

## Prototype 고온 초전도 케이블의 제작 및 교류손실

김영석, 이병성, 정종만, 백승명, 김상현  
경상대학교 공과대학 전기공학과

### The Characteristics on AC Losses and Construction of Prototype High-T<sub>c</sub> Superconducting Cable

Y.S. Kim, B.S. Lee, J.M. Jung, S.M. Baek, S.H. Kim  
Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang National University

yskim@cecc-1.gsnu.ac.kr shkim@nongae.gsnu.ac.kr

**Abstract** - Superconducting power cable is one of the most promising energy application of high-T<sub>c</sub> superconductors (HTS). Thus, we investigated previously the characteristics on electrical and mechanical Bi-2223 Ag sheathed tape. And a prototype HTS cable have been designed, constructed and tested.

The result shows that the transport current of HTS cable(1, 19-filament) in LN<sub>2</sub> was 116[A], 240[A], respectively. And AC loss of HTS cable(19-filament) was 1.7 [W/m] in 240 [A] loading.

## 1. 서 론

고온 초전도 케이블을 제작하기 위해서는 높은 임계전류밀도(이하 J<sub>c</sub>) 및 기계적 안정성을 가지는 선재의 개발이 우선되어야 하며, 이에 안정한 통전 성능과 실용개발에 도달했다고 생각되는 Bi-2223계 은 피복 테이프를 사용해서 고온 초전도 케이블을 제작했다. 이 케이블은 대도시의 대용량 송전 및 관로 포설시 compact화와 액체 질소를 냉매로 사용하기 때문에 비용면에서 경제적이라 할 수 있다[1].

이런 고온 초전도 케이블은 세계 각국에서 연구가 진행 중에 있다. 특히, 유럽에서는 pirellis사 및 denmark 대학이 협력해서 2kA급 케이블의 연구개발을 진행하고 있으며, 케이블의 교류손실 측정시의 전압 loop 경향, 위상오차, 유도전압의 저감 등에 대해 검토를 하고 있다. 또한 일본에서는 Tokyo전력 및 Furukawa 전력에서 66kV, 2kA급의 고온 초전도 케이블을 제작하여 시험하고 있으며, 케이블의 교류손실 저감을 위하여 수치해석에 의한 최적 설계에 대한 검토도 연구하고 있다[2,3].

일반적으로 고온 초전도 케이블의 형태로는 원통의 Former상에 초전도 선재를 부착하여 제작하는 Prototype형태가 주로 사용되며, 본 실험에서도 이를 채택하였다.

이 고온 초전도 케이블을 실현하기 위해서는 전기적 특성 면에서 높은 전류밀도 성능과 낮은 교류손실을 가지는 케이블의 개발이 중요한 과제이다. 이에 본 연구에서는 케이블 제작 시 도체로 사용되는 은 피복 고온 초전도 선재의 전기적 및 기계적 특성을 조사하여 케이블 설계시의 기초자료로 하였으며, 단심 및 19심 선재를 이용하여 direction type 및 spiral type의 케이블을 제작하여 각 케이블의 통전 특성[4] 및 교류손실 특성[5,6]에 대해 연구하였다.

## 2. 고온 초전도 케이블의 제작 및 실험방법

Prototype 고온 초전도 케이블의 제작을 위하여 PIT법으로 19심 및 단심 선재를 840℃에서 두 번의 열처리를 거친 후 제작하였으며, 최종 선재의 길이는 115mm로 하였다. 그림 1에 19심 선재의 길이방향에 대한 J<sub>c</sub>의 균일도를 나타낸다. 장척으로 19심 선재를 만들기 위해 알루미늄 보빈에 60cm로 감은 후, 열처리하였으며, 전압단자 간격은 5cm로 하여 J<sub>c</sub>의 변화를 측정하였다. 측정된 선재의 평균임계전류는 17.1 A였고 선재는 길이방향에 대해 J<sub>c</sub>의 변화가 크게 나타나지 않았으며, 평균 J<sub>c</sub>=14025.29A/cm<sup>2</sup>였다.

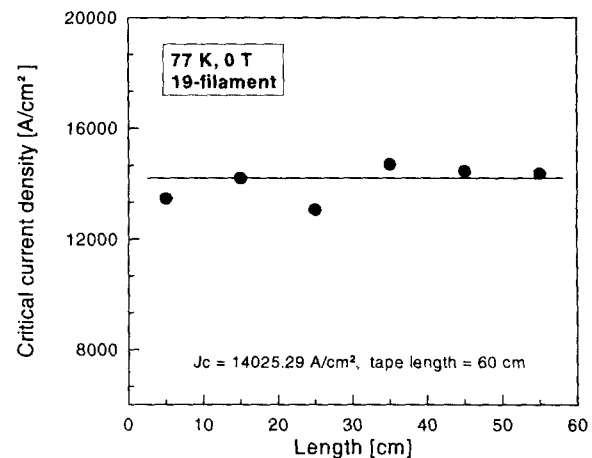


Fig.1. J<sub>c</sub>-distribution of 19 filamentary tape

따라서, 장척으로 한 경우  $J_c$ 의 균일성을 확인할 수 있었으며, 케이블 제작에 있어서 선재의 특성은 양호하다고 생각된다. 표 1에 각 선재의 특성을 나타낸다.

Table 1. Parameters of Bi-2223 tape

Bi-2223 Tape	$I_c$ (A)	S/S <sub>Ag</sub>	S (mm <sup>2</sup> )	$J_c$ (A/cm <sup>2</sup> )
1-filament	10.2	0.527	0.375	3467
19-filament	20.5	0.218	0.14	14643

그림 2에 spiral형 케이블 제작시 pitch각에 의한  $J_c$ 의 열화에 관해 나타낸다. 선재의 pitch각은 former 길이방향에 대한 것을 나타내며, 전체 pitch 길이의 1/2에 해당하는 길이를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이  $J_c$  열화의 폭이 19심 선재보다는 단심 선재의 경우 훨씬 심하게 나타나고 있다. 19심 선재의 경우 pitch각이 30°이하에서 크게 변화하지 않았지만, 단심 선재의 경우는 약 50%이하로 떨어졌다. 그러므로,

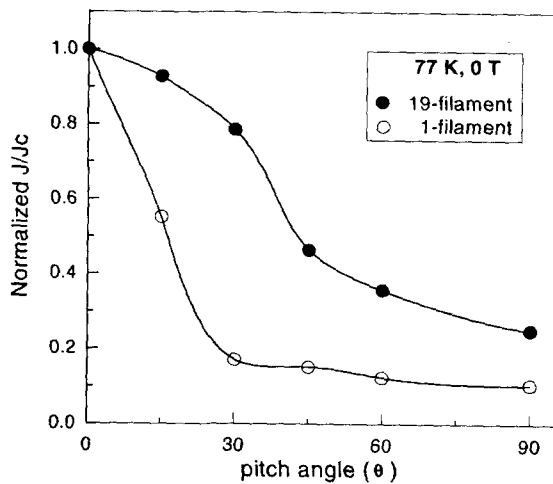


Fig. 2.  $J_c$  dependence on pitch angle in LN<sub>2</sub>

단심 선재로는 통전 용량의 측면에서 spiral형의 케이블 구조보다는 direction형태의 케이블로 제작하는 것이 유리하다고 생각된다. 하지만, 19심 선재의 경우 pitch각에 의한 열화의 폭은 적으므로, 교류 손실 면에서 spiral형의 케이블 구조로 제작하는 것이 유리하다고 생각된다. 그림 1과 2의 결과를 토대로 고온 초전도 케이블은 direction형과 spiral형의 두 가지 type으로 제작하였다. 단심 선재는 direction형으로, 19심 선재는 spiral형으로 제작하였다.

케이블의 제작은 외경 16mm, 내경 14mm인 원통형의 copper former상에 kraft지로 절연시킨 후, 은 피복 고온 초전도 선재를 부착하였다. 단심으로 제작한 케이블의 경우, former상에 일직선상으로 인접한 선재의 간격을 최소한으로 하여 부착하였다. 또한, 19심 선재로 제작한 케이

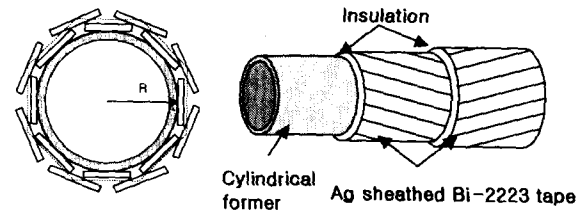


Fig. 3. Prototype High-T<sub>c</sub> superconducting cable.

블은 pitch각에 의한 선재의 특성에서  $J_c$ 의 열화 폭이 적은 former의 길이방향과 15° 각으로 선재를 부착하였다. 2층의 경우에는 1층의 선재 상에 kraft지로 절연을 시킨 후, 1층의 감은 방향과 반대방향의 역 spiral 형태로 제작하였으며, 자장의 침입을 최소로 하기 위해, 1층의 인접한 윗 부분에 선재의 가운데 부분이 접하게 하였다. former상에서 선재의 부착은 선재 끝 부분에 편조선으로 감은 후 납땜을 하여 고정하였다. 그림 3에 제작된 prototype 고온 초전도 케이블을 나타내며, 표 2에 19심 케이블의 제원을 나타낸다.

Table 2. Parameters of cable.

	Size	Characteristics
Former	O. dia : 16 mm I. dia : 14 mm	Copper pipe
Conductor	Length 100 mm	Ag sheathed Bi-2223 Tape [3.2mm <sup>w</sup> × 0.25mm <sup>t</sup> ] $I_c = 20.5$ A (1 μV/cm) 2 layer (16 wires)
Insulation	Thickness 130 μm	Kraft紙 + LN <sub>2</sub>

케이블의 대전류 통전 특성은 4단자법을 이용하여 측정하였으며, 통전 전류에 의한 교류손실 측정회로도를 그림 4에 나타낸다. 교류손실의 측정은 케이블에 전류를 통전 시키고, 전압단자에 차폐선을 사용하여 Lock-in Amp(SR 830, Stanford Co.)에서 양단의 전압 신호를 측정하였다. 이때 시료 양단에서 발생하는 전압은 실제 손실로 표현할 수 있는 유효성분과 회로전체의 Inductance에 의한 유도성분, 즉 무효성분을 포함하고 있다. 시료 전압신호의 무효성분을 제거하기 위해 전류단에 Rogowski 코일을 설치하여 유도성분을 구하고 Lock-in Amp에서 차동하였다.

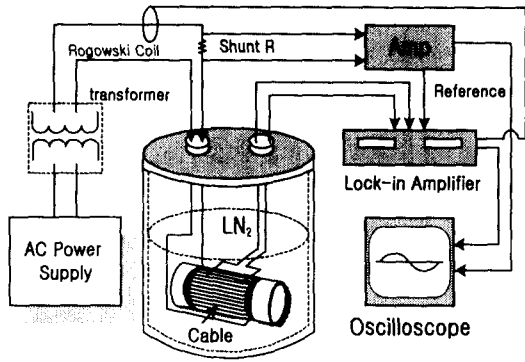


Fig. 4. AC Loss Measurement Diagram of Prototype High- $T_c$  Superconducting Cable

그리고 오실로스코프를 사용하여 전류신호와 전압 신호를 취득하여 교류 통전 손실을 구하였다. 이때의 교류 통전 손실은 다음 식에 주어진다.

$$W = I \times V \quad [W/m] \quad \text{--- 1)}$$

측정은 통전 전류의 peak값이 DC 임계전류까지 상승시켜 실험하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

그림 5는 고온 초전도 케이블의 도체로 사용된 19심 선재 하나의 교류 통전 손실을 나타낸다. 실험에서 구한 값은 Norris이론식(7)으로 계산한 값과 비교하였는데, Norris이론식은 다음과 같이 나타내어진다.

$I_0 \leq I_c$  일 때, 초전도 선재의 단면형상이 strip 형상일 경우 손실식은

$$W = \frac{\mu_0 I_c^2}{\pi} [ (1 + \beta) \ln(1 + \beta) + (1 - \beta) \ln(1 - \beta) - \beta^2 ] \quad \text{--- 2)}$$

로 주어지고, 선재의 단면형상이 ellipse형인 경우의 손실은

$$W = \frac{\mu_0 I_c^2}{2\pi} [ (2 - \beta) \beta + 2(1 - \beta) \ln(1 - \beta) ] \quad \text{--- 3)}$$

로 주어진다. 단, 여기서  $\beta = I_0/I_c$  이다.

19심 선재의 손실은 선재의 core단면을 strip 형상으로 간주하는 Norris 이론식 2)의 값에 가까운 것을 알 수 있다.

고온 초전도 케이블의 제작에 있어서 인접한 선재를 former상에 부착 시에는 통전에 의한 각 선재의 자장의 영향이 서로 다른 경향을 나타내고 있다. 인접한 선재의 gap에 의한 교류손실의 영향을 살펴보기 위하여 그림 6에 19심 선재 3개의 배치에 대한 교류손실을 나타낸다. 실험은 19심 선재 3개를 일직선상으로 배치한 후 인접한 선재의 간격을 조절하였으며, 각 선재마다 전압탭을 내었다.  $d=0$ 인 경우는 선재가 약간 포개진 경우로 선재 core-core 사이가 0인 경우,

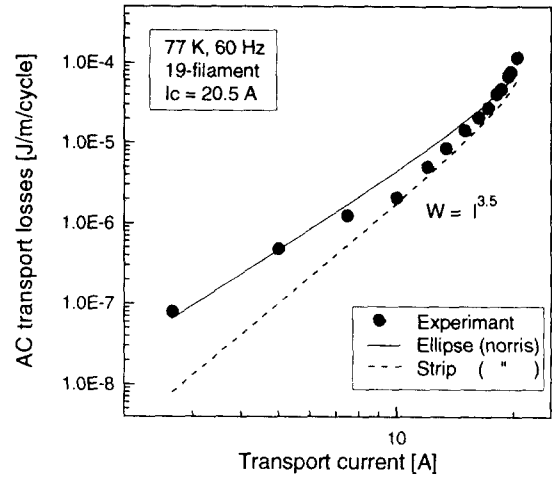


Fig. 5. AC transport losses per cycle of 19 filamentary tape.

0.926인 경우는 선재와 선재 사이의 gap이 거의 없는 경우, 1.926은 선재와 선재 사이의 gap을 1mm로 한 경우를 나타낸다. 그림에 나타낸 손실 값은 가운데 선재의 손실을 나타내며, 비교를 위해 0.926일때(●)의 가장자리 선재의 손실 값을 나타낸다.

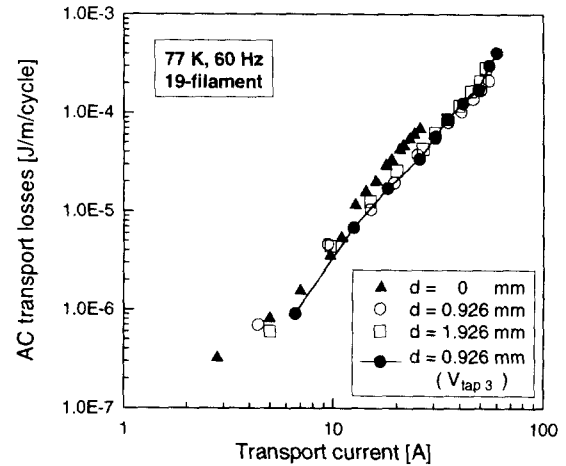


Fig. 6. AC transport losses of tapes arranged in single layer.

그림에 나타낸바와 같이 교류 손실값은 0.926에서 가장 낮은 값을 나타내며,  $d=0$ 에서 가장 높은 손실 값을 가졌다. 이것은  $d=0$ 인 경우 선재의 접침에 의한 접촉저항에 의해 손실 값이 증가한 것으로 생각되며, 가운데 선재의 손실 값은 자장의 상쇄에 의해 가장자리의 손실 값보다 낮게 나타났다. 이것으로 고온 초전도 케이블의 제작 시에 인접한 선재의 gap이 최소한으로 작게 하는 것이 손실을 줄이는 방법으로 생각된다.

그림 7에 고온 초전도케이블의 전류 통전에 대한 그림을 나타낸다. 케이블의 임계전류는 전류 통전 시의 자장에 의한 영향, 제조공정상의 기계적 열화 등을 고려하여 다음과 같이 도체 임계전류를 결정한다.

$$I_{cable} = \sum I_{c-tape} \times k \quad (4)$$

여기서, k는 열화계수이다.

direction형의 단심 케이블과 1층 spiral형 1층 19심 케이블의 통전 전류는 각각 116 A, 240 A였으며, 열화계수는 0.85와 0.73이었다. 19심 케이블의 경우, 선재 부착 시 pitch에 의해 비틀리게 되므로 기계적 열화가 크게 나타남을 알 수 있다.

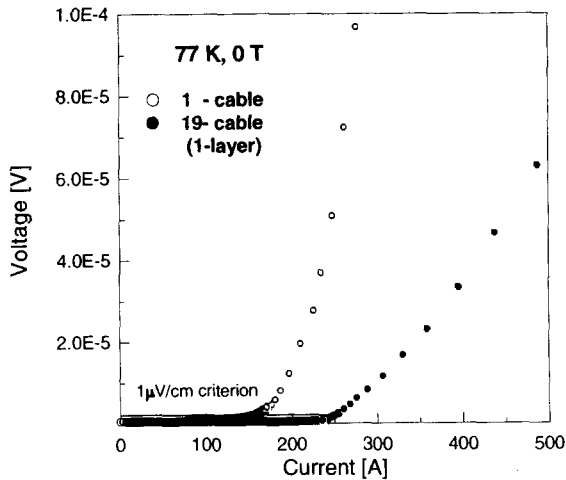


Fig. 7. I-V curve for HTS cables.

그림 8에 19심 케이블의 통전 전류에 대한 교류손실을 나타낸다. 실험에서 측정된 손실값은 최대 통전 전류 240 A에서 1.7 [W/m]의 값을

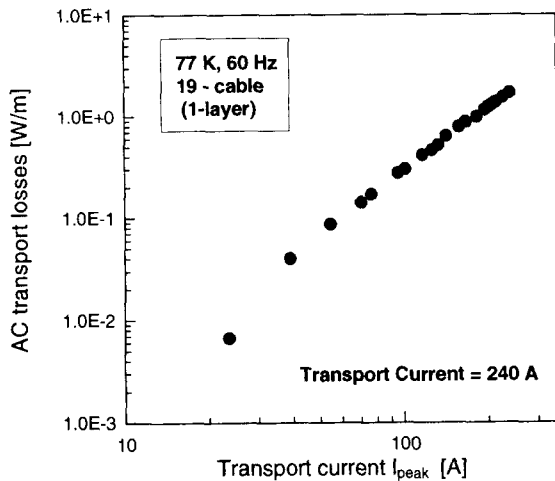


Fig. 8. AC transport losses of 19-filamentary HTS cable

가졌다. 이것은 보고되어진 손실 값보다 높은 값을 가졌다[2]. 교류손실을 감소하기 위해 pitch에 대한 연구와 선재 상호간의 Inductance를 줄이는 것이 연구되어야 하겠다.

### 3. 결 론

본 실험에서 얻어진 결과들은 다음과 같다.

- 1) 19심 및 단심 선재를 이용하여 prototype 형태의 케이블 제작하였으며, LN<sub>2</sub>중에서 각각의 통전 전류는 240 A, 116 A였다.
- 2) 19심 선재 3개를 이용한 교류 손실 값은 선재를 인접하게 부착하는 것이 손실을 줄일 수 있었으며, 가운데 선재의 손실 값이 약간 낮게 나타났다.
- 3) 19심 케이블의 경우 임계전류 통전시 손실 값은 약 1.7 [W/m] 값을 가졌다.

본 논문은 "1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

### [참 고 문 헌]

- [1] Michael, J et al, "HTS Cable Test Facility: Design and Initial Results", IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol.9, No.2, pp.134-137, 1999.
- [2] 海保勝之, 低温工学, Vol.34, No.12, pp.741-757, 1999.
- [3] R.Wesche et al, "Design of superconducting power cables" Cryogenics, 39, pp.767-775, 1999
- [4] 藤上 純, "Bi계銀시스선을 이용한 초전도체의 교류전도 특성, 低温工学, Vol.33 No.3, pp. 121-127, 1998.
- [5] L.M.Fisher, "Losses in Bi-2223/Ag tapes and in the 1kA AC transmission line model. Supercond. Sci. Technol.12 pp.24-35, 1999.
- [6] M.Daumling, "A model for the current distribution and ac losses in superconducting multi-layer power cables", Cryogenics 39, pp.759-765,1999.
- [7] W.T Norris, Journal of Physics. D 3, pp. 489-507, 1970.