

제련설비용 대전류 동 Bus Bar의 온도해석

(Analysis of High Current Copper Bus Bar Temperature in Smelting Plants)

곽병길* · 김창환 · 최병주 · 김규호 · 이상봉**

(Byung-Kil Kwak · Changl-Hwan Kim · Byung-Ju Choi · Kyu-Ho Kim · Sang-Bong Rhee)

Abstract

In electrolysis smelting plants that using high DC current, the bus bar is most important facility for delivering the high current. The copper made bus bar is widely used for various advantages as good electrical and thermal conductivity, resonable malleability, ductility, and not rust easily. However, when high current in copper bus bar, temperature rises and maximum allowable current capacity is restricted by temperature of bus bar. In this paper, we investigated temperature variation of copper bus bar by putting cooling water channel imposed to bus bar construction. For the validity, various simulations were carried out.

Key Words : Bus-Bar, Allowable Current, Temperature, Cooling Water

1. 서 론

비철금속을 생산하는 제련설비에서 버스바(bus bar)는 직류의 대 전류를 전달하는데 사용된다. 전류의 크기가 비철 금속의 생산량에 중요한 요소이므로 전도성이 높은 동이 버스바 재료로 가장 많이 사용된다. 고순도의 재질로 용해, 압출, 압연, 인발 가공된 동 버스바는 전기 및 열적 전도성, 연성, 내 화학성, 기계

적 물성이 우수해 사용 시 결함이 없고 대 전류를 가장 효율적으로 공급해 줄 수 있기 때문에 수·배전반, 배전기류, 스위치류, 송·배전설비, 기타 산업용소재로 널리 사용되고 있다[1].

제련설비에 사용되는 버스바는 도체가 허용하는 온도 상승시 허용전류도 증가하지만 반대로 장시간 버스바에 대 전류가 흐르는 경우 그만큼 많은 열이 발생하고 이에 따라 도체의 열에 따른 저항이 증가하게 되어 결국 전류의 흐름을 방해하는 요인이 된다. 즉 열에 의한 도체의 저항값 증가는 도체의 허용 전류량을 감소시키며 전류량에 의해 생산량이 결정되는 비철금속 제조의 전기분해 제련공정에서는 이러한 열을 감소시키고자 다양한 냉각 방법이 사용되고 있다[2-6].

버스바의 온도를 낮추기 위한 여러 가지 방안 중 대표적인 것은 강제 냉각을 이용하는 것으로 도체 내 냉각수로를 구성하고 냉각수를 이용해 온도를 낮추는

* 주저자 : 영남대학교 전기공학과 학부과정
** 교신저자 : 영남대학교 전기공학과 교수
* Main author : Dept. of Electrical Engineering at Yeungnam Univ. Undergraduate Course
** Corresponding author : Dept. of Electrical Engineering at Yeungnam Univ. Professor
Tel : 053-810-3097, Fax : 053-810-4767
E-mail : byungkil@ynu.ac.kr
접수일자 : 2014년 7월 7일
1차심사 : 2014년 7월 10일, 2차심사 : 2014년 9월 16일
심사완료 : 2014년 9월 22일

방법이다. 이 방법은 외부온도 조건, 냉각수 온도, 그리고 유속 등에 따라 그 영향이 틀려지게 되어 이에 대한 정확한 분석이 필요한 실정이다.

본 논문에서는 동도체 버스바에 대 전류를 흘렸을 때 발생하는 열과 이 발생된 열을 줄이기 위해 냉각수로에 흘려준 냉각수의 온도변화를 이론적으로 분석하였으며 시뮬레이션 프로그램(ANSYS)의 2-Way 방식을 이용해 냉각수 유속에 따라 동 버스바의 온도변화를 비교 확인하였다.

2. 도체의 허용전류

2.1 버스바 재료 특성

본 논문에는 버스바 도체로 동을 적용하였고 냉각매체로는 물을 선정하였다. 동과 물의 주요 특성 값은 표 1에 나타내었으며 이를 이용해 해석하였다.

표 1. 물과 구리의 특성 값
Table 1. properties of copper and water

Material	Property	Value
Copper	Density $\rho[\text{kg}/\text{m}^3]$	8978
	Specific Heat $C_p[\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}]$	381
	Thermal Conductivity $k[\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$	387.6
Water	Molecular Weight $M[\text{kg}/\text{kgmol}]$	18.0152
	Specific Heat $C_p[\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}]$	4182
	Thermal Conductivity $k[\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$	0.6
	Viscosity $\mu[\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}]$	0.001

상온인 20°C에서 구리의 고유 저항률은 1.724 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 이고 온도계수는 0.00433°C⁻¹이므로 특정 온도 T에서의 도체 저항률 ρ_T 는 식 (1)과 같다[5].

$$\rho_T = 1.724 \times (1 + 0.00433 \times (T - 20)) \quad (1)$$

여기서 ρ 의 단위는 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 이고, T는 °C이다.

2.2 허용전류 계산

버스바 도체의 허용전류량은 도체의 열 저항에 관계되며 푸리에의 법칙을 사용해 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다[7-8].

$$E_{heat} = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = -\sigma S \frac{\Delta T}{\Delta x} = -\sigma S \frac{\Delta T}{L} \quad (2)$$

$$= \frac{\Delta T}{R_{th}}$$

여기서

E_{heat} : 열량 Q의 미분치 열에너지

σ : 고유저항 ρ 의 역수인 전기전도도

열량에 따른 열에너지를 열 저항에 관한 식으로 정리하면 식 (3)과 같다.

$$R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{E_{heat}} \quad (3)$$

도체의 허용 전류를 구하기 위해서는 도체에서의 열 손실을 저항에 의한 전력손실(I^2R)로 등가화 하여 계산한다. 이때 열손실은 열전달에 관한 전도(conduction), 대류(convection), 복사(radiation)의 합으로 구성된다. 이 중 전도는 이중 물체간의 heat sink에 관계된 것으로 단독 도체에서의 허용전류 계산에서는 무시한다.

대류에 관해 본 논문에선 자연 대류를 적용하였으며 Newton's law of cooling (뉴턴의 냉각법칙)에 의해 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{conv} = hA(T - T_0) \quad (4)$$

여기서 P_{conv} 의 단위는 W이며 A는 대류 열전달이 발생하는 면적 cm^2 , T는 물체의 표면 온도 °C, T_0 는

주위 온도 $^{\circ}\text{C}$ 이다. h 는 대류 열 전달계수 $\text{W}/\text{cm}^2\text{C}$ 로 식 (5)와 같다.

$$h = \frac{0.005 \times ((T - T_0)/100)^{0.25}}{6.4516} \quad (5)$$

복사는 Stefan-Boltzmann's law(스테판-볼츠만 법칙)에 따라 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{rad} = \epsilon \sigma A (T^4 - T_0^4) \quad (6)$$

P_{rad} 의 단위는 W 이며 σ 는 스테판-볼츠만 상수로 $5.67 \times 10^{-12} \text{W}/\text{cm}^2\text{K}^4$, ϵ 는 방사율(emissivity)이며 $0 \leq \epsilon \leq 1$ 의 값을 갖는다. 대류 및 복사를 이용해 도체의 허용전류는 식 (7)과 같이 계산된다.

$$I^2 R = P_{rad} + P_{conv}, I = \sqrt{\frac{P_{rad} + P_{conv}}{R}} A \quad (7)$$

냉각수가 사용되어 도체의 온도를 가감하는 경우에는 버스바와 물 사이의 온도 차이를 계산하여 최종 도체의 온도로 산정하여야 하며 식 (8)을 이용해 계산한다.

$$T_{w-b} = 116.4 \times 10^{-3} \times TF \times ((D/(\text{gal}/\text{min}))^{0.8} \times P \quad (8)$$

여기서

T_{w-b} : 버스바와 물의 온도차이($^{\circ}\text{C}$)

TF 는 : Temp. Factor, D : 냉각수관 지름(cm)

P : cm 당 버스바의 전체 열 발생량(W/cm)

3. ANSYS 시뮬레이션 방법

도체의 냉각수 사용 시 온도변화를 분석하기 위해 상용해석 프로그램인 ANSYS를 이용해 영향을 확인하였다.

3.1 Bus bar 모델링

해석을 위해 우선 도체의 모델링과 정확한 해석을

위한 메쉬 분할이 필요하며 이를 위해 그림 1, 2와 같이 모델링된 도체를 사용하였다.

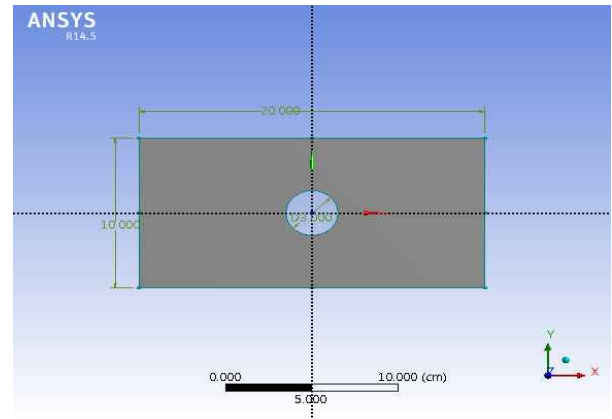


그림 1. 버스바 기본 모델링
Fig. 1. Basic modeling of bus bar

버스바의 재질은 구리(Copper)이고 냉각수로는 물을 사용하였다. 도체 및 냉각매질의 해석에 필요한 물성은 표 2와 같은 값을 사용하여 모의하였다.

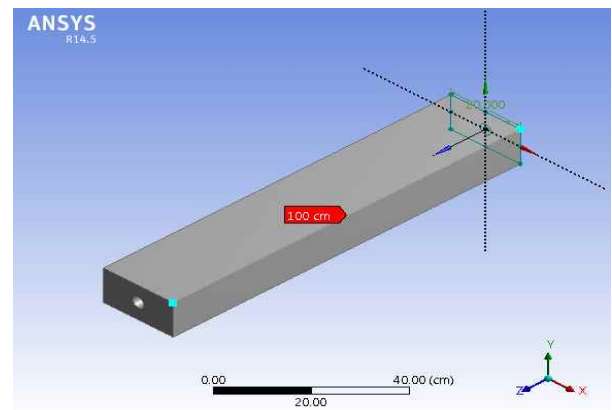


그림 2. 버스바의 3D 모델링
Fig. 2. 3D modeling of bus Bar

표 2. 버스바 도체규격
Table 2. Spec. of Conductor

파라미터	크기
가로×세로(cm^2)	20×10
전체 길이(cm)	100
냉각수로 지름(cm)	3

3.2 시뮬레이션 설정

전기뿐만 아니라 열, 유동 해석을 ANSYS에서 실행하기 위해서는 electric-thermal-fluent 의 순차적인 해석이 필요하다[9].

프로그램에서 electric-thermal-fluent 세 가지 해석이 동시에 연동되지 않기 때문에 electric-thermal 해석을 한 뒤 그 결과 값을 fluent 해석을 통해 최종적으로 버스바의 온도를 계산한다. 먼저 electric 해석에서 전류 값을 인가한 뒤 thermal 해석에서 steady-state thermal 해석을 이용한다. 버스바에 포함되는 열전달은 전도, 대류, 복사 모두 고려되었고 대류계산은 프로그램 내에 설정되어 있는 자연대류(free convection)를 사용하였다. 복사는 대류와 같은 면적이고 주위 온도, 메쉬 크기의 범위, fluent 해석에서 냉각수의 초기 온도, viscous model의 값을 표 3에 자세히 나타내었다.

표 3. 시뮬레이션 파라미터
Table 3. Simulation Parameter

파라미터	값
전류 (A)	10,000
자연 대류 ($W/m^2\text{C}$)	5
방사율 (ϵ)	0.1
주위 온도 ($^{\circ}\text{C}$)	25
냉각수 초기 온도 ($^{\circ}\text{C}$)	20
Mesh Size(nodes)	20,000
Viscous Model	k-epsilon

전류가 흐르는 경우의 해석을 위해 버스바에 대 전류 통과 시 냉각수에 의한 냉각 효과를 확인하고 최종적으로 냉각수가 흐른 후 버스바의 온도 변화를 해석하고자 ANSYS의 2 way 방식으로 electric, steady-state-thermal, fluent 세 가지 해석을 coupling하여 시뮬레이션 하였다.

먼저 냉각수가 없을 때 electric과 steady-state thermal 해석으로 온도를 해석한 후 fluent 해석을 통해 버스바에 일정한 속도의 냉각수를 흘려준 다음 최종적인 버스바의 온도변화를 파악한다. 해석을 위한 순서도는 그림 3과 같다.

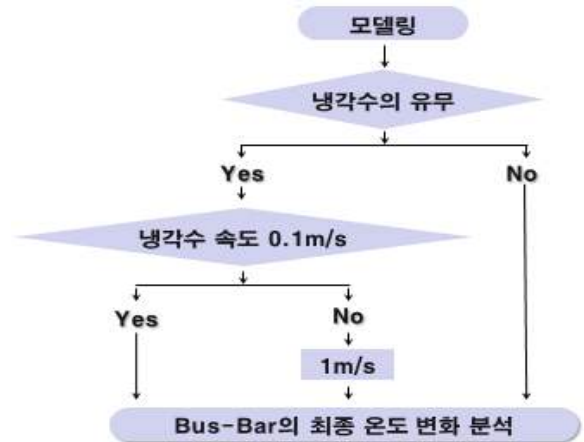


그림 3. 시뮬레이션 순서도
Fig. 3. Diagram of simulation

냉각수의 속도에 의해서도 온도 변화가 다르게 나타나는데 본 연구에서는 냉각수 유속을 0.5m/s일 때와 1m/s를 비교하였다.

3.3 시뮬레이션 결과

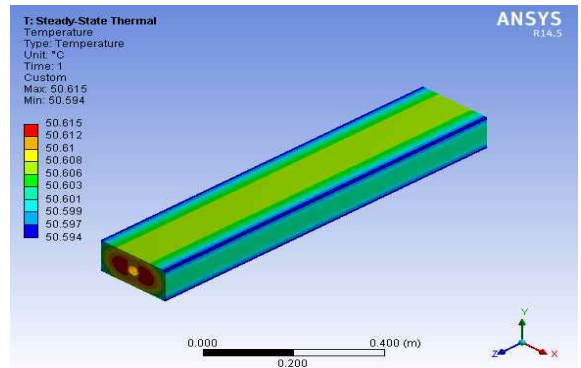


그림 4. 냉각수 없는 경우 버스바의 온도분포
Fig. 4. Temp. of bus bar without cooling

그림 4는 상온에서의 냉각수 주입 전 버스바에 10,000A의 전류를 인가하였을 때 나타나는 온도분포를 나타낸다. 냉각수로 내부는 냉각수가 흐르기 전이므로 공기(still air)로 채워져 있고 버스바의 끝면도 마찬가지로 공기로 둘러싸여 있다. 전류 흐름에 의한 열 발생으로 도체의 최고온도는 50.615 $^{\circ}\text{C}$ 이고 최저온도는 50.594 $^{\circ}\text{C}$ 로 온도 차이가 0.021 $^{\circ}\text{C}$ 로 거의 차이가

제련설비용 대전류 동 Bus Bar의 온도해석

없다는 것을 확인할 수 있다.

ANSYS 결과를 검증하기 위해 앞에서의 이론적 계산식을 적용하면, 주위온도 50.6°C에서의 ρ 는 식 (1)에 의해

$$\rho = 1.724 \times (1 + 0.00433 \times (50.6 - 20)) \approx 1.95 \mu\Omega \cdot cm$$

이며, 단면적은

$$200 cm^2 - \frac{\pi \times 3^2}{4} cm^2 \approx 193 cm^2$$

이므로 cm당 저항은

$$R_{cm} = \frac{1.95}{193} \approx 0.01 \mu\Omega/cm$$

이다. 전류는 10,000A이므로 전체 열 발생량은

$$P = I^2 R = 10000^2 \times 0.01 \times 10^{-6} = 1 W/cm$$

이다. 본 논문의 버스바의 경우 복사과 대류에 의한 열 전달 면적이 $2(10+20) = 60 [cm]$ 로 같고 방사율 $\epsilon = 0.1$ 로 설정하였으므로 복사에 의한 열 손실은 식 (5)에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{rad} = 0.1 \times 60 \times 5.668 \times 10^{-12} \times ((50.6 + K)^4 - (25 + K)^4) \approx 0.11 W/cm$$

여기서 K 는 켈빈온도로 273.15°C이다. h 는 식(4)에 의해 다음과 같은 식으로 구할 수 있고

$$h = \frac{0.005 \times ((50.6 - 25)/100)^{0.25}}{6.4516} \approx 5.513 \times 10^{-4}$$

그러므로 대류에 의한 열 손실은

$$P_{conv} = 5.513 \times 10^{-4} \times 60 \times (50.6 - 25) \approx 0.85 W/cm$$

따라서 전체 열 손실과 전체 열 발생량을 비교하면

$$P \approx P_{rad} + P_{conv}$$

이므로 근사적으로 일치한다고 볼 수 있다.

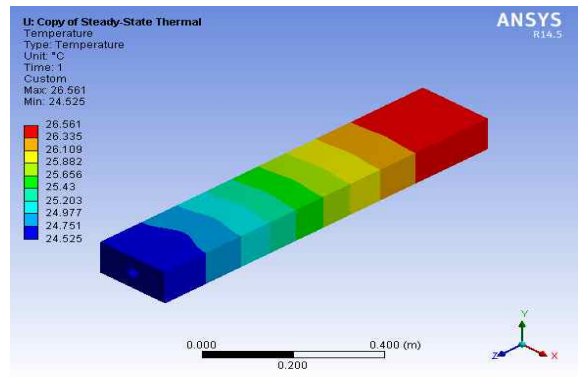


그림 5. 냉각수 주입 시 온도 분포(0.1m/s)
Fig. 5. Temp. with cooling water(0.1m/s)

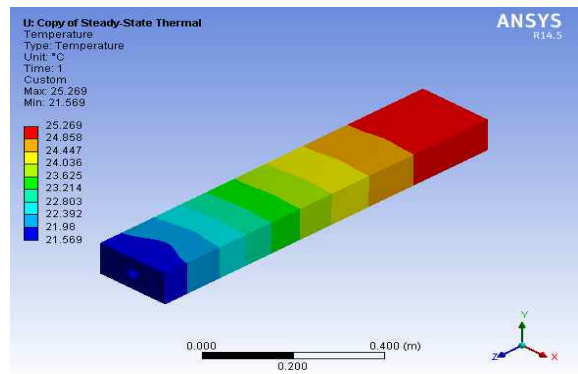


그림 6. 냉각수 주입 시 온도 분포(1m/s)
Fig. 6. Temp. with cooling water(1m/s)

그림 5, 6은 각각 냉각수를 사용하였을 때의 결과이다. 냉각수의 유속 0.1m/s, 1m/s일 때의 버스바 온도 분포 결과이며 냉각수 속도가 0.1m/s에서 최고온도는 26.561°C, 최저온도는 24.525°C로 확인되었다. 냉각수 유속이 1m/s인 경우에 최고 온도는 25.269°C, 최저온

도는 21.569°C로 나타났다. 냉각수가 없을 때의 경우와 비교하면 약 28°C의 온도가 낮아졌으며 이를 통해 도체의 허용 전류는 증가됨을 예상할 수 있다.

그림 5의 버스바에서 온도가 약 25.5°C 발생하였는데 이를 이론적으로 살펴보면 25.5°C에서의 ρ 는 식 (1)에 의해

$$\begin{aligned} \rho &= 1.724 \times (1 + 0.00433 \times (25.5 - 20)) \\ &\approx 1.7651 \mu\Omega \cdot cm \end{aligned}$$

이며, 단면적은 위에서와 같이 193cm²이다. 그러므로 전체 저항은 다음과 같다.

$$R_{th} = \frac{1.7651}{193} \times 100 \approx 0.9146 \mu\Omega$$

전체 열 발생량은

$$P = I^2 R_{th} = 10000^2 \times 0.9146 \mu = 91.46 W$$

혹은 $P = 0.9146 W/cm$ 로 나타낼 수 있다.

유속이 0.1m/s이므로 체적유량은 1.1204gal/min (0.0707liter/s)이고 유량의 주입구 부분과 출입구 물 온도 사이의 열 손실은 $4186 \times 0.0707 = 296 W/^\circ C$ 이다. 그러므로 주입구와 출구 사이의 온도증가는 $91.46/296 \approx 0.3^\circ C$ 이다. 냉각수 출구에서 나오는 물의 온도는 $0.3 + 20 = 20.3^\circ C$ 이고 TF는 20.3°C에서 6.89의 값을 갖는다. 식 (8)을 이용해 최종적인 버스바와 물의 온도 차이는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_{w-b} &= 116.4 \times 10^{-3} \times 6.89 \\ &\times ((3/(1.1204)))^{0.8} \times 0.9146 \\ &= 1.6129^\circ C \end{aligned}$$

그러므로 버스바의 최종온도는

$$25 + 0.3 + 1.6 = 26.9^\circ C$$

이다. 이는 시뮬레이션 결과인 25.5°C와 근사적으로 일치한다고 볼 수 있다.

그림 6의 결과도 같은 방법으로 계산한 결과 25.28°C로 버스바 온도 약 24°C와 근사적으로 일치한다고 볼 수 있다. 표 4는 냉각수 유/무 및 유속에 따른 온도 변화 결과이다.

표 4. 버스바의 최종온도
Table 4. Final temperature of bus bar

온도 \ 냉각수	냉각수 무	0.1m/s	1m/s
Min. Temp(°C)	50.594	24.252	21.569
Max. Temp(°C)	50.615	26.561	25.269

4. 결 론

본 논문에서는 동 버스바에 전류를 흘렸을 때 발생하는 열과 냉각수로를 통한 냉각수 사용으로 버스바의 온도 감소효과 분석하였다. 냉각수의 사용으로 온도가 더욱 감소하고 이를 통해 도체의 허용전류는 상승함과 사용되는 냉각수의 유속이 낮을수록 온도감소 효과가 커짐을 확인할 수 있었는데 이는 낮은 유속의 냉각수가 결국 유입되는 냉각수의 양을 결정하여 냉각에 더 효율적임을 확인하였다.

향후 최적의 냉각수 유속 및 형상에 대한 최적 설계 기법의 적용으로 제련설비용 버스바에 대한 형상구조에 관한 추후 연구가 필요할 것으로 사료된다.

References

- [1] H. H. Kwon, J. R. Lee, "Die Design of Drawing for the Copper Bus-bar", Journal of KSMTE, Vol.11 No.4, pp. 82-88, 2002.
- [2] Zeng Linsuo, Wang Maojun, "The Design and Realization of on-line Measuring Device of Busbar Temperature Rise for HV Switch Board", Power System Technology, 2006, Page(s): 1-5.
- [3] HK. Kim, YH. Oh, SH. Lee, "Prediction of temperature rise in gas insulated busbar using multi-physics analysis", Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, 2009, Page(s): 1-4.
- [4] Yifeng Zhu, Qiongquan Ge, Lu Zhao, "Research of temperature rise on IGBT module and DC busbar for a

single-phase PWM rectifier”, Electrical Machines and Systems, 2012, Page(s): 1-4.

[5] J. Hus, “Estimating busbar temperatures”, IEEE Trans. Industry Applications, vol. 26, pp. 926-934, Sep./Oct. 1990.

[6] Publication No. 22, Copper For Busbars. Copper Development Association, Potters Bar, Hers, Great Britain, revised 1984.

[7] INCROPERA, F.P., DEWITT, D.P., BERGMAN, T.L., LAVINE, A.S., (2006), “Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley and Sons.

[8] L. Low, formerly with PPG industries, Pittsburgh, PA, 1979, private communication.

[9] J. K. Kim, Y. H. Oh, J. Y. Lee, S. C. Hahn, “Temperature Rise Prediction of GIS Bus Bar Considering Thermal Flow”, Journal of KIEE, Vol.58 No.4, pp. 742-747, 2009.

◇ 저자소개 ◇



곽병길(郭棟吉)

2009년 영남대학교 전기공학과 학사과정.
2015년 동 대학원 전기공학과 입학예정.



김창환(金蒼煥)

2013년 영남대학교 전기공학과 졸업.
2013년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



최병주(崔炳柱)

1981년 영남대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 Kyushu대학 대학원 공학연구과 졸업(박사). 1982~1986년 현대중전기(주)기술연구소 연구원. 1986~1997년 한국전기연구원 선임연구원. 1997~2009년 서라벌대학교 고속전기철도과 부교수. 2014년~현재 영남대학교 전기공학과 조교수.



김규호(金圭浩)

1988년 2월 한양대 전기공학과 졸업. 1990년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년 3월 안산공과대학 전기과 부교수. 2008년 9월~현재 국립환경대학교 전기공학과 부교수.



이상봉(李相奉)

1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2012년~현재 영남대학교 전기공학과 조교수.