ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 36(5), 439-448 (2026) https://doi.org/10.4283/JKMS.2026.36.5.439

Characteristic Analysis of a Contactless Permanent Magnet Coupling According to Magnetization Arrangement

Min-Jae Jung and Min-Mo Koo*
Purpose-Built Mobility Group, Korea Institute of Industrial Technology, Jeonnam-Gwangju 61012, Korea

(Received 8 October 2026, Received in final form 27 October 2026, Accepted 27 October 2026)

This study analyzes the pullout torque and torque density of a coaxial contactless permanent magnet coupling for motor dynamometers using two-dimensional finite element analysis. Based on a minimum-pole reference model meeting the target torque, four combinations of parallel and Halbach arrays on the inner and outer rotors were compared under identical magnet mass and dimensions. Halbach arrays increased pullout torque, particularly on the outer rotor. Adjusting the pole arc ratio and radially magnetized segment arc ratio reduced magnet mass with comparable torque when both rotors used parallel arrays, and increased torque without additional mass when both used Halbach arrays. With these ratios combined, the latter yielded the highest pullout torque, whereas a Halbach array only on the inner rotor yielded the highest magnet mass-based torque density, meeting the target torque with less magnet mass. Thus, Halbach placement and both ratios should be selected for the design objective.

Keywords : permanent magnet coupling, pullout torque, parallel array, Halbach array, torque density, pole arc ratio

자석 배열에 따른 비접촉 영구자석 커플링 특성 해석

정민재 · 구민모*
한국생산기술연구원 목적기반모빌리티그룹, 전남광주통합특별시 북구 첨단과기로208번길6, 61012

(2026년 10월 8일 받음, 2026년 10월 27일 최종수정본 받음, 2026년 10월 27일 게재확정)

본 논문은 전동기 성능 시험용 다이나모 시스템을 위한 동축형 비접촉 영구자석 커플링의 최대 전달 토크와 토크 밀도를 2차원 유한요소해석으로 분석하였다. 목표 토크를 만족하는 최소 극수의 기준 모델을 선정하고, 내측과 외측 회전자에 평행 배열과 할박 배열을 조합한 네 가지 모델을 동일한 자석 질량과 외형 조건에서 비교하였다. 그 결과 할박 배열은 최대 전달 토크를 증가시켰으며, 특히 외측 회전자에 적용할 때 효과가 컸다. 더 나아가 극호비와 종횡비를 조절한 결과, 두 회전자 모두 평행 배열인 모델은 최대 전달 토크를 유지하면서 자석 질량을 줄일 수 있었고, 두 회전자 모두 할박 배열인 모델은 자석 질량의 증가 없이 최대 전달 토크가 향상되었다. 극호비와 종횡비를 조합한 조건에서 최대 전달 토크는 두 회전자 모두 할박 배열인 모델이, 자석 질량 기준 토크 밀도는 내측 회전자에만 할박 배열을 적용한 모델이 가장 높았으며, 이 모델은 더 적은 자석 질량으로 목표 최대 전달 토크를 만족하였다. 따라서 설계 목적에 따라 할박 배열의 적용 위치와 두 비율을 함께 선정할 필요가 있다.

주제어 : 영구자석 커플링, 최대 전달 토크, 평행 배열, 할박 배열, 토크 밀도, 극호비

I. 서 론

영구자석 커플링은 입력 축과 출력 축에 각각 연결된 두 회전자 사이의 자기적 상호작용을 통해 기계적 접촉 없이 토크를 전달하는 동력 전달 장치로, 기계적 접촉에 따른 마모가 발생하지 않아 효율과 신뢰성 측면에서 이점을 가진다[1]. 또한, 전달 토크가 최대 전달 토크를 초과하는 과부하 조건에서는 두 회전자 사이에 슬립이 발생하여 연결 기기의 기계적 손상을 방지할 수 있으며, 이러한 특성으로 인해 위험 환경이나 부식 환경을 포함한 다양한 산업 분야에 적용되고 있다[2]. 이러한 슬립 현상은 과부하 조건에서 시스템을 보호하는 기능으로 작용할 수 있으나, 정상 운전 중 발생할 경우

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-62-600-6230, Fax: +82-62-600-6219, e-mail: mmkoo@kitech.re.kr

두 회전자 간의 동기 상태가 상실되어 동력 전달이 중단될 수 있다. 따라서 정상 운전 시 부하 토크는 최대 전달 토크를 초과하지 않아야 하며, 최대 전달 토크는 과부하 보호 특성과 동력 전달 성능을 결정하는 핵심 설계 지표이다. 영구자석 커플링의 주요 응용 분야 중 하나는 전동기 성능 시험 시스템이다. 전동기의 토크-속도 특성 측정에는 다이나모 시스템이 널리 사용되며, 시험 전동기와 다이나모 시스템 사이의 축 연결 방식은 측정 시스템의 성능 및 신뢰성 측면에서 중요하게 고려되어야 한다. 영구자석 커플링의 최대 전달 토크는 자석의 배치 구조와 자화 방향에 따라 달라진다. 자석의 배치 구조 측면에서, 내측 회전자와 외측 회전자가 원통형 공극을 사이에 두고 마주 보는 동축형 구조에 대해서는 자계 해석 및 토크 측정을 기반으로 한 특성 분석이 수행되어 왔다[3].

최대 전달 토크를 향상시키기 위한 방법 중 하나로 자석의 자화 방향을 조절하는 할박(Halbach) 배열이 연구되어 왔다. 할박 배열은 하나의 극을 여러 개의 세그먼트로 분할하고, 인접한 세그먼트의 자화 방향을 순차적으로 회전시킴으로써 한쪽 면의 자속을 강화하고 반대쪽 면의 자속을 감소시키는 구조이다[4]. 영구자석 커플링에서도 각 자석의 자화 방향을 순차적으로 변화시켜 공극 자속 분포를 개선하는 점진적 자화 구조가 제안되었다[5]. 이러한 자화 배열은 동축형 자기 기어, 축 방향 자기 기어 및 자기 커플링 등에 적용되어 토크 밀도 향상에 기여하는 것으로 보고되었으며[6-9], 영구자석 커플링에서 달성 가능한 토크 밀도의 이론적 상한에 관한 분석 또한 제시되었다[10].

다만, 할박 배열의 적용에는 세그먼트 분할에 따른 제작상의 제약과 감자 특성[11,12]에 대한 검토가 함께 요구된다. 따라서 자석 배열에 따른 성능은 최대 전달 토크의 절대적인 크기뿐만 아니라, 자석 사용량과 점유 체적을 함께 고려한 토크 밀도의 관점에서도 평가할 필요가 있다. 실제로 평행 배열과 할박 배열을 적용한 동기형 영구자석 커플링을 해석적 계산, 유한요소해석 및 실험을 통해 비교한 선행 연구에 따르면, 할박 배열의 기본파 자계는 평행 배열 대비 약 1.4배 크며, 동일한 자석 체적 조건에서 더 높은 최대 전달 토크를 나타내고 동일한 최대 전달 토크를 구현하는 데 필요한 자석량 또한 감소하는 것으로 보고되었다[2].

그러나 기존 연구의 대부분은 내측 회전자와 외측 회전자에 동일한 배열 방식을 적용한 조건에서 자석 배열에 따른 특성을 평가하였다. 동축형 구조에서는 두 회전자의 자석 배열을 서로 독립적으로 구성할 수 있으므로, 서로 다른 자석 배열을 조합했을 때의 특성 및 할박 배열의 적용 위치에 따른 성능 차이를 검토할 필요가 있다. 또한, 자석이 극 피치 내에서 차지하는 폭은 전달 토크와 자석 사용량을 동시에 결정하는 주요 설계 변수이며, 자석 호 길이비와 분할 할박 배열의 세그먼트 폭 배분이 토크 밀도에 미치는 영향이 보고된 바 있다[13]. 특히 외측 회전자에만 2세그먼트 할박 배열을 적용한 동축형 커플링에서 반경 방향으로 자화된 세그먼트의 호 비율과 극호비 등을 설계 변수로 설정하고, 최대 전달 토크와 자석 질량을 동시에 고려하여 최적화한 연구가 수행되었다[14]. 그러나 해당 연구에서는 할박 배열의 적용 위치를 외측 회전자로 한정하고, 최대 전달 토크와 자석 질량을 가중합한 단일 목적함수를 기반으로 최적 조건을 도출하였다. 따라서 할박 배열의 적용 위치에 따른 성능 차이와 최대 전달 토크 및 자석 질량 기준 토크 밀도를 각각 최대화하기 위한 설계 조건에 대해서는 충분히 검토되지 않았다.

본 논문에서는 전동기의 성능 시험용 다이나모 시스템에 적용하기 위한 동축형 비접촉 영구자석 커플링을 대상으로, 동일한 외형 조건에서 4종류의 자석 배열에 따른 특성을 비교하였다. 또한, 할박 배열의 적용 위치가 서로 다른 조건일 때 극호비와 반경 방향 자석 비율의 조합에 따른 최대 전달 토크 및 자석 질량 기준 토크 밀도의 변화를 분석하였다. 먼저, 목표 최대 전달 토크를 만족하는 기준 극수를 선정한 후, 동일한 형상 치수와 자석 사용량 조건에서 평행 배열 모델과 할박 배열 모델의 특성을 2차원 유한요소해석을 통해 비교하였다. 이어서 내측 및 외측 회전자에 평행 배열과 할박 배열을 조합한 네 가지 모델을 구성하고, 할박 배열의 적용 위치에 따른 최대 전달 토크와 토크 밀도를 비교하였다. 마지막으로 두 혼합 조건을 대상으로 평행 배열의 극호비와 할박 배열의 종횡비를 설계 변수로 설정하고, 두 변수의 전체 조합에 대한 해석을 수행하여 변수 간 상호작용을 분석하고 각 평가 지표를 최대화하는 설계 조건을 도출하였다.

II. 비접촉 영구자석 커플링의 특성 해석

1. 해석 모델

본 연구의 해석 대상 커플링은 Fig. 1과 같이 동축 형태로, 철심과 영구자석으로 구성된 내·외측 회전자가 공극을 사이에 두고 마주 보는 구조이다. 한쪽 회전자가 회전하면 내측 및 외측 영구자석 사이의 자기적 상호작용에 의해 토크가 전달되어 다른 회전자도 동기하여 회전한다. 철심에는 전기강판(35JN230)을 사용하였고, 자석에는 NdFeB 계열의 N42SH 영구자석을 적용하였다.

Fig. 2는 해석 모델의 반경 방향 치수와 자석의 중심각을 정의한 단면 형상을 나타내며, 좌측은 평행 배열, 우측은 할박 배열을 나타낸다. r_1과 r_2는 각각 내측 철심의 내반경과 외반경, r_3은 내측 자석의 외반경, r_4와 r_5는 각각 외측 자석의 내반경과 외반경, r_6은 외측 철심의 외반경을 나타낸다. 극

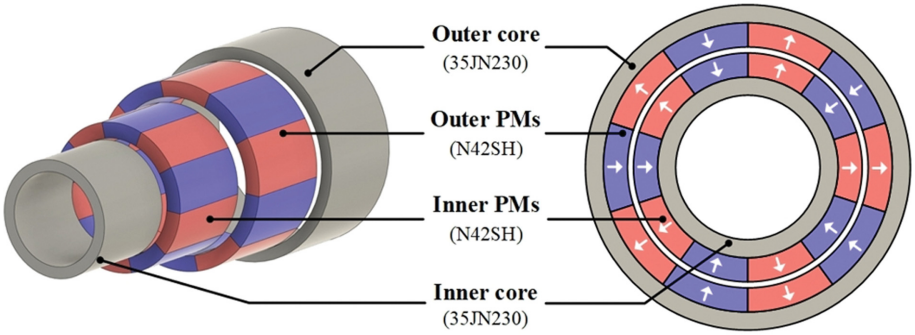


Fig. 1. (Color online) Configuration of the coaxial permanent magnet coupling.

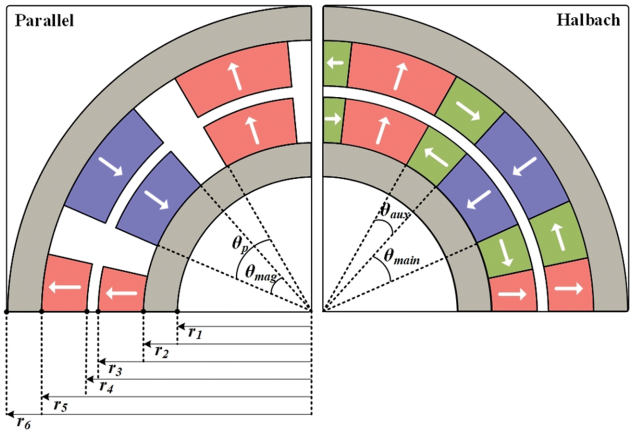


Fig. 2. (Color online) Cross-sections and design variables of the parallel and Halbach arrays.

피치 내에서 자석이 차지하는 중심각은 배열 방식에 따라 다르게 정의되며, 이를 설계 변수로 설정한 해석 결과는 극호비에 관한 절에서 제시하였다. 또한, 해석 모델의 주요 사양은 Table I과 같다.

본 연구의 전달 토크는 2차원 유한요소해석을 통해 산출하였다. 유한요소해석에서는 회전 영역에 가상의 미소 변위를 부여하고, 이에 따른 자계 공에너지(co-energy)의 변화로부터 가상일의 원리에 기반하여 토크를 계산하며, 이는 식(1)과 같다.

Table I. Specification of the coaxial permanent magnet coupling.

Parameter	Symbol	Value	Unit
Pole number	P	10	pole
Internal radius of inner core	r_1	12	mm
External radius of inner core	r_2	15	mm
External radius of inner PM	r_3	19	mm
Internal radius of outer PM	r_4	20	mm
External radius of outer PM	r_5	24	mm
External radius of outer core	r_6	27	mm
Stack length	L_{stk}	54	mm
Permanent magnet	-	N42SH	-
Core material	-	35JN230	-

$$T = \frac{\partial W(\theta, i)}{\partial \theta} \tag{1}$$

여기서 W는 해석 영역의 자계 공에너지이며, 식(2)와 같이 정의된다.

$$W = \int_V \left(\int_0^H B \cdot dH \right) dV \tag{2}$$

θ는 내측 회전자와 외측 회전자 사이의 상대 회전각, i는 권선 전류, B와 H는 각각 자속밀도와 자계강도, V는 적분 영역의 체적이다. 토크는 전류가 일정한 조건에서 상대 회전각에 대한 자계 공에너지의 변화율로 산출된다. 본 연구의 영구자석 커플링은 별도의 권선 및 전류원이 존재하지 않으므로, 영구자석에 의해 형성되는 자계의 공에너지 변화를 기반으로 전달 토크를 산출하였다. 또한, 2차원 유한요소해석에서 계산되는 토크에는 축 방향 모델 길이인 54 mm를 적용하였다.

2. 극수에 따른 토크 특성 및 극수 선정

본 연구의 비접촉 영구자석 커플링은 전동기의 성능 시험용 다이나모 시스템에 적용하기 위한 것으로, 시험 대상 전동기는 정격 출력 3 kW 및 정격 토크 16.5 Nm 사양이다. 부하 변동 및 기동 과도 상태에서 발생할 수 있는 토크 증가를 고려하여 충분한 토크 안전율을 확보하고자, 선행 연구에서 적용한 기준을 바탕으로 정격 토크의 2배에 해당하는 33 Nm를 최대 전달 토크로 설정하였다[15].

Fig. 3은 비접촉 영구자석 커플링의 내·외경 치수를 고정한 상태에서 극수를 4극부터 20극까지 변화시킨 유한요소해석 모델을 보여준다. 극수 변화에 따른 전달 토크는 두 회전자의 상대 기계각에 따라 결정되므로, 극수가 서로 다른 모델의 토크 파형을 동일한 기준에서 비교하기 위해 해석 결과의 가로축을 전기각으로 환산하여 나타내었다. Fig. 4는 극수에

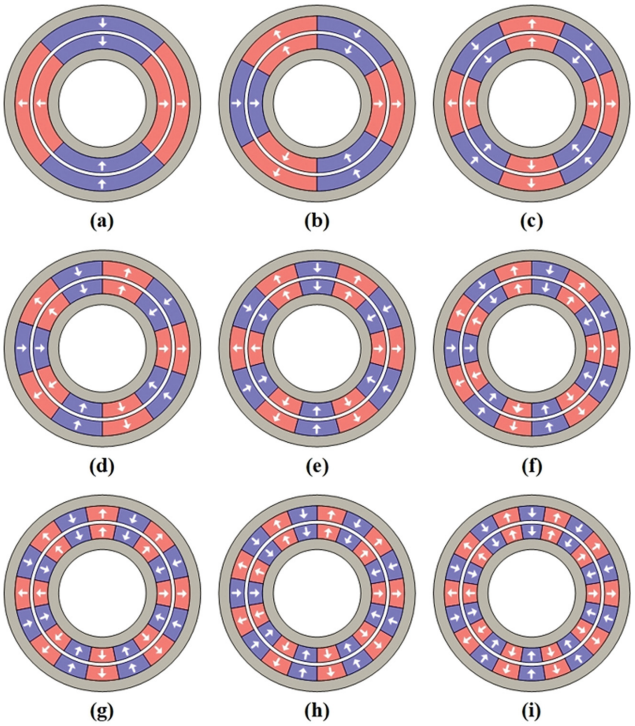


Fig. 3. (Color online) Cross-sections of the coupling models according to the number of poles: (a) 4, (b) 6, (c) 8, (d) 10, (e) 12, (f) 14, (g) 16, (h) 18, and (i) 20 poles.

따른 전달 토크 파형을 보여준다. 또한, 극수에 따른 최대 전달 토크를 정량적으로 비교하기 위해 Fig. 5와 Table II에 해석 결과를 정리하였다. 최대 전달 토크는 극수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 16극에서 최댓값인 53.12 Nm를 나타낸 후 18극과 20극에서는 감소하였다. 이는 극수 증가에 따라 극 피치가 감소하면서 토크 생성에 기여하는 유효 공극 자속과 인접 극 사이의 누설자속 간의 상대적인 영향이 변화하기 때문으로 판단된다.

앞서 설정한 최대 전달 토크의 목푯값 33 Nm를 기준으로 극수별 해석 결과를 비교하였다. 4극에서 8극 모델은 최대 전달 토크의 목표 성능에 미치지 못하였다. 반면, 10극 모델의 최대 전달 토크는 45.19 Nm로, 목푯값의 약 1.37배에 해당하며 본 연구에서 검토한 동일 외형 조건에서 목표 최대 전달 토크를 만족하는 최소 극수이다. 10극 모델의 토크 파형을 Fig. 4(d)에서 확인할 수 있다. 본 연구의 극수 선정 목적은 최대 전달 토크가 가장 큰 극수를 선정하는 것이 아니라, 요구되는 전달 토크를 만족하면서 이후 자석 배열에 따른 특성을 동일한 조건에서 비교하기 위한 기준 모델을 설정하는 데 있다. 따라서 설계 목표인 최대 전달 토크를 만족하는 최소 극수인 10극 모델을 이후 자석 배열 특성 비교를 위한 기준 모델로 선정하였다.

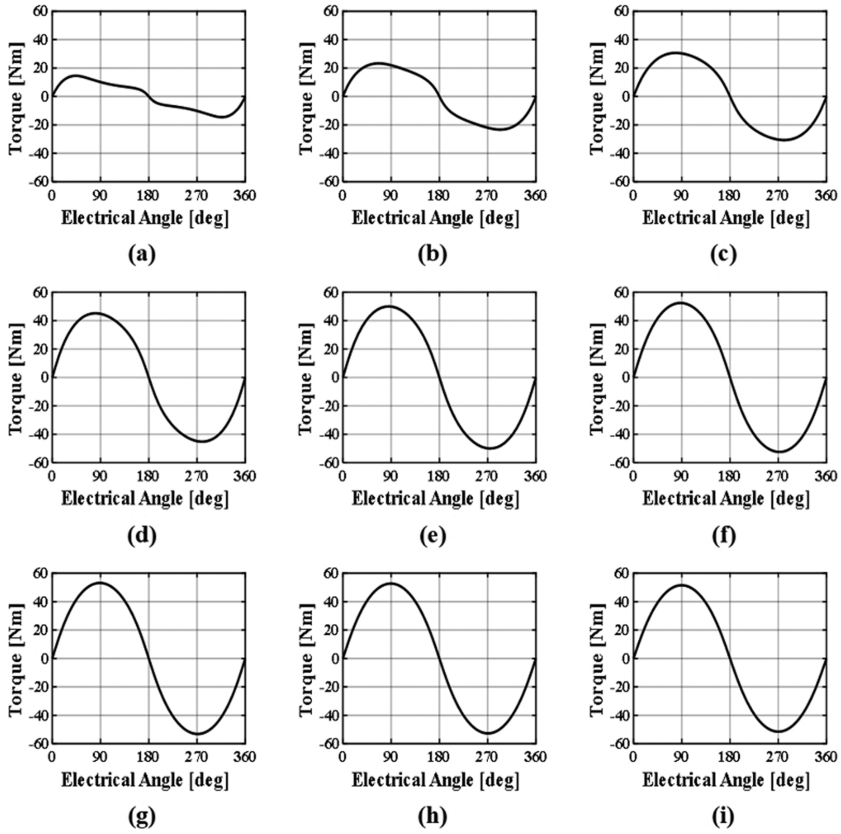


Fig. 4. Torque as a function of electrical angle for each number of poles: (a) 4, (b) 6, (c) 8, (d) 10, (e) 12, (f) 14, (g) 16, (h) 18, and (i) 20 poles.

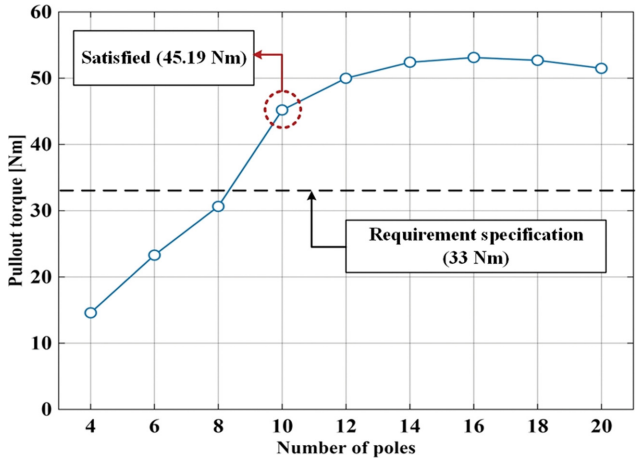


Fig. 5. (Color online) Pullout torque as a function of the number of poles.

Table II. Pullout torque according to the number of poles.

Number of poles	Pullout torque [Nm]	Requirement specification (33 Nm)
4	14.58	Not satisfied
6	23.30	Not satisfied
8	30.65	Not satisfied
10	45.19	Satisfied
12	50.00	Satisfied
14	52.40	Satisfied
16	53.12	Satisfied
18	52.70	Satisfied
20	51.50	Satisfied

3. 자석 배열의 조합에 따른 토크 특성 해석

평행 배열은 각 극이 한 개의 영구자석으로 구성되며, 각 자석의 자화 방향은 자석 중심에서의 반경 방향과 평행하도록 설정하였다. 할박 배열의 극당 자석 세그먼트 수는 자석 분할 수 증가에 따른 착자 공정의 복잡성과 조립성 등을 고려하여 2개의 기본 배열로 설정하였다. 이 경우 인접한 자석 세그먼트 사이의 자화각은 90°씩 변화하며, 2극당 4개의 세그먼트로 구성된다. 이에 따라 각 세그먼트 중심의 반경 방향을 기준으로 자화 방향이 순차적으로 변화하는 할박 배열을 구성하였다.

할박 배열 모델은 앞서 기준 모델로 선정한 10극 모델에 극당 2개의 세그먼트를 적용하여 구성하였으며, 회전자당 총 20개의 자석 세그먼트가 배치된다. 따라서, 각 자석 세그먼트가 차지하는 중심각은 18°가 된다. 또한, 동일한 형상 및 자석 사용량 조건에서 해석한 결과, 할박 배열 모델의 최대 전달 토크는 56.80 Nm로, 평행 배열 모델 대비 25.7% 증가하였다. 이를 통해 동일한 형상과 자석 사용량 조건에서도 자석의 자화 배열에 따라 최대 전달 토크가 크게 달라질 수 있음을 확인하였다.

전달 토크의 절대적인 크기만으로는 자석 사용량을 고려한 성능을 정량적으로 비교하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 자석 사용량 대비 전달 토크 성능을 평가하기 위해 단위 자석 질량당 최대 전달 토크로 정의되는 토크 밀도(τ_m)를 주요 평가 지표로 적용하였다. 자석 질량을 산출하기 위해 자석의 총 부피는 내측 및 외측 영구자석이 원주 방향으로 빈 공간 없이 배치된 조건에서 두 원통형 자석 영역의 체적 합으로 계산할 수 있으며, 이는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{mag} = \pi L_{stk}\left[(r_5^2 - r_4^2) + (r_3^2 - r_2^2)\right] \tag{3}$$

여기서 L_{stk}는 비접촉 영구자석 커플링의 적층 길이를 나타낸다. 본 해석 모델의 치수를 적용한 결과, 외측 회전자의 자석 체적은 2.986×10^{-5} m^3, 내측 회전자의 자석 체적은 2.307×10^{-5} m^{3}이며, 총 자석 체적은 5.293×10^{-5} m^{3}로 산출되었다. 여기에 영구자석 N42SH의 밀도(ρ) 7,500 kg/m^{3}를 적용하면 총 자석 질량은 약 0.397 kg으로 계산된다. 영구자석 질량 기준 토크 밀도는 식(4)와 같이 정의된다.

$$\tau_m = \frac{T_P}{\rho V_{mag}} \tag{4}$$

여기서 T_P는 최대 전달 토크를 나타낸다. 한편, 외형 크기가 서로 다른 커플링 간의 성능 비교를 위해, 최외측의 반지름인 외측 철심의 외반경을 기준으로 한 원기둥 체적을 커플링의 전체 체적으로 정의하였다. 최대 전달 토크를 전체 체적으로 나눈 체적 기준 토크 밀도(τ_d)는 식(5)와 같이 정의된다 [16].

$$\tau_d = \frac{T_P}{\pi r_6^2 L_{stk}} \tag{5}$$

본 모델의 전체 체적은 1.2367×10^{-4} m^{3}이며, 전체 체적에서 영구자석이 차지하는 비율은 42.8%이다. 본 연구에서 비교한 극호비를 적용하지 않은 평행 배열과 할박 배열 모델은 자석의 총 질량과 외형 치수가 동일하므로, τ_m과 τ_d의 증가율은 최대 전달 토크 증가율과 동일한 것으로 확인하였다. 이는 할박 배열의 적용을 통해 자석 사용량과 커플링의 외형 체적을 증가시키지 않고 자화 방향의 재배치만으로 단위 자석 질량 및 단위 체적당 최대 전달 토크를 향상시킬 수 있음을 보여준다.

앞서 내측 및 외측 회전자에 동일한 배열 방식을 적용한 평행 배열 모델과 할박 배열 모델의 특성을 비교하였다. 동축형 비접촉 영구자석 커플링에서는 내측 회전자와 외측 회전자의 자석 배열을 서로 독립적으로 구성할 수 있으므로, 두 회전자에 서로 다른 자석 배열을 적용한 혼합 조건의 특성을 추가로 검토할 필요가 있다. 이에 내측 및 외측 회전자에 적

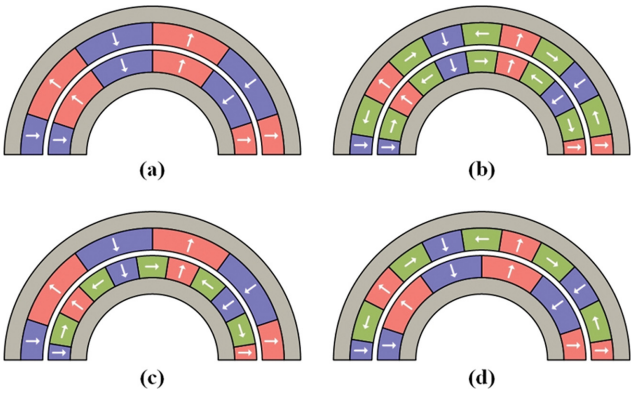


Fig. 6. (Color online) Magnetization directions of the four magnet arrangements: (a) PA-PA, (b) HA-HA, (c) HA-PA, and (d) PA-HA.

용되는 평행 배열(PA)과 할박 배열(HA)을 조합하여 총 4종류의 자석 배열 모델을 구성하고, 배열 조합에 따른 최대 전달 토크 및 자기적 특성을 비교하였다. 비교 모델은 내·외측 회전자 전체에 평행 배열을 적용한 PA-PA, 전체 할박 배열을 적용한 HA-HA, 내측 회전자에만 할박 배열을 적용한 HA-PA, 마지막으로 외측 회전자에만 할박 배열을 적용한 PA-HA로 구성하였다. 여기서 PA-PA와 HA-HA는 앞에서 해석을 수행한 평행 배열 모델과 할박 배열 모델에 각각 해당한다. 4종류의 모델에는 Table I의 10극 기준 모델의 형상 치수를 동일하게 적용하였다. 또한, 할박 배열이 적용된 회전자는 극당 2개의 세그먼트로 분할하였으며, 자석이 점유하는

Table III. Pullout torque and torque density according to the four magnet arrangements.

Model	Pullout torque [Nm]	τ_m [Nm/kg]	τ_d [kNm/m^3]
PA-PA	45.19	113.8	365.4
HA-PA	49.44	124.5	399.8
PA-HA	55.58	140.0	449.4
HA-HA	56.80	143.1	459.3

전체 영역은 평행 배열과 동일하게 유지하였다. 따라서 전체 모델의 자석 총 질량과 외형 체적은 동일하며, 자석 배열 조합에 따른 특성을 동일한 자석 사용량 및 외형 조건에서 비교하였다.

혼합 조건에서는 할박 배열이 적용된 회전자의 자속 집중 방향을 고려하여 자화 방향을 설정하였다. Fig. 6은 각 자석 배열 조합에 따른 영구자석 커플링 해석 모델을 보여준다. Fig. 7과 Fig. 8은 자석 배열 조합에 따른 토크 파형 결과와 자속밀도 분포를 보여준다. 또한, 최대 전달 토크와 토크 밀도에 대한 정량적 비교 결과를 Table III에 정리하였다. PA-PA 모델을 기준으로 최대 전달 토크는 HA-PA 모델에서 약 9.4%, PA-HA 모델에서 약 23%, HA-HA 모델에서 약 25.7% 증가하였으며, HA-HA 모델이 전체 조합에서 가장 높은 것으로 확인되었다. 또한, 전체 조합의 자석 총 질량 및 외형 체적이 동일하므로, 토크 밀도는 최대 전달 토크와 동일한 경향을 나타낸다. 특히 한쪽 회전자에만 할박 배열을 적용한 두 배열(HA-PA, PA-HA)만을 비교하면, PA-HA의 최대 전달

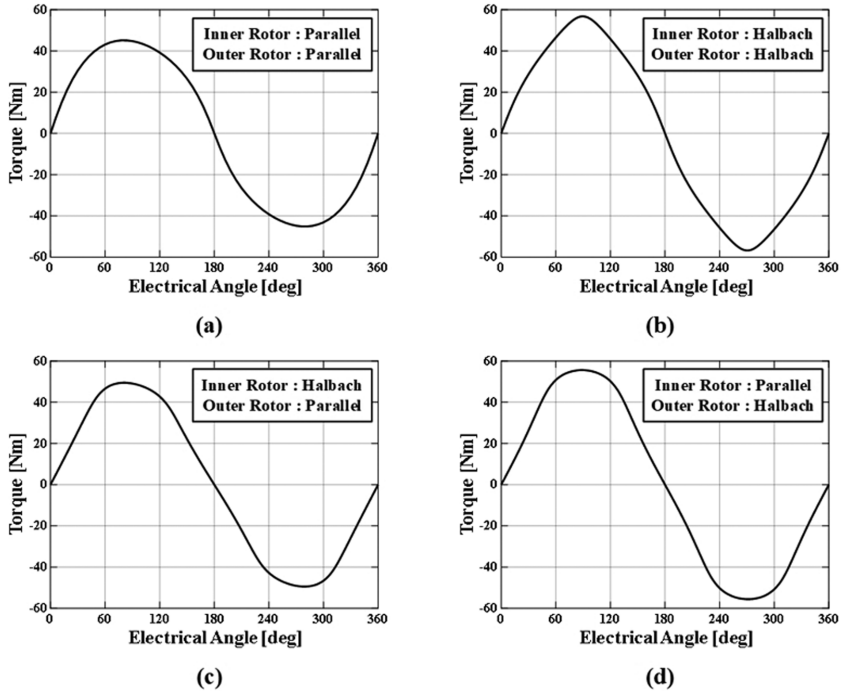


Fig. 7. Torque as a function of the electrical angle of the four magnet arrangements: (a) PA-PA, (b) HA-HA, (c) HA-PA, and (d) PA-HA.

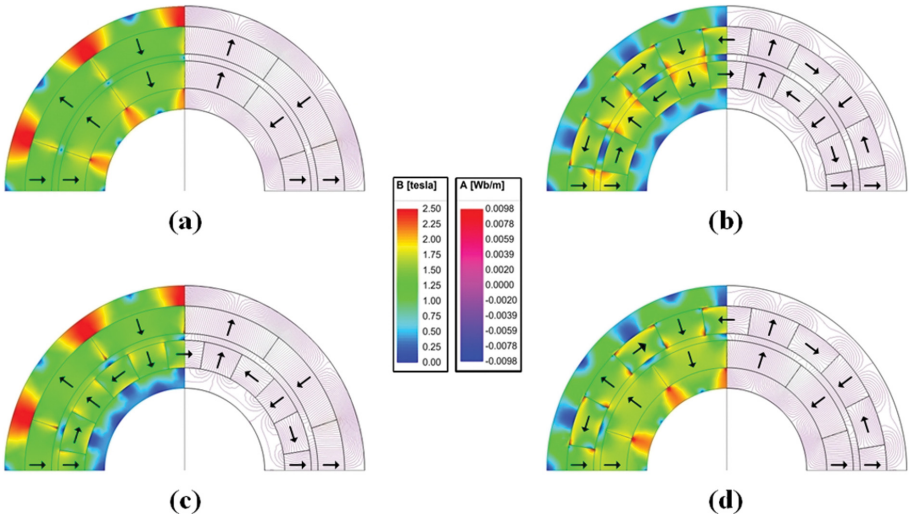


Fig. 8. (Color online) Magnetic flux density (left) and flux line (right) distributions of the four magnet arrangements: (a) PA-PA, (b) HA-HA, (c) HA-PA, and (d) PA-HA.

토크가 HA-PA 대비 약 6.14 Nm 높게 나타났다. 따라서 본 연구의 해석 조건에서는 할박 배열을 내측 회전자에 적용하는 것보다 외측 회전자에 적용하는 것이 최대 전달 토크 향상 면에서 더 효과적인 것으로 판단된다. 다만, 이러한 결과는 자석이 극 피치 전체를 점유하는 기본 배열 조건에 대한 것으로, 극호비와 반경 방향 자석 비율이 변화할 경우 두 혼합 조건의 상대적인 성능은 달라질 수 있다.

4. 극호비 및 종횡비에 따른 토크 특성 해석

앞 절의 해석은 자석의 극호비 1을 적용한 조건에서 배열의 영향을 비교한 결과이다. 본 절에서는 평행 배열의 극호비 및 할박 배열의 종횡비가 영구자석 커플링의 전달 토크 특성에 미치는 영향을 해석하였다. 평행 배열과 할박 배열의 극호비와 종횡비의 변수는 Fig. 2에 정의되어 있으며, 평행 배열의 극호비와 할박 배열의 종횡비는 식(6)과 (7)로 정의된다.

$$\gamma_{PA} = \frac{\theta_{mag}}{\theta_p} \tag{6}$$

$$\gamma_{HA} = \frac{\theta_{main}}{\theta_{main} + \theta_{aux}} \tag{7}$$

여기서 θ_p는 극 피치, θ_{mag}는 평행 배열 자석의 중심각, θ_{main}과 θ_{aux}는 각각 할박 배열의 종방향 자석과 횡방향 자석의 중심각이다. γ_{HA}가 0.5인 경우는 두 자석의 폭이 같은 조건을 의미하며, 할박 배열의 경우 γ_{HA}를 변화시켜도 종방향과 횡방향 자석 세그먼트가 극 피치 전체를 점유하므로 회전자의 자석 사용량은 변하지 않는다. 이에 따라 HA-HA 모델의 자석 총 질량은 모든 조건에서 0.397 kg으로 일정하다.

PA-PA 모델의 γ_{PA}에 따른 해석 결과는 Table IV와 같다.

Table IV. Pullout torque and torque density of the PA-PA model according to the pole arc ratio.

γ_{PA}	Pullout torque [Nm]	τ_m [Nm/kg]	τ_d [kNm/m^3]
1.0	45.19	113.8	365.4
0.9	47.26	132.3	382.1
0.8	**47.38**	149.2	383.1
0.7	45.01	162.0	363.9
0.6	39.31	**165.0**	317.9
0.5	29.30	147.6	236.9

Table V. Pullout torque and torque density of the HAHA model according to the radially magnetized segment arc ratio.

γ_{HA}	Pullout torque [Nm]	τ_m [Nm/kg]	τ_d [kNm/m^3]
0.5	56.80	143.1	459.3
0.55	59.47	149.8	480.9
0.6	**60.03**	**151.2**	485.4
0.65	59.60	150.1	481.9
0.7	58.75	148.0	475.0
0.75	57.61	145.1	465.8

최대 전달 토크는 γ_{PA}가 0.8일 때, 자석 질량 기준 토크 밀도 τ_m은 γ_{PA}가 0.6일 때 각각 최댓값을 나타냈다. 하지만 γ_{PA}가 0.6인 모델에서는 최대 전달 토크가 극호비 1 대비 약 13% 감소하였다. 반면, γ_{PA}가 0.7인 모델에서는 최대 전달 토크가 45.01 Nm로 기본 모델과 유사한 수준을 유지하면서 자석 질량은 30% 감소하여 τ_m이 42.3% 향상되었다. 따라서 최대 전달 토크와 τ_m을 최대화하는 γ_{PA}는 서로 다르며, 두 지표를 함께 고려할 경우 γ_{PA}가 0.7인 지점이 최적의 성능 조건으로 확인된다. HA-HA 모델의 γ_{HA}에 따른 해석 결과는 Table V와 같다. 최대 전달 토크는 γ_{HA}가 0.5에서 56.80

Nm이며, 종방향 자석의 비율을 증가시킨 0.6 모델에서는 5.7% 증가한 최댓값을 나타낸 후 다시 감소하였다. 이는 종방향 자석이 공극 자속을 직접 형성하고 횡방향 자석은 이 자속을 공극 쪽으로 집중시키는 역할을 하므로, 두 자석의 폭 배분에 따라 공극 자속의 크기가 달라지기 때문으로 판단된다. γ_{HA}의 변화에도 자석 총 질량은 일정하므로, 자석 사용량의 증가 없이 자석 세그먼트의 폭 배분을 조절하여 얻어진 결과이다. 이에 따라 τ_m도 약 5.7% 향상되었다.

내·외측 회전자의 혼합 조건(HA-PA, PA-HA) 모델에 극호비 및 종횡비를 적용한 해석을 통해 검토 범위 내에서 최적 조건을 선정하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 각각 회전자 배열 혼합에 따른 최대 전달 토크와 토크 밀도의 분포를 보여준다. 내측과 외측 회전자의 극호비와 종횡비를 독립 변수로 설정하여 해석하였으며, 극호비가 커질수록 최대 전달 토크가 최대가 되는 종횡비는 작아지는 경향을 확인할 수 있었다. 또한, PA-HA 모델에서의 최대 전달 토크는 극호비가 1인 조건에서 최댓값이 나타남을 확인할 수 있었다. Fig. 11은 회전자의 혼합 조건에 따른 최적의 최대 전달 토크 및 토크 밀도를 갖는 모델 형상을 보여준다. 두 혼합 조건의 최대 전달 토크 및

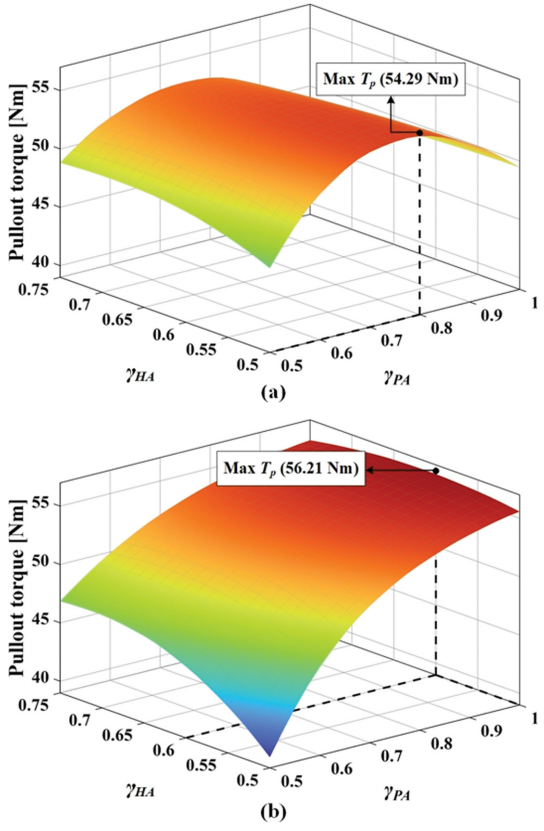


Fig. 9. (Color online) Pullout torque of the hybrid arrangements as a function of the pole arc ratio γ_{PA} and the radially magnetized segment arc ratio γ_{HA}: (a) HA-PA and (b) PA-HA.

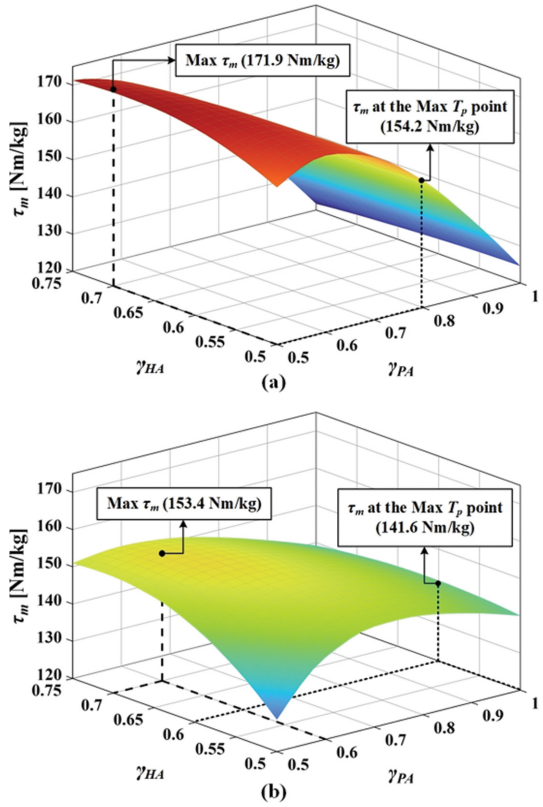


Fig. 10. (Color online) Magnet mass-based torque density of the hybrid arrangements as a function of the pole arc ratio γ_{PA} and the radially magnetized segment arc ratio γ_{HA}: (a) HA-PA and (b) PA-HA.

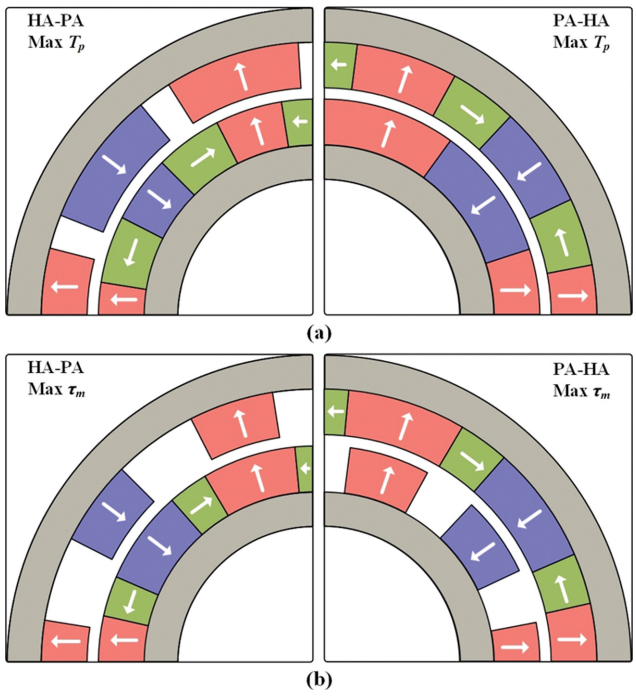


Fig. 11. (Color online) Cross-sections of the hybrid arrangements at the selected conditions: (a) maximum pullout torque, (b) maximum mass-based torque density.

Table VI. Pullout torque and torque density of the hybrid arrangements at the base and selected conditions.

Model	Condition	γ_{PA}	γ_{HA}	Pullout torque [Nm]	m_{mag} [kg]	τ_m [Nm/kg]	τ_d [kNm/m^3]
HA-PA	Base	1.0	0.5	49.44	0.397	124.5	399.8
	Max T_p	0.8	0.5	**54.29**	0.352	154.2	439.0
	Max τ_m	0.5	0.7	49.01	0.285	**171.9**	396.3
PA-HA	Base	1.0	0.5	55.58	0.397	140.0	449.4
	Max T_p	1.0	0.6	**56.21**	0.397	141.6	454.5
	Max τ_m	0.6	0.7	50.27	0.328	**153.4**	406.5

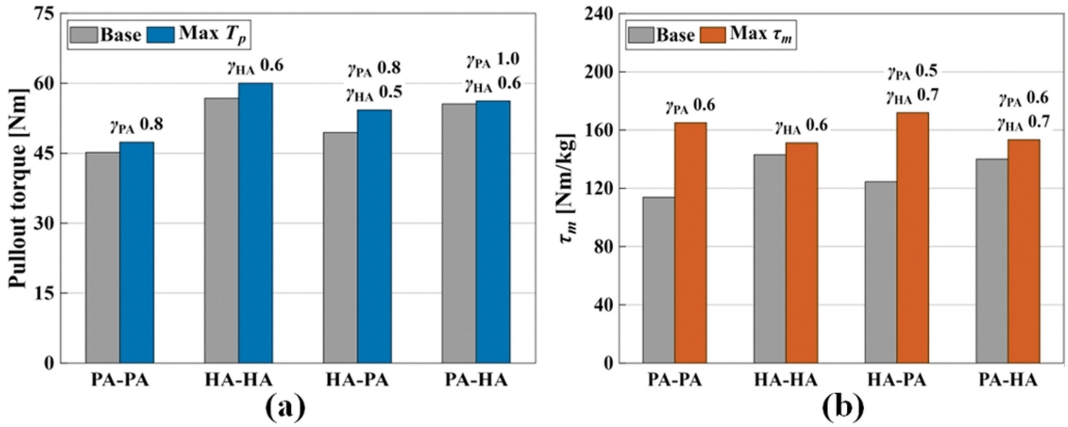


Fig. 12. (Color online) Comparison of the four magnet arrangements at the base and selected conditions: (a) pullout torque and (b) torque density based on magnet mass. Base denotes γ_{PA} = 1.0 for parallel arrays and γ_{HA} = 0.5 for Halbach arrays.

토크 밀도가 각각 최대가 되는 조건의 결과는 Table VI에 정리하였다. 최대 전달 토크는 HA-PA 모델이 γ_{PA} 0.8, γ_{HA} 0.5에서, PA-HA 모델이 γ_{PA} 1.0, γ_{HA} 0.6에서 가장 높았으나, 두 모델 모두 γ_{HA} 0.6을 적용한 HA-HA 모델에는 미치지 못하였다. 자석 질량 기준 토크 밀도는 HA-PA 모델이 γ_{PA} 0.5, γ_{HA} 0.7에서, PA-HA 모델이 γ_{PA} 0.6, γ_{HA} 0.7에서 가장 높았으며, 이 중 HA-PA 모델의 값이 검토한 모든 모델 중 가장 높았다. 이 HA-PA 모델은 HA-HA 0.6 모델보다 자석 총 질량이 약 28% 적으면서도 목표 최대 전달 토크를 만족한다. Fig. 12는 4종의 자석 배열의 기준 조건과 최적 조건에서의 최대 전달 토크와 토크 밀도를 비교한 것이다.

III. 결 론

본 논문은 전동기 성능 시험용 다이나모 시스템에 적용하기 위한 동축형 비접촉 영구자석 커플링을 대상으로, 자석 배열의 조합과 극호비 및 종횡비에 따른 최대 전달 토크와 토크 밀도 특성을 2차원 유한요소해석으로 분석하였다. 먼저 외형 치수를 고정한 상태에서 극수에 따른 최대 전달 토크를 비교하여, 목표 최대 전달 토크를 만족하는 최소 극수인 10극 모델을 기준 모델로 선정하였다. 이어서 내측과 외측 회전자에 평행 배열과 할박 배열을 조합한 네 가지 모델을 동일한 자석 사용량과 외형 조건에서 비교하였다. 그 결과 PA-PA 모델 대비 최대 전달 토크는 모두 증가하였으며, 한쪽 회전자에만 할박 배열을 적용하는 경우에는 내측보다 외측에 적용하는 것이 더 효과적이었다. 더 나아가 극호비와 종횡비를 변화시킨 결과, PA-PA 모델에서는 극호비를 줄여 자석 사용량을 낮추면서도 기준 모델 수준의 최대 전달 토크를 유지할 수 있었고, HA-HA 모델에서는 종횡비 0.6에서 자석 사용량의 증가 없이 최대 전달 토크가 증가하였다. 혼합 조건에서는 최대 전달 토크가 최대인 조건과 자석 질량 기준 토크 밀도가 최대인 조건이 서로 달랐다. 검토한 조건 중 최대 전달 토크는 종횡비를 적용한 HA-HA 모델이, 자석 질량 기준 토크 밀도는 극호비와 종횡비를 적용한 HA-PA 모델이 가장 높았다. 이 HA-PA 모델은 HA-HA 모델보다 자석 총 질량이 적으면서도 목표 최대 전달 토크를 만족한다. 따라서 최대 전달 토크를 우선하는 경우에는 HA-HA 모델을, 자석 사용량 절감을 우선하는 경우에는 HA-PA 모델을 적용하는 것이 유리하며, 설계 목적에 따라 할박 배열의 적용 위치와 극호비 및 종횡비를 함께 선정할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 2026년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가

원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2026-25523851, 산업용 소형모터 및 드라이브 성능평가를 위한 AI기반 엔드-투-엔드 자동화 시험기술개발).

References

[1] Y. Akcay, P. Giangrande, C. Gerada, and M. Galea, Proc. 10th Int. Conf. Power Electronics, Machines and Drives (2020) pp. 385~390.
[2] H. B. Kang, J. Y. Choi, H. W. Cho, and J. H. Kim, IEEE Trans. Magn. **50**, 8600604 (2014).
[3] J. Y. Choi, H. J. Shin, S. M. Jang, and S. H. Lee, IEEE Trans. Magn. **49**, 3921 (2013).
[4] Z. Q. Zhu, Proc. Power Conversion Conference (2007) pp. K-9~K-16.
[5] J. F. Charpentier and G. Lemarquand, IEEE Trans. Magn. **35**, 4206 (1999).
[6] D. Som, K. Li, J. Kadel, J. Wright, S. Modaresahmadi, J. Z. Bird, and W. Williams, IEEE Trans. Magn. **53**, 8112206 (2017).
[7] H. Y. Wong, H. Baninajar, B. W. Dechant, P. Southwick, and J. Z. Bird, IEEE Trans. Energy Convers. **38**, 507 (2023).
[8] M. Johnson, M. C. Gardner, and H. A. Toliyat, Proc. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (2015) pp. 108~114.
[9] K. Li and J. Z. Bird, Proc. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (2016) pp. 1448~1454.
[10] K. Li, J. Z. Bird, and V. M. Acharya, IEEE Trans. Magn. **53**, 8106304 (2017).
[11] M. C. Gardner, M. Johnson, and H. A. Toliyat, Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (2019) pp. 3129~3136.
[12] M. Galea, L. Papini, H. Zhang, C. Gerada, and T. Hamiti, IEEE Trans. Magn. **51**, 8107309 (2015).
[13] Y. Ni, Z. Liu, B. Xiao, and Q. Wang, IEEE Trans. Energy Convers. **35**, 1877 (2020).
[14] B. Cheng and G. Pan, Math. Probl. Eng. **2018**, 7627326 (2018).
[15] J. Kim, M. H. Yoon, and J. J. Lee, Proc. KIEE Spring Conference (2023) pp. 93~94.
[16] K. K. Uppalapati, M. D. Calvin, J. D. Wright, J. Pitchard, W. B. Williams, and J. Z. Bird, IEEE Trans. Ind. Appl. **54**, 1331 (2018).