

SmBCO Coated Conductor의 교류손실 측정

Measurement of AC Loss in SmBCO Coated Conductor

박명진^{1*}, 김우석², 이지광³, 오상수⁴, 하홍수⁴, 김호섭⁴, 고락길⁴, 유상임⁵, 문승현⁶, 최경달⁷

M.J. Park^{1*}, W.S. Kim², J.K. Lee³, S.S. Oh⁴, H.S. Ha⁴, H.S. Kim⁴, R.K. Ko⁴,
S.I. Yoo⁵, S.H. Moon⁶, K.D. Choi⁷

Abstract: According to the improvement of HTS conductor, HTS tapes which have the high current capacity have been recently researched in several nations. For large power application, AC loss is the most important issue in the development of AC superconducting power devices because it is closely related to the system operation efficiency. In 1st generation wire of HTS conductor, BSCCO, AC loss is too large to use for power application. Also, It is well known in recently years that YBCO CC, the 2nd generation wire, has also too much AC loss to apply to AC power devices. There are many trials to develop the new HTS wire having the low AC loss around the world. In this research, we present the measurment result of magnetization losses in SmBCO coated conductors. We measured the magnetization loss generated by perpendicularly exposed external magnetic field and compared with the analytic value of the strip model. Also, we presented the results compared with measured magnetization loss of an YBCO coated conductor.

Key Words: AC loss, magnetization loss, SmBCO coated conductor, YBCO coated conductor.

1. 서 론

최근 고온초전도 선재의 개발이 가속화됨에 따라 고온초전도 테이프 선재를 이용한 전력기기의 개발이 활발히 진행되고 있다. 특히 1세대인 BSCCO 계열의 초전도 선재의 한계성으로 지적되었던 자기적인 특성과 교류손실을 개선하고 극복하기 위한 방법으로 그림 1과 같은 구조의 2 세대 초전도 선재인 YBCO coated conductor에 대한 연구와 개발이 진행되어 왔으나 YBCO 박막 선재 역시 높은 교류손실로 인하여 이를 감소시키기 위한 연구가 필요하다. 한편, 이와는

별도로 다른 재료를 이용하여 기존의 초전도 선재가 지닌 약점을 극복하는 초전도 선재를 개발하기 위한 시도가 지속적으로 이루어지고 있다. SmBCO coated conductor는 이러한 시도 하에 있는 고온초전도 선재로서 Hastelloy 합금의 금속기판위에 $Al_2O_3/Y_2O_3/IBAD-MgO/Epi-MgO/LMO$ 의 복합 완충층을 증착시킨 후 EDDC(Evaporation using Drum in Dual Chamber)공정으로 사마륨(Sm)의 초전도층을 증착한 선재이다. SmBCO coated conductor의 초전도층인 사마륨은 YBCO coated conductor에서 초전도 층으로 사용하는 이트륨(Yttrium) 보다 자장하에서의 임계전류가 우수한 특성을 지니고 있으며, 초전도 상태를 유지하는 임계온도 역시 좀 더 높은 특성을 가지고 있다. 또한 metal source를 이용한 증착법을 사용하는 경우에는 다른 희토류원소(rare-earth elements)에 비해 비용면에서 저렴하다는 경제성도 지니고 있다 [1]. 그림 2는 SmBCO CC 선재의 자장 대비 임계전류밀도의 크기를 정규화하여 나타낸 그림이다. EDDC 공정으로 제작한 SmBCO CC 선재의 77 K하에서의 c축 평행자장 즉 선재의 넓은면에 수직으로 가해지는 자장 대비 전류밀도의 특성이 MOCVD 공정으로 제작한 YBCO CC 선재의 75 K 온도에서의 특성보다 우수함을 나타내고 있다.

고온초전도 선재를 교류조건하에서 사용하게 되면, 초전도체 고유의 자기적 특성으로 인하여 교류손실이 발생하게 된다. 교류손실은 외부자장이 고온초전도선재에 가해질 때 발생하는 자화손실과 초전도체에 흐르는 교류전류에 의해 발생하는 교류자장에 의한 전송전류손실로 나누어진다 [2, 3]. 본 논문에서는 현재 연구 개발 단계에 있는 두 가지 크기의 임계전류를 지닌 SmBCO coated conductor의 샘플을 이용하여, SmBCO coated conductor에서의 교류 손실을 측정하였으며, YBCO coated conductor의 교류손실과 비교하였다.

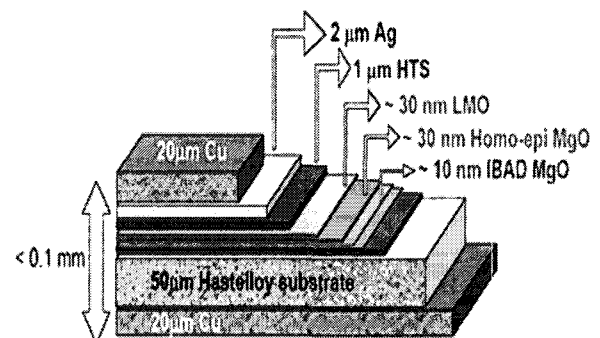


Fig. 1. The structure of YBCO coated conductor.

¹정 회원 : 기초전력연구원, 선임연구원
²정 회원 : MIT, 연구원
³정 회원 : 우석대학교 전기공학과, 교수
⁴정 회원 : 한국전기연구원, 연구원
⁵정 회원 : 서울대학교 교수
⁶정 회원 : (주)서남
⁷정 회원 : 한국산업기술대 에너지대학원 교수
 *교신저자 : pj1973@hanmail.net
 원고접수 : 2008년 01월 10일
 심사완료 : 2008년 03월 21일

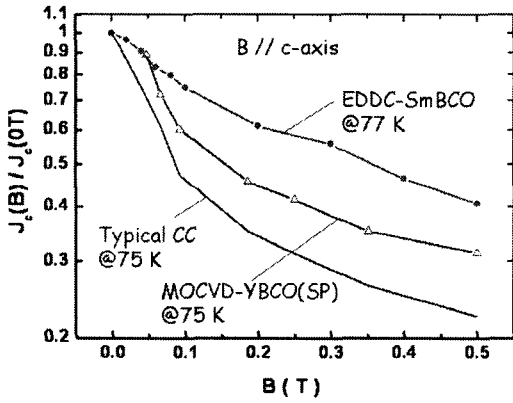


Fig. 2. Critical current according to external magnetic field in coated conductors.

2. 실험 방법 및 측정

초전도 선재의 교류손실 중 외부자장에 의한 자화손실을 측정하기 위해서는 선재에 외부자장을 가하기 위한 별도의 마그넷이 필요하다. 그림 3은 본 논문에서 초전도 선재에 외부자장을 가하기 위해서 제작한 외부자장 인가용 레이스 트랙형의 마그넷을 나타내고 있다. 마그넷은 1 A당 4.79 mT의 자장을 발생 시킬 수 있도록 제작하였으며, 가로×세로×높이가 570 mm×70 mm×254 mm 인 마그넷 중심의 공간에 픽업코일과 캔슬 코일 그리고 초전도 선재의 샘플을 배치하여 자화손실을 측정하였다. 제작한 마그넷의 측정 인덕턴스의 값은 0.554 H 이기 때문에, 자화손실의 측정에 필요한 자장을 발생시키기 위해서는 수 kV 이상의 전압을 마그넷에 인가해 주어야 하지만 실험실 단위에서 이러한 전압의 발생이 어려움으로 커패시터 뱅크를 사용하여 직렬공진을 시켜 측정회로의 전체 임피던스 값을 감소시켜 측정에 필요한 자장을 발생시킬 수 있도록 하였다.

그림 4은 초전도 선재에 외부자장을 인가했을 때 초전도 선재로부터 발생하는 유기기전력을 측정하기 위한 Linked Pick up Coil(LPC)을 나타낸다 [4]. LPC의 픽업코일과 캔슬코일의 1 턴에 대한 가로×세로×높이는 각각 30 mm이며, 각 코일의 전체 턴 수는 총 248 턴이다. 각 코일의 권선 방향을 달리한 직렬연결로서 외부자장에 의한 유기기전력을 상쇄 시키고, 초전도 샘플에 의한 유기기전력만을 측정할 수 있도록 하였다.

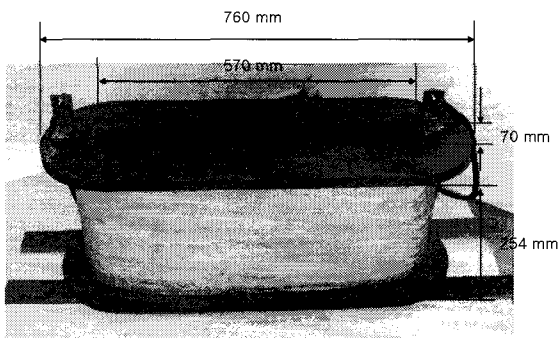


Fig. 3. The magnet for external magnetic field.

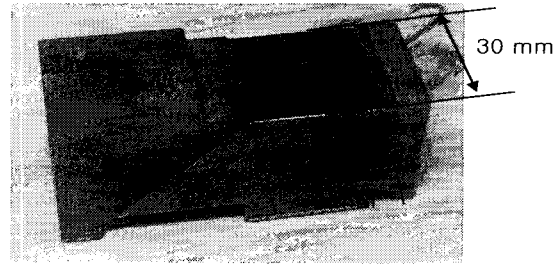


Fig. 4. Linked Pick up coil.

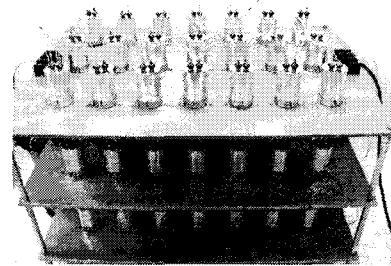


Fig. 5. The capacitor bank for resonance.

그림 5는 직렬 공진을 위한 커패시터 뱅크를 나타낸다. 0.555 H의 마그넷을 공진시키기 위한 커패시터의 용량은 약 12.65 μ F이며, 이를 위해 60 μ F, 450 V 용량의 교류용 커패시터 75개를 직병렬로 연결하여 제작하였다.

그림 6은 자화손실 측정을 위한 측정 회로도를 나타낸다. 마그넷에 인가한 전류와 LPC로부터 측정된 유기기전력을 절연증폭기를 이용하여 증폭한 신호를 오실로스코프를 통해 data를 저장, PC를 이용해 자화손실의 크기를 계산하였다.

2.1 YBCO coated conductor의 자화손실

먼저 측정 장비의 신뢰도를 판단하고 SmBCO coated conductor와의 자화손실 비교를 위해 YBCO coated conductor의 자화손실을 측정하였다. 표 1에 나타낸것과 같이 측정에 사용한 YBCO CC 선재 샘플의 폭은 12 mm와 이를 절반으로 잘라낸 6 mm이며, 길이는 100 mm 이다. 금속 기판, 버퍼층, 초전도 층 그리고 은 안정화 층을 모두 포함한 선재의 두께는 0.055 mm 이며, 이 중 YBCO 초전도 층의 두께는 1 μ m이다. 임계전류의 크기는 77 K의 액체질소와 자기장 하에서 200 A/cm-w 이다. 폭 12 cm, 6 cm 샘플의 임계전류는 각각 240 A, 116 A이다.

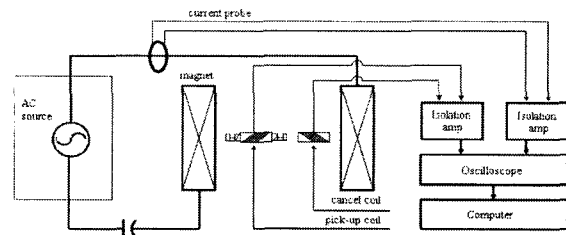


Fig. 6. The measurement set-up.

Table 1. Specifications of YBCO coated conductor.

HTS wire	YBCO coated conductor
Width	6.0 mm, 12.0 mm
Length	100 mm
Average thickness (Thickness of YBCO layer)	0.055 mm (1 μ m)
Critical current	200 A/ cm at 77 K, self field

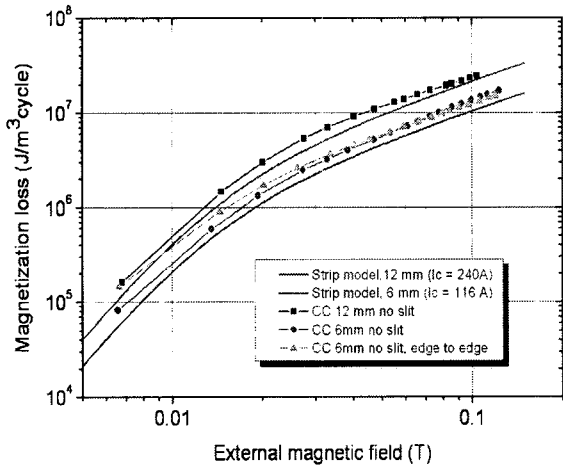


Fig 7. Magnetization losses of YBCO CC.

그림 7은 YBCO CC 선재의 측정 자화손실을 나타낸다. 자화손실 측정은 선재의 샘플을 폭 12 mm와 6 mm 그리고 폭 6 mm 샘플 두 개를 옆으로 나란히 한 배치(Edge to Edge)의 세 가지 경우에 대해서 수행하였다. 측정값은 측정 샘플과 동일한 선재의 폭, YBCO 층의 두께 그리고 임계전류를 갖는 Strip 모델의 해석 결과와 비교하였다 [5]. 측정 결과는 12 mm와 6 mm 폭 선재 샘플 모두 Strip 모델의 해석 결과와 약간의 차이를 보이기는 하였지만, 외부자장의 인가에 대해서 자화손실의 증가 패턴이 유사함을 나타내었다. 6 mm 단일 선재 샘플과 6 mm 선재 샘플 2 개를 Edge to Edge로 배치한 경우의 자화손실의 크기는 40 mT 이상에서 거의 동일한 크기를 갖지만, 약 40 mT 미만에서는 Edge to Edge로 배열한 선재의 자화손실이 좀 더 큰 특징을 나타내었다. 이는 인접선재의 영향이 낮은 외부자장의 영역에서 크게 나타나고 있음을 나타내는 것임을 알 수 있다 [6]. 더욱이 6 mm 폭 샘플 두 개를 Edge-to-Edge로 배치한 경우는 12 mm 폭 선재를 6 mm 폭으로 필라멘트화 즉 다심화 시킨 것으로 볼 수 있다. coated conductor를 다심화 한 경우 인접선재의 영향이 사라지는 구간에서 자화손실은 단심인 경우의 자화손실 크기에 다심화 한 개수 만큼 반비례하여 감소하는 경향을 보이는데 [7], 본 연구의 측정결과에서도 이러한 경향은 잘 나타났다.

2.2 SmBCO coated conductor의 자화손실

표 2는 자화손실 측정에 사용한 SmBCO coated conductor 샘플 선재의 제원을 나타내고 있다. 실험에 사용한 선재는 폭이 4 mm로 동일하지만, 선재 전체의 두께와 초전도 층의 두께가 0.05 mm, 1.2 μ m와 0.1 mm, 1.7 μ m로 서로 다른 두 개의 샘플을 사용하였다.

Table 2. Specifications of SmBCO coated conductors.

HTS tape	SmBCO coated conductor
Sample #1	
width	4 mm
Thickness(SmBCO layer)	0.05 mm(1.2 μ m)
Critical current(measured)	87.5 A at 77 K, self field
Sample #2	
width	4 mm
Thickness(SmBCO layer)	0.1 mm (1.7 μ m)
Critical current(measured)	28.6 A at 77 K, self field

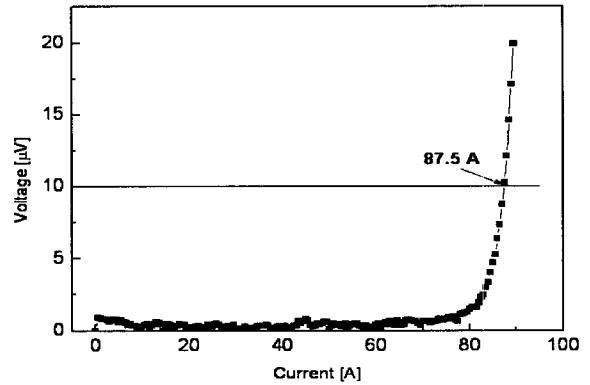


Fig. 8. V-I curve of sample #1.

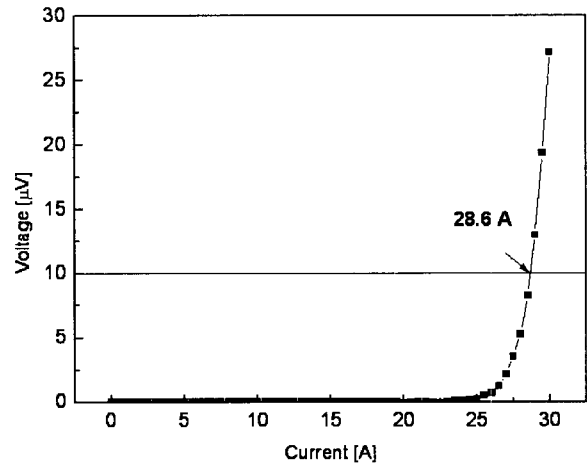


Fig. 9. V-I curve of sample #2.

샘플의 임계전류는 77 K, 자기자계하에서 측정한 결과, 그림 8과 9에서와 같이 Sample #1은 87.5 A, Sample #2는 28.6 A를 각각 나타내었다.

그림 10은 Sample #1과 #2의 자화손실 측정 결과를 나타낸다. 그림 7에서와 같이 동일한 폭과 초전도층의 두께 그리고 임계전류를 갖는 경우에 대한 strip 모델의 해석 결과를 SmBCO CC Sample #1, #2의 자화손실 결과와 비교하여 나타내었다. YBCO CC 샘플의 자화손실은 strip 모델의 해석 결과와 비교할 때 비슷한 크기와 자화손실 경향을 나타낸 것과는 달리 SmBCO CC 샘플의 전체적인 자화손실의 크기와 그 경향은 strip 모델의 해석과는 많이 차이를 보이고 있음을 나타내고 있다. 임계전류가 작은 Sample #2의 경우는

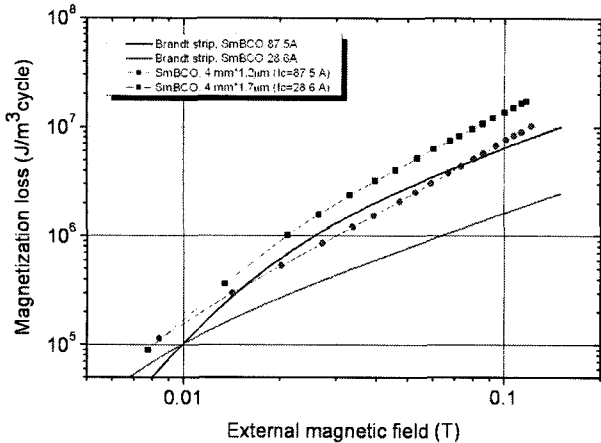


Fig. 10. Magnetization losses of SmBCO CC.

Sample #1의 경우에 비해서 strip 모델의 해석 결과와 측정결과가 더 많은 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 제원이 서로 다른 두 개의 SmBCO CC의 자화손실을 측정하였다. 측정 시스템 확인 및 측정 결과 비교를 위해 YBCO CC의 자화손실과 strip 모델의 자화손실 해석 결과를 통해 SmBCO CC의 자화손실을 비교 검토하였다. 측정 결과, SmBCO의 자화손실은 YBCO CC와 strip 모델의 해석 결과와는 많은 차이를 보였다. SmBCO CC의 자화손실 결과는 동일한 측정 시스템에서 측정한 YBCO CC의 결과로 볼 때, 측정 장비 및 측정 방법에 오류가 있다고 보기는 어렵다고 할 수 있다. 이러한 SmBCO CC 샘플의 자화손실 결과는 샘플의 초전도 층의 균일도에 대한 문제인 것으로 판단된다. 앞으로 좀 더 다양한 샘플과 측정을 통해 SmBCO CC 선재의 교류손실에 관한 연구를 진행 할 예정이다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

[1] 김태형, 오상수, 하동우, 김호섭, 고락길, 송규정, 하홍수, 이남진, 박경채, "SmBCO 고온 초전도 선재의 안정화재 특성", 한국초전도·저온공학회논문지, 9권 3호, pp. 9-11, 2007.
 [2] 이지광, 임형우, 박명진, 차귀수, "YBCO CC 적층 및 BSCCO tape 적층선재에서 수직자화손실 값을 이용한 임의 방향 자화손실 평가", 대한전기학회 논문지, B56권 2호, pp.282-288, 2007.
 [3] 박명진, 임형우, 차귀수, 이지광, "Total AC Loss by Simultaneously Applied AC Transport Current and AC External Magnetic Field in

BSCCO Tape", 한국초전도·저온공학회논문지, 7권 1호, pp.24-27, 2005. 11.

[4] Jiang and N. Amemiya, "An experimental method for total AC loss measurement of high Tc superconductors," Supercon. Sci. Technol., Vol. 17, pp. 371-379, 2004.
 [5] Ernst Helmut Brandt, and Mikhail Indenbom, "Type-II-superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field," Physical review B, Vol. 48, No. 17, pp. 893-906, 1993.
 [6] 박명진, 임형우, 이광연, 차귀수, 이지광, "적층 배열형상에 따른 BSCCO 적층선재의 자화손실 특성 수치해석 및 측정", 대한전기학회논문지, 55B권, 2호, pp.83-87, 2006.
 [7] 이광연, 박명진, 차귀수, 이지광, "YBCO CC의 Slit 개수에 따른 자화손실 저감 특성 해석", 대한전기학회 학회논문집, B 권, pp1249-1251, 2005.

저 자 소 개



박명진 (朴明陣)

1973년 12월 7일생, 1999년 순천향대 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2005년 동 대학원전기 공학과 졸업(공학박사). 현재 기초전력연구원 선임 연구원.



김우석 (金佑錫)

1970년 6월 12일생, 1996년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업, 1998년 동 대학교 공과대학 대학원 졸업 (공학석사), 2002년 동 대학교 공과대학 대학원 졸업(공학박사), 2005 - 2007 MIT/FBML Researcher, 2002- 현재 기초전력연구원 전임연구원



이지광 (李志光)

1966년 6월 1일생. 1989년 서울대 전기공학과 졸업, 1991년 동 대학원 졸업 (공학석사), 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 우석대학교 전기전자공학과 부교수.



최경달 (崔景達)

1962년 2월 12일생. 1984년 서울대학교 공과대학 전자공학과 졸업, 1986년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사), 1993년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사), 1993년-1997년 기초 전력공학공동연구소 전임연구원, 1998년-현재 한국산업기술대학교 에너지 대학원 교수



오상수(吳詳秀)

1959년 11월 1일 생. 1983년 경북대 금속공학과 졸업, 1992년 Kyoto대 대학원 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도재료연구그룹 그룹장.



고락길(高樂吉)

1972년 5월 1일 생, 1995년 배재대 물리학과 졸업, 1997년 동대학원 졸업(이학석사), 현재 한국전기연구원 선임연구원.



하홍수(河洪秀)

1969년 5월 21일 생, 1995년 성균관대공금속공학과 졸업, 1997년 동 대학원 금속공학과 졸업(공학석사), 2007년 대학원 신소재공학부 졸업(공학박사), 재 한국전기연구원 초전도재료연구그룹 선임연구원.



문승현(文勝鉉)

1964년 9월 23일생, 1987년 서울대학교 물리학과 졸업, 1994년 동 대학원 졸업(이학박사), 1994~2002년 LG전자기술원 선임연구원, 책임연구원, 현재 주식회사 서남 대표이사



김호섭(金昊燮)

1972년 3월 4일 생, 1995년 연세대 물리학과 졸업, 2003년 한국과학기술원 물리학과 졸업(이학박사), 현재 한국전기연구원 초전도재료연구그룹 선임연구원.



유상임(劉相任)

1959년 10월 10일생. 1982년 서울대학교 무기재료공학과 졸업. 1984년 동 대학원 무기재료공학과 졸업(공학석사), 1992년(미국) Iowa State University 졸업 (공학박사), 1992-1993년 (미국) Ames Laboratory 박사후기 연구원, 1993-1995년 (일본) ISTEK 초빙연구원, 1995-1998 (일본) Railway Technical Research Institute 주임연구원, 1998- 현재 서울대학교 재료공학부 부교수