

Fabrication method of persistent mode superconducting coils using tailored coated conductor

Hee-Gyoun Lee^a, Jae-Geun Kim^a, Sun-Wang Lee^a, Woo-Seok Kim^a,
Seung-Wook Lee^a, Kyung-Dal Choi^a, Gye-Won Hong^a, Tae-Kuk Ko^b

^a Korea Polytechnic University, Gyunggi-do, Korea

^b Yonsei University, Seoul, Korea

Received 19 August 2005

영구전류모드 운전을 위한 coated conductor의 가공 및 자석 제조

이희균^{*,a}, 김재근^a, 이선왕^a, 김우석^a, 이승욱^a, 최경달^a, 홍계원^a, 고태국^b

Abstract

Coated conductors suitable for the fabrication of persistent mode high T_c magnets are suggested and the fabrication method of persistent mode magnets using coated conductor are demonstrated. Persistent current was observed in a small piece of coated conductor. Closed loop of coated conductor with a diameter of around 1 cm was successfully prepared and was cooled with a magnetic field of about 500 Gauss in order to induce supercurrent. Coated conductor with a I_c of 100 A/cm-width was used for the preparation of closed loop of coated conductor. Persistent current was confirmed by measuring the magnetic field generated from closed loop of coated conductor by using Gauss meter. Magnetic field of 4.4 Gauss was detected from the supercurrent of closed loop of coated conductor. It shows that superconducting joint of coated conductor is not a prerequisite for the construction of persistent mode magnets. It is thought that this work opens the possibility to use coated conductor for the construction of persistent mode high T_c magnets for MRI, NMR and magnetic separation applications.

Keywords : persistent magnet, coated conductor, superconducting joint, double pancake coil

I. 서론

고온초전도체의 발견이후 많은 연구자들이

이를 이용하여 저항손실이 없는 초전도 전력기기를 개발하고자 노력하여 왔다. 초전도 재료를 이용한 전력기기의 특징 중에서 가장 초전도재료의 특성을 잘 활용한 것으로 영구전류모드로 운전하는 초전도 자석을 생각할 수 있다. 특히 MRI 나 실험실에서 사용하는 고자장 발

*Corresponding author. Fax : +82 31 496 8319
e-mail : hglee@kpu.ac.kr

생용 자석은 원하는 자기장을 안정되게 발생하는 것이 중요한데 영구전류 모드로 운전하면 전력공급원의 전력변동과 관계없이 일정한 자기장을 거의 영구적으로 유지하여 MRI 영상신호나 자기장 하에서의 측정신호를 안정되게 얻을 수 있기 때문이다. 일단 초전도 자석에 전력을 공급하여 원하는 자기장을 발생하게 되면 초전도 영구전류 스위치를 연결하여 초전도 전류가 폐회로에 흐르게 하며, 이 상태는 초전도 코일의 온도를 임계온도 이하로 유지하는 한 영구히 지속된다.

영구전류모드로 초전도 자석을 유지하기 위해서는 초전도 권선의 양끝 부분에 초전도 접합이 이루어져야 한다. 초전도 접합이 이루어지지 않으면 접합 저항으로 인해 에너지 손실이 일어나 영구 전류모드 자석을 제조할 수 없게 된다. NbTi 금속계 초전도 선재를 사용하는 자석의 경우에는 구리 matrix를 부식시켜 선재를 구성하는 NbTi 초전도 filament를 노출시킨 다음 이 필라멘트를 NbTi 관내에서 겹친 다음 압력을 가하여 변형시켜 초전도 필라멘트인 NbTi 간에 물리적인 접합이 이루어지도록 하는 butt joint에 의해 초전도 접합이 이루어져 초전도 전류(supercurrent)가 흐른다.

이런 방식을 이용하여 금속계 저온 초전도 자석의 영구전류모드 switch가 개발되어 현재 MRI용 자석이나 실험실용 고자장용 초전도 자석에 사용되고 있다.

그러나 산화물계 고온 초전도 선재의 경우에는 초전도체가 취성을 갖기 때문에 기계적인 압력만으로는 초전도 접합을 이룰 수 없으며 새로운 방법이 개발되어야 이를 이용한 영구전류모드 초전도 자석의 실용화가 가능하다. 이미 상업적 생산을 시작한 Ag/BSCCO PIT 선재의 경우에는 피복재인 은을 벗겨낸 다음 BSCCO 초전도 core를 노출시키고, 이를 겹친 후 압력을 가하여 물리적으로 접합한 후 고온에서 열처리 하는 방법으로 부분적으로 초전도 접합을 만드는 기술이 여러 가지로 연구되어 접합부에서 80 % 이상의 임계전류를 통전할 수 있는 접합기술이 개발되었다 [1,2]. 그러나

BSCCO-2223 선재는 고 자장에서 임계전류밀도의 감소가 클 뿐 아니라 피복재로 사용되는 은의 값이 비싸기 때문에 고 자장 발생용 자석에서는 이 기술의 사용이 제한 될 것으로 생각된다.

최근 연구가 활발하게 진행되는 박막형 선재인 coated conductor는 높은 자장 하에서의 통전능력이 우수하고 또한 상대적으로 비싸지 않은 금속 모재를 사용하기 때문에 선재의 가격을 대폭 낮출 수 있는 것으로 평가되고 있어 전력케이블, 모터, 변압기, 한류기 등 초전도 전력기기 분야에 널리 응용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 coated conductor의 고자장 특성이 우수하고 가격 면에서 장점을 갖고 있음에도 불구하고 coated conductor의 초전도 접합기술이 아직 개발되지 않았으며 이로 인해 coated conductor를 MRI, NMR, 자기분리용 자석, 실험실용 고자장 자석 등 영구전류 모드가 필요한 응용기기의 개발이 지연되고 있다. 따라서 coated conductor의 응용범위를 넓히기 위해서는 coated conductor의 접합기술 개발 및 영구전류방식의 초전도 권선제조방법 및 이의 특성 평가방법이 개발되어야 한다.

본 연구에서는 은 보호층이 도포된 coated conductor를 hot press 방법으로 은 보호층을 서로 접합시켜 제작한 폐회로의 영구전류 감쇠 특성을 측정하여 hot press 방법에 의한 coated conductor의 초전도 접합 제조가능성을 시험하였다. 한편 접합공정 없이 coated conductor를 도체로 사용하여 초전도 자석을 제작하기에 적합하도록 coated conductor를 가공하는 기술과 이 기술을 사용하여 영구전류 모드로 작동할 수 있는 초전도 자석제조용 권선기술에 대해 소개한다.

II. 실험 방법

은 보호층이 증착된 폭 1 cm의 coated conductor를 3 cm 길이로 절단한 후 선재의 끝단이 서로 겹치도록 정사각형으로 배열시켰다. 이 때 coated

conductor의 은피복부가 서로 접하도록 하였으며 사용한 coated conductor의 임계전류는 20 A/cm-width 였다. 배열된 coated conductor 선을 알루미늄 판 위에 올려놓고 또 다른 알루미늄 판으로 덮은 후 그 위에 무게 20 gram의 추를 올려놓고 tube furnace에 장입하였다. 은 보호층 간에 확산에 의한 고상접합이 일어나도록 시료를 800℃로 가열하여 2시간 유지시켰다. 열처리하는 1000 ppm 산소를 포함하는 argon가스를 1000 sccm 흘리며 행하였다. 800℃에서 2시간 열처리 후 500℃, 산소분위기하에서 2시간 유지한 후 상온까지 산소분위를 유지하며 노냉하였다. 1 cm 길이의 선재를 같은 조건에서 열처리한 후 Tc를 측정하여 열처리 공정이 초전도 특성을 파괴하지 않음을 확인하였다. 그림 1은 열처리가 끝난 coated conductor 접합체의 사진으로 접합상태가 유지되고 있으며 손으로 약하게 잡아당겨도 접합이 유지되어 있어 은 보호층 간에 확산접합이 일어난 것을 확인할 수 있었다. 그림 1의 폐회로의 정사각형 coated conductor에 500 Gauss의 자기장을 가하며 액체 질소온도로 냉각하는 field cooling 후 Hall sensor를 사용하여 전류감쇠 특성을 관찰하였다.

그림 2는 폭 1 cm인 coated conductor의 양 끝부분을 남겨놓고 남은 부분의 중앙부를 절단하여 제조한 시료의 사진이다. 선재를 분할하는 과정에서 coated conductor의 초전도 특성이 파괴되지 않는다면 coated conductor는 초전도 코

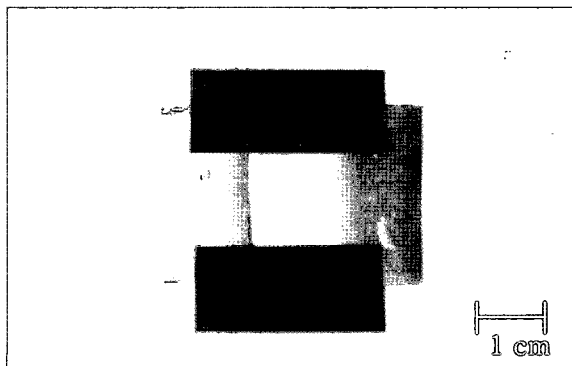


Fig. 1. Joined coated conductor. Silver-to-silver joining was made by hot pressing at elevated temperature with load.

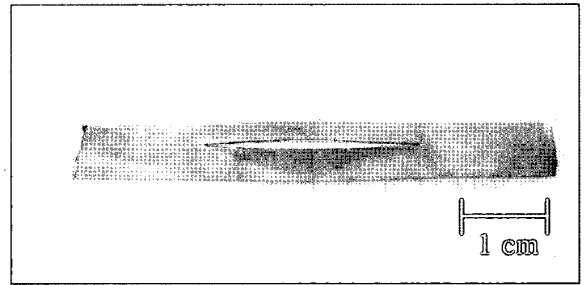


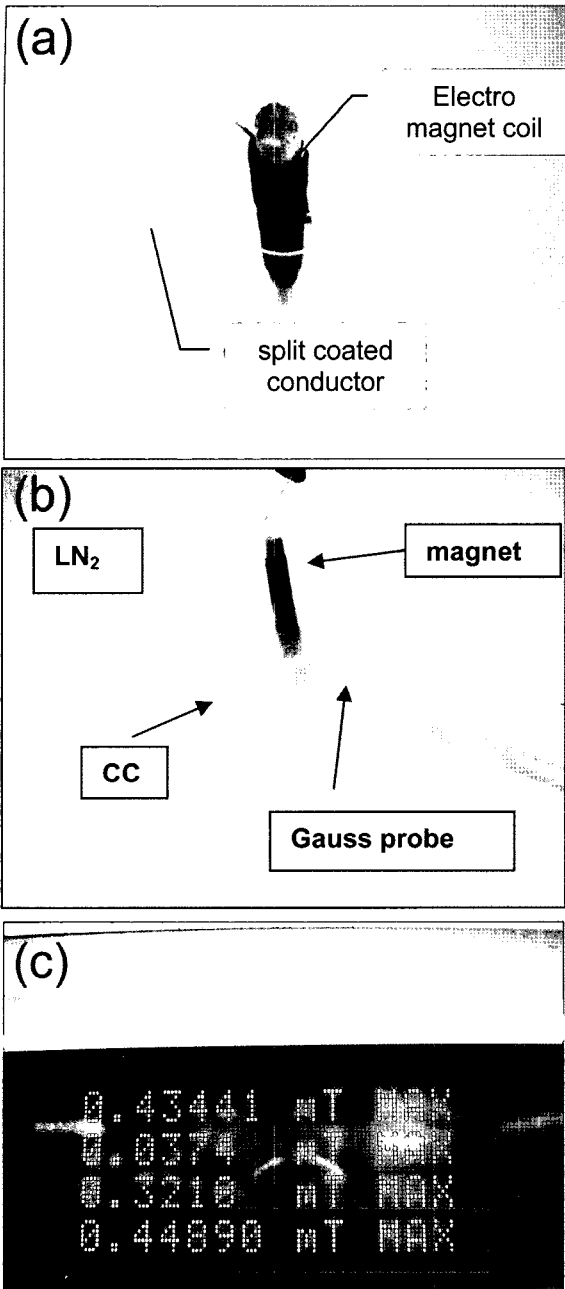
Fig. 2. Closed loop coated conductor after slitting along tape length.

팅층이 끊어지는 점이 없이 초전도체로 폐회로가 형성된다. 따라서 일단 이 선재에 전류를 흐르게 하면 외부에서 전류의 공급원을 차단하여도 원칙적으로 전류가 영구히 흐르는 영구전류 모드가 되어야 한다. 이를 확인하기 위해서 앞서와 같은 방법으로 외부에서 500 Gauss의 자장을 가하며 액체질소 온도까지 냉각시켰다. 냉각된 상태에서 외부자장을 차단한 후 냉각된 coated conductor 선재에서 발생하는 자장을 Gaussmeter를 사용하여 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

그림 1의 접합된 coated conductor는 기계적으로 잘 결합되었으며 감쇄전류 측정을 위해 용기에 넣고 자장을 가할 때도 분리되지 않았다. 초전도 층이 두껍지 않고, 임계전류밀도가 크지 않기 때문에 넓은 면적의 은 접합만으로 저항이 낮은 접합이 가능하여 전류감쇄특성을 측정할 수 있을 것으로 기대하였다. 그러나 외부 자기장을 제거한 후 제작된 coated conductor 폐회로의 자기장감쇠를 측정할 결과 매우 빠르게 자기장이 감쇄하였기 때문에 시간에 따른 전류의 감쇄특성을 측정할 수 없었다. 이로부터 접합부가 매우 낮은 저항을 갖더라도 초전도전류 (supercurrent)를 흘릴 수 없음을 명백하다.

그림 2는 5 cm 길이의 coated conductor를 low speed diamond cutter를 이용하여 중앙부를 길이 방향으로 3 cm 분할한 coated conductor를 나타낸 것으로 초전도부분이 끊어짐 없이 loop를



D 3-Channel Gaussmeter

Fig. 3. Experimental procedures for verifying the permanent flow of induced super current in closed loop of slit coated conductor. (a) Inducing of current to the closed loop by electromagnet. (b) Switch off electromagnet, eliminating magnetic field source except from supercurrent closed loop. (c) Magnetic field measured by Gauss meter.

형성하고 있다.

그림 3은 이 분할된 coated conductor closed circuit에 영구전류가 유지되는 것을 확인하는 실험과정을 나타낸 것이다. 그림 3(a)는 coated conductor의 절단 부를 양 옆으로 벌린 후 전자석을 끼우고 전자석에 500 Gauss의 자장을 발생시킨 후 선재를 액체질소 온도로 냉각시켜 분할된 coated conductor로 구성된 폐회로에 초전도 전류를 유도하는 과정을 나타낸 것이다. 그림 3(b)는 그 후 전자석의 전원을 차단한 후 coated conductor에 유도되었던 supercurrent에 의해 발생하는 자장을 Gauss meter를 이용하여 측정하는 과정을 나타낸다. 그림 3(c)는 전원 차단 후 5 분이 경과한 다음에 Gauss meter에서 측정된 자장 값으로 약 4.5 Gauss의 자장이 검출되었다. 이상의 간단한 실험을 통해 길이 방향으로 분할된 coated conductor에서 폐회로를 통한 supercurrent의 유도가 가능하다는 사실을 확인하였다.

그림 2의 방식으로 선재를 분할하는 경우 전류가 폐회로를 형성하며 저항성분을 갖는 부분이 없는 것을 쉽게 알 수 있다. 분할하는 선재의 폭 및 수는 선재의 특성과 응용 목적 그리고 초기 선재의 재원에 따라 결정될 수 있다. 선재의 분할 방법으로는 *slitter*, *laser*, *water jet*, *diamond cutter*등을 단독 혹은 함께 사용하여 분할 할 수 있을 것이다. IBAD/MOCVD법에 의해 제조된 coated conductor와 RABiTS/MOD법에 의해 제조된 coated conductor에서 *slitter*를 사용하여 coated conductor를 분할/절단하는 경우에 있어 선재의 초전도 통전능력저하는 10 %를 넘지 않는 것으로 보고되었다 [3]. 따라서 선재 분할에 따른 coated conductor의 초전도 통전능력 저하는 그리 크지 않을 것으로 예측할 수 있다.

그림 4는 분할된 coated conductor 선재를 이용하여 두 개의 pancake coil을 제작하는 공정의 모식도이다. 우선 그림 4(a)와 같은 선재를 4(b)와 같이 가운데를 분할 한다. 4(c)에 나타낸 바와 같이 분할한 선재를 spool에 감은 후 한 쪽 끝의 일정 길이 부분을 남겨 둔 후 2 개의

bobbin에 분할된 선재를 각기 권선한다. 이 때 선재의 끝부분은 두 bobbin 들과 함께 회전하게 된다. 그림 4(c-1)는 권선이 끝난 후의 상태이다. 이 상태에서 선재에 전류가 흐르는 상황을 가정하면 선재가 폐회로를 이루고 있기 때문에 위의 pancake coil과 아래의 pancake coil에 흐르는 전류의 방향이 서로 반대가 된다. 따라서 그림 4(c)의 상태로 배열된 pancake coil에서는 위의 coil과 아래의 coil이 발생하는 자장의 방향 또한 반대로 되어 자기장에 서로 상쇄되어 이 상태의 배열로는 자석으로 사용할 수 없게 된다. 따라서 분할된 coated conductor로 제작한 각 pancake coil에서 발생하는 자장이 같은

방향으로 배열시켜야만 비로소 초전도 자석으로 사용 가능해 지게 된다. 직관적으로 두 개의 pancake coil에서 발생하는 자장의 방향이 반대이다. 따라서 이들 중 하나를 자장 축에 수직 한 방향으로 180° 회전시키면 두 개의 pancake coil에서 발생하는 자장은 동일한 방향으로 되고 따라서 이들 pancake coil에서 발생하는 자장을 일정 목적으로 활용 가능하게 된다. 그림 4(d)는 아래의 pancake coil을 회전시켜 상하부 coil의 자장 방향을 일치시킨 그림이다.

위의 Wind and flip 방식에 의해 pancake coil을 제작할 때 선재의 뒤틀림이 필연적으로 수반된다. 비틀림 변형에 따른 coated conductor의

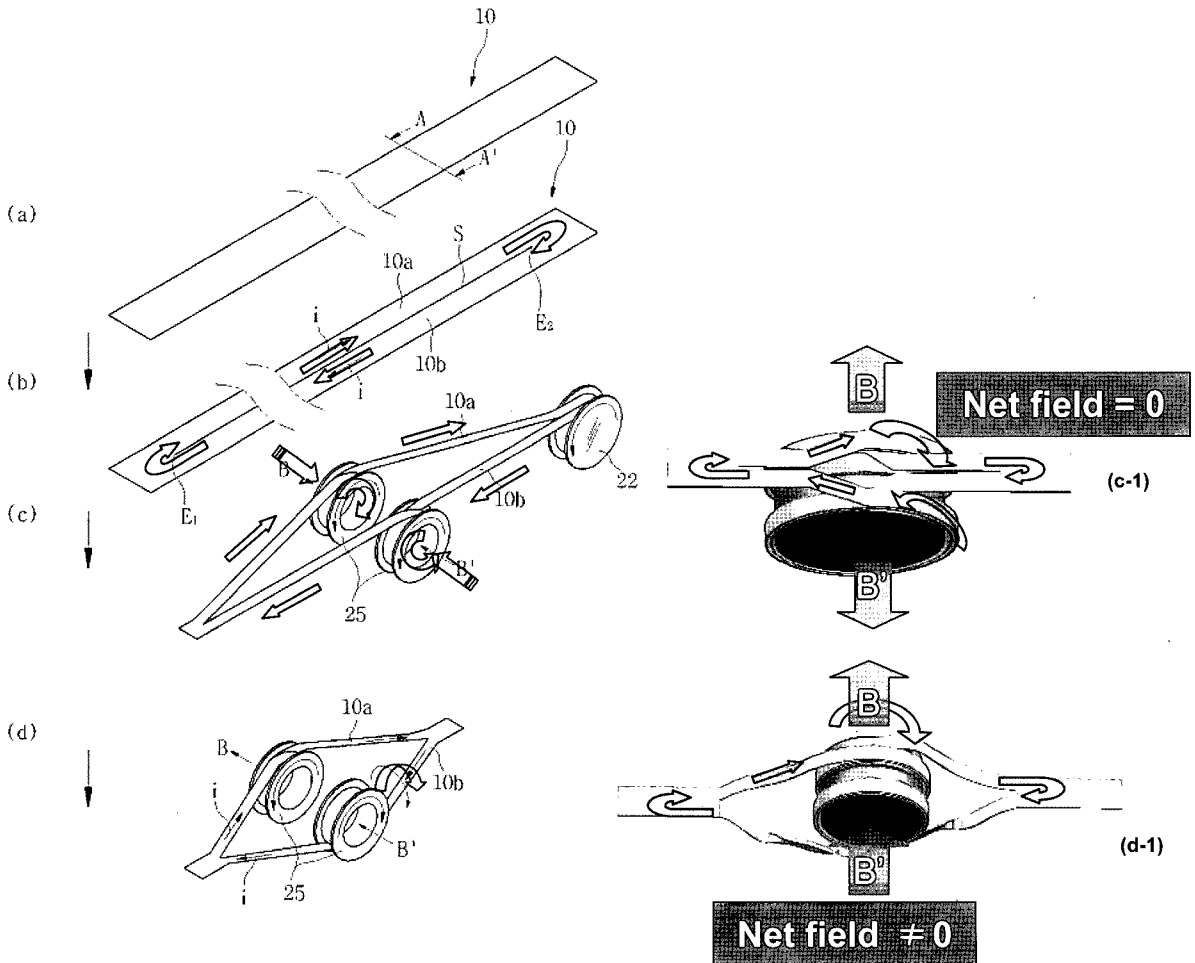


Fig. 4. Procedures for preparing pancake coils for persistent mode operation using Wind-and-flip technique.

특성 변화에 대한 연구가 IBAD/MOCVD법에 의해 제조된 coated conductor의 경우에 있어 행해진 바 있으며 폭이 1 mm이고 길이가 50 cm 인 선재를 6 회전 시켜 비틀림 변형을 주었을 경우에 있어 초전도 특성의 저하는 관찰되지 않았다 [4].

앞서 설명한 바와 같이 분할된 coated conductor 선재는 폐 회로를 이루고 있어 일단 전류가 흐르게 되면 손실 없이 지속적으로 흐를 수 있어 영구전류 모드로 자석을 작동시키는 것이 가능하다.

그림 5는 분할된 coated conductor를 사용하여 제작한 pancake coil을 persistent mode로 동작시키는 원리를 나타낸 모식도이다. 우선 코일 전체를 액체질소로 채워진 저온조에 넣어 냉각시켜 초전도 상태가 되게 한다. heater를 켜서 5 부분을 가열하여 초전도 상태에서 상전도 상태가 되게 한 다음 전원을 켜서 coil에 전류를 공급하여 자기장을 발생시킨다. 원하는 자기장 값에 도달하면 heater를 켜서 5 부분이 냉각되어 초전도 상태가 되게 하면 초전도 전류가 5 부분을 통과하는 폐회로를 형성하고, 외부에서 전원공급을 중지하여도 supercurrent가 계속 흘러서 자기장을 일정하게 유지하는 영구전류 모드 상태로 동작하는 초전도자석 상태가 될 수 있다.

coated conductor를 이용하여 Wind-and-flip 방법으로 영구전류모드로 동작하는 초전도 자석을 실증하고자 그림 6과 같은 실험을 수행하였다. 6(a)는 두께 200 μm , $I_c = 100 \text{ A}$ 인 길이 1.5 meter의 coated conductor를 길이 방향으로 분할한 선재의 사진이다. 그림 6(b)는 이 분할한 선재를 이용하여 두 개의 pancake coil을 만들고, 그 중 하나를 뒤집어 자기장의 방향이 같게 만든 coil의 옆면사진이고, 그림 6(c)는 이 코일의 전체사진으로 영구전류 운전을 실험하기 위하여 전류 인입선이 soldering 된 것을 볼 수 있으며, coil을 축에 수직인 방향으로 180° 회전시켜 제조하였기 때문에 선재의 양 끝단의 선재는 비틀림 변형을 받은 것을 볼 수 있다.

선재를 길이방향으로 slit하는 방법 중 처음

에 시도된 water jet 방법은 절단하는 과정에서 수분이 초전도 산화물 층에 침투하여 초전도 특성이 파괴되는 결과가 나타났다. 두 번째 시도에서는 low speed diamond cutter를 사용하고, 절단 시 알코올을 윤활 및 냉각제로 사용하여 선재를 분할한 다음 coated conductor의 특성을 확인하였을 때는 각 부분에서 18 A의 임계전류를 확인하여 절단에 의하여 초전도 특성이 저하되지만 초전도 특성을 유지하는 것을 확인하였다. 그러나 코일로 가공한 후의 특성시험에서는 초전도 전류가 흐르지 않았다. 이는 분할 후 최초의 초전도 특성시험 후 냉각된 coated conductor가 상온으로 회복되는 과정에서 주변의 습기를 흡수하여 표면에 형성된 이슬이 초전도 층으로 침투하여 초전도 특성을 파괴된 때문으로 생각된다. 이에 따라 초전도 선재의 분할 후의 보호방법이 필요한 것으로 판단되

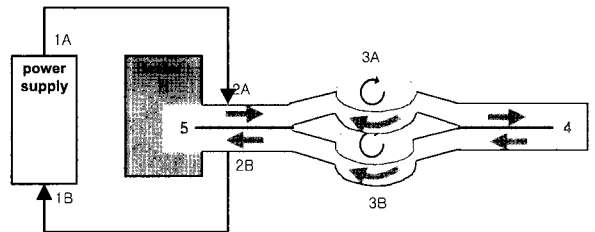


Fig. 5. Schematic diagram of persistent mode switch operation: current flow in case of heater switch on state: power supply, 1A,2A,3A,4,3B,2B,1B : current flow in case of heater switch off state:2A,3A,4,3B,2B,5.

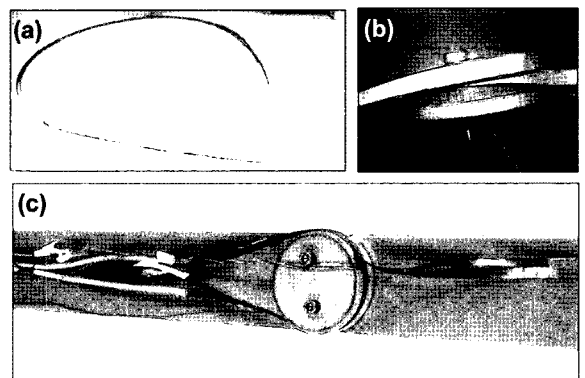


Fig. 6. Fabrication of persistent mode superconducting coil by Wind-and-flip method and its setup for testing super current.

어 현재 분할된 선재에 보호층을 추가한 선재를 준비하여 새로운 실험을 준비 중이다. 또한 선재 절단 시 초전도 특성의 저하를 감소시킬 수 있는 가공방법이 필요한 것으로 판단되어 이에 대한 연구도 진행 중이다.

IV. 결 론

경제성이 있고 고자장 하에서 사용이 가능한 것으로 평가되는 coated conductor에서의 접합 특성 및 영구전류 모드를 얻을 수 있는 형태의 길이 방향으로 분할된 coated conductor를 가공하여 이를 이용한 무접합 pancake coil을 제조하는 방법에 대해 연구하였다. 짧은 길이의 coated conductor로 구성된 폐회로에서 supercurrent가 흐를 수 있음을 확인하였으며 이를 바탕으로 한 무접합 pancake coil 모형을 coated conductor를 사용하여 제작하였다.

감사의 글

본 연구(R01-2004-000-10788-0)는 과학재단의 목적기초연구 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] H.G. Lee et al., "A Study of joining of Ag/Bi-2223 superconducting tapes", *Physica C* 242, 81-84 (1995)
- [2] H.G. Lee et al., "Filament-to-filament joining of multi-filamentary Ag/Bi-2223 superconducting tapes", *Physica C* 259, 69-74 (1996)
- [3] V. Selvamanickam, et al., "Scale-Up of Coated Conductor Technology at SuperPower", presented at DOE peer review, Washington, July (2004).
- [4] V. Selvamanickam, et al., "Scale-Up of Coated Conductor Technology at SuperPower", presented at DOE peer review, Washington, Aug (2005).