

마그네틱 기어의 토크리플 개선을 위한 폴피스 형상 연구

김찬승* · 박의중* · 김성진* · 김용재**

An Study on Pole Piece Shape for Improving Torque Ripple of Magnetic Gears

Chan-Seung Kim* · Eui-Jong Park* · Sung-Jin Kim* · Yong-Jae Kim**

요약

마그네틱 기어는 기계적인 접촉 없이 회전 기계의 입력측과 출력측이 자기적으로 결합되어 동력을 전달한다. 마그네틱 기어는 내측회전자, 외측회전자, 폴피스로 구성되어 있으며, 동력전달 시 두 회전체와 폴피스 사이의 자기저항 차이로 토크리플이 발생하게 된다. 이러한 토크리플은 회전기계의 소음과 진동의 원인이 되기 때문에 최소화하는 방안이 필요하다. 본 논문에서는 토크리플 저감 방안으로 폴피스의 각진 모서리를 깎아 필렛을 적용한 형상을 제안하였다. 2D 유한요소해석법을 활용하여 필렛 파라미터 변화에 따른 마그네틱 기어의 토크리플을 비교 및 분석하고 토크리플이 우수한 폴피스 형상을 모색하였다.

ABSTRACT

Magnetic gears are magnetically coupled to the input side and the output side of the rotary machine to transmit power without mechanical contact. The magnetic gear consists of an inner rotor, an outer rotor and pole pieces. Torque ripple occurs due to the difference in reluctance between the two rotors and the pole pieces during power transmission. Torque ripple is a cause of the noise and vibration of the rotary machine, so it is necessary to minimize it. In this paper, we propose a shape that cuts the corner of the pole piece and apply a fillet to reduce torque ripple. We used a two-dimensional finite element analysis method to compare and analyze the torque ripple of the magnetic gears according to the change of the fillet parameters and to find the pole piece shape with excellent torque ripple.

키워드

Magnetic Gears, Pole Piece, Torque Ripple, Fillet, Finite Element Analysis Method
마그네틱 기어, 폴피스, 토크리플, 필렛, 유한 요소 해석법

1. 서론

기어는 회전 기계 시스템에서 동력을 전달하는 기계 장치이며 자동차 시스템, 풍력발전기, 저속 및 고속 기기 등과 같은 산업현장 곳곳에서 다양하게 사용

되고 있다. 대다수 장치에서 기계식 기어가 상용되고 있으나, 최근 물리적 접촉 없이 자기적 결합을 통해 기어의 특성을 나타내는 마그네틱 기어가 제안되었다. 마그네틱 기어는 물리적인 접촉이 없기 때문에, 접촉 마찰에 의해 발생하는 마모 및 파손 등의 결함이

* 조선대학교 전기공학부(ozaki9291@gmail.com, puj1988@chosun.kr, kimsj641@chosun.kr)

** 교신저자 : 조선대학교 전기공학과

• 접수일 : 2017. 09. 05

• 수정완료일 : 2017. 10. 25

• 게재확정일 : 2017. 12. 15

• Received : Sep 05, 2017, Revised : Oct 25, 2017, Accepted : Dec 15, 2017

• Corresponding Author : Yong-Jae Kim

Dept. of Electrical Engineering, Chosun University,

Email : kimyj21@chosun.ac.kr

없고 윤활유가 불필요하여 유지보수에 유리하다. 또한, 마찰에 의한 에너지 손실이 감소되어 고효율 구동이 가능하며, 입력측과 출력측의 샵프트가 분리되어 있으므로 과부하시 기기 보호 능력이 뛰어나다[1-5].

마그네틱 기어는 두 회전자 사이에 동심원 형태의 폴피스 구조물을 갖는다. 폴피스는 두 회전자에 착자된 영구자석의 자계를 변화시켜 두 회전자가 일정한 기어비를 가지고 회전할 수 있게 한다. 이 때, 폴피스 영역과 공기 영역의 서로 다른 자기저항 차이로 인해 두 회전자에 토크리플이 발생한다[6-10]. 이러한 토크리플은 기기의 진동과 소음의 원인이 되므로 리플 저감 대책을 강구하여야 한다. 기존의 영구자석을 이용한 기기들의 경우 토크리플을 저감시키기 위하여 영구자석의 폭 조정, 영구자석의 스큐, 보조극, 보조치 설치 등 다양한 연구가 진행되었다[11-14]. 하지만 마그네틱 기어는 폴피스를 가짐으로써 상기의 영구자석 기기들과는 구조적인 차이가 존재하며, 마그네틱 기어에 상기방법을 적용하기에는 여러 가지 제약이 따른다. 따라서 본 논문에서는 토크리플 저감 방안으로 폴피스 모서리를 깎아 필렛을 적용한 형상을 제안하였다. 2D 유한요소해석법을 이용하여 각 파라미터 변화에 따른 토크리플 값을 분석하고 토크리플 저감에 유리한 폴피스 형상을 모색하였다.

II. 마그네틱 기어 기본모델

2.1 마그네틱 기어의 기본 구조 및 원리

그림 1은 마그네틱 기어의 일반적인 구조를 나타낸다. 마그네틱 기어는 내측회전자, 외측회전자, 폴피스의 3개 영역으로 구성되며, 폴피스는 내측회전자와 외측회전자를 자기적으로 결합하는 역할을 한다. 폴피스의 개수는 식 (1)에 의해 결정된다. p_i, p_o 는 각각 내측회전자와 외측회전자의 극수를 나타낸다[3-6].

$$p_i + p_o = 2n_p \tag{1}$$

폴피스가 고정된 경우, 마그네틱 기어의 기어비는 다음 식 (2), (3)에 의해 결정된다. ω_1, ω_2 는 각각 내측회전자와 외측회전자의 회전속도를 나타내며, 음의 부호는 두 회전자의 회전방향이 서로 반대임을 의미한다[3-6].

$$G_r(Gear\ ratio) = \frac{p_o}{p_i} \tag{2}$$

$$\omega_1 = -G_r\omega_2 \tag{3}$$

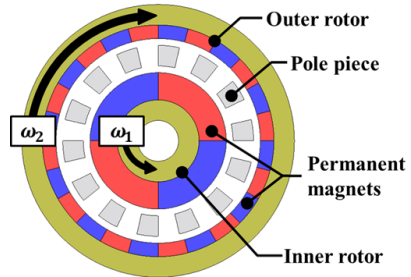


그림 1. 마그네틱 기어의 구조
Fig. 1 Structure of magnetic gear

2.2 기본모델 제원 및 토크특성

본 논문에서 사용된 마그네틱 기어의 기본모델 제원은 표 1을 통하여 나타내었다. 그림 2는 기본모델의 토크를 나타내며, 내측회전자와 외측회전자의 토크는 각각 0.253Nm, 1.530Nm이며, 토크리플 값은 7.21%, 0.04%이다. 그림 2를 통해 토크에 리플이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 토크리플은 기어에 진동 및 소음을 발생시킨다. 따라서 본 논문에서는 토크리플을 저감시키기 위해 폴피스와 공기 사이의 자기저항 차이를 줄이는 방법으로써, 폴피스의 모서리를 깎아 필렛을 적용하고 토크리플을 비교분석하였다.

표 1. 기본모델 제원
Table 1. Specifications of basic model

Item	Value
Outer diameter	40mm
Stack length	30mm
Gear ratio	6:1
Number of inner poles	4
Number of outer poles	24
Number of pole pieces	14
Inner rotor rpm	600
Outer rotor rpm	100

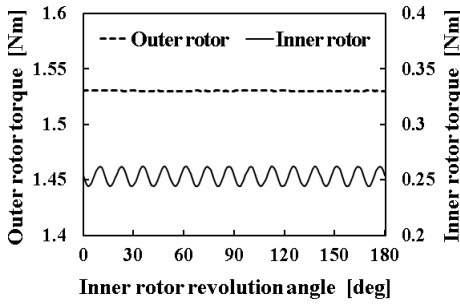


그림 2. 기본모델 토크특성
Fig. 2 Torque characteristics of basic model

III. 폴피스 필렛 적용 시 토크특성

3.1 폴피스 필렛 파라미터

그림 3은 필렛이 적용된 폴피스 형상을 나타낸다. 마그네틱 기어의 일반적인 폴피스 형상은 그림상의 음영 표시된 부분을 포함한 사다리꼴의 형상을 가지며, 본 논문에서는 폴피스 각 모서리의 음영 부분을 깎은 폴피스 형상을 제안한다. 폴피스의 각 모서리에 필렛을 적용하기 위해 총 4개의 파라미터를 선정하였으며, 각각의 모서리에 접하는 원의 반경 값을 파라미터 값으로 정의하였다. 4개의 파라미터 값이 서로 간섭하는 것을 방지하기 위해, 폴피스 필렛 파라미터의 범위를 각 모서리의 절반 길이인 0.1~1.3mm로 설정하고 파라미터 값을 0.2mm의 간격으로 변화시켰다.

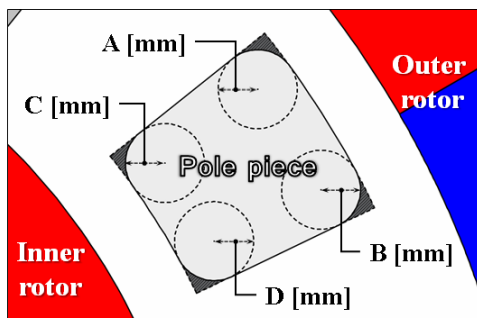


그림 3. 폴피스 필렛 파라미터
Fig. 3 Fillet parameter of pole piece

3.2 단일 필렛이 적용된 폴피스

4개의 모서리 모두에 필렛 형상을 적용하기에 앞

서, 한쪽 모서리에만 필렛을 적용하여 파라미터 값에 따른 토크특성 분석을 수행하였다. 그림 4는 각각 하나의 필렛만 적용했을 때 파라미터 값에 따른 내측회전자의 토크리플을 나타내며, 그림 5는 파라미터 값에 따른 외측회전자의 토크리플을 나타낸다.

먼저 A 파라미터를 적용한 모델은 파라미터 값이 증가함에 따라 내측회전자의 토크리플이 증가하는 경향을 나타낸다. 반면에 외측회전자의 토크리플은 감소하는 경향을 나타내며, 파라미터 값이 0.5mm일 때 가장 높은 리플 감소율인 50.32%를 나타내었다.

B 파라미터가 적용된 모델에서는 파라미터 값이 증가함에 따라 내측회전자와 외측회전자의 토크리플이 증가하는 경향을 나타낸다.

C 파라미터가 적용된 모델에서는 파라미터 값이 증가함에 따라 내측회전자의 토크리플이 감소하는 경향을 나타내며, 본 모델의 최댓값인 1.3mm일 때 28.12%의 리플 감소율을 보인다. 그리고 외측회전자의 토크리플은 파라미터 값이 0.3mm일 때 가장 높은 리플 감소율인 12.44%를 나타낸다.

D 파라미터가 적용된 모델에서는 파라미터 값이 증가함에 따라 내측회전자의 토크리플이 감소하는 경향을 나타내며, 본 모델의 최댓값인 1.3mm일 때 21.21%의 리플 감소율을 보인다. 반면에 외측회전자의 토크리플은 증가하는 경향을 나타낸다.

상기 분석을 통해 단일 파라미터 적용 시 내측회전자의 토크리플 저감에 유리한 파라미터는 C, D이며 외측회전자의 토크리플 저감에 유리한 파라미터는 A임을 확인하였다.

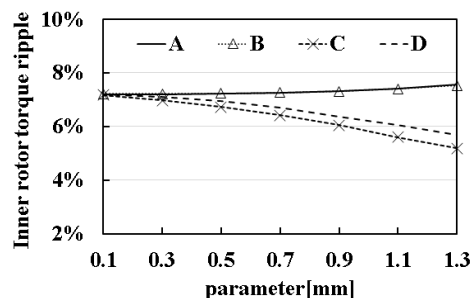


그림 4. 각 파라미터 적용 시 내측회전자 토크리플
Fig. 4 Inner rotor torque ripple when each parameter is applied

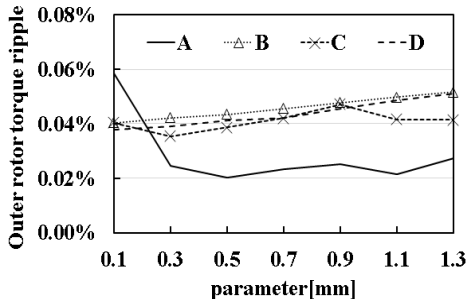


그림 5. 각 파라미터 적용 시 외측회전자 토크리플
Fig. 5 Outer rotor torque ripple when each parameter is applied

3.3 필렛 파라미터 상호작용 분석

각 필렛 파라미터 분석을 통해 B 파라미터를 제외한 파라미터들은 서로 마주하는 회전자의 토크리플을 저감시키는 것을 알 수 있다. 다음으로 같은 회전자를 마주하는 파라미터들을 동시에 적용할 시 토크리플 감소율이 증가하는지 알아보기 위해, 각각 A, B 파라미터를 동시에 적용한 모델과 C, D 파라미터를 동시에 적용한 모델의 분석을 수행하였다. 그림 6은 A, B 파라미터 값에 따른 토크리플의 변화를, 그림 7은 C, D 파라미터 값에 따른 토크리플의 변화를 나타낸다.

A:0.1, B:0.1을 적용 시 내측회전자는 0.23%의 최대 토크리플 감소율을 보이며, A:1.1, B:0.1을 적용 시 외측회전자는 51.08%의 최대 토크리플 감소율을 갖는다. C:1.3, D:1.3을 적용 시 내측회전자는 76.85%의 최대 토크리플 감소율을 보이며, C:0.3, D:0.1을 적용 시 외측회전자는 17.04%의 최대 토크리플 감소율을 갖는다.

상기 분석을 통해 내측회전자의 토크리플은 C, D 파라미터에 의해 크게 저감되며, 외측회전자의 토크리플은 A 파라미터에 의해 크게 저감되는 것을 확인할 수 있다. 또한 B 파라미터 값이 0.1mm의 값을 가질 때, A 파라미터만을 적용한 경우보다 최대 토크리플 감소율이 0.76%의 증가함을 보인다.

한편, 폴피스 모서리를 깎아 필렛을 적용한 모든 모델에서 외측회전자의 peak-to-peak 값이 0.001Nm을 넘지 않는 것을 확인하였다. 기본모델의 외측회전자 토크리플은 가시적인 변화가 미미하여 저감시키는 것이 무의미하다고 판단하였으며, 다음 절을 통해 내측회전자의 토크리플이 최소가 되는 형상을 모색하였다.

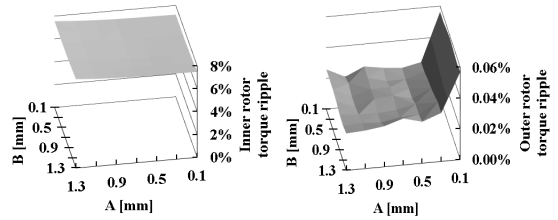


그림 6. A, B 파라미터 적용 시 토크리플
Fig. 6 Torque ripple when A, B parameters are applied

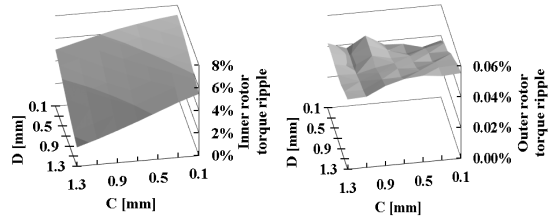


그림 7. C, D 파라미터 적용 시 토크리플
Fig. 7 Torque ripple when C, D parameters are applied

3.4 내측회전자 토크리플 저감 폴피스

내측회전자의 토크리플을 최소로 만들기 위하여, 앞 선 파라미터 조합들 중 가장 큰 내측회전자 토크리플 감소율을 보여준 A, B 파라미터의 조합(A:0.1, B:0.1)과, C, D 파라미터의 조합(C:1.3, D:1.3)을 동시에 적용하였다. 그 결과 내측회전자의 토크리플은 C, D 파라미터만을 적용했을 때의 감소율보다 0.19%가 높은 77.04%로 저감되었다. 그림 8과 그림 9는 기본 모델과 최종모델의 내외측회전자 토크를 나타낸다. 최종모델의 내측회전자 토크리플은 기본 모델의 토크리플보다 77.04%가 저감된 1.66%이며, 외측회전자 토크리플은 A, B 파라미터에 의한 영향으로 44.39%가 증가된 0.06%임을 확인하였다.

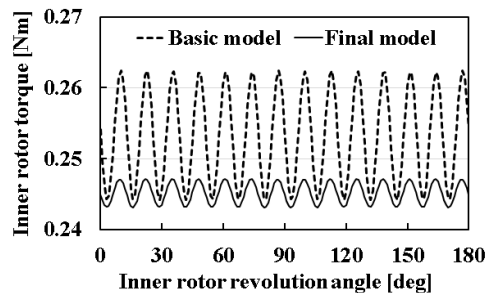


그림 8. 기본모델과 최종모델의 내측회전자 토크
Fig. 8 Inner rotor torque both the basic model and the final model

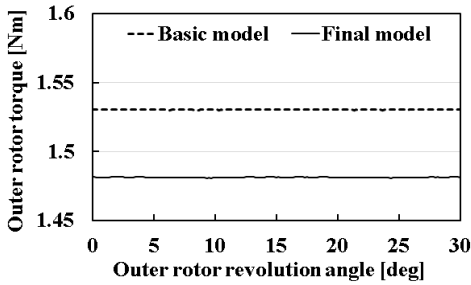


그림 9. 기본모델과 최종모델의 외측회전자 토크
 Fig. 9 Outer rotor torque both the basic model and the final model

IV. 결론

본 논문에서는 마그네틱 기어의 토크리플 저감 방안으로 폴피스 모서리를 깎아 필렛을 적용하는 방법을 제안하였다. 폴피스에 필렛을 적용함으로써 두 회전자와 폴피스 사이에 존재하는 자기저항차를 줄여 토크리플 저감을 꾀하였으며, 2-D 유한요소해석법을 활용하여 다양한 마그네틱 기어 모델의 토크리플을 해석하고 그 변화를 비교분석하였다.

먼저 4개의 폴피스 필렛 파라미터를 선정하여, 각각의 파라미터들을 단일 적용한 뒤 해석 및 비교하고, 그 다음으로 동일한 회전자와 마주하는 파라미터들의 상호작용을 분석하였다. 내측회전자 토크리플은 파라미터 값에 따라 기본모델 대비 최대 5.5%p 이상 저감되는 등의 두드러진 차이를 보였지만, 외측회전자 토크리플은 모든 비교모델에서 기본모델 대비 $\pm 0.02\%$ 의 차이 값을 보여 그 변화가 무의미하다 판단하였다. 따라서 본 논문에서 해석한 모델의 데이터를 바탕으로 내측회전자 토크리플이 최소가 되는 폴피스 형상을 모색하였다. 그 결과 내측회전자와 마주하는 두 필렛 파라미터(C, D)가 최댓값을 가질 때 토크리플이 최솟값을 나타내며, 나머지 두 파라미터(A, B)에 의한 감소율은 0.19%p로 아주 미미하였다. 따라서 본 논문에서 사용된 모델의 토크리플 저감에 가장 유리한 형상은 내측회전자와 마주하는 폴피스의 모서리 곡률이 최대가 되는 형상임을 도출하였다.

본 논문은 마그네틱 기어의 토크리플 저감에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다. 하지만 폴피스의 면적이 줄어들어 따라 자속밀도의 변화가 생겨 토크에 영

향을 미치므로 추후 다양한 마그네틱 기어 모델을 비교분석하여, 토크밀도와 토크리플이 우수한 폴피스 형상을 찾고 본 연구의 신뢰성과 파라미터 설계 표준화를 확보하고자 한다.

감사의 글

이 연구는 2017년도 산업통상자원부 및 산업기술 평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임. ('10076577')

References

- [1] H. Huh and J. Lee, "A Study on The Modeling and Operation Control of A Variable Speed Synchronous Wind Power System," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 10, no. 8, 2015, pp. 935-944.
- [2] K. Lee, W. Cho, J. Back, and I. Choy, "Design and Verification of Disturbance Observer based Controller for Windturbine with Two Cooperative Generators," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 12, no. 2, 2017, pp. 301-308.
- [3] L. Shah, A. Cruden, and B. Williams, "A Variable Speed Magnetic Gear Box Using Contra-Rotating Input Shafts," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 47, no. 2, 2011, pp. 431-438.
- [4] K. Atallah and D. Howe, "A Novel High-Performance Magnetic Gear," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 37, no. 4, July, 2001, pp. 2844-2846.
- [5] H. Shin and J. Chang, "Analysis of Coaxial Magnetic Gear with Low Gear Ratios for Application in Counter Rotating Systems," *J. of Magnetics*, vol. 20, no. 2, 2015, pp. 186-192.
- [6] E. Park, S. Kim, S. Jung, and Y. Kim, "Correlation Analysis between Air Gaps and Torque Characteristics of Magnetic Gear," *2016 Electrical Machinery and Energy Conversion Systems Society Spring Conf. of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Jeju, Korea, Mar., 2016, pp. 223-225.
- [7] S. Kim, E. Park, and Y. Kim, "Optimal Design of Ferromagnetic Pole Pieces for Transmission

Torque Ripple Reduction in a Magnetic-Geared Machine," *J. of Electrical Engineering & Technology*, vol. 11, no. 6, 2016, pp. 1628-1633.

- [8] Y. D. Yao, D. R. Huang, C. C. Hsieh, D. Y. Chiang, S. J. Wang, and T. F. Ying, "The Radial Magnetic Coupling Studies of Perpendicular Magnetic Gears," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 32, no. 5, Sept., 1996, pp. 5061-5063.
- [9] E. P. Furlani, "Two-dimensional Analysis for the Coupling of Magnetic Gears," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 3, no. 3, 1997, pp. 2317-2321.
- [10] T. Lubin, S. Mezani, and A. Rezzoug, "Analytical Computation of the Magnetic Field Distribution in a Magnetic Gear," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 46, no. 7, 2010, pp. 2611-2621.
- [11] M. Jeong, C. Moon, H. Kim, Y. Chang, and T. Park, "A Study on Design of 50kW PMSG for Microgrid Application," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 9, no. 4, 2014, pp. 527-536.
- [12] K. Lee and Y. Kim, "A Study on The Reduction of Cogging Force of Stationary Discontinuous Armature Permanent Magnet Linear Synchronous Motor by Change in Auxiliary Pole," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 5, no. 6, 2010, pp. 613-619.
- [13] Y. Kim and J. Kim, "The Analysis of Skewed Armature Effect for Reduction of End Edge Cogging Force of Stationary Discontinuous Armature PMLSM," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 9, no. 2, 2014, pp. 243-248.
- [14] K. Lee, W. Cho, J. Back, and I Choy, "Design and Verification of Disturbance Observer based Controller for Windturbine with Two Cooperative Generators," *J. of Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 12, no. 2, 2017, pp. 301-308.

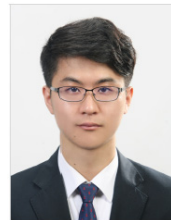
저자 소개



김찬승(Chan-Seung Kim)

2017년 조선대학교 전기공학과 졸업
2017년~현재 조선대학교 대학원 전기공학과 석사과정

※ 관심분야 : 전기기기 설계 및 해석



박의중(Eui-Jong Park)

2013년 조선대학교 전기공학과 졸업
2015년 조선대학교 대학원 전기공학과 석사 졸업
2017년 조선대학교 대학원 전기공학과 박사과정 수료

2017년-현재 조선대학교 박사수료 후 연구원

※ 관심분야 : 전기기기, 모터 설계 및 해석



김성진(Sung-Jin Kim)

2011년 조선대학교 전기공학과 졸업
2013년 조선대학교 대학원 전기공학과 석사졸업
2017년 조선대학교 대학원 전기공학과 박사졸업

2017년-현재 조선대학교 박사 후 연구원

※ 관심분야 : 전기기기, 모터 설계 및 해석



김용재(Yong-Jae Kim)

1996년 조선대학교 전기공학과 졸업
2003년 일본 무사시 공업대학 대학원공학연구과 전기공학 석사졸업

2006년 일본 무사시 공업대학 대학원공학연구과 전기공학 박사졸업

2007년-현재 조선대학교 전기공학과 교수

※ 관심분야 : 전기기기, 모터 설계 및 해석