

구리 안정화재가 있는 YBCO 박막형 초전도 선재의 과전류 통전 특성

Over-current characteristics of YBCO coated conductors having Cu stabilizer

임성우^{1*}, 두호익², 김혜림¹, 현옥배¹, 손송호¹, 임지현¹, 황시돌¹, 오성용³, 한병성²

S. W. Yim^{1*}, H. I. Du², H. R. Kim¹, O. B. Hyun¹, S. H. Sohn¹, J. H. Lim¹, S. D. Hwang¹, S. Y. Oh³, B. S. Han²

Abstract: Differently from BSCCO tapes which are fabricated by powder-in-tube method, the coated conductors are made by the evaporation of YBCO on metal substrate. Due to this structural merit, although the coated conductors are generally used for large current transportation, they are expected to be favorable to the purpose of the fault current limitation as well. In this study, using YBCO coated conductor having copper stabilizer formed by plating technique (produced by Superpower Co.), we investigated the over-current characteristics of the coated conductor. The coated conductors had 85 A I_c and 90 K T_c . The resistance of the conductor was 0.93 m Ω /cm at 300 K and 0.17 m Ω /cm at the temperature right above T_c . To the coated conductors, we applied the voltages of the range from 150 V_{rms} to 230 V_{rms} and measured the V-I curves using four probe method. From the results, we could analyze the electric behavior of the coated conductor in flux flow state. As the current exceed I_c , the currents were distributed into the superconductor and metal stabilizer. The amounts of the currents shared through both current paths were calculated under the assumption that the Joule heating was perfectly eliminated by LN₂ surrounding the conductor. Finally, the condition for the stable current flowing state which does not affect the conductor was established from the analysis on the over-current characteristics.

Key Words: YBCO coated conductor, over-current characteristics, current distribution, stable current flowing state.

1. 서 론

고가의 은 합금이 피복재로 사용되고 제조 공정이 복잡하여 생산 단가가 높은 BSCCO 초전도 선재를 대신하여 YBCO 초전도체와 금속 기판으로 구성되는 박막형 초전도 선재 (coated conductor)의 개발과 활용의

관심이 높아지고 있다. BSCCO 선재의 임계 특성이 BSCCO 상의 격자 방향성에 상당히 의존하고 초전도 상 생성의 메커니즘 또한 매우 복잡하여 선재의 특성 향상에 많은 어려움이 따르는 반면, YBCO 선재는 증착 공정을 통해서 금속 기판 위에 초전도상으로 형성될 수 있기 때문에 우수한 방향성을 얻을 수 있고 제작비용 절감 측면 뿐 아니라 임계 특성 향상의 관점에서 보아도 보다 유연하여 향후 기기 적용에 적절할 것으로 판단된다. 더불어, 두터운 은 합금 피복재 사용이 불가피한 BSCCO 선재와 달리, YBCO coated conductor는 피복재 두께 및 재질을 용도에 따라 달리 할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 특성은 coated conductor가 대전류 통전 용도 뿐만 아니라 한류용 초전도 재료로서도 활용할 수 있는 가능성을 제시하여 선재 응용의 폭을 넓힐 수 있는 중요한 요소가 된다 [1, 2]. 한편, BSCCO 선재에 대한 오랜 연구 결과를 바탕으로 기기 적용을 위한 특성 향상 및 평가 기술이 상당 부분 확보되어 있는 반면, coated conductor를 초전도 기기에 적용하기 위해서는 초전도 상태에서의 운전 특성 뿐만 아니라 정격 운용 범위를 벗어난 조건에서의 특성 변화에 대한 세부적인 연구 또한 반드시 필요하다고 할 수 있다 [3, 4]. 본 연구에서는 구리가 피복재로서 도금된 YBCO coated conductor에 대하여 정상 및 과도 상태에서의 통전 특성을 조사 분석하였다. 아울러 선재의 통전 및 한류 작용을 고려하여 그에 대한 안정 운전 조건을 제시하였다.

2. 실험 방법

본 실험에 사용된 선재는 미국 Superpower사에 제작한 coated conductor로서 표 1에 제시된 바와 같이 85 A의 임계전류, 90 K의 임계온도를 갖는다. 금속 기판 위에 YBCO 초전도체가 증착되었으며, 통전 시 안정성 향상을 위하여 은이 그 위에 피복된 형태로 제작되었다. 또한 안정화재로서 20 μ m의 구리가 도금되어 선재의 표면은 완전한 구리색을 띄는 형태이다.

Table 1. Physical properties of the coated conductor

Producer	Superpower
Stabilizer	Cu surround 20 μ m
Overlayer	Ag 2 μ m
Substrate	Hastelloy 50 μ m
I_c & T_c	85 A (1 μ W/cm, @ 77 K), 90 K

¹정 회 원 : 한전전력연구원 초전도그룹

²정 회 원 : 전북대학교 공과대학 전기공학과

³정 회 원 : 충북대학교 공과대학 신소재 공학부

*교신저자 : yimsw@kepri.re.kr

원고접수 : 2008년 01월 10일

심사완료 : 2008년 02월 19일

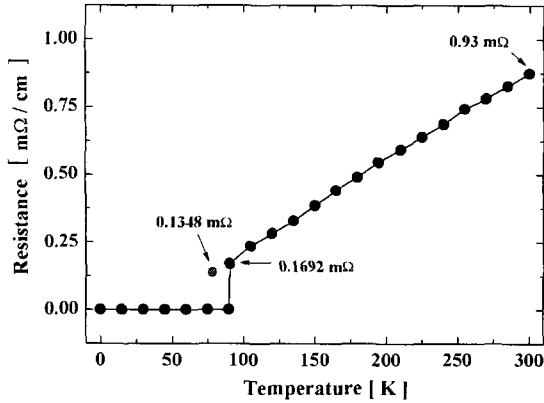


Fig. 1. Resistance variation as a function of temperature increase.

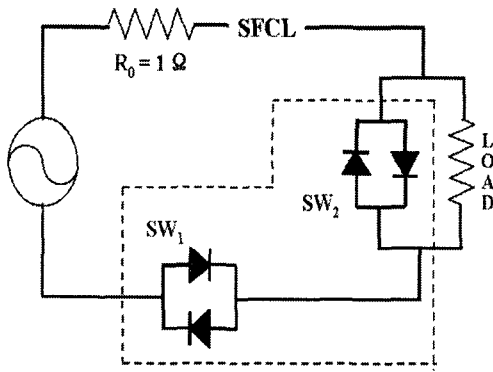


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental circuit.

한편, 온도에 따른 선재의 저항 변화를 측정하여 Fig. 1에 나타내었다. 임계온도인 90 K에서 0.1692 mΩ/cm가 측정되었으며 상온인 300 K에서 선재 저항은 0.93 mΩ/cm로 증가하였다. 아울러, 임계온도를 초과한 초전도체의 저항이 금속 안정화제의 저항보다 훨씬 크다는 것을 고려하면 Fig. 1로부터 금속 피복재의 저항 변화를 구할 수 있다. 그림에 제시된 바와 같이 피복재 저항이 온도에 따라 선형적으로 감소한다고 가정하였을 때, 77 K에서의 피복재 저항은 0.1348 mΩ/cm가 될 것으로 계산되었다. Fig. 2는 시험을 위해 구성된 회로의 개략도를 보여주고 있다. 10 V 단위로 조절할 수 있는 전압원을 사용하여 100 cm의 선재에 대해 설정된 전압을 인가하였으며, 4단자법을 이용하여 선재의 전압 신호를 검출하여 켄치 거동을 조사하였다. 특히, 인가 전류량을 조절하기 위해 1 Ω (R_0)의 저항을 회로 상에 투입하고 인가 전압 크기를 변화시키며 통전 전류량을 제어하였다. 본 실험에서 전류 인가 시간은 9.5 주기로 고정하였으며, Fig. 2에 표시된 위상 제어기를 통하여 크기를 조절하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 시험에 사용된 YBCO 박막형 선재에 170 V_{rms} 를 인가하였을 때, 전압-전류 변화 그리고 저항 변화를 나타내고 있다. 선재에 인가된 전류는 첫 주기에서 230 A_p에 이르고 있어 선재 임계전류의 약 3 배에 해당하는 양의 전류가 인가되고 있음을 알 수 있다. 그러나 발생한 저항에 의한 환류 작용은 거의 일어나

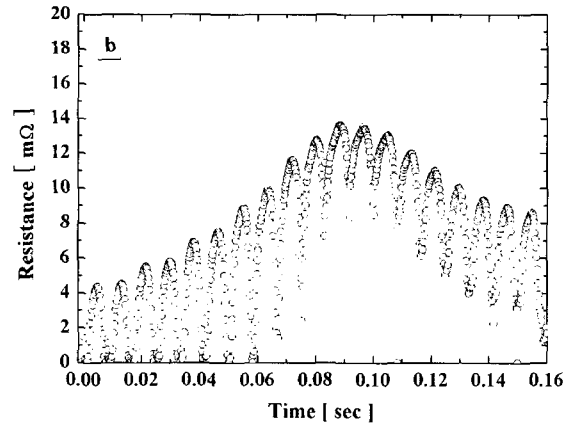
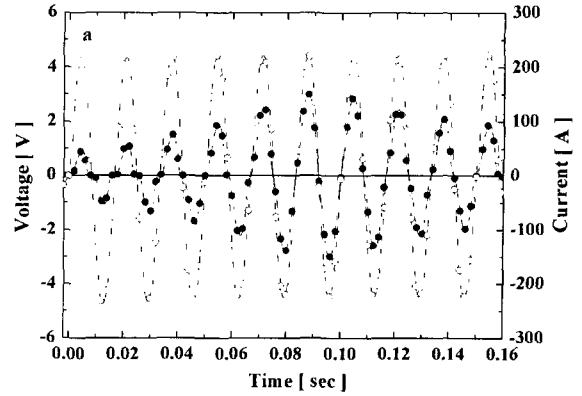


Fig. 3. (a) voltage-current and (b) resistance variation when 170 V_{rms} was applied.

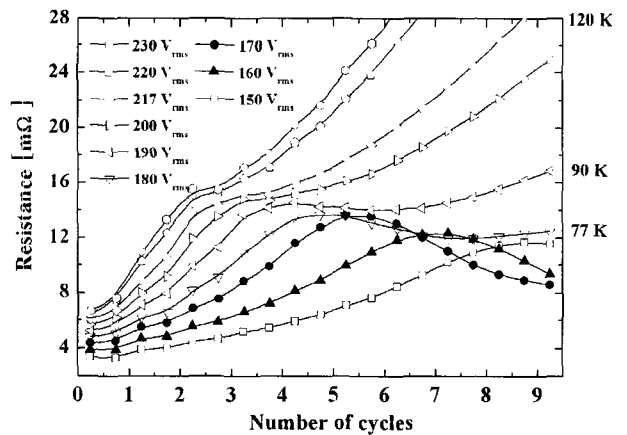


Fig. 4. Resistance increase with applied voltages and duration.

지 않고 있으며, Fig. 3(b)의 저항 변화 추이를 고려할 때, 선재는 여전히 플럭스 플로우 상태를 유지하고 있다고 판단된다. 이러한 변화를 좀 더 구체적으로 살펴 보기 위하여 인가 전압을 달리하여 켄치 거동을 조사 하였다. Fig. 4는 150 V_{rms} - 230 V_{rms} 까지 범위의 전압을 각각 10 V 단위로 증가시키며 인가하여 선재에서 검출된 저항 변화를 나타낸 결과이다. 결과로부터 190 V_{rms} 이하의 전압을 9.5 주기 동안 인가한 경우, 여전히 선재 온도가 여전히 임계온도를 초과하지 않고 있음을 알 수 있다. 그러나 200 V_{rms} 이상의 전압을 인가한 경우, 발생 저항은 급격히 증가하여 이에 의해 발생된 줄열은 6 주기 이내에 임계 온도를 초과하고 있음을 확인할 수 있다.

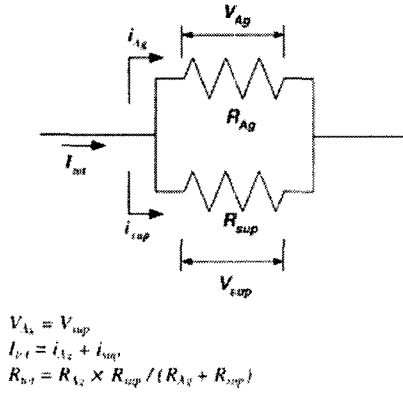


Fig. 5. Equivalent circuit and equation of superconducting wire.

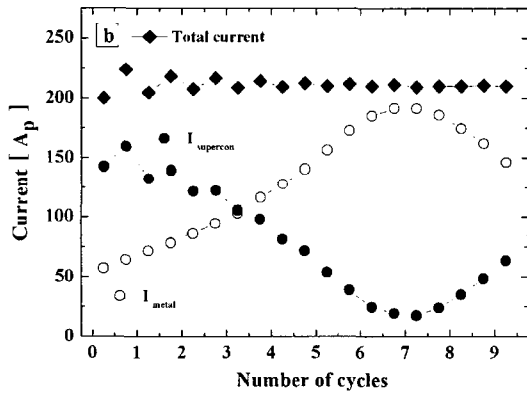
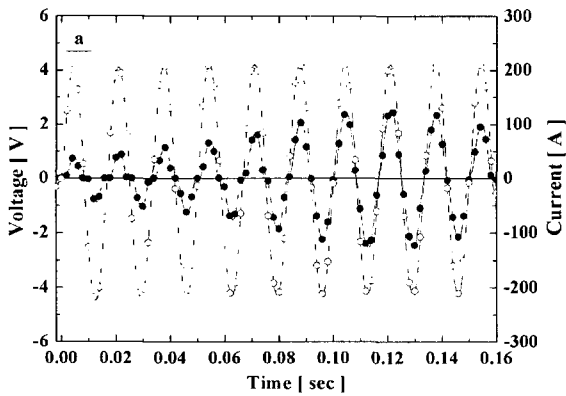


Fig. 6. (a) voltage-current variation and (b) current distribution between superconductor and metal stabilizer when 160 V_{rms} was applied.

특히, 160 V_{rms} - 180 V_{rms} 영역의 저항은 초기 증가 후 감소하는 경향을 나타내어 선재는 여전히 플럭스 플로우 상태를 유지하고 있다고 판단된다. 플럭스 플로우 상태에서는 선재의 초전도체에서 저항이 발생하기 시작하므로 인가 전류는 금속 안정화재를 통하여 일부 우회하여 통전하게 되므로 초전도체와 안정화재 간에 전류 분류 현상이 발생한다. 이러한 경우, 초전도체와 안정화재 간의 전기적 관계는 Fig. 5에 제시된 바와 같은 등가 회로로 표현할 수 있다. 특히, Fig. 4로부터 확인되는 바와 같이 선재에 160 V_{rms} 이하의 전류를 인가한 경우, 발생 저항은 13.48 Ω (77 K에서의 안정화재 저항)을 초과하지 않고 있음을 알 수 있다.

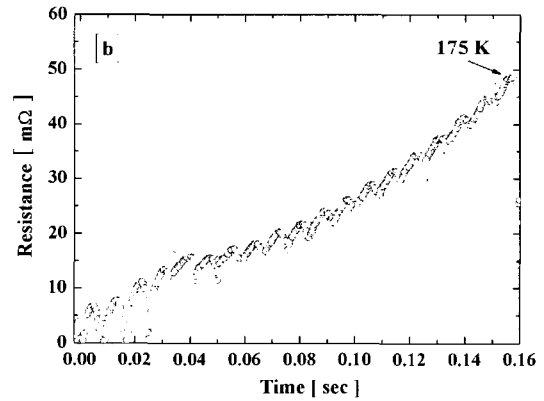
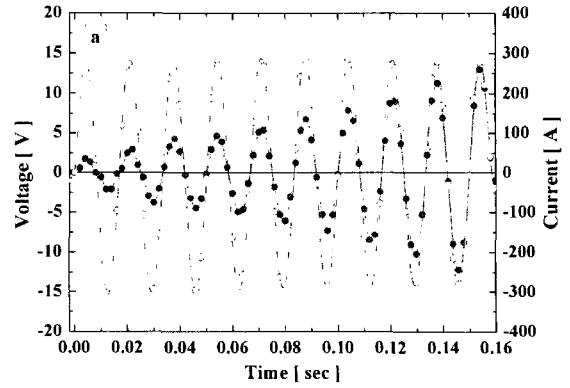


Fig. 7. (a) voltage-current and (b) resistance variation when 230 V_{rms} was applied.

이러한 경우, 플럭스 플로우 상태의 초전도체에서 발생한 줄열이 주변의 액체질소에 의하여 완전히 냉각되어서 선재 전체의 온도 변화가 없다고 가정할 수 있다. 이러한 가정이 성립한다면, 초전도체를 둘러싸고 있는 안정화재의 저항 변화는 없으며 이에 따라 Fig. 5에 제시된 등가 회로에 의하여 초전도체-안정화재 간 전류분류량을 계산할 수 있다. 이러한 개념을 바탕으로 인가 전류가 초전도체와 안정화재 간에 분류되는 현상을 설명하기 위하여, Fig. 6에 160 V_{rms}가 인가된 경우에 대한 전류 분류 결과를 제시하였다. Fig. 6으로부터 전체 인가된 전류에 대하여 초전도체로 통전되는 전류량과 피복재로 분류되는 전류량의 변화를 확인할 수 있다. 전류 인가 초기에 초전도체의 저항이 증가하므로 전체 통전 전류량도 다소 변화하고 있는 것으로 판단된다. 시간이 경과함에 따라 저항 증가에 기인하여 초전도체를 통하여 흐르는 전류량은 점차 감소하고 있으며 안정화재로 분류되고 있다. 특히, 4 주기가 경과했을 때, 초전도체를 통전하는 전류는 선재의 정상 상태의 임계전류인 85 A 이하로 적어지고 있으며, 7 주기 경과 후 다시 증가하는 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 초전도체의 온도가 발생한 줄열만큼 높아져서 임계전류 또한 작아졌지만 일시적인 초전도성 회복 현상이 나타나고 있는 것으로 판단된다. 그러나 과전류 인가가 계속 지속되거나 그 크기가 커진다면 줄열이 축적되어 선재 저항은 급격히 증가할 것임을 예상할 수 있다. Fig. 7은 230 V_{rms}의 전압을 인가한 경우, 선재의 전압-전류 및 저항 변화 특성을 나타내고 있다. 이 때 선재에 인가된 전류는 첫 주기에서 280 A_p에 이르며 이에 따라 저항도 지속적으로 증가하고 있음을 확인할 수 있다.

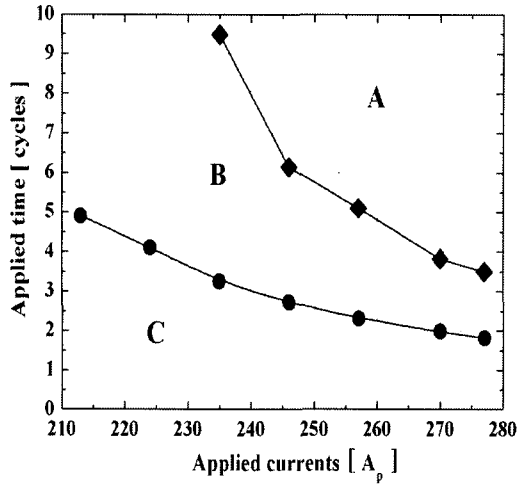


Fig. 8. The condition for the stable operation of the coated conductor according to the magnitude and duration of the applied currents.

Fig. 1에 제시된 선재의 온도-저항 변화 특성을 고려할 때, 9.5 주기가 경과하였을 때 선재 온도는 약 175 K에 이르는 것으로 예상된다. 그러나 9.5 주기 경과 이후에도 인가된 전류량은 거의 일정하여 선재의 한류 작용은 거의 나타나지 않는 것으로 보이며, 본 시험에 사용된 선재는 대전류 통전용으로 보다 적합할 것으로 판단된다.

한편, Fig. 4와 6의 결과를 바탕으로 본 시험에 사용된 선재의 안정 통전 영역을 제시할 수 있다. Fig. 8은 인가 전류의 크기와 인가 시간에 따라 인가 전류가 임계 전류를 초과한 상태이나 안정적 통전이 가능할 것으로 예상되는 영역 (C), 선재에 줄열이 점차 축적되기 시작하며 발생 저항이 분류된 인가 전류량에 의존하여 과전류 통전 특성이 결정되는 플럭스 플로우 상태의 영역 (B) 그리고 선재에서 발생한 줄열의 온도가 임계 온도를 초과하여 선재가 소손될 수 있는 영역 (A)으로 각각 구분하여 나타내었다. 시험에 사용된 선재가 초전도 케이블 등의 대전류 통전용 재료로 사용되는 경우, Fig. 8의 결과로부터 과도 상태를 고려한 운전 조건 확립이 가능할 것으로 예상된다.

4. 결 론

미국 Superpower사에서 제작한 구리 안정화재를 갖는 YBCO 박막형 선재에 대하여 과전류 통전 특성을 조사하고 플럭스 플로우 상태에서의 전류 분류 현상 등에 대하여 분석하였다. 선재에 150 V_{rms} - 230 V_{rms} 까지 범위의 전압을 각각 10 V 단위로 증가시키며 인가하여 선재에서 검출된 저항 변화를 분석하였다. 우선, 160 V_{rms} 이하의 전압을 인가한 경우, 발생 저항은 77 K에서의 안정화재 저항을 초과하지 않았다. 160 V_{rms} - 180 V_{rms} 영역에서의 저항은 초기 증가 후 감소하는 경향을 나타내며 플럭스 플로우 상태를 유지하였다. 190 V_{rms} 이하의 전압을 9.5 주기 동안 인가한 경우, 선재 온도는 임계 온도를 초과하지 않았다. 200 V_{rms} 이상의 전압을 인가한 경우, 발생된 줄열은 6 주기 이내에 임계 온도를 초과하였다. 160 V_{rms}를 인가하여 분류된 전류량을 조사한 결과, 4 주기가 경과했을 때 초전도체를 통전하는 전류는 85 A 이하로 적어졌

으며, 7 주기 경과 후 다시 증가하였다. 마지막으로 위의 결과를 바탕으로 과도 상태에서의 안정 통전 영역을 분석할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] M.C. Ahn, D.K. Park, S.E. Yang, M.J. Kim, C. Lee, B.-Y. Seok, and T.K.Ko, "Basic design of 22.9 kV/630 A resistive superconducting fault current limiting coil using YBCO coated conductor," *Physica C*, vol. 463-465, pp. 176-1180, 2007
- [2] Min Cheol Ahn, Seong Eun Yang, Dong Keun Park, Hyoungku Kang, Bok-Yeol Seok, Tae Kuk Ko, "Current limiting characteristics of coated conductors with various stabilizers," *Cryogenics*, vol. 47, pp. 425-430, 2007
- [3] S.W. Yim, S. H. Lim, H. R. Kim, S. D. Hwang, and K. Kishio, "Electrical behavior of Bi-2223/Ag tapes under applied alternating over-currents," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 15, no. 2, pp. 2482-2487, June 2005.
- [4] Seong-Woo Yim, Sung-Hun Lim, Song-Ho Sohn, Si-Dole Hwang, and Sung-Chae Yang, "Quench development due to external magnetic field in HTS cable conductor transporting AC current," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 16, no. 2, pp. 1606-1609, June 2006.

저 자 소 개



임성우 (任星禹)

1973년 02월 28일생, 1997년 전북대학교 전기공학과 졸업, 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사) 현재 한전전력연구원 일반연구원



김혜림 (金蕙林)

1957년 3월 15일생, 1979년 서울대 물리학과 졸업, 1991년 미 코넬대 대학원 물리학과 졸업(이학박사), 현재 한전전력연구원 책임연구원



현옥배 (玄鉦培)

1953년 02월 11일생, 1976년 연세대 물리학과 졸업, 1987년 미 아이오와 주립대 물리학과 졸업(이학박사), 현재 한전전력연구원 수석연구원



오성용 (吳守龍)

1973년 8월 22일생, 2000년 한밭대학교 금속공학과 졸업, 2004년 동 대학원 응용소재공학과 졸업(공학석사), 현재 충북대학교 신소재공학과 연구원



손승호 (孫松鎬)

1974년 7월 14일생, 2001년 고려대학교 금속공학과 졸업, 2004년 동대학원 신소재공학과 졸업 (공학석사), 현재 한전전력연구원 선임연구원.



두호익 (杜昊益)

1971년 12월 5일 생, 2001년 전북대학교 전기공학과 대학원 졸업(공학석사), 2003년 동대학원 박사과정 수료, 2006년 전주비전대학 전기과 겸임교수, 현재 동 대학원 박사과정



임지현 (林志炫)

1981년 3월 19일생, 2004년 전남대학교 기계공학과 졸업, 2006년 동대학원 기계공학과 졸업 (공학석사), 현재 한전전력연구원 일반연구원.



한병성 (韓秉誠)

1951년 12월 22일 생, 1981년 전북대학교 전기공학과 대학원 졸업(공학석사) 1988년 프랑스 루이파스퇴르 대학 졸업(공학박사), 현재 전북대학교 전기공학과 교수



황시돌 (黃時堯)

1957년 1월 12일생, 1981년 2월 연세대학교 전기공학과 졸업, 1986년 8월 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업 (석사), 현재 한전전력연구원 책임연구원