ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 36(3), 281-286 (2026) https://doi.org/10.4283/JKMS.2026.36.3.281

Optimal Design and Electromagnetic Analysis of an Outer Rotor Motor Considering Material Variation

Seyeong Kim*
5th R&D Institute, Agency for Defense Development, Changwon 51678, Republic of Korea

(Received 18 March 2026, Received in final form 2 June 2026, Accepted 4 June 2026)

This study presents the optimal design and performance analysis of an outer rotor motor for underwater applications. To achieve the target power and maximize torque performance within limited operating conditions, the motor structure was optimized by selecting slot opening, shoe angle, and tooth width as design variables. Based on the optimized model, the characteristics according to the air-gap length were analyzed, revealing that the 5mm air-gap model exhibited superior power output compared to the target. This air-gap was selected as the base design as it not only ensures sufficient thickness for waterproof molding in underwater environments but also provides a strategic element for weight reduction by utilizing the back-EMF margin to shorten the stack length. By adjusting the stack length and materials based on this design, it was confirmed that a weight reduction of up to 13.36% could be achieved while maintaining the target power using N42SH or N45SH magnets. Finally, considering performance requirements and economic efficiency, the model employing N42SH or N45SH was selected as the final design.

Keywords : outer rotor motor, response surface methodology, electromagnetic analysis, neodymium magnet

외전형 전동기의 최적 설계 및 재료 변경에 따른 전자기 특성 분석

김세영*
국방과학연구소 5연구원, 창원시 진해구, 51678

(2026년 3월 18일 받음, 2026년 6월 2일 최종수정본 받음, 2026년 6월 4일 게재확정)

본 연구에서는 수중 환경에 적용되는 외전형 전동기의 최적 설계 및 성능해석을 수행하였다. 제한된 구동 환경에서 목표 출력을 달성하고 토크 리플과 코깅 토크 성능을 개선하기 위해 slot opening, shoe angle, tooth width를 설계 변수로 선정하여 전동기를 최적화하였다. slot opening은 코깅 토크에, shoe angle은 토크 리플에, tooth width는 자속 분포에 영향을 미친다. 최적 모델을 기반으로 공극 길이에 따른 특성을 비교 분석한 결과, 공극 5 mm 모델은 목표 출력 대비 높은 출력 특성을 나타냈다. 이는 수중 환경에서의 방수 몰딩 두께 확보를 가능하게 할 뿐만 아니라, 높은 유기전압 마진을 활용한 적층 길이 단축 및 경량화의 요소로 판단되어 기초 설계안으로 채택되었다. 이를 바탕으로 적층 길이와 재료를 변경하여 성능을 분석한 결과, N42SH, N45SH 재료를 적용한 경우, 목표 출력은 유지하면서 최대 13.36% 경량화가 가능함을 확인하였다. 최종적으로 요구 성능과 경제성을 고려하여 N42SH 또는 N45SH를 적용한 모델을 최종 모델로 선정하였다.

주제어 : 외전형 전동기, 반응표면법, 전자기 해석, 네오디뮴 자석

I. 서 론

최근 무인선박 및 수중 로봇 시스템의 운용 범위가 확대됨에 따라 수중 환경에서도 운전 신뢰성을 확보할 수 있는 전동기에 관한 연구가 이루어지고 있다. 특히 추진 효율 향상과 소형, 경량화는 전동기의 중요한 요소이며, 수중 환경에 적합한 전동기 구조 설계 및 신뢰성 평가를 요구한다.

일반적으로 전동기는 내전형 전동기가 널리 사용되고 있지만, 고토크를 제공하는 데 한계가 있다. 반면 외전형 전동기는 회전자가 바깥에 위치하고 스테이터가 내부에 있는 구조로, 동일한 조건과 비교하였을 때 상대적으로 고토크에 유리하다. 또한 구조적으로 회전자 냉각 효율, 조립 공정 측면에

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-55-540-6424, e-mail: ksy26@add.re.kr

서도 장점이 있으며, 제한된 공간 및 신뢰성이 요구되는 환경에서는 외전형 전동기가 유리하다[1-3]. 따라서 본 연구에서는 소형, 경량화를 위해 외전형 전동기를 채택하였고, 목표 출력 및 토크 최대화를 위한 최적 설계 및 전자계 해석을 진행하였다.

토크 리플과 코깅 토크가 증가할 경우 전동기의 진동, 소음이 증가하고, 성능이 저하될 수 있다. 특히 코깅 토크는 영구자석과 고정자 슬롯 사이의 자기적 상호작용에 의해 발생하며, 진동과 소음을 발생시키는 주요 요소이다[4,5]. 토크 리플은 공극 자속 밀도의 고조파 성분과 슬롯 구조에 영향을 받으며, 기계적 피로 및 신뢰성 저하를 일으킨다. 최적화를 위해 반응표면법을 사용하였으며, 3개의 설계 변수를 중심합성법으로 샘플링하였고, 총 15회의 변수 조합을 고려하여 시뮬레이션을 수행하였다[6-8]. 토크, 토크 리플, 코깅 토크를 목적함수로 선정하였고, 목적함수에 영향을 주는 요소인 slot opening, shoe angle, tooth width를 변수로 선정하였다. 이를 통해 최적화된 모델을 선정하였다.

본 논문에서는 수중 환경에서 운용 가능한 전동기 개발을 목표로 한다. 3개의 설계 변수와 3개의 목적함수로 최적 모델을 선정하였다. 목표 출력을 만족하고, 전동기를 경량화하기 위해 공극, 적층 길이, 자석 및 코어의 재료를 변화하여 전자계 해석 결과를 비교분석 하였고, 최종 모델을 선정하였다[9].

II. 외전형 전동기 설계 및 해석

1. 초기 모델 사양

초기 모델의 주요 사양 및 해석 결과는 Table I과 같다. 출력 밀도 향상을 위해 자속 밀도가 높은 NdFeB 계열의 영구자석을 적용하였고, 코어에는 철손이 작은 35PN230을 사용하였다. 출력은 목표 출력을 1로 하여 정규화 값으로 표현하였으며, Cogging Torque/Torque(%)는 해석 모델의 정격 토크 대비 코깅 토크의 비를 백분율(%)로 정의한 것이다. 초기 모델 해석 결과 정규화된 출력은 0.96이므로 목표 출력에 도달하지 못하였다.

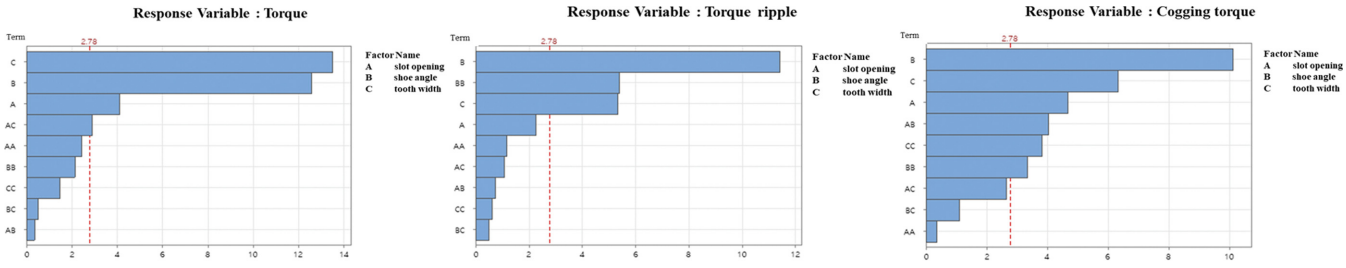
Table I. Specification of initial model.

Item	Model
Normalized power	0.96
No. of phase	3
Pole slot	40p 48s
Magnet	N48SH
Core	35PN230
Outer diameter (mm)	410
Air gap (mm)	7
Torque ripple (%)	1.41
Cogging Torque/Torque (%)	0.17
Efficiency (%)	93.76

2. 최적 모델 해석

본 논문에서는 토크 최대화, 진동의 주원인인 코깅 토크 및 토크 리플을 최소화하는 것을 목적함수로 설정하였다. 또한, 토크 최대화, 토크 리플 및 코깅 토크 최소화를 위해 slot opening, shoe angle, tooth width를 변수로 선정하였다. slot opening은 공극 내 자속 밀도 분포를 결정하여 코깅 토크에 영향을 미치며, shoe angle은 고조파 성분을 조절하여 토크 리플을 억제하는 핵심 변수이며, tooth width는 자기 회로의 포화를 결정하여 토크 출력에 기여한다. 목표 출력을 최적점으로 선정하였고, 코어의 자속 밀도가 재료의 포화 자속 밀도를 초과하지 않도록 제약조건을 두었다. 총 실험 횟수는 15회이며, 반응 함수에 대한 회귀방정식의 adjusted R-square 값으로 모델의 신뢰도를 판단하였다. 토크, 토크 리플, 코깅 토크의 adjusted R-square 값은 각각 96.59%, 93.63%, 94.55%로 신뢰도가 높은 것을 확인할 수 있다. Fig. 1은 파레토 차트를 나타낸 것으로, 분석 결과 shoe angle과 tooth width가 토크와 코깅 토크에 지배적인 영향을 미치는 것을 확인하였다.

Fig. 2는 최적 설계 결과를 나타내는 그림으로 신뢰도는 약 99%로 확인되었고, 각 변수의 범위는 각각 2~6 mm, 10°~30°, 10~12 mm로 설정하였다. 본 연구에서는 Response



(a) Torque　　(b) Torque ripple　　(c) Cogging torque

Fig. 1. (Color online) Pareto chart.

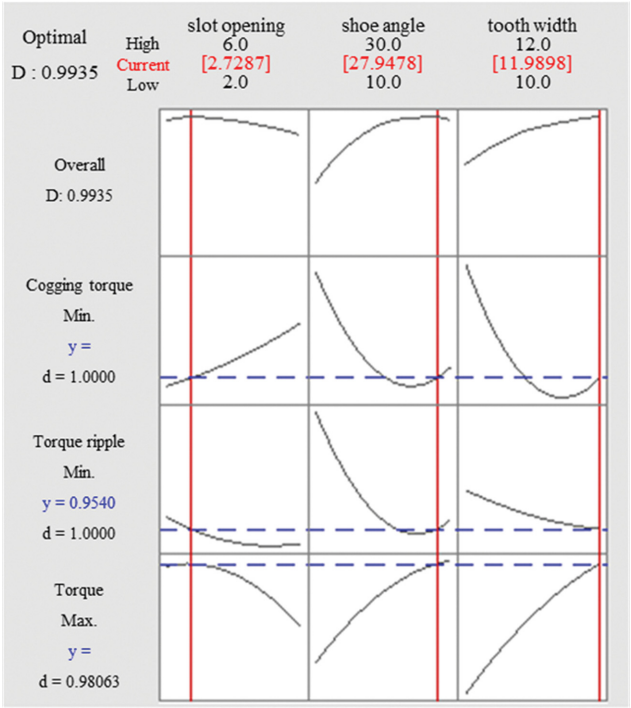


Fig. 2. (Color online) Result of RSM optimization design.

Optimizer를 이용하여 종합 만족도를 최대화하는 최적점을 도출하였으며, 토크 최대화와 토크 리플 및 코깅토크 최소화를 동시에 만족하는 설계 변수를 선정하였다. 그 결과 slot opening 약 2.73 mm, shoe angle 약 27.95°, tooth width 약 11.99 mm로 도출되었다.

RSM 기반 최적 설계의 타당성 검증을 위해 초기 모델, RSM, 최적 모델(FEA)의 설계 변수 및 성능 결과를 Table II에 나타내었다. RMS 모델과 최적 모델(FEA)에서 토크 리플의 경우 오차율은 약 4%로 높은 예측 정밀도를 보였고, 토크 대비 코깅 토크 비율 절댓값의 차이는 0.01%인 것을 확인할 수 있다. 또한, 최적화를 통해 slot opening, shoe angle, tooth width 값이 변화하면서 초기 모델 대비 최적 모델에서 토크 리플은 약 35.4%, 토크 대비 코깅 토크 비율은 약 70% 감소된 것을 확인할 수 있다.

Table III. Analysis result according to air gap.

Case	1	2	3
Air gap	5 mm	7 mm	9 mm
Normalized power	1.18	1	0.81
No. of phase		3	
Magnet		N48SH	
Core		35PN230	
Line-Line terminal voltage(peak,V)	449.5	390.7	339.6
Torque ripple (%)	1.09	0.91	1.15
Cogging Torque/Torque (%)	0.44	0.06	0.04
Efficiency (%)	94.71	93.97	92.95
Weight (kg)	340.16	341.51	342.87

3. 공극 변화에 따른 성능 비교

최적 모델을 기반으로 공극 변화에 따른 성능 변화를 분석하였다. 식(1)과 식(2)는 토크와 출력을 나타내는 식이다. 여기서 T는 토크, B_g는 공극 자속 밀도, A는 전기적 부하, r은 공극 반경, l은 적층 길이를 나타낸다. 공극은 크기에 따라 자속, 토크 등에 영향을 미친다.

$$T = \frac{\pi}{2} B_g A r^2 l \tag{1}$$

$$P = \frac{\pi}{2} B_g A r^2 l \omega \tag{2}$$

Table III와 Fig. 3은 공극 길이에 따른 해석 결과를 나타낸 것이다. 적층 길이, 재료 등은 모두 동일하며, 공극 길이는 회전자와 고정자 사이 몰딩제 및 복합재가 추가되는 것을 고려하여 선정한 것이다.

해석 결과, 공극 7 mm는 목표 출력에 만족하였고, 효율 90% 이상을 달성하였다. 공극 9 mm는 효율은 90% 이상이지만, 목표 출력 대비 0.81의 값이 나왔고, 선간전압이 입력 전압 대비 낮게 나타났다. 공극 5 mm는 효율 90% 이상, 목표 출력 대비 18% 크게 나왔으며, 선간전압은 입력 전압을 초과해서 나타났다. 이는 높은 전압 마진을 바탕으로 적층 길이를 단축하여 전동기를 경량화할 수 있는 설계적 잠재력을 나타낸다. 따라서 2.4절에서는 목표 출력 확보 및 경량

Table II. Comparison of design variables and performance.

Item	Initial model	RSM model (predicted value)	Optimization model (FEA)
Slot opening	3.2	2.7287	2.73
Shoe angle	30	27.9478	27.95
Tooth width	12	11.9898	11.99
Torque ripple (%)	1.41	0.95	0.91
Cogging Torque/Torque (%)	0.17	0.04	0.05
Efficiency (%)	93.76	-	93.97

Air gap : 7 mm

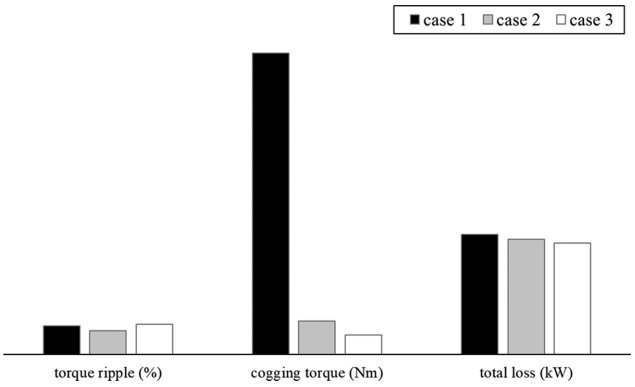


Fig. 3. Performance comparison according to air gap.

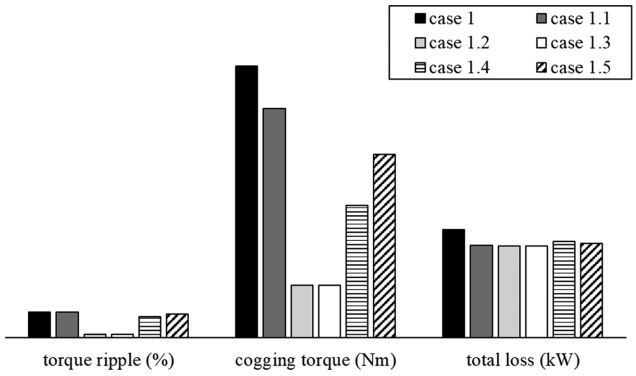


Fig. 4. Performance comparison according to stack length and materials.

화를 위해 공극 5 mm 모델을 기초 설계안으로 채택하였으며, 이를 기준으로 적층과 물성에 변화에 따른 성능 비교 분석을 수행하였다.

4. 적층 및 물성 변화에 따른 성능 비교

공극 5 mm일 경우 목표 출력보다 크게 발생했으므로 경량화를 위해 적층 길이를 조절하여 목표 출력값에 맞추고, 적층 길이와 영구자석 및 코어의 종류에 따른 특성 변화를 분석하였다.

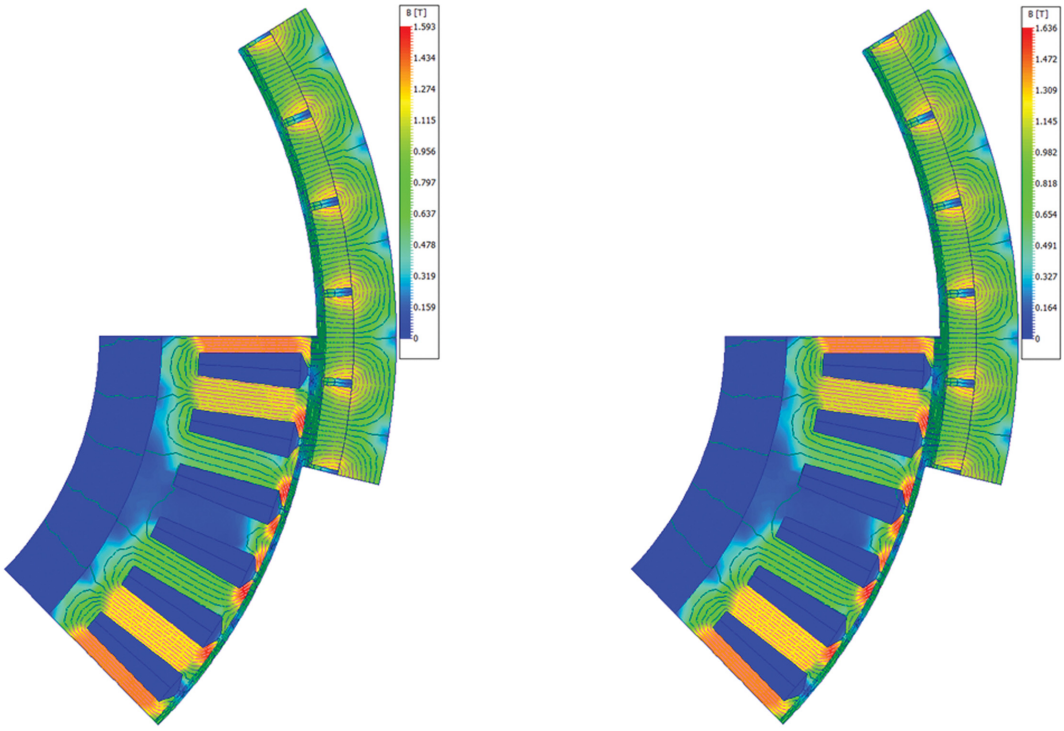
Case 1.1~ 1.5는 적층 길이와 영구자석 및 코어의 물성에 변화를 고려하였고, Table IV와 Fig. 4에 각 모델의 해석 결과를 나타내었다. 여기서 적층 길이는 case 1의 실제 길이를 1로 정규화하여 표기하였다. 이에 따라 case 1.1~1.5의 적층 길이 값은 case 1 대비 적층 길이 비율을 의미한다. VACO FLUX 50을 사용한 case 1.2와 1.3의 경우, 적층 길이, 토크 리플, 코깅 토크 모두 35PN230보다 값이 작았으며, 이는 재료의 높은 포화 자속 밀도로 인해 자기적 왜곡이 줄어들고, 고조파가 억제되었기 때문이다. 반면 효율에서는 유의미한 차이가 없었는데, 이는 자속밀도가 약 1.6 T로, 35PN230의 포화 자속 밀도인 2.0 T 이내에 해당하기 때문이다. 따라서 포화 자속 밀도가 높을 때 사용하는 코발트 철심의 사용으로 인해 성능 변화가 크게 관측되지 않았다. 체적당 철손 분석 결과, case 1.1~1.3 모두 유사하였고, 이는 자기 포화가 발생하지 않는 영역에서 고가의 코발트 철심을 적용하더라도 체적당 철손이 크게 감소하지 않음을 나타낸다. 코발트 철심 적용은 치폭, 직경 등을 더 감소시킬 때 효과적이므로 향후 개선 사항에 고려해볼 수 있을 것으로 판단된다.

Case 1.4와 case 1.5는 영구자석에 N48SH 대신 N42SH와 N45SH를 적용한 경우이며, case 1과 비교했을 때, 출력 조건을 만족하는 범위 내에서 적층 길이 감소로 인해 무게가 10.89%, 13.36% 감소하였다. 특히 체적당 철손이 case 1.1~1.3 대비 약 12% 감소하였으며, 이를 통해 열적 안정성이 향상되었다. Fig. 5와 같이 자속 밀도는 shoe 부분에 1.59~1.63 T로 국부적으로 집중되지만 포화하지 않았고, 고정자 재료의 포화자속밀도가 2.3 T로 높은 코발트 철심일 때를 제외

Table IV. Analysis result according to stack length and materials.

Case	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
Normalized length	1	0.843	0.8	0.8	0.89	0.87
Normalized power	1.18	1	1	1	1	1
Magnet	N48SH	N48SH	N48SH	N48SH	N42SH	N45SH
Rotor core	35PN230	35PN230	35PN230	VACO FLUX 50	35PN230	35PN230
Stator core	35PN230	35PN230	VACO FLUX 50	VACO FLUX 50	35PN230	35PN230
Line-Line terminal voltage (peak, V)	449.5	380	379	379	386	381.9
Torque ripple (%)	1.09	1.09	0.15	0.15	0.89	1
Cogging Torque/Torque (%)	0.44	0.44	0.099	0.099	0.25	0.35
Iron loss/volume(kW/m^3)	57.52	57.52	57.78	57.53	50.20	50.48
Efficiency (%)	94.71	94.63	94.68	94.68	94.46	94.54
Weight (kg)	340.16	243.19	282.79	287.66	303.13	294.72

Air gap : 5mm, No. of phase : 3



(a) case 1.4 (b) case 1.5

Fig. 5. (Color online) Flux density distribution.

하고 자석의 강도에 따라서 코깅 토크와 토크 리플이 비례하는 경향을 보이는 것을 확인하였다. 또한, 최근 희토류 이슈로 인해 중희토류(Tb, Dy) 수출 규제와 공급망 불확실성이 증대함에 따라, 본 연구에서는 포화자속밀도가 높은 N48 grade보다 수급이 상대적으로 안정적이고, 가격 경쟁력을 갖춘 N42 또는 N45 사용이 적절하다고 판단하였고, N42 또는 N45 사용으로도 적층 길이 최적화를 통해 요구 성능을 만족할 수 있음을 확인하였다.

III. 결 론

본 논문에서는 수중 환경에 적용되는 전동기의 최적 설계 및 성능해석을 수행하였다. 반응표면법의 중심합성법을 이용하여 최적 설계를 수행하였으며, 공극 변화에 따른 특성 변화를 확인하였다. 본 연구의 전동기는 수중 추진용 전동기이며, 회전자와 고정자의 방수를 위한 기계적 공극과 자기적 공극을 고려하여 공극의 하한값을 5 mm로 설정하였다. 이는 수중 환경에서의 신뢰성 확보를 위한 것이다. 5 mm 공극일 때 분석 결과, 공극이 기존 대비 감소하여 출력 밀도가 증가함에 따라 출력과 효율은 향상되었으나, 좁아진 공극 내에서 자속 밀도의 고조파 왜곡이 심화됨에 따라 토크 리플과 코깅 토크가 상승하는 관계가 확인되었다.

공극 5 mm를 기준으로 적층 길이 변화와 재료 변화에 따른 특성을 분석한 결과, 고출력 재료인 VACOFLUX 50은 높은 포화자속 밀도로 인해 코어의 자기 포화가 억제되어 기존 재료 대비 토크 리플과 코깅 토크가 감소하는 효과를 보였으나, 자속밀도가 포화점 이내에 해당하여 효율 및 체적당 철손 밀도는 유사하였다. N42SH와 N45SH 영구자석을 사용한 경우, N48SH과 비교하였을 때, 목표 출력은 유지하면서 체적당 철손은 약 12% 감소하였으며, 중량은 각각 10.89%, 13.36% 감소하였다. 따라서 공극 개선을 통한 설계 최적화와 영구자석 및 코어 재료의 변화를 종합적으로 고려할 때, 경제적 측면과 열적 안정성을 동시에 확보할 수 있는 case 1.4와 case 1.5를 향후 개선 모델로 제시하였다.

감사의 글

이 논문은 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(915057401).

References

[1] H. Barua, L. Lin, V. Rallabandi, J. Wilkins, P. Kumar, and B. Ozpineci, IEEE Access **12**, 137881 (2024).

[2] T. S. Kim, J. W. Yang, K. H. Shin, G. H. Jang, C. Han, and J. Y. Choi, Machines **13**, 440 (2025).
[3] M. M. Koo, H. K. Lee, H. J. Shin, and J. Y. Choi, J. Korean Magn. Soc. **34**, 278 (2024).
[4] W. Hao, G. Zhang, W. Liu, H. Liu, and Y. Wang, Energies **16**, 422 (2023).
[5] K. Abbaszadeh, F. Rezaee Alam, and M. Teshnehlab, Energy Conversion and Management **55**, 108 (2012).
[6] M. A. Bezerra, R. E. Santelli, E. P. Oliveira, L. S. Villar, and L. A. Escaleira, Talanta **76**, 965 (2008).
[7] S. T. Jo, Y. G. Lee, J. H. Lee, and J. Y. Choi, Energies **15**, 461 (2022).
[8] V. Rafiee and J. Faiz, J. Energy Technol. **12**, 43 (2019).
[9] D. K. Hong, J. G. Lee, Y. H. Jeong, K. D. Kim, and I. H. Park, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers **74**, 432 (2025).