

## 2G 고온초전도 도체를 이용한 전류리드 제작 및 특성

손명환\*, 김석호\*, 심기덕\*, 배준한\*, 이석주\*, 엄범용\*, 박해용\*\*  
 한국전기연구원\*, 국립창원대학교\*\*

### Fabrication and characteristics of current lead with 2G HTS tapes

Myung-Hwan Sohn\*, Seokho Kim\*, Ki-deok Sim\*, Jun Han Bae\*, Seok-Ju Lee\*, Beom-Yong Eom\*, Hae-Yong Park\*\*  
 Korea Electrotechnology Research Institute\*, Changwon National University\*\*

**Abstract** - 초전도 시스템에서 전류를 공급하는 역할을 하는 전류리드는 없어서는 안 될 핵심 부품이다. Powder-in-tube(PIT) 법으로 제작한 1세대(1G) 고온초전도 선재보다 열전달특성이 나쁜 2세대(2G) 고온초전도 선재를 이용하여 고온초전도 전류리드를 제작하였다. 사용한 선재는 미국 AMSC사 선재이다. 초전도 자석으로의 열침입을 최소화하기 위해 지지구조물은 GFRP를 사용하였고 금속연결부는 무산소동을 사용하였다. 2G 선재 6가닥을 사용하여 제작한 전류리드는 액체질소 온도에서 I-V 특성을 평가한 결과 약 400 A급 전류리드도 사용 가능하다고 판단되었으며, 열전달 특성을 측정하기 위해 무냉매형 특성평가장치를 사용하였는데, 77 K과 7 K 사이에서 약 50 mW정도 였다. 본 논문에선 2G 고온초전도 선재를 사용하여 제작한 전류리드의 전기적 열적 특성에 대해 논의하고자 한다.

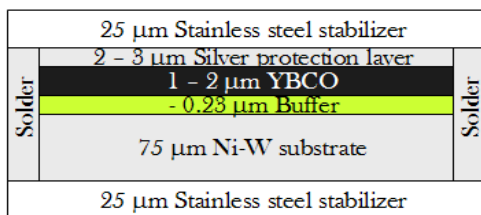
### 1. 서 론

오늘날 초전도기술을 전력 및 산업분야에 응용하고자하는 노력들이 선진국을 비롯한 세계 곳곳에서 활발히 연구되어지고 있다. 이 때 극저온으로 유지되도록 고진공 단열이 되어 있는 초전도 기기 내부에 전류를 공급하기 위해 전류리드가 반드시 사용된다. 이 때 외부로부터의 전도열침입을 최소화 하고 전류가 흐를 때 발생하는 줄열이 또한 최소화 하여야 기기의 효율을 높일 수 있다. 현재까지 여러 가지 형태의 고온초전도 전류리드가 개발되었다. 고온초전도 벌크형 전류리드는 열전달특성이 매우 나쁜 장점이 있지만 기계적인 충격에 약하다는 단점도 가진다. PIT법으로 만든 1G 고온초전도 도체는 기계적인 강도면에서는 강하나 피복재가 금속이라 벌크형에 비해 전도열침입이 커서 특별히 초전도전류리드용 피복재가 개발되었는데 cryoblock형이라 부른다. 그것에 반해 박막형으로 제조하는 2G 고온초전도 선재는 열전달특성이 매우 나쁜 Ni 혹은 NiW 등의 substrate에 YBCO를 증착하여 제작되는데 기계적인 강도도 좋으며 열전달 특성도 매우 나빠서 고온초전도 전류리드로 사용할 수 있다.

본 논문에선 2G 고온초전도 선재를 사용한 고온초전도 전류리드의 제작과 전류리드로서 적합한 특성을 가지는 지를 전기적 및 열적인 측면에서 검토하고자 한다. 제작에 사용된 도체는 AMSC에서 제작한 것으로 <표 1>과 <그림 1>에 도체의 사양과 단면 구조를 나타내었다.

<표 1> AMSC사의 344S 2G 고온초전도 선재의 사양

Characteristic	344S
Substratelayer	Ni-W
Stabilizer	Stainless steel
Total stabilizer thickness(mm)	0.05
Total thickness(mm)	0.16
Tape width(mm)	4.4
Ic at 77 K, self field, 1 μV/cm(A)	110



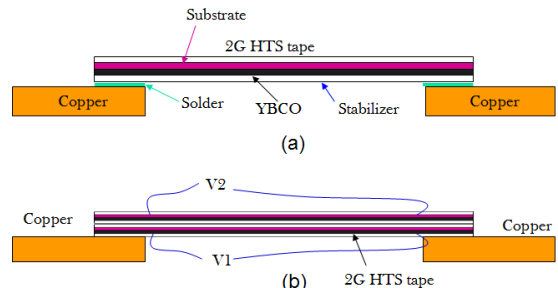
<그림 1> AMSC사의 344S 2G 고온초전도 선재의 단면

### 2. 본 론

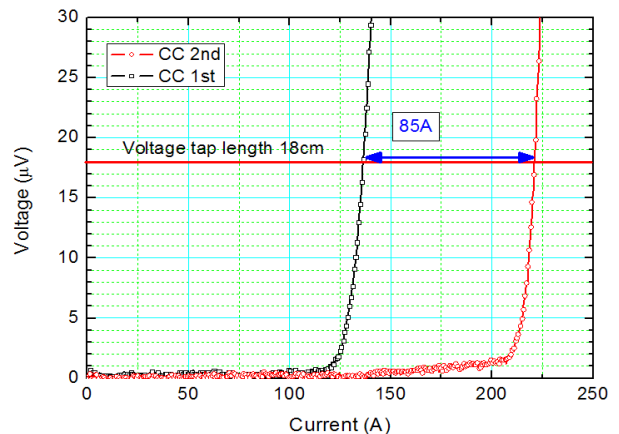
#### 2.1 2G 고온초전도 선재의 I-V 특성

열전달 특성이 나쁜 2G 고온초전도 선재를 전류리드 제작에 사용하기 위해 stainless steel로 안정화 층을 가지는 AMSC 344S 선재를 선택하였다. AMSC 344S 선재의 양면은 구리와 같은 금속과 접합을 할 경우 각기 다른 접합저항을 가진다. 고온초전도 층 쪽이 저항이 적고 substrate 층이 있는 쪽이 저항이 크다. 선재 한 가닥을 사용할 경우에는 단순히 접합저항이 커서 접합부에 줄열 발생이 많아지지만 2 가닥 이상을 사용할 경우 이웃한 선재들이 각기 다른 접합저항을 가지면 전류가 흐를 때 전류분류 문제가 발생한다.

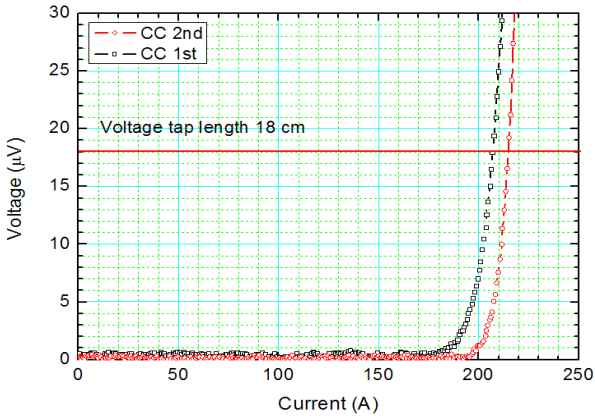
<그림 2>에는 344S 선재 한 가닥과 두 가닥을 접했을 경우의 배치를 나타내고 <그림 3>에는 두 가닥 선재를 가진 시편의 각종 선재의 I-V 곡선을 액체질소 속에서 측정한 결과를 나타내었다. 가로축의 전류는 두 선재에 흐르는 전류의 합이다. 구리 전류단자와 직접 접합된 1층 선재는 약 120 A부터 전압이 나타나기 시작하여 급격히 증가한다. 1μV/cm기준을 총전류 137 A에서 통과한다. 이때부터 2층 선재에서 전압이 발생한다. 즉 2층의 초전도 선재로 전류가 흐르기 위해서는 반드시 1층 선재의 substrate를 통과해야 하는데 이 substrate의 저항이 기율기로 나타났다. 따라서 두 선재가 구리 전류단자와 접합이 이루어 질 때 옆으로 나란히 접합되어 접합저항의 차이가 작을 경우 전류분류도 적게 일어난다. <그림 4>에 나란히 접합한 각 선재의 I-V특성곡선을 나타내었다. I-V 곡선의 차이가 확연히 줄어들었다.



<그림 2> (a) 344S 고온초전도 선재 1 가닥을 가진 선재 (b) 2가닥 적용한 선재



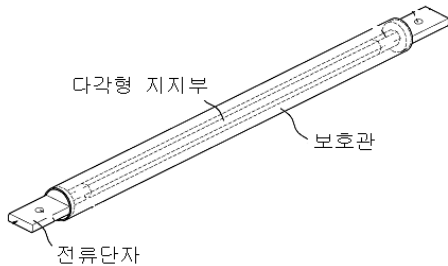
<그림 3> 344S 고온초전도 선재 2 가닥을 적용한 경우 각 선재의 I-V 특성곡선



〈그림 4〉 344S 고온초전도 선재 2 가닥을 나란히 접합한 경우 각 선재의 I-V 특성곡선

### 2.2 2G 고온초전도 전류리드 설계 및 제작

더 큰 용량의 전류리드를 만들기 위해서는 더 많은 선재가 필요하고 이 경우 접합저항의 차이를 줄이는 것이 필요하기 때문에 다각형의 전류리드 지지구조를 생각할 수 있다. 본 연구에 사용한 지지구조는 6각형을 가진다. 보호관 외경은 18.26mm였다. 〈그림 5〉에 고온초전도 전류리드 구조와 제작한 전류리드의 사진을 나타내었다.

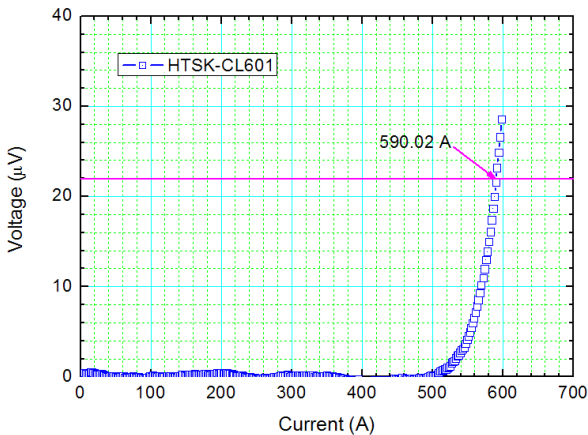


〈그림 5〉 고온초전도 전류리드 구조와 사진

### 2.3 2G 고온초전도 전류리드 특성평가

#### 2.3.1 전기적 특성

전류리드는 6가닥의 344S 선재를 사용하였다. 먼저 액체질소 속에서 제작한 전류리드의 I-V 특성곡선을 측정하였다. 그 결과를 〈그림 6〉에 나타내었다. 전압탭 간격은 22cm였고  $I_c$ 는 590 A였다.  $n$ 값은 23.37로 계산되었다. 사용전류를  $I_c$ 의 70%로 고려할 때 본 연구에서 제작한 전류리드는 400 A급으로 사용은 가능할 것으로 생각된다.



〈그림 6〉 고온초전도 전류리드의 I-V 특성곡선

#### 2.3.2 열적 특성

전류리드로 사용하기 위해서는 열전달 특성이 매우 중요한데, 극저온 냉동기를 사용하여 열전달 특성을 실험하였다. 전류리드의 한 쪽은 냉동기의 2단에 연결하여 4.2~10K 정도로 냉각하고 다른 쪽은 연결하지 않고 히터를 배치하여 인위적으로 온도를 높인다. 사용한 히터 저항은 13.8Ω 이었다. 이 시편은 외부로부터의 복사열을 차단하기 위해 알루미늄 호일을 사용하여 실드층을 설치하였다. 〈그림 7〉에 실험 배치를 나타내었다.



〈그림 7〉 열전달 특성 실험 배치

실제 실험에서 냉동기 헤드에 연결된 전류리드의 한 끝은 4.2 K까지 냉각되지 않고 7 K정도까지 냉각되었다. 다른 쪽의 온도가 62 K일 때 히터를 통해 공급된 열은 38.2mW이었다. 액체질소 온도인 77 K이 되었을 때에는 50.7 mW이었다. 한 쌍을 고려하면 약 100 mW가 된다. HTS-110사의 500 A 급 전류리드 제품 CS050030 한 쌍의 전도열점입 145 mW (64 K - 4.2 K)와 비교해도 뒤지지 않는 성능이다[7].

### 3. 결 론

1G PIT 고온초전도 선재에 비하여 열전달 특성이 나쁜 2G 고온초전도 선재를 사용하여 고온초전도 전류리드를 제작하였다. 액체질소 속에서 측정된  $I_c$ 는 590 A였고 이 값의 70%를 운전전류로 고려할 때는 약 400A급으로 사용이 가능할 것으로 판단된다. 열전달 측면에서도 77 K과 7 K 사이에서 약 50mW 정도로 양호하였다. 따라서 초전도 전력기기를 제작하는데 2G 선재를 사용한 전류리드가 좋은 후보 부품이 될 것이라 생각된다.

#### 감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발 사업의 지원에 의한 것입니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Y. K. Kwon, M. H. Sohn, S. K. Baik, E. Y. Lee, J. M. Kim, T. S. Moon, H. J. Park, Y. C. Kim, K. S. Ryu, "Development of a 100 hp synchronous motor with HTS field coils", IEEE Trans. Appl. Supercond. 15 (2005) 2194 - 2197.
- [2] G. Snitchler, B. Gamble, S. S. Kalsi, "The performance of a 5 MW high temperature superconductor ship propulsion motor", IEEE Trans. Appl. Supercond. 15 (2005) 2206 - 2209.
- [3] W. Nick, G. Nerowski, H.-W. Neumueller, M. Frank, P. van Hasselt, J. Fraunhofer, F. Steinmeyer, "380 kW synchronous machine with HTS rotor windings - development at Siemens and first test results", Physica C 372-376 (2002) 1506-1512.
- [4] Jian X. Jin, Tian F. Xiang, Lin H. Lei, Jia Q. Li, "Comparison and performance analysis of HTS current leads", Physica C 460-462 (2007) 1487-1488.
- [5] Masayuki Ishizuka, Junji Sakuraba, "Critical current density ( $J_c$ ) and mechanical characteristics of a Bi-2223 bulk current lead for cryocooler-cooled superconducting magnets", Physica C 433(2006) 173-181.
- [6] A. Ballarino, "Large-capacity current leads", Physica C 468 (2008) 2143-2148.
- [7] <http://www.hts110.co.nz/wp-content/uploads/2008/11/hts-110current-leads1.pdf>