

A Study on a 2-D Electromagnetic Analysis Method for a Bearingless Motor Considering Leakage Flux

Min-Mo Koo*

Department of Purpose-Built Mobility Group, Korea Institute of Industrial Technology, Gwangju 61012, Korea

(Received 4 June 2025, Received in final form 31 July 2025, Accepted 1 August 2025)

In high-cleanliness and high-reliability industrial fields such as semiconductors and chemicals, the bearingless motor (BLM), which enables lubrication-free and contactless operation, has emerged as a promising alternative. The BLM adopts a disk-shaped rotor and a stator with a bent-teeth structure, offering a compact configuration and passive magnetic stabilization. However, due to the flat rotor geometry, significant axial and radial end leakage flux occurs at the rotor and stator edges, which strongly affects electromagnetic analysis. These end leakage flux components cannot be accurately reflected using conventional two-dimensional finite element analysis (2-D FEA), and thus three-dimensional analysis is generally required. Nevertheless, three-dimensional finite element analysis (3-D FEA) consumes excessive computational resources and time, making it inefficient for repeated simulations during the early design stage. This study proposes a 2-D FEA method that incorporates a permeability factor to account for end leakage flux paths based on the structural characteristics of the BLM. The proposed method achieves accuracy comparable to 3-D FEA while significantly improving computational efficiency, making it suitable for effective application in the early-stage design optimization and electromagnetic performance prediction of BLMs.

Keywords : Bearingless motor, Finite element analysis (FEA), Leakage flux, Permeance factor, Electromagnetic analysis

누설자속을 고려한 베어링리스 모터의 2차원 전자기 해석 기법 연구

구민모*

한국생산기술연구원 목적기반모빌리티그룹, 광주광역시 첨단과기로 208번길 6, 61012

(2025년 6월 4일 받음, 2025년 7월 31일 최종수정본 받음, 2025년 8월 1일 게재확정)

고청정 및 고신뢰성의 펌프 시스템을 필요로 하는 반도체 및 화학 산업 분야에서는 비윤활-무마찰 구동이 가능한 베어링리스 모터(Bearingless Motor, BLM)가 유망한 대안으로 주목받고 있다. 베어링리스 모터는 디스크 박형의 회전체와 굽은 치 구조의 고정자를 채택하여 컴팩트한 구조와 자기적 수동 안정성을 제공하지만, 베어링리스 모터의 특성상 축방향 및 반경방향 말단에서 발생하는 누설 자속이 전자기 해석에 큰 영향을 미친다. 이러한 단부 누설 자속은 기존의 2차원 유한요소해석(2-D FEA)으로는 정밀하게 반영되기 어렵기 때문에 3차원 해석이 필요하다. 하지만 3차원 유한요소해석(3-D FEA)은 계산 자원과 해석 시간이 과도하게 소모되어, 초기 설계 단계에서의 반복 해석을 수행하기에는 비효율적일 수 있다. 본 연구에서는 BLM의 구조적 특성을 고려하여, 단부 누설 자속 경로로 보정된 퍼미언스 계수를 적용한 2-D FEA 기법을 제안하였다. 제안된 해석법은 3-D FEA에 준하는 정확도를 확보하면서도 높은 계산 효율성을 제공하며, 베어링리스 모터의 설계 최적화 및 전자기 성능 예측에 효과적으로 적용할 수 있다.

주제어 : 베어링리스 모터, 유한요소해석, 누설 자속, 퍼미언스 계수, 전자기 해석

I. 서 론

최근 반도체, 바이오 의약품, 정밀화학 및 첨단 의료 기기 산업을 중심으로 고정밀, 고정밀, 고신뢰성 운전이 가능한 펌프 시스템에 대한 수요가 급증하고 있다. 이러한 응용 분야에서는 윤활유의 사용 또는 회전체와 베어링 간의 접촉으로 인해 입자 마모 및 시스템 내부 오염이 발생할 수 있는 기계식 시스템을 적용할 경우, 공정 불량이나 제품 손상으로 이어질 우려가 있다. 또한, 기계식 베어링 기반의 펌프는 마찰에 따른 발열, 마모로 인한 수명 저하, 복잡한 유지보수 등의 제약이 존재하여 고정밀 환경에 적합하지 않다. 이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로서, 회전체를 자기력으로 부상시켜 비접촉 회전을 구현하는 베어링리스 모터(Bearingless Motor, BLM)가 최근 다양한 분야에서 주목받고 있다. BLM은 토크를 발생시키는 동시에 회전체를 비접촉으로 공중에 자기부상시키는 기능을 일체화한 펌프용 전자기 구동 시스템으로, 별도의 기계식 제어 장치를 사용하지 않는다는 특징이 있다. 이를 통해 마찰에 의한 기계적 손실과 마모가 발생하지 않으며, 윤활유 등의 소모품이 불필요하여 장기간에 걸쳐 안정적인 운전이 가능하며 유지보수 부담이 현저히 감소한다. 특히, 베어링리스 슬라이스 모터(Bearingless slice motor, BLSM)는 디스크 박형 회전체 구조를 채택하여 토크 및 축 방향의 수동 자기 안정화를 구현할 수 있으며, 이러한 방식은 제어 시스템의 복잡성을 줄이면서도 고속 회전 조건에서의 안정적인 운전을 가능하게 한다. 구조적으로도 단순하여 소형화 및 경량화에 유리하며, 고정밀 및 고신뢰성 응용 환경에 적합한 장점을 갖는다[1-6].

BLSM은 컴팩트한 구조 구현을 위해 고정자가 굽은 치(bent teeth)형태의 구조를 적용하여 반경 치수를 최소화한다. 특히, 슬라이스의 박형 타입의 모터 구조 특성상 축방향 및 반경방향으로 누설자속(axial and radial end leakage flux)과 프린지 자속(fringe flux)이 발생하게 된다. 이러한 3차원 자속 경로의 영향은 2차원 유한요소해석(2-D Finite Element Analysis, 2-D FEA) 만으로는 정확하게 반영하기 어렵기 때문에, 전자기 성능 예측에 본질적인 한계가 존재한다. 따라서, BLSM의 전자기 특성을 정밀하게 분석하기 위해서는 3차원 유한요소해석(3-D FEA) 기반의 해석이 필수적이다. 그러나 3-D FEA는 높은 계산 복잡도와 컴퓨팅 자원 소모가 요구되며, 다수의 설계 변수에 대한 반복 해석이 필요한 설계 초기 단계에서는 분석 시간이 과도하게 증가하는 문제가 있다. 특히, 반복적 구조 비교 및 민감도 분석이 수반되는 개념 설계 단계에서는 이러한 시간 소모로 인해 설계 최적화 과정이 지연될 수 있는 비효율성이 발생한다.

회전자와 고정자 단부에서 발생하는 자속 누설이 전체 자속

대비 무시할 수 없는 수준의 모터는 3차원 해석의 수행이 필수적이다. 이를 고려하지 않을 경우, 2-D FEA 기반의 성능 예측은 3-D FEA 또는 실험 결과와 큰 오차를 유발할 수 있다. 최근에는 박형 구조를 갖는 영구자석 동기모터(PMSM)에서, 축방향으로 발생하는 누설자속과 프린지 자속의 영향을 2-D FEA에 반영하고자 하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. Chen *et al.*은 영구자석 모터의 단순화된 자계회로 모델을 기반으로 누설 자속의 영향을 제한적으로 해석하였으며, Jung *et al.*과 Shin *et al.*은 축방향 자속 누설 경로를 고려하기 위해 2차원 자계 회로 모델에서의 퍼미언스를 이론적 기반으로 조정하는 방법을 제안하였다. 이와 같은 접근 방식은 기존 2차원 해석의 계산 효율성과 3차원 해석의 정밀도 간의 균형을 도모할 수 있다는 점에서 주목받고 있다[7-11].

본 연구에서는 선행연구들을 바탕으로 BLSM의 구조적 특성을 고려한 2-D FEA 기법을 제안하였다. 특히, 박형 구조 및 고정자의 굽은 치 구조로 인해 발생하는 축방향 및 반경 방향 단부 자속 경로를 분석하고, 이를 2-D FEA 모델에 반영하기 위한 보정된 퍼미언스 모델을 유도하였다. 또한, 기존 문헌에선 고려하지 않은 영구자석에서의 누설효과를 고려하기 위해 회전자 영역에도 보정 퍼미언스 모델을 적용하였다. 제안된 해석 방법은 3-D FEA에 준하는 자속 분포 및 성능 예측을 확보하면서도, 반복적 구조 비교나 민감도 분석이 필요한 설계 초기 단계에서 해석 시간 및 계산 자원 소모를 효과적으로 절감할 수 있도록 구성하였다. 이를 통해 BLSM의 전자기 성능을 신속하고 정밀하게 예측할 수 있는 2-D FEA 기법을 제공하였다.

II. 누설효과를 고려한 베어링리스 모터의 2차원 해석 기법

1. 해석 모델

본 논문의 해석 기법을 위해 설정한 베어링리스 모터는 Fig. 1과 같이 디스크 형태의 회전체를 갖는 베어링리스 슬라이스 모터로, 공중 부상 제어와 회전 토크를 동시에 구현할 수 있는 구조를 가진다. 베어링리스 슬라이스 모터의 해석 모델은 회전자, 고정자, 구동 및 부상용 결합 권선 등으로 구성된다. 회전자는 공심형의 영구자석으로 구성되며, 고정자는 굽은 치 구조를 적용하여 반경 방향의 모터 사이즈를 최소화한 컴팩트한 구조를 적용하였다. 해석에 적용된 모터는 2극 8슬롯 구조의 2상 베어링리스 모터로, 구동용 권선과 부상용 권선이 결합된 단일 코일을 통해 고정자 자계를 발생시키도록 배치되어 있다. 특히, 슬라이스 형태의 박형 회전자와 굽은 치 구조의 고정자는 축방향 및 반경방향의 단부에서 누설 자속과 프린지 자속이 유발되는 구조적 특성을 가지며, 이러한

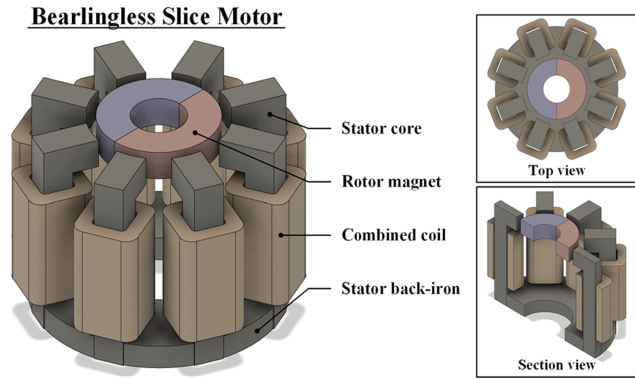


Fig. 1. (Color online) Structure and analysis model of the bearingless slice motor.

자속 경로는 전자기 해석의 정밀도에 유의미한 영향을 미치는 주요 요인 중 하나로 작용한다. 또한, 해석 모델의 형상 및 권선 배치에 대한 이해를 돕기 위해, Top view 및 Section view를 Fig. 1에 함께 제시하였으며, 이를 통해 본 논문에서 설정한 베어링리스 모터의 전체 구조 및 자계 경로

특성을 도식적으로 설명하였다.

2. 3차원 자계 분포 해석

베어링리스 슬라이스 모터의 자속 경로는 회전자와 고정자의 단부 형상, 공극 구조, 권선 배치 등에 따라 3차원으로 복잡하게 형성되며, 특히 축방향 및 반경방향 단부에서 누설 자속 및 프린지 자속이 발생된다. 이러한 3차원 자속 경로를 확인하기 위해, 본 논문에서는 3-D FEA를 기반으로 무부하 및 부하 조건에서의 자속 밀도 분포를 확인하였다.

Fig. 2는 무부하 조건에서의 베어링리스 모터와 모터 주변 영역에 형성된 자속 밀도 분포를 보여준다. 공심형으로 구성된 2극의 회전자 내 영구자석에서 발생한 자속은 고정자로 직접 전달되지 못하고, 회전자 내부 및 상하단 단부에서 공기 중으로 누설되는 양상이 확인된다. 특히 고정자 철심이 포화되지 않은 무부하 조건에서는 영구자석의 축방향 누설 자속의 영향이 뚜렷하게 확인된다.

반면, Fig. 3은 구동 전류가 인가된 부하 조건에서의 자속 밀도 분포를 보여준다. 부하 조건에서는 구동 권선에 의해 고

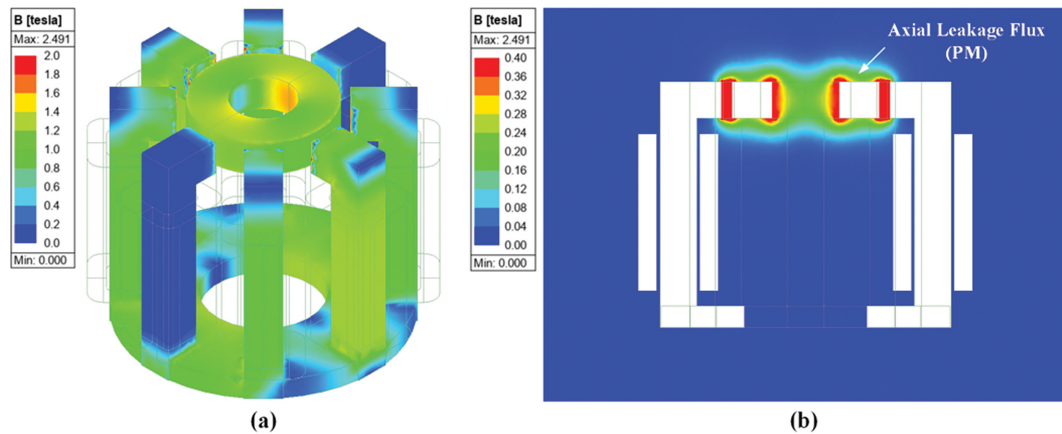


Fig. 2. (Color online) Magnetic flux density and leakage flux distribution at no-load condition.

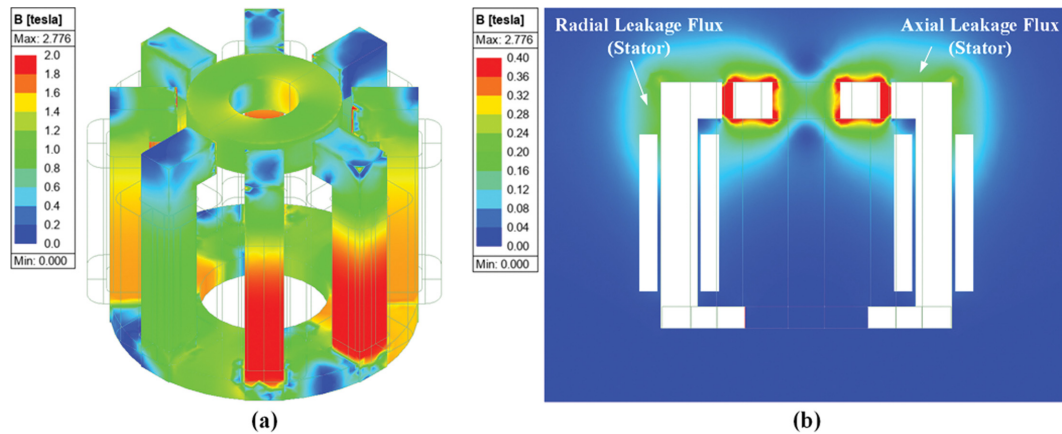


Fig. 3. (Color online) Magnetic flux density and leakage flux distribution at load condition.

정자 철심과 요크 부근이 포화되며, 이에 따라 축방향 누설 자속뿐만 아니라 반경방향 누설 자속도 발생됨을 확인하였다. 고정자 외곽 공기 중에서도 누설 자속이 광범위하게 확산되는 분포를 보이며, 이는 2차원 해석 모델로는 정밀하게 반영하기 어려운 특성이다. 따라서, 3차원 해석 결과를 통해 확인된 박형 및 굽은 치 구조를 갖는 베어링리스 슬라이스 모터는 단부 자속의 영향이 크며, 누설 자속 경로를 반영한 보정된 2차원 해석 모델의 제안이 필요하다.

3. 3차원 해석결과를 반영한 자속 경로 모델링

앞서 설명한 베어링리스 슬라이스 모터는 고정자에 굽은 치 형상이 적용되어 있으며, 이에 따라 반경 방향의 고정자에서는 축방향 누설 자속이 발생되고, 축방향의 고정자에서는 반경방향 누설 자속이 발생하는 것으로 확인하였다. 이러한 구조적 특성을 반영한 베어링리스 슬라이스 모터의 고정자와 회전자 3차원 누설 자속 경로는 Fig. 4와 Fig. 5로 모델링된다. 각각의 주자속 및 누설자속 경로를 고려한 퍼미언스 및 퍼미언스 계수는 선행연구의 이론적 기초[7-11]와 베어링리스 모터의 구조 특성을 고려하여 제안되었다.

Fig. 4는 고정자의 구조 파라미터와 자속 경로를 함께 나타낸 것으로, 주자속 경로에 해당하는 퍼미언스(P_{s_main})와 누설 자속 경로의 퍼미언스(P_{s_leak1} , P_{s_leak2})로 분리되어 구성된다. 이 중 주자속 경로의 퍼미언스는 구동 및 부상용 권선에 의해 형성된 자속이 고정자의 슬롯 내부부를 통해 흐르는 경로이며, 기존 2차원 해석 모델의 퍼미언스를 의미한다. 반면, 누설 자속 경로의 퍼미언스는 각각 고정자 치 단부와 슬롯외곽을 통해 흐르는 누설 자속에 해당하는 퍼미언스로, 이들은 3차원 누설 효과를 고려하여 보정된 2차원 퍼미언스 계수로

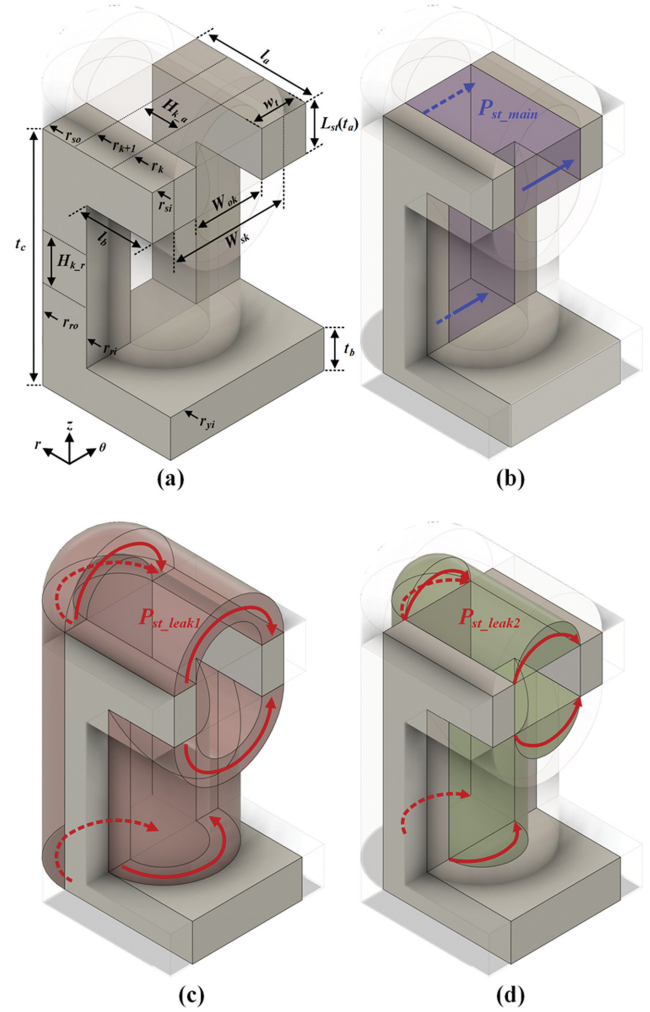


Fig. 4. (Color online) Stator modeling: (a) stator dimensions, (b) main flux path in the slot, (c) leakage flux path of stator surface and (d) leakage flux path of stator edge.

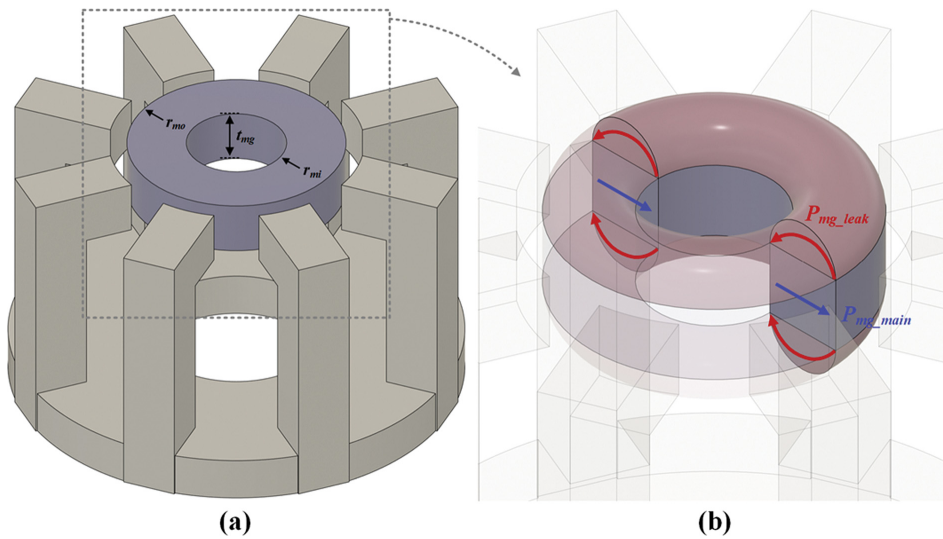


Fig. 5. (Color online) Rotor modeling: (a) dimensions of rotor PM and (b) main and leakage flux paths of PM.

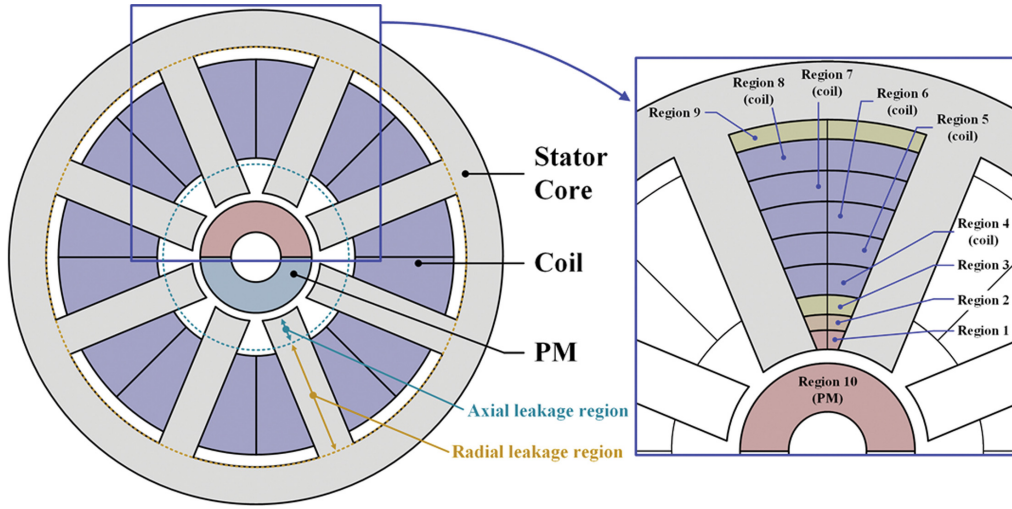


Fig. 6. (Color online) Equivalent 2-D FEA model of the bearingless slice motor and region classification.

새롭게 반영된다.

Fig. 5는 회전자 내 영구자석에서 발생하는 자속 경로를 나타낸다. 주자속 퍼미언스(P_{m_main})은 공극을 통해 고정자로 전달되는 자속 경로가 반영되며, 누설 자속 퍼미언스(P_{m_leak})는 회전자 단부에서 주변 공기 중으로 누설되는 경로가 반영된다. 앞서 제시한 3-D FEA 결과를 통해, 공심형 영구자석 구조에서는 이러한 누설 자속 경향이 뚜렷하게 나타나므로 본 논문에서는 회전자 영구자석 및 주변의 누설 자속 경로를 반영하였다. Fig. 4와 Fig. 5에서 정의된 주자속과 누설자속의 경로에 따른 퍼미언스는 식(1)~(3)으로 정의된다. 여기서, a , r 과 mag 의 각각 축방향, 반경방향, 영구자석에서 발생하는 누설 경로를 고려한 퍼미언스의 구분 기호를 의미한다. 도출된 퍼미언스를 고정자의 축방향, 반경방향 및 회전자 영구자석의 축방향의 보정된 퍼미언스 계수로 유도하면 각각 식(4)~(6)과 같이 도출된다. 이는 다음에서 다루는 2차원 등가 해석 모델의 슬롯 영역에 적용된다. 여기서, $H_{k_a,r,mg}$, $W_{sk_a,r,mg}$, $W_{ok_a,r}$ 및 L_{st} 는 각각 각 퍼미언스 계산 영역의 길이, 단부 간의 간격 길이, 고정자 철심 기준의 간격 길이 및 적층 길이를 의미한다. 또한, 식(5)에서는 2차원 해석 모델의 등가화에 따른 회전방향으로 슬롯의 길이가 증가되는 수치적 보상을 위해, 2차원 모델의 반경 방향에 따른 슬롯 길이를 보정할 수 있도록 고려하였다.

$$P_{mk_a,r,mg} = \mu_0 \frac{H_{k_a,r,mg} L_{st}}{W_{ok_a,r,mg}} \quad (1)$$

$$P_{sk_a,r,mg} = 0.264 \mu_0 H_{k_a,r,mg} \quad (2)$$

$$P_{tk_a,r} = \frac{\mu_0 (W_{sk_a,r} - W_{ok_a,r}) H_{k_a,r}}{\pi W_{sk_a,r}} \quad (3)$$

$$\mu_{rfk_a} = \frac{P_{mk_a} + 2P_{sk_a} + 2P_{tk_a}}{P_{mk_a}} \quad (4)$$

$$\mu_{rkf_r} = \frac{P_{mk_r_c} + P_{sk_r_{ri}} + P_{sk_r_{ro}} + P_{tk_r_{ri}} + P_{tk_r_{ro}}}{P_{mk_r_c}} \left[1 + \frac{k(k+a)H_{k_r}}{2r_c} \right] \quad (5)$$

$$\mu_{rfk_mg} = \frac{P_{mk_mg} + 2P_{sk_mg}}{P_{mk_mg}} \quad (6)$$

4. 2차원 등가 해석 모델

Fig. 6은 3차원 자속 경로 분석 결과와 퍼미언스 계수를 반영하여 구성된 베어링리스 모터의 2차원 등가 해석 모델을 보여준다. 제안된 2차원 등가 모델에서 고정자의 슬롯영역은 총 9개의 세부 영역으로 구분되며, 이는 고정자의 굽은 치 구조, 코일 배치, 공극 영역 등 물리적 형상과 자속 경로 특성을 기준으로 정의되었다. 회전자에서의 주자속 및 누설 자속 경로를 반영하기 위해 회전자 영구자석 영역을 10번째 영역으로 해석 모델에 적용하였다. 각 퍼미언스 요소는 앞에서 정의된 주 자속 경로 및 누설 자속 경로로 부터 유도된 퍼미언스 계수에 따라 설정되며, 이를 통해 3차원 누설 효과를 반영한 등가 2차원 해석 모델을 구성할 수 있다. 고정자의 굽은 치 형상에 따른 2차원 해석 모델에서 등가 길이를 반영하였다.

III. 2차원 등가 모델의 해석결과 및 비교검증

1. 무부하 및 부하 자계 해석 결과

Fig. 7과 Fig. 8은 퍼미언스 계수를 적용하지 않은 등가 해석 모델과 제안된 보정 퍼미언스 계수를 적용한 등가 해석 모델에서 무부하 조건 및 부하 조건의 자계 해석 결과는 보

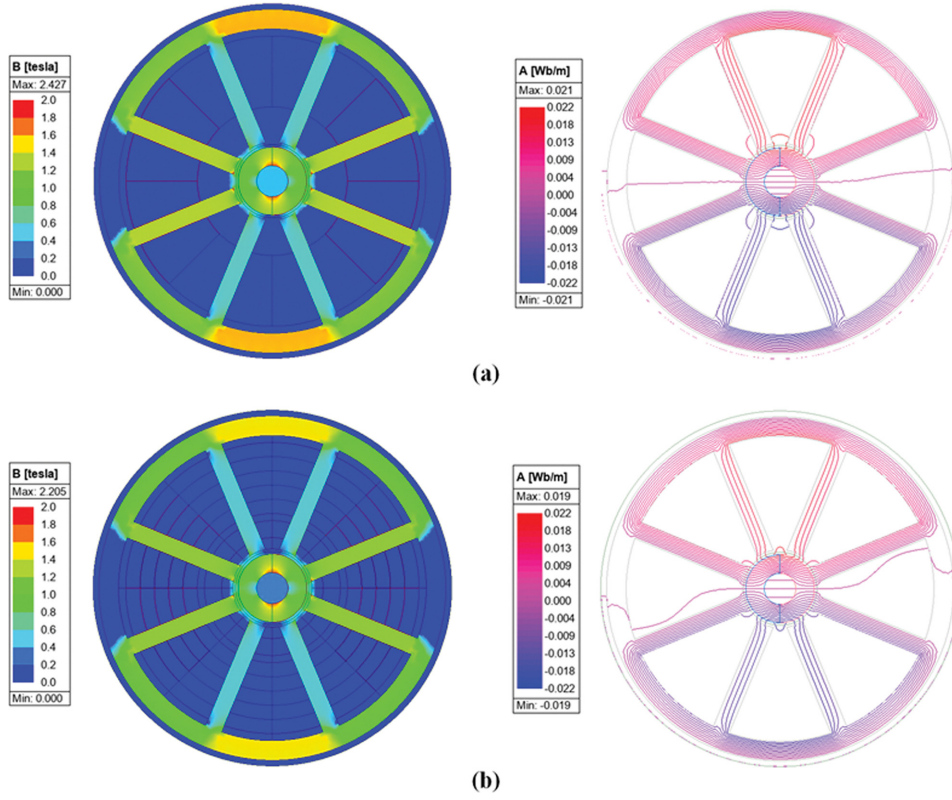


Fig. 7. (Color online) Magnetic field analysis results under no-load condition: (a) conventional 2-D FEA and (b) proposed 2-D FEA.

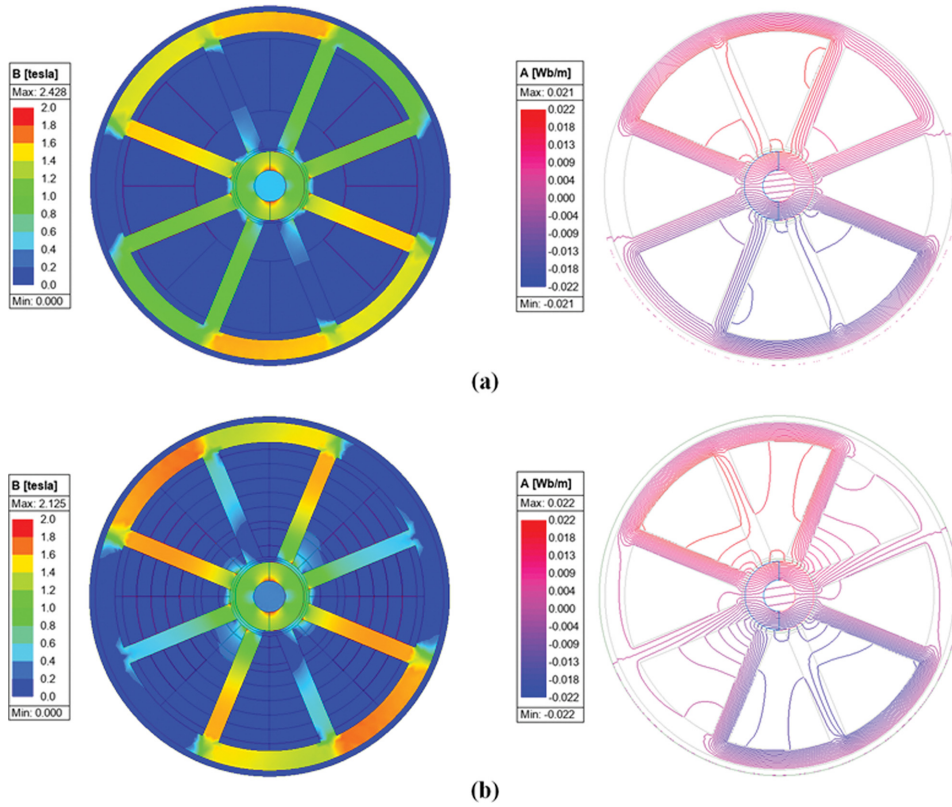


Fig. 8. (Color online) Magnetic field analysis results under load condition ($I = 10A_{pk}$): (a) conventional 2-D FEA and (b) proposed 2-D FEA.

Table I. Specifications of the bearingless slice motor.

Parameter	Value	Parameter	Value
r_{so}	47.5 mm	w_t	12 mm
r_{si}	27.5 mm	l_a	20 mm
r_{yi}	20 mm	l_b	8 mm
r_{mo}	24 mm	l_c	12 mm
r_{mi}	11 mm	air gap	3.5 mm
L_{st}, t_a, t_m	12 mm	N_s	8
t_b	8 mm	n_a	3
t_c	80 mm	n_r	6
turns per coil	100	rotor speed	1,000 rpm
rated current	5 A _{pk}	max current	10 A _{pk}

여준다. Table I은 해석에 적용된 베어링리스 슬라이스 모터의 사양을 보여준다. 여기서, 모터의 정격 전류 사양은 공냉식 모터에 일반적으로 적용되는 5 A/mm²을 기준으로 산정하였으며, 최대 전류는 정격 전류의 2배로 적용하였다.

Fig. 7(b)는 제안된 퍼미언스 계수를 반영한 무부하 조건의 해석 결과로, 퍼미언스 계수를 적용하지 않은 해석 결과(Fig. 7(a))와 비교해서 회전자 영구자석 단부에서 공기중으로 누설되는 자속 효과가 반영되는 것을 확인하였다. 또한, 영구자석의 공심 부분에서 자속이 감소하는 경향이 표현되었음을 확인하였다. 이러한 자속 분포 특성은 무부하 역기전력의 크기 및 파형 특성에 직접적인 영향을 미칠 것으로 판단된다. Fig. 8(b)는 제안된 퍼미언스 계수를 적용한 부하 조건($I = 10A_{pk}$)의 해석 결과로, 퍼미언스 계수를 적용하지 않은 해석 결과(Fig. 8(a))와 비교해서 고정자의 슬롯 상단 및 코일 하단 영역 등에서의 누설 자속이 보다 명확히 반영된 것을 확인하였다. 이와 같은 누설 자속의 반영은 부하 운전 시 토크의 크기 및 파형에 영향을 줄 수 있는 중요한 요인으로 해석된다. 따라서, 제안된 등가2차원 해석 모델은 누설 자속 경로를 효

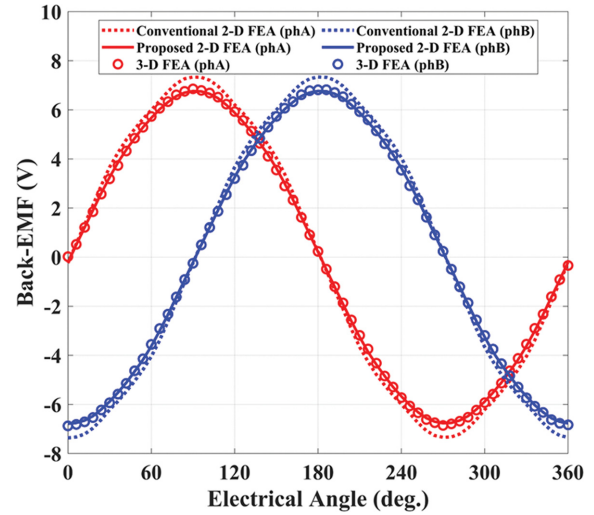


Fig. 9. (Color online) Comparison of back-EMF under no-load condition at 1,000-rpm.

과적으로 고려하였으며, 기존의 퍼미언스 계수를 적용하지 않은 2차원 해석 모델과 비교해서 누설 효과를 반영하는 것을 확인하였다.

2. 역기전력 및 부하 토크 해석 결과

Figs. 9~11은 논문에서 제안한 2차원 해석 기법의 정량적 정확도를 검증하기 위해 무부하 역기전력, 부하 전류에 따른 토크와 정격 및 최대 전류 조건에서의 토크 파형 비교한 해석결과를 보여준다. Table II에서 Figs. 9~11의 해석 결과에 대한 정량적 수치를 보여준다. 각 결과는 기존의 일반적인 2차원 해석, 제안된 보정 퍼미언스 기반 2차원 해석, 그리고 3차원 해석 간의 결과와의 비교를 통해 도출되었다. Fig. 9에서 일반적인 2차원 해석과 비교해서 제안기법의 2차원 해석

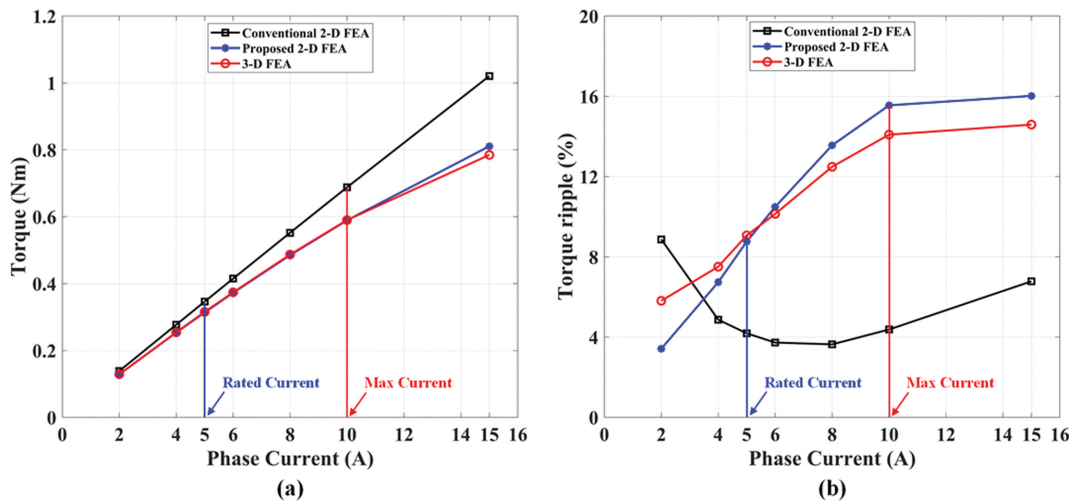


Fig. 10. (Color online) Comparison of analysis results: (a) load torque and (b) torque ripple.

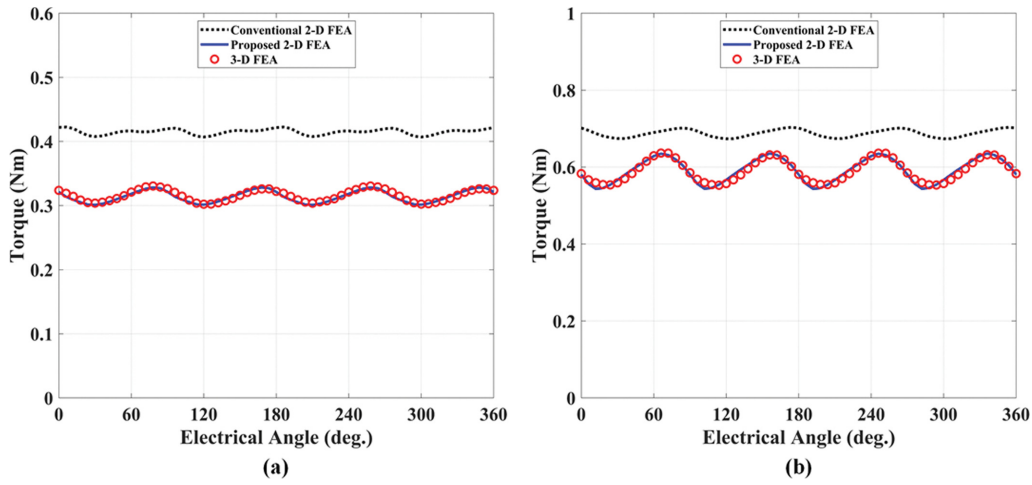


Fig. 11. (Color online) Analysis results of load torque: (a) rated current condition ($I = 5\text{A}$) and (b) max current condition ($I = 10\text{A}$).

Table II. Analysis results of bearingless slice motor.

Parameter			3D	Conv. 2D	Proposed 2D
Back-EMF (max)	value		6.8551 V_{pk}	7.3387 V_{pk}	6.7657 V_{pk}
	error		-	7.1%	1.3%
Back-EMF (rms)	value		4.739 V_{rms}	5.1878 V_{rms}	4.8082 V_{rms}
	error		-	9.5%	1.5%
$I = 2\text{A}$	Torque (avg)	value	0.1290 Nm	0.1386 Nm	0.1285 Nm
		error	-	7.44%	0.39%
	Torque (ripple)	value	5.81%	8.87%	3.42%
$I = 4\text{A}$		error	-	3.06%	2.39%
	Torque (avg)	value	0.2543 Nm	0.2771 Nm	0.2536 Nm
		error	-	8.97%	0.28%
$I = 5\text{A}$	Torque (avg)	value	0.3154 Nm	0.3462 Nm	0.3140 Nm
		error	-	9.77%	0.44%
	Torque (ripple)	value	9.07%	4.19%	8.76%
$I = 6\text{A}$		error	-	4.88%	0.31%
	Torque (avg)	value	0.3739 Nm	0.415 Nm	0.3727 Nm
		error	-	10.99%	0.32%
$I = 8\text{A}$	Torque (avg)	value	0.4868 Nm	0.5521 Nm	0.4853 Nm
		error	-	13.41%	0.31%
	Torque (ripple)	value	12.49%	3.64%	13.56%
$I = 10\text{A}$		error	-	8.85%	1.07%
	Torque (avg)	value	0.5899 Nm	0.6879 Nm	0.5910 Nm
		error	-	16.61%	0.19%
$I = 15\text{A}$	Torque (avg)	value	0.7848 Nm	1.0207 Nm	0.8108 Nm
		error	-	30.06%	3.31%
	Torque (ripple)	value	14.59%	6.78%	16.02%
$I = 15\text{A}$		error	-	7.81%	1.43%

과 3차원 해석의 무부하 역기전력 파형 및 진폭이 매우 일치함이 확인된다. 이는 회전자 영역의 퍼미언스 계수 적용을 통해 회전자 영구자석 단부에서 발생하는 누설 자속이 효과적으로 반영된 결과로 분석된다. Fig. 10은 부하 전류에 따른 토크 및 토크 리플 해석을 비교한 결과이다. 3차원 해석 결과와 비교해서 제안기법의 2차원 해석의 오차가 감소되고 증감에 대한 경향이 일치됨을 확인하였다. 이는 제안된 해석 모델에서 회전자 누설 자속과 고정자 포화에서 기인되는 누설 자속이 효과적으로 반영된 것으로 확인된다. 또한, 고정자 치의 과포화 조건($I = 15A_{pk}$)에서도 기존 2차원 해석 오차 30.06% 대비 3.31%로 현저히 감소됨을 확인하였다. Fig. 11은 Fig. 10의 해석 결과 중 정격 및 최대 전류 조건에서의 토크 파형으로, 매우 유사한 토크 해석 결과를 확인하였다. 이러한 비교 분석을 통해, 베어링리스 모터의 제안된 2차원 해석 기법은 계산 효율성을 유지하면서 3차원 해석에 준하는 정밀도와 신뢰도를 확보한 해석 기법임을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 베어링리스 모터의 3차원 누설 자속 특성을 효과적으로 반영할 수 있는 보정 퍼미언스 기반의 2차원 해석 기법을 제안하였다. 베어링리스 모터의 박형 및 굽은 치 등의 구조적 특수성으로 축방향 및 반경방향 누설 자속이 발생하게 되며, 이러한 자속 경로는 기존 2차원 해석만으로는 정밀하게 반영하기 어렵다는 한계를 가진다. 이를 해결하기 위해, 본 논문에서는 3차원 해석을 통해 자속 경로를 분석하고, 고정자 및 회전자에서 발생하는 주자속과 누설 자속 경로를 모델링하여 퍼미언스 계수를 정량화하였다. 이를 바탕으로 누설 자속 효과가 반영되는 베어링리스 모터의 2차원 등가 모델을 구축하였다. 또한, 제안된 기법의 신뢰성 검증을 위해 무부하 및 부하 조건에서 자계 해석, 역기전력 및 부하 토크 해석을 수행하고 이를 3차원 해석과 비교하였으며, 그 결과 제안된 해석 기법이 높은 정밀도와 신뢰성을 확보하였음을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제안된 베어링리스 슬라이스 모터의 2차원 해석 기법은 계산 효율성과 신뢰성 있는 성능 예측이 가능한 방법임이 입증되었으며, 이를 통해 설계 초기 단계에서의 설계 변수 검토와 민감도 분석뿐만 아니라, 설계 최적화 단계에서도 효과적으로 활용될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 한국생산기술연구원 기본사업 “농작업 환경에서 친환경 동력원을 이용한 스마트 전기구동 플랫폼 개발 (KITECH JA-25-0008)”의 지원으로 수행한 연구입니다.

References

- [1] A. Chiba, T. Fukao, O. Ichikawa, M. Oshima, M. Takemoto, and D. G. Dorrell, *Magnetic bearings and bearingless drives*, Elsevier, Amsterdam (2005) pp. 1~15.
- [2] T. Nussbaumer, P. Karutz, F. Zurcher, and J. K. Kolar, *IEEE Trans. Ind. Appl.* **47**, 754 (2011).
- [3] H. Zhu and F. Li, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26**, 5202804 (2016).
- [4] W. Gruber, W. Amrhein, and M. Haslmayr, *IEEE Trans. Ind. Appl.* **45**, 1301 (2009).
- [5] R. Yang, Z. He, N. Sugita, and T. Shinshi, *IEEE Access* **11**, 24353 (2023).
- [6] R. Puentener, M. Schuck, D. Steinert, T. Nussbaumer, and J. W. Kolar, *IEEE/ASME Trans. Mech.* **23**, 2963 (2018).
- [7] H. C. Roters, *Electromagnetic Devices*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ (1941) pp. 116~150.
- [8] T. Holenstein, M. Schuck, and J. W. Kolar, *IEEE Ind. Elect. Society* **1**, 184 (2020).
- [9] Y. Chen, Z. Q. Zhu, and D. Howe, *IEEE Trans. Ind. Appl.* **44**, 1701 (2008).
- [10] J. W. Jung, H. I. Park, J. P. Hong, and B. H. Lee, *IEEE Trans. Magn.* **53**, 8208104 (2017).
- [11] K. H. Shin, J. H. Lee, S. Y. Sung, J. H. Park, and J. Y. Choi, *IEEE Trans. Magn.* **59**, 8103905 (2023).

Appendix

$$r_k = \frac{r_{si} + (n_a - 1)(r_{so} - r_{si})}{n_a}$$

$$H_{k_a} = r_{k+1} - r_k$$

$$H_{k_r} = \frac{t_c - 0.5t_a - t_b}{n_r}$$

$$H_{k_pm} = \pi(r_{mo} + r_{mi})$$

$$W_{sk_a} = \frac{\pi(r_k + r_{k+1})}{N_s}$$

$$W_{sk_r_{c,r_i,r_o}} = \frac{2\pi r_{c,r_i,r_o}}{N_s}$$

$$W_{sk_pm} = r_{mo} - r_{mi}$$

$$W_{ok_a} = (r_k + r_{k+1}) \left[\frac{\pi}{N_s} - \sin^{-1} \left(\frac{w_t}{r_k + r_{k+1}} \right) \right]$$

$$W_{ok_r_{c,r_i,r_o}} = 2r_{c,r_i,r_o} \left[\frac{\pi}{N_s} - \sin^{-1} \left(0.5 \frac{w_t}{r_{c,r_i,r_o}} \right) \right]$$