

Influence of Shape Ratio and Structural Configuration on the Electromagnetic Performance of Axial Flux Permanent Magnet Machines for Drone Applications

Hwi-Rang Ban, Kyeong-Tae Yu, Jun-Ho Jang, Seok-Hyeon Eom,
Seong-Won Kim, Jun-Beom Park, and Jang-Young Choi*

Department of Electrical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, South Korea

Kyung-Hun Shin*

Department of Electrical Engineering, Changwon National University, Changwon 51140, South Korea

(Received 10 September 2025, Received in final form 17 October 2025, Accepted 17 October 2025)

This study investigates the rotor and stator structures of an axial flux permanent magnet synchronous machine (AFPM) for drone applications, aiming to improve efficiency and specific power. Based on a reference model of an outer-rotor permanent magnet synchronous machine designed for drones, both single-sided and double-sided AFPM models are analyzed with respect to various shape ratios. By comparing the characteristics across different shape ratios, structural configurations that exhibit enhanced performance over the reference model are identified. Furthermore, by applying the optimal shape ratio to the yokeless and segmented armature (YASA) type structure, which is also used in traction applications, improvements of 2.24% in efficiency, 14.6% in specific power, and 5.22% in torque density compared with the reference model are confirmed. The results of this study are expected to provide useful guidelines in the initial design stage of drone AFPMs for selecting optimal electromagnetic structures and shape ratios.

Keywords : axial flux permanent magnet synchronous machine, shape ratio, specific power, electromagnetic analysis, finite element method

형상치수비와 구조에 따른 드론용 축방향 영구자석 전동기의 전자기 성능 최적 형상 분석

반휘랑 · 유경태 · 장준호 · 엄석현 · 김성원 · 박준범 · 최장영*

충남대학교 전기공학과, 대전광역시 유성구 대학로 99, 34134

신경훈*

국립창원대학교 전기공학과, 경남 창원시 의창구 창원대학로 20, 51140

(2025년 9월 10일 받음, 2025년 10월 17일 최종수정본 받음, 2025년 10월 17일 게재확정)

본 논문에서는 드론용 축방향 영구자석 동기전동기(axial flux permanent magnet synchronous machine, AFPM)의 효율과 비출력(specific power) 향상을 위해 회전자 및 고정자 구조를 검토하고, 형상치수비에 따른 전자기 특성을 분석하였다. 기준 모델로 드론용 외전형 영구자석 동기전동기를 설정하고, 이를 바탕으로 단축형과 양축형 AFPM 모델을 해석하여 성능 변화를 비교하였다. 특히, 견인용에도 적용되는 YASA(yokeless and segmented armature, YASA) 구조에 최적 형상치수비를 적용한 결과, 기준 모델 대비 효율 2.24%, 비출력 14.6%, 토크밀도 5.22%의 향상을 확인하였다. 이러한 결과는 드론용 AFPM의 초기 설계 단계에서 적절한 전자기 구조 및 형상치수비 선정에 유용한 설계 지침을 제공할 수 있다.

주제어 : 축방향 영구자석 동기전동기, 형상치수비, 비출력, 전자기 특성 해석, 유한요소해석

I. 서 론

최근 항공 및 해상 분야에서 전기 추진화가 가속화됨에 따라 드론의 활용은 물류, 국방, 농업, 레저 등 다양한 영역으로 확대되고 있다. 이에 따라 장시간 비행을 위해 드론용 전동기에는 높은 효율, 높은 비출력, 경량화가 필수적으로 요구된다[1-4].

현재 드론용 전동기에는 주로 외전형 반경방향 자속 영구자석 동기전동기(radial flux permanent magnet synchronous machine, RFPM)가 사용된다. 외전형 구조는 디자인 설계가 용이하고 회전자 요크의 포화도가 낮아 경량화에 유리하지만, 더 높은 비출력을 확보하기에는 한계가 존재한다.

이에 대한 대안으로 축방향 영구자석 동기전동기(axial flux permanent magnet synchronous machine, AFPM)가 주목받고 있다. AFPM은 자속이 축방향으로 형성되며 출력이 외경의 세제곱에 비례하는 특성을 가지므로, 동일 체적 내에서 RFPM보다 높은 성능을 구현할 수 있다[5]. 특히, 드론 프로펠러 축과 직결 배치가 가능하여 공간 활용성이 뛰어나며, 회전자 외경과 축방향 길이 조절을 통해 다양한 설계가 가능하다. 또한, AFPM은 구조에 따라 단측(single-sided)과 양측(double-sided)으로 구분되며, 일반적으로 양측 구조에서 더 높은 토크 밀도와 성능 향상이 기대된다[6,7].

본 연구에서는 Fig. 1에 제시된 AFPM 구조를 대상으로 전자기 성능을 분석하였다. 분석 대상은 슬롯을 갖는 코어드(core-type) 구조이며, 단측형(single rotor single stator, SRSS), 양측형(dual rotor single stator, DRSS/single rotor dual stator, SRDS), 그리고 고정자 요크를 제거하고 분할 코

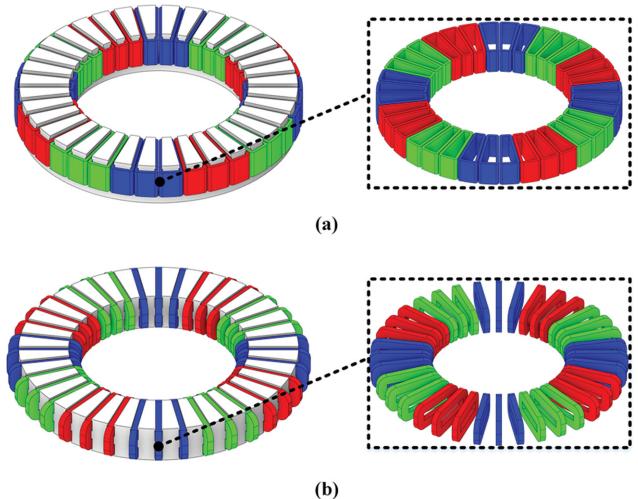


Fig. 2. (Color online) Winding configurations of AFPM machine: (a) tooth (drum) winding and (b) TORUS (ring-type) winding.

어를 적용한 YASA(yokeless and segmented armature) 구조를 포함한다. 다중 구조(multi rotor multi stator, MRMS)는 높은 토크 밀도를 구현할 수 있으나 제작성의 한계로 제외하였다.

또한, Fig. 2에 나타낸 권선 형태 중 환상권(TORUS winding)은 짧은 엔드와인딩을 갖고 집중권 및 분포권 모두에 적합하여 높은 출력 밀도를 구현할 수 있다[8]. 이에 본 연구에서는 드론 적용 가능성을 검토하기 위해 DRSS 구조의 TORUS 권선을 분석 대상으로 선정하였다.

본 연구의 목적은 AFPM의 구조별 특성과 형상치수비(shape ratio)가 성능에 미치는 영향을 규명하고, 기준 모델인

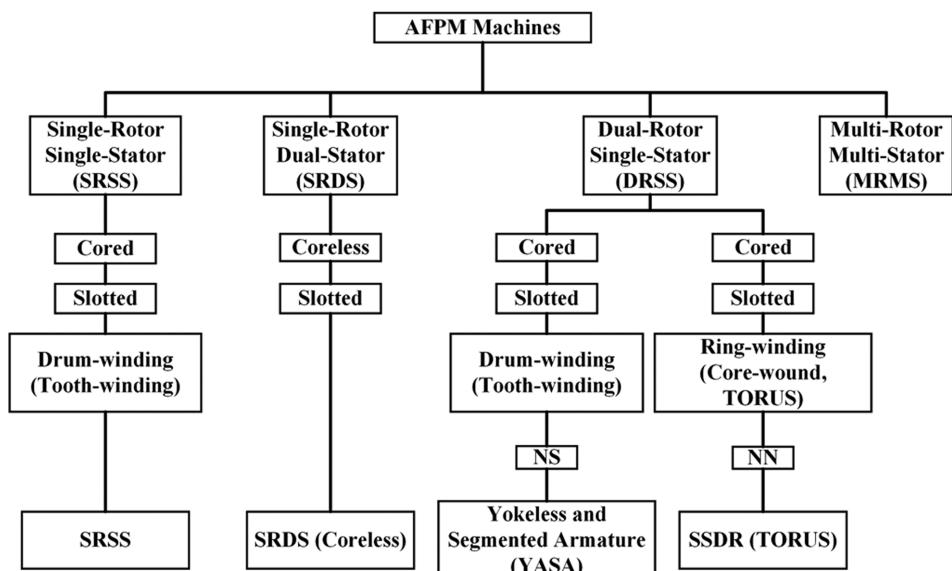


Fig. 1. Configuration of AFPM models.

외전형 RFPM과 비교하여 효율·비출력·토크 밀도 측면에서의 개선 가능성을 검증하는 것이다. 이를 통해 드론용 AFPM의 초기 설계 단계에서 최적 구조 및 형상치수비 설정에 대한 지침을 제시하고자 한다.

II. K_D 와 K_L 에 따른 AFPM의 전자기 특성

1. 외전형 영구자석 동기 전동기의 사양

본 논문에서 기준 모델은 드론용 외전형 RFPM으로, 다극 구조의 40극 36슬롯 모델을 적용하였다. 권선은 치 집중권을 사용하였으며 점적률은 0.6으로 설정하였다. 동일한 점적률과 권선 턴수를 AFPM 설계에도 반영하여 성능 비교를 수행하였다. 영구자석의 두께는 제작 한계를 고려해 2 mm로 고정 하였으며, 결선 방식은 드론 전동기에서 일반적으로 사용되는 텔타 결선을 채택하였다. 이는 배터리 구동 환경에서 출력 확보에 유리하다. 또한, 드론용 전동기는 프로펠러 후면에 장착되어 공랭식으로 동작하므로, 일반 전폐형 전동기보다 높은 전류밀도를 허용할 수 있다. 기준 모델의 세부 사양은 Table I에 정리하였다.

AFPM은 축방향 자속을 가지는 3차원 구조적 특성으로 인해, RFPM처럼 전기강판을 축방향으로 적층하여 제작하기 어렵다. 이러한 구조적 제약은 대량생산에 적합하지 않아 양산성 및 제작비용 측면에서 불리하게 작용한다. 따라서 본 연구에서는 양산성을 고려하여 AFPM의 고정자 코어에 연자성 복합재(soft magnetic composite, SMC)를 적용하여 모델을 구성하였다. 사용된 재질 특성은 Table II에 제시하였으며, 밀도는 전기강판(50PN470) 7,700 kg/m³, SMC(Somaloy 700-3P) 7,300 kg/m³를 적용하여 중량을 산출하였다[9]. Fig. 3은 해석에 사용된 B-H 곡선과 B-P 곡선을 나타낸다. SMC는 낮은 포화자속밀도를 가지지만 형상 자유도가 높다는 장점이 있으며, 반면 전기강판에 비해 성능이 떨어지는 단점이 있다.

Table I. Design specifications of the reference RFPM model.

Parameter	Value
Pole / Slot	40 / 36
Outer diameter of stator [mm]	81
Outer diameter of rotor [mm]	88.5
Air gap [mm]	0.4
Axial length [mm]	20
Maximum input current [A]	20
Rated speed [rpm]	3,000
DC voltage limit [V]	48
Current density limit [A/mm ²]	15
Number of parallel branches	1

Table II. Materials used in the reference RFPM and AFPM models.

Component	Reference RFPM	AFPM
Stator core material	50PN470 (electrical steel)	Somaloy 700-3P (SMC)
Rotor core material	S45C (steel)	
Permanent magnet material	N42SH	
Conductor material	Copper	

Fig. 4는 기준 모델인 RFPM과 AFPM 모델의 3차원 구조를 보여준다. RFPM은 반경방향 자속을 가지므로 2차원 해석을 통해 정확한 해석 결과를 얻을 수 있는 반면, AFPM은 축방향 자속을 가지는 특징으로 인해 3차원 해석이 필요하다. Fig. 5는 기준 모델인 RFPM과 AFPM의 유한요소해석(finite element method, FEM) 메쉬 모델을 나타내며, 기준 모델 RFPM과 SRSS, SRDS(coreloss), DRSS(YASA), DRSS (TORUS)의 메쉬는 각각 9532, 246388, 265726, 436094, 373042개의 조건에서 해석을 진행하였다. SRDS(coreless) 모델의 경우, 고정자가 두 개로 구성되며 고정자 한 개당 3턴의 권선을 적용하여 비교를 수행하였다.

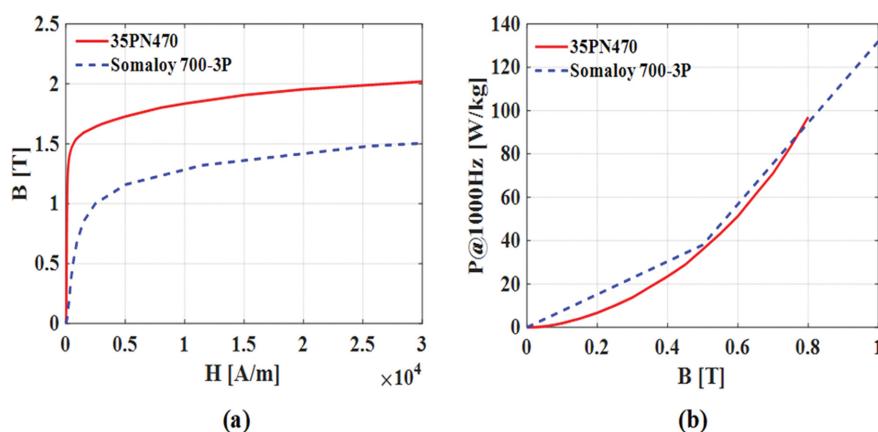


Fig. 3. (Color online) Comparison of core materials: (a) B-H curves and (b) B-P (core loss) curves of 50PN470 and Somaloy 700-3P.

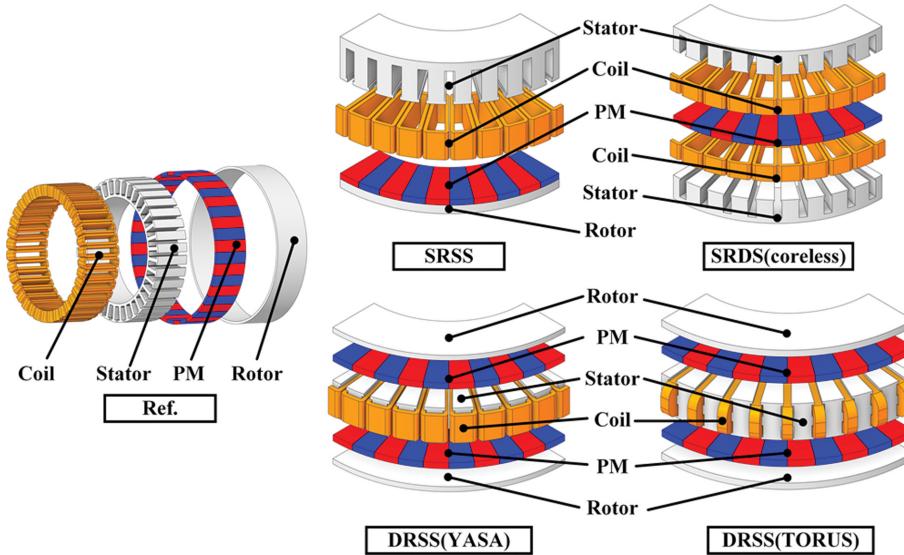


Fig. 4. (Color online) Structures of the reference RFPM and AFPM.

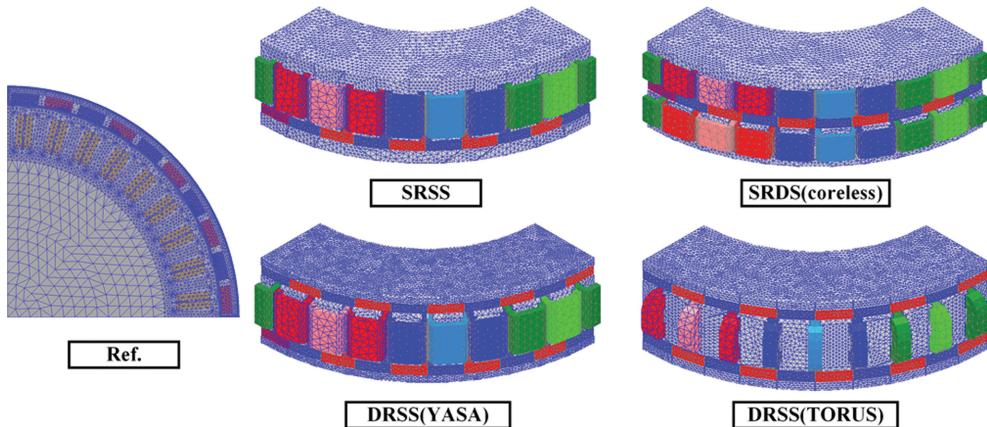


Fig. 5. (Color online) Mesh models of the reference RFPM and AFPM.

2. K_D 에 따른 특성 비교

AFPM은 동일한 체적에서 더 넓은 자석 면적을 확보하여 높은 토크 밀도를 달성할 수 있다. 이러한 특성은 회전자 외경과 내경의 비율에 의해 정의되며, 형상치수비는 식(1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

$$K_D = \frac{R_{in}}{R_{out}} \quad (1)$$

$$K_L = \frac{D}{L} \quad (2)$$

여기서, R_{out} 은 회전자 외경까지의 반지름, R_{in} 은 회전자 내경까지의 반지름, D 는 RFPM과 AFPM의 외경, L 은 축방향 길이를 나타낸다.

RFPM과 AFPM의 토크는 장하비와 치수에 따라 각각 식(3)과 (4)로 표현된다.

$$T_{RFPM} = \pi B_g ac R_{out}^2 L \quad (3)$$

$$T_{AFPM} = \frac{\pi}{2} B_g ac K_D (1 - K_D^2) R_{out}^3 \quad (4)$$

여기서, B_g 는 공극자속밀도, ac 는 전기장하를 나타낸다.

RFPM의 토크는 외경 D 의 제곱에 비례하는 반면, AFPM은 외경 D 의 세제곱에 비례하므로 동일한 체적 조건에서 더 높은 토크 밀도를 기대할 수 있다. 두 토크의 비는 식(5)와 같이 정리된다[10].

$$\frac{T_{AFPM}}{T_{RFPM}} = \frac{\frac{\pi}{2} B_g ac K_D (1 - K_D^2) R_{out}^3}{\pi B_g ac R_{out}^2 L} = \frac{K_L K_D (1 - K_D^2)}{4} \quad (5)$$

Fig. 6는 식(5)를 통해 동일한 장하비 조건에서 RFPM과 AFPM의 토크 성능을 비교한 결과로, 동일 체적 조건인 D 는 90 mm, L 는 20 mm 이내에서 D 가 고정되고 K_D 와 K_L 의 변

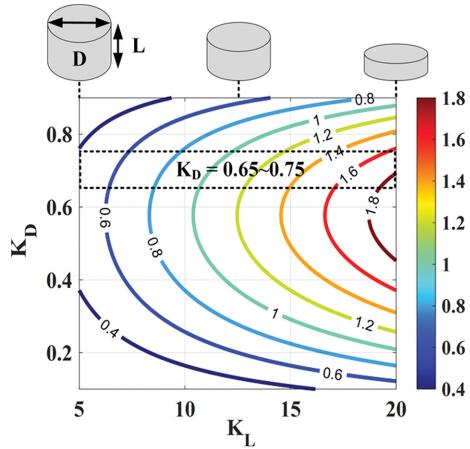


Fig. 6. (Color online) Torque capability of AFPM compared with RFPM as a function of shape ratios K_L and K_D .

회할 때의 토크 비를 나타낸다. 그럼에서 확인할 수 있듯이, 등고선의 값은 토크 비를 나타내며, AFPM은 토크 비가 1을 초과하는 영역에서 RFPM보다 높은 토크 밀도를 나타낸다. 특히, 문헌에 따르면 고출력 밀도를 확보하는 적정 K_D 값은 약 0.65~0.75 범위이며[11], K_L 값이 증가할수록 AFPM의 토크 성능이 RFPM을 상회함을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 K_D 변화에 따른 AFPM 해석 모델의 토크와 비

출력을 나타낸다.

K_D 가 감소하면 영구자석 면적이 증가하여 토크는 향상되지만, 비출력은 SRSS를 제외하고 약 $K_D = 0.6$ 에서 최대가 된다. 이는 K_D 감소 시 자석뿐만 아니라 고정자와 회전자 철심, 퀸선의 제적이 모두 증가하여 전체 중량이 늘어나기 때문이다. 이후 K_L 에 따른 비교는 $K_D = 0.65$ 를 기준으로 수행하였다.

3. K_L 에 따른 특성 비교

Fig. 8은 K_L 변화에 따른 토크와 비출력을 나타낸다. 축방향 길이 $L = 20$ mm 조건에서 외경 D 를 증가시켜 K_L 를 변화시킨 결과, RFPM은 K_L 증가에도 토크가 크게 향상되지 않았고, 비출력은 오히려 감소하였다. 반면 AFPM은 K_L 이 커질수록 RFPM보다 높은 토크 밀도를 보였으나, 비출력을 개선하기 위해서는 더 큰 K_L 값이 필요함을 알 수 있다. 특히 DRSS (TORUS) 구조의 경우, K_L 증가 시 비출력이 감소하여 공간과 중량 제약이 큰 드론 적용에는 부적합함을 확인하였다.

Fig. 9은 K_L 변화에 따른 손실과 효율 특성을 보여준다. SRDS(coreless)를 제외한 대부분의 모델은 기준 외경 $D = 90$ mm보다 큰 K_L 값에서 최고 효율을 나타냈다. 이는 D 가 증가하면 슬롯 면적도 커져 고정자 동손은 거의 일정하게 유지되지만, 철손은 증가하기 때문이다. 따라서 고효율 설계를 위해서는 축방향 길이 L 을 줄이고 외경 D 를 확대하는 방향

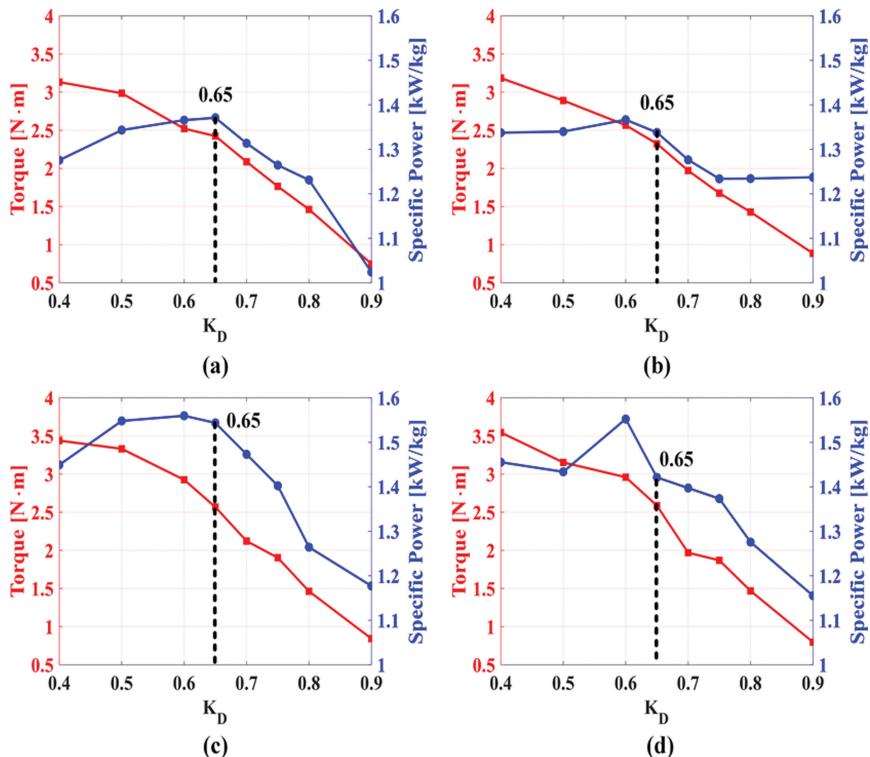


Fig. 7. (Color online) Variation of torque and specific power with K_D for different AFPM structures: (a) SRSS, (b) SRDS (coreless), (c) DRSS (YASA), and (d) DRSS (TORUS).

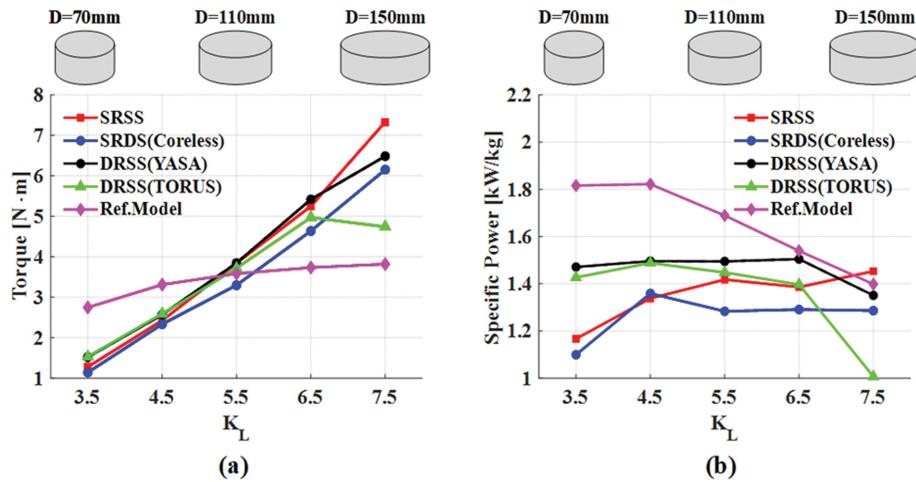


Fig. 8. (Color online) Comparison of performance according to K_L : (a) torque and (b) specific power.

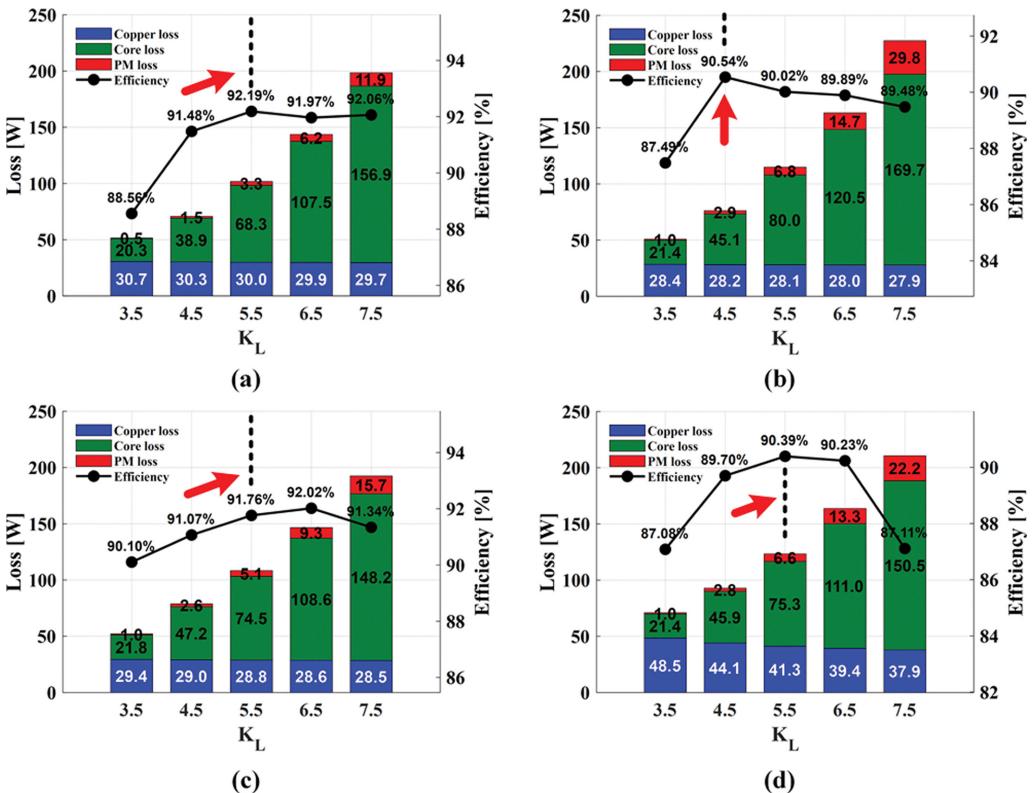


Fig. 9. (Color online) Electromagnetic losses and efficiency of AFPM models as a function of K_L : (a) SRSS, (b) SRDS (coreless), (c) DRSS (YASA), and (d) DRSS (TORUS).

이 바람직함을 알 수 있다.

III. 형상치수비에 따른 전자기 성능 비교

1. 외전형 RFPM의 형상치수비 특성

Fig. 10는 형상치수비 변화에 따른 RFPM의 특성을 보여준다. 외경 D 가 감소하고 축방향 길이 L 이 증가할 경우, 비출

력과 효율은 동일한 방향으로 향상되는 경향을 나타낸다. 특히 RFPM은 외경 D 의 확대보다는 축방향 길이 L 의 증가가 성능 개선에 더 효과적이며, 이는 고정자와 회전자의 축방향 길이가 동일하게 영향을 받기 때문이다.

2. AFPM의 형상치수비 특성

Fig. 11은 형상치수비 변화에 따른 AFPM의 비출력을 나타

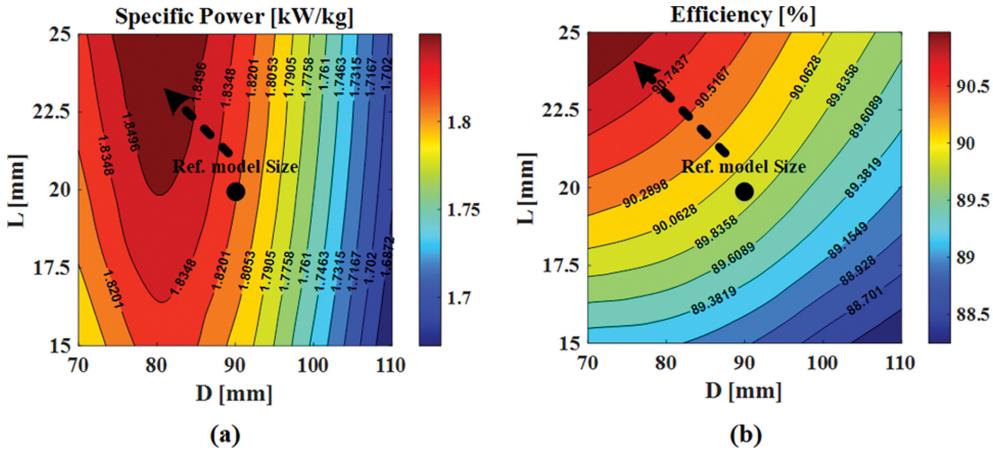


Fig. 10. (Color online) Characteristics of the reference RFPM as a function of shape ratio: (a) specific power and (b) efficiency.

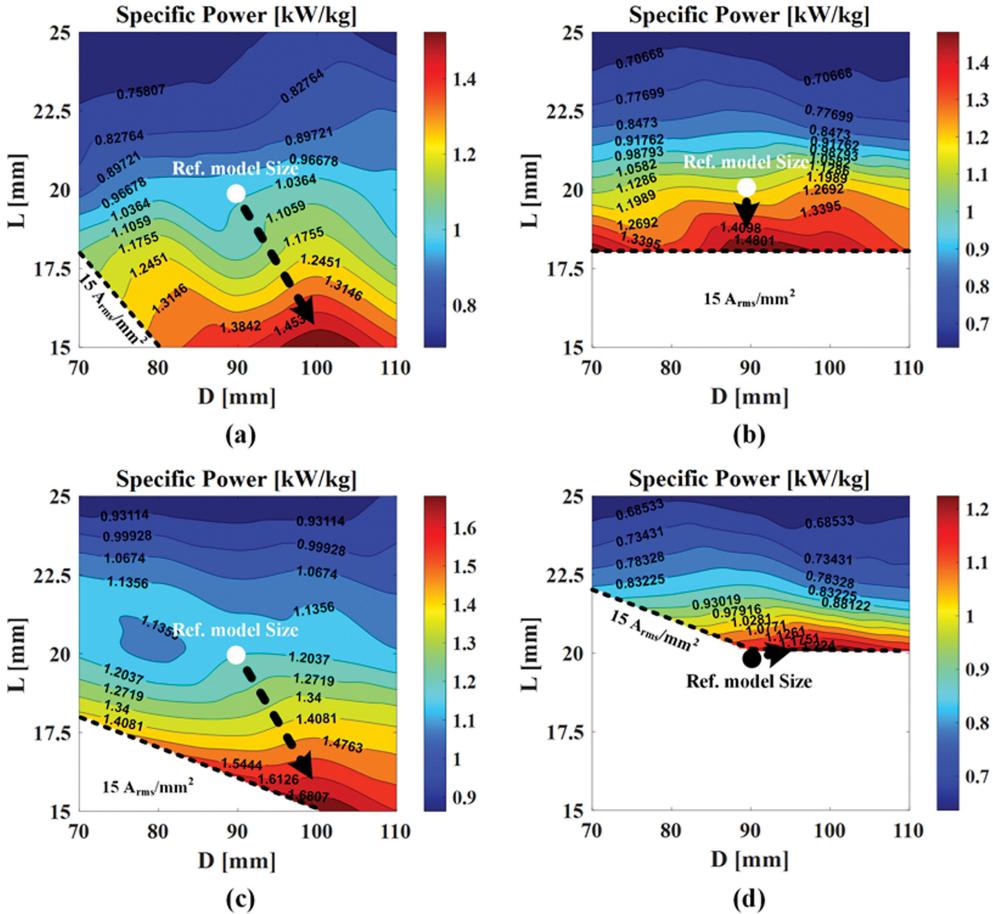


Fig. 11. (Color online) Specific power characteristics of AFPM models as a function of shape ratio: (a) SRSS, (b) SRDS (coreless), (c) DRSS (YASA), and (d) DRSS (TORUS).

낸다. 축방향 길이 L 이 감소하면 슬롯 면적도 줄어들어 전류 밀도 한계를 초과하는 영역이 발생하며, 이 구간은 점선으로 표시하였다. 네 가지 모델 모두 L 이 감소하고 외경 D 가 증가할수록 비출력이 향상되며, 이는 RFPM과는 반대되는 경향이다.

Fig. 12은 형상치수비 변화에 따른 AFPM의 효율을 보여준다. L 이 감소하고 D 가 증가하는 방향에서 효율 역시 개선되는 경향을 나타낸다. 따라서 AFPM은 D 증가와 L 감소의 조합에서 비출력과 효율 모두 향상될 수 있음을 확인할 수 있다.

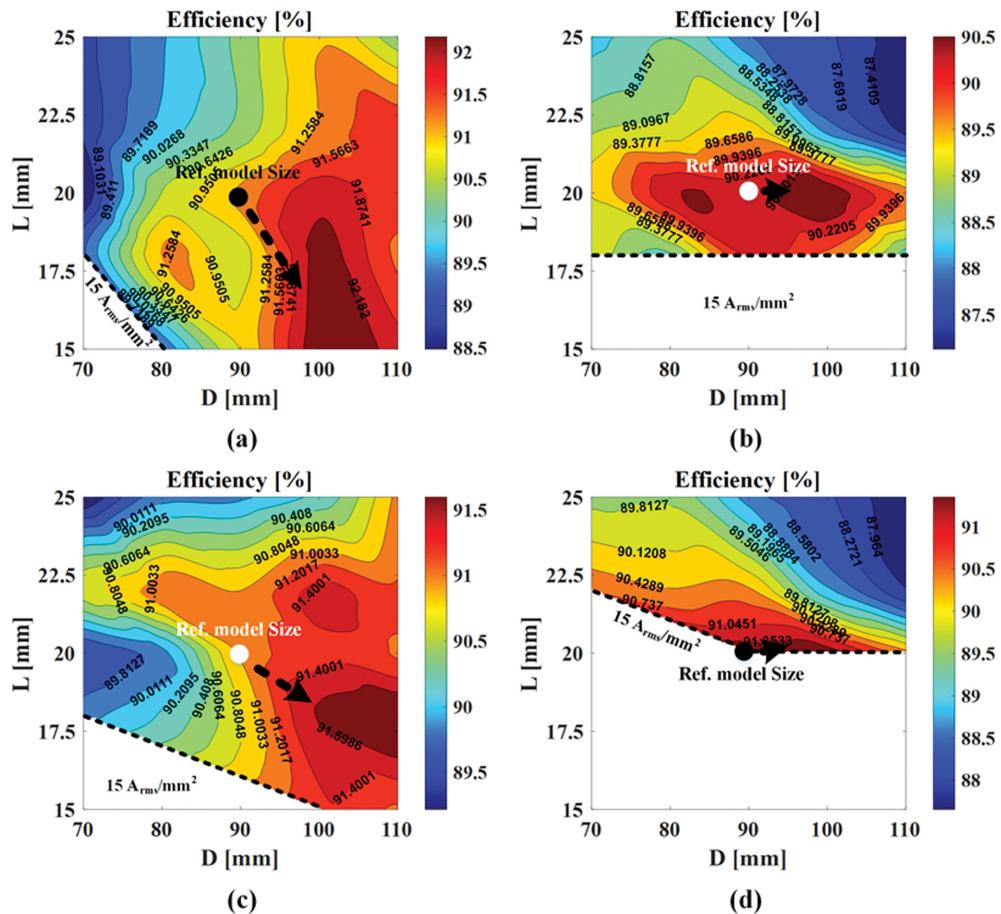


Fig. 12. (Color online) Efficiency characteristics of AFPM models as a function of shape ratio: (a) SRSS, (b) SRDS (coreless), (c) DRSS (YASA), and (d) DRSS (TORUS).

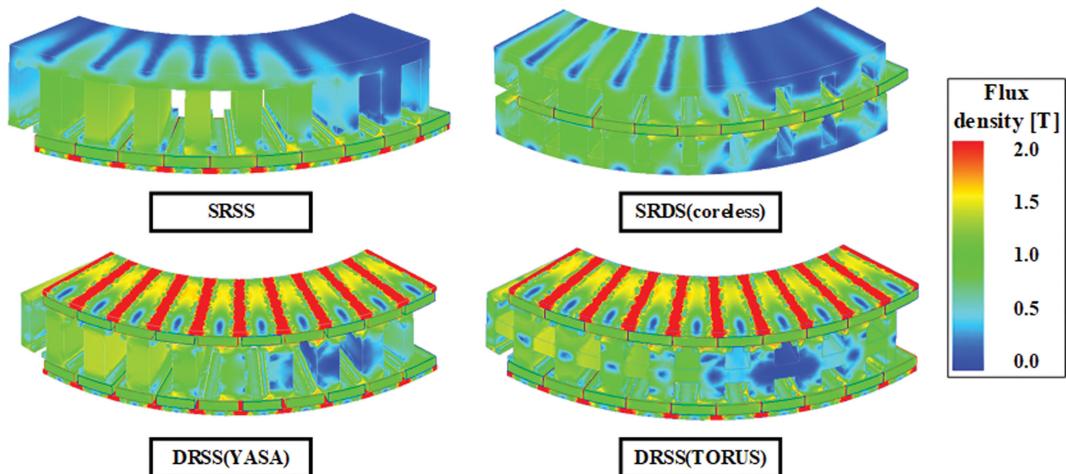


Fig. 13. (Color online) Magnetic flux density distribution of the AFPM at the optimal shape ratio under load conditions.

3. 최적 형상치수비에서의 전자기 성능 비교

Fig. 13은 최적 형상치수비에서의 부하 자속 밀도 분포를 나타내며, Fig. 14은 무부하 역기전력과 부하 토크 특성을 보여준다. 분석 결과, DRSS(YASA) 구조의 무부하 역기전력은

기준 모델 대비 9.53% 증가하였고, 동일 전류 조건에서 토크는 20.9% 향상되었다. 이는 회전자가 양측에 배치되어 동일 체적 내에서 더 높은 토크를 발생시킨다.

최적 형상치수비에서는 초기 형상 대비 슬롯 면적이 달라

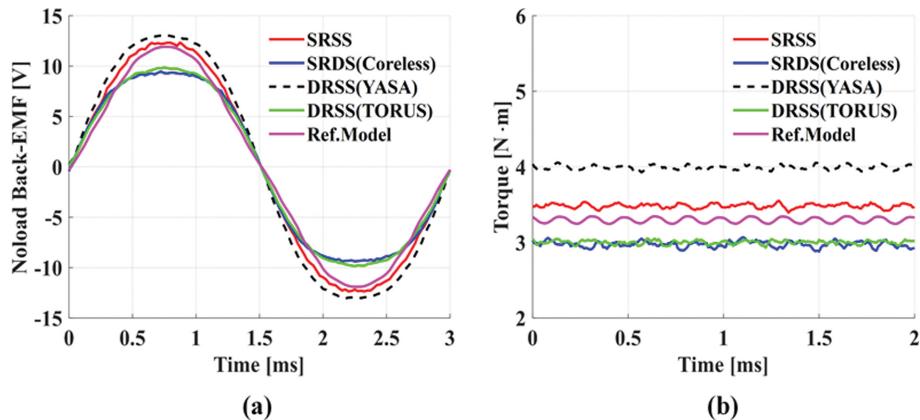


Fig. 14. (Color online) Electromagnetic performance waveforms of the AFPM at the optimal shape ratio: (a) no-load back-EMF and (b) rated torque.

Table III. Comparison of electromagnetic performance between the reference RFPM and AFPM structures at the optimal shape ratio.

Parameter	Reference RFPM	SRSS	SRDS (coreless)	DRSS (YASA)	DRSS (TORUS)
Outer diameter [mm]	88.5	100	100	100	100
Axial length [mm]	20	18	18.8	18	18
Weight [kg]	0.560	0.625	0.622	0.593	0.606
Speed [rpm]	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
Torque [N·m]	3.30	3.48	2.97	3.99	3.90
Number of turns	6	9	3	9	7
Current density [A_{rms}/mm^2]	13.89	12.71	12.13	14.35	14.83
Maximum line voltage [V]	37.61	41.81	31.50	42.43	31.78
Copper loss [W]	38.66	50.31	46.37	56.52	48.24
Core loss [W]	74.23	43.98	57.31	46.91	52.71
PM loss [W]	1.88	1.21	4.52	1.90	2.23
Efficiency [%]	90.02	91.97	90.89	92.26	90.13
Specific power [kW/kg]	1.85	1.75	1.50	2.12	1.56
Torque density [Nm/L]	26.82	24.62	20.11	28.22	21.22

지므로, 제작성을 고려한 점적률을 유지하기 위해 권선 턴수를 조정하였다.

Table III은 기준 외전형 RFPM과 AFPM 구조의 전자기 성능을 비교한 결과이다. SMC 코어를 적용한 AFPM은 철순이 낮아 효율 축면에서 유리하였으나, 비출력은 DRSS (YASA) 구조를 제외하고는 개선되지 않았다. 따라서 드론과 같이 축방향 길이 L 이 짧은 응용에서는 일부 AFPM 구조가 적합하지 않으며, DRSS(YASA)가 RFPM보다 동일 점적률 조건에서 전류밀도가 증가하지만 전류밀도 제한 내에서 더 높은 비출력, 토크 밀도, 효율을 달성할 수 있음을 확인하였다. 또한, YASA 구조는 고정자 요크가 제거되어 코어 중량이 감소함으로써, 비출력 향상에 효과적인 구조임을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 드론용 AFPM의 효율, 비출력, 토크 밀도 향상을 위해 구조별 특성과 형상치수비(K_D , K_L)를 비교·분석

하였다. 분석 결과, 축방향 길이 L 이 짧은 드론 응용에서는 DRSS(YASA) 구조가 가장 적합함을 확인하였다. 특히 기준 RFPM 대비 효율은 2.24%, 비출력은 14.6%, 토크 밀도는 5.22% 향상되었다.

이러한 결과는 구조 및 형상치수비 최적화를 통해 외전형 RFPM보다 고효율·고비출력의 AFPM을 설계할 수 있음을 보여주며, 드론용 AFPM의 초기 설계 단계에서 전자기 구조 및 형상치수비 선정에 중요한 설계 지침을 제공한다.

감사의 글

이 논문은 2025~2026년도 국립창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

References

- [1] M. S. Islam, R. Mikail, and I. Husain, IEEE Trans. Ind. Appl.

- 55, 5789 (2019).
- [2] M. Liben and D. C. Ludois, IEEE Trans. Ind. Appl. **57**, 2342 (2021).
- [3] S. D. Panjaitan, Y. S. K. Dewi, M. I. Hendri, R. A. Wicaksono, and H. Priyatman, IEEE Access **10**, 120650 (2022).
- [4] Y. Park, H. Kim, H. Jang, S.-H. Ham, J. Lee, and D.-H. Jung, IEEE Trans. Ind. Appl. **30**, 5201405 (2020).
- [5] H.-J. Pyo, J. W. Jeong, J. Yu, S. G. Lee, and W.-H. Kim, IEEE Trans. Ind. Appl. **30**, 5202004 (2020).
- [6] Y. Wang, J. Lu, C. Liu, G. Lei, Y. Guo, and J. Zhu, IEEE Trans. Magn. **55**, 8105304 (2019).
- [7] R. Tsunata, M. Takemoto, J. Imai, T. Saito, and T. Ueno, IEEE Trans. Ind. Appl. **59**, 3353 (2023).
- [8] R. Huang, Z. Song, H. Zhao, and C. Liu, IEEE Trans. Transp. Electrif. **8**, 2118 (2022).
- [9] S. Sun, F. Jiang, T. Li, B. Xu, and K. Yang, IEEE Trans. Ind. Appl. **30**, 5205906 (2020).
- [10] N. Gadiyar, J. Van Verdeghem, and E. L. Severson, IEEE Trans. Ind. Appl. **59**, 3920 (2023).
- [11] F. G. Capponi, G. De Donato, and F. Caricchi, IEEE Trans. Ind. Appl. **48**, 2190 (2012).