

# 자기부상열차의 주행 환경을 고려한 집전자 마모도 평가

## Estimation of Power Collector Wear Considering the Operating Environment of a Maglev

이 경 복\* · 마 상 견\* · 임 재 원\*\* · 박 도 영\*\* · 손 정 룡\*\*\* · 강 현 일†  
(Kyoung-bok Lee · Sang-kyeon Ma · Jae-won Lim · Do-young Park · Jeong-ryong Son · Hyun-il Kang)

**Abstract** - The wear of the third track power collector is one of the essential check factors for safe train operation. Rapid wear of the current collector accelerates the line of the catenary. In addition, the arc generated when the catenary line is turned off causes a malfunction in the minute portion of the catenary line, thereby shortening the life of the catenary line. In this paper, to analyze the mechanical wear of the current collector during driving according to the environmental factor of the Maglev(magnetic levitation train), it was divided into dry season and wet season. the wear of metallized collector, copper alloy collector and carbon collector were measured and compared with each other. The wear rate was measured according to the position of the wire, the position of the power collector and the position per hour. Microscopic photographs of the cross section and surface of the power collector were measured. The electrical currents of the metallized collector, copper alloy collector and carbon collector were measured.

**Key Words** : Maglev, Power collector, Metallized carbon copper, Overhead wire, Third rail

### 1. 서 론

철도 차량의 집전방식은 크게 커티너리(catenary) 집전방식과 제3궤조 집전방식으로 구분된다[1]. 커티너리 집전방식은 궤도 상부에 설치된 가공전차선으로부터 팬터그래프를 통하여 집전하는 방식이며, 고속주행 차량에 주로 사용되고 있다. 제3궤조 집전방식의 강체전차선로는 정극(+)과 부극(-) 선로로 구분되어 있으며 변전소로부터 직류 1,500 V를 급전 받아 차량에 공급한다[2-4]. 제3궤조 집전방식은 고가형식의 중, 저속 차량에 주로 사용하는 방식이며, 주행용 레일(rail) 외에 궤도의 상, 측 및 하면에 설치된 도전 레일(conductive rail)로부터 수전하는 방식이다. 이러한 제3궤조 집전방식은 커티너리 설비가 필요하지 않아 노선의 전체적인 외형이 단순해지고 도상지 미관에 적합하기에 최근 전기철도 집전방식으로 많이 사용되고 있다[5].

제3궤조 집전방식의 주행용 레일은 외부 충격, 레일의 이동 및 단락사고 발생에 대한 영향을 최소화하기 위해 지지금구에 조립식 구조로 설치된다. 도전 레일은 콘크리트 거더(concrete girder) 및 분기기 스틸 거더(steel girder)의 양 측면에 설치된다. 또한 알루미늄 합금 A-type 레일 및 카드

뮴-프리(Cd-free) 전차선의 신축을 분산시키고 이를 흡수하기 위하여 123 m마다 신축흡수장치를 설치하고, 중앙에는 고정 장치가 설치된다. 신축흡수장치의 온도변화에 대한 신축 처리 능력은 설치환경에 맞게 계산하여 정하고 있다.

집전장치의 표면 재료로는 주로 동계 합금과 카본(carbon)과 동으로 이루어진 메탈라이즈(metallized)가 사용되는데 집전장치의 수명은 전기 부하, 온도, 집전자 또는 가선의 상태, 습도, 주변 조건, 접촉력 또는 상방향으로의 힘, 판토그래프(pantograph)의 상태, 차량의 속도, 진동, 정류 조건 등과 같은 다양한 외부 요인에 의하여 영향을 받는다[6]. 집전장치의 빠른 마모는 전차선의 이선을 촉진시킨다. 또한 전차선이 이선될 때에 발생하는 아크(arc)는 전차선의 미소 부분에 용손을 발생시켜 전차선의 수명을 단축시킨다[7]. 그러므로 제3궤조 집전장치의 마모 정도는 안전한 열차운행을 위하여 필수적인 점검 요소 중 하나이다. 그러나 제3궤조 집전방식이 국내에 도입 된지 얼마 되지 않았기에 집전장치의 마모 정도에 대한 연구가 미진한 실정이다. 국내와 같이 계절에 따라 온도, 습도 및 풍량의 편차가 심한 경우 집전장치의 마모 정도에 대한 연구는 반드시 필요하다.

본 논문에서는 자기부상열차 환경 요인에 따라 주행시 발생하는 집전장치의 기계적 마모 정도 분석하기 위하여 건기와 우기로 나누어 각각 측정하였다. 제3궤조 집전장치의 마모도 측정은 2016년 2월 개통된 인천자기부상열차에서 사용 중인 메탈라이즈(카본 동) 집전자, 동계 합금 집전자 그리고 순 카본 집전자의 마모도를 측정하여 서로 비교 분석하였다. 마모도는 가선 위치, 습판체 위치 및 시간당 위치에 따라 각각 측정되었으며, 정밀한 분석을 위하여 마모된 집전자의 단면과 표면의 미세사진을 측정하였다. 또한 메탈라이

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Hanbat National University, Korea

E-mail: hikang@hanbat.ac.kr

\* Daejeon Metropolitan Express Transit Corporation, Korea

\*\* Korea Institute of Machinery & Materials, Korea

\*\*\* Schunk Carbon Technology Ltd, Korea

접수일자 : 2017년 2월 14일

최종완료 : 2017년 2월 27일

즈(카본 등), 동계합금 그리고 순카본 집전자의 집전 전류를 측정하여 전기적 특성을 비교 분석하였다.

## 2. 제3제조 집전장치

제3제조 집전방식의 유형은 형식에 따라 다양하게 분류되지만 급전선과 습동체의 접촉위치에 의한 분류로 나누며, 급전선과 습동체의 접촉위치에 따라 상면접촉, 측면접촉, 하면접촉 등 크게 3가지 유형으로 분류된다. 상면습동방식은 용인 경전철에서 사용되며 집전장치가 도전레일의 상면을 습동하도록 설치하고 지지금구 매우 단순하며 도전레일 점감이 용이하다는 장점이 있다. 그에 반해 하면습동방식은 집전장치가 도전레일의 습동하도록 설치하도록 하며 국내의 경우 부산-김해경전철에 설치되어 있다. 또한 측면습동방식은 집전장치가 도전레일의 측면을 습동하도록 설치하고 의정부 경전철에 설치되어 있다. 측면접촉식과 하면접촉식의 집전장치에 대한 사양을 다음 표 1에 나타내었다. 하면습동방식과 측면습동방식은 지지금구 다소 복잡하며 도전레일 점감이 어려운 단점이 있다.

표 1 집전장치 사양 비교

Table 1 Comparison of power collector specifications

구분	측면접촉식	하면접촉식
전압	1500 V	1500 V
주행속도	110 km/h	120 km/h
습동판 재질	Carbon	Carbon
압상력	96 N ~ 144 N (120 N ± 20%)	92 N ~ 122 N (107 N ± 15 N)
동작온도	-25°C ~ +40°C	-30°C ~ +75°C

그림 1은 하면접촉식 자기부상열차 집전장치와 메탈라이즈(카본 등) 집전장치를 보여준다. 그림 1의 (a)에 보인바와 같이 급전레일과 습동체의 접촉상태를 측정하기 위해 열차 차량에 측정 장비를 부착하고, 열차가 주행하면서 급전레일과 집전판의 습동상태를 연속적으로 측정하였다. 그림 1의 (b)는 메탈라이즈(카본 등)으로 이루어진 집전장치를 보여준다. 집전장치는 동으로 이루어진 판위에 카본재질을 덮분혀 제작한 이중구조로 구성되어 있다.

메탈라이즈(카본 등) 집전자는 제작사의 고유 기술력에 따라 재료의 물성특성 및 배합비율이 달라지게 된다. 또한, 국제적으로 통용되는 규격은 시험방법만 규정하며 별도의 규격을 제시하지 않고 있어 제작사에서 제시하는 규격을 따르고 제작사에서는 제품의 품질을 보증하도록 되어 있다. 자기부상열차에 적용하는 집전자의 규격은 다음 표 2와 같다.

표 2 자기부상열차 집전장치 규격

Table 2 Specifications of Maglev power collector

구분	전기비저항	굴곡강도	겉보기 밀도	경도
메탈라이즈(카본 등) 집전장치	0.5 ~ 5 $\mu\Omega \cdot m$	50 ~ 100 MN/m <sup>2</sup>	2.0 ~ 2.6 g/cm <sup>3</sup>	95 ~ 130 (HR 5/150)



(a) 자기부상열차 집전장치



(b) 메탈라이즈(카본 등) 집전장치

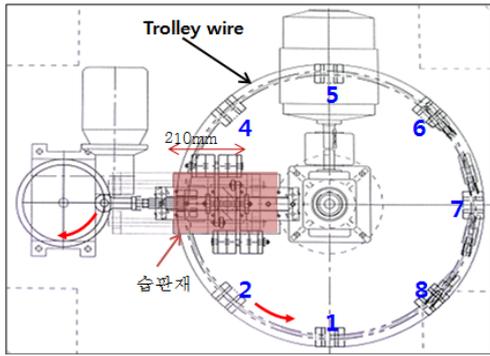
그림 1 자기부상열차의 집전자

Fig. 1 power collector of Maglev

집전자에 요구되는 특성으로는 통전성과 유효성에 주목하였고 재료에 따른 종류로는 순카본, 메탈라이즈(카본 등) 및 동 등이 있다. 이러한 재료 중 현장에 적용하기 위한 세부 검토 항목으로는 제조 비용, 내구성, 아크 발생 빈도, 기계적 강도, 전기전도도, 친환경, 경량화, 가선 내마모성, 가공성, 조립성이며 사용 환경에 적합한 재질을 선정하여 사용되고 있다. 동을 사용할 경우, 도전성은 좋으나 유효성이 없어 고체윤활재가 별도로 필요하며 조립 및 운영에 있어 비용이 높다는 단점이 있다. 또한 습동체 재질의 요구 특성인 경도, 비중 및 비저항 특성을 만족시킬 수가 없다. 한편 순카본 재질의 경우, 도전성 및 유효성은 좋으나 충격에 취약하다는 단점이 있어 가공 및 조립 시 크랙(crack)이 발생되기 쉽고 내마모시험기에 조립 시 볼트부분 크랙이나 깨짐이 있다. 또한 습동체 재질의 요구 특성인 경도, 비중, 비저항에 있어 동과 같이 어느 하나라도 만족시킬 수 없는 단점이 있다.

## 3. 운행 환경에 따른 제3제조 집전장치 마모도 측정

그림 2는 내구실험에 사용된 내마모시험기 도면 및 외관 사진을 나타내고 있다. 인가전류는 500 A, 압상력은 59 N으로 설정하였다. 주행시간은 48 시간으로 하였고, 습동체 왕복 이동거리는 210 mm로 설정하였다. 자기부상열차 집전장치 마모도 측정은 건기 시와 우기 시로 나누어 실시하였다. 우기 시 수분 분사는 단위면적 시간당 10 ml에 해당하는 양으로 설정하였다. 측정에 사용된 집전장치는 카본 동으로 이루어진 메탈라이즈(카본 등)와 동계 합금 그리고 순카본



(a) 내마모 시험기 [8]



(b) 내마모 시험기 외관

그림 2 전차선의 위치별 마모량

Fig. 2 Wear amount according to position of trolley wire

이 사용되었다.

그림 3은 전차선의 건기 시 및 우기 시 위치에 따른 마모 정도를 측정된 결과이다. 우기 시험에서 메탈라이즈(카본 동) 소재와 순 카본 소재에서 가선과의 기계적 마찰 및 아크에 의해 0.0001 g 정도로 마모가 거의 없었으며 가선도 거의 없는 결과를 나타내었다. 반면 동계 합금 소재는 메탈라이즈(카본 동) 소재에 비해 0.003 g 정도의 많은 마모량이 나타났으며 가선의 마모량도 많았다. 건기 시험에서 동계 합금은 아크 및 진동이 심해져 47 시간에서 강제 종료하였고, 메탈라이즈(카본 동) 소재는 크랙으로 35 시간에서 강제 종료하였다.

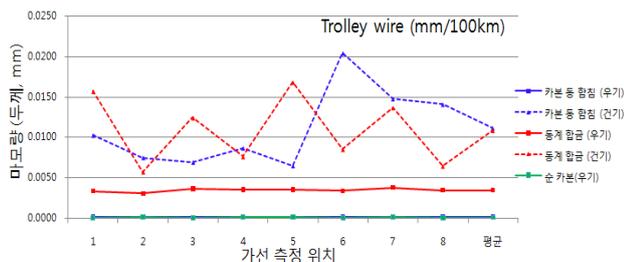


그림 3 전차선의 위치별 마모량

Fig. 3 Wear amount according to position of trolley wire

그림 4는 슬판체의 건기 시 및 우기 시 위치에 따른 마모 정도를 측정된 결과이다. 건기 시험에서는 메탈라이즈(카본 동) 소재의 마모가 동계 합금 소재에 비해 현저히 많았으나 가선의 마모량은 거의 같았다. 이것은 마찰열이 메탈라이즈(카본 동) 소재의 마모에 미치는 영향이 큰 것으로 판단되며, 건기 시험의 신뢰성은 떨어진다고 사료된다. 우기 시험에서는 전차선의 경우와 마찬가지로 메탈라이즈(카본 동) 소재와 순 카본 소재의 마모량이 가장 적었고, 동계 합금의 경우 평균 0.02g 정도의 마모량을 보였다.

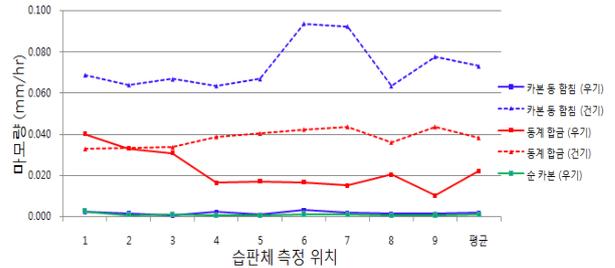
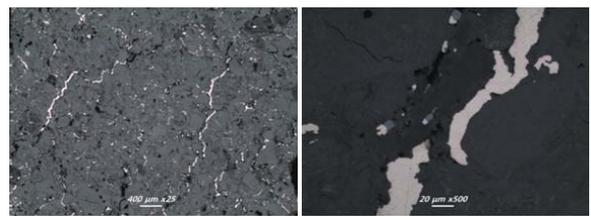


그림 4 슬판체의 위치별 마모량

Fig. 4 Wear amount according to position of power collector

그림 5는 메탈라이즈(카본 동) 집전자의 단면 및 표면 사진이다. 단면과 표면 사진에서 보이듯이 카본 입자 계면의 미세 기공부분에 동이 함침 되어 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 집전 성능을 향상시키는 효과가 있다. 이와 같이 전도성 물질이 함침되어 있는 경우는 열차 운행 시 집전 슬판체를 지지하는 캐리어는 집전자와 직접 soldering 되어야 하고 캐리어 소재로는 내식성이 우수한 스테인리스 스틸을 사용하면 좋으나 두 소재간의 접합성이 좋지 않아 캐리어 소재로 적용하기는 어렵다. 따라서, 캐리어 소재는 집전자와의 통전성능이 양호하고 soldering 특성이 적합한 소재가



(a) 단면 (cross section)



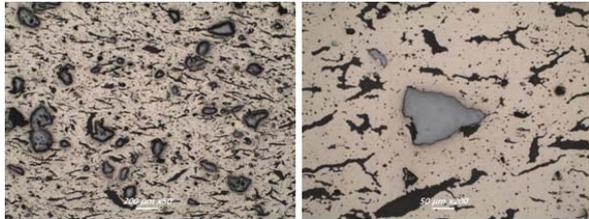
(b) 표면 (surface)

그림 5 메탈라이즈(카본 동) 카본 집전자 단면 및 표면사진

Fig. 5 Cross section and surface image of metallized (carbon copper) power collector

선정되어야 한다. 특히 가공성, 내구성, 그리고 전기전도도가 고려되어야 하고 주요한 인자는 내식성이다.

그림 6은 동계 합금 집전자의 단면 및 표면사진이다. 동계 합금의 단면과 표면 사진에서 볼 수 있듯이 내마모 및 윤활성을 부여하기 위하여 고체 윤활제, 액체윤활제가 첨가되어 있고 그 외에 내마모 및 내아크성을 부여하기 위하여 전도성 물질이 첨가되어 사용되고 있다.



(a) 단면 (cross section)



(b) 표면 (surface)

그림 6 동계합금 집전자의 단면 및 표면사진

Fig. 6 Cross section and surface image of copper alloy power collector

그림 7은 메탈라이즈(카본 동), 동계 합금 및 순 카본 소재의 시간당 위치별 마모량을 나타낸 결과이다. 동계합금 소재보다 메탈라이즈(카본 동) 소재의 마모량이 적었고, 건기보다 우기 시의 마모량이 적었다. 건기 시험에서는 최대 마모량은 동계 합금이 0.9 g과 메탈라이즈(카본 동)는 0.5 g을 보였다. 반면에 우기 시험에서는 최대 마모량은 동계 합금이 0.58 g, 메탈라이즈(카본 동)는 0.0001 g 및 순카본 소재가 0.0001 g를 보였다. 이러한 결과는 그림 3과 그림 4와 마찬가지로 우기시험에서 모든 소재가 가장 좋은 마모 특성을 보였고 동계 합금에 비해 메탈라이즈(카본 동) 소재가 더 우수한 마모 특성을 보임을 확인 할 수 있었다.

그림 8은 500 A 인가전류에서의 시간별 집전 성능을 나타낸 결과이다. 동계 합금 집전자의 집전전류는 건기와 우

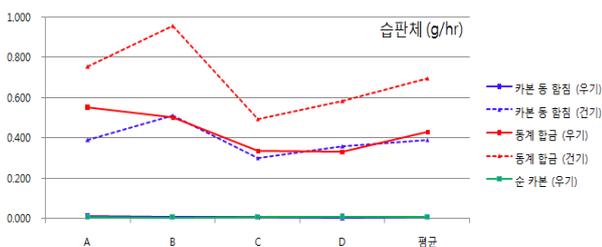


그림 7 시간당 위치별 마모량(g/hr)

Fig. 7 Wear per hour position

기 시 모두 최대 500 A의 특성을 보였다. 건기 시험에서 최소 집전전류 성능에서는 동계 합금 집전전류가 220 ~ 350 A이고 메탈라이즈(카본 동) 소재 집전전류는 100 ~ 170 A 정도로 약 2배 정도 차이를 보였다. 반면에 우기 시험에서 집전전류 성능에서는 동계 합금 집전전류가 360 ~ 440 A, 메탈라이즈(카본 동) 집전전류가 180 ~ 220 A 그리고 순 카본의 집전전류는 40 ~ 110 A 정도로 약 2배 정도씩 차이를 보였다. 이러한 결과는 메탈라이즈(카본 동)와 순 카본 집전장치 보다 동계 합금 집전장치의 성능이 더 우수하다는 것을 보여준다.

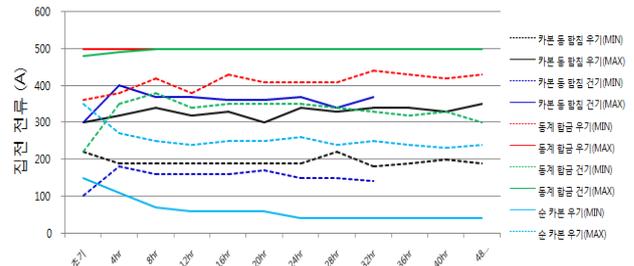


그림 8 집전 전류

Fig. 8 Contact current

#### 4. 결 론

본 연구에서는 메탈라이즈(카본 동), 동계 합금 및 순 카본 등 3가지 종류의 집전장치 소재에 대한 마모 특성을 연구 하였다. 수행조건은 건기와 우기로 나누어 측정하였다. 건기 시험 결과에서 동계 합금과 메탈라이즈(카본 동) 소재는 둘 다 아크 및 진동이 심해져 시험을 강제 종료하였다. 메탈라이즈(카본 동) 소재는 우기 시험 결과에서 가선과의 기계적 마찰 및 아크에 의한 마모가 거의 없었으며 가선도 거의 없는 결과를 나타내었다. 반면 동계 합금 소재는 메탈라이즈(카본 동) 소재에 비해 많은 마모량을 나타내며 가선의 마모량도 많았다. 한편 순 카본 소재는 마모량이 가장 적었으나 집전 성능이 가장 낮았다. 건기시험에서는 상기 결과와 달리 메탈라이즈(카본 동) 소재의 마모가 동계 합금 소재에 비해 많았으며 가선의 마모량은 거의 같았다. 이것은 마찰열이 메탈라이즈(카본 동) 소재의 마모에 미치는 영향이 큰 것으로 판단되며, 건기 시험의 신뢰성은 떨어진다고 사료된다. 메탈라이즈(카본 동) 소재의 집전 성능은 우기 시에는 동계 합금 소재 대비 48 ~ 66% 이며, 건기 시에는 동계 합금 소재 대비 46 ~ 72%이었다. 순 카본 소재의 집전 성능은 우기 시 동계 합금 소재 대비 15 ~ 51%이었다. 집전 성능은 메탈라이즈(카본 동) 소재가 동계 합금 소재 대비 55 ~ 60%정도로 낮았지만 우기 시 내마모성은 1/10 ~ 1/50 정도 수준으로 내마모성이 우수한 것으로 확인되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업에 연구비 지원(16RTRP-B070556-04)에 의해 수행 되었습니다.

References

- [1] J. Pombo and J. Ambrósio, "Influence of the aerodynamic forces on the pantograph - catenary system for high-speed trains", Vehicle System Dynamics, vol. 47, no. 11 pp. 1327-1347, 2009.
- [2] D.J. Hartland, "Electric contact systems - Passing power to the trains", Railway Electrification Infrastructure and Systems(REIS 2013), 6th IET Professional Development Course on, 2013.
- [3] C. Goodman, "Overview of electric railway systems and the calculation of train performance", Electric Traction Systems, 2008 IET Professional Development course on, 2008.
- [4] Mark A. Gabbott, "Catenary and pantograph design and interface", 3rd IET Professional Development Course on Railway Electrification Infrastructure and Systems, 2007.
- [5] Ji-Chan Kim, Sang-Kyeon Ma, Seong-Yong Yang, Kyeong-Bok Lee, and Joo-Won Yoon, "Third-Rail Current Collector Device improving performance and efficiency for Maglev Train", Autumn Conference & Annual Meeting of the Korean Society for Railway, 2015.
- [6] Y. Chen, Z. M. Liu and Q. Li, "The Fatigue Reliability Evaluation & Improvement of the Single-Arm Subway Current Collector", Applied Mechanics and Materials, vol. 215-216, pp. 826-831, 2012.
- [7] L Dong, G Chen and Z Zhou, "Effects of the Polarity on the Friction and Wear of the Third Rail in Subway", China Railway Science, 2009.
- [8] Kyu-Hwa Cho, "A Study on Material Development for and Application of a Slider of Pantograph", Journal of the Korean Society for Railway, vol. 18, no. 5, pp. 410-418, 2015.

저 자 소 개



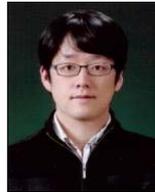
**이 경 복 (李 庚 複)**

1998년 성균관대 전기공학과 졸업, 2009년 충남대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2012년 동대학원 동학과 졸업(공학박사), 1995년~2005년 현대로템중앙연구소 선임연구원, 2005년~현재 대전도시철도공사 철도사업팀장



**마 상 건 (馬 尙 見)**

2011년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1998년~1999년 ㈜효성, 2001년~2005년 서울도시철도공사, 2005년~현재 대전도시철도공사 연구개발원 책임연구원



**임 재 원 (林 載 元)**

2004년 서울대학교 전기공학부 졸업(학사), 2006년 동대학원 졸업(공학석사), 2011년 동대학원 졸업(공학박사). 2011년~현재 한국기계연구원 선임연구원



**박 도 영 (朴 都 永)**

1984년 서울대 전기학과 졸업(학사), 1986년 동대학원 졸업(공학석사), 1997년 Queen's University 전기학과 졸업(공학박사), 2006년~2011년 한국기계연구원 자기부상열차실용화사업단 기술팀장(책임), 2011년~현재 한국기계연구원 책임연구원



**손 정 룡 (孫 正 龍)**

1992년 나가오과학기술과학대학교 대학원 창조설계공학전공(석사), 1995년~2001년 Allied material corp., 2002년~현재 Schunk Carbon Technology Ltd. 수석연구원



**강 현 일 (姜 賢 一)**

2001년 성균관대 전기공학과 졸업(학사), 2003년 동대학원 졸업(공학석사), 2007년 동대학원 졸업(공학박사), 2007년~2008년 성균관대 정보통신공학부 연구교수, 2011년~현재 국립한밭대학교 전기공학과 부교수