

# 단결정 성장용 초전도 마그네트의 제작 및 성능평가

심기덕, 진흥범, 최석진\*, 김경한\*, 한호한\*, 김형진\*, 이봉근\*, 권영길  
한국전기연구원, \*주)덕성

## Fabrication and Test Results of Superconducting Magnet for Crystal Growing System

K.D. Sim, H.B. Jin, S.J. Choi, K.H. Kim, H.H. Han, H.J. Kim, B.K. Lee, Y.K. Kwon  
Korea ElectroTechnology Research Institute, Duksung Co. Ltd.

skedy@keri.re.kr

**Abstract** - Magnetic field is necessary to control the convection of melted silicon and to improve the quality of the wafer in the 12inch silicon wafer growing process. Nowadays, superconducting magnet is used in this process.

We fabricated and tested a saddle shaped superconducting magnet for 8inch silicon wafer growing system. And the protection circuits for HTS current lead and superconducting coil are designed and manufactured. In this paper, their manufacturing process and test results are introduced.

### 1. 서 론

지금까지 반도체 제조 공정에는 주로 직경 8inch의 실리콘 웨이퍼가 사용되어 왔다. 그러나, 반도체 제조단가를 절감하여 가격 경쟁력을 확보하기 위한 방법으로 웨이퍼의 직경을 증가시키려는 노력이 계속되고 있다. 현재 12inch급의 웨이퍼 성장기에 대한 연구개발이 진행되고 있으며 Alpha Magnetics사, 스미토모, 미쯔비시등에서 시제품들이 제작되고 있다.[1] 12inch 이상의 웨이퍼 성장에는 실리콘 용탕의 대류를 억제하여 웨이퍼의 순도를 높이기 위해 자기장 특히, 웨이퍼의 성장방향에 수직인 '수평자기장'을 인가하는 방법이 사용된다. 현재 '자기장인가 방식', 특히 초전도를 사용한 자기장인가 방식이 직경 1600mm에 이르는 용탕의 용액을 제어하는 유일한 방법으로 받아들여지고 있다.

본 논문에서는 12inch 실리콘 웨이퍼 성장용 초전도 마그네트 개발의 전단계로 개발중인 8inch 웨이퍼 성장용 수평자기장형 초전도마그네트의 제작과정과 성능평가 결과에 대해 다루었다. 본 마그네트에 사용된 diode 부분, HTS 전류리드의 퀀치 protection 부분 및 saddle형 코일의 권선법에 대해서도 언급하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 마그네트의 설계

##### 2.1.1 Coils의 기본형상 결정

수평자기장을 인가하기 위하여 현재 2개 혹은 4개의 솔레노이드코일 혹은 마주보는 한 쌍의 saddle형 코일이 주로 사용된다.[1] 본 연구에서는 saddle 코일 형태를 채택하였으며, 코일의 크기는 8inch 단결정 성장에 사용되는 실제 도가니의 크기와 코일이 삽입될 극저온용기의 제작을 고려하여 그림1과 같이 결정하였다. 선재는 편각선을 사용할 것을 가정하였고, 한쪽에 총 1500turn을 정렬 권선하도록 하였으며 동작전류는 400A정도로 결정하였다. 그러나, 제작과정에서 권선수 및 권선의 정렬 여부에 약간의 수정이 가해졌다.

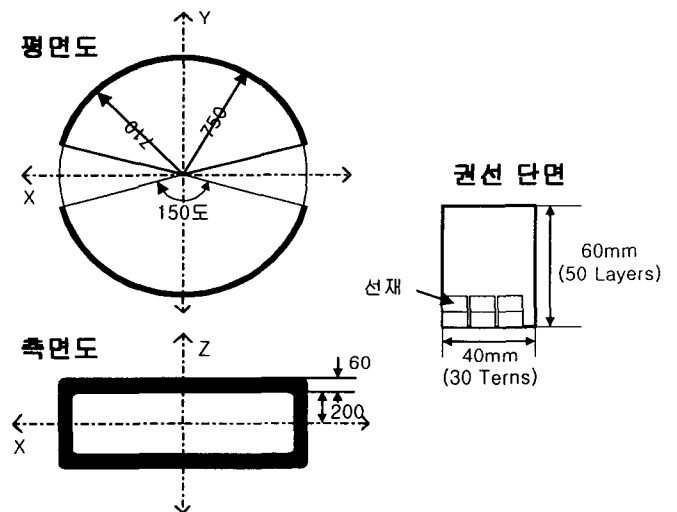


Fig. 1. Schematic drawing of superconducting coil

##### 2.1.2 Coil에 대한 전자장 해석

위의 기본 형상을 가지고 전자장해석을 수행하였다. 전자장해석은 기본적으로 중심자기장 및

최대자장값을 예측하는 데에 목적이 있으며, 더 나아가 마그네틱 shield의 설치 시 stray field의 감소정도, HTS 전류리드부의 자기장강도등을 예측하는 부수적인 목적을 갖는다.

전자장해석은 상용해석 tool인 OPERA-3d를 사용하였다. 다양한 경우에 대한 해석이 진행되었으나, 여기에서는 coil 주변에 20mm두께의 실린더형 마그네틱 shield와 30mm두께의 4분할 shield가 동시에 설치되었을 경우의 해석 예 만을 그림?에 소개한다. 동작전류는 400A이다.

이때 중심자장은 5300 gauss이며 최대자장은 3.08 Tesla이다.

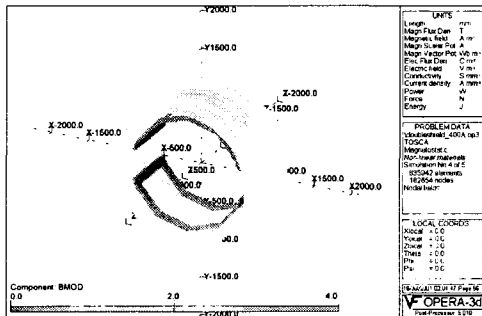


Fig. 2. A result of FEM analysis for the Superconducting coil

## 2.2 Coil의 제작

### 2.2.1 Coil 권선

몇 번의 saddle 코일에 대한 예비권선을 시행한 후, 현재 갖춘 장비 및 권선 시 발생하는 잡다한 문제점등을 고려하여 권선 시 기본 원칙을 다음 세 가지로 정하였다.

첫째, 보빈에 직접권선하기,

둘째, 정렬권선하기(이는 거의 불가능함),

셋째, 보빈에 에폭시 함침 통 역할을 하는 frame을 설치, 밀봉하여 코일을 직접함침하기.

먼저, 코일의 권선을 위해 알루미늄 재질의 보빈이 제작되었으며, 보빈과 권선 간의 전기절연을 위해 에폭시 sheet가 보빈에 접착되었다. fig.3은 이 과정을 보여주는 그림이다. 보빈에는 코일이 권선될 알루미늄 frame이 부착되며, 이 frame 위에 직접 권선을 하게 된다.(fig.4.) 권선 후 선재는 유리 섬유로 보강되며(fig.5) 이후 frame은 에폭시 함침을 위해 알루미늄 덮개로 완전히 밀봉된다.(fig.6)

권선을 시행한 결과 현재의 장비로는 정렬 권선이 불가능하다는 결론에 도달했다. 이는 saddle 코일의 형태상 물리적으로 불가능한 부분이며, 이의 해결을 위해서는 권선 중에 즉각적으로 선재 간 접착이 가능하도록 권선법을 개선해야 할 것으로 판단된다.

함침 frame으로 밀봉된 코일을 진공유지가 가능한 대형 함침조에 위치시켜 진공함침을 시도하였다. 그러나 함침 frame의 기밀 유지에 문제가 발생하였으며, 결과적으로 선재 사이에 에폭시가 완벽하게 주입되었다는 것을 보장할 수 없게 되었다. 함침에 사용된 에폭시는 CTD사의 극저온

용 상온경화 에폭시이며, 섭씨 80도에서 3시간 동안 열처리 과정을 거쳤다.



Fig. 3. Bobbin

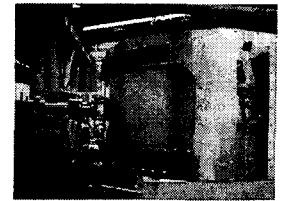


Fig. 4. Winding



Fig. 5. Glass fiber reinforcement

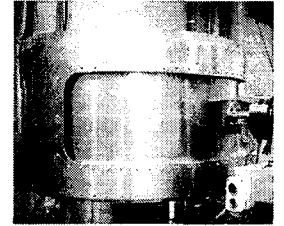


Fig. 6. Case for epoxy impregnation

초전도 선재 간 조인트를 없애기 위해, 기본 설계안의 권선수인 1500turn을, 목표로 하는 자장값인 0.25~0.3T 수준을 만족하는 범위 내에서 1100turn으로 하향 조정하였다. 이는 본 연구의 다른 축인 “액체헬륨 재응축”의 실현을 위하여, 마그네트에서의 불필요한 열 발생을 최소화 시키려는 의도이기도 하다.

### 2.2.2 마그네트 시스템의 회로 구성

마그네트 보호회로, 고온초전도 전류리드 및 이의 보호회로를 포함한 전체 초전도 마그네트 회로를 fig.7.과 같이 구성한다.

마그네트 보호회로부는 직병렬 결합된 diode로 구성되어, 헬륨조 내부에서 마그네트에 병렬 연결된다. 또 다른 보호회로는 고온초전도 전류리드를 위한 것으로서, 전류리드의 퀸치시 작동하여, power supply로부터 공급되는 전류를 강제로 차단함으로써 전류리드의 소손을 방지하기 위한 것이다.

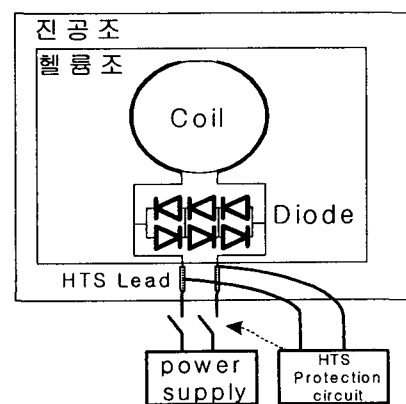


Fig. 7. Schematic drawing of superconducting magnet circuit

### 2.2.3 Diode 특성 실험

마그네트의 보호에는 병렬로 연결된 diode 회로의 순방향 전압이 이용된다. 마그네트의 켄치 시 순방향 전압 이상의 전압이 발생하고 이에 의해 diode가 도통되어 에너지를 소모하게 된다. 또한 전류여자 시 순방향전압을 넘지 않는 범위 내에서 비교적 고속의 충 방전을 가능케 한다.

본 시스템에 사용된 diode는 일반 전력용 diode이다. Diode의 순방향 전압의 온도 의존성과 자장 의존성을 검사하여 사용가능 여부를 판정하기 위한 요소 실험을 진행하였다.

fig.8.은 테스트를 위해 병렬로 연결된 두개의 diode를 보여준다.

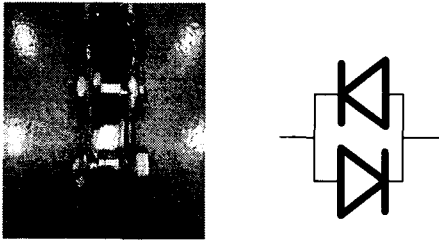


Fig. 8. Parallel connected diodes.

실험 결과, fig.9.에서 보는 바와 같이 온도가 낮을수록 그리고 diode에 수직으로 인가된 주변자장이 강할수록 순방향 전압이 상승함을 알 수 있다. 실제 시스템에는 2개씩 병렬로 연결된 diode쌍이 총 3쌍 직렬로 연결되어 사용되었다. 수많은 연속 운전 결과 diode회로의 신뢰성은 검증되었다.

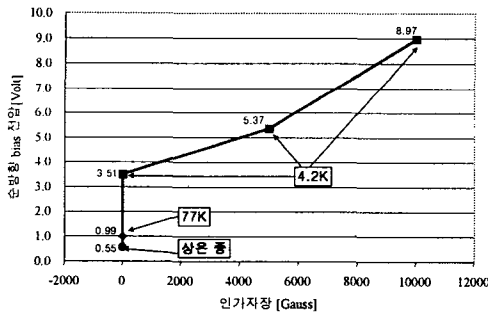


Fig. 9. Thermal and field dependency of the forward bias voltage

### 2.2.4 HTS 전류리드 보호부 제작

진공조에 위치한 두개의 고온초전도 전류리드에서 발생하는 켄치를 각각 검출하여 켄치로부터 전류리드를 보호하기 위한 회로가 제작되었다. 몇 단에 걸친 증폭기와 noise 차단부, 비교기 그리고 차단기 구동부등으로 구성된다.

0.5mV 이상을 켄치로 판정하여 power supply로부터의 전류를 circuit breaker로 차단할 수 있게 하였다. fig.10은 본 보호회로의 회로도이다. 본 장치는 PCB로 제작되었으며 fig.11은 이에 대한 외관도이다.

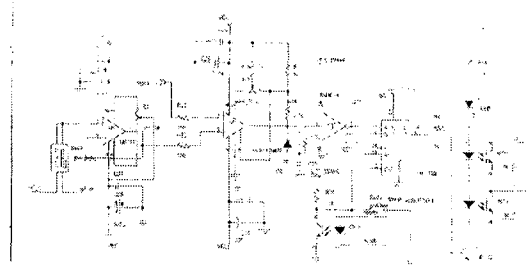


Fig. 10. Circuit diagram of HTS current lead protection circuit

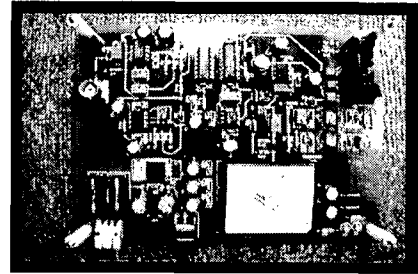


Fig. 11. Photo of PCB for HTS lead protection circuit

### 2.3 성능평가 실험

본 마그네트는 헬륨재응축형 극저온 용기에 삽입되어 냉각되었다. fig.12.는 극저온 용기 및 각종 부속품들을 포함하여 최종 제작된 초전도 마그네트 시스템을 보여 준다.

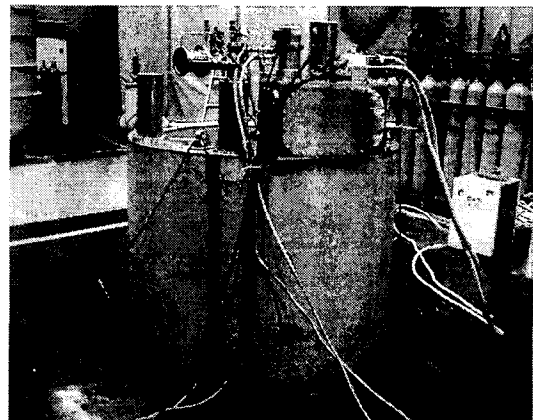


Fig. 12. Total system of the superconducting magnet

코일을 여자한 결과 목표 전류인 400A에 도달하지 못한 상태에서 켄치가 발생하였다. 켄치 전류는 초기여자 시 150A에서 시작하여 여자를 반복 할수록 증가하여 235A 근처에서 증가를 멈추었다.(첫번째 여자)

마그네트의 온도를 상온까지 상승시킨 후 재냉각하여 다시 여자 실험을 수행하였다. 이 결과 초기 켄치는 180A에서 발생하였으며 “첫번째 여자”에 비해 적은 반복 횟수 만에 235A 근방의 켄치전류에 도달했다. fig.13.은 이에 대한 결과를 나타낸 그래프이다.

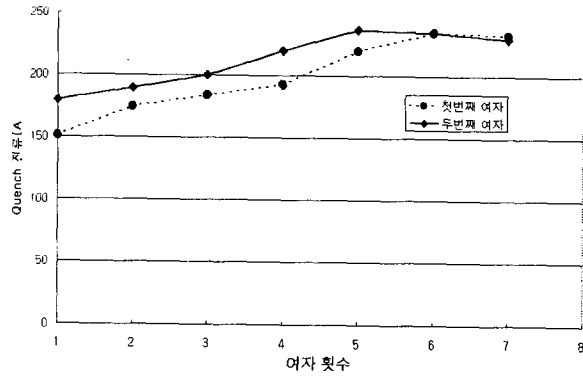


Fig. 13. Quench current of the superconducting magnet

200A 통전 시 중심자장은 1650gauss로 측정되었으며, 이는 초기설계에서 변경된 부분인 turn 수, 권선 밀도등을 수정하여 재해석한 전자장해석 결과와 일치하였다.

### 3. 결 론

코일을 목표전류인 400A에서 운전하지 못하였다. 본 코일에 사용된 선재는 6T에서 800A의 임계전류를 갖는 선재로서 235A에서 퀘치가 발생한 것은 선재의 문제가 아닌 코일 전체에 걸친 기계적인 문제일 가능성이 크다고 판단된다.

첫째, 함침용기의 완벽한 기밀유지에 실패하여 코일의 함침 정도를 신뢰할 수 없게 되었다. 여자 실험 결과 training effect가 관찰되었는데 이는 불충분한 함침에 기인한 것으로 보인다. 또한, 냉각 예비 실험 후 함침된 코일에서 미세한 균열들이 관찰되었는데 이 또한, training effect

와 낮은 퀘치 전류의 원인으로 작용했을 것으로 보인다.[2]

둘째, 코일을 지지하는 보빈이 코일이 받는 전자기력을 견디기에 불충분한 강도를 갖는 것으로 의심된다. 코일을 덮고 있는 알루미늄 판의 두께가 2mm에 지나지 않고, 코일 frame의 고정을 위해 20mm 간격으로 삽입된 M6 볼트의 지지강도 또한, 불충분해 보인다. 코일 설계 시 보빈에 대한 지지구조 설계를 간과한 결과이다. 현재 전자기력에 자세한 대한 해석을 진행 중이며, 향후에는 설계 초기단계에서부터 보빈의 지지구조에 대한 고려가 있어야 할 것이다.

본 연구를 통해 HTS 전류리드에 대한 운영 경험을 쌓았으며 HTS 전류리드의 보호회로 제작 기술을 획득하였다. 또한, 외국에서는 일반화 되어 있는 diode를 이용한 마그네트 보호방법에 대한 기술을 획득하였으며, 이는 향후 저온 초전도 마그네트의 응용분야에 활용될 수 있을 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 부품소재기술개발사업에서 지원하였습니다. 이에 감사드립니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] "Misubish Electric's Activities on Superconducting Magnet Technology", section 2-3 페이지, 출판년도
- [2] Martin N. Wilson, "Superconducting Magnets", p85~88