

## No-insulation 기법을 적용한 소용량 고온 초전도 코일의 영구전류 특성에 관한 연구

### A Study on the Basic Characteristics of Persistent Current Mode Operation for Small Scale High Temperature Superconducting Coil with No-insulation Winding Method

이태성<sup>1</sup>, 이우승<sup>2</sup>, 최석진<sup>3</sup>, 조현철<sup>3</sup>, 김형준<sup>3</sup>, 이지호<sup>2</sup>, 강제식<sup>1</sup>, 권오준<sup>4</sup>, 이해근<sup>5</sup>, 고태국<sup>6,\*</sup>

T.S. Lee<sup>1</sup>, W.S. Lee<sup>2</sup>, S. Choi<sup>3</sup>, H.C. Jo<sup>3</sup>, H.J. Kim<sup>3</sup>, J. Lee<sup>2</sup>,  
J.S. Kang<sup>1</sup>, O.J. Kwon<sup>4</sup>, H.G. Lee<sup>5</sup>, T.K. Ko<sup>6,\*</sup>

**Abstract:** This paper aims to evaluate the feasibility of using no-insulation High Temperature Superconducting (HTS) coil in persistent current mode system. A HTS coil in persistent current mode system usually includes one or more non-superconducting joints in its circuit. And the current decaying rate of the coil is affected by the resistance of joint in persistent current circuit. If the resistance of joint is large, decaying rate of the current drastically increases. Therefore, reducing the joint resistance of the HTS coil is very important in persistent current mode system. In this paper, the no-insulation HTS coil is suggested as a way to reduce the joint resistance with the embedded parallel contact resistance naturally made by no-insulation winding method. Two small coils are fabricated with insulation and no-insulation winding method, and persistent current mode system experiment of each coil is preformed and analyzed.

**Key Words:** superconductor coil, persistent current mode, no-insulation, contact resistance

## 1. 서 론

초전도 기기들은 고자장을 만들기 위해 초전도 자석은 사용하며, 고온 초전도 자석을 제작할 경우에는 절연은 필수적이라고 고려된다[1].

하지만 최근에 턴과 턴 사이를 절연하지 않은 no-insulation 코일에 대한 연구가 활발히 진행이 되고 있다[1-3].

No-insulation 고온 초전도 코일은 퀀치가 발생하면 전류가 다른 턴으로 바이패스가 발생하기 때문에 국부적인 온도상승을 막아주어 열적인 안정도를 증가시키며, 과전류에서도 안전하다. 그리고 크기가 작아지는 장점이 존재한다[1,2].

고온 초전도선재를 사용한 Persistent Current Switch(PCS) 시스템의 경우에는 초전도 자석 간 접합저항이 발생하고, 접합저항은 영구전류모드 운전에서 전류 감쇄율이 높아지는 문제를 야기한다. 전류 감쇄율이 큰 고온초전도 자석은 시스템의 안정도를 감소시키는 문제를 발생시키며, 전류 보상 주기를 증가시키는 문제가 일어난다[4].

본 연구에서는 no-insulation 권선기법을 적용한 코일과 기존의 방법에 따라 제작된 insulation 코일을 각각 제작하고, 영구 전류 모드에서의 전류 감쇄율의 차이를 비교하는 실험을 수행하였다. 실험결과를 이용하여 no-insulation 코일의 접촉저항을 산출 하였다.

## 2. 샘플코일 제작 및 실험 set-up

### 2.1. Insulation 코일과 No-insulation코일

영구전류 모드 운전을 하기 위해서는 폐회로가 구성이 되어야 하며, 폐회로를 만들기 위해서 반드시 접합저항( $R_j$ )이 발생한다. 그림 1에 insulation 코일과 no-insulation 코일로 구성된 영구전류시스템의 등가 회로를 나타내었다.

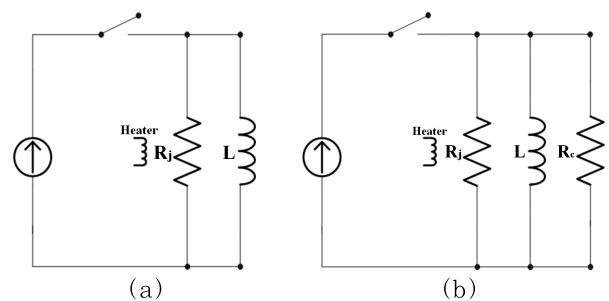


Fig. 1. (a) circuit diagram of insulation coil on PCS system (b) circuit diagram of No-insulation coil on PCS system.

<sup>1</sup>학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 석사과정

<sup>2</sup>학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 통합과정

<sup>3</sup>학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 박사과정

<sup>4</sup>학생회원 : 고려대 대학원 신소재공학과 석사과정

<sup>5</sup>정 회원 : 고려대 공과대학 신소재공학과 교수

<sup>6</sup>정 회원 : 연세대 공과대학 전기전자공학과 교수

\*교신저자 : tkko@yonsei.ac.kr

원고접수 : 2012년 08월 10일

심사완료 : 2012년 09월 21일

게재확정 : 2012년 09월 21일

그림 1(a)는 insulation 코일로 구성된 영구전류시스템의 회로를 나타내며, 폐회로를 구성하는 접합저항( $R_j$ )만 존재한다. 그림 1(b)는 no-insulation 코일로 구성된 영구전류시스템의 회로를 나타내며, 턴과 턴 사이를 절연을 하지 않기 때문에 접촉저항( $R_c$ )이 발생한다. 접촉저항( $R_c$ )과 접합저항( $R_j$ )가 회로상의 병렬 구조로 되어 있기 때문에 no-insulation 코일의 전체 저항은 접합저항( $R_j$ )보다 낮아지게 된다. 저항이 낮아지므로 전류 감쇄율은 감소하고 영구전류 모드 운전시간은 증가 할 것이다.

**2.2. 샘플 코일 제작**

영구전류 모드에서의 전류 감쇄율을 비교하기 위해서 insulation과 no-insulation 더블 팬케이크 코일을 제작하였다.

영구전류 모드를 운전을 하기 위해서는 폐회로를 만들어야 하며, 폐회로를 만든 후에는 코일의 임계전류 측정을 할 수 없다. 따라서 코일을 폐회로로 만들기 전에 개방 상태에서 임계전류를 측정했다.

고온 초전도체 퀀치 발생 기준 전계  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$  기준으로 임계전류를 산출 하였으며 그림 2는 각각의 코일의 임계전류 측정 V-I 곡선을 나타낸 것이다.

Insulation 코일의 임계전류는 72 A, no-insulation 코일의 임계전류는 84 A로 측정되었다. 보빈과 권선과정을 동일하게 하였지만, 다른 릴에 보관된 선재를 사용하여 임계전류가 다르게 나타났다. 운전 전류는 약 44 A 로 결정하였다.

표 1은 고온초전도 코일의 사양을 나타낸 것이다. GdBCO 선재를 사용했으며 각 층별 25턴 총 50턴으로 구성 되어 있다. 코일의 인덕턴스는 0.2 mH이다.

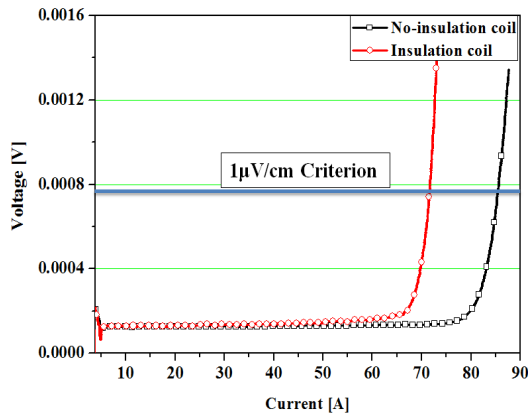


Fig. 2. V-I curve of double pancake coil before joint.

Table 1. Specification of sample coil.

	insulation 코일	no-insulation 코일
보빈 외경	60.10 [mm]	
선 재	GdBCO	
권 선 수	50 [turn]	
인덕턴스	0.2 [mH]	
임계전류	72 [A]	84 [A]

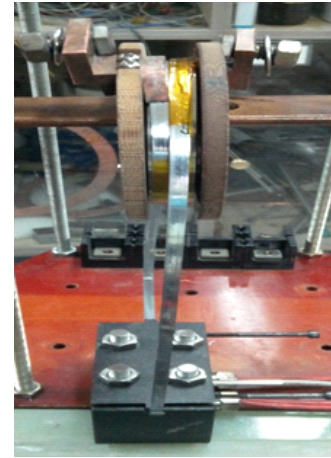


Fig. 3. Designed joint equipment for equal joint resistance.

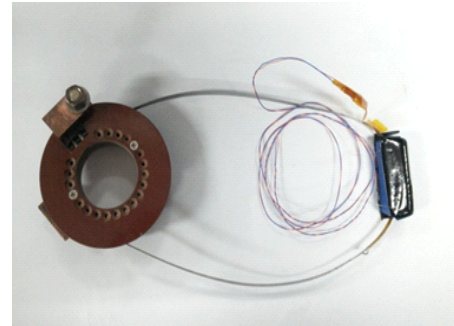


Fig. 4. Experiment set-up for PCS test.

임계전류 측정 후, 영구전류 운전을 위한 폐회로를 구성하기 위해서 고온초전도 선재를 접합하였다. 그림 3과 같이 접합저항을 동일하게 만들기 위해서 고안한 접합 장치를 이용하였다[5]. Sn62.8 % Pb36.8 % Ag0.4 % 으로 구성된 솔더를 사용하였고, 접합 선재 간 동일한 압력을 가하기 위하여 토크 렌치를 사용하여 동일한 토크로 선재에 가하는 압력을 동일하게 만들어 주었다.

그림 4는 완성된 코일의 사진이다. 코일의 접합 부위에 니크롬선을 이용하여 히터를 설치하였다. 히터와 선재사이에는 E type의 열전대(Thermocouple)를 사용하여 온도를 측정하였고 단열조건을 만들기 위해서 에폭시로 함침을 하였다.

표 2는 사용한 히터에 대한 사양이다. 히터에 전류를 인가시키면 접합부위에 퀀치가 발생하여, 초전도 코일로 전류가 흐르게 만들었다. 히터에 전류 인가 후 온도는 132 K이 되도록 하였다.

Table 2. Specification of heater.

	insulation 코일	no-insulation 코일
히터 저항	56.5 [ $\Omega$ ]	
히터 인가전류	0.34 [A]	
전류인가 후 온도	132 [K]	

### 3. 실험결과 및 분석

본 실험은 77 K 액체질소 온도 하에서 이루어졌으며  $I_{op}$ 를 44 A,  $I_{op}/I_c$ 를 37 %로 설정하여 두 번의 실험을 수행하였다. 그림 5는 초전도 자석의 충전모드 운전을 나타낸 그림이다. 그림 5의 (a)는 히터에 인가한 전류를 나타내며 히터에 0.34 A를 인가시켰을 때, 그림 5의 (b)처럼 132 K이 나타난다. 그림 5의 (c)는 통전전류를 나타내며 0.4 A/s로 44 A까지 도달 후 300초 동안 유지 시키고 전원을 차단하였다. 44 A 도달 후 240초 후에 히터전류를 차단시켰다.

그림 5과 같은 순서로 충전을 하였으며  $I_{op}/I_c$ 를 동일하게 하기 위하여 (c)의 파워서플라이의 전류를 Insulation 코일은 27 A No-insulation 코일은 31 A로 변경하여 실험을 수행하였다. 전류 감쇄율은 초전도 자석의 중심에 위치한 홀센서를 이용하여 측정하였다.

그림 6은 영구전류 모드 운전할 때의 홀센서를 이용하여 측정된 자장 값을 전류로 환산하여 나타냈으며, 파워서플라이를 끈 시점부터의 그래프이다. 44 A로 실험한 결과의 그래프를 보면 초기 충전된 전류의 차이가 발생하였고, 이 원인은 다음과 같다. 히터 동작을 끈 후 전류의 패스가 접합 부분으로도 흐르게 되며 두 코일의 접합저항 값이 동일하게 나오지 않았기 때문에, 히터동작을 끈 후에 감쇄가 발생되어서 감쇄의 차이 때문에 시작전류가 다르게 나타난 것으로 보인다.

영구모드의 결과를 식 (1)을 이용하여 시스템의 전체 저항 값을 계산할 수 있다.  $L$ 은 인덕턴스,  $T_i$ 와  $T_e$ 는 각각 영구전류모드의 중간 두 시점이고,  $I_i$ 와  $I_e$ 는 각각  $T_i$ 와  $T_e$ 에 대응되는 전류이다.

$$R_{tot} = \frac{L}{T_i - T_e} \times \ln\left(\frac{I_e}{I_i}\right) \quad (1)$$

Flux-flow, flux-creep에 의한 영향을 받을 가능성이 있는 방전시점의 앞부분과 노이즈에 영향을 많이 받는 뒷부분을 제외하였다.  $T_i$ 를 600 초,  $T_e$ 는 900 초 일 때의 식 (1)을 이용하여 저항을 산출 하였다.  $I_{op}$ 를 44 A를 동일하게 설정했을 때, insulation 코일의 저항은  $1.06 \mu\Omega$ , no-insulation 코일의 저항은  $0.3 \mu\Omega$ 으로 산출 되었다.  $I_{op}/I_c$ 를 37 %로 설정했을 때는 insulation 코일의 저항이  $1.02 \mu\Omega$ , no-insulation 코일은  $0.3 \mu\Omega$ 으로 산출 되었다.

산출된 저항 값이 접합저항의 차이에 의해서 나타난 것인지 확인하기 위해서 코일 양단의 접합 부위를 잘라서 접합저항을 측정하였다. 그림 7은 4단자법을 이용하여 접합저항을 측정한 그래프이다. 4단자법 측정결과 insulation 코일의 접합저항은  $1.04 \mu\Omega$ , no-insulation 코일의 접합저항은  $0.5 \mu\Omega$ 으로 측정 되었다. 접합저항을 동일하게 만들기 위해서 접합 장치를 사용했지만, 솔더 양의 차이 때문에 동일한 저항이 나오지 않았다.

Insulation 코일의 경우 시정수를 이용하여 계산한 저항과 실험을 통해서 측정된 저항의 차이가 약 2 %로 나타났다. 이는 노이즈에 의한 오차 범위로 생각된다.

No-insulation 코일은 저항의 차이가 40 %로 나타났다. 이러한 차이는 no-insulation 코일 내에서 턴과 턴 사이를 통하는 전류패스가 존재하며, 등가회로에서는 접합저항( $R_j$ )과 접촉저항( $R_c$ )이 병렬로 구성되어 되어 코일의 전체 저항이 낮아진다.

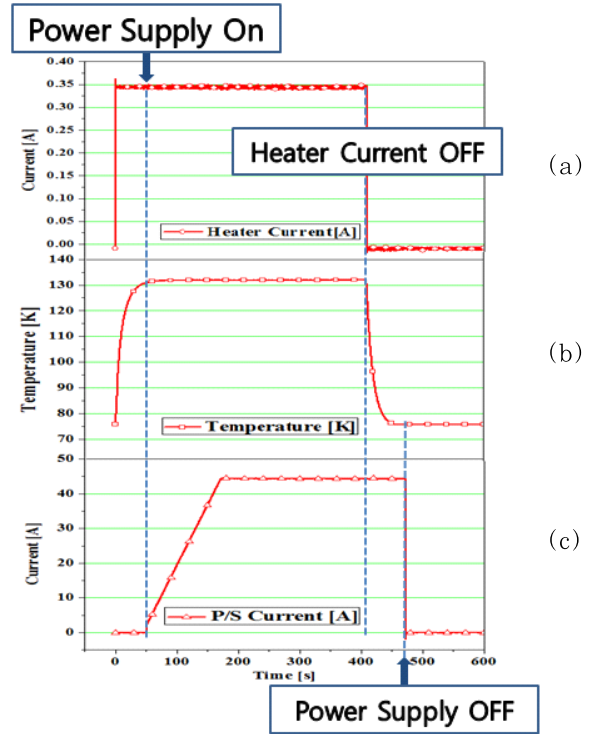


Fig. 5. Operation sequence of persistent current switch system.

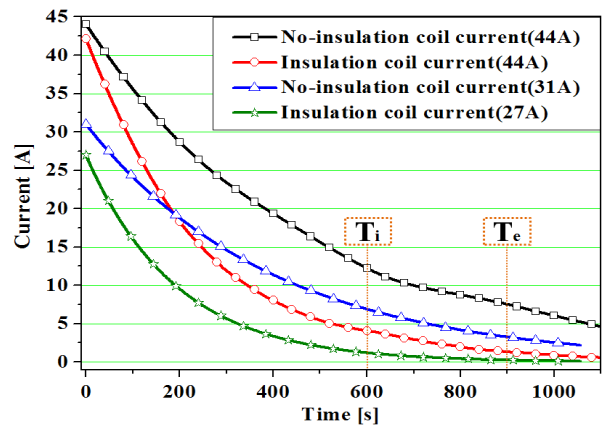


Fig. 6. Current decay waveform of each coil in the closed loop.

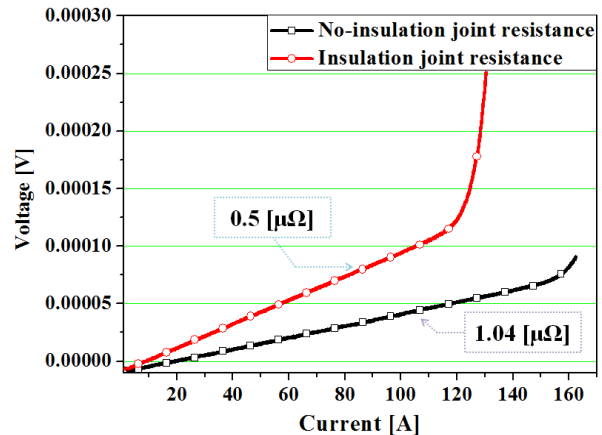


Fig. 7. Joint resistance waveform using 4point probe.

Table 3. Experiment and formula results comparison of 4point probe and time constant.

	Insulation 코일 저항	No-insulation 코일 저항
4단자법 실험 측정	1.04 [ $\mu\Omega$ ]	0.5 [ $\mu\Omega$ ]
시정수 수식 사용	1.06 [ $\mu\Omega$ ](44A)	0.3 [ $\mu\Omega$ ](44A)
	1.02 [ $\mu\Omega$ ](27A)	0.3 [ $\mu\Omega$ ](31A)

따라서 no-insulation 코일의 저항이 감소하므로 insulation 코일보다 영구전류 모드 운전이 좀 더 효과적이다.

실험을 통해서 얻어진 값을 토대로 no-insulation 코일의 접촉 저항을 계산을 하였다. 식 (2)는 병렬저항의 등가회로에서 합성저항을 구하는 식을 나타낸 것이다.  $R_c$ 는 접촉저항이고,  $R_{tot}$ 는 시정수를 이용하여 산출한 저항 값,  $R_j$ 는 접합저항이다.

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_j} + \frac{1}{R_c} \quad (2)$$

$$R_c = \frac{R_{tot} \times R_j}{R_j - R_{tot}} \quad (3)$$

식 (2)는  $R_c$ 로 정리하여 나타낸 수식이 식 (3)이다. 식 (3)을 통하여 접촉저항이  $0.75 \mu\Omega$ 로 산출되었다. 권선 과정에 변화를 통해서 접촉저항을 낮출 수 있으며, 전체 저항이 낮아져 전류 감쇄율의 감소가 예상된다.

전류 감쇄율의 감소는 영구전류 운전시간의 증가와 전류 보상 주기를 감소시킬 수 있으며 따라서 시스템 안정도와 효율을 향상시킬 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 GdBCO 선재를 이용하여 insulation 및 no-insulation 권선 방법으로 PCS 운전을 위한 소용량 더블 팬케이크 코일을 제작하고, 영구전류 모드의 전류 감쇄율의 차이를 실험을 통하여 비교 분석 하였다. Insulation 코일에서 측정된 코일의 저항 값은 RL회로의 전류 감쇄 현상을 통하여 추론된 식 (1)을 통하여 산출된 값과, 접합 저항 측정을 위한 4단자법을 이용하여 측정된 값이 2 % 차이를 보이며 이는 오차 범위로 보인다. 하지만 no-insulation 코일의 저항값의 경우 식 (1)을 통하여 산출한 값과, 4단자법을 이용한 측정된 값 사이에 40 %의 차이가 존재함을 확인하였다. 이는 no-insulation 코일이 가지는 특성상 발생하는 턴과 턴 사이의 접촉저항에 의한 영향으로 판단된다. No-insulation 코일의 턴과 턴 사이의 접촉저항은 등가회로상 병렬저항으로 해석되며, 이를 이용하면 고온 초전도 코일의 영구전류 운전에서 접촉저항의 구조를 가지지 않는 코일에 비하여 더 낮은 전류 감쇄율을 가질 수 있도록 코일을 설계할 수 있다. 따라서 no-insulation 권선 방법을 적용한

다면 낮은 전류 감쇄율을 요구하는 고온 초전도 코일을 사용하는 기기의 효율을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 국책 연구 사업임(No.202012M1A7A1A02034484).

#### 참 고 문 헌

- [1] Seungyong Hahn, Dong Keun Park, Juan Bascuñán, and Yukikazu Iwasa, "HTS Pancake Coils Without Turn-to-Turn Insulation", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 21, no. 3, pp. 1592-1595, June 2011.
- [2] Sukjin Choi, Hyun Chul Jo, Young Jin Hwang, Seungyong Hahn and Tae Kuk Ko, "A Study on the No insulation Winding Method of the HTS Coil", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 22, no. 3, in press, June 2012.
- [3] Seungyong Hahn, Dong Keun Park, Juan Bascuñán, and Yukikazu Iwasa, "No-insulation(NI) HTS Inserts for > 1 GHz LTS/HTS NMR Magnets", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 22, no. 3, in press, June 2012.
- [4] 조현철, 장기성, 장재영, 김형준, 정운도, 운용수, 고태국, "BSCCO Magnet 제작 및 영구전류모드에서의 전류 보상 운전 특성", 한국초전도·저온공학회논문집, 12권 1호, pp. 56-60, 2010년.
- [5] 김형준, 조현철, 장기성, 양민규, 안민철, 고태국, "고온초전도 마그넷 적용을 위한 YBCO Coated Conductor의 곡률 접합방법 연구", 한국초전도 저온공학회 논문집, 12권 1호, pp. 17-21, 2010년.

#### 저 자 소 개



##### 이태성(李太成)

1986년 9월 2일생, 2012년 대전대 전기공학과 졸업, 현재 연세대 대학원 전기 전자공학과 석사과정.



##### 이우승(李愚承)

1987년 2월 19일생, 2010년 연세대 전기전자공학부 졸업, 현재 동 대학원 전기전자공학과 통합과정.





**최석진(洪吉童)**

1974년 6월 10일생, 1998년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



**조현철(趙賢哲)**

1979년 11월 30일생, 2007년 동국대 전기공학과 졸업, 2009년 연세대 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기전자공학과 박사과정.



**김형준(金炯駿)**

1983년 7월 16일생, 2009년 인하대 정보통신공학과 졸업, 2011년 연세대 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기전자공학과 박사과정.



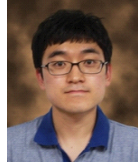
**이지호(李知浩)**

1986년 10월 22일생, 2010년 연세대 공대 전기전자공학부 졸업, 현재 동 대학원 전기전자공학과 통합과정.



**강재식(姜在植)**

1984년 2월 6일생, 2011년 숭실대 정보통신전자공학부 졸업, 현재 연세대 대학원 전기전자공학과 석사과정.



**권오준(權五俊)**

1986년 8월 21일생, 2011년 고려대 공대 신소재공학부 졸업, 현재 동대학원 신소재공학과 석사과정.



**이해근(李海根)**

1963년 09월 26일생, 1987년 고려대 공대 재료공학과 졸업, 1990년 미 일리노이대 대학원 재료공학과 졸업(공학석사), 1995년 동대학원 재료공학과 졸업(공학박사), 1995~1997년 MIT, FBML, 박사후과정, 1997~2006년 MIT, FBML 연구교수, 2006~현재 고려대학교 신소재공학과 교수.



**고태국(高太國)**

1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업(M.SC), 1986년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업(Ph.D), 1986년~1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 2008~2010년 한국초전도·저온공학회 회장, 현재 연세대 전기전자공학과 교수, 현재 한국초전도·저온공학회 명예회장.