

## 고온 초전도 더블 팬케이크의 접합 수 감소를 위한 권선 방법에 관한 연구

### A Study on the Winding Method for Reducing Joints of the High Temperature Superconducting Double Pancake Coil

강재식<sup>1</sup>, 조현철<sup>2</sup>, 장재영<sup>2</sup>, 황영진<sup>2</sup>, 이지호<sup>1</sup>, 이우승<sup>1</sup>, 박영건<sup>1</sup>, 고태국<sup>3,\*</sup>

J.S. Kang<sup>1</sup>, H.C. Jo<sup>2</sup>, J.Y. Jang<sup>2</sup>, Y.J. Hwang<sup>2</sup>, J. Lee<sup>1</sup>, W.S. Lee<sup>1</sup>, Y.G. Park<sup>1</sup>, T.K. Ko<sup>3,\*</sup>

**Abstract:** A double pancake winding method is widely used to make the superconducting magnet, using high temperature superconductor (HTS) tape. In the double pancake winding method, the joints with contact resistances between double pancake coils are inevitably needed. The electrical joule heating on the contacts causes refrigerant loss during operation. And a space outside the winding, for splices and mechanical support, is more than that for its layer-wound equivalent. In this paper, a double pancake winding method in order to reduce the number of the joints was proposed. Both of the double pancake coils using the conventional winding method and the proposed winding method have been fabricated and tested to make the solution technically feasible in the double pancake winding method. Especially, critical-current tests of the fabricated double pancake coils were conducted in order to show the same performance and confirm contact resistances between double pancake coils.

**Key Words:** contact resistance, critical current test, double pancake winding method, electrical joule heating, the joint.

## 1. 서 론

고온 초전도체를 이용한 마그넷 연구가 활발히 진행되고 있는 가운데, 마그넷 제작에 더블 팬케이크 권선법이 널리 이용되고 있다. 더블 팬케이크 권선은 얇은 테이프 형태인 고온 초전도체에 용이하며, 여러 개의 더블 팬케이크 모듈을 접합하여 마그넷을 구성 하였을 때, 열이나 기계적 외란에 손상된 팬케이크 모듈을 교체할 수 있다는 장점을 지니고 있다[1]. 그러나 각 더블 팬케이크 모듈을 연결하기 위해서 더블 팬케이크 모듈 사이에 반드시 접합 부분이 발생한다[2]. 여기서 접합 부분은 NMR/MRI같은 응용기기에서 영구전류를 동작시키기 위해서는 전류의 손실을 일으키는 불가피

한 저항이 되며[3], 저항에 의하여 발생하는 열 때문에 원치 않는 냉매 손실을 가져올 수 있다. 즉, 연속적으로 권선되는 더블 팬케이크 권선 방법은 고온 초전도 선재를 더블 팬케이크 형태로 유지하며 모듈 간에 접합을 하지 않고 권선하는 방식으로 접합부에서 발생하는 저항에 의한 손실을 감소시킬 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이와 같이 기존 더블 팬케이크 권선 방법의 취약점을 보완하기 위해 접합 저항을 발생시키지 않고 권선할 수 있는 권선 방법을 제시하였다.

그리고 새로운 권선 방법의 절차를 설명하고 권선의 신뢰성을 확인하기 위해서 기존의 권선 방법과 새로운 권선 방법을 이용하여 샘플 코일을 제작하였다. 권선 시, 불필요한 고온 초전도 선재의 손상 여부를 확인하기 위해 각 코일의 임계전류를 측정하였다. 또한 퀀치 발생 전, 선형적인 구간에서 발생하는 전압을 이용하여 코일 내부의 접합 저항을 판단하고 그 크기를 추정하였다.

## 2. 연속 더블 팬케이크 권선 및 실험

### 2.1. 기존 더블 팬케이크와 연속 더블 팬케이크

더블 팬케이크 권선 방식은 싱글 팬케이크를 적층할 때, 불가피하게 발생하는 접합을 절반으로 줄일 수 있으며 팬케이크 형태를 가지면서 2층으로 권선할 수 있는 독창적인 방식으로 마그넷을 제작할 때 적합한 권선 방법이다. 그러나 싱글 팬케이크와 마찬가지로 더블 팬케이크 간에 접합이 발생한다. 이것은 더블 팬케이크의 단점으로써, 이를 보완하기 위해서 레이어 권선 방법이 한 가지 대안으로 평가되고 있다[3]. 하지만, 레이어 권선 방법은 피치부가 연속적으로 발생한다는 단점을 가지고 있다. 따라서 팬케이크 형태를 유지하면서 접합이 발생하지 않도록 권선할 수 있는 권선 방법을 제안하였다. 이것은 더블 팬케이크 권선 방법의 보완된 권선 방법이다. 그림 1은 각각 기존의 더블 팬케이크 권선 방법과 제안된 더블 팬케이크 권선 방법에 대한 그림이다. 본 논문에서는 제안된 더블 팬케이크 권선 방법을 연속 더블 팬케이크 권선 방법으로 명명하였다.

그림 1(a)의 더블 팬케이크 권선 방법은 보빈의 위층과 아래층에 동일한 선재 길이를 권선한다. 이를 위하여, 한 개의 더블 팬케이크 모듈을 완성하기 위한 총 선재 길이의 절반을 비어있는 릴에 옮긴 후, 다른 절반의 선재를 아래층에 먼저 권선하고 릴에 감아놓은 선재를 위층에 권선한다. 이렇게 완성된 더블 팬케이크 모듈은 한 개의 더블 팬케이크 코일이 된다. 따라서 제작된 각 더블 팬케이크 코일을 서로 접합하여 원하는 마그넷을 구성하게 된다.

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

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

<sup>3</sup>정 회 원 : 연세대 공과대학 전기전자공학과 교수

\*교신저자 : tkko@yonsei.ac.kr

원고접수 : 2011년 11월 28일

심사완료 : 2012년 03월 21일

게재확정 : 2012년 03월 21일

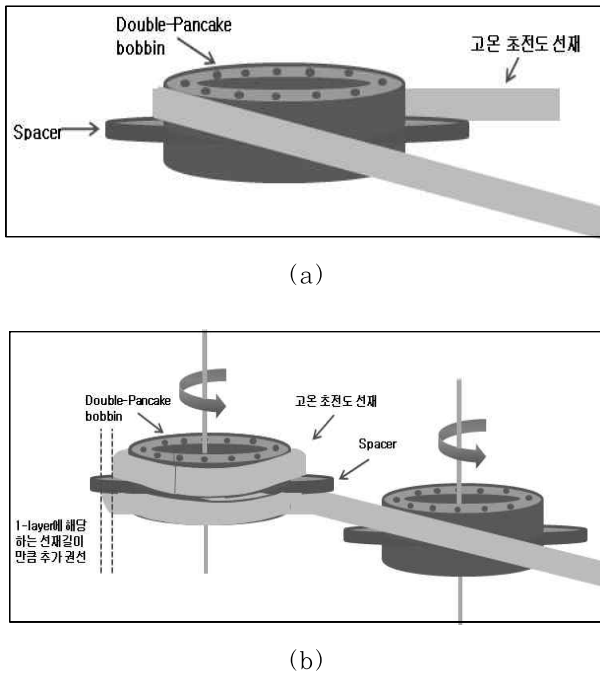


Fig. 1. (a) The concept of the conventional double pancake winding method. (b) The concept of the continuous double pancake winding method.

반면에 더블 팬케이크 코일을 접합 없이 더블 팬케이크 모듈로 구성된 마그넷을 제작하기 위한 연속 더블 팬케이크 권선 방법의 개념 다음과 같다. 그림 1(b)는 연속 더블 팬케이크 권선 방식이다. 기존 권선 방법에서는 한 개의 모듈을 완성하기 위한 선재만 필요하며 팬케이크 보빈을 축에 고정하고 축이 회전하며 고온 초전도 선재가 감기는 형태이다. 따라서 완성된 더블 팬케이크 보빈에서 선재를 끊지 않고 다음 더블 팬케이크 보빈에 권선하는 것이 무리였다. 그러나 먼저 권선된 보빈은 릴처럼 고정하고 다음에 권선 될 보빈이 추가적으로 권선 된다면 선재를 계속 이어서 권선할 수 있다. 구체적인 권선 순서는 다음과 같다.

마그넷을 만들기 위한 선재 소모 길이를 비어있는 릴에 감고, 더블 팬케이크 권선 방법을 이용하여 한 개의 모듈을 완성한다. 그림 2는 연속 더블 팬케이크 권선 방법을 이용한 코일을 제작하는 과정이다. 완성된 더블 팬케이크 모듈 A와 새로 권선되는 더블 팬케이크 모듈 B, 그리고 선재가 감겨있는 릴은 그림 2(a)와 같이 수평으로 맞춘다. 완성된 더블 팬케이크 모듈 A는 미리 옮겨놓는 릴의 역할을 하게 된다. 더블 팬케이크 모듈 A의 아래층에 모듈 B에 권선 될 절반의 선재를 감아놓는다. 이렇게 절반의 선재가 감겨있는 팬케이크 모듈 A를 그림 2(b)와 같이 모듈 B와 함께 같은 축에 고정하여 아래층에 선재를 권선한다. 모듈 B의 아래층에 선재가 권선되면, 완성된 더블 팬케이크 모듈 A의 아래층에 감아놓았던 선재를 모듈 B의 위층에 권선을 하게 된다. 각 더블 팬케이크 모듈을 적층시키기 위해서 모듈 B는 고정시키고, 완성된 더블 팬케이크 모듈 A를 고정 축으로부터 분리시켜 마무리 권선을 한다. 최종적으로 두 팬케이크 모듈이 적층되면 체결을 한다. 이 과정에서 선재가 감겨있는 릴은 계속 연결되어 있다. 이와 같은 방법을 반복적으로 수행하면 고온 초전도 선재가 연속적으로 권선된 더블 팬케이크 모듈이 적층되어 최종적으로 제작하려

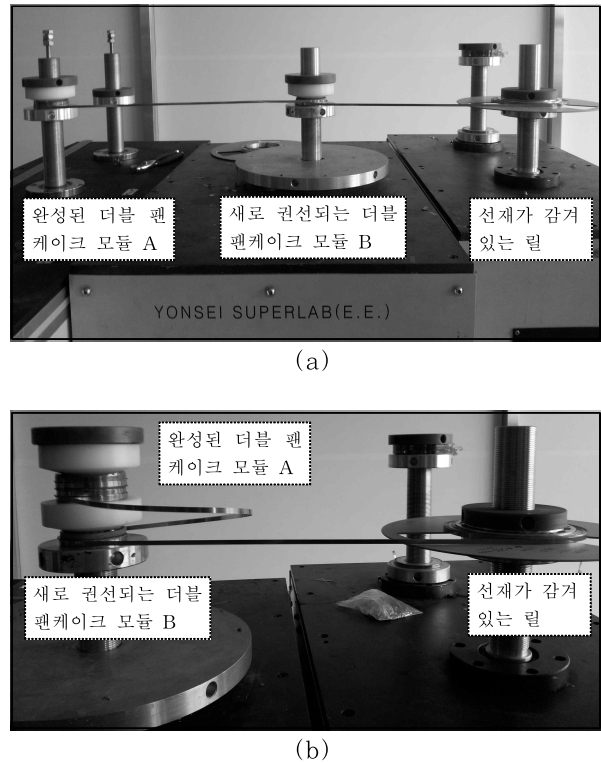


Fig. 2. (a) Stage 1. (b) Stage 2 Process of making coil used by the proposed double pancake winding method.

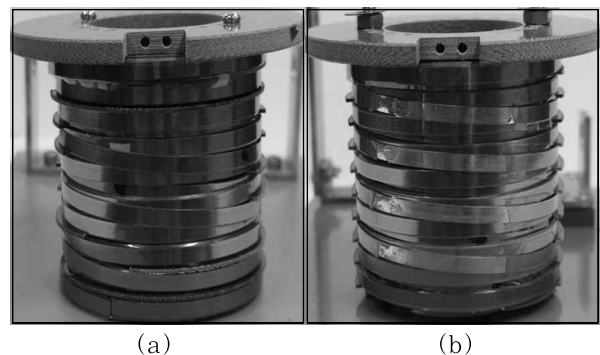


Fig. 3. (a) Sample coil 1 using the continuous double pancake winding method. (b) Sample coil 2 using the conventional double pancake winding method.

는 마그넷이 완성된다. 앞에서 언급 했듯이, 완성된 더블 팬케이크 모듈 A와 모듈 B가 적층되는 과정에서 보빈의 이동이 불가피하므로, 초전도 선재의 손상 가능성을 고려하여 새로운 더블 팬케이크 모듈 B는 축에 고정시키고 위층에 적층될 완성된 더블 팬케이크 모듈 A만 이동한다.

## 2.2. 샘플 코일 제작 및 실험 set-up

연속 더블 팬케이크 권선 방법의 가능성을 확인하기 위해서 샘플 코일을 제작하였다. 그림 3은 각각 연속 더블 팬케이크 권선 방법을 적용한 샘플코일 1과 기존 더블 팬케이크 권선 방법을 적용한 샘플코일 2이다. 또한 표 1은 실험에 사용된 샘플 코일의 사양이다. 두 코일은 더블 팬케이크 모듈 5개가 적층된 것으로 총 11.67 m의 고온 초전도 선재를 권선하였다.

Table 1. Specification of sample coil.

보빈 외경	60.10 mm
선재	GdBCO
단일 선재 임계전류	139 A
총 선재 소모량	11.67 m
각 층별 선재 turn 수 (각 층별 선재 소모량)	5 turn (976.37 mm)
총 보빈의 수	5 개
인덕턴스	0.12 mH

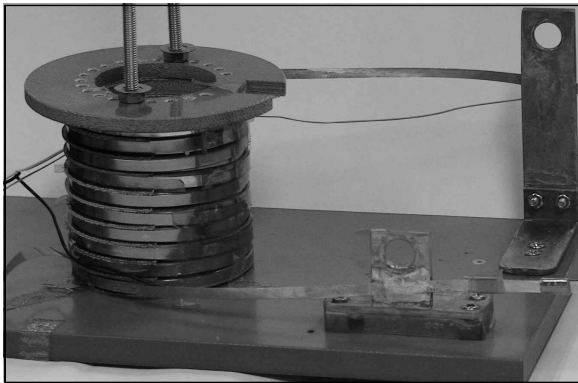


Fig. 4. Experimental set-up for critical current test.

그리고 선재 접합은 별도의 접합 장치를 이용하지 않고 모듈의 반경을 고려하여 접합부의 길이를 결정하고 접합 길이를 5 cm로 진행하였다[4]. 여기서 접합 물질은 인듐 비스무스를 사용하였다.

연속 더블 팬케이크 권선 시, 고온 초전도 선재의 손상에 대한 권선 방법의 신뢰성을 확인하기 위해서 임계전류 측정을 진행하였다. 동일한 인덕턴스를 갖는 두 코일은 같은 임계전류 값을 가질 것으로 예상하였다. 비록 고온 초전도 선재의 균등성을 고려한다면, 약간의 차이는 있을 것이다.

또한 코일 내부의 접합 저항을 확인하기 위해서 임계전류 측정으로부터 얻어진 데이터를 통해서 접합 저항의 크기를 추정하였다. 샘플코일 1은 연속적으로 선재가 권선 되었으므로 접합 저항이 0개이고, 샘플코일 2는 더블 팬케이크 모듈 5개가 적층 되었으므로 접합 저항이 4개이다. 동일한 인덕턴스를 갖는 두 코일의 접합 수가 다르기 때문에 임계전류 측정 시, 권치가 발생하고 전압이 급격히 올라가기 전 지점인 20 A에서부터 60 A까지에서 기울기 차이가 발생하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 5는 각 샘플코일의 임계전류 측정 결과이다. 총 선재 길이는 11 m이고 고온 초전도체 권치 발생 기준 전압인 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$ 를 적용하여 임계전류를 산출하면, 샘플코일 1의 임계전류 109 A, 샘플코일 2의 임계전류 107 A로 측정되었다. 실제 데이터는 109 A와 107 A이므로 약 1 %의 오차이며, 선재의 균등성을 고려한다면 허용 가능한 임계전류가 측정되었다. 따라서 기존의 권선 방법처럼 선재에 손상을 주지 않고 충분히 권선이 이뤄질 수 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 샘플코일 2는 접합 저항이 있기 때문에 임계

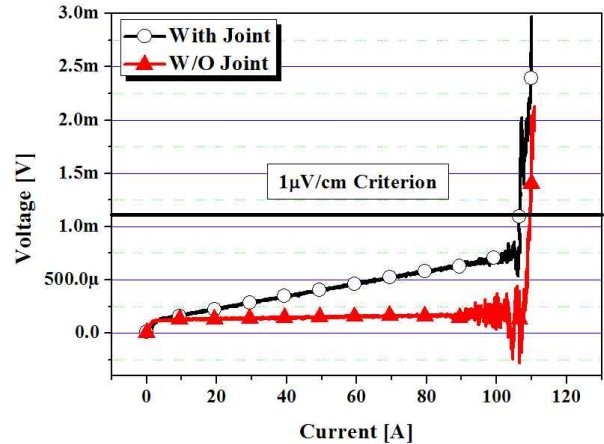


Fig. 5. V-I curve of double pancake coil with joint and double pancake coil without joint.

전류 이하의 구간에서 저항으로 인한 전압이 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 처음 전류를 인가하고 코일의 인덕턴스 성분에 의해서 전압강하가 발생한 후, 그래프의 기울기를 비교해보면 샘플코일 1에서는 전압이 발생하지 않고 저항이 0으로 계산되었다. 반면에, 샘플코일 2에서는 전압강하가 발생해서 전류가 증가함에 따라 전압도 동시에 증가하고 있다. 그래프의 기울기를 이용하여 코일 내부의 저항 값을 산출해 보기 위해서 선형적인 구간을 선택하였다. 즉, 샘플코일 2에 전류가 인가되고 23 A부터 63 A까지 40 A가 증가하는 동안, 250  $\mu\text{V}$ 에서 500  $\mu\text{V}$ 로 250  $\mu\text{V}$ 의 전압이 발생했으므로, 코일 내 저항이 약 6.25  $\mu\Omega$ 이다. 따라서 샘플코일 2의 저항 6.25  $\mu\Omega$ 은 마그넷을 동작시킬 때, 인가되는 전류만큼 1 sec당  $I^2R$ 의 줄열이 발생되어 액체헬륨의 기화열 0.0829 kJ/mol에 해당하는 양의 헬륨 소비가 증가할 것이다. 반면에, 샘플코일 1은 접합이 없으므로 접합 저항에 의한 전압이 발생하지 않는다. 즉, 접합 없이 더블 팬케이크 권선이 이뤄졌다는 사실을 알 수 있다. 이것은 코일 내 저항은 0이고 샘플코일 2에서 발생한 헬륨 소비를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 더블 팬케이크 형태를 가지며 더블 팬케이크 모듈이 적층되는 마그넷을 만들기 위해 불가피하게 발생하는 접합 저항 없이 연속적으로 고온 초전도 선재를 권선할 수 있는 권선 방법을 제안하였다. 기존의 더블 팬케이크 권선 방법에서 선재를 연장하여 권선하였고, 특별한 권선 장비를 이용하지 않았다. 연속 더블 팬케이크 권선 방법은 개념의 전환으로 복잡한 권선 방법과 별도의 장비를 요구하지 않았다. 모듈을 적층하는 과정에서 접합을 하지 않기 때문에 추가적인 제작과정이 생략될 수 있었다. 그러나 더블 팬케이크 권선 방법에서 가졌던 장점으로 손상된 모듈 교체 시에는 불가피한 접합이 이뤄지겠지만, 접합 수 측면에서 기존 더블 팬케이크 권선 방법에서 갖는 접합의 수를 줄일 수 있을 것이다.

기존 더블 팬케이크 권선 방법과 연속 더블 팬케이크 권선 방법을 이용하여 두 개의 샘플 코일을 제작함으로써, 새로 제안하는 권선 방법이 기존 더블 팬케이크 권선 방법에서 갖는 접합 저항 4개를 줄이며 권선

이 가능하다는 것을 입증하였다. 또한 실험을 진행하여 두 코일을 비교 분석하였다. 즉, 임계전류 측정을 통해 권선 방법에 대한 신뢰성을 입증하였다. 각 코일의 임계전류 실제 데이터는 109 A와 107 A이므로 약 1%의 오차를 나타냈다. 따라서 권선 방법에 대한 신뢰성을 확인하였을 뿐만 아니라, 모듈을 적층하는 과정에서 발생하는 접합 저항을 줄임으로써 두 코일의 임계전류 이하에서의 전압 발생 유무도 확인 할 수 있었다. 연속 더블 팬케이크 권선 방법을 이용한 코일에서는 저항이 0임을 입증하였고, 기존 더블 팬케이크 권선 방법을 이용한 코일에서는 접합 4개에 해당하는 6.25  $\mu\Omega$ 이 발생하였다.

향후에 접합이 없는 더블 팬케이크를 이용하여 마그넷을 제작하면 저항에 의한 액체 헬륨의 소비를 줄일 수 있으며, 영구전류로 동작시킬 수 있을 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0020401)

### 참고 문헌

- [1] Haigun Lee, Juan Bascuñán, and Yukikazu Iwasa, "A High-Temperature Superconducting Double-Pancake Insert for an NMR Magnet", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 13, no. 2, pp. 1546-1549, June 2003.
- [2] Jung Ho Kim, Seok Hern Jang, Kyu Tae Kim, Jun Hyung Lim, Jinho Joo, Seyong Choi, and Wansoo Nah, "Fabrication and Characteristics of the Joint Properties in (Bi, Pb)<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> Closed Double Pancake Coil", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 14, no. 2, pp. 1094-1097, June 2004.
- [3] K. Shibusani, T. Egi, S. Hayashi, Y. Fukumoto, I. Shigaki, Y. Masuda, R. Ogawa, and Y. Kawate, "Fabrication of superconducting joints for Bi-2212 pancake coils", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 3, no. 1, pp. 935-938, March 1993.
- [4] Hyun Chul Jo, Sukjin Choi, Jae Young Jang, Young Jin Hwang, Chang Young Lee, Min Cheol Ahn, Yong Soo Yoon, and Tae Kuk Ko, "A Study on the Characteristic Evaluation of An HTS Coil with respect to the Winding Methods", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 12, no. 4, pp. 31-35, November 2010.
- [5] 김형준, 조현철, 장기성, 양민규, 안민철, 고태국, "고온초전도 마그넷 적용을 위한 YBCO Coated Conductor의 곡률 접합방법 연구", 한국초전도저온공학회논문지, 12권, 1호, pp. 17-21, 2010년 3월.

### 저자 소개



#### 강재식(姜在植)

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



#### 조현철(趙賢哲)

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



#### 장재영(張宰榮)

1982년 11월 8일생, 2007년 연세대 전기전자공학부 졸업, 2009년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기전자공학과 박사과정.



#### 황영진(黃英珍)

1980년 3월 31일생, 2007년 연세대 전기전자공학부 졸업, 2010년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기전자공학과 박사과정.



#### 이지호(李知浩)

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



#### 이우승(李愚承)

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



#### 박영건(朴永健)

1985년 11월 7일생, 2011년 금오공대 전자공학부 졸업, 현재 연세대 대학원 전기전자공학과 석사과정.



#### 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, 2008년~2010년 한국초전도·저온공학회 회장, 현재 연세대 전기전자공학과 교수, 현재 한국초전도·저온공학회 명예회장.