

# L-C 공진형 자여자 와전류 브레이크의 파라미터 추출 방법 및 특성연구

(Extraction Method of Parameter of Self Excited Eddy Current Brake Using L-C Resonance and characteristic research)

정태철\* · 조수영 · 안한용 · 정거철 · 박용석 · 조현태 · 이 주\*\*

(Taechul Jeong · Sooyoung Cho · Hanwoong Ahn · Geochul Jeong · Eung-Seok Park · Hyuntae Cho · Ju Lee)

## Abstract

In recent years, numerous studies have attempted to find and explore the auxiliary brake and the oil pressure type and electrical type are mainly used. However, the model proposed here is to self-excited eddy current brake. The advantage of this is it does not require an external power supply and can be produced to reduce the size than others. This self-eddy current brake consists of RLC circuit so resistance, inductance and capacitance value can be considered a fixed value. But, inductance and resistance value changes depending on the shape, temperature and magnetic alteration. Therefore, in this paper, the focal point is characteristic analysis according to the parameter variations. Also, using this result, this paper explains how to estimate the capacitance.

Key Words : SEIG , Eddy current brake , Parameter design, L-C Resonance

## 1. 서 론

최근에 자동차 안전 기준이 보행자의 교통사고와 대형버스의 내리막길 사고 등을 막기 위해 보조제동장치 성능기준이 강화되었고, 이로 인하여 보조브레이크의 개발의 중요성이 대두되고 있다. 현재 상용차에는

풋 브레이크의 제동력을 보조하기 위해 구조상 자연적으로 발생하는 엔진 브레이크와 차량에 부가적으로 장착하여 사용하는 배기브레이크, 유체식 리타더 등이 있다. 이러한 보조브레이크의 사용은 상용차의 제동력에 대한 법규 개정의 움직임에 따라 사용이 의무화 될 예정이다[1].

이 논문에서 연구하고자 하는 자여자 와전류 브레이크(Self-Excited Eddy Current Brake)는 회생 제동을 통한 와전류 브레이크이다. 이는 기존 와전류 브레이크의 전원공급을 위하여 존재하는 배터리를 대신 커패시터를 사용한 모델이며, 배터리 대신 커패시터를 사용함으로써 비용도 절감할 수 있고, 크기도 축소 시

\* Main author : Doctor's course Electrical Engineering, Hanyang University  
\*\* Corresponding author : Professor Electrical Engineering, Hanyang University  
Tel : 02-2220-0349, Fax : 02-2295-7111  
E-mail : kyungch1@nate.com  
Received : 2015. 8. 24  
Accepted : 2015. 11. 5

킬 수 있다는 장점을 가진다. 자여자 와전류 브레이크는 RLC회로로 구성되지만, 인덕턴스와 저항 값이 형상, 온도, 자기적 변화에 따라 변동하기 때문에 적절한 파라미터를 선정하는 것이 중요하다. 따라서, 본 논문에서는 기초 모델을 이용하여 파라미터 값을 분석 후, 적절한 커패시터 값을 산정하여 실제 시뮬레이션을 통해 검증한다.

## 2. 와전류 브레이크의 원리

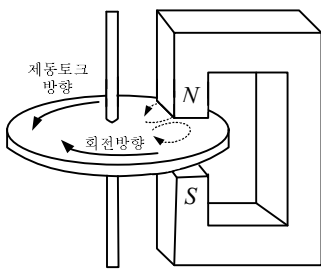


Fig. 1. Principle of the eddy current brake

와전류 브레이크는 회전 원판 사이에 자석을 둔 그림 1을 보면 플레밍의 오른손 법칙에 따라 기전력이 유도되어 와전류가 형성되고, 이 전류와 자기장을 통해 토크가 원판의 회전방향과 반대방향으로 나타나게 되어 실질적으로 회전 원판이 정지되는 원리를 가지고 있다. 또한, 와전류를 발생시키는 기전력의 크기는 식 (1)의 패러데이 법칙에 따라 턴수에 비례하고 자속의 시간적 변화율에 비례한다는 것을 알 수 있다.

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

와전류 브레이크의 최대토크 식은 식 (2)와 같다.

$$T_m = \frac{K_m}{\pi} \frac{1}{\mu_0} (\pi R^2 L) B_0^2 \quad (2)$$

여기서  $K_m$ 은 비투자율( $\mu_0$ )과 관련된 수치인자이고,  $R$ 은 회전자의 반경,  $L$ 은 적층 길이,  $B_0$ 는 공극자속밀도이다. 즉, 최대토크는 회전자의 부피( $\pi R^2 L$ )에 비례하고, 공극자속에 비례한다는 것을 알 수 있다. 그리고

이는 투자율에는 관련이 있지만 저항성분에는 관련이 없다는 것을 알 수 있다. 또한, 투자율은 인덕턴스 값에도 영향을 주기 때문에 적절한 값을 가지는 재질을 사용해야 한다[2].

## 3. 자여자 와전류 브레이크 파라미터 추출

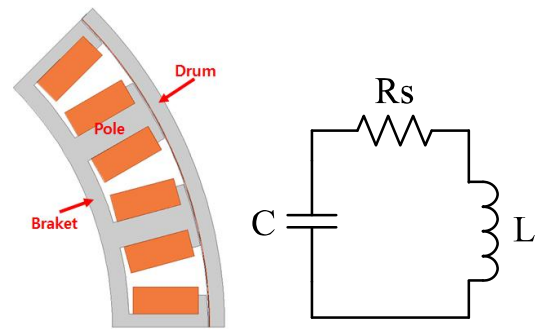


Fig. 2. Analysis model of the self excited eddy current brake and the equivalent circuit of the one-phase of the stator

자여자 와전류 브레이크의 회전자의 도전율을 높이기 위해 회전자 표면에 구리코팅을 한 기본 모델의 형상은 그림 2와 같고, 설계 사양은 표 1과 같다.

Table 1. Specification of the self excited eddy current brake

항목	사양	단위
회전자 외경	482	mm
고정자 외경	464	mm
적층 길이	73	mm
폴 수	24	-
상 수	3	

$$\begin{bmatrix} R_s + pL_s + 1/pC & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s + 1/pC & 0 & pL_m \\ pL_m & -\omega_r L_m & R_r + pL_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_m & pL_m & \omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -V_{cq0} \\ -V_{cd0} \\ K_{gr} \\ -K_{dr} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서  $K_{gr} = \omega_r \lambda_{dro}$ ,  $K_{dr} = \omega_r \lambda_{qro}$ 를 나타낸다.

식 (3)은 3상 자여자 유도발전기(Self-Excited

Induction Generator; SEIG)의 방정식이고, 자여자인 지 아닌지를 판단하기 위해서는 식 (4)에 표현된  $i_{ds}$ 의 분모항이 0이 되는 특성 방정식을 풀면 도출해낼 수 있다[3].

$$i_{ds} = \frac{U}{[R_s + pL_s + 1/pC - (p^2L_m^2(R_r + pL_r) + pL_m^2\omega_r^2L_r)/\Delta]^2 + (pL_m^2R_r\omega_r/\Delta)^2} = \frac{U}{\theta} \quad (4)$$

여기서  $\Delta = (R_r + pL_r)^2 + \omega_r^2L_r^2$ 를 나타낸다.

$i_{ds}$ 의 분모항이 고정자 저항과 회전자 저항, 고정자 인덕턴스와 회전자 인덕턴스 및 상호인덕턴스, 커패시턴스로 구성되어 있으므로 이 파라미터를 추출하고 선정하는 것이 중요하다.

이 논문에서는 3상이 단지 120도의 위상차만 가지고 크기가 같고 대칭이기 때문에 한 상을 기준으로 하여 파라미터를 산출한다.

### 3.1 저항과 인덕턴스 추출

기동 시 Boosting이 되는지 판별하기 위해 구속시험 방법과 가상코일의 방법을 이용하여 자여자 와전류 브레이크의 파라미터를 추출한다. 참고적으로 고정자 저항은 기초 모델에 있는 권선을 통해 주어진 값을 가진다.

#### 3.1.1 저항과 인덕턴스 추출

회전자의 저항을 산정하기 위해서는 권선에 정격주파수의 25%를 가지는 주파수로 전압을 인가하여 구한다. 여기서 전압은 초기 기동시 기동전류를 흐르게 하는 전압으로써, 이 값을 찾는 것이 중요하다. 기동전류와 기동전압을 통해 식 (5)와 같은 3상의 유효전력 방정식을 세울 수 있고, 이를 회전자 저항에 관한 식으로 변형하면 식 (6)으로 나타낼 수 있다. 따라서, 구속시험을 통해 회전자 저항을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v_{a,rms}i_{a,rms} + v_{b,rms}i_{b,rms} + v_{c,rms}i_{c,rms} = 3i_{a,rms}^2R_s + 3i_{a,rms}^2R_r \quad (5)$$

$$R_r = \frac{v_{a,s}i_{a,s} + v_{b,s}i_{b,s} + v_{c,s}i_{c,s} - 3i_{a,s}^2R_s}{3i_{a,s}^2} \quad (6)$$

#### 3.1.2 가상코일을 통한 인덕턴스 추출

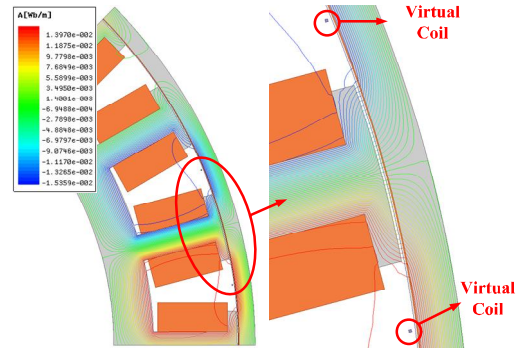


Fig. 3. Inductance extraction through virtual coils

인덕턴스 값을 구하기 위해 그림 3과 같이 한 상의 양끝 단에 가상의 코일을 배치시킨 후 한 상에만 전류를 인가하여 인덕턴스 값을 구할 수 있다.

한 상의 고정자 인덕턴스는 FEM해석을 통해 얻어진 쇠교자속을 이용하여 식 (7)의 관계에 따라 구해진다.

$$L_s = \frac{\lambda_{pha,a}}{i_a} \quad (7)$$

자화인덕턴스는 FEM해석을 통해 얻어진 가상코일을 지나는 쇠교자속을 이용하여 식 (8)의 관계에 따라 구해진다.

$$L_m = \frac{\lambda_m}{i_a} \quad (8)$$

식 (7)과 식 (8)의 관계에 따라 고정자의 누설 인덕턴스는 식 (9)와 같이 구해진다.

$$L_{ls} = L_s - L_m \quad (9)$$

회전자의 누설인덕턴스를 구하기 위해서는 고정자 저항 및 구속시험에 이용된 전압과 전류, 이때 얻어진 회전자 저항을 통해 구한다.

$$L_{lr} = \frac{240 \sqrt{\left(\frac{v_{a,rms}}{i_{a,rms}}\right)^2 - (R_s + R_r)^2}}{\pi \cdot N_{slot,a} \cdot N} - L_{ls} \quad (10)$$

식 (8)과 식 (10)을 이용하여 회전자 인덕턴스는 식 (11)과 같다.

$$L_r = L_m + L_{lr} \quad (11)$$

## 4. 커패시턴스 산정 및 해석 결과

### 4.1 커패시턴스 산정

커패시턴스를 산정하기 위해서는 식 (4)에서 나타난  $\theta$ 가 0이 되는 특성방정식을 풀어야 한다. 이 특성방정식을 매텔랩으로 구현하여 3장에서 구한 파라미터를 대입하여 계산하면 그림 4와 같다.

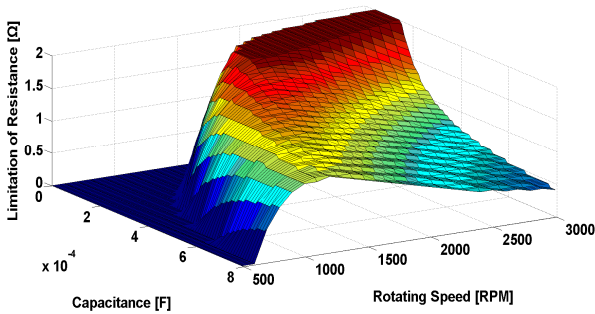


Fig. 4. Boosting plot of the capacitor calculation

그림 4를 통해 저속영역인 500rpm~1,500rpm 영역에서는 1,500rpm~3,000rpm보다 좀 더 큰 커패시턴스를 가져도 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 이 논문에서 사용된 한 상의 고정자 저항은 0.43Ω이고, 운전영역은 600rpm~1,500rpm이므로, Boosting이 잘 일어나기 위하여 커패시턴스를 250uF으로 산정하였다.

### 4.2 해석 결과 검증

그림 2에 나타난 기초모델에 4.1장에서 구한 커패시

턴스 값을 이용하여 외부회로를 구성한 후 FEM해석한 결과는 그림 5, 그림 6, 그림 7과 같다.

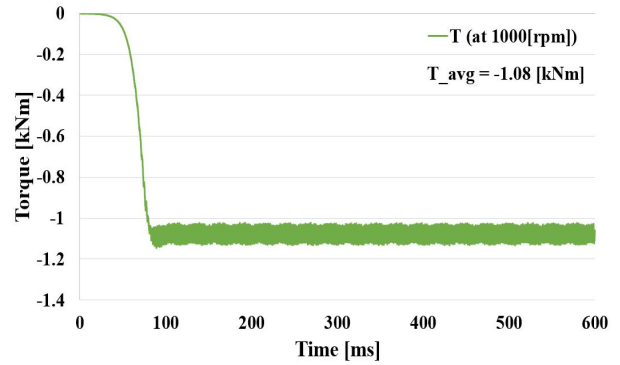


Fig. 5. Torque at 1000rpm

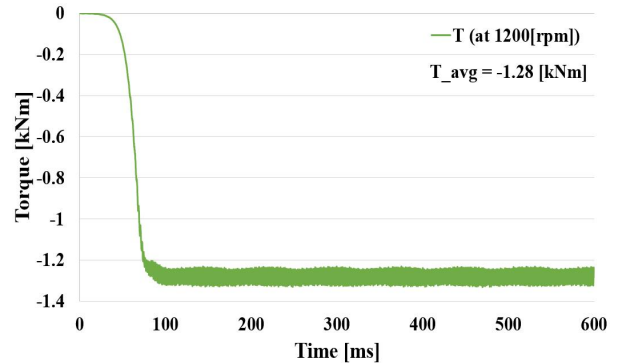


Fig. 6. Torque at 1200rpm

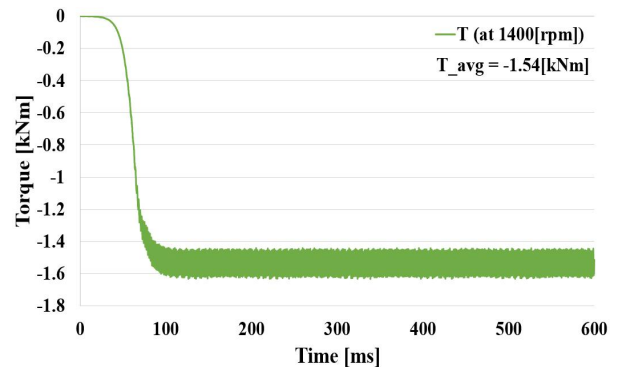


Fig. 7. Torque at 1400rpm

위 그래프 결과에서 알 수 있다시피 커패시턴스가 적절하게 선정이 되어 제동토크가 정상상태에서 수렴함을 알 수 있다.

### 5. 3D 시뮬레이션 및 제작성능평가

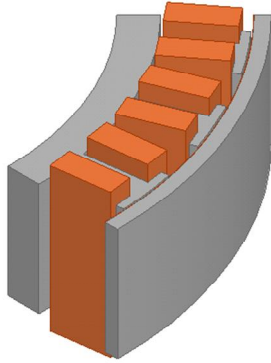


Fig. 8. 3D model of the self excited eddy current brake

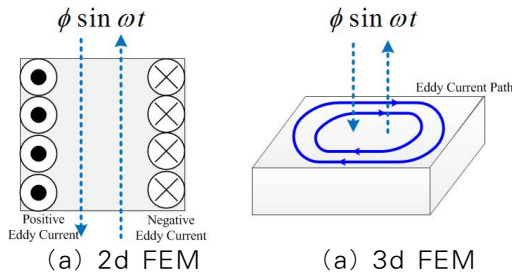


Fig. 9. Eddy current path of 2D and 3D

2차원 시뮬레이션 결과를 토대로 부스팅이 됨을 확인한 후에 3차원 유한요소 해석을 수행하였다. 그림 8은 3차원 유한요소 해석모델을 나타낸다. 3차원 유한요소 해석을 수행하는 이유는 자여자 와전류 브레이크의 특성상 유도전동기와 달리 엔드링이 없고 드럼만 존재하기 때문이다. 드럼만 존재하게 되면 2차원 해석시에는 그림 9 (a)와 같은 와전류 패스만 형성되게 되기 때문에 실제 출력에 영향을 미치게 된다. 따라서 그림 9 (b)와 같은 와전류 패스를 형성하기 위해 3차원 전자계 유한요소 해석을 수행하였다.

3차원 전자계 유한요소 해석은 해석시간이 2차원 해석시간에 비해 약 1달간의 해석시간이 소요되므로 제작모델의 1포인트에서만 해석을 하는 것으로 정하였다. 그림 10은 1200rpm에서의 토크파형이다. 제동토크는 수렴된 토크파형을 기준으로 약 589Nm을 나타내고 있는데 위와 같은 결과는 앞서도 언급했던 드

럼의 와전류 패스에 의해 제동토크가 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

위와 같은 사실을 토대로 제작을 통한 시험평가를 수행하였다. 제작된 모델의 형상은 그림 11과 같다. 특히 드럼의 경우에는 냉각을 위한 최외각에 핀을 설치하였고 중간에 원형 홈을 만들었다.

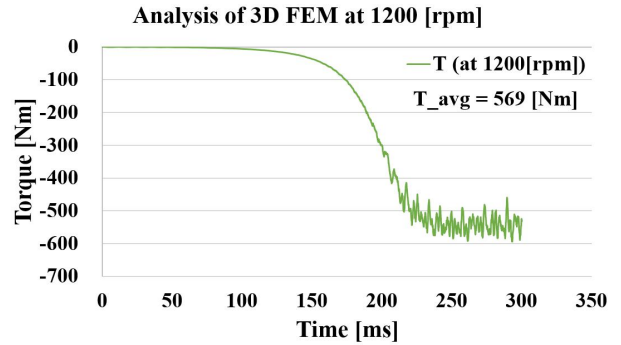


Fig. 10. Torque of 3D analysis at 1200rpm



(a)



(b)

Fig. 11. Production model of self excited eddy current brake

그림 12는 자여자 와전류 브레이크의 1200rpm에서의 시험결과를 나타낸다. 시험조건은 초기속도 0rpm에서 1200rpm을 약 0.5초간 인가하여 제동토크의 파형을 관찰하였다. 3차원 해석과의 비교는 온도에 따른 도전을 변화에 의해 토크가 감소하므로 초기 제동토크 값을 기준으로 비교하였다. 비교결과 표 2와 같은 결과를 얻었으며 예상한대로 2차원 해석보다는 와전류 패스를 고려할 수 있는 3차원 해석이 정확한 값을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

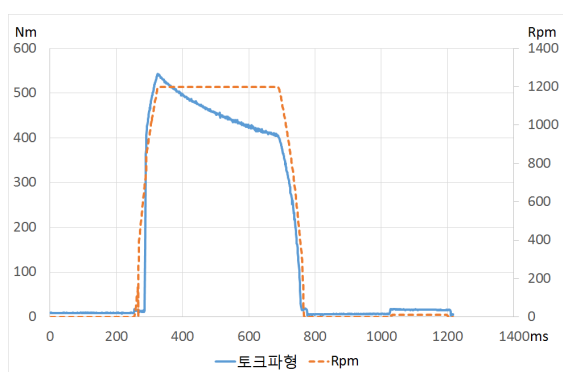


Fig. 12. Test result of the self excited eddy current brake

Table 2. Comparison of analysis and experimental value at 1200rpm

모델	rpm	Torque (Nm)	상전압 (Vrms)
2d해석	1200rpm	1281	567
3d 해석		569	506
시험치		542	488

## 5. 결 론

자여자 와전류 브레이크는 기존의 와전류 브레이크의 단점을 보완하기 위한 것으로써, 이는 전동차의 휠에 직접 연결되어 휠의 회전력에 의해 제동토크가 발생하기 때문에 에너지 절감에 기여할 수 있고, 크기도 작다는 장점을 가지고 있다. 그리고 자여자 와전류 브레이크를 설계함에 있어서 인덕턴스와 저항 값이 온도와 형상 등에 따라 변하기 때문에 파라미터 변동을

잘 분석하여야 하고, 이에 따라 적절한 커패시턴스를 산정하는 것이 중요하다. 이 논문에서는 기동시 파라미터 값만 고려하여 설계를 하였는데, 추후에는 포화시 파라미터 변동에 따른 값을 분석하여 좀 더 정확한 자여자 와전류 브레이크를 설계할 예정이다. 또한 3차원 해석이 정확한 결과를 도출하지만 해석시간이 오래 걸리므로 2차원해석에서의 보정방법을 통한 해석 방법도 추가적으로 연구해 봐야 할 것이다.

본 논문은 한국에너지기술평가원에서 주관하는 에너지 기술개발사업 “그린상용차용 전기식 회생 보조 브레이크 시스템 개발” 과제의 성과물로써 관계자 여러분께 감사드립니다.(과제번호 : 2013T100200023)

## References

- [1] Tae-Chul Jeong, Mi-Jung Kim, Ki-Deok Lee, Jae-Jun Lee, Jung-Ho Han, Seung-Joo Kim, and Ju Lee, “Eddy Current Brake performance improvement and analysis for commercial vehicle auxiliary brake application,” KIEE, Summer academic conference, July 2013.
- [2] S. Sharif, J. Faiz, K. Sharif, “Performance analysis of a cylindrical eddy current brake”, IET (Electric Power Applications), Vol. 6, No.12, pp.661-668, 2012.
- [3] Dawit Seyoum, “The dynamic analysis and control of a self-excited induction generator driven by a wind turbine.”, A thesis submitted to The University of New South Wales for the Degree of Doctor of Philosophy, School of Electrical Engineering and Telecommunications March, 2003.
- [4] SM. H. Haque, Ali I. Maswood, “Determination of Excitation Capacitance of a Three-Phase Self-Excited Induction Generator”, Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 2012.
- [5] A.Chatterjee, K.Roy and D.Chatterjee, “Performance Evaluation of Single Phase Self Excited Wind Generator using Three Phase Machine”, Automation, Control, Energy and Systems (ACES), 2014.
- [6] N.H. Malik and A.A. Mazi, “Capacitor requirements for isolated self excited induction generators”, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 2, No. 1, pp. 62-68, 1987.
- [7] A.M. Eltamaly, “New formula to determine the minimum capacitance required for self-excited induction generator”, Proc. of the IEEE 23rd Power Electronics Specialist Conference, Vol. 1, pp. 106-110, 2002.

◇ 저자소개 ◇



**정태철 (鄭太喆)**

1985년 3월 15일생. 2010년 한밭대 전기공학과 졸업. 2012년 한양대 전기공학과 석사졸업. 2013년~현재 동대학원 박사과정.



**조수영 (趙修映)**

1991년 5월 17일생. 2013년 명지대 전기공학과 졸업. 2013년~현재 한양대 전기공학과 석박통합과정.



**안한웅 (安漢雄)**

1986년 6월 21일생. 2010년 한양대 전기공학과 졸업. 2010년~현재 동대학원 석박통합과정.



**정거철 (鄭巨喆)**

1987년 3월 21일생. 2012년 한밭대 전기공학과 졸업. 2012년 10월~2013년 8월 한국철도기술연구원 위촉 연구원. 2015년 한양대 전기공학과 석사졸업. 2015년~현재 동대학원 박사과정.



**박응석 (朴應錫)**

1954년 2월 22일생. 1973~1999년 철도청 (전기주사). 1999년~현재 (주)디투엔지니어링 사장. 2004년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2012년 한양대학교 공학대학원 철도시스템공학과 졸업(석사). 2013년~현재 한양대학교 대학원 전기공학과 박사과정.



**조현태 (趙顯泰)**

1983년 10월 3일생. 2009년 경북대 전자공학과 졸업. 2012년~현재 상신브레이크 근무.



**이 주 (李 柱)**

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 System 정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국철도 기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 전기생체공학부 교수.