

자동차 송풍장치용 Slotless Outer Rotor BLDC 모터 설계 및 제작에 관한 연구

이현장* · 정희석** · 조선희***

A Study on Design and Manufacture of Slotless Outer Rotor BLDC Motor
for a Vehicle Blower

Hyon-Jang Lee* · Hee-Seok Jeong** · Sun-Ho Cho***

요약

본 연구에서는 자동차 송풍장치용 slotless Outer Rotor BLDC 모터를 설계하고 제작하여 기존의 모터들의 단점을 개선하였다. 제안된 모터는 Brush를 제거하여 회전 시 DC 모터의 기계적 마찰에 의한 소음을 해결하고, 구조적으로 Slotless Air-Gap 권선을 사용하여 BLDC 모터 슬롯에 의해 발생하는 코깅 토크를 개선하였다. 그리고 외부 회전자에 Magnet을 부착시키고 내부 회전자와 동시에 회전하기 때문에 자속의 변화가 생기지 않아 구조적으로 철손을 원천적으로 줄여 높은 효율을 가진다.

ABSTRACT

In this paper, a slotless outer rotor BLDC motor for a vehicle blower was designed and manufactured to improve the disadvantages of general motors. The proposed motor solves the noise caused by mechanical friction of DC motor during rotation by removing the brush. Also, slotless air-gap windings are used to improve cogging torque by BLDC motor slots. Then, the motor has a structure in which a magnet is attached to the external rotor and rotates simultaneously with the internal rotor, there is no change in magnetic flux. Therefore, it has high efficiency by fundamentally reducing iron loss.

키워드

Air Gap Winding, BLDC Motor, Cogging Torque, Outer Rotor, Slot Less
에어 갭 권선, BLDC 모터, 코깅 토크, 외부 회전자, 슬롯 리스

1. 서론

최근 자동차의 환경규제와 편의사양의 고급화 정책으로 송풍장치에 사용되고 있는 모터도 고효율과 고

급화로 지속적으로 발전되고 있다[1-2]. 그러나 현재 사용되고 있는 송풍장치용 모터는 직류 브러시 모터를 사용하고 있으며, 슬롯을 가지고 있기 때문에 회전 시 기계적인 마찰로 코깅에 의한 소음과 진동이 발

* 대림대학교 전기공학과(hjlee80@daelim.ac.kr)

• Received : Jul. 30, 2023, Revised : Sep. 05, 2023, Accepted : Oct. 17, 2023

** 대림대학교 보건의료공학과(hsjeong@daelim.ac.kr)

• Corresponding Author : Sun-Ho Cho

*** 교신저자 : 대림대학교 전기공학과

Daelim University College

• 접수일 : 2023. 07. 30

Email : chosunho@daelim.ac.kr

• 수정완료일 : 2023. 09. 05

• 게재확정일 : 2023. 10. 17

생되어 문제가 되고 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 BLDC 모터들이 개발 되어 기계적인 마찰을 개선하였지만, 모터 구조상 여전히 슬롯을 가지고 있어 슬롯에 의한 코깅 토크는 지속적으로 발생되고 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 본 연구에서는 DC 모터의 단점인 브러시를 제거하고, BLDC 모터의 문제점인 슬롯으로 인한 코깅 토크 발생을 개선한 Slotless Outer Rotor BLDC 모터를 설계하고 제작하였다. 본 모터는 Air-Gap 권선을 사용하고, 외부 회전자에 Magnet을 부착하여 내부 회전자와 동시에 회전하는 형태로 회전 시 자속의 변화가 생기지 않아 철손이 이론적으로 적으며 코깅 토크가 발생되지 않는 장점이 있다. 특히 모터 작동 시 자속의 변화가 생기지 않기 때문에 와전류 손실이 없어 모터의 적층이 필요하지 않아 제작이 쉽고 생산 단가를 낮출 수 있기 때문에 자동차 송풍장치에 적용하려고 한다[3-6].

본 연구에서는 일반적인 BLDC 모터와 Slotless Outer Rotor BLDC 모터의 특징을 비교 분석하고, 설계 단계에서는 Ferrite와 네오뎀 영구자석을 적용하여 Air-Gap에서 공극 자속밀도를 비교하여 모터에 적합한 자석을 선정하여 제작하고 평가하였다.

II. BLDC 모터 특징

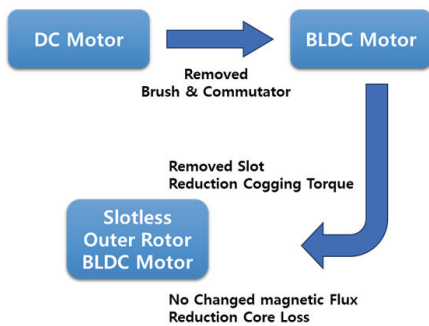


그림 1. Slotless Outer Rotor BLDC Motor 블록도
Fig. 1 Block Diagram of Slotless Outer Rotor BLDC Motor

본 연구에서 제안된 Slotless Outer Rotor BLDC 모터는 DC Motor의 장점을 유지하면서 단점을 최소화하기 위한 모델로 볼 수 있으며, 블록도는 그림 1과

같다. DC 모터의 단점인 Brush와 정류자를 제거하여 기계적 마모 및 마찰 소음을 저감하였다. 그리고 BLDC 모터에 사용되는 슬롯을 제거하여 코깅 토크를 줄이고, 자속이 변화되지 않는 Outer Rotor 형태로 구조적으로 철손을 저감 시킨 모델이다.

2.1 Outer Rotor BLDC Motor 특징

아래 그림 2는 일반적으로 사용되고 있는 Outer Rotor BLDC Motor의 구조를 나타낸 것이다. 모터 외부 회전자(Cylinder)에 영구자석이 부착되어 회전되고, 내부 고정자(Stator)는 슬롯에 권선을 감는 형태로 되어있다. 일반적인 BLDC Motor는 정류자와 브러시를 제거하여 회전 시 기계적인 마모가 발생하는 DC 모터의 단점을 개선하였다. 하지만 BLDC 모터는 구조적으로 Magnet이 회전하고 슬롯이 존재하기 때문에 Magnet 회전에 의한 자속의 변화로 코깅(Cogging) 토크가 발생 되는 단점을 가지고 있다 [7-9].

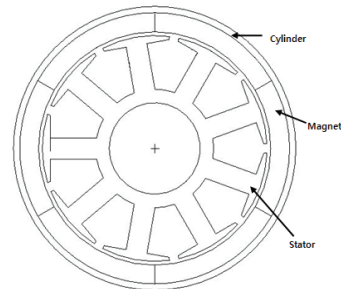


그림 2. Outer Rotor 타입 BLDC Motor 구조
Fig. 2 Structure of Outer Rotor Type BLDC Motor

2.2 Slotless Outer Rotor BLDC Motor 특징

Slotless Outer Rotor BLDC 모터는 기존의 BLDC 모터에서 구조적으로 슬롯을 제거한 것으로 그림 3과 같다. 본 연구의 모터는 외부와 내부에 두 개의 회전자와 가지고 있으며, 외부 회전자에 영구자석을 부착하고 내부 회전자와 구조적으로 일체화 하여 동시에 회전된다. 그리고 두 회전자 사이의 Air-Gap 권선이 고정자이기 때문에 구조적으로 슬롯을 제거한 특징을 가지고 있다. 따라서 모터 회전 시 구조적으로 슬롯과 자속 변화가 없기 때문에 슬롯에 의한 코깅 토크,

Hysteresis Loss와 와전류 손실(Eddy Current Loss)이 발생되지 않는다[10-13]. 그리고 와전류 손실이 발생되지 않기 때문에 모터의 회전자 적층이 필요하지 않아 제작 및 생산 단가를 낮출 수 있는 장점이 있다[14-15].

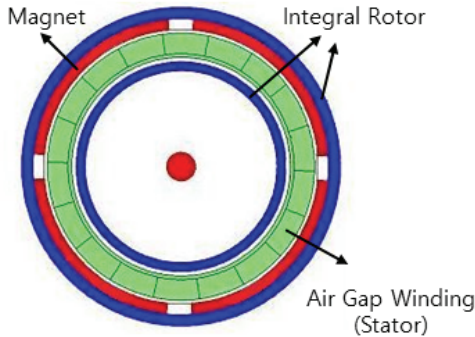


그림 3. Slotless Outer Rotor BLDC Motor 구조
Fig. 3 Structure of Slotless Outer Rotor BLDC Motor

III. Motor 설계

3.1 Slotless Outer Rotor BLDC Motor 사양

표 1. 모터 설계 사양
Table 1. Motor Design specification

Rated Volt [V]	13.5	Pole	4
Rated Current [A]	22	Diameter [mm]	90
Rated Torque [Nm]	0.53	Winding Turn	15
Rated Speed [RPM]	3000	Effective Length [mm]	25

본 연구에서는 기존에 사용되고 있는 자동차 Blower용 BLDC 모터와 동일한 패키지와 사양을 가지는 Slotless Outer Rotor BLDC Motor를 설계하였다. 정격 전압은 자동차에서 사용되고 있는 배터리 전압, 부하 전류, 그리고 송풍장치에 팬 회전에 필요한 토크와 회전속도를 표 1과 같이 설계 사양을 정의하였다.

3.2 영구자석 분석

모터에 적용되는 영구자석을 분석하기 위하여 가격이 저렴한 Ferrite 자석과 고가인 Neodymium 자석을 이용하여 본 연구의 모터에 적용하여 검토하였다. Slotless Outer Rotor BLDC 모터는 일반적인 모터보다 구조적으로 공극이 크기 때문에 영구자석 공극에 따른 자속밀도 분석이 필요하다. 그림 4와 5는 Ferrite와 Neodymium 영구자석 두께가 6[mm]일 때, 공극에서 자속밀도[T]를 계산한 그래프이다. 아래 결과와 같이 공극 4 ~ 8[mm] 중에서 공극이 커질수록 자속밀도가 비선형 적으로 낮아 지는 경향이 있으며, Ferrite 경우 본 모터에 적용하기 불가할 정도의 자속밀도가 계산되었다. 그리고 본 모터는 구조적으로 공극에 권선이 필요하기 때문에 4[mm]의 공극은 자속밀도가 커서 높은 모터의 출력을 기대할 수 있다. 공극이 너무 작아 권선 작업이 불가능한 단점이 있기 때문에 설계 사양의 모터 출력이 가능한 Neodymium 자석과 공극 6[mm]로 선정하였다.

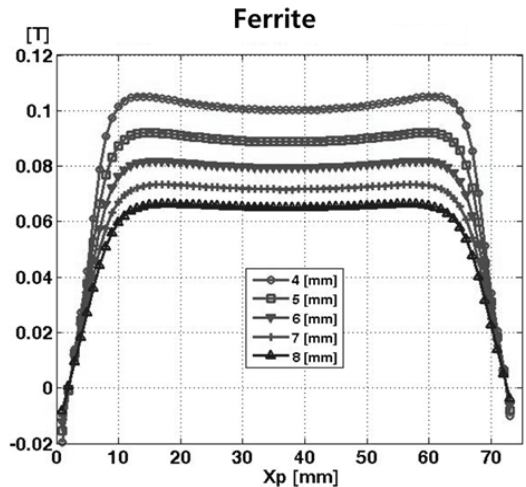


그림 4. 페라이트 자속밀도
Fig. 4 Magnetic flux density of Ferrite

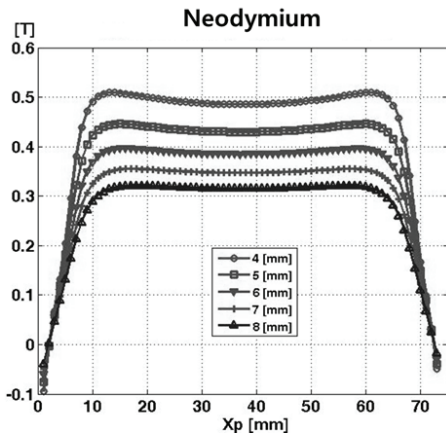


그림 5. 네오뮴 자속밀도
Fig. 5 Magnetic flux density of Neodymium

공극에서 발생하는 Neodymium 자속밀도를 식(1)을 이용하면 한 극의 자속을 계산할 수 있다.

$$\Phi_{(x,z)} = \int_{y=-l_w}^{y=+l_w} \int_{x=x-x_b}^{x=x+x_b} B_z(x,y,z) dx dy \dots (1)$$

3.3 권선의 설계

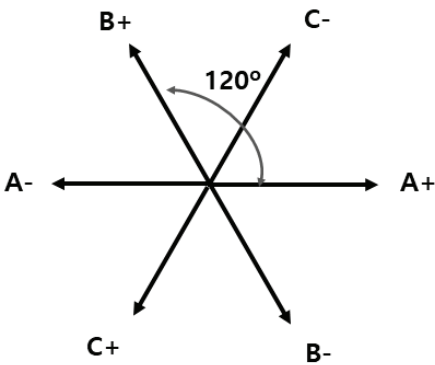


그림 6. 3상 권선 벡터도
Fig. 6 Vector Diagram of 3-Phase Winding

본 모터는 일반적인 BLDC 모터에서 많이 이용되는 3-Phase 전원을 이용하고, 권선 상수가 높은 Y결

선을 아래 그림 6과 같이 설계하였다.

3.4 모터 기구부 설계

연구에서 제안된 Slotless Outer Rotor BLDC 모터 기구부를 설계하기 위하여 CATIA 3D 설계 프로그램을 사용 하였다. 본 모터는 내부 회전자와 외부 회전자가 동시에 회전하는 구조로, 그림 7과 같다. 외부 회전자에 Magnet이 부착된 형태로 높은 회전수에서 원심력의해 Magnet이 이탈되지 않는 구조로 설계 하였다. 그리고 설계된 모터는 다이내모 테스트 및 회전시 작동을 관찰을 위해 모터 하우징을 상용 모터보다 두껍고, 회전자가 보이도록 설계 하였다.

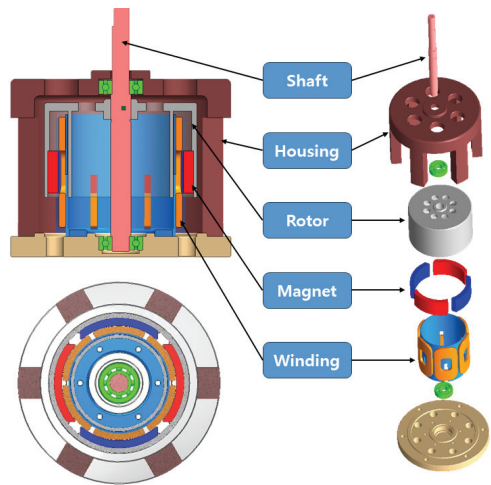


그림 7. Motor 구조
Fig. 7 Motor Structure

3.5 모터 제작

3D 프로그램으로 설계하여 제작된 모터는 그림 8과 같다. 외부 회전자와 내부 회전자 사이(Air-Gap)에 권선을 고정시키기 위해 프레임을 제작하여 권선을 고정하고 실리콘 본드를 이용하여 고정을 시켰다. 그리고 권선의 냉각을 위해 모터 하우징 앞면에 6개의 구멍을 만들고, 회전시 모터 관찰을 위해 하우징 옆면을 부분 개방하였다.

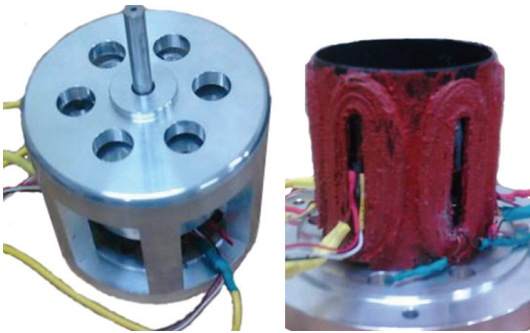


그림 8. 제작된 Motor
Fig. 8 Produced Motor

3.6 모터 평가 결과

제작된 Slotless Outer Rotor BLDC 모터는 무하가 및 부하 평가가 필요하여 그림 9와 같은 Dynamometer, Power Analyser, Controller, 인버터, 전원공급기 장비로 시스템으로 평가되었다.

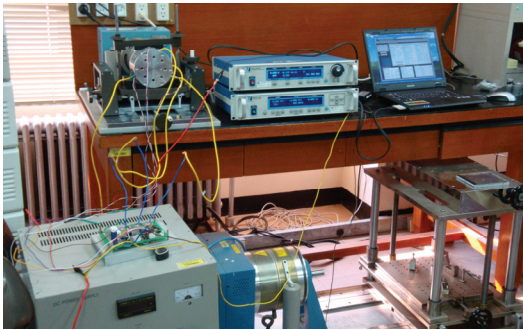


그림 9. 평가 장비
Fig. 9 Test Equipment

3.6.1 무부하 평가 결과

모터의 무부하 평가 시험은 모터 부하와 관계없이 회전속도에 의해 일정하게 발생하는 손실로 철손, 마찰손 및 풍손 등 모터의 고유 손실을 측정하기 위한 것이다. 본 모터는 두 개의 회전자가 동시에 회전하여 자속이 변하지 않는 구조로 이론상 철손이 거의 없다. 즉 평가된 모터는 마찰손 및 풍손에 의한 손실이 대부분이며, 그림 10과 같이 일반적인 모터와 동일하게 회전수가 높을수록 손실이 커지는 경향을 가진다.

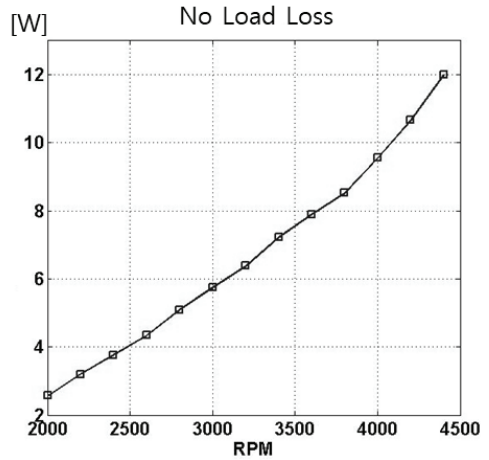


그림 10. 무부하 평가 결과
Fig. 10 No Load Test Result

3.6.2 부하 평가 결과

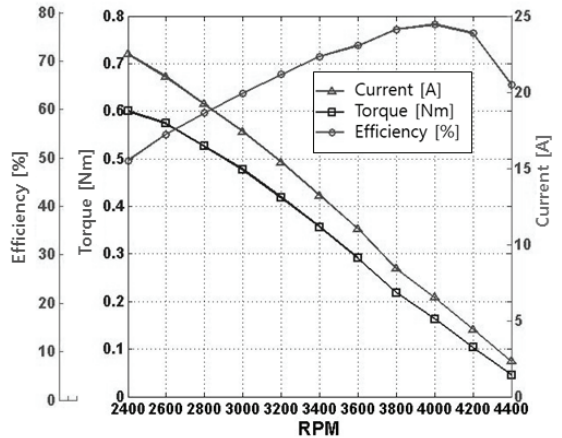


그림 11. 부하 평가 결과
Fig. 11 Load Test Result

모터의 실제 성능을 평가하기 위해 부하 테스트를 진행하여 그림 11과 같은 결과를 얻었다. 정격 회전수 3000[RPM]에서 토크 0.477[Nm], 부하전류 17.4[A], 효율 63.8[%]의 성능을 확인하였다. 본 결과는 실제 요구 토크의 90[%]의 수준으로 10[%]의 성능 편차가 발생하였다. 그 원인은 설계 사양과 동일한 제작이 어려웠던 권선에서 발생된 것으로 판단된다. 그리고 높은 정격 전류 사용으로 동손이 증가되어 효율은 63.8 [%]로 일반적인 BLDC 모터 보다 낮은 편이지만, 고

전류를 사용하는 자동차 모터들의 효율과 비교하면 좋은 수준으로 판단된다.

IV. 결 론

Slotless Outer Rotor BLDC 모터를 자동차 송풍장치 용으로 설계하고 제작하였다. 본 모터는 외부 회전자에 Magnet이 부착되어 내부 회전자와 동시에 회전되는 구조로 모터 동작 시 자속의 방향이 변하지 않기 때문에 이론적으로 철손이 발생되지 않는다. 그래서 모터 제작 시 적층이 필요 없으며, 높은 회전력을 요구하는 곳에 사용이 적합하다. 그리고 Air-Gap 권선으로 슬롯을 제거하여 코깅 토크도 발생되지 않아 소음과 진동 저감에 매우 큰 장점이 있다. 이러한 장점은 높은 회전력, 진동 및 소음에 민감한 자동차 또는 건물 실내용 모터로 적용이 가능할 것으로 판단된다. 하지만 Air-Gap 권선을 사용하여 모터의 유효 공극이 커지게 되어 공극에서의 자속밀도가 일반 모터들과 비교하여 낮기 때문에 권선 턴수와 전류를 좀더 많이 사용해야 하는 단점이 있다.

차후 모터 공극에서의 자속밀도 손실을 줄이고, 각각 코일 또는 권선을 대체할 Flexible PCB 권선을 사용하여 모터의 유효 공극을 줄여 자속밀도를 높이면 기존의 BLDC 모터들을 대체할 수 있을 것으로 기대된다. 그리고 본 모터는 구조적으로 적층이 필요하지 않기 때문에 제작 공정을 단순히 할 수 있어 향후 자동차 제조업 탄소저감 공정 발전에 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

References

- [1] G Lee, J Jeong, K Lee, S Yoon, and S Park, "Study on Range and Energy Consumption Efficiency of Electric Passenger Vehicle under Real-Road Driving Conditions," *Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers*, vol. 31, no. 5, May 2023, pp. 361-369.
- [2] H Song, "Introduction to International Discussion on Automotive LCA and Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions of Passenger Vehicle in 2030," *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, vol. 45, no. 5, May 2023, pp. 39-42.
- [3] G. Lee, W. Lee, and G Kim, "The Design of Radial Magnetic Force Equilibrium for Reduction of Vibration in IPM Type BLDC Motor," *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 65, no. 2, Feb. 2016, pp. 298-303.
- [4] D. Kim, S. Lee, and D. Yoon, "A Study on the Electromagnetic Noise Reduction of BLDC Motor for Fuel Pump of Vehicles," *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 68, no. 2, Feb. 2019, pp. 277-284.
- [5] B. Kim, J. Seen Yun, G. Shin, G. Min, and J. Chung, "Noise Reduction of an In-wheel Motor System for an Electric Vehicle," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, vol. 29, no. 3, June 2019, pp. 422-428.
- [6] C. Woong, "Development of Domestic Standardization in Smart Factory and Manufacturing Data," *The Journal of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 5, Oct. 2021 pp. 783-788.
- [7] K. Seo, S. Jung, and C. Lee, "Topology Design of BLDC Motor for Cogging Torque Reduction and Characteristic Analysis," *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 63, no. 11, Nov. 2014, pp. 1519-1525.
- [8] B. Byeon, E. Park and Y. Kim, "Harmonic Reduction of Synchronous Generator by Permanent Magnet Shape Deformation," *The Journal of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 17, no. 6, Dec. 2022 pp. 1081-1088.
- [9] S. Baek, "A study on energy conversion through torque control of IPMSM in EV powertrain," *The Journal of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 5, Oct. 2021 pp. 845-850.
- [10] Y. Choi, E. Han, and C. Lee, "Development Process and Technology Trend of Permanent

Magnet Motor System for Electric Vehicle," *Journal of the Korean Magnetics Society*, vol. 31, no. 3, June 2021, pp. 97-108.

- [11] H. Lee, "A Study on the Design and Manufacture of HVAC Double Cylinder Motor for a Car Blower", Master's Thesis, *Korea University of Technology and Education School of Information Technology*, 2008.
- [12] J Jung, B Lee, and D. Ahn, "Electromagnetic Field Analysis of Distributed Winding Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Axial Leakage Flux using Two-Dimensional Finite-Element," *Analysis.Journal of Magnetics*, vol. 27, no. 4, Dec. 2022, pp. 379-387.
- [13] D. Lim and S. Kim, "Thermal Characteristics of Oil-cooled In-wheel Motor in Electric Vehicles," *Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers*, vol. 22, no. 5, July 2014, pp. 29-34.
- [14] J. Chang, "Theoretische und experimentelle Untersuchungen an einem elektronisch kommutierten Gleichstrom-Doppelzylinderlaufermotor," PHD's Thesis, *TU Berlin* 1984.
- [15] C. Park, "Theoretische und experimentelle Untersuchungen an einem elektronisch kommutierten Scheibenlaufer-Kleinmotor," PHD's Thesis, *TU Berlin* 1989.



정희석(Hee-Seok Jeong)

2000년 홍익대학교 금속·재료공학과 졸업(공학사)
2002년 홍익대학교 대학원 금속·재료공학과 졸업(공학석사)

2021년 서울과학기술대학교 일반대학원 의공학-바이오소재 융합협동과정 졸업(공학박사)

2021년 ~ 현재 대림대학교 보건의료공학과 교수

※ 관심분야 : 전자재료, 생체재료



조선희(Sun-Ho Cho)

1993년 경희대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1997년 경희대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

2009년 경희대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)

2010년 ~ 현재 대림대학교 전기공학과 교수

※ 관심분야 : 자동제어, 신재생에너지

저자 소개



이현장(Hyon-Jang Lee)

2008년 한국기술교육대학교 전기공학과 졸업(공학사)

2010년 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)

2020년 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)

2021년 ~ 현재 대림대학교 전기공학과 교수

※ 관심분야 : 전기기기, 자동차

