

분할형 YBCO CC들을 전위한 적층도체의 수직 자화손실 저감 특성

Reduction Characteristics on Perpendicular Magnetization Loss in Transposed Stacking Conductor of Striated YBCO CC

이지광^{1*}, 변상범², 한병욱², 박상호², 최석진², 김우석³, 박 찬³, 최경달²

J.K. Lee^{1*}, S.B. Byun², B.W. Han², S.H. Park², S.J. Choi², W.S. Kim³, C. Park³, K.D. Choi²

Abstract: Recently, it is proposed to make striations on the YBCO coated conductor and to transpose each other as one of the solutions to decrease the perpendicular magnetization loss. For large power application using HTS, the stacked conductor packing the YBCO coated conductors should be used because single conductor is limited in flowing of demanded large current. In this paper, we research the affect of the striation and continuously transposed stacking geometry on the magnetization loss in perpendicularly exposed magnetic field. Several short samples having different number of striation and continuously transposed stack are prepared and tested in perpendicularly exposed magnetic field for the magnetization loss characteristics. The magnetization loss of striated sample was lower than sample without striation. The reduction effect on magnetization loss by the striation is obviously appeared in higher field and lower number of stack and decreased as increasing the transposed stacking number. Also, the reduction effect by transposed stack is obviously appeared in lower field at lower number of striation and isn't appeared at higher striation number and higher magnetic field.

Key Words: YBCO coated conductor, striation, continuously transposed conductor, stack, perpendicular magnetization loss.

1. 서 론

초전도전력기기는 일반적으로 초전도선재를 권선한 코일형태로 사용되며, 코일 여자 시 코일을 구성하는 각 초전도선재에는 여러 방향의 자장이 발생하고, 이러한 임의 방향의 자장은 외부 인가 자장처럼 작용하여 코일 각 부분에서 자화손실을 발생시킨다. 특히 초전도선재의 넓은 면에 수직으로 가해지는 자장이 코일

전체의 교류손실을 주도하게 된다. 이러한 수직자장에 의한 자화손실을 줄이는 것은 효율성과 직결되므로 전력응용기기의 실용화에 중요한 요소라 할 수 있다.

현재까지 개발된 YBCO CC는 수직자장에 의한 자화손실이 BSCCO 선재에 비해 작지 않아 이를 줄이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 국내·외에서 연구되고 있는 초전도를 이용한 대전력 기기 개발의 경우를 보면 전류가 수백~수천[A] 이상의 대전류의 통전능력을 요구하는 데, 현재의 YBCO CC 1본의 단일선재로는 필요한 전류를 통전시킬 수 없으므로 수~수십본의 YBCO CC를 적층하여 사용하게 된다. 적층선재에서의 교류손실은 적층선재를 구성하는 인접 초전도테이프들에 의한 자장차폐에 의한 영향 때문에 단일선재의 경우와는 다른 특성을 보인다[1-3]. 전력기기 실용화에 있어서 중요한 초전도선재의 교류손실의 저감을 위해서는 결론적으로 저온선재에서와 마찬가지로 초전도체를 가느다란 필라멘트 형태로 제작하는 극세다심화와 외부자장 인가시 이러한 필라멘트들이 자기적으로 결합하여 덩어리로서 작용하는 것을 방지하기 위해 필라멘트들을 서로 꼬는 트위스트가 필요하다고 할 수 있다. 그러나, YBCO CC처럼 중형비가 매우 큰 평판과 같은 구조에서는 극세다심화 및 트위스트는 매우 어려우므로 극세다심화 대신 분할(striation)을, 트위스트 대신 전위(transposition)를 해 줌으로서 이에 근사한 효과를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 대전류를 흘릴 수 있는 YBCO CC 적층도체의 외부수직자장에 의한자화손실의 저감 특성을 알아보기 위해 여러가닥으로 분할된(striated) YBCO CC 선재를 이용하여 적층 수를 달리한 연속전위도체들을 제작하였으며 수직자화손실을 측정하여 자화손실 저감의 특성을 확인하였다.

2. 자화손실 측정방법

고온초전도선재의 자화손실은 균일한 외부자장을 고온초전도선재의 샘플에 인가할 때 발생하는 에너지의 유출입으로부터 얻을 수 있으므로 1주기 당, 단위길이 당 자화손실은 식(1)과 같이 표현 할 수 있다.

$$Q_m = \oint_s \vec{E} \times \vec{H} \cdot \vec{ds} \quad (1)$$

여기서, \vec{E} 은 샘플을 따라 발생된 전계, \vec{H} 는 외부인가자계의 세기이다. 식(1)을 측정된 전압, 전류 신호를 이용하여 고온초전도선재의 1주기 당, 단위체적 당 자화손실로 표현하면 식(2)를 얻을 수 있다.

¹정 회 원 : 우석대 전기전자공학과

²정 회 원 : 한국산업기술대학교 에너지대학원

³정 회 원 : 서울대학교 재료공학부

*교신저자 : jikwang@woosuk.ac.kr

원고접수 : 2008년 10월 01일

심사완료 : 2009년 08월 05일

게재확정 : 2009년 08월 05일

$$Q_m = \frac{C_{pu}k}{V_s} \int_0^T v(t)i(t) dt \quad (2)$$

여기서, k 는 자장인가용 코일자석의 단위전류당 발생 자속밀도를 나타내는 자석상수이고, C_{pu} 는 픽업코일 보정상수, V_s 는 샘플의 체적이다.

그림1은 자화손실 측정을 위한 회로도이다. 샘플은 픽업코일 내부에 위치하며, 외부자장이 인가되는 경우에 픽업코일에 유기되는 전압은 초전도선재 샘플에서 발생하는 자장과 외부자장과의 합성에 의해 나타나므로 초전도선재의 샘플에서 발생하는 자장만을 얻기 위해 픽업코일과 동일한 턴 수의 캔슬코일을 픽업코일에 연결해 외부자장에 의한 유기기전력을 상쇄시킨다.

표 1은 샘플제작에 사용된 Superpower사의 YBCO CC의 사양으로서, 금속층인 Ag의 두께는 1.2 μ m, YBCO 층은 1 μ m, 기판층은 60 μ m, 폭은 12mm이다. 표1의 YBCO CC를 펀칭기를 이용하여 주기적으로 피치를 가지고 전위되는 형상의 전위형상선재들을 제작하였으며, 전위형상선재를 화학적인 에칭방법을 이용하여 각각 2, 4, 6 가닥으로 분할한 분할선재를 다수 제작하였다. 수직자화손실을 측정하고자 하는 연속전위도체 샘플은 분할선재들을 단일, 2, 4, 6, 8, 10 개수 만큼 적층하여 제작하였으며 표 2는 전위형상선재의 사양과 연속전위도체 샘플의 종류를, 그림 2는 제작된 연속전위도체 샘플의 형상을 보여준다.

표 2 및 그림 2의 연속전위도체 샘플의 이름에서 "S"는 단일 YBCO CC 전위형상 선재를 분할한 분할선 수를 의미하며, "N"는 적층개수를 의미한다. S0는 분할선이 없으므로 비분할선재, S1, S3, S5는 각각 분할선이 1, 3, 5개이므로 2분할, 4분할, 6분할선재를 의미한다. 그림 2의 샘플들의 길이는 120mm이고, 그림1의 픽업코일(LPC, linked pick-up coil)의 중심부에 위치하게 된다. 픽업코일 내에 샘플의 가운데 부분 60mm가 들어가게 되며, 자화손실 측정에 있어 end effect를 배

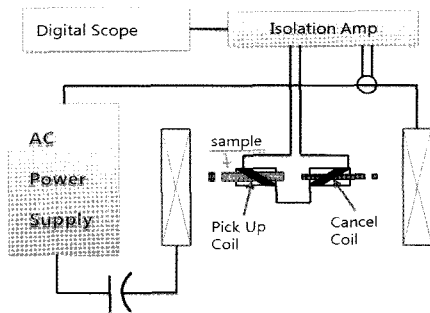


Fig. 1. Experimental circuit for magnetization loss measurement.

Table 1. Specification of YBCO CC.

HTS wire	YBCO Coated Conductor
폭	12 mm
YBCO층 두께	1 μ m
기판 (두께)	Hastelloy (60 μ m)
안정화층 (두께)	Ag (1.2 μ m)
기판 저항율	125 μ cm
임계전류	290 A/cm (77 K, 자기자계)

Table 2. Specification of Samples.

전위형상선재	
폭	4.5 mm
피치	80 mm
길이	120 mm
연속전위도체 샘플	
분할 개수	비분할(S0), 2분할(S1), 4분할(S3), 6분할(S5)
전위형상선재의 적층 개수	1(N1), 2(N2), 4(N4), 6(N6), 8(N8), 10(N10)

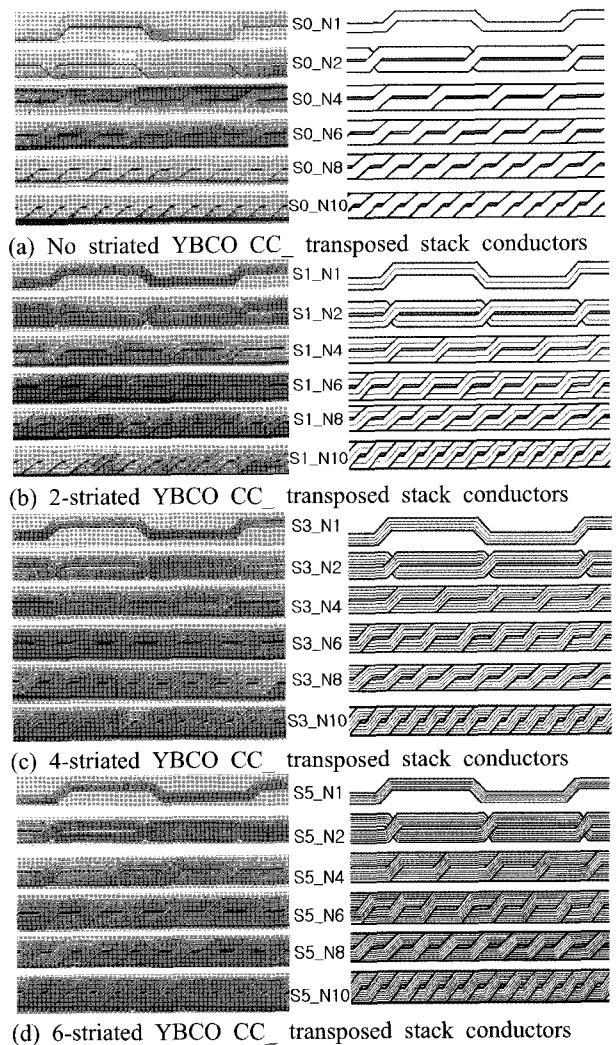


Fig. 2. Samples having different striation and transposed stacking number.

제하기 위해 양쪽 30mm들은 픽업코일 바깥쪽에 있게 된다.

3. 측정결과 및 분석

그림 3은 비분할, 2분할, 4분할, 6분할 전위형상 단일 선재들의 수직자화손실 측정결과를 계산결과와 비교하여 보여준다. 그림 3에서 실선 및 점선들은 Brandt에 의해 제안된 strip 모델에 의한 계산결과이다. 비분할 선재(S0_N1)의 경우에는 측정결과와 계산결과가 잘 일치함을 알 수있다. 2분할(S1_N1), 4분할(S3_N1), 6분할

(S5_N1)선재의 경우에 낮은 외부인가자장 영역에서 측정값과 계산값이 차이를 보이는 이유는 strip 모델에 의한 자화손실 계산에서는 분할된 각 필라멘트들간의 초전도 반자성에 의한 자기적인 상호영향이 고려되지 않고 서로 독립적인 것으로 계산되지만, 측정값에는 이러한 영향들이 포함되기 때문이다. 인가자장이 커져서 완전침투자장을 넘어서게 되면 분할된 초전도 필라멘트들을 통하여 자장이 통과하게 되므로 반자성에 의해 밀려나는 자장이 작아지게 되고, 자장의 상호영향이 줄어들게 되어 측정결과와 계산결과가 잘 일치하게 된다.

그림4는 비분할, 2분할, 4분할, 6분할선재로 제작한 10적층 연속전위도체들의 수직자화손실 측정결과를 보여준다. 그림 3,그림4의 결과로부터 분할에 의한 자화손실저감 효과를 볼 수 있으며, 그 효과는 외부 인가자장이 높을수록 명확히 나타남을 알 수 있다. 즉, 높은 자장에서는 분할 개수만큼 자화손실이 감소함을 알 수 있다. 그림 4에서 비분할 선재로 적층한 연속전위도체의 자화손실이 낮은 자장에서는 분할 선재로 적층한 연속전위도체보다 더 작음을 볼 수 있으며, 이는 적층수가 크면 비분할 선재의 자기차폐에 의한 적층효과가 분할의 효과보다 더 크게 나타날 수 있음을 의미한다.

그림 5~그림 7은 각각 비분할, 2분할, 6분할 전위형상선재로 제작한 2, 4, 6, 8, 10 적층 연속전위도체들의 수직자화손실 측정결과를 보여준다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 비분할 선재로 제작한 연속전위도체의 자화손실은 적층수가 클수록 자화손실밀도가 작음을 볼 수 있는데 이는 적층에 의한 자기차폐효과 때문이다. 적층의 효과는 초전도체의 반자성 특성으로 완전침투자장의 크기를 증가시키는 역할을 하게 되고, 적층 수가 증가할수록 이러한 현상은 두드러지게 나타난다. 자기차폐효과로 적층선재의 안쪽에 위치한 선재들은 바깥쪽에 위치한 선재들 보다 같은 외부자장이 인가되더라도 각각의 선재에서는 더욱 작은 영역에서 차폐전류가 흐르게 되어 선재내부에 전류밀도 분포가 0인 영역이 더욱 커지게 되어 상대적으로 자화손실의 크기가 감소하게 된다. 그림6, 그림 7에서 보면 적층된 도체라 할지라도 많은 가닥으로 분할된 전위형상선재를 사용하면 적층의 효과가 사라지게 됨을 알 수 있다. 이는 분할된 선재의 필라멘트 사이로 자장이 통과하게 되어 적층에 의한 자기차폐효과가 없어지기 때문이다.

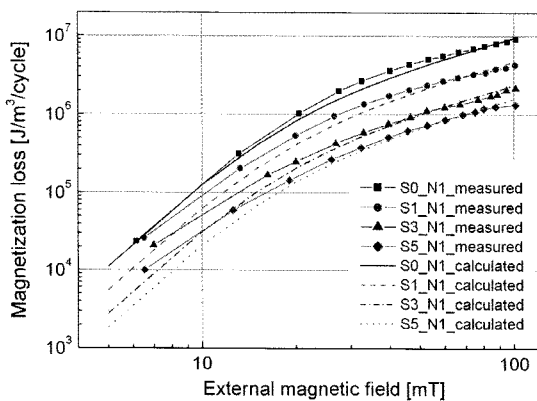


Fig. 3. Comparison of the measured and calculated magnetization losses of no, 2, 4, 6-striated single YBCO coated conductor. Solid and dot lines are the calculated results by strip model formula proposed by Brandt and Indenbom.

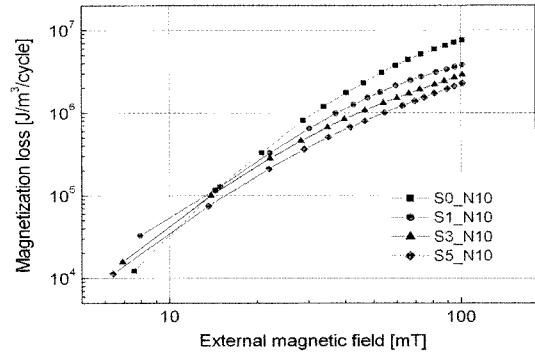


Fig. 4. Measured magnetization losses of no, 2, 4, 6-striated and 10-transposed stack conductors.

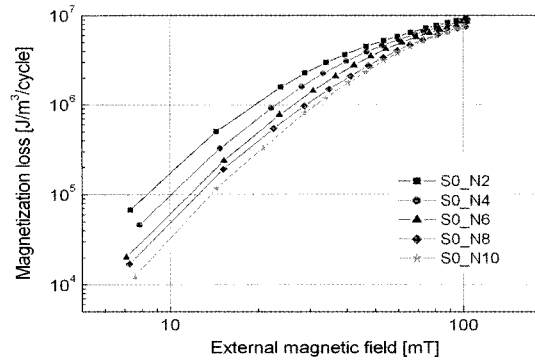


Fig. 5. Measured magnetization losses of 2, 4, 6, 8, 10-transposed stack conductors made of no striated YBCO coated conductors.

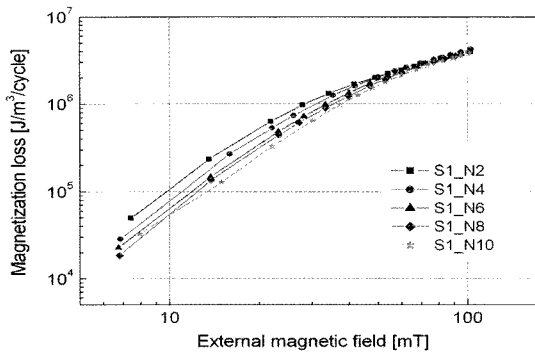


Fig. 6. Measured magnetization losses of 2, 4, 6, 8, 10-transposed stack conductors made of 2-striated YBCO coated conductors.

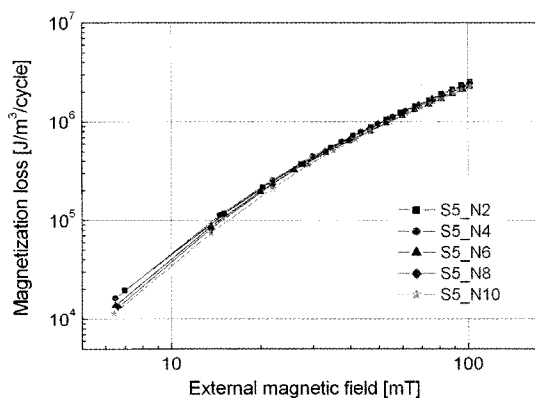


Fig. 7. Measured magnetization losses of 2, 4, 6, 8, 10-transposed stack conductors made of 6-striated YBCO coated conductors.

그림8은 여러 분할선재로 제작된 단일선재 및 10적층 연속전위도체에 대해 측정된 자화손실(그림3, 그림4), 그림9는 비분할 및 6분할선재로 제작된 여러 적층의 연속전위도체에 대해 측정된 자화손실(그림5, 그림7)을 단위체적당의 자기저장에너지밀도로 나누어 표현한 식(3)의 정규화된 자화손실을 나타낸다.

$$Normalized\ loss = \frac{Measured\ loss}{B_m^2/2\mu_0} \quad (3)$$

식(3)과 같이 표현된 정규화손실은 loss factor의 개념으로 생각할 수 있으며, 앞의 그림3, 그림4, 그림5, 그림7의 그래프에서 손실증가 패턴이 변하는 외부자장의 크기를 쉽게 판별할 수 있다. 그림8와 그림9에서 그래프들의 극대점에 해당하는 외부자장의 크기는 앞의 그래프들에서 손실증가의 기울기가 변하는 외부자장의 크기를 의미하며, 이는 각 샘플들에서 연속전위도체의 완전침투자장을 나타낸다고 할 수 있다. 비분할 단일선재(S0_N1)에서 수직방향의 외부자장이 인가되는 경우 약 30mT 정도에서 극대값이 나타나는 것을 볼 수 있는데 이때는 초전도선재의 전 면적을 통해 차폐전류가 흐르고 있음을 나타내며 초전도선재 내부에 자장이 완전히 침투하는 시점이기도 하다.

그림 8에서 단일선재와 10적층선재 두 경우 모두 분할 개수가 늘어날수록 완전침투자장이 작아짐을 알 수

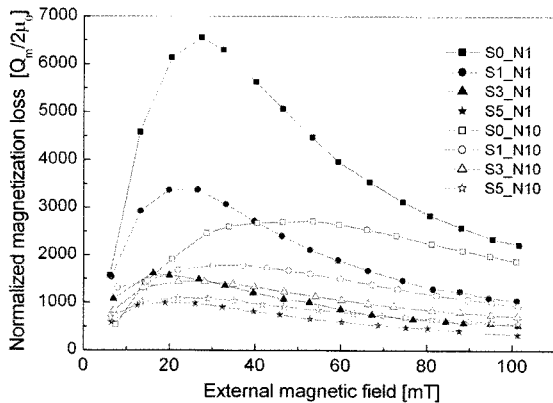


Fig. 8. Normalized value divided by $B_m^2/2\mu_0$ of measured perpendicular magnetization loss shown as Fig.3 and Fig.4.

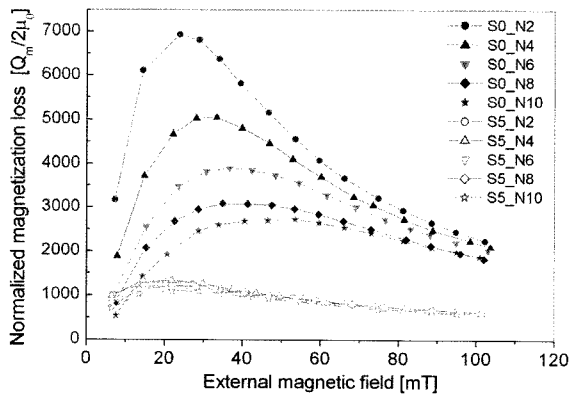


Fig. 9. Normalized value divided by $B_m^2/2\mu_0$ of measured perpendicular magnetization loss shown as Fig.5 and Fig.7.

있으며, 이는 분할된 부분으로 자장이 통과함으로 선재의 폭이 감소하는 효과가 있기 때문이다.

그림 9에서 비분할 선재로 제작된 적층도체들에서는 적층 개수가 늘어날수록 완전침투자장이 증가하고 정규화손실은 감소함을 알 수 있으며, 이는 적층에 의한 자기차폐효과에 기인한다고 할 수 있다. 그러나 6분할 선재로 제작된 적층도체들에서는 분할된 부분을 통해 자장이 통과하기 때문에 자기차폐효과는 사라지게 되어 완전침투자장도 정규화손실 크기도 적층 개수에 관계없이 거의 같음을 알 수 있다.

4. 결 론

대전류용 YBCO CC 적층도체의 외부수직자장에 의한 자화손실의 저감 특성을 알아보기 위해 여러가닥으로 분할된(striated) YBCO CC선재를 이용하여 적층수를 다르게 한 연속전위도체들을 제작하였으며 수직자화손실을 측정하였다. 측정결과로부터 분할에 의한 자화손실 저감 효과는 높은 자장에서는 분할 개수만큼 자화손실이 감소하는 것을 알 수 있으며, 이러한 효과는 외부인가자장이 높을수록 명확히 나타남을 알 수 있다. 비분할 선재를 적층하여 제작한 연속전위도체의 수직자화손실에서는 적층에 의한 자기차폐효과가 명확히 나타나고 이에 의한 자화손실 저감 특성이 크지만, 분할한 선재로 적층하여 제작한 연속전위도체의 자화손실은 분할 개수가 클수록 자기차폐효과는 사라지게 되어 적층에 의한 손실저감 효과는 나타나지 않고 분할에 의한 손실저감 효과만 있음을 알 수 있다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] Myungjin Park, Myeongseob Choi, Seungyong Hahn, Guesoo Cha, and Jikwang Lee, "Effect of the Stack in HTS Tapes Exposed to External Magnetic Field," IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 14, no. 2, pp. 1106-1109, June 2004.
- [2] Ji-kwang Lee, Seung-wook Lee, Myung-jin Park, and Guesoo Cha, "Magnetization Loss in HTS Stacked Tapes by Various Directional External Magnetic Fields," IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 14, no. 2, pp. 630-633, June 2004.
- [3] Ji-kwang Lee, Myungjin Park, Hyungwoo Lim, Heejuon Lee, Guesoo Cha, and Seungwook Lee, "Magnetization Loss and Shield Effect in Multi-Stacked Tapes With Various Stacking Configurations," IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 16, no. 2, pp. 131-134, June 2006.

저 자 소 개



이지광(李志光)
1966년 6월 1일생, 1989년 서울대 전기공학과 졸업, 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 우석대학교 소방안전학과 교수.



변상범(卞相範)
1981년 3월 20일생, 2007년 2월 한국산업기술대학교 졸업, 2009년 2월 동대학교 에너지대학원 졸업(공학석사), 현재 동대학원 연구원.



한병욱(韓炳煜)
1982년 1월 13일생, 2008년 2월 순천향대학교 정보기술공학부 졸업, 현재 한국산업기술대학교 에너지대학원 석사과정.



박상호(朴相浩)
1969년 2월10일생, 1996년 한국해양대 전기공학과 공학사, 2004년 한국해양대 동대학원 공학박사, 현재 한국산업기술대 겸임교수.



최석진(崔錫鎭)
1974년 6월 10일생, 1998년 연세대학교 전기공학과 졸업, 2001년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 위덕대학교 산학협력단 연구원.



김우석(金佑錫)
1970년 6월 12일생, 1996년 서울대학교 공과대학 전기공학과공학사, 1998년 서울대학교 공과대학 대학원 공학석사, 2002년 서울대학교 공과대학 대학원 공학박사, 현재 서울대학교 재료공학부 계약교수.



박 찬(朴 燦)
1964년 4월 30일생, 1986년 서울대학교 무기재료공학과 졸업, 1988년 동대학원 졸업(공학석사), 1996년 New York State College of Ceramics at Alfred University 박사, 현재 서울대학교 재료공학부 교수.



최경달(崔景達)
1962년 2월 12일생, 1984년 서울대 전기공학과 졸업(공학사), 1986년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1993년 동대학원 전기공학과 공학박사, 현재 한국산업기술대학교에너지대학원 교수.