 미타겟 자석은 감자된다. 따라서 착자와 감자를 동시에 고려해야 한다. Fig. 7은 편측 착자기의 1회 착자 형상 및 착·감자 해석을 나타낸 것이다.

1회 착자의 경우 모든 자석이 타겟 자석이므로 착자 해석만 진행해도 된다. 이때 자석의 양 끝단에서 미착자 영역이 확인된다. 착자 자속을 증가시키기 위해 텐 수를 늘려도, 텐 수가 증가함에 따라 저항이 증가하여 실제 인가되는 전류는 줄어든다. 그 결과 기자력의 크기는 변동되지 않는다. Fig. 8은 텐 수를 2배로 증가시킨 후 착·감자 해석을 진행한 것이다. 그림에서 보이는 것처럼 치의 길이는 증가했으나, 타겟 자석 양 끝단의 미타겟 영역은 오히려 약간 증가하여 기존

Fig. 7에서는 착자율이 83.75%이 Fig. 8에서는 83.69%로 소폭 감소하였다. 두 경우의 착자 전류 임펄스 과정을 확인해 보면, Fig. 9와 같이 전류 크기가 약 2배 차이 발생함을 알 수 있다. 편측 1회 착자 방식은 양 끝단을 착자하기 어려운 구조이므로 효율적이지 못하다.

두 번째로 검토해볼 것은 편측 2회 착자이다. Fig. 10은 2회 착자의 형상 및 착감자해석과 포화도를 나타내었다.

2회 착자의 경우 1회 착자와 동일한 착자 전원을 인가하였다. 착자 해석 결과, 타겟 자석이 착자되었음을 확인하였다. 그러나 미타겟 자석은 갑자기 발생하진 않았으나 필요 이상

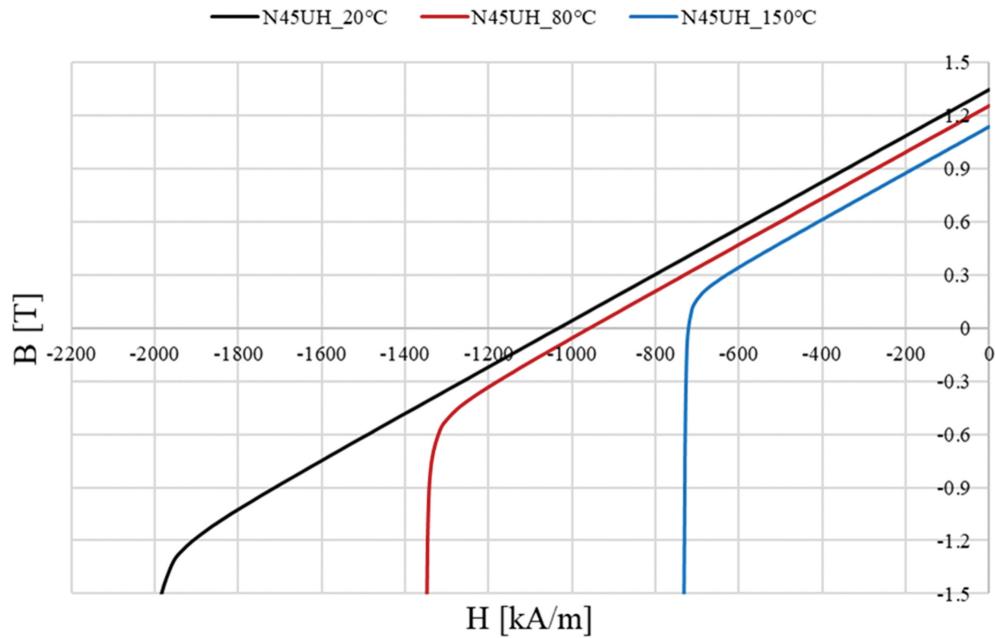


Fig. 6. (Color online) N45UH temperature-dependent BH curve.

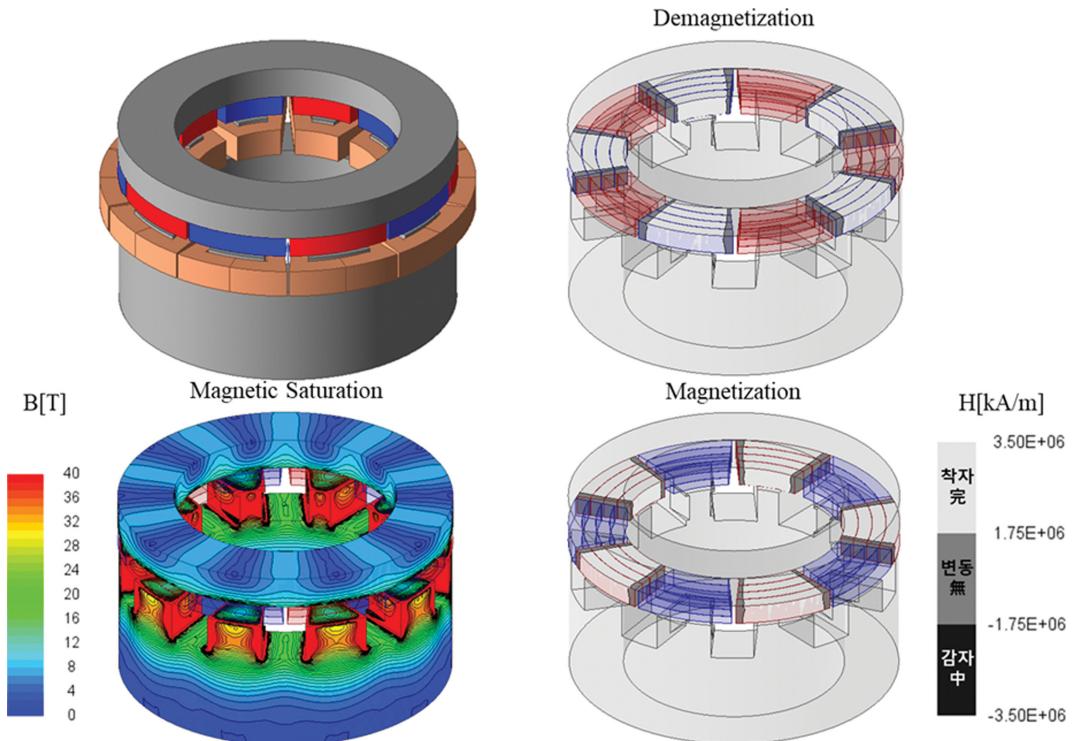


Fig. 7. (Color online) Single type magnetizer (one step magnetization) 15 Turn.

의 기자력이 인가되고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 1회 촉자에 비해 적은 촉자 전원을 공급해도 촉자가 가능함을 확인하였다. Fig. 11은 극당 받는 기자력을 유지하기 위해 극당 던 수를 균일하게 가져가면서 치를 위아래로 분화시킨 양측 촉자기이다. 양측 촉자기 역시 2회 촉자로 진행된다. 편측 촉자기와 비교할 때 촉자율은 비슷하지만 양 측 윗단에서 감자

가 소폭 발생한다. 따라서 촉·감자 영향에 따른 촉자를 비교해 보면 동일하게 99% 이상이지만 양측형에서 감자율이 1% 발생했다. 이는 양측에서 촉자를 하더라도 미착자된 하단보다는 상단에 미치는 기자력이 커져 감자를 발생시 시킴을 알 수 있다. 인가 전류가 절반으로 줄어들면 Fig. 12와 같이 양 측형은 84.7%, 편측형은 84.4%로 모두 감자 영역은 발생하

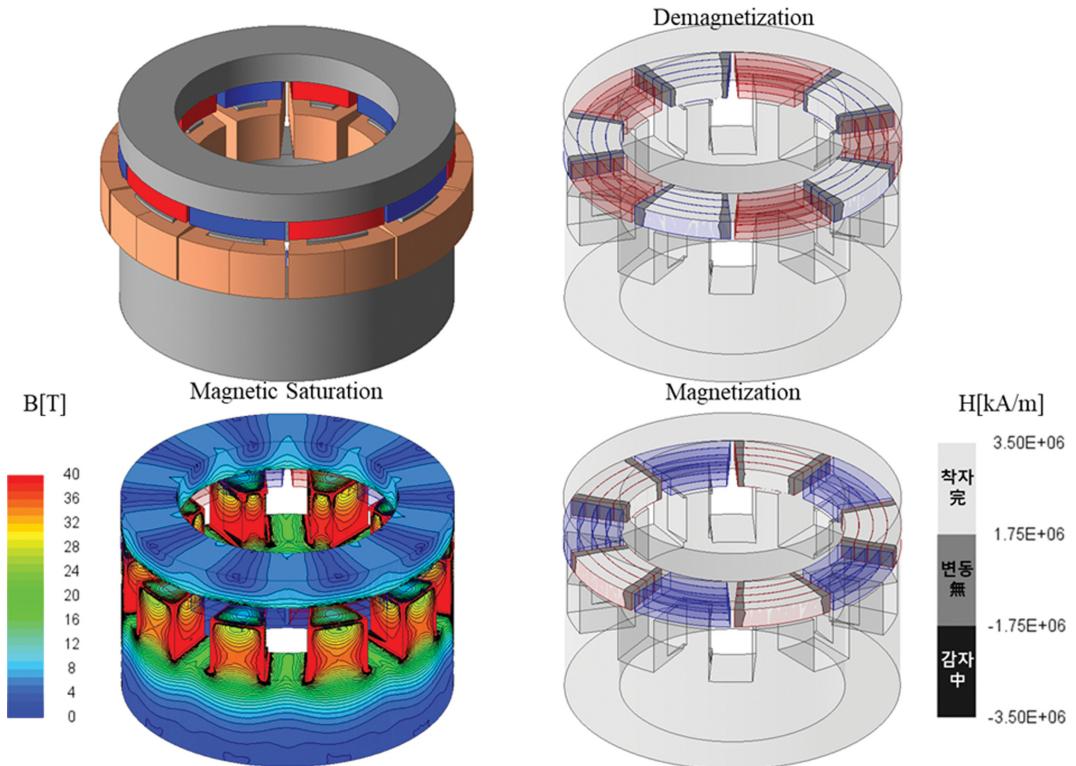


Fig. 8. (Color online) Single type magnetizer (one step magnetization) 27 Turn.

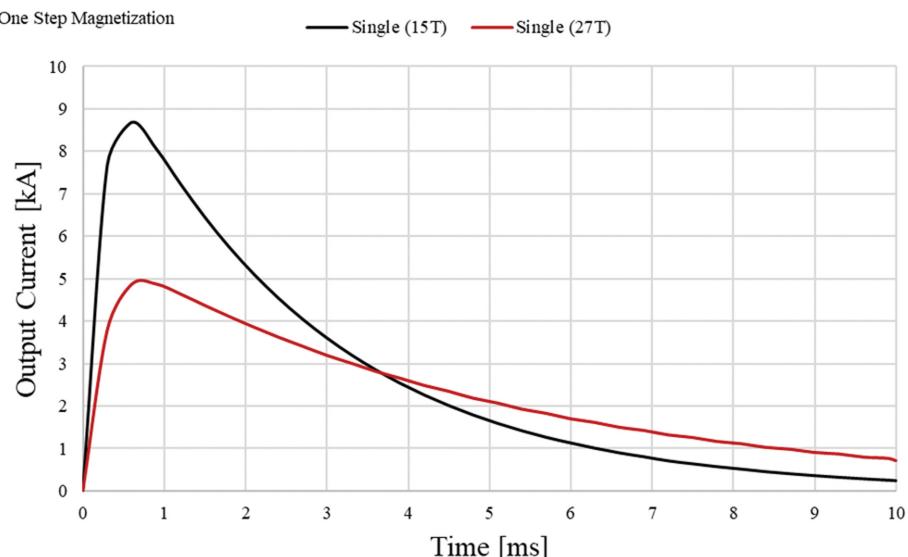


Fig. 9. (Color online) Magnetizing current waveform comparison by turn count.

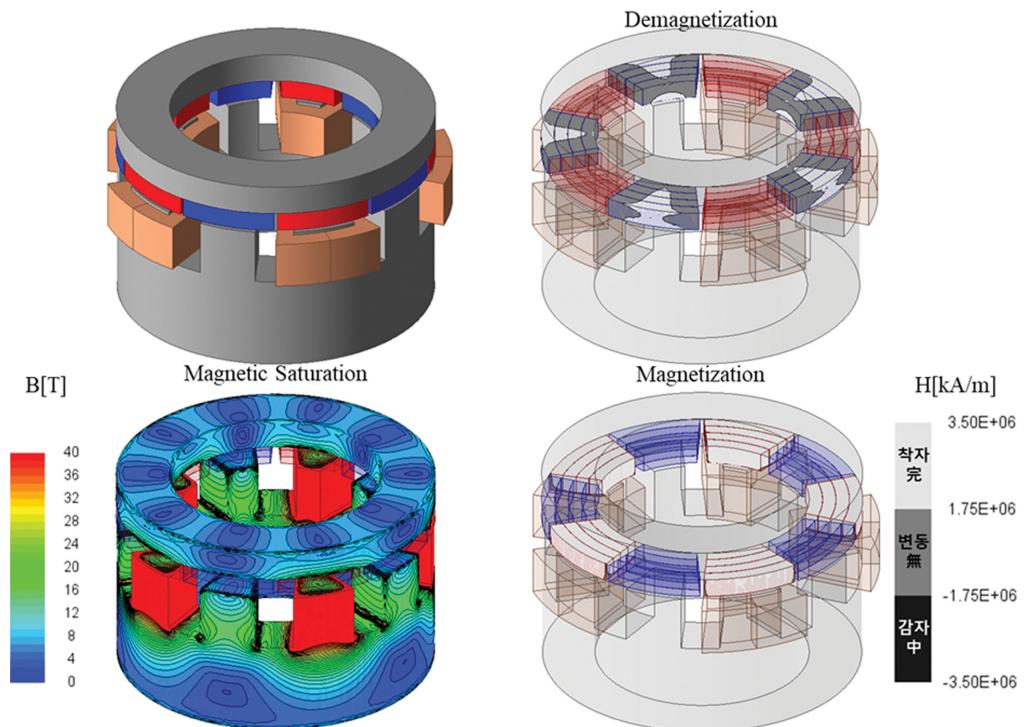


Fig. 10. (Color online) Single type magnetizer (two step magnetization) 27 Turn.

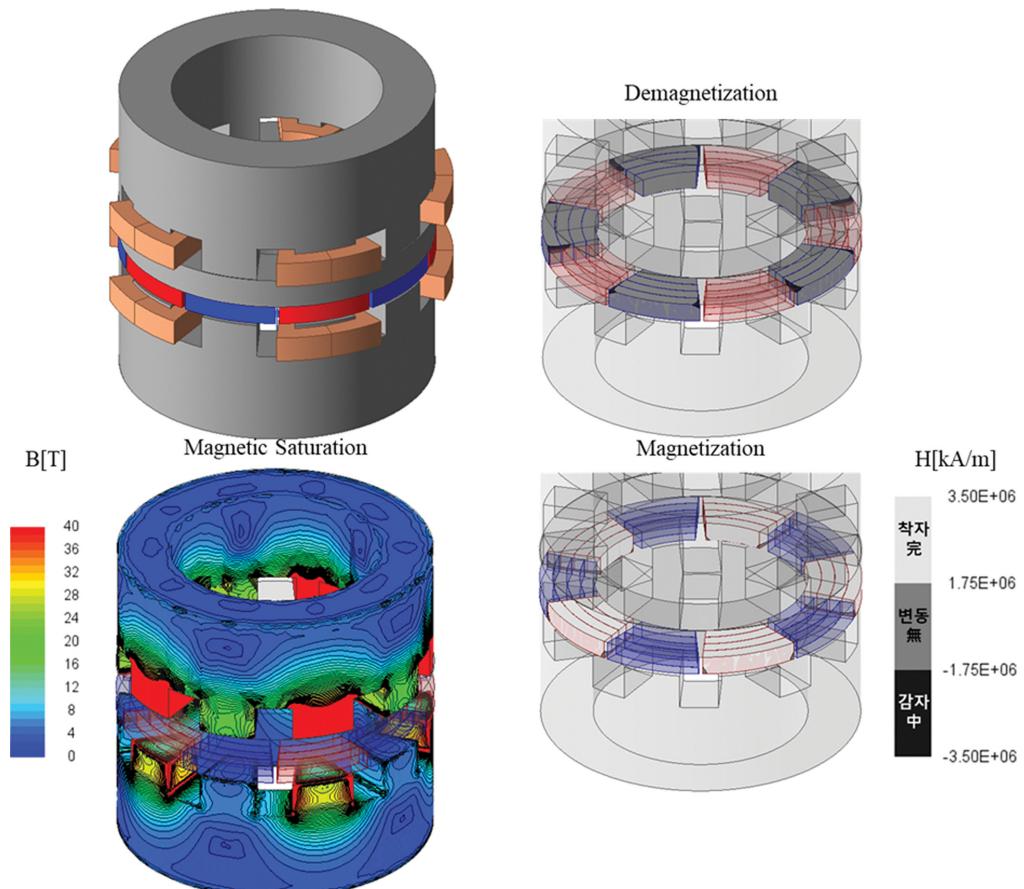


Fig. 11. (Color online) Dual type magnetizer (two step magnetization) 27 Turn.

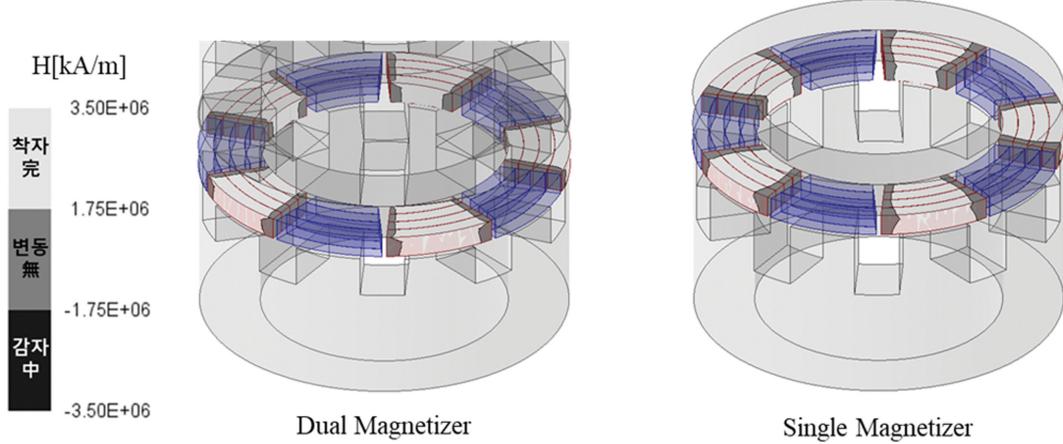


Fig. 12. (Color online) Comparison of magnetizing rates for single type and dual type magnetizers after current reduction.

지 않고 착자 영역은 유사하게 유지된다. 본 연구에서는 고도화 설계를 통해 감자를 줄이고 착자를 증가시키는 최적 설계로, 제작 비용은 적고 착자 과정이 간단한 축방향 자속 전동기용 편축 착자기 설계하고자 한다.

## 2. 다회착자를 고려한 착자기 구조 설계

방사 방향 자속 전동기용 착자기의 경우, 회전자와 연결된 축을 통해 회전자와 착자기가 공극을 유지한 상태에서 착자가 진행된다. 이로 인해 착자 후 회전자를 분리하는 과정에 문제가 생기지 않는다. 그러나 축 방향 자속 전동기의 경우 착자기와 회전자가 축 방향으로 공극을 유지해야 한다. 그러나 이러한 공극은 자기저항을 크게 증가시키는 요인이 되므로, 정확히 유지되지 않으면 착자 성능에 큰 영향을 미친다. 따라서 공극 없이 착자기에 회전자를 부착하여 착자를 진행한다. 이는 회전자 수명에 큰 영향을 준다. 회전자는 회전자 요크에 영구자석을 본드로 부착하여 구성되므로, 높은 잔류 자속 밀도를 갖는 영구자석과 착자 요크가 붙은 상태에서 둘

을 분리하면 회전자 요크와 영구자석이 분리될 수 있다. 타겟 회전자와 착자 요크 사이의 축 방향 흡입력은 2 mm 공극 유지를 기준으로 약 3,580 N이다. 따라서 2회 이상 다회 착자가 진행될수록 회전자의 파손 가능성은 더욱 높아진다. 축 방향 자속 모터의 흡입력에 관하여 Cho and Fussell(1993)은 이중 공극 AFPM에서 자기적 불균형에 의해 상당한 축방향 흡입력이 발생함을 보고하였으며 Pranjić and Virtić(2017)은 회전자 디스크에 작용하는 자기 압력 기반 용력 및 변형 해석을 수행하여 약 2,600 N의 흡입력 범위에서 구조적 안정성을 검증하였으므로, 본 설계의 3,580 N 흡입력 가정은 물리적으로 타당성을 확보할 수 있다[22,23]. 본 연구는 회전자의 착자율뿐 아니라 회전자 수명을 고려하여 축 방향 자속 전동기용 착자기에 회전자 분리용 구조를 추가한다. 착자 요크의 착자용 치와 미착자용 치 사이에 회전자를 밀어주는 실린더와 지그를 설치한다. Fig. 13을 보면 해당 지그는 영구자석 사이에 위치하여 단일 자석 기준 자석의 양 끝단을 밀어주는 형식으로 구성된다. 또한 회전자와 착자 요크 사이에 공극을

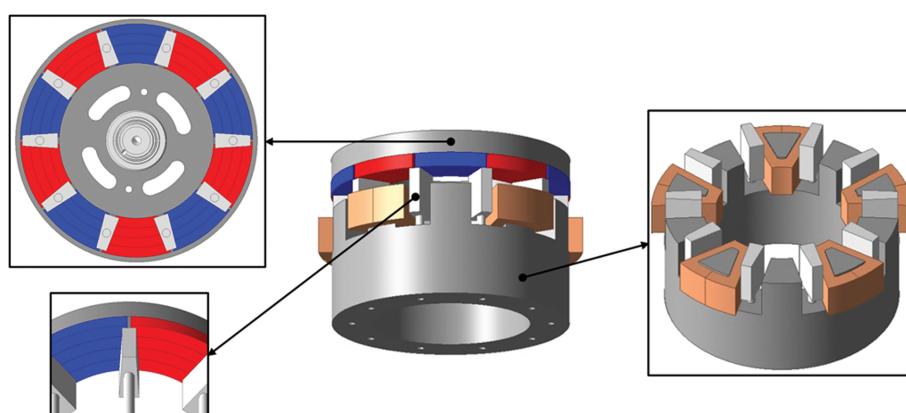


Fig. 13. (Color online) Separable structure considering rotor lifespan.

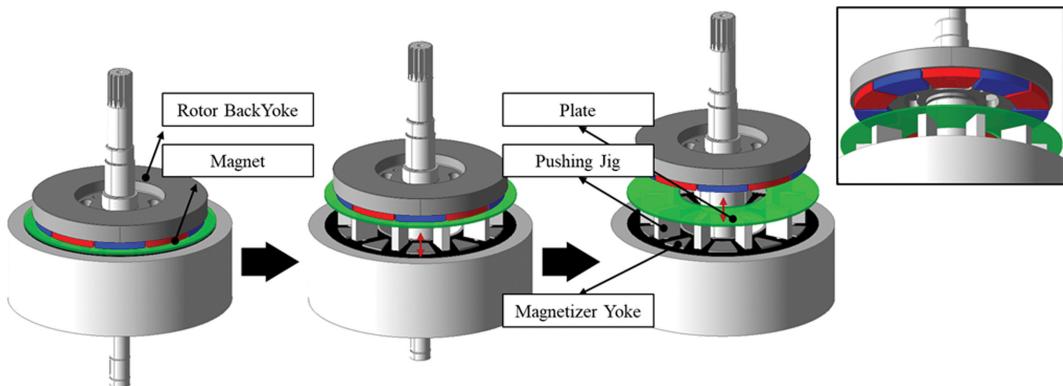


Fig. 14. (Color online) Axial flux motor magnetizer shape reflecting jig and plate structures.

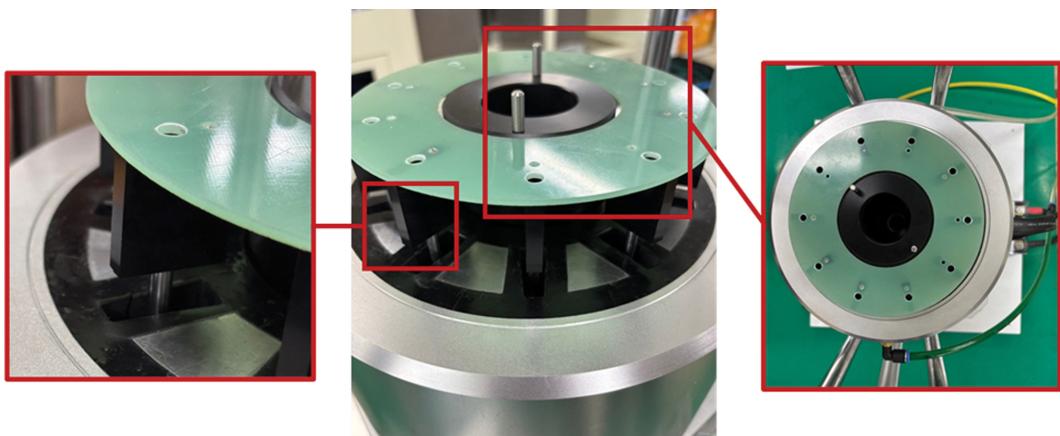


Fig. 15. (Color online) Axial flux motor magnetizer manufacturing appearance.

두고 설계한 후, 실제 제작 단계에서는 공극을 유지하기 위해 플레이트 구조를 배치한다. 최종 착자 요크 형상은 Fig. 14와 같다. Fig. 14에서 회전자 축을 밀어주는 주 실린더와 회전자 및 플레이트를 함께 밀어주는 보조 실린더가 함께 작동하여, 회전자 자석과 착자 요크 사이 흡입력으로 인한 영구자석 파손을 방지하고 이후 주 실린더가 추가로 회전자를 밀어 완전히 분리한다.

해당 착자기는 2회 착자를 통해 영구자석을 착자하는 구조로, 먼저 N극을 우선 착자한 후 S극을 착자하는 과정을 거친다. 1회 착자 후 회전자를 분리하여 회전시켜 타겟 자석을 교체한다. 이후 단자 축 결선 방향을 변경하여 N극과 S극이 각각 착자되도록 한다.

#### IV. 최종모델 시험 평가 및 데이터 비교

착자기 제작된 모습과 회전자와 착자기를 조립한 형상은 Fig. 15, 16에서 확인할 수 있다. Fig. 15에서와 같이 지그를 통해 플레이트 및 회전자를 밀어주는 구조가 Fig. 14와 동일하게 구현되었음을 알 수 있다. 또한, Fig. 16 하단에 위치한

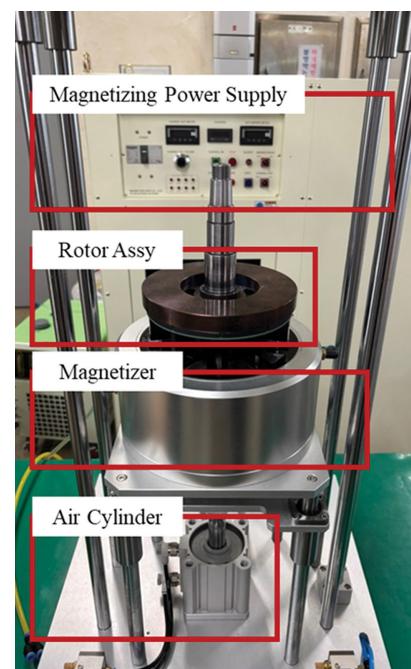


Fig. 16. (Color online) Axial flux motor magnetizer test evaluation appearance.

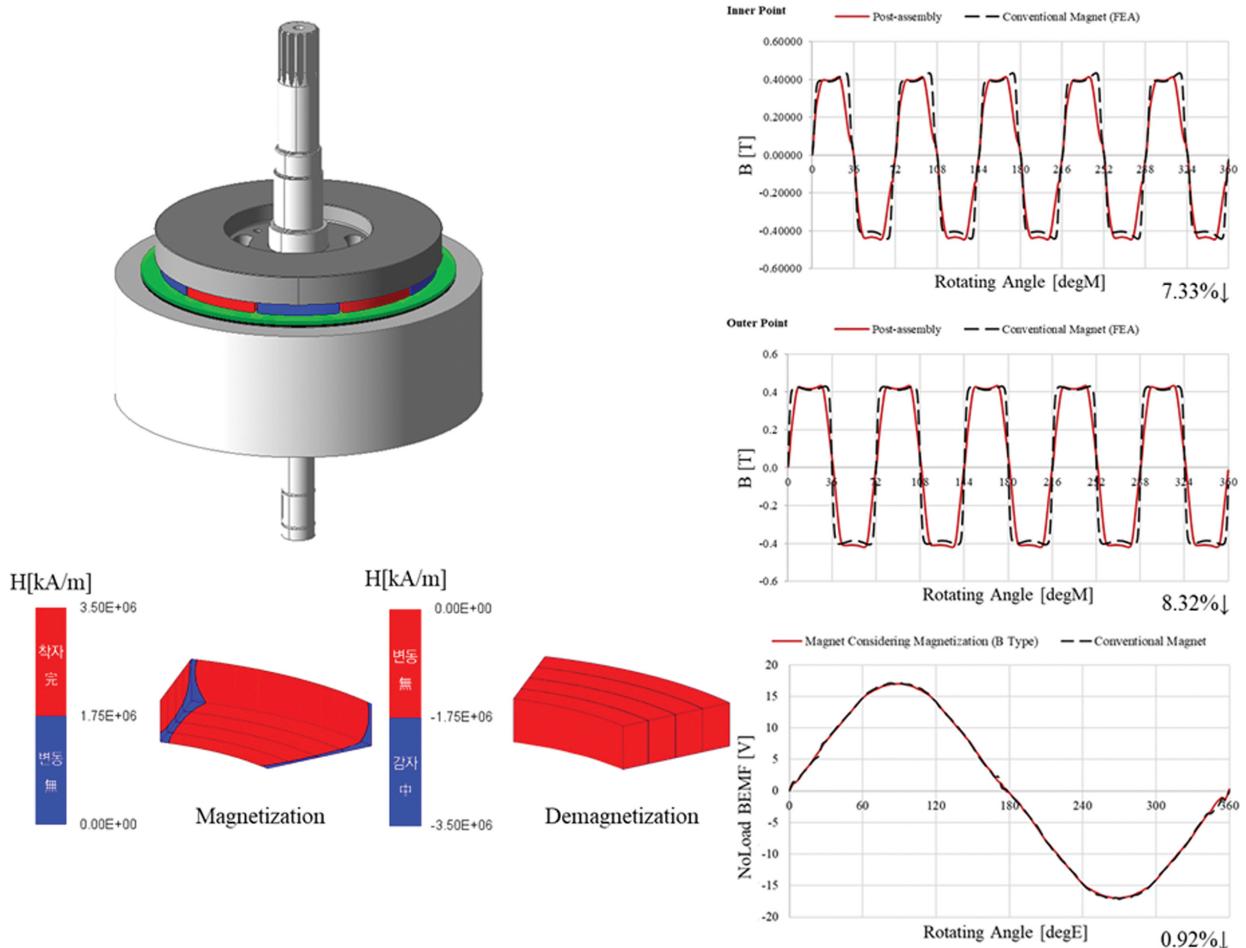


Fig. 17. (Color online) Axial flux motor magnetizer FEA magnetizing analysis and test data.

**Table I.** Final model performance.

Parameter	Unit	Single Magnetizer
Input Voltage	V <sub>Peak</sub>	3,700
Input Capacitor	μF	6,000
Current	kA	12
Magnet	-	N45UH
Magnetizer Core	-	S20C
Number of Poles	-	10
Airgap	mm	2

에어 실린더를 통해 회전자 축을 밀어 전체적인 회전자 분리가 이루어진다. Fig. 17은 FEA 축자 해석 결과와 Pre-magnetized assembly 및 Post-assembly 제작 방식에 따른 공극 자속 밀도 측정 데이터이다. 공극 자속 밀도를 비교하면, 2회 축자 후 감자가 발생하지 않음을 확인할 수 있으며, 양 끝단에서 미축자가 발생하여 Fig. 17의 Post-assembly 공극 자속 밀도 파형이 양 끝단에서 사다리꼴 모양으로 감소된 것을 볼 수 있다. 축 방향 자속 모터의 자석 재질 및 축자요크의 재질, 최종모델의 인가 전압 및 커파시턴스와 이때 축

자기에 인가되는 전류의 크기는 Table I에 기재하였다.

## V. 결 롤

본 연구는 축방향 자속 전동기용 축자기에 대한 타입별 분석과 다회 축자를 고려한 구조적 해결 방안에 관한 내용이다. 이를 반영하여 축자율을 고려한 축자기 설계 후 축자 시험 평가를 수행하였다. 토크 밀도가 중요한 어플리케이션에서 축방향 자속 전동기 적용에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 산업 현장에서는 양산을 고려한 축방향 자속 전동기 탑재 방안을 검토하고 있으며, 양산 관련 부분도 주요 연구 주제로 부상하고 있다. 이에 따라 전동기 고정자 및 회전자 코어 제작을 위해 연자성 분말 코어와 말이형 강판 등의 제작 공정을 고려한 설계가 진행되고 있다. 양산을 위해 회전자는 조립 후 축자가 필수적이며, 이를 위해 조립된 회전자의 자석을 축자시킬 축자기 연구도 필요하다. 축방향 자속 전동기는 구조적 특징상 영구자석이 표면 부착형임에도 불구하고 축자기의 상세 설계가 필요함을 본문에서 밝혔다. 축방향 자속

전동기용 착자기는 양축형과 편축형 모두 가능하나, 편축형은 착자 과정과 제작 비용이 적게 들어 고도화 설계를 통한 편축형 착자기 설계가 더 효과적이다. 본 연구에서는 편축형 착자기를 선택하여 설계를 진행하였고, 다회 착자 시 회전자의 수명을 고려하여 회전자 분리용 구조를 설계에 반영하였다. FEA 해석 결과와 공극 자속 밀도 시험 데이터를 비교한 결과, 착자가 예상대로 잘 이루어졌음을 확인하였다.

### 감사의글

본 연구는 2025년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 에너지수요관리 핵심기술개발사업(중형급 정속 고효율 전동기 개발 및 실증, No. RS-2023-00232767) 재원으로 수행되었습니다.

### References

- [1] M.-K. Hong, H.-J. Pyo, S.-W. Song, D.-H. Jung, and W.-H. Kim, *Machines* **11**, 591 (2023).
- [2] S.-H. Yang, H.-J. Pyo, D.-H. Jung, and W.-H. Kim, *Machines* **11**, 445 (2023).
- [3] S.-W. Song and W.-H. Kim, *Processes* **13**, 2913 (2025).
- [4] J. Zhang, J. Liu, and H. Wu, *Electronics* **12**, 2867 (2023).
- [5] A. Mrad, J.-F. Llibre, Y. Lefèvre, and M. Arnaout, *Electricity* **6**, 24 (2025).
- [6] H. Nory, A. Yıldız, S. Aksun, and C. Aksoy, *Energies* **18**, 4684 (2025).
- [7] H.-C. Liu, *World Electric Vehicle Journal* **16**, 50 (2025).
- [8] V. Sarac, D. Minovski, S. Aneva, P. Janiga, M. F. Smitkova, D. Bogatinov, and A. Atanasova, *Machines* **13**, 375 (2025).
- [9] D. G. Dorrell, M.-F. Hsieh, and A. M. Knight, *IEEE Trans. Magn.* **48**, 835 (2012).
- [10] M. M. Rahman, K.-T. Kim, and J. Hur, *IEEE Trans. Magn.* **50**, 865 (2014).
- [11] K.-C. Kim, *IEEE Trans. Magn.* **50**, 793 (2014).
- [12] C. Bianchini, F. Immovilli, E. Lorenzani, A. Bellini, and M. Davoli, *IEEE Trans. Magn.* **48**, 2685 (2012).
- [13] Z. Q. Zhu, Y. Liu, and D. Howe, *IEEE Trans. Magn.* **42**, 3512 (2006).
- [14] I.-J. Yang, S.-H. Lee, K.-B. Lee, J. Lee, W.-H. Kim, and I.-S. Jang, *IEEE Trans. Magn.* **57**, 1 (2021).
- [15] H.-J. Kim and S.-W. Baek, *Energies* **18**, 4936 (2025).
- [16] X. Yu, Q. Wang, Y. Fu, H. Chen, J. Zhang, and W. Geng, *World Electric Vehicle Journal* **15**, 335 (2024).
- [17] S.-W. Song, S.-H. Lee, and W.-H. Kim, *Processes* **13**, 2139 (2025).
- [18] N. Gadiyar, J. Van Verdeghem, and E. L. Severson, *IEEE Trans. Ind. Appl.* **59**, 3920 (2023).
- [19] Z. Shi, X. Sun, Z. Yang, Y. Cai, G. Lei, J. Zhu, and C. H. T. Lee, *IEEE Transactions on Transportation Electrification* **10**, 3770 (2024).
- [20] M. Bilal, J. Ikram, A. Fida, S. S. H. Bukhari, N. Haider, and J. Ro, *IEEE Access* **9**, 64179 (2021).
- [21] J. Gao, X. Han, Z. An, and Z. Yu, *Energies* **18**, 3730 (2025).
- [22] C. P. Cho and B. K. Fussell, *IEEE Trans. Magn.* **29**, 2416 (1993).
- [23] F. Pranjić and P. Virtič, *J. Energy Technol.* **10**, 57 (2017).