

Bi-2223 선재를 이용한 Prototype 고온 초전도 케이블의 전기적 특성

김영석*, 이병성*, 장현만*, kwak민환*, 김상현*
 *경상대학교 전기공학과(자동차 및 컴퓨터 응용기술연구소)

An Electrical Properties of Prototype HTS Cable using Bi-2223 tape

Kim Young-Seok*, Lee Byung-Sung*, Jang Hyun-Man*, Kwak Min-Hwan*, Kim Sang-Hyun*
 *Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang Nat'l Univ(RIACE)

Abstract - Superconducting power cable is one of the most promising energy application of high-T_c superconductors (HTS). A prototype HTS cable have been constructed multi-layer cable using Bi-2223 tape and tested.

The result shows that the total transport current of HTS cable in LN₂ was 475(A), and transport current passed through almost the outer layer (2-layer). Also, AC transport losses in outer layer of HTS cable was proportion to I² and higher than losses of inner layer. As magnetic distribution were concentrated on outer layer.

Keywords - Multi-layer HTS cable, Magnetic distribution, AC transport losses

1. 서 론

현재 개발된 초전도 전력기기 응용분야는 금속계 저온 초전도 선재를 이용한 저온 영역(LHe)의 응용이 대부분이고, 고온 초전도 전력분야의 응용은 Bi-2223 선재의 낮은 임계전류밀도(이하 J_c), 외부자장의존성, 기계적 취약성 때문에 크게 연구가 되지 못했다[1]. 하지만, 최근에는 PIT법으로 제작된 Bi-2223 선재가 10⁴(A/cm²)이상의 높은 통전 능력과 은 합금을 이용한 기계적인 특성이 향상되어 액체 질소를 냉매로 사용하는 고온 초전도 케이블(이하 HTS 케이블)등에 응용 연구가 기대되고 있다[2][3].

이런 HTS 케이블에 대한 연구는 유럽의 Pirelli 및 simense, 일본의 동경전력 및 Furukawa전력 그리고 미국의 south wire 등에서 1000A 이상의 통전능력을 가지는 케이블이 제작되어 시험되고 있으며, 최적설계를 위해 연구가 계속 진행 중에 있다[4][5]. 한편, 국내에서도 한국전기연구소 및 기계연구원에서 케이블에 대해 연구를 진행하고 있으며, 전기연구소에서는 700A급의 HTS 케이블을 개발하여 시험하였다[6].

HTS 케이블 제작 시에는 통전 용량을 증대시키기 위해 다층구조 형태로 제작되며, 선재의 비틀림 현상과 자장에 따른 J_c의 열화현상이 나타난다. 또한 대부분 케이블의 경우 교류 영역에서 운전되기 때문에 통전 시에 각 층의 전류분포 불균일성과 교류손실이 발생하게 된다[7][8]. 이런 다층 케이블에서 불균일한 전류분포는 기기의 안정성 및 교류손실의 불균형을 초래하게 된다. 또한 교류손실 발생은 냉매를 기화시켜 경제적 손실을 가져올 뿐만 아니라 기기의 안정성에도 크게 영향을 미치게 된다[9].

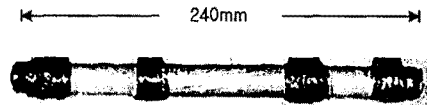
따라서 본 연구에서는 Bi-2223 선재를 이용한 2층 구조의 HTS 케이블을 제작하고 각 층의 전류통전 능력을 조사하였다. 또한 정확한 교류손실의 측정을 위해 위상 오차제어에 의한 손실 전압값의 계산과 교류손실을 측정

하였으며, 각 층에 미치는 교류손실의 차이를 자장분포를 통해 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 HTS 케이블의 제작

다층 HTS 케이블의 제작은 외경 18mm, 내경 14mm인 원통형의 flexible former상에 kraft지(130μm)로 절연시킨 후, 19실 Bi-2223 선재를 부착하였으며, 선재의 부착 시에는 J_c의 열화의 폭을 최소화하기 위하여 pitch 폭을 200으로 하였다. 2층의 경우에는 1층의 선재 상에 kraft지로 절연을 시킨 후, 1층의 감은 방향과 반대방향의 역 spiral 형태로 제작하였으며, 자장의 침입을 최소로 하기 위해 1층의 인접한 위 부분에 선재의 가운데 부분이 접하게 하였다. 마지막으로 선재의 고정엔 끝 부분에 편조선으로 감은 후 납땜을 하였으며, 케이블 전체를 teflon tape으로 고정하였다. 그림 1에 제작된 prototype 고온 초전도 케이블의 제원과 형상을 나타낸다.



	Size	Characteristics
Former	O.D : 18 mm I.D : 14 mm	Flexible sus pipe
Conductor	Length 200 mm	19 filamentary tape (3.2mm ^w × 0.25mm ^t) I _c = 18 A (1 μV/cm) 2 layer (35 wires)
Insulation	Thickness 130 μm	Kraft紙 + LN ₂

그림 1. Prototype 고온 초전도 케이블 형상 및 제원

2.2 실험장치 및 방법

HTS 케이블의 대전류 통전 특성은 4단자법을 이용하여 1 μV/cm 일 때의 전류값을 임계전류값으로 정하였다. 그림 2에 4단자법에 의한 통전 전류의 측정과 교류손실 측정회로도를 나타낸다. HTS케이블 및 선재의 교류손실의 측정은 전류를 통전 시키고, 외부노이즈의 영향을 최소화하기 위해 차폐선을 사용하여 Lock-in amp(SR 830, Stanford Co.)에서 양단의 전압 신호를 측정하였다. 전압의 측정은 lock-in 기술을 이용하여 전압탭의 페루프를 쇄고하는 자속의 시간적 변화량으로

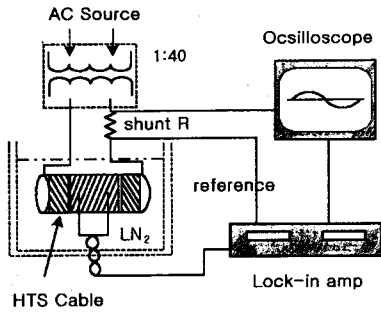


그림 2. HTS 케이블 교류손실 측정 개략도

구할 수 있다. 이때 전체전압은 실제 손실로 표현할 수 있는 유효성분과 회로전체의 Inductance에 의한 유도성분을 포함하고 있다. 여기서 전류단에 Rogowski 코일을 설치하여 출력값을 Lock-in Amp에 입력시켜 차동기능을 이용하여 유도분을 상쇄시켰다. 그리고 오실로스코프를 사용하여 shunt 저항에서 취득한 전류신호와 lock-in amp에서 전압 신호를 취하여 교류 통전 손실을 구하였으며, 다음 식에 주어진다.

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

이때의 통전 전류는 $0.1 < I_p / I_c < 1$ 의 범위에서 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 3은 제작된 HTS 케이블의 대전류 통전 특성을 나타낸다. Bi-2223 선재는 1, 2층에 각각 17개와 18개가 사용되었으며, 각각에 전류를 통전한 결과 1층에서는 225 A, 2층에는 250A의 통전 능력을 가졌다. 이때의 통전능력은 다음 식에 따른다.

$$I_{cable} = \sum I_{c-tape} \times k \quad \text{----- 2)}$$

여기서, k는 열화계수로서, 1층, 2층의 열화계수는 0.74, 0.77로서 통전능력이 저하됨을 알 수 있다. 이는 케이블의 spiral pitch가 가해지는 기계적인 힘과 전체 자장의 영향에 의해 저하되는 것으로 사료된다.

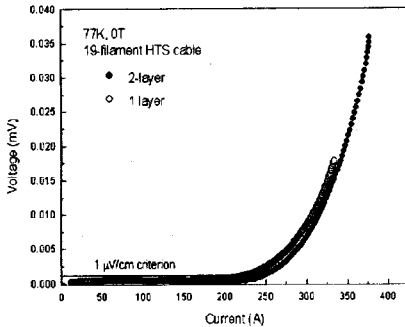


그림 3. HTS 케이블의 대전류 통전 특성

이런 HTS 케이블은 교류영역에서 운용되기 때문에 실제 교류전원을 사용하여 통전 능력을 측정하였으며, 이를 그림 4에 나타낸다.

그림에서 알 수 있듯이 각층에 흐르는 전류를 비교하면, 2층에 흐르는 전류가 1층보다 큼을 알 수 있다. 이는 일반 구리도체와 같이 표피효과에 의한 최외층에 전류가 집중하는 현상이 나타나며, 이러한 현상을 편류 현상이라 부른다. 이것은 각 층의 저항값의 차이와 인덕턴스의 영향이라 사료된다. 이 편류현상이 발생하면 케

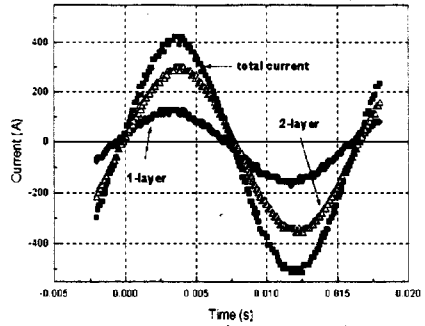


그림 4. HTS 케이블 각 층의 전류분포

이들의 각 층에 미치는 전류의 불균일성이 가중되어 교류손실에 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다. 따라서 케이블 제작시에는 임계전류의 열화를 방지하기 위해 spiral pitch를 크게해야 하며, 교류손실을 감소시키기 위해 각 층의 균일한 전류분포와 인덕턴스를 줄이는 것이 시급하다 하겠다. 이에 따라 각 층의 교류손실을 위상오차의 제어에 의해 손실 전압값을 저감하는 방법으로 접근하였다. 실제 초전도체 통전시에 발생하는 전압값은 식과 같이 저항분과 유도분의 두가지 요소를 가지고 있다.

$$V = V_r \sin \omega t + V_L \cos \omega t \quad \text{----- 3)}$$

즉, $V_r \sin \omega t$ 의 값은 in-phase된 것이며, $V_L \cos \omega t$ 은 out of-phase 값이 출력되게 된다.

여기서, reference로 주어지는 signal은

$$V_{ref} = V_{ref} \sin(\omega_{ref} t + \theta_{ref}) \quad \text{----- 4)}$$

이다.

lock-in amp(SR 830)의 phase sensitive detector(PSD) 기능을 이용하여 3)와 4)의 식을 연산하면, 출력되는 신호 전압은 low pass filter를 통해 출력값이 나오므로 AC signal은 제거되고 출력은 DC signal이 나온다.

따라서

$$V_{out} \cong V_r \cos \theta_{ref} + V_L \sin \theta_{ref} \quad \text{----- 5)}$$

와 같이 된다.

여기서, $\theta_{ref} = 0$ 라면, 전류의 입력신호의 in-phase된 신호 요소가 측정되게 된다.

만일, 위상오차(phase error) δ 가 있다면,

$$V_{out} \cong V_r \cos(\theta_{ref} \pm \delta) + V_L \sin(\theta_{ref} \pm \delta) \quad \text{--- 6)}$$

과 같이 되며, 식 5)의 $\theta_{ref} = 0$ 일때 in-phase된 요소분 (ΔV_r)의 상대적인 오차에 의한 손실전압 측정은

$$\Delta V_r = 100 \frac{V_{out} - V_r}{V_r}$$

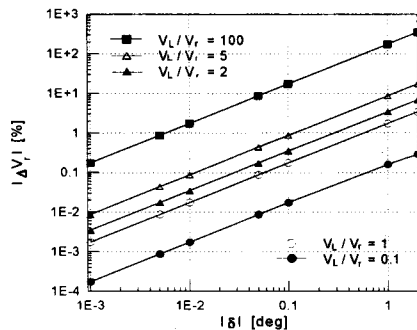


그림 5. 위상 오차에 대한 손실전압 특성

$$= 100 \left(\cos \delta - 1 \pm \frac{V_L}{V} \sin \delta \right) (\%) \quad \text{----7)}$$

가 된다.

따라서, 위상오차의 제어에 의해 손실전압의 값이 변화 될을 알 수 있다. 그림 5에 위상오차에 의한 손실전압의 변화를 나타낸다.

그림에서 알 수 있듯이 유도분과 저항분의 비가 상대적으로 작고 위상오차 δ 가 작아짐에 따라 전압값은 줄어들음을 알 수 있다. 따라서 위상오차의 제어에 의한 정확한 손실값을 측정할 수 있었다.

그림 6에 HTS 케이블 각층의 교류손실을 나타내며, 실선은 norris 이론식을 이용한 계산값이다. 그림에서 알 수 있듯이 1층보다는 2층의 손실값이 큼을 알 수 있다. 2층의 손실값은 거의 전류의 제곱에 비례하여 히스테리시스 손 뿐 만 아니라 와전류손에도 많이 의존하는 것으로 사료된다.

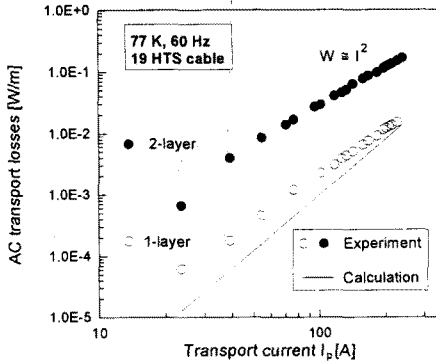
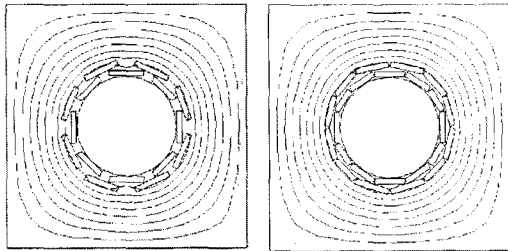


그림 6. HTS 케이블의 교류손실

1층의 손실값이 2층보다 상대적으로 낮은 것은 그림 4에 나타낸 각 층의 전류분포에서 케이블 2층에 전류가 집중하게 되어 자기 자계의 영향이 덜 받는 것으로 생각되며, 이는 그림 7에 나타낸 각 층의 자장분포와 동일한 결과를 나타낸다.



a) gap이 있는 경우 b) gap이 없는 경우

그림 7. HTS 케이블 각 층의 자장분포

그림 7의 a)는 케이블에서 선재사이의 gap이 존재하는 경우를 나타내며, b)는 gap 존재하지 않는 경우를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 두 경우 모두 1층에는 거의 자장의 영향이 미치지 않음을 알 수 있으며, b)의 경우가 자장의 영향이 더 작음을 알 수 있다. 따라서 former상에 선재의 부착시 gap이 없는 상태로 하는 것이 손실을 줄이는 방법으로 생각되며, 전체적인 손실값이 이론적인 값보다 높게 나타나고 있다. 추후 교류손실의 저감을 위해 각 층의 인덕턴스와 상호 인덕턴스를 조사할 것이며, 4단자법에 의한 손실의 측정이 아닌 무접촉 손실측정법에 대해서도 보고할 예정이다. 또한 손실의 이론적인 해석도 병행할 예정이다.

본 실험에서 얻어진 결과들은 다음과 같다.

1) HTS 케이블의 각 층의 통전능력은 225 A, 250A 였지만, 1층보다는 2층에 전류가 집중하는 편류 현상이 발생하였다.

2) HTS 케이블 각 층의 손실값은 1층보다는 2층의 손실값이 큼을 알 수 있으며, 2층의 손실값은 거의 전류의 제곱에 비례하여 히스테리시스 손 뿐 만 아니라 와전류손에도 많이 의존하는 것으로 사료된다.

3) HTS 케이블의 교류손실은 2층의 값이 상대적으로 크며, 이는 자장의 영향이 1층보다는 2층에 집중하여 나타난 결과로 사료된다.

본 연구는 "1999년도 한국 전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행되었음.

(과제번호 : 99-003)

참 고 문 헌

- [1] R.L. Wong, C.T. Yeaw "Comparison of the Calculated and Measured Stability of a NbTi Cable-In Conduit Conductor" IEEE Trans on Appl. Supercond. 5, pp.592-595, 1995.
- [2] "ASC wire 2x better than other reports", superconductor week, Vol.13, No.30, pp. 1-2, 1999.
- [3] Michael, J et al, "HTS Cable Test Facility: Design and Initial Results", IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.9, No.2, pp.134-137, 1999.
- [4] 海保勝之, 低温工学, Vol.34 No.12, pp.741-757, 1999.
- [5] R.Wesche, A.Anghel, B.Jakob, G.Pasztor, G.Vecsey, "Design of superconducting power cables", Cryogenics, Vol.39, pp.767-775, 1999.
- [6] 조전욱 외 7인 "700A급 고온 초전도 케이블 코야 제작 및 평가" KIASC conference 2000, pp.55-57, 2000.
- [7] M.Daumling, "A model for the current distribution and ac losses in superconducting multi-layer power cables", Cryogenics, Vol. 39, pp.759-765, 1999.
- [8] 藤上 純, "Bi계열 시스선을 이용한 초전도체의 교류 통전특성, 低温工学, Vol.33, No.3 pp. 121-127, 1998.
- [9] J.W.Lue et al, "AC Losses of Prototype HTS Transmission Cables", IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.9, No.2, pp. 416-419, 1999.