

다층 고온 초전도 케이블의 전류 분포 및 교류손실 해석

Current Distribution and Numerical Analysis of AC Losses on Multi-Layer HTS Cable

⁰김영석*, 이병성*, 장현만*, 광민환*, 김상현*
(*Y.S.Kim*, B.S.Lee*, H.M.Jang*, M.H Kwak*, S.H.Kim*)

* 경상대학교 공과대학 전기공학과(자동화 및 컴퓨터 응용기술 연구소)
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 AC transport losses under self field were investigated at 77K on the 19 filamentary tape and multi-layer HTS cables. And we carried out numerical analysis using bean model.

The result shows that the total transport current of HTS cable in LN_2 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 I^2 and higher than losses of inner layer. In case of $I_p=I_c$, calculated numerical loss density was concentrated on the edge of tape and most of loss density in cable was distributed outer layer more than inner layer. As magnetic distribution was concentrated on outer layer.

Key words(중요용어) : Multi-layer HTS cable, AC transport losses, Numerical analysis

1. 서론

현재 이용되고 있는 Bi계 고온 초전도 선재는 임계전류의 향상 및 Mg 및 Au가 첨가된 합금 피복재에 의한 기계적인 특성의 향상 그리고, LN_2 를 냉매로 사용하게 되어 고온 초전도 케이블(이하 HTS 케이블)등의 응용 연구로 이용되고 있다[1][2].

HTS 케이블에 대한 연구는 유럽, 일본 그리고 미국 등에서 1000 A 이상의 통전능력을 가지는 케이블을 제작하여 시험하고 있으며, 최적설계를 위해 연구가 계속 진행 중에 있다[3][4]. 한편, 국내에서도 한국전기연구소 및 기계연구원에서 케이블에 대해 연구를 진행하고 있으며, 전기연구소에서는 700A의 통전능력을 가지는 HTS 케이블을 개발하여 시험하였다[5].

HTS 케이블은 통전 용량을 증대시키기 위해 일반적으로 다층구조 형태로 제작되며, 대부분 교류 영역에서 운전되기 때문에 통전 시에 교류손실이 발생하고 각 층의 임피던스의 차이에 의한 전류분포 불균일성 나타난다[6][7]. 이런 다층 케이블에서는 자기자계에 의한 hysteresis 손실 및 와전류 손실등이 발생하며, 교류 손실의 발생은 주위 냉매를 기화시켜 경제적 손실을 가져오게 된다[8]. 따라서, HTS

케이블에 있어서는 통전용량의 증대뿐만 아니라, 교류손실을 줄이는 것도 매우 중요하며, 전체 케이블의 손실을 수치해석을 통해 교류 손실분포를 예측하여 HTS 케이블 시스템의 최적화하는 것은 필수적이라 하겠다[9].

따라서, 본 연구에서는 Bi-2223 테이프를 이용한 다층 spiral 구조의 HTS 케이블을 제작하였다. 먼저 케이블에 사용된 테이프의 교류손실을 측정하여 케이블의 교류손실의 기본 자료로 하였으며, 제작된 케이블의 전류 통전특성을 조사하였다. 또한, 케이블 각 층의 통전 능력에 따른 교류손실을 측정하고 수치해석을 통한 손실 밀도값과 비교하였으며, 손실의 차이의 원인을 각 자장분포를 통해 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 HTS 케이블의 제작

다층 HTS 케이블의 제작은 원통형의 flexible former상에 kraft지($130\mu m$)로 절연시킨 후, 19심 Bi-2223 테이프를 부착하였으며, 선재의 부착 시에는 J_c 의 열화의 폭을 최소화하기 위하여 pitch길이를 200mm로 하였다. 2층의 경우에는 1층의 선재 상에 kraft지로 절연을 시킨 후, 1층의 감은 방향과 반대 방향의 역 spiral 형태로 제작하였으며, 자장의 침입을 최소로 하기 위해 1층의 인접한 위 부분에 선재

의 가운데 부분이 접하게 하였다. 마지막으로 선재의 고정은 끝 부분에 편조선으로 감은 후 납땀을 하였으며, 케이블 전체를 teflon tape으로 고정하였다. 그림 1에 제작된 prototype 고온 초전도 케이블의 제원과 형상을 나타낸다.

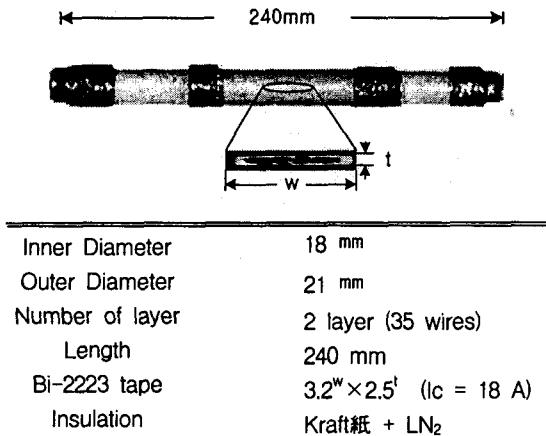


그림 1. Prototype 고온 초전도 케이블 형상 및 제원
Fig. 1. Parameter and shape of prototype HTS cable.

2.2 실험장치 및 방법

HTS 케이블의 대전류 통전 특성은 4단자법을 이용하여 전계 1 μV/cm 일 때의 전류값을 임계전류값으로 정하였다. HTS케이블 및 테이프의 교류손실은 Poynting vector $E \times H$ 를 이용하여 다음 식에 의한 계산되어 진다.

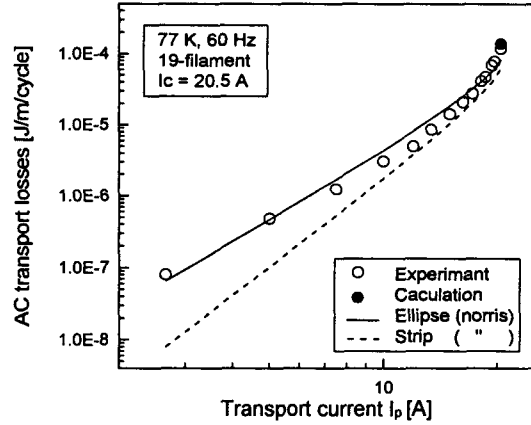
$$P = \int E \times H dt \quad \text{----- 1)}$$

손실의 측정은 초전도체에 전류(I_p)를 통전 시키고, 전압 양단에서 발생하는 손실전압을 Lock-in amp(SR 830, Stanford Co.)에서 측정하였다. 전압단자에서 얻어지는 신호는 실제 손실로 표현할 수 있는 저항성 전압성분과 Inductance에 의한 유도전압성분이 포함되어 있어 두 신호사이에는 위상오차가 발생하게 된다. 따라서, lock-in amp의 dual phase 기능을 이용하여 전류신호를 reference로 설정하여 전압단자의 신호와 Rogowski coil의 신호를 동시에 받아들였다. 여기서, Rogowski 코일로 위상차를 보상해줌으로써 실제의 저항성 전압값을 얻을 수 있었다. 그리고 오실로스코프를 사용하여 전류신호와 전압 신호를 취득하여 교류 통전손실을 구하였다. 이때의 통전 전류는 $0.1 < I_p / I_c < 1$ 의 범위에서 측정하였다.

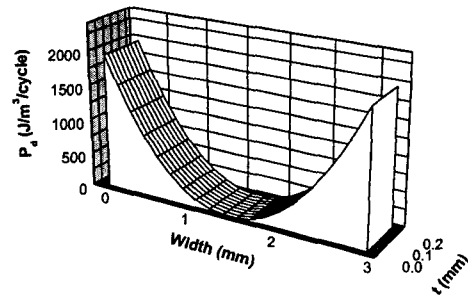
3. 실험결과 및 고찰

그림 2에 HTS 케이블에 사용된 19심 테이프의 교

류손실과 손실밀도(P_d)에 대해 나타낸다. 여기서, 수치해석은 Norris 이론에 기초해서 임계상태 모델인 Bean 모델을 사용했다. 초전도체에 흐르는 교류전류



a) AC transport losses.



b) In case of $I_p = I_c$, AC loss density

그림 3. 19심 테이프의 교류 통전손실과 손실밀도
Fig. 3. AC loss density and losses of 19 filamentary tape.

에 의한 초전도내부의 임의의 점 r에서 발생하는 손실밀도는 Maxwell 전자방정식을 이용하여 정리하면 다음 수식에 의해 계산된다[9].

손실밀도 P_d 는

$$P_d = 2\mu_0(H_0 - J_c r)^2 \quad \text{----- 2)}$$

이 되며, 임의의 점 r에서 기준점(=원점)을 채교하는 자속 ϕ 는

$$\phi = \frac{\mu_0(H_0 - J_c r)(H_0/J_c - r)}{2} \quad \text{----- 3)}$$

이 된다. 2)와 3)식을 정리하면, 손실밀도 P_d 는

$$P_d = 4J_c \phi \quad \text{----- 4)}$$

가 된다. 여기서, J_c 는 테이프의 임계전류밀도이다. 따라서, 손실값은 $r = H_0/J_c$ 일때, $P_d = 0$ 이고, $r = 0$ 이 되면 최대 $2\mu_0 H_0^2$ 이 된다.

그림 2에서 알 수 있듯이 19심 테이프의 교류 통전손실은 히스테리시스 손실이 지배적인 Norris 이론

식에 잘 일치하고 있고(그림 a), 그림 상의 ● 는 전류 I_p 가 I_c 일때의 수치 계산된 값을 나타내며, 실험 결과와 잘 일치하고 있다. 그림 b)는 테이프의 손실 밀도 분포를 나타낸 것으로 주로 테이프의 외부영역에 손실밀도가 분포하고 있으며, 내부로 갈수록 손실밀도값이 감소하여 거의 0에 가까운 값을 나타내었다. 이는 자계의 침입이 테이프 내부로 갈수록 크게 영향을 미치지 못하여 손실밀도값이 감소하는 것으로 사료된다.

그림 3은 제작된 HTS 케이블의 대전류 통전 특성을 나타내며, Bi-2223 테이프는 1, 2층에 각각 17개와 18개가 사용되었다. 이때의 케이블 통전 특성은 다음 식에 따른다.

$$I_{cable} = \sum I_{c-tape} \times k \quad \text{----- 5)}$$

여기서, k는 열화계수이다.

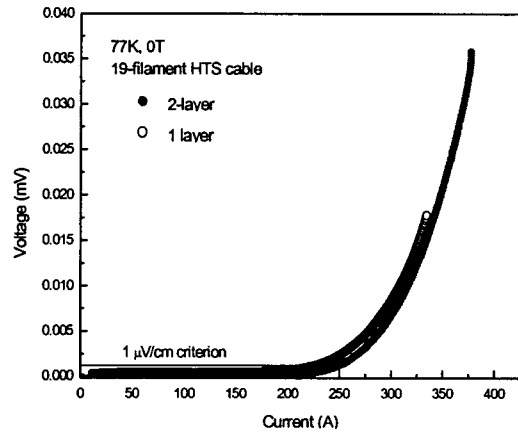


그림 4. HTS 케이블의 대전류 통전 특성

Fig. 4. I-V curve of HTS cable.

HTS 케이블 각 층에 전류를 통전한 결과 1층에서는 225 A, 2층에는 250A의 임계전류를 가졌으며, 1층, 2층의 열화계수는 0.74, 0.77로서 임계전류가 다소 많이 감소됨을 알 수 있다. 이는 케이블의 제작과정에서 Bi-2223 테이프의 spiral pitch에 따른 비틀림 현상에 의해 가해지는 기계적인 힘과 케이블 전체에서 발생하는 자장에 의해 테이프가 자장에 약한 특성을 나타내는 영향 때문으로 사료된다.

HTS 케이블의 통전 능력에 따른 교류손실을 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 편류현상이라 부른다. 이것은 각 층의 테이프 개수 및 임피던스의 차이에 의한 영향이라 사료되며, 각 층의 교류손실에도 크게 영향을 미칠 것으

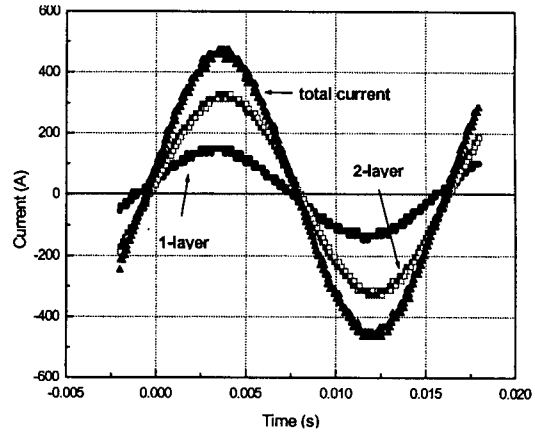


그림 5. HTS 케이블 각 층의 전류분포

Fig. 5. Current distribution of each layer on HTS cable

로 생각된다.

그림 5에 HTS 케이블 각층의 교류손실을 나타낸다. 그림에서 실선은 Norris 이론식을 이용한 계산값이다.

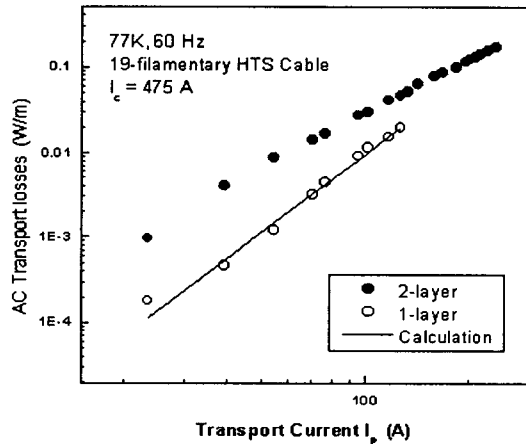


그림 6. HTS 케이블의 교류통전손실

Fig. 6. AC transport losses of HTS cable.

그림에서 알 수 있듯이 1층보다는 2층의 손실값이 큼을 알 수 있다. 1층의 손실값은 이론식과 거의 일치하여 전류 I^3 에 비례하여 증가하였으며, 2층의 손실값은 거의 전류 I^2 에 비례하여 히스테리시스손 뿐 만 아니라 와전류손도 많이 포함되어 있다고 사료된다.

그림 7에 $I_p = I_c$ 일때의 다층 케이블의 소선 1회 선당의 수치 해석된 손실밀도를 나타낸다. 그림 6의 손실값과 마찬가지로 2층의 손실밀도도 1층보다 훨씬 크게 분포되어 있으며, 19심 테이프와 마찬가지로 손실밀도는 내부로 갈수록 감소됨을 알 수 있다.

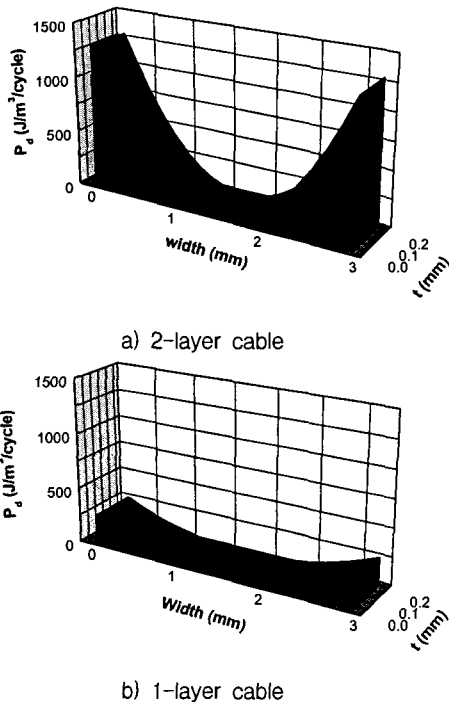


그림 7. HTS 케이블 1회선당의 교류손실밀도 ($l_p=l_c$)
 Fig. 7. AC loss density per tape of HTS cable
 (In case of $l_p=l_c$)

1층의 손실값이 2층보다 상대적으로 낮은 것은 그림 4에 나타난 각 층의 전류분포에서 케이블 2층에 전류가 집중하게 되어 자기 자계의 영향이 덜 받는 것으로 생각되며, 자장이 최외층에 집중적으로 분포하고 특히, 선재의 edge부분에 자장이 많이 분포하고 있는 것을 알 수 있으며, 내층에는 자장의 영향이 미약함을 알 수 있다.

따라서, HTS 케이블의 통전용량을 증대시키기 위해서는 테이프 1선 당의 임계전류를 높이는 것이 중요하지만, 이로 인해 케이블 층간의 편류현상이 발생하여 안정성에 영향을 미치게 된다. 따라서 HTS 케이블 층간의 전류 편류현상을 억제하여 교류손실을 감소시키는 것이 중요하며, 추후 교류손실의 저감을 위해 각 층의 인덕턴스와 상호 인덕턴스 등의 임피던스 균일성에 대해 연구를 계속할 예정이고 4단 자법에 의한 손실의 측정이 아닌 무접촉 손실 측정법에 대해서도 보고할 예정이다.

4. 결 론

본 실험에서 얻어진 결과들은 다음과 같다.

1) HTS 케이블의 각 층의 통전능력은 225 A, 250 A였지만, 1층보다는 2층에 전류가 집중하는 편류현

상이 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 크고 이는 수치해석에 의한 손실밀도와 일치하였으며, 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] "ASC wire 2x better than other reports", superconductor week, Vol.13, No.30, pp. 1-2, 1999.
- [2] Michael, J et al, "HTS Cable Test Facility: Design and Initial Results", IEEE Trans. Appl, Supercond, Vol.9, No.2, pp.134-137, 1999.
- [3] 海保勝之, 低温工学, Vol.34 No.12, pp.741-757, 1999.
- [4] R.Wesche, A.Anghel, B.Jakob, G.Pasztor, G.Vecsey, "Design of superconducting power cables", Cryogenics, Vol.39, pp.767-775, 1999.
- [5] 조전욱 외 7인 "700A급 고온 초전도 케이블 코아 제작 및 평가" KIASC conference 2000, pp.55-57, 2000.
- [6] M.Daumling, "A model for the current distribution and ac losses in superconducting multi-layer power cables", Cryogenics, Vol. 39, pp.759-765, 1999.
- [7] 藤上 純, "Bi계銀시어스線を用いた超電導導体の交流電特性, 低温工学, Vol.33, No.3 pp. 121-127, 1998.
- [8] J.W.Lue et al, "AC Losses of Prototype HTS Transmission Cables", IEEE Trans. Appl, Supercond, Vol.9, No.2, pp. 416-419, 1999.
- [9] Y.Yang et al, "The influence of geometry on self-field AC losses of Ag sheathed PbBi2223 tapes", Physica C, 256, pp.378-386, 1996.