

YBCO Coated Conductor와 BSCCO tape의 적층 및 외부자장의 각도에 따른 자화손실 특성

The Magnetization Losses Characteristics of Multi-stacked and Variable Angle of External Magnet Field in YBCO CC and BSCCO tape

임형우*, 이희준**, 차귀수***

Hyoungwoo Lim*, Heejoon Lee**, Guesoo Cha***

Abstract: Multi-stacked HTS tapes are needed to conduct large current in the power application. In this paper, magnetization losses of the multi-stacked YBCO coated conductor and the BSCCO tape have been measured and compared. Magnetization losses of single tape, 2-stacked, 3-stacked and 4-stacked HTS tapes have been presented in this paper. Multi-stacked tapes have been fabricated using face-to-face type stacking method. Measurements of magnetization loss were performed under various angle of external magnetic field to consider the anisotropic characteristics of HTS tapes. Test results show that loss density per unit volume decreased for both YBCO coated conductors and BSCCO tapes when the stacking number of tapes is increased. The magnetization losses of YBCO CC are larger than those of BSCCO tapes when the external magnetic field is increased.

Key Words: YBCO Coated conductor, BSCCO tape, Magnetization loss, Stacked.

1. 서 론

근래에 들어 산업이 발전하고 전력의 수요가 급격히 늘어나므로 인하여 대형 전력회사의 전력기기뿐만 아니라 도심의 밀집한 건물내부의 전력기기 허용용량 의 한계에 와 있다. 이로 인하여 기존의 전력기기의 용량 을 증가시키고 에너지의 효율 및 환경 친화적인 기기 들에 대한 관심이 높아지고 있다. 그러나 한정되어 있 는 공간에 대용량의 전력기기를 증설한다는 것이 커다 란 문제로 대두되면서, 전력기기의 부피를 줄이고 에 너지의 손실을 감소시키면서 환경 친화적인 기기에대 한 연구가 활발히 진행중이다. 이에 대한 대안으로초 전도 전력기기에 대한 관심이 늘어나고 있으며, 초전 도 전력기기에는 사고전류를 방지할 수 있는 한류기, 대용량 전력을 송전할 수 있는 초전도 전력케이블 및 초전도 변압기 등을 꼽을 수 있다. 이 중에서도 초전 도 변압기는 다른 초전도 기기보다 빠른 상용화의 가 능성을 보이고 있다. 초전도 변압기가 빠른 상용화로

이어질 것으로 보는 이유로는 기존의 건물 내부에 수 명이 다되어 가는 변압기의 교체로 볼 수 있으며, 이 는 용량의 증가와 함께 대부분 제한적인 공간에 설치 하였다가 근래에 건물의 전력 수요가 증가함에 따라 한정된 공간에 대용량의 전력기기를 삽입할 수 없다는 문제로 인하여 부피가 작으면서도 대용량을 갖는 변압 기를 필요로 한다는데 있다. 현재 초전도 변압기는 1 세대 초전도 선인 BSCCO tape를 사용하여 연구하고 있으며 이는 기존의 구리선보다 전류 용량이 100배 가 량 높아서 초전도 변압기 및 여러 분야로 응용되고 있 다. 또한 최근에 2세대 초전도선인 YBCO CC가 개발 되므로 인하여 기존의 1세대초전도선보다 전류 용량이 더 높은 선재가 개발되었다. 초전도 선은 저항이 작아 서 손실이 없으므로 에너지 절감에 대한 효과를 가지 고 있으나, 교류 전류가 흐를 경우 초전도선에 교변 자장이 가해지게 되어 교류 손실이 발생하게 된다[1].

본 논문에서는 초전도 전력기기로의 응용을 위해 개 발되어 지고 있는 1세대 초전도 선과 2세대 초전도선 에 교류자장이 각도에 따라 가해졌을 경우 발생하는 자화에 의한 손실을 측정하여 비교해 보았다. 또한, 대 용량의 전력기기로의 응용을 위해 초전도선을 적층 하 였을 경우에 대해서 함께 비교해 보았으며, 두께가 매 우 얇고 폭이 넓은 초전도선에 외부자장이 넓은 면으 로 가해질 경우에 대해서 브란트가 제안한 해석식 을 적용하여 비교하였다. 또한 이러한 해석식을 외부자장 의 각도에 따라 계산해 보기 위해 변형시킨 식과 선재 에 넓은 면으로 가해지는 자장 즉 수직 자장에 의한 손실값을 측정하여 이 값을 외부자장의 각도에 따라 계산한 값과 측정값을 비교해 보았다.

2. 실험 방법

현재 사용하고 있는 자화손실 측정방법은 Rec-tangular 방법, saddle-shaped-coil 방법과 Lin- ked-pickup-coil 방법 등이 있으며, 본 논문에서는 Linked-pickup-coil(LPC) 방법을 이용하여 실험하였다 [2,3].

Fig. 1은 실험 중 샘플의 적층 방법으로 a)는 YBCO Coated Conductor의 구조와 적층에 방법을 그림으로 나타낸 것이고 b)는 BSCCO tape의 구조와 적층방법 을 그림으로 나타낸 것이다. BSCCO tape는 상하의 구 분이 없으나 YBCO CC는 기판층을 기준으로 그 위에 buffer 층 YBCO 층 금속층등의 순으로 증착하는 방법 을 사용함으로써 상하의 구분을 가지고 있다.

Table 1은 본 실험에 사용한 YBCO CC 및 BSCCO 선재의 사양이다.

* 학생회원: 순천향대학교 전기공학과 박사과정
 ** 정 회 원: 순천향대학교 정보기술공학부 계약교수
 *** 정 회 원: 순천향대학교 정보기술공학부 교수
 원고접수: 2005년 09월 09일
 심사완료: 2005년 09월 22일

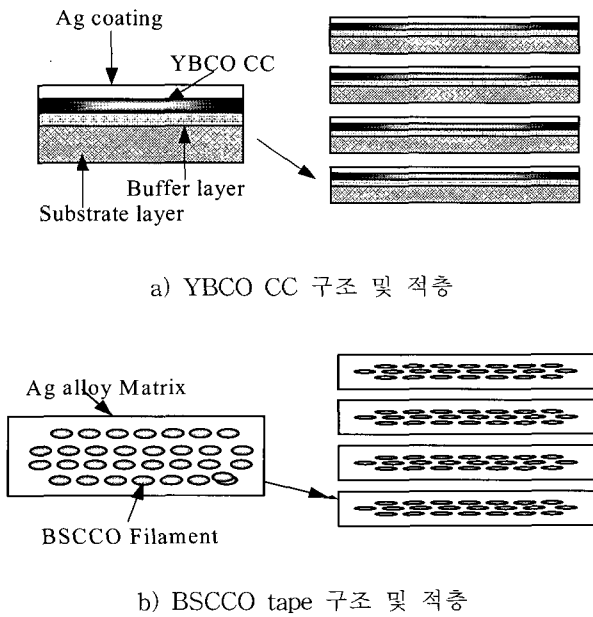


Fig. 1. Geometry of multi-stacked YBCO CC and BSCCO a)YBCO CC b)BSCCO Tape.

Table 1. Specification of YBCO CC and BSCCO Tape.

YBCO Coated Conductor	Width	8 mm
	Ag Thickness	1.2 μm
	YBCO Thickness	1 μm
	buffer Thickness	2.04 μm
	Substrate Thickness	60 μm
	Ic	166A at 77K
BSCCO Tape	Width	4.1mm
	Thickness	0.21mm
	core area	(4.1mm*0.21mm)*0.59
	Ic	125A at 77K

3. 실험 결과

Fig. 2부터 Fig. 5까지는 외부자장 인가 방향을 하고 90°, 60°, 45°, 30°로 바꾸어 가며 자화 손실을 측정 한 결과이며, 그림에서 검정색 사각형은 측정값을 나타내고 있으며, 원형의 기호는 이론식을 이용하여 얻은 결과이며, 이 그림에서 나타난 기호 중에서 삼각형의 기호는 측정값으로부터 얻은 식을 이용하여 그린 그림이다. 이들 Fig. 2부터 Fig. 5까지 결과로부터 자장의 인가 방향이 90°에서 30°로 점차 낮아질수록 자화 손실 값이 감소해 가고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과들로부터 초전도 선을 이용한 초전도 전력기기를 사용할 경우 외부자장이 인가되는 각도를 작게 함으로서 초전도 전력기에서 발생하는 손실의 주 원인이 되는 자화 손실 값을 감소시킬 수 있다고 할 수 있다. 또한, Fig. 2부터 Fig. 5까지 원형기호는 브란트가 제시한 식(1)을 식 (2)과같이 변경하여 외부자장의 각도를 변화시키며 실험했던 각도와 같이 90°, 60°, 45°, 30°로 바꾸어 가며 계산한 결과이다[4].

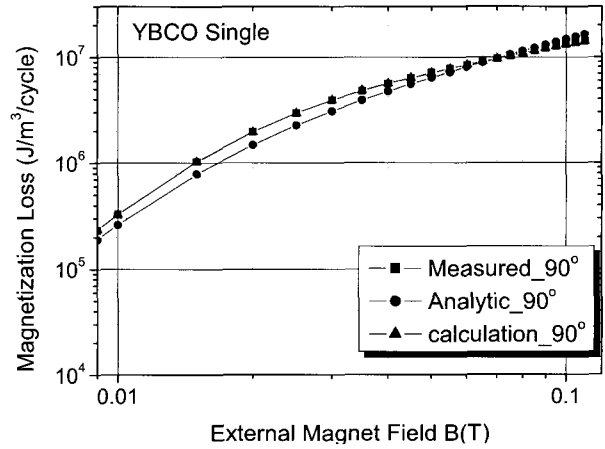


Fig. 2. Comparison magnetization loss of the measurement, analytic and calculation of the single YBCO CC at perpendicular external Magnetic field.

$$Q = \frac{4a^2 J_c dB}{S} \left[\frac{2}{\beta} \ln(\cos \beta) - \tan \beta \right] \quad (1)$$

식(1)에서 $\beta = B/B_c$ 이고, $B_c = \mu_0 J_c d / \pi$ 이며, a 는 샘플 폭의 1/2, d 는 두께이다. 식(1)은 YBCO Coated Conductor에 외부자장이 수직으로 가해질 경우 발생하는 자화손실 값이다. 그러나 위의 식(1)은 외부 자장이 임의의 방향에서 가해지는 경우에 대해서는 고려하지 못하고 외부자장이 수직으로 가해질 경우만을 고려함으로 $B = B \sin(\theta)$ 로 바꾸어 계산하였다. 따라서 식(1)을 다시 정리하면 다음의 식(2)과 같이 정리할 수 있다.

$$Q = \frac{4a^2 J_c dB \sin(\theta)}{S} \left[\frac{2}{\beta} \ln(\cos \beta) - \tan \beta \right] \quad (2)$$

식(2)에서 $\beta = B \sin(\theta) / B_c$ 이고, 식에서 YBCO Coated Conductor의 넓은 면에 가해지는 외부자장의 각도가 수직일 때 $\theta = 90^\circ$ 라 정하였다. 고온초전도선재의 자화손실은 균일한 외부자장을 고온초전도선재의 샘플에 인가할 때 발생하는 에너지의 유출입으로부터 얻을 수 있으므로 1주기 당, 단위길이 당 자화손실은 식(3)과 같이 표현 할 수 있다.

$$Q_m = \oint_s \vec{E} \times \vec{H} ds \quad (3)$$

위의 식(3)에서, \vec{E} 은 샘플을 따라 발생된 전계, \vec{H} 는 외부 인가자계의 세기이다.

Fig. 3은 외부자장이 선재에 가해지는 각도가 60도 일 경우에 측정값과 식(2)로부터 얻은 결과와 수직 자장이 가해질 경우에 발생하는 자화 손실값의 측정값으로부터 얻은 식을 식(2)와 같이 외부자장의 함수로 바꾸어서 다시 계산한 결과이다. 이론식에 의한 값보다 측정에 의해 얻은 값으로 수식을 만들어 다시 계산한 값이 이론식의 값보다 더 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 4는 샘플에 가해지는 외부자장의 각도가 45도 일 경우 발생하는 자화손실 측정값과 식 (2)번으로부터 얻은 자화손실 그리고 계산에 의한 값을 나타내

고 있으며, Fig. 3과 같이 측정에 의한 값이 일치하고 있음을 나타내고 있다. Fig. 5는 외부자장이 샘플에 가해지는 각도가 30도 일 경우이며, Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4와 같이 계산에 의한 값들이 이론식(2)보다 잘 일치하고 있다. 또한 외부자장의 각도가 수직에서부터 60도, 45도, 30도로 작아지면서 자화 손실의 값이 점차 감소해가고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과로부터, 초전도 전력기기의 초전도 선에서 발생하는 교류 자장에 의한 자화 손실을 정확히 계산하고자 할 경우, 논문에서 실험하여 얻은 결과와 같이 선재에 외부자장이 수직으로 가해질 경우의 자화에 의한 손실을 정확히 측정한다. 측정 후에 다양한 각도에서 발생하는 손실을 계산하는 것이 초전도 전력기기의 선재에서 발생하는 자화 손실을 더 정확히 계산할 수 있을 것으로 예상된다. Fig. 6은 외부자장이 가해지는 각도가 변할 때 단일 BSCCO tape에서 발생하는 자화손실을 측정 한 그래프와 수직 방향의 자장이 가해졌을 경우의 측정값으로부터 얻은 계산 값을 비교한 것이다. 그림6에서 샘플에 가해지는 외부자장의 각도가 수직에서부터 점차 감소해 가면서 자화손실 값이 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 측정값과 계산값이 잘 일치하고 있음이 나타나고 있다.

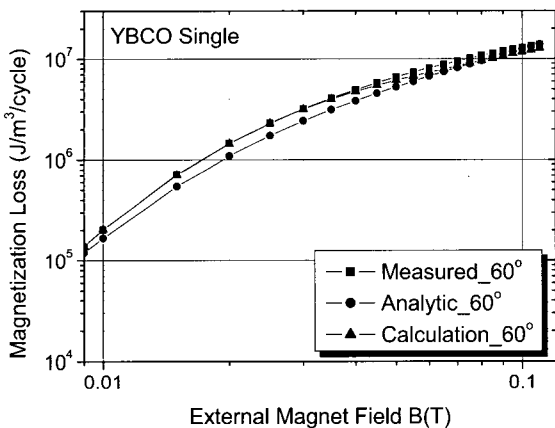


Fig. 3. Comparison magnetization loss of the measurement, analytic and calculation of the single YBCO CC when external Magnetic Field angle is 60 degree.

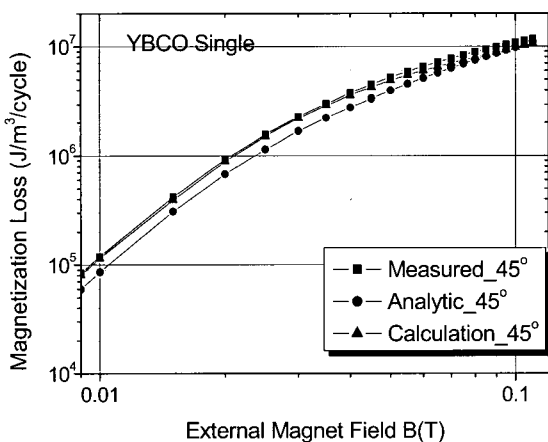


Fig. 4. Comparison magnetization loss of the measurement, analytic and calculation of the single YBCO CC when external Magnetic Field angle is 45 degree.

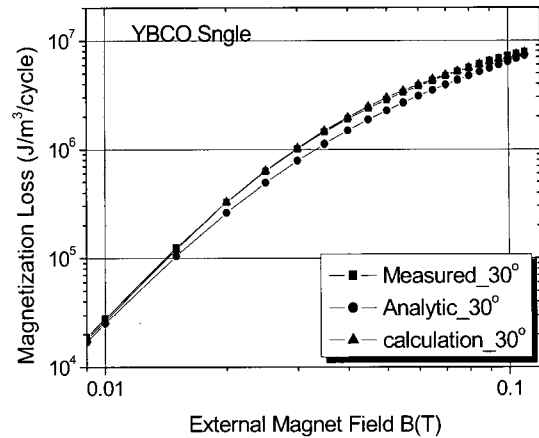


Fig. 5. Comparison magnetization loss of the measurement, analytic and calculation of the single YBCO CC when external Magnetic Field is 30 degree.

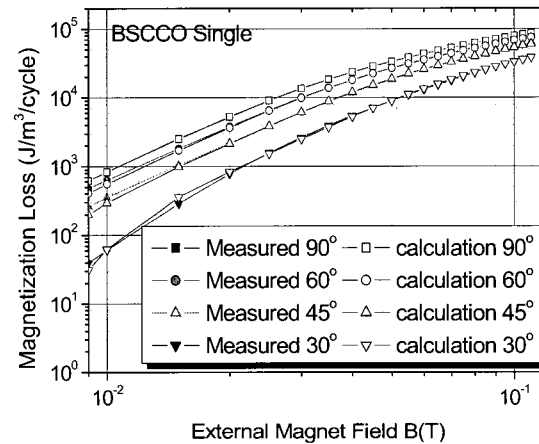


Fig. 6. Comparison magnetization loss of the measurement and calculation of the single BSCCO tape when various angle of external magnetic field is 90°, 60°, 45°, and 30°.

Fig. 7은 단일 YBCO CC와 BSCCO tape의 외부자장의 변화에 따른 자화 손실을 비교한 그래프이다. YBCO CC와 BSCCO tape의 단위 체적당의 손실을 비교해 보았을 때 YBCO CC가 BSCCO tape 보다 그 손실이 100배가량 높은 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 4적층한 YBCO CC의 외부자장 인가와 각도가 변함에 따라 발생하는 손실을 측정 한 값과 단일 YBCO CC에서와 마찬가지로 외부자장을 수직으로 인가시켰을 때의 측정값으로부터 수식을 구하여 외부자장의 증가와 샘플에 인가되는 자장의 각도가 변화할 경우에 대해서 값을 얻은 것이다. 결과는 측정값과 실험값이 잘 일치 하고 있음을 보이고 있다. 또한 단일 YBCO CC 보다 4적층 하였을 경우의 자화손실이 감소한 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 4적층한 YBCO CC와 BSCCO tape에 외부자장의 각도를 변화하면서 측정 한 결과이다. 4적층한 YBCO CC와 BSCCO tape 샘플 모두 수직에서부터 30도로 외부 자장이 인가되는 각도가 작아질수록 자화손실 값이 감소하고 있음을 알 수 있으며, BSCCO tape의 샘플이 단일 샘플일 경우나 적층을 하였을 경우,

모두 YBCO CC 보다 체적당 발생하는 자화 손실이 작았다. Fig. 9는 YBCO CC와 BSCCO tape의 샘플을 4적층했을 경우 발생하는 손실이며 단일 선재의 손실들과 비교해 보았을 경우 적층을 할수록 손실 값이 감소한다는 것과 함께 외부자장이 선재에 완전침투 되는 지점이 적층을 할수록 높은 자장의 영역으로 이동해 간다는 것을 확인 할 수 있었다.

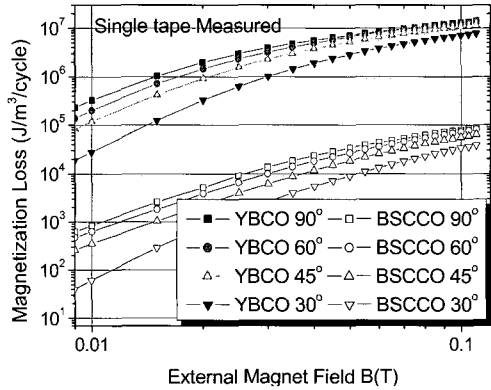


Fig. 7. Comparison magnetization loss of the measurement and calculation of the single YBCO CC and BSCCO tape when various angle of external magnetic field is 90°, 60°, 45°, and 30°

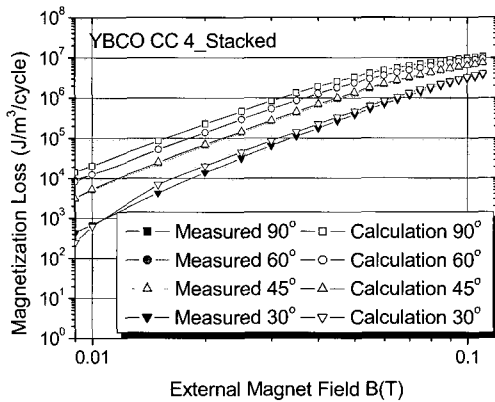


Fig. 8. Comparison magnetization loss of the measurement and calculation of the 4 stacked YBCO CC when various angle of external magnetic field is 90°, 60°, 45°, and 30°

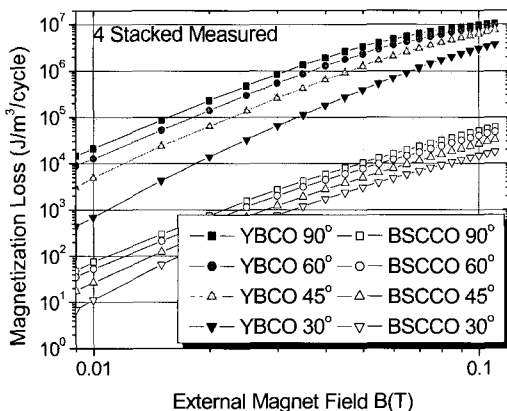


Fig. 9. Comparison magnetization loss of the measurement and calculation of the 4 stacked YBCO CC and BSCCO tape when various angle of external magnetic field is 90°, 60°, 45°, and 30°.

4. 결 론

본 논문에서는 1세대 초전도 선 BSCCO tape와 2세대 초전도 선 YBCO CC의 샘플에 외부자장을 인가하였을 경우, 샘플에서 발생하는 자화 손실을 측정하였고, 샘플에 가해지는 외부자장의 각도가 달라졌을 경우 두 종류의 샘플에 대해서 측정 하였다. 그리고 적층수의 증가에 따라 발생하는 자화손실에 대해서 측정 하였다. 또한 YBCO CC의 경우 이론식과 비교하여 그 타당성을 검토해 보았으며, 선재에 가해지는 자장이 수직일 경우에 대해서만 국한 되어있는 이론식을 변형하여 외부자장의 각도가 달라졌을 경우에 대해서 실험 값과 비교하였다. 그리고 샘플에 수직으로 자장이 인가되었을 경우에 발생하는 손실로부터 수식을 얻어 이론식 및 측정값과 비교 검토해 보았다. 단일 선재에서 계산값을 측정값과 비교해 본 결과 측정값에 대한 이론값보다 계산값에 대한 측정값이 더 잘 일치 하였다. 또한, 외부자장을 인가하는 각도가 샘플의 넓은 면에 수직에서부터 점차 작아질 경우 손실이 감소하는 경향을 보였다.

적층 실험에 대한 결과는 YBCO CC 및 BSCCO tape 모두 샘플을 적층 할수록 자화손실이 감소하였다. 또한 YBCO CC와 BSCCO tape를 비교했을 때 단위체 적당 발생하는 자화손실이 YBCO CC가 더 컸다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 순천향대학교 교수 연구년제에 의하여 연구하였음

참 고 문 헌

- [1] V. Matias et al., "Accelerated Coated Conductor Program at Los Alamos National Laboratory," IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 13, no. 2, pp. 2488-2491, 2003.
- [2] Amemiya N. and Jiang Z., "Magnetization loss of YBCO Coated Conductors and BSCCO multi-filamentary tapes," Supercond. Sci. Techol. 17 pp. 295-299, 2004.
- [3] Masataka Iwakuma, Keniro Toyota et al., "AC loss properties of YBCO superconducting tapes fabricated by IBAD-PLD technique," Physica C 412-414 (2004) pp. 983-991
- [4] Ernst Helmut Brandt, "Type-II- superconductor strip with current in a Perpendicular Magnetic ", Physical review B, Vol. 48, No. 17, 893-906, November 1993.

저 자 소 개



임형우(林炯佑)
1972년 1월 18일생, 2000년 순천향대학교 전기공학과 졸업, 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.



이희준(洪吉童)

1969년 5월 15일 생. 1994년 순천향대 공대 전기공학과 졸업 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 동대학원 전기공학과 졸업(공박), 현재 순천향대학교 계약교수.



차귀수(車貴守)

1956년 7월 18일생. 1978년 서울대 공대공업 교육학과 졸업, 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사) 현재 순천향대 공대 정보기술공학부 교수.