

기계적 강도를 고려한 초고속 선형동기전동기 회전형 시험기 설계

Design of High-Speed LSM Rotary Type Testing Machine
in Consideration of Mechanical Strength

설 현 수* · 박 응 석* · 이 주* · 박 찬 배†

(Hyun-Soo Seol · Eung-Seok Park · Ju Lee · Chan-Bae Park)

Abstract - The rotary type testing machine undergoes mechanical stress as an external force is applied. In case of the rotary type testing machine, even a tiny flaw results in a fatal damage because the size of the machine is huge. Therefore, when designing the rotary type testing machine, it is necessary to secure a safety factor with the mechanical stress analysis in order to prevent the machine from being destroyed due to scattering or transformation of rotating field. This thesis proposes a LSM rotary type testing machine which rotates at the speed of up to 600km/h. And the mechanical stress is considered in order that the safety factor remains above 1.5 at the maximum speed. In addition, because normal force as well as thrust occurs in the machine, the normal force exerted was considered through the strength analysis. Finally, a design plan which enables to weaken the normal force affecting the rotary type testing machine is introduced and its validity is proved by the results of FEM analysis.

Key Words : LSM, Rotary Type, Testing Machine, Rotary Type Testing machine, Mechanical Strength

1. 서 론

현재 기존의 고속열차는 최고속도 300~350km/h로 운영되고 있으며, 속도 증속을 위한 다양한 연구들이 진행 중에 있다. 그 중 초고속 자기부상열차를 비롯한 wheel-on-rail 방식의 비부상 초고속열차에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 기존의 초고속 자기부상열차는 전자기력을 이용하여 열차를 부상시켜서 비접촉식으로 운행하기 때문에 마찰, 소음, 진동이 없으며, 점착력을 필요로 하지 않으므로 기존의 휠 온 레일 방식으로는 달성이 어려운 600km/h 이상의 속도로 달릴 수 있는 친환경적인 교통수단이나, 부상 가이드웨이 및 부상제어 등 기술적, 경제적 난제가 존재하며, 특히 열차 상호간의 호환운영이 어려워 실용화에 낭하을 겪고 있다. 따라서 초고속 자기부상열차의 장점인 선형추진방식만을 채용한 비부상 초고속열차에 대한 관심이 높아지고 있다[1,2].

초고속 열차에 사용가능한 선형동기전동기는 이동자와 고정자 모두 직선형의 구조로 되어 있기 때문에 이동자에 작용하는 추진력 측정의 어려움이 존재하며, 이는 일반 회전형 전동기와 같이 전동기와 측정 장비의 상대 위치가 고정되어 있는 경우와 다르다. 또한 선형동기전동기의 고속운전시험을 위해서는 매우 긴 노

선이 필요하고 막대한 비용이 발생하므로 회전시험기의 형태로 제작하면 고속영역시험이 가능하고 선형동기전동기의 기계적 특성을 파악하고 제어시스템 선형연구에 이용가능하다[3].

회전형 시험기는 회전하는 동안 여러 외력이 작용함에 따라 기계적 스트레스를 받게 된다. 회전형 시험기의 경우, 그 사이즈가 매우 크기 때문에 시험기의 작은 결함만으로도 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 회전형 시험기를 설계할 때, 회전 계자 권선의 비산 및 회전 계자의 변형으로 인한 회전형 시험기 파손 방지를 위해 기계적 강도해석을 통한 안전을 확보는 반드시 필요하다.

본 논문에서는 시속 600km/h를 달성하는 선형동기전동기 회전형 시험기 모델을 제안한다. 그리고 회전형 시험기가 최고 속도에서 운전할 때 안전을 1.5 이상을 유지할 수 있도록 기계적 강도를 고려하여 설계하였다. 또한 선형동기전동기는 특성상 추력뿐만 아니라 수직력이 발생하므로 수직력이 회전형 시험기의 기계적 강도에 미치는 영향을 강도해석을 통하여 분석하였다. 마지막으로 회전형 시험기의 기계적 강도에 영향을 주는 수직력을 상쇄시킬 수 있는 설계 방안을 제시하고 유한요소해석을 통해 설계의 타당성을 검증하였다.

2. 초고속 선형동기전동기 회전형 시험기 모델

2.1 회전형 시험기 해석 모델

본 논문에서 서술되는 회전형 시험기는 시속 600km/h를 달성하는 선형동기전동기를 등가화하여 회전형의 형태로 설계한 것

† Corresponding Author : Korea Railroad Research Institute, Korea

E-mail: cbpark@krii.re.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea.

Received : March 11, 2015; Accepted : April 24, 2015

로 그 형태는 그림 1과 같다. 그 구조를 살펴보면 선형동기전동기의 이동자에 해당되는 계자가 회전 계자 형태로 구성되고, 고정자는 회전 계자를 일부 감싸는 형태이다.

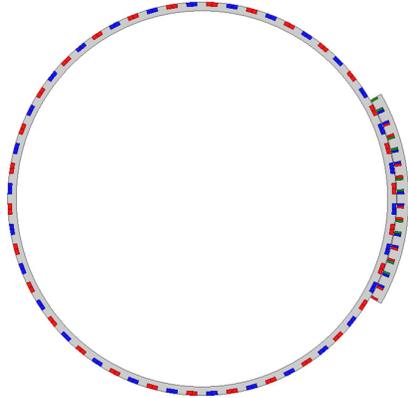


그림 1 선형동기전동기 회전형 시험기 모델
Fig. 1 LSM rotary type testing machine

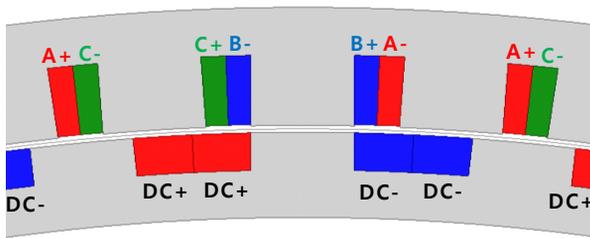


그림 2 회전형 시험기 권선도
Fig. 2 LSM rotary type testing machine winding layout

표 1 선형동기전동기 회전형 시험기 설계 사양
Table 1 Specifications of high-speed rotary type testing machine

항목	값	단위
출력	20	kW
정격속도	635	RPM
최고속도	1,111	RPM
토크@635RPM	300	Nm
토크@1111RPM	172	Nm
전압 제한값	296.2	V _{peak}
시험기 직경	3	m
적층 길이	100	mm
계자 극 수	60	EA
고정자 극 수	10	EA
계자 턴 수	100	turn
고정자 권선법	집중권	-
고정자 턴 수	13	turn
고정자 전류/전류 위상각@635RPM	45 / 0	A _{rms} / deg
고정자 전류/전류 위상각@1,111RPM	40 / 40	A _{rms} / deg

기계적 강도를 고려한 초고속 선형동기전동기 회전형 시험기 설계

그림 2는 회전형 시험기의 권선도를 나타낸 것으로, 회전 계자는 직류 전압이 인가되어 여자되고 고정자에는 3상 교류전압이 인가되어 구동된다. 표 1은 선형동기전동기 회전형 시험기의 설계 사양을 나타낸다. 시속 600km/h를 달성하기 위해서는 회전형 시험기의 직경이 3m라고 했을 때, 1,111RPM으로 회전해야 한다. 또한 목표 출력 20kW를 달성하기 위해서는 172Nm만큼 토크가 발생해야 한다. 그림 3은 회전형 시험기의 토크 파형으로 목표 토크를 만족한 것을 알 수 있으며, 그림 4는 전압파형으로 최고 속도에서 전압 제한값을 만족함을 알 수 있다.

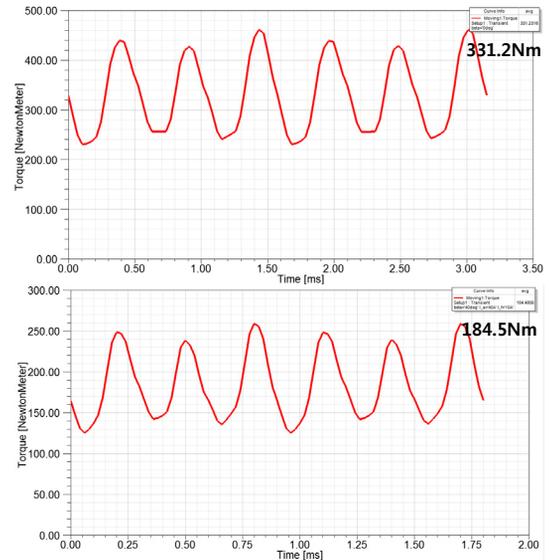


그림 3 토크 파형(635RPM(위), 1,111RPM(아래))
Fig. 3 Torque waveform(635RPM(Above), 1,111RPM(Below))

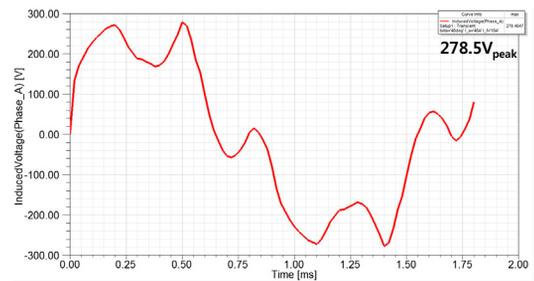


그림 4 전압 파형(1,111RPM)
Fig. 4 Voltage waveform(1,111RPM)

2.2 회전형 시험기 강도 해석 모델

본 논문에서 서술되는 선형동기전동기 회전형 시험기는 회전 계자의 직경이 3m이고 회전속도가 최고 1,111rpm이기 때문에 회전 계자의 안전율이 중요하다. 회전형 시험기의 회전 계자를 살펴보면, WFSM(계자권선형 동기전동기)의 형상과 유사하다. 계자를 이루는 부분은 철심으로 구성되어 있으며 회전 계자의 치에는 권선이 감겨져 있다. 회전 계자의 요크는 일반 전동기와 같이

설계할 수 있지만 회전 계자의 무게를 고려했을 때 올바른 설계 방법이 아니므로 그림 5와 같이 회전축과 계자 사이를 Spoke 모양으로 하여 회전 계자의 무게를 줄이도록 하고, Spoke 양 끝단에 Fillet을 주어 Spoke가 받는 Stress를 줄일 수 있도록 설계하였다. 또한 Spoke의 재질을 SUS로 하였기 때문에 공기의 투자율과 같으므로 회전형 시험기의 성능에 영향을 주지 않는다.

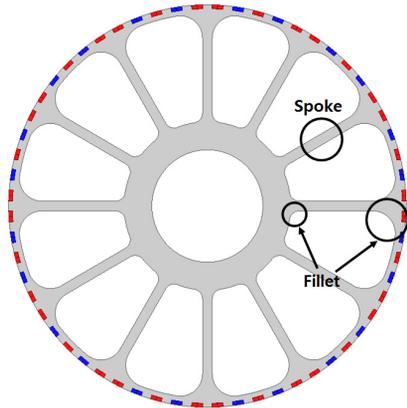


그림 5 회전형 시험기의 회전 계자
Fig. 5 Rotary field of the rotary type testing machine

3. 기계적 강도를 고려한 회전형 시험기 최적화 설계

3.1 Spoke 개수에 따른 기계적 강도 해석

회전형 시험기가 고속으로 운전될 때 회전 계자에 원심력이

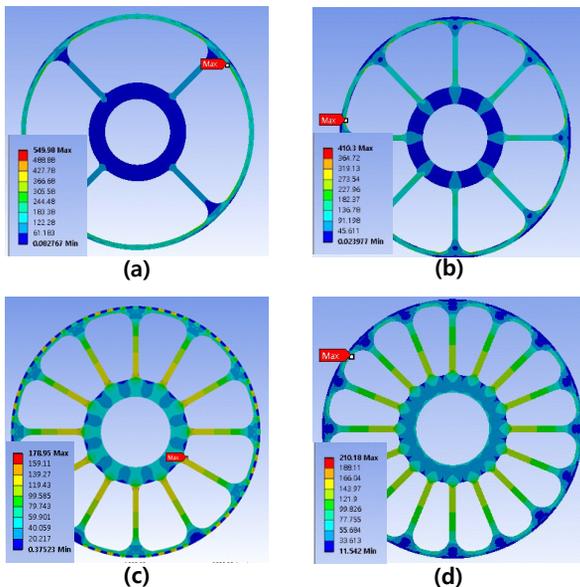


그림 6 Spoke 개수에 따른 기계적 강도해석 결과 (a)Spoke 4개, (b)Spoke 8개, (c)Spoke 12개, (d)Spoke 16개

Fig. 6 Result of Mechanical strength analysis according to number of spoke

발생하므로 중심축과 계자를 지지하는 Spoke에 응력이 집중된다 [4]. 따라서 본 절에서는 Spoke 개수와 기계적 강도와와의 관계를 분석하기 위해 Spoke 개수에 따른 강도 해석을 수행하였고, 그 결과를 바탕으로 Spoke 개수를 결정하였다.

그림 6은 Spoke 개수에 따른 기계적 강도해석 결과를 나타내고 최대 응력이 최소가 되는 Spoke 개수는 12개인 것을 알 수 있다.

$$k_{safe} = \frac{\sigma_E}{\sigma_{Yield}} \quad (1)$$

식 (1)은 안전율을 구하는 식으로 σ_E 는 Equivalent Stress를 나타내고 σ_{Yield} 는 Yield Strength를 나타낸다[5]. 식 (1)을 이용하여 Spoke 개수에 따른 안전율을 구하면 표 2와 같다. 본 논문에서 서술하는 회전형 시험기는 안전율 1.5를 목표로 함으로 Spoke의 개수가 2개 및 16개일 때 목표 안전율을 만족하고 그 중 12개일 때가 가장 안전율이 크므로 12개가 최적화된 Spoke 개수라고 할 수 있다.

표 2 Spoke 개수에 따른 최대 응력 및 안전율

Table 2 Maximum stress and safety factor according to number of spoke

Spoke 개수	최대 응력(MPa)	안전율
4	549.98	0.63
8	410.3	1.19
12	178.95	1.93
16	210.18	1.66

3.2 수직력을 고려한 회전형 시험기 기계적 강도 해석

선형동기전동기에서는 추력과 수직력이 존재한다. 만약, 수직력이 회전 계자의 기계적인 강도에 영향을 주어 안전율을 저하시킨다거나 수직력에 의해 회전 계자와 고정자 사이의 공극이 일정하게 유지하지 못한다면 회전형 시험기의 성능에 큰 문제가 발생하게 된다. 회전형 시험기의 구조는 전동기와 같이 고정자가 회전자를 둘러싸고 있는 구조가 아니라 일부분만을 둘러싸고 있기 때문에 수직력이 한쪽방향으로만 영향을 줄 수 있다. 따라서 기계적 강도해석을 할 때 수직력을 고려하여 강도해석을 수행해야 한다. 그림 7은 수직력을 고려한 회전형 시험기의 강도해석 모델을 나타내고 회전형 시험기의 최대 수직력은 1009.9N이므로 이를 적용하여 모델링을 하였다.

그림 8은 수직력을 고려한 기계적 강도해석 결과를 나타내고 표 3은 수직력을 고려하지 않은 모델과 고려한 모델의 최대 응력 및 안전율을 비교한 것이다. 표 3에서 볼 수 있듯이, 수직력을 고려하면 최대 응력이 증가하고 안전율이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 편축형 회전형 시험기 설계를 할 경우에는

수직력을 고려한 강도해석을 수행하여 기계적 안정성을 검증하여야 한다.

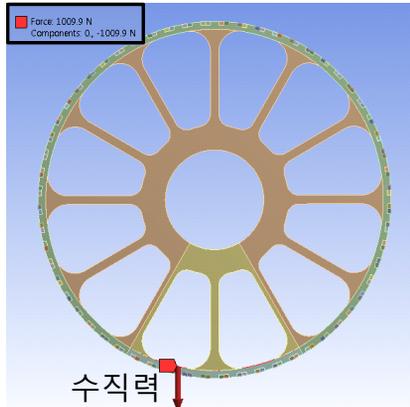


그림 7 수직력을 고려한 기계적 강도해석 모델
 Fig. 7 Mechanical strength analysis model in consideration of normal force

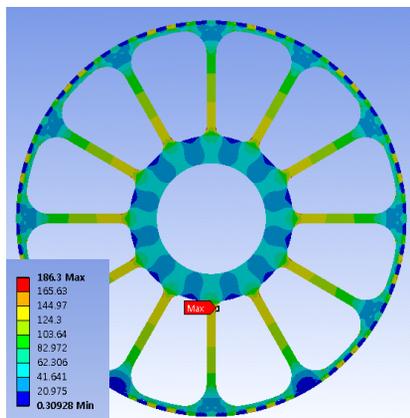


그림 8 수직력을 고려한 기계적 강도해석 결과
 Fig. 8 Result of mechanical strength analysis in consideration of normal force

표 3 수직력을 고려하지 않은 모델과 고려한 모델의 최대 응력 및 안전율 비교

Table 3 Comparison of maximum stress and safety factor between a model which considered the normal force and another model which not.

	최대 응력 (MPa)	안전율
수직력을 고려하지 않은 모델	178.95	1.93
수직력을 고려한 모델	186.3	1.85

4. 양측형 회전형 시험기

앞 장에서 설계한 회전형 시험기는 고정자가 회전 계자의 일부분을 감싸고 있는 형태이기 때문에 수직력이 한 곳에만 집중되어 나타났다. 하지만 그림 9와 같이 고정자를 대칭적으로 양측면에 설계 한다면 수직력이 상쇄되는 효과를 가지므로 회전형 시험기 설계 시 수직력에 대한 고려를 하지 않아도 될 것이다. 따라서 본 장에서는 양측형 회전형 시험기에 대한 설계를 진행하였다.

표 4 양측형 회전형 시험기 설계 사양

Table 4 Specifications of both sides rotary type test facility

항목	값	단위
시험기 직경	3	m
적층 길이	50	mm
계자 극 수	60	EA
고정자 극 수	20	EA
계자 턴 수	100	turn
고정자 턴 수	13	turn
고정자 전류/전류 위상각@635RPM	45 / 0	A_{rms} / deg
고정자 전류/전류 위상각@1,111RPM	40 / 40	A_{rms} / deg

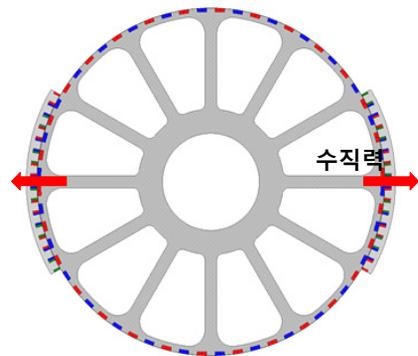


그림 9 양측형 회전형 시험기 모델
 Fig. 9 Both sides rotary type testing machine

양측형 회전형 시험기를 설계할 경우, 동등 출력 20kW를 발생하기 위해서는 적층길이를 기존의 절반인 50mm로 설계 하면 된다. 표 4는 양측형 회전형 시험기의 설계 사양을 나타낸 표이다. 표 4에 보이는 바와 같이, 적층 길이 및 고정자 극 수를 제외한 나머 설계 사양은 동일한 것을 볼 수 있다. 또한 편측형 회전형 시험기와 같은 조건으로 전류를 인가하였을 때 목표 사양을 만족하면서 비슷한 성능을 내는 것을 확인하였다.

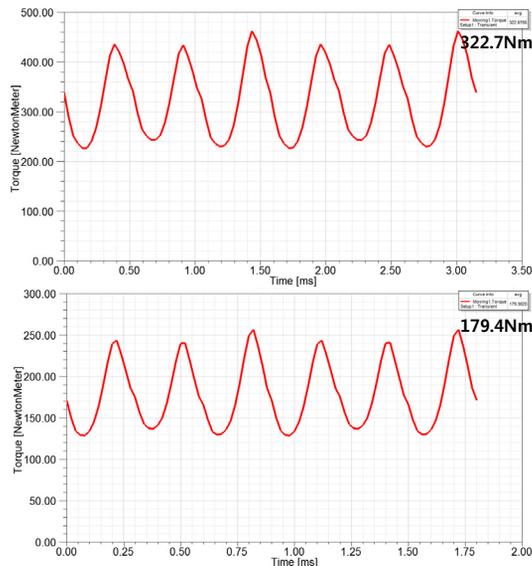


그림 10 토크 파형(635RPM(위), 1,111RPM(아래))
 Fig. 10 Torque waveform(635RPM(Above), 1,111RPM(Below))

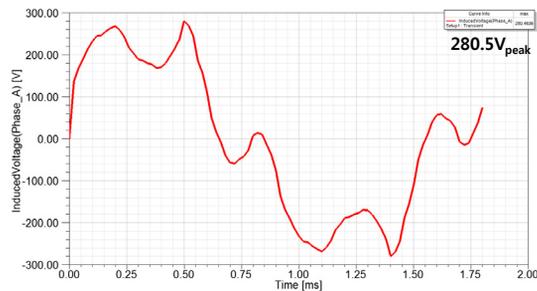


그림 11 전압 파형(1,111RPM)
 Fig. 11 Voltage waveform(1,111RPM)

5. 결 론

본 논문에서는 최대 속도 600km/h를 달성할 수 있는 초고속 선형동기전동기의 회전형 시험기 설계에 대해 서술하였다. 먼저 선속도 600km/h를 달성하면서 목표 출력 20kW를 내는 회전형 시험기를 설계하고 그 성능을 유한요소해석을 통해 확인하였다. 그리고 기계적인 안전성을 확보하기 위해서 회전 계자와 회전 축 사이를 Spoke 구조로 설계하였고 Spoke 개수에 따른 강도해석을 수행하여 안전율 1.5 이상을 확보할 수 있는 Spoke의 개수를 결정하였다. 또한 고정자가 회전계자의 일부분을 감싸고 있는 편축형 회전 시험기의 경우, 수직력이 발생하기 때문에 수직력을 추가적으로 고려하여 강도해석을 수행하였고, 안전율을 검증하였다. 마지막으로 회전형 시험기의 기계적 강도에 영향을 주는 수직력을 상쇄시킬 수 있는 설계 방안으로 고정자를 대칭적으로 설계하는 양축형 회전형 시험기를 제시하고 유한요소해석을 통해 성능을 확인하고 설계의 타당성을 검증하였다.

감사의 글

본 논문은 한국철도기술연구원에서 시행하는 주요 사업(레일방식 초고속철도 핵심요소기술 개발, 과제 번호 PK1501A)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] Chan-Bae Park, Byung-Song Lee, Chang-Young Lee, "Characteristic Analysis of Superconducting LSM for the Wheel-rail-guided Very High Speed Train according to Winding Method of the Ground 3-phase Coils," The Traction of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 63, No. 8, pp. 1164~1169, 2014.
- [2] Chan-Bae Park, Jae-Hee Kim, Byung-Song Lee, "Design of a Small-scaled Superconducting LSM for the Very High Speed Railway Vehicle," The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 63, No. 11, pp. 1602~1607, 2014.
- [3] Han-Wook Cho, Ho-Kyung Sung, So-Young Sung, Dae-Joon You, Seok-Myeong Jang "Design and Characteristic Analysis on the Short-Stator Linear Synchronous Motor for High-Speed Maglev Propulsion" IEEE TRACTATIONS ON MAGNETICS, VOL. 44, NO. 11, NOVEMBER 2008.
- [4] Jang-Ho Seo, Hyun-Kyo Jung, "Optimal Design of an IPMSM for High-Speed Operation Using Electromagnetic and Stress Analysis," Journal of Electrical Engineering & Technology Vol. 4, No. 3, pp. 377~381, 2009.
- [5] Won-Ho Kim, "A Stress Analysis Method for the Rotor Design of an IPMSM Considering Radial Force," Journal of Electrical Engineering & Technology Vol. 9, No.3, pp. 888-892, 2014.

저 자 소 개



설 현 수(Hyun-Soo Seol)

1987년 3월 30일생. 2012년 한양대 전자정보시스템 졸업(학사). 2012년~현재 한양대 대학원 전기공학과 석박사통합과정.



박 응 석(Eung-Seok Park)

1954년 2월22일생. 1973~1999년 철도청(전기주사). 1999년~현재 ㈜디투엔지니어링 사장. 2004년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2012년 한양대학교 공학대학원 철도시스템공학과 졸업(석사). 2013년~현재 한양대학교 대학원 전기공학과 박사과정.



이 주(Ju Lee)

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 System정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국 철도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 전기생체공학부 교수.



박 찬 배(Chan-Bae Park)

2003년 서울대 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2013년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2003년~2006년 삼성전자 DA연구소 선임연구원. 2007년 ~ 현재 한국철도기술연구원 추진무선급전연구팀 선임연구원. 관심 분야는 전기 차량 견인용 회전기, 선형기 및 무선전력전송시스템 설계 및 분석