

Design of an Electric Water Pump Motor with a PCB Stator

Do-Hyeon Choi

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

Won-Ho Kim*

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

(Received 18 September 2025, Received in final form 24 September 2025, Accepted 25 September 2025)

This paper presents a slotless axial-flux motor (AFM) for automotive electric water pump (EWP) applications that employs a printed circuit board (PCB) stator and a design approach aimed at reducing axial length. In EWP assemblies, the volute primarily occupies space in the radial (outer-diameter) direction; therefore, rather than minimizing the motor outer diameter, shortening the axial length is more effective for securing in-vehicle space. Compared with conventional EWP motors based on radial-flux motor (RFM), which typically have longer axial dimensions and are disadvantageous for packaging, the proposed PCB-stator AFM achieves a more compact form factor by shortening the stack length while meeting the target performance. Although single-rotor AFM are attractive for compactness, stator fabrication is challenging; the PCB stator offers high manufacturability, rapid production, and suitability for mass manufacturing. In addition, capacity scaling across multiple power levels is facilitated by stacking modular PCB stators. A single modular PCB stator consists of multiple layers; such a multi-layer construction is referred to as a multilayer PCB. Leveraging a multilayer PCB allows the phase current to be distributed across the stacked conductor layers, enabling a higher effective current density than in conventional motors. Based on these characteristics, this study proposes an effective design methodology for a PCB-stator EWP AFM and verifies the approach through electromagnetic analysis.

Keywords : axial flux motor, coreless, EWP, PCB motor, PCB stator, slotless

PCB 고정자를 적용한 차량용 전동식 워터펌프 모터 설계

최도현

가천대학교 차세대스마트에너지시스템융합학과, 성남시 성남대로 1342, 13120

김원호*

가천대학교 전기공학과, 성남시 성남대로 1342, 13120

(2025년 9월 18일 받음, 2025년 9월 24일 최종수정본 받음, 2025년 9월 25일 게재확정)

본 논문은 차량용 전동식워터펌프(EWP, Electric Water Pump)에 적용 가능한 슬롯리스 축방향 자속 모터에 인쇄회로기판(PCB, Printed Circuit Board) 고정자를 적용하고, 축방향 길이 저감을 위한 설계를 제안한다. EWP에서는 블루트가 주로 외경(반경) 방향의 공간을 차지하므로 모터 외경을 줄이는 것보다 차량 내부의 공간을 확보를 위해서는 축방향 길이 저감이 효율적이다. 기존 방사형 자속 전동기(RFM, Radial Flux Motor) 기반 EWP 모터는 축방향 길이가 길어 패키징 구성을 불리한 반면, 본 논문에서 제안하는 PCB 고정자 축방향 자속 전동기(AFM, Axial Flux Motor)는 목표 성능을 만족하면서 적층 길이를 저감하여 보다 compact한 형상을 달성한다. 단일 로터 AFM은 소형화에 유리하지만 고정자 제작이 어렵다는 한계가 있으며, PCB 고정자는 높은 제작성, 빠른 생산, 대량 제조에 유리하다. 또한 모듈형 PCB 고정자를 적층함으로써 다양한 용량대로 확장이 용이하다. 하나의 모듈형 PCB 고정자는 여러개의 레이어로 구성이 되고, 이러한 여러개의 레이어 PCB를 멀티레이어 PCB라고 한다. 멀티레이어 PCB를 활용하여 전류를 분산시켜 흐르게 하는 설계가 가능하고, 이는 기존 모터 대비 전류밀도를 높게 사용할 수 있는 장점이 있다. 본 연구는 이러한 특성을 바탕으로 PCB 고정자를 적용한 AFM EWP 모터의 효과적인 설계 방법을 제안하고, 이를 전자기해석을 통해 검증하였다.

주제어 : 축방향 자속 모터, 코어리스, 전동식워터펌프, PCB 모터, PCB 고정자, 슬롯리스

I. 서 론

본 연구는 복잡한 치(teeth) 구조로 제조 공정이 까다로운 기존 AFM을 인쇄회로기판 기반 고정자로 대체하여 제작성·양산성을 확보하고, PCB 고정자에서 발생하는 주요 손실 저감 설계 방법을 제안한다. 전통적인 AFM은 치 형상을 구현하기 위해 슬롯 수마다 찍어내고, 전기강판을 밀어서 적층하여 제작한다. 이후 권선기로 치에 코일을 감아 제작하므로 시간이 오래 걸리고 비용 부담이 크다. 반면 표준화된 공정으로 생산되는 PCB는 대량 생산에 적합하며, 고정자 권선을 회로 패턴으로 구현함으로써 제조 공정의 단순화가 가능하다. PCB 절연층의 주재료인 FR-4는 공기와 유사한 투자율을 가지고, 슬롯이 없어 자기저항 차이가 발생하지 않는 슬롯리스 구조이다. 이에 따라 영구자석과 치의 상호작용에서 기인하는 코킹토크가 이론적으로 발생하지 않는다. 코킹토크는 자석과 치가 정렬되려는 힘으로써 모터 회전에 저항하여 진동·소음을 유발하고 심하면 회전자와 고정자 사이에 간접 위험이 높아지는데, PCB 고정자는 치가 없으므로 이러한 문제가 발생하지 않는다. 본 연구에서는 이와 같은 PCB 슬롯리스 AFM을 차량용 EWP에 적용하였다. EWP는 임펠러와 모터가 일체로 동작하기 때문에 진동 억제가 특히 중요하며, 임펠러는 유체 저항을 상대하므로 모터에 높은 출력과 토크가 요구된다. AFM은 RFM에 비해 유리한 토크 밀도를 제공하고, 슬롯리스 구조는 자기적 공극이 커지고, 누설자속이 증가하기 때문에 AFM에 적용하여 슬롯리스 RFM 대비 토크를 키우고, 직경을 키우는 설계로 보완할 수 있다.

다만 슬롯리스 모터에서는 영구자석 자속이 도체에 시간·공간적으로 변화하는 자체를 형성하여 PCB 구리 패턴에서 AC 손실이 증가하기 쉬우므로, AC 손실 저감 설계가 필수적이다. 이에 본 논문은 PCB 권선 패턴을 AC 손실 저감을 위한 inverse trace 설계를 통하여 정해진 크기에서 전류밀도를 최소화하고, 모터의 효율 감소를 최소화하는 PCB 모터 설계를 제안한다.

II. 소 개

현재 기계식 구동시스템들은 전동화로 인해 빠르게 전동화 시스템으로 대체되고 있으며, 특히 자동차 분야에서 수요가 급증하고 있다. 특히 차량용 워터펌프는 내연기관 차량에서 주로 엔진 냉각을 위해 기계식 워터펌프를 사용해 왔으나, HEV, PHEV, EV, EREV 등과 같은 차량에서 전동식 워터펌프가 도입되어 엔진 냉각뿐만 아니라 구동모터, 배터리까지 냉각 대상이 확대되었다. 이처럼 냉각해야 할 부품이 많은 차량용 전동화 시스템에서는 구동 모터와 배터리는 물론 자율

주행 제어기 냉각에도 EWP가 요구된다. 그 결과 차량 한대에 탑재되는 EWP 모터 수가 많이 필요로 하고, 한정된 패키징 공간 제약으로 인해 각 모터의 소형화가 필수적이다. 그러나 기존 RFM EWP는 축방향 길이 저감에 따라 출력 저하가 발생하여 성능 한계에 도달하였다. 반면 PCB 모터는 고정자 권선을 PCB 고정자로 대체하여 축방향 길이를 크게 줄일 수 있어 축길이 공간 확보가 용이하고, 이에 필요 어플리케이션에 따라 PCB 고정자를 적용한 모터 연구가 활발하게 진행되고 있다. PCB 모터 관련 최신 연구 주제로는 할바 magnet을 사용하여 누설자속을 줄이고 공극자속밀도를 높이는 PCB motor[1] 다만, PCB 모터에 할바자석을 활용할 경우 AC 손실 저감에는 유리하겠지만 제조비용이 증가하게 된다. trace width에 따른 와전류 손실과 레이어에 따른 순환 전류 손실에 대한 연구[2,3]가 있는데 이는 매우 중요한 연구로 PCB 모터에서 코일의 AC 손실 저감 설계는 매우 중요하다. 다만, 본 논문에서 제안하는 설계 방법에 비해 비효율적인 설계이다. 집중 권선으로 구성된 pcb 고정자에 대한 연구[4]도 많은 연구가 진행되고 있지만, 차량용 EWP와 같은 저전압 어플리케이션에서는 집중권 패턴보다 분포권 패턴 설계가 효율 측면에서 유리하기 때문에 본 연구에서는 분포권 PCB 패턴 설계에 대한 연구를 제안한다. 또한, slit을 파내어 AC 손실을 줄이는 연구[5]로 이는 실제 코일에서 도체에 와전류가 발생할 수 있기 때문에 slit을 통해 별별 구조를 적용하는 것은 위험할 수 있다. 할바자석도 활용하지만 플렉서블 PCB를 활용한 RFM 연구[6]는 플렉서블 PCB의 경우 FR 계열의 PCB보다 제조비용이 높고, 축방향 길이 저감이 필요한 EWP 어플리케이션에는 적합하지 않다. 한편, 상용 RFM 모터의 코킹토크 저감을 위해 다양한 형상·자석·고정자 설계가 검토되어 왔다. 기존에 상용화되고 있는 RFM 모터에서 코킹토크를 저감하기 위한 설계로 회전자와 고정자 형상설계에 관한 연구[7], RFM에서의 영구자석 형상에 대한 연구[8,9], AFM에서의 영구자석 형상에 대한 설계 연구[10], AFM의 영구자석에 dual-skew를 적용한 설계 연구[11,12], 고정자 형상에 대한 설계 연구[13,14]와 같은 설계 기법들이 최근 많이 연구되어지고 있다. 그럼에도 이러한 방법만으로는 코킹토크를 완전히 제거하기 어렵다. 원론적으로 코킹토크의 이론적 발생을 방지하려면 고정자 형상에서의 자기저항 차이가 존재하지 않아야 한다. 따라서 PCB 고정자를 모터에 적용하면 모터의 제작성 및 생산성 항상뿐만 아니라 전자기적 코킹토크 발생을 방지할 수 있다.

추가적인 장점으로 PCB 고정자는 모듈화 구조에 용이하다. 하나의 PCB 기판을 여러장 쌓아 적층하는 방식으로 출력을 높이는 것이 가능하다. 동일 출력에서는 전류밀도를 낮추고, 최적화된 효율 설계 포인트를 도출해낼 수 있다. 하지만

PCB 기판의 개수가 많아지게 된다면 직렬로 연결되어있는 구조에서는 각 기판에서 동손실이 발생하고, 기판의 수만큼 자기적 공극 증가로 누설 자속 양이 증가하기 때문에 이를 고려하여 레이어 수를 선정해야한다.

PCB 고정자에서는 회전자 회전에 따라 영구자석의 시변 자속에 의해 AC 손실이 발생하게 되고, 이는 PCB 모터에서 주요 손실 중 하나이다. 일반적으로 도체의 폭을 매우 얕게 하여 AC 손실을 저감하는데 동면적 감소로 인한 저항 증가로 동손실은 증가하게 된다. 따라서, PCB 모터 설계는 AC 손실과 동손실 저감의 상호 관계에 의해 효율 경향성을 확인하고, 설계 변수를 선정해야한다. 따라서 PCB 모터의 주요 손실 저감 설계 방법을 제안한다.

III. 기존 EWP 모터 성능 및 PCB 고정자

Fig. 1은 차량용 전동식워터펌프 EWP PCB 모터의 시작품이다. 기존 전통적인 모터들에 비하여 PCB 고정자를 활용한 EWP 모터는 축방향으로 굉장히 박형화된 것을 볼 수 있다. EWP는 모터뿐만 아니라 임펠러 설계도 중요하기 때문에 모터 전체 외경의 경우 임펠러의 크기를 고려하여 제한되었고, 이에 맞춰 축방향 길이를 박형화하여 설계하였다.

Table I은 기존 모델이 되는 EWP에 적용된 RFM의 전자기 성능 데이터 및 사이즈이다. 모터 Active part의 전체 외

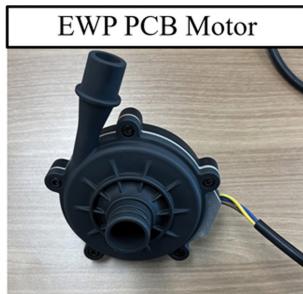


Fig. 1. (Color online) PCB-stator motor for an Electric Water Pump (EWP).

Table I. Specifications of the basic EWP model.

Parameters	Unit	Value
Rated Torque	Nm	0.22
Rated Speed	rpm	4500
Rated power	W	103.67
Input Current	A _{rms}	14
Load Line to Line Voltage	V _{peak}	8.1
Copper loss	W	20.34
Core loss	W	1.08
Efficiency	%	82.62
Stator Diameter	mm	56
Stack Length	mm	24.4

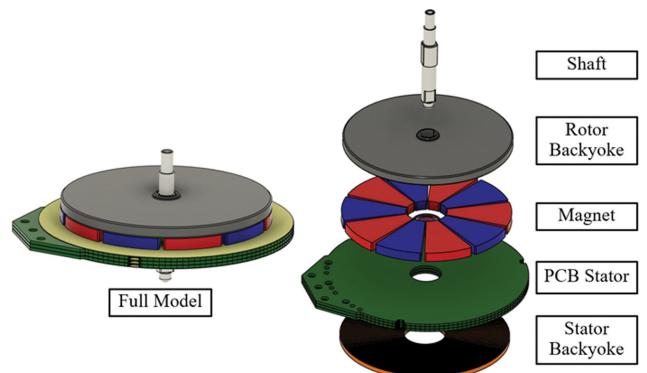


Fig. 2. (Color online) Configuration of the EWP PCB motor.

경은 56 mm이며, 적층 길이는 24.4 mm이다. 전류밀도는 약 14 A_{rms}/mm² 정도이며, 효율은 약 82.62%이다.

Fig. 2는 차량용 EWP 모터의 구조로 샤프트, 회전자 백요크, 회전자 영구자석, PCB 고정자, 고정자 백요크로 구성되며 된다. 이는 회전자가 1개인 Single rotor 타입 AFM으로 회전자가 2개인 타입으로도 구성할 수 있으나 출력이 낮은 소형 모터에서는 회전자의 개수에 따라 공극 개수가 늘어나기 때문에 누설자속이 커지게 된다. 또한, PCB 고정자를 활용한 AFM의 경우 주요 발열원인 PCB 고정자에 고정자 백요크를 부착하는 형태로 고정자가 구성되기 때문에 고정자 백요크의 단면적만큼 열을 전달해줄 수 있어 회전자가 2개인 타입보다 방열 구조에 유리하다. 또한, 본 논문의 EWP 모터는 12V 전원의 저전압 어플리케이션으로 분포권선 PCB 패턴을 활용하였다. 분포권선 패턴은 PCB 레이어를 활용한 엔드턴 단면적 최적화 설계를 통하여 단면적을 최대한 사용할 수 있어 집중권선에 비해 회로 전기저항을 최소화하기 용이하다. 또한, PCB 유효도체를 회전자에 맞춰 유효토크를 효율적으로 낼 수 있는 설계가 가능하기 때문에 분포권선 PCB 고정자로 설계를 진행한다.

본 논문에서 제안하는 분포권선 PCB는 3상이며, 모든 상이 1개의 기판에 들어가는 구조로 구성이 되며, 이러한 구조는 멀티레이어를 활용한 엔드턴 설계와 비아홀을 이용하여 전기적으로 연결이 가능하기 때문에 가능하게 된다.

(a) BEMF of three-phase winding

$$\begin{aligned} e_A &= \sum_{n=odd} E_n \sin n\omega_e t, \\ e_B &= \sum_{n=odd} E_n \sin \left(n\omega_e t - \frac{2}{3}n\pi \right), \\ e_C &= \sum_{n=odd} E_n \sin \left(n\omega_e t + \frac{2}{3}n\pi \right), \end{aligned} \quad (1)$$

식(1)과 같이 3상의 역기전력을 a, b, c 상이 전기적으로

120도의 위상차를 갖고 구성된다. E_n 은 역기전력의 n 차 고조파 성분이고, n 은 고조파 차수이며, ω_e 는 전기각속도이다.

(b) Electromagnetic Torque

$$T_e = \frac{\sum e_k i_k}{\omega_m} \quad (2)$$

전자기 토크는 (b)와 같이 표현할 수 있고, 식(2)에서 T_e 는 전자기 토크, e_k 와 i_k 는 각각 k 상의 역기전력과 전류, ω_m 은 기계각속도이다.

(c) Current of three-phase winding

$$i_A = I_m \sin \omega_e t, i_B = \sin \left(\omega_e t - \frac{2}{3}\pi \right), i_C = I_m \sin \left(\omega_e t + \frac{2}{3}\pi \right) \quad (3)$$

i_A , i_B , i_C 는 각 상의 전류이며, I_m 은 전류의 크기이다. 식(2)에 따라, 3상의 전자기 토크는 식(4)와 같이 표현한다.

(d) Electromagnetic torque of three-phase winding

$$T_e = T_{avg} + \sum_{n=1} T_{6n} \cos(6n\omega_e t + \phi_n) \quad (4)$$

$$T_{avg} = \frac{3E_1 I_m}{2\omega_m}, T_{6n} = \frac{3E_{6n-1} - E_{6n+1}}{2\omega_m}$$

식(4)로부터, 3상 권선의 토크리플은 주로 BEMF의 $(6n-1)$

차와 $(6n+1)$ 차 고조파 성분의 영향을 받는다.

IV. PCB 모터 기초 설계

1. PCB 모터 기초 설계 변수 설정

슬롯리스 AFM은 기본적으로 자기장하의 비율이 큰 모터이다. 일반적인 슬롯리스 모터의 고정자 권선이 많아지게 되면 자기적 공극이 증가하여 누설자속 양이 많아지게 된다. PCB AFM에서는 PCB 두께가 증가하여 마찬가지로 자기적 공극이 증가하게 된다. 따라서, 이를 고려하여 PCB 고정자의 PCB 개수를 선정해야 한다. PCB 개수가 늘어나면 자기적 공극은 증가할 수 있으나 전류밀도를 낮추기 용이하고, 각 PCB는 직렬로 연결되기 때문에 전기장하의 크기를 키울 수 있어 전압 사용량을 높일 수 있다. 하지만, PCB 개수가 많아지게 된다면 축방향 길이가 길어지게 되므로, 이를 고려하여 목표하는 부피 내에서 선정하게 된다. PCB 개수에 따라 모터 효율, 전류밀도 성능 경향성을 보고 개수를 선정하게 된다.

Fig. 3은 PCB 개수에 따른 성능 경향성에 대한 성능맵이다. 먼저 PCB 고정자는 모듈화된 구조로 PCB 고정자를 적층형태로 쌓아 제작하는 구조에 용이하다. 각 PCB는 직렬, 병렬로 연결할 수 있으나, 본 논문에서는 직렬로 연결하여 출력을 높이는 방향으로 성능을 검토하였다. PCB 개수가 늘어날수록 자기적 공극의 길이는 증가하나 총 직렬턴수는 PCB 개수에

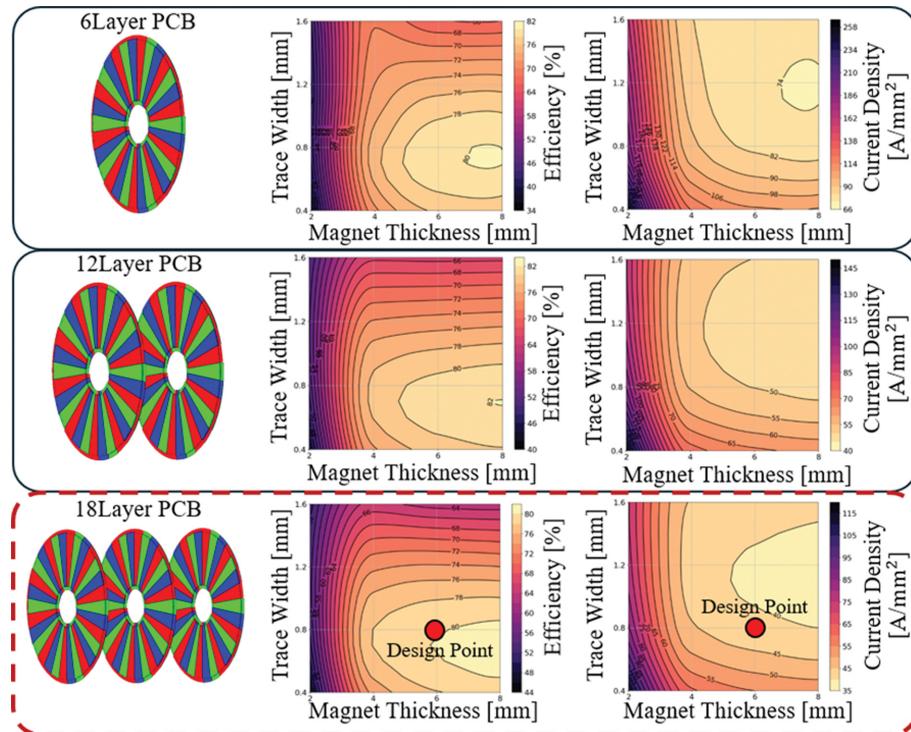


Fig. 3. (Color online) Effect of PCB-stator module count on 3D FEA results.

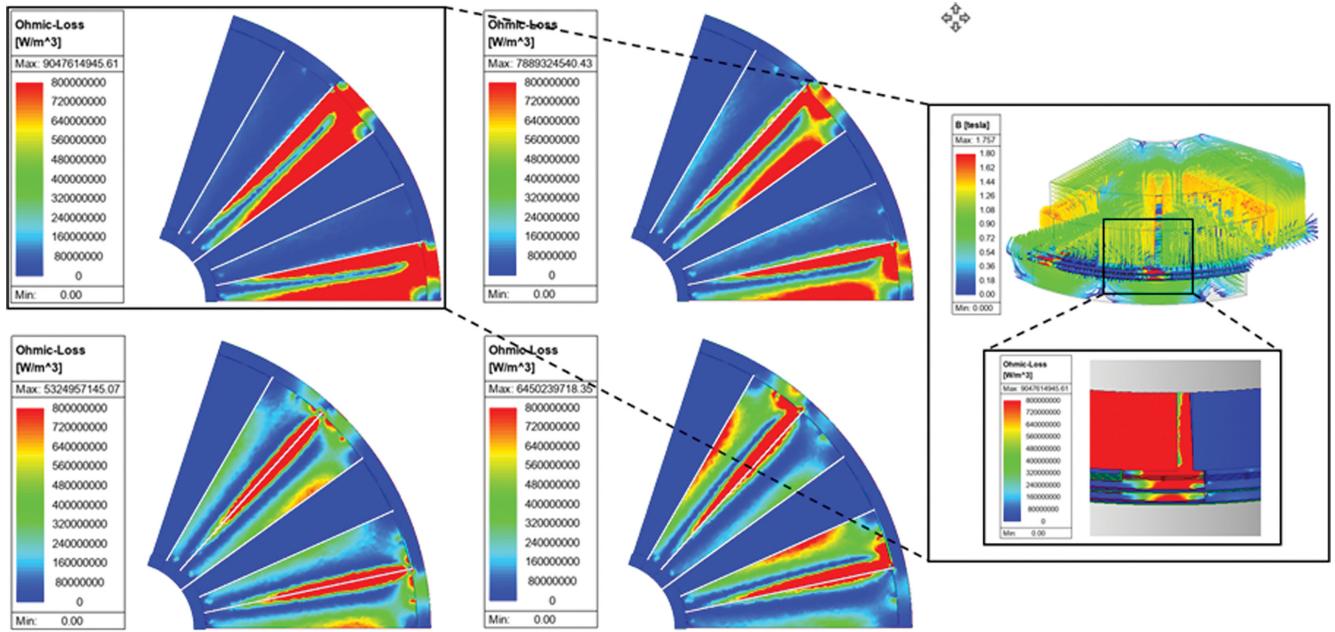


Fig. 4. (Color online) AC loss in PCB traces and magnetic flux-line distributions at various rotor positions.

비례하여 증가하기 때문에 전압사용량은 증가하게 된다. 또한, PCB 모터에서 가장 중요한 주요 손실은 PCB 도체에서 발생하는 AC loss이다. 회전자가 시간에 따라 회전하면서 영구자석에서 나오는 자속은 시간에 따라 변화하는 자속을 형성하는데 이 자속이 시간변화가 빨라질수록 PCB 도체에서는 AC loss가 커지게 된다. 이는 슬롯리스 모터 설계시 중요한 손실로 널리 알려져 있다. 따라서 PCB 도체 폭을 줄여 AC loss 저감 경향성을 봐야하고, 일반적으로 PCB에서 도체의 폭을 Trace라고 하기 때문에 폭에 대해 Trace width라고 정의하고 성능 경향을 보게 된다. 도체 폭이 얇아질수록 AC loss는 감소하겠지만 유효 동면적 감소로 Copper loss는 커지게 된다. 영구자석 두께의 증가에 따라 역기전력은 커지지만 자기적 공극 및 누설 자속 증가로 비선형적인 증가 특성을 보인다. 또한, 영구자석 사용량에 비례하여 AC loss도 크게 발생하기 때문에 Fig. 3에서는 Trace width와 Magnet Thickness 두께에 따라 전류밀도와 효율을 최적화할 수 있는 기초 설계를 진행한다. 또한 PCB 모터는 PCB 기판의 멀티레이어 특성으로 인해 전류가 병렬로 흐르게 된다. 본 논문에서는 3개의 상이 한 개의 PCB 기판에 구성되는 패턴으로 설계를 진행하여 이에 따라 최소 설계 레이어인 6레이어로 설계를 진행하였으며, 일반적으로 PCB는 2, 4, 6 레이어와 같이 짹수 레이어로 제작된다. 레이어 선정은 제작비용과 관련이 있기 때문에 최소 레이어로 설계를 진행하였다. 멀티레이어 구조로 인해 기존 모터 대비 전류밀도를 4~5배 더 높게 설계하여도 열적 특성에 강건하다는 사실은 이미 널리 알려져 있다. 하지만, 안정성을 고려하여 본 논문에서는 기존 모터 대비 3배를 기준으

로 진행하여 $30 \text{ A}_{\text{rms}}/\text{mm}^2$ 내를 목표로 설계하였다. Fig. 3에서는 기초설계를 진행하여 PCB 개수를 선정하고, 이후 전류밀도 최적화 설계를 진행하게 된다. 하지만 기판 2개를 사용한 12 레이어에서는 전류밀도가 너무 높아 적합하지 않으므로 18 레이어를 기초모델로 선정하였다.

Fig. 4는 본 논문에서 제안하는 분포권선 기초 패턴의 PCB Trace에 발생하는 AC loss plot이다. 유효도체 영역의 패턴을 외경 방향으로 갈수록 시변자속의 영향이 큰 모터의 AC loss plot을 나타낸다. EWP와 같이 저전압 어플리케이션에서는 PCB 고정자의 슬롯당 턴 수가 적기 때문에 도체폭을 효율적으로 설계할 수 있는 공간 여유가 크다. 모터에서 회전자 영구자석 극 간 사이에서 발생하는 자속의 시간변화가 가장 빠르기 때문에 엔드턴은 AC 손실 발생에 대한 영향이 비교적 적다. 또한, 영구자석과 가까운 PCB 레이어에서 자속 영향도가 가장 높기 때문에 이러한 것을 고려하여 설계한다.

Fig. 5는 제작을 고려하였을 때 trace와 trace 사이의 최소 이격 거리를 반영하여 구리 도체를 최대한 사용하였을 때와 기존 PCB trace 설계에 사용되는 폭이 일정한 PCB trace를 적용하였을 때 AC 손실 도이다. 도체의 폭을 최대한 넓게 사용하면 동면적 최대로 상저항은 낮아지게 되나 회전자 영구자석의 자속에 의한 AC 손실이 매우 크게 발생하게 된다. 이를 저감하기 위해 도체의 폭을 매우 얕게 설계하게 되면 상저항 증가로 동손실은 증가하게 된다.

Fig. 5에서 PCB 트레이스의 폭을 일정하게 설계한 모델을 폭이 일정한 트레이스 도체(CTC, Constant Trace Conductor) PCB라고 정의한다[15]. Table II는 기존 비교 모델인 RFM

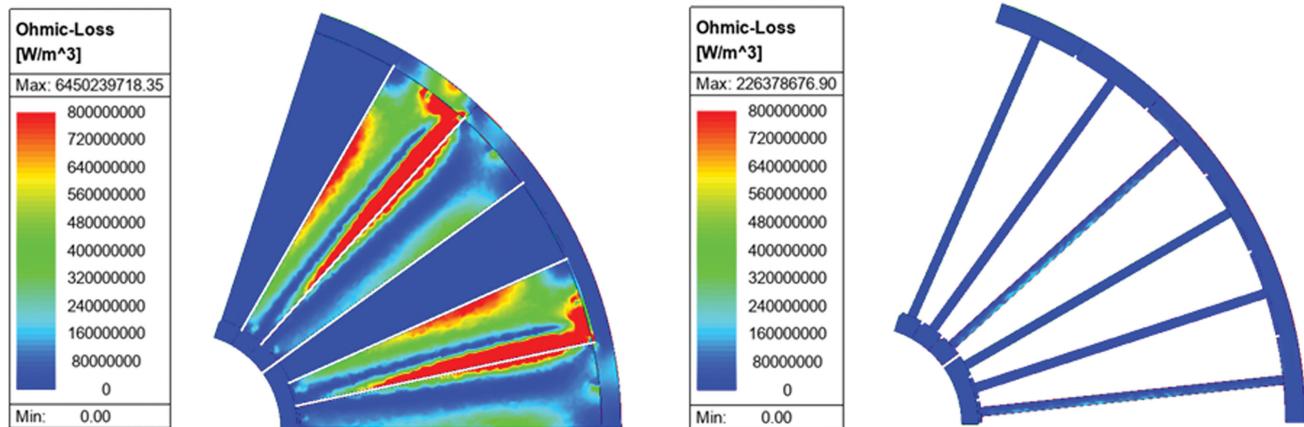


Fig. 5. (Color online) Effect of PCB trace pattern on AC loss.

Table II. Specifications of the final EWP PCB motor.

Parameters	Unit	Value
Pole/Slot	-	10/30
Stator Diameter (Outer)	mm	80
Rotor Diameter (Outer)	mm	68.4
Airgap length	mm	0.5
Stack Length (Active)	mm	16.1
Copper Thickness	Oz	2
PCB Layer (1EA)	Layer	6
Magnet	-	N45UH
PCB	-	FR-4
Stator Core	-	35PN300
Rotor Core	-	S45C

EWP 모델과 CTC PCB 모델의 전자기성능 데이터 비교이다. 본 논문에서 제안하는 PCB 모터는 극/슬롯 비율이 1:3인 분포권선 패턴을 적용하였다. PCB 레이어를 활용하여 중권 및 과권을 적용한 PCB 트레이스 분포권선 설계 방법에서는 엔드턴의 단면적을 최대한 활용할 수 있다. Table III의 데이터는 엔드턴 설계가 진행되지 않은 기초 모델 비교로서 높은 전류밀도와 동손실로 효율이 다소 낮은 것을 확인할 수 있었다. 이에 따라 엔드턴 최적화 설계로 상저항을 최소화하는 설

계가 필요하다.

2. PCB 고정자 엔드턴 설계

Fig. 6은 PCB 고정자 엔드턴에 대한 그림이다. 기존 AFM과 동일하게 고정자는 내/외측 엔드턴을 가지며, Inner/Outer Endturn으로 명칭한다. 회전자의 내/외경은 엔드턴을 제외한 PCB 유효도체만을 덮고 있는 형상이다. PCB 고정자에서 유효도체 패턴 부분만 유효토크에 기여하기 때문이고, 엔드턴을 덮게 된다면 엔드턴에서 AC loss가 발생하기 때문에 이를 고려하여 설계하게 된다. 본 논문에서의 분포권선 PCB 패턴은 엔드턴의 단면적을 최대한 사용할 수 있기 때문에 엔드턴 설계가 필수적이다.

Fig. 7은 엔드턴 설계에 따른 성능맵이다. 성능맵은 입력출력, 전류밀도, 무부하선간전압, 효율순이며 전압을 최대한 사용하였을 때, 전류밀도가 제일 낮은 설계 변수를 기초 설계 모델로 선정하였다. 선정된 설계변수에서의 기초 모델은 전류밀도는 약 $33.5 \text{ A}_{\text{rms}}/\text{mm}^2$ 이내, 동손실과 AC 손실만 고려한 효율은 약 79% 정도의 성능을 확인하였다. 설계 목표로 하는 전류밀도 범위보다 다소 높아 저감 설계가 필요하여 4-3 절에서 다루기로 한다.

Table III. Specifications of the conventional traces and CTC PCB traces 3D FEA data.

3D FEA performance Data	Parameters	Unit	Ref EWP	CTC Trace PCB
	Rated speed	rpm	4500	4500
	Rated power	W	103.67	103.67
	Load Line to Line Voltage	V _{peak}	8.1	10.2
	Rated torque	Nm	0.22	0.22
	Input Current	A _{rms}	14	10.1
	Current Density	A _{rms} /mm ²	14.1	37.42
	Copper loss	W	20.34	23.43
	Core loss	W	1.1	-
	AC loss	W	-	4.99
	Efficiency	%	82.62	78.48

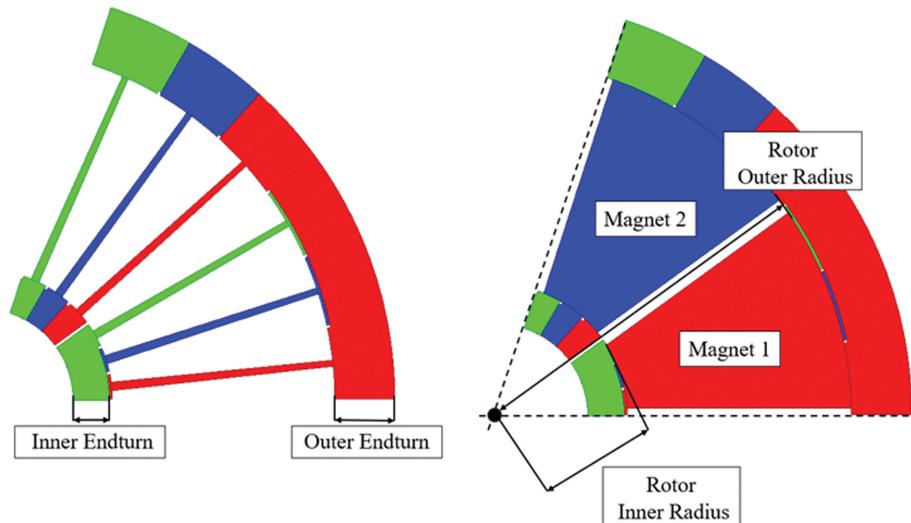


Fig. 6. (Color online) Design variables of the PCB-stator end-turn.

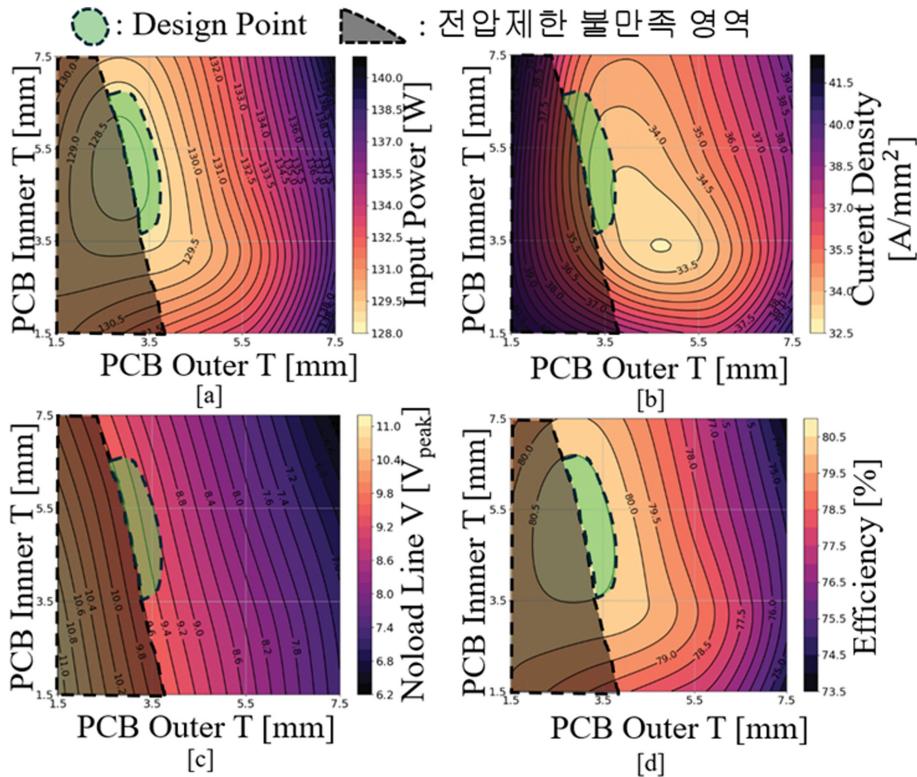


Fig. 7. (Color online) 3D FEA performance evaluation for end-turn design variations.

3. PCB 모터 전류밀도 및 저항 저감 패턴 설계

4-3장에서는 도체의 폭이 내측에서 외측으로 갈수록 얇아지는 설계 방법인 Inverse trace를 적용하여 전류밀도를 최소화하고, 효율 감소를 최소화하는 PCB 고정자 설계 방법에 대해 다룬다.

AC 손실을 최소화하면서 도체 면적을 최대한으로 설계하게 된다면 가장 전류밀도를 최소화하고, 효율 감소를 최소화

하는 설계를 도출할 수 있다. Fig. 8은 외측방향으로 갈수록 PCB 트레이스를 얇게 설계하여 동순실과 AC 손실 저감을 극대화하게 된다. 외측 방향으로 갈수록 AC 손실이 더 크게 발생하기 때문에 Inner Width의 두께가 Outer Width 두께보다 항상 두꺼워야하며, Inner Width는 회전자 내경에 따라 최대한으로 활용할 수 있는 두께가 달라지게 되나 내측에서도 AC 손실이 클 경우 폭을 줄여 설계해야한다. Fig. 8과

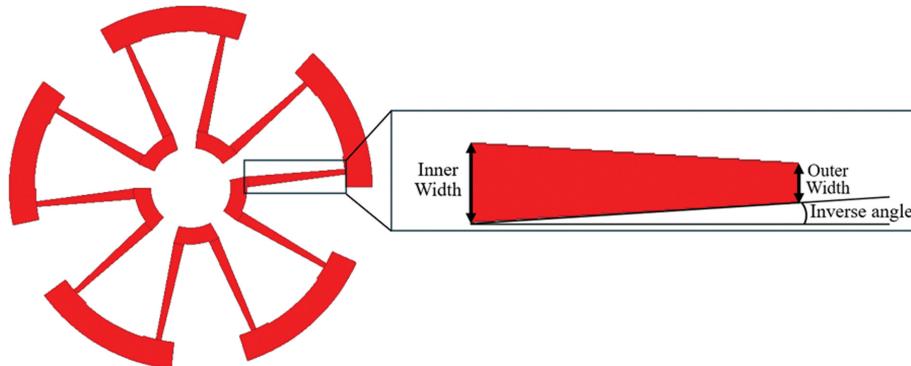


Fig. 8. (Color online) Active conductor of the Inverse-Trace PCB-stator.

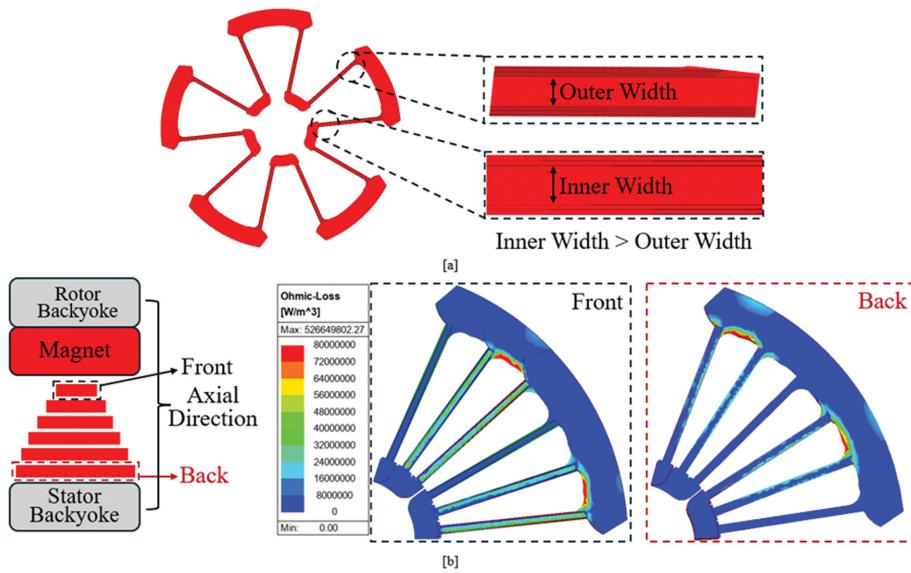


Fig. 9. (Color online) PCB traces width and AC loss of the final model.

같이 일반적으로 Inner Width가 Outer Width보다 두껍게 설계하며, 이를 Inverse Trace라고 한다.

공극면 기준으로 영구자석과 거리가 가장 가까운 레이어와 멀리 있는 레이어에 발생하는 AC 손실의 발생 크기 차이는 다르다. 슬롯리스 모터의 경우 자속의 경로를 만들어주는 고정자 치가 없기 때문에 이러한 자기적 공극이 증가하게 되면 자속의 누설 증가로 레이어에 따라서도 AC 손실 발생이 달라지게 된다. Fig. 9과 같이 각 레이어에 따라 폭을 조절하여 AC 손실 발생을 완화하는 설계 방법을 적용할 수 있다.

V. Reference EWP와 EWP PCB 전자기성능 비교

Fig. 9와 같은 PCB고정자 패턴을 활용한 최종 EWP PCB 모델의 고정자에서 발생하는 AC loss를 파형으로 보면 Fig. 10과 같다. 약 6.92 W 정도 발생하였다.

PCB 모터는 고정자 치가 없는 슬롯리스 AFM으로 공극자

속이 고정자 치로 집중하여 들어가지 못하기 때문에 자속의 공간고조파 성분이 증가하게 된다. Fig. 11은 무부하 상전압 파형으로 PCB 모델의 경우 3차 고조파와 같은 저차 고조파

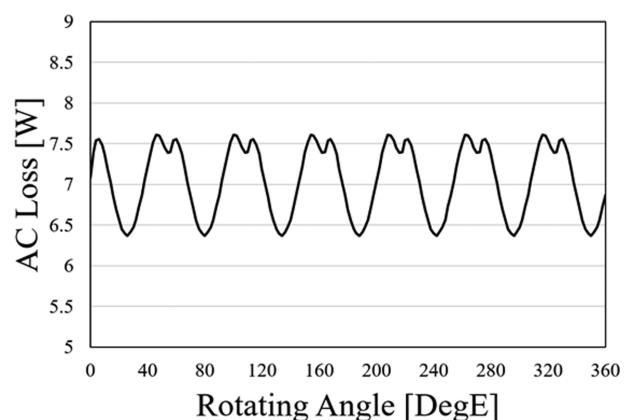


Fig. 10. (Color online) AC loss waveform of the final model.

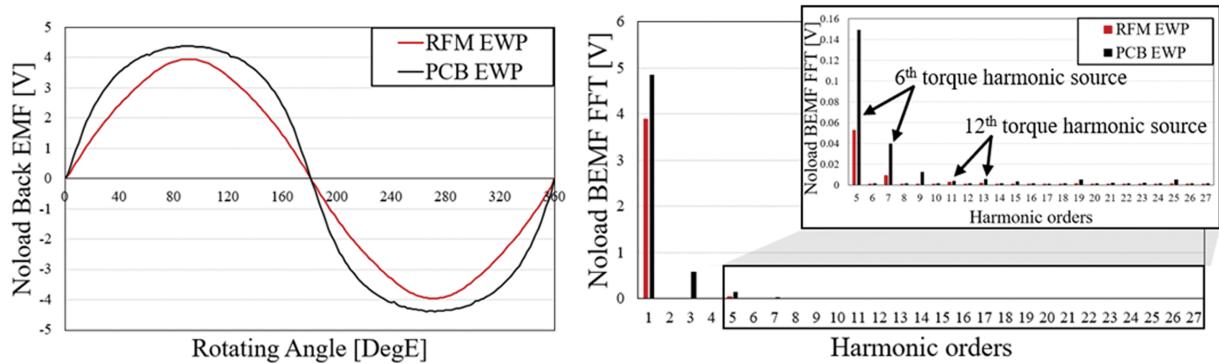


Fig. 11. (Color online) Noload back-EMF waveform and FFT analysis of the final model.

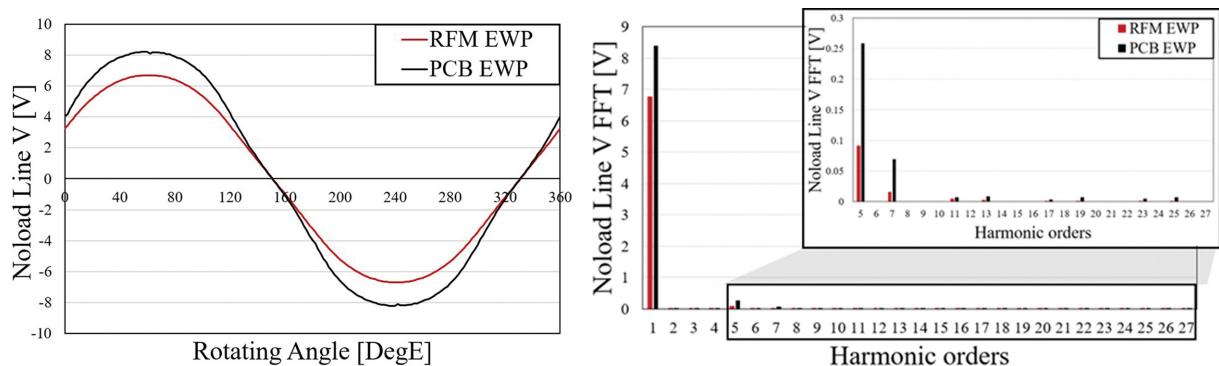


Fig. 12. (Color online) Noload line-to-line voltage waveform and FFT analysis of the final model.

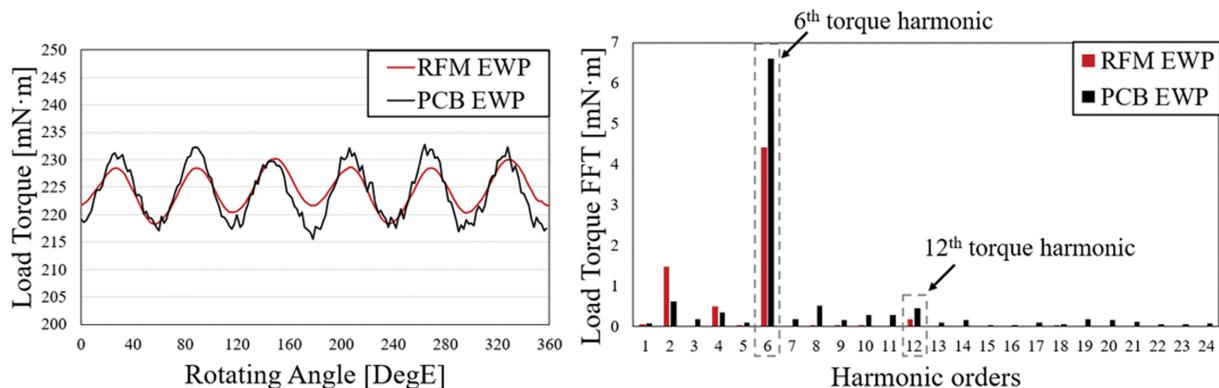


Fig. 13. (Color online) Load torque waveform and FFT analysis of the final model.

성분이 구형파 및 역기전력 파형을 만들게 된다. Fig. 12에서 무부하 선간전압을 FFT 분석을 통해 마찬가지로 5, 7차와 같은 저차 고조파 성분이 발생하는 것을 확인하였다. 이는 Fig. 13과 같이 전류 부하시 토크리플 발생 주원인인 토크의 6차 성분 고조파를 발생하게 된다. 식(4)에서처럼 3상 권선의 토크리플은 주로 BEMF의 $(6n-1)$ 차와 $(6n+1)$ 차 고조파 성분에 영향을 받는데 Fig. 11에서처럼 PCB EWP는 6차 토크 고조파 성분에 영향을 미치는 BEMF의 5, 7차 고조파와 12차 토크 고조파 성분에 영향을 미치는 BEMF의 11, 13차

BEMF의 고조파가 큰 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유로 Fig. 13에서 6, 12차 토크 고조파 성분이 PCB EWP가 더 커서 토크리플이 크다는 것을 알 수 있다. 기존 EWP 모터의 토크리플은 약 5.33%이고, PCB 모터 최종 모델은 약 7.7%인 것을 확인하였다. 향후 연구에서는 PCB 고정자 패턴 설계, 영구자석 형상 설계 등을 통하여 BEMF의 토크 고조파 성분을 유발하는 고조파 성분을 저감하는 설계를 반영하여 토크리플을 저감하고자 한다.

최종 EWP PCB 모델의 성능맵은 Fig. 14의 (a) 전류밀도,

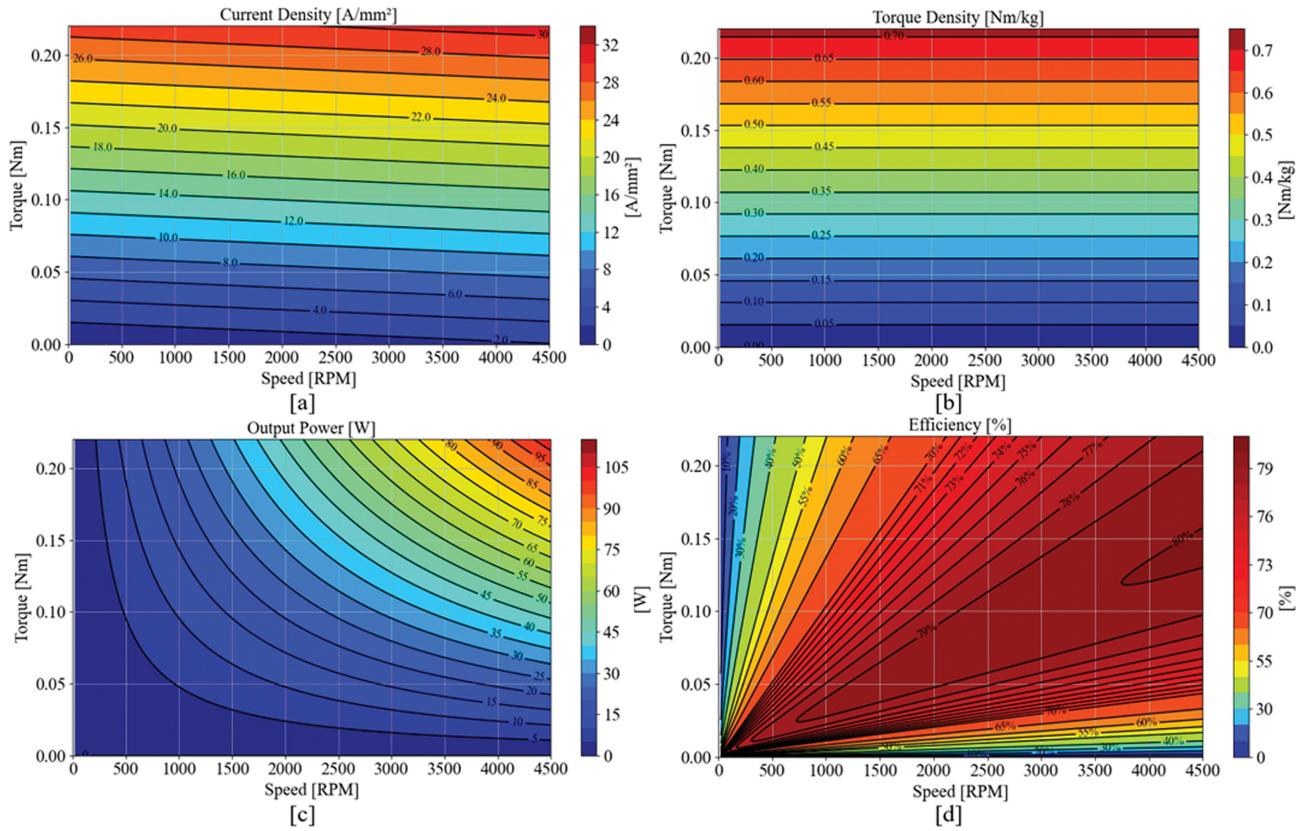


Fig. 14. (Color online) Performance map of the final model. (a) Current density, (b) Torque density, (c) Output power, (d) Efficiency.

(b) 토크밀도, (c) 출력, (d) 효율로 구성된다. 정격속도/토크에서 전류밀도는 약 30.9 A/mm²로 설계 목표치인 기존 모터 2~3배 범위 내에서 안정적으로 만족하는 범위이다. 토크밀도는 최종모델의 Active part 무게가 약 306 g으로 약 0.72 Nm/kg이며, Table IV와 같이 모터 효율은 약 78.2%이다.

기존 모터 대비 효율이 다소 낮지만 이는 모터 외경 사이즈의 확장 유무, PCB 고정자의 온즈나 레이어 증가를 통해 기존 모터 수준까지 효율을 높이는 모델을 검토하여 고려해 볼 수 있다.

Table IV. Specifications of the final model.

Parameters	Unit	Value
Rated Torque	Nm	0.22
Rated Speed	rpm	4500
Rated power	W	103.67
Input Current	A _{rms}	10.7
Current Density	A _{rms} /mm ²	30.9
Load Line to Line Voltage	V _{peak}	10.2
Copper loss	W	20.53
AC loss	W	6.92
Core loss	W	1.5
Efficiency	%	78.2
Stator Diameter	mm	80
Axial Stack Length	mm	16.1

VI. 결 론

본 논문은 차량용 EWP 전동기에 PCB 고정자를 적용한 EWP PCB 전동기 설계 방법에 대한 연구로 슬롯리스 모터의 주요 손실인 AC손실 저감 설계 방법을 제안한다. 먼저 PCB 모터를 차량용 EWP에 적용하면 적층 길이 저감에 용이하여 박형화가 가능하다. 목표 성능을 위해 설계 목표에 따라 외경 크기는 증가해야하지만 EWP의 경우 볼루트가 있어 축방향 길이를 저감하여 차량 내부 공간을 확보하는 것이 중요하다. 기존 RFM EWP 모터의 축방향 길이는 24.4 mm이고, PCB 고정자 적용 EWP의 최종 모델은 총 적층 길이 16.1 mm(회전자 10 mm, 공극 0.5 mm, 고정자 5.6 mm)로 박형화 설계를 적용하였다. 최종 모델의 전류밀도 약 30.9 A/mm², 모터 효율 78.2%로 기존대비 다소 감소하였으나 모터 전체 축길이 약 34% 저감할 수 있었다.

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] S. Neethu, S. P. Nikam, S. Pal, A. K. Wankhede, and B. G. Fernandes, IEEE Trans. Ind. Electron. **67**, 5269 (2020).
- [2] Y. Chulaee, D. D. Lewis, A. Mohammadi, G. Heins, D. Patterson, and D. M. Ionel, IEEE Trans. Ind. Appl. **59**, 4010 (2023).
- [3] F. Tokgoz, Ö. Gülsuna, F. Karakaya, G. Çakal, and O. Keysan, IEEE Trans. Energy Convers. **38**, 653 (2023).
- [4] F. Marcolini, G. De Donato, F. G. Capponi, and F. Caricchi, IEEE Trans. Ind. Appl. **60**, 5919 (2024).
- [5] G. François and B. Dehez, IEEE Trans. Ind. Appl. **58**, 6035 (2022).
- [6] N.-W. Liu, K.-Y. Hung, B.-T. Lyu, S.-C. Yang, Y.-P. Lin, and C.-Y. Chan, IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. **60**, 3496 (2024).
- [7] D.-H. Choi, I.-J. Yang, M.-K. Hong, D.-H. Jung, and W.-H. Kim, Machines **11**, 991 (2023).
- [8] W. Tong, S. Li, X. Pan, S. Wu, and R. Tang, IEEE Trans. Energy Convers. **35**, 2191 (2020).
- [9] Z. Li, X. Yu, X. Wang, and X. Xing, IEEE Trans. Appl. Supercond. **31**, 5204705 (2021).
- [10] M. T. Girgin, M. K. Guven, and M. Aydin, IEEE Trans. Magn. **58**, 8201304 (2022).
- [11] L. Jia, M. Lin, W. Le, N. Li, and Y. Kong, IEEE Trans. Magn. **56**, 7507306 (2020).
- [12] P. Srikuhumphun, P. Seangwong, J. Jongudomkarn, A. Siritartiwat, N. Fernando, S. Somkun, and P. Khunkitti, IEEE Access **12**, 99912 (2024).
- [13] E. Brescia, M. Palmieri, P. R. Massenio, G. L. Cascella, and F. Cupertino, IEEE Access **11**, 39405 (2023).
- [14] T. Liu, S. Huang, J. Gao, and K. Lu, IEEE Trans. Magn. **49**, 4028 (2013).
- [15] D.-H. Choi, H.-S. Han, M.-K. Hong, D.-H. Jung, and W.-H. Kim, Energies **18**, 2538 (2025).