

도전성이 높은 안정화층을 고려한 YBCO 선재의 전송전류 손실 해석

강명훈, 한병욱, 정두영, 임희현, 임형우, 차귀수, 이희준
순천향대학교

Analysis of transport current loss considering the conductive layer of YBCO wires

Myunghun Kang, Byungwook Han, Duyoung Jung, Heehyun Lim, Hyoungwoo Lim, Gueesoo Cha, and Heejoon Lee
Soonchunhyang University

Abstract - YBCO wire has a metal substrate to improve the texture structure and highly conductive layers to increase the cryogenic stability. When AC current flows in the YBCO wire, magnetic field which is generated by the AC current magnetizes the metal substrate and induces the eddy current in the stabilizing layer. To examine the effect of the metal substrate and the conducting layer on the transport current loss of YBCO wire, this paper presents the transport current loss of YBCO wire which has metal substrate and conductive layer. YBCO wire with Ni-W substrate and copper layer were chosen as the model HTS wire for numerical calculation. Finite element method has been used to calculate the transport loss and the results of numerical calculation was compared with analytic calculation suggested by Norris.

기존의 4층 구조에서 금속층을 윗면과 아랫면에 같이 사용하였다.

그림 2는 수치해석을 위한 모델의 단면도이다. 그림 2와 같이 선재 전체의 폭은 4.4mm이지만 기판층과 YBCO 층은 전체 폭보다 작다. 또한 금속층, 기판층, 초전도층을 제외한 영역은 공기 영역으로 설정하였다.

표 1은 수치해석을 위해 사용한 요소들이다. 기판층은 니켈과 텅스텐의 합금이며 x 는 니켈-텅스텐 합금 중 텅스텐의 함유량이다.

표 2는 수치해석 모델의 사양이다. 구리의 저항률과 Ni, Ni-3%W, Ni-5%W의 종류에 따라 변화시키며 수치 해석을 하였다.

본 논문에서 사용한 구리의 저항률은 세 가지 방법으로 결정하였다. 첫 번째는 I-V를 이용하여 측정하는 방법이다. 그림 3은 샘플의 저항을 찾기 위해 측정된 결과이다. 전류의 증가에 따라 전압의 크기가 선형이므로 식 (1)을 이용하여 저항률을 계산하였다.

1. 서 론

고온 초전도 선재의 특성개발과 더불어 고온초전도선재를 이용한 초전도 변압기, 초전도 한류기 등의 차세대 전력기기들이 개발에 사용되고 있다. 이러한 초전도 전력기기들은 고효율기기이면서도 소형경량화가 가능한 전력기기라는 장점을 가지고 있어 많은 연구가 선진각국에서 계속되고 있으며 현재 국내외의 전력산업 부분에서도 활발한 연구가 진행 중이다.[1] 하지만 이런 초전도 전력기기를 교류조건하에서 동작하게 되면 직류조건에서와는 달리, 초전도 선재의 자기적 특성으로 인해 교류손실이 발생한다. 이 교류손실은 전력기기의 전체적인 효율을 저하시키기 때문에 이런 초전도 선재의 교류손실 값은 중요하다.

본 논문에서는 도전성이 높은 안정화층과 금속기판이 YBCO선재의 교류손실에 어떠한 영향을 주는지를 2차원 유한요소법을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 유한요소법은 안정화층의 저항률과 니켈-텅스텐 합금의 종류를 바꾸면서 수행하였다. 그리고 초전도층에 전류가 흐를 경우 안정화층과 기판층 부분의 손실 값을 검토하였으며, 선재 전체의 손실 값과 Norris의 평판 모델을 비교 분석하였다.

$$\rho = R \times \frac{A}{L} \tag{1}$$

I-V 측정 결과 저항률은 7.0E-9 Ωm 이었다. 두 번째는 온도계수를 이용하여 구리의 저항률을 구하였으며, 식 (2)로부터 구하였다.

$$\rho_T = \rho_{20} [1 + \alpha_{20}(t - t_{20})] \tag{2}$$

위 식 (2)에서 ρ_T 는 구하고자 하는 온도에서의 저항률이며, ρ_{20} 은 20℃에서의 저항률, α_{20} 은 20℃에서의 물질의 온도계수, t 는 측정온도이며 t_{20} 은 20℃를 나타낸다. 계산

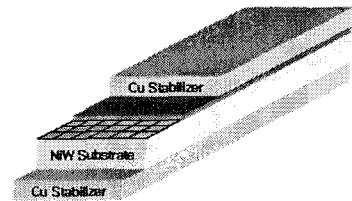


그림 1. YBCO 선재의 구성

2. YBCO 선재의 수치해석

2.1 수치해석모델

BSCCO 선재는 초전도체와 안정화재인 Ag로 구성되며 PIT 압연공정을 통해 제작하고, YBCO 선재는 박막 증착형태로 제작되기 때문에 층 구조로서 안정화층, 금속기판, 초전도체의 4층 구조로 되어있다.

그림 1은 YBCO 선재의 구조이다. 해석에 사용한 선재는

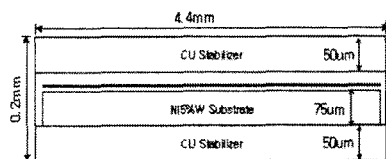


그림 2. 수치해석 모델의 단면도

표 1. YBCO 선재의 사양

분류	값
선재 폭	4.4 mm
선재 두께	0.2 mm
YBCO 층 두께	1 μm
기판	Ni-x%W
안정화층	Cu

표 2. 수치해석 모델의 사양

구분	구리저항률 Ωm	니켈저항률 Ωm	텅스텐 함유율
1	7.0E-9	1.5E-8	5%
2	2.7E-9	1.5E-8	5%
3	4.5E-9	1.5E-8	5%
4	7.0E-9	1.5E-8	0%
5	7.0E-9	1.5E-8	3%

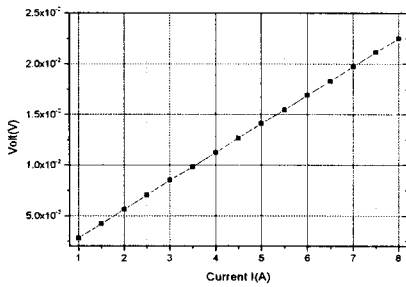


그림 3. 구리의 I-V 특성

결과 저항률은 2.7E-9 Ωm 이었다. 세 번째는 참고문헌에서 제시한 저항률을 이용하여 구하였다. 그 결과 구리의 저항률은 4.5E-9 Ωm 이었다.[2]

니켈-텅스텐 합금의 종류에 따른 저항 값은 정확하게 알기가 어려워 니켈 저항률을 하나로 보았으며 참고문헌에서 제시한 값인 1.5E-8 Ωm를 사용하였다.[3] 니켈-텅스텐 합금의 종류에 따른 투자율과 포화자속 값은 참고문헌의 값을 이용하였다.[4]

그림 4는 니켈-텅스텐 합금의 종류에 따른 자화곡선 그래프이다.

2.2 수치해석방법

수평방향의 자화손실 값은 Wilson이 제시한 무한 평판 모델을 통해 완전침투가 발생하지 않은 경우와 완전침투가 발생한 경우에 대해 계산되었다. 평균 수평 자속밀도 값은 아래 식 (3)에 의해 구해진다. N은 요소의 번호이며, $B_{m//,e}(i)$ 은 i번째 요소에 가해지는 수평 자속밀도 값이다.

$$B_{m//}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |B_{m//,e}(i)| \quad (3)$$

완전침투가 발생하지 않은 경우, ($\beta < 1$)

$$Q_m = 2 \frac{(B_{m//}(k))^2 \beta}{\mu_0} \times S \times 60 \quad (4)$$

완전침투가 발생한 경우, ($\beta \geq 1$)

$$Q_m = \frac{2(B_{m//}(k))^2}{\mu_0} \left(\frac{1}{\beta} - \frac{2}{3\beta^3} \right) \times S \times 60 \quad (5)$$

위 식에서, Q_m 은 단위 길이 당 손실 값이며, $\beta = B_{m//}(k)/B_p$,

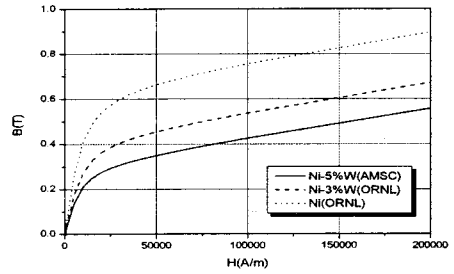


그림 4. 니켈합금의 자화곡선

$B_p = \mu_0 J_c a$, 초전도체의 전류 밀도는 $J_e = I_c/S$ 이며, S는 선재의 면적, a는 선재 두께의 절반이다.

수직방향의 자화손실 값은 Brandt가 제시한 평판 모델에 의해 계산하였다.

평균 수직 자속밀도 값은 아래 식 (6)에 의해 구해진다. N은 요소의 번호이며, $B_{m\perp,e}(i)$ 은 i번째 요소에 가해지는 수직 자속밀도 값이다.

$$B_{m\perp}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |B_{m\perp,e}(i)| \quad (6)$$

$$Q_m = \frac{4\pi a^2}{S\mu_0} B_c B_{m\perp}(k) \left[\frac{2}{\beta_\perp} \ln(\cosh\beta_\perp) - \tanh\beta_\perp \right] \times S \times 60 \quad (7)$$

위 식에서, a는 평판 모델 폭의 절반이며, $\beta_\perp = B_{m\perp}(k)/B_c$, $B_c = \mu_0 J_c d/\pi$ 이며 여기서 d는 선재의 두께이다.[5]

2.3 수치해석 결과

수치해석을 통해 계산된 손실 값은 구리 안정화층 부분의 손실 값, 니켈-텅스텐 합금 기판 부분의 손실 값과 초전도체 부분의 손실 값으로 나눌 수 있다. 구리 안정화층 부분의 손실 값은 전송전류에 의한 자계분포에 기인한 와전류 손실 값이며, 니켈-텅스텐 합금 기판 부분의 손실 값은 저항률과 투자율에 기인한 와전류손실 값과 기판에서의 자화손실 값의 합성 값으로 계산하였다. 또한, 초전도체 부분의 손실 값은 자계분포에 의한 히스테리시스 손실 값으로 계산하였다.

그림 5는 Ni-5%W 선재의 전송전류의 변화에 따른 구리 안정화층의 저항률 변화에 따른 구리의 손실 값을 나타낸 그래프이다. 속이 찬 기호와 빈 기호는 각각 그림2의 모델 단면도에서 초전도체 상층에 위치한 구리 안정화층과 하층에 위치한 구리 안정화층을 나타낸다. 전반적으로 초전도체 상층의 구리 손실 값이 하층의 손실 값보다 크며, 손실 값은 저항률과 반비례함을 알 수 있다. 따라서 구리 안정화층 부분의 두께를 감소시키고 저항률을 증가시키면 손실 값의 저감에 유리할 것으로 보인다.

그림 6은 전송전류의 변화에 따른 니켈의 손실 값을 나타낸 그래프이다. 니켈의 저항률을 하나의 값으로만

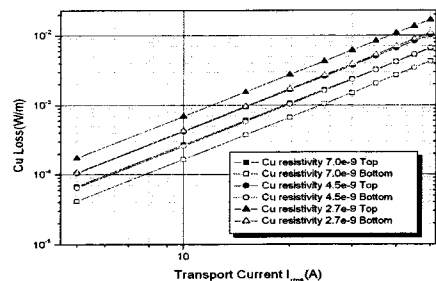


그림 5. 구리의 손실

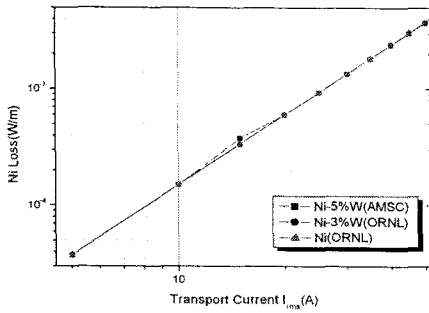


그림 6. 니켈의 손실

해석하였기 때문에 손실 값은 니켈-텅스텐 합금의 텅스텐 함유량이 달라져도 변화가 없을 수 있다.

그림 7과 8은 전송전류 10A, 30A, 50A에서의 니켈-텅스텐 합금의 종류에 따른 상층과 하층의 구리 손실 값을 나타내었다. 각각의 값은 Ni-5%W 기판을 갖는 해석 모델 값으로 나누어 정규화 하였다.

그림 9는 구리 저항률 변화에 따른 해석모델 선재의 전송전류 손실 값을 나타낸 그래프이다. 별 모양 기호는 Norris의 평판 모델 식을 이용한 계산 값이다. 그리고 속이 빈 기호는 서로 다른 구리 저항률을 갖는 해석모델을 나타낸다. 그래프에서 알 수 있듯이 구리의 저항률에 따라 전송전류 손실 값이 다르게 계산됨을 알 수 있다.

그림 10은 니켈-텅스텐 합금의 종류에 따른 해석모델 선재의 손실 값을 나타낸 그래프이다. 텅스텐의 함유량은 기판의 투자율과 포화자속 값의 차이를 나타낸다. 별 모양 기호는 Norris의 평판 모델 식을 이용한 계산 값이다. 그리고 나머지 기호들은 서로 다른 텅스텐 함유량의 기판을 갖는 해석모델을 나타낸다. 그래프에서 알 수 있듯이 기판의 투자율과 포화자속 값에 무관하게 손실 값이 거의 동일함을 알 수 있다.

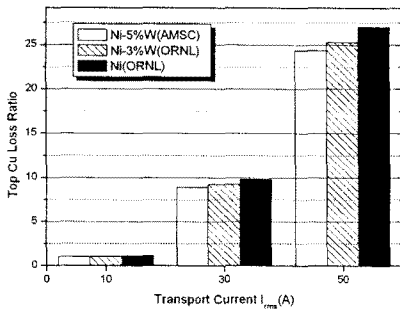


그림 7. 상층 구리의 손실

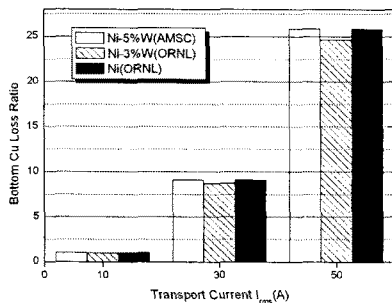


그림 8. 하층 구리의 손실

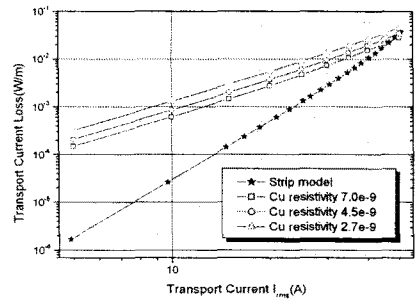


그림 9. 구리 저항률 변화에 따른 선재의 손실

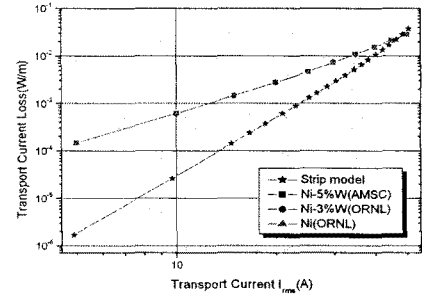


그림 10. 니켈-텅스텐 합금의 종류에 따른 선재의 손실

3. 결 론

본 논문에서는 YBCO 선재에서 도전성이 높은 안정화층과 금속기판이 교류손실에 미치는 영향을 수치해석 방법을 이용하여 계산하였다. 그 결과 교류손실은 구리 안정화층의 저항률에 반비례하지만, 금속기판에서 텅스텐의 함유량에 따라서는 큰 차이가 없었다. 이러한 결과로부터 교류손실의 저감을 위해서는 구리 안정화층의 두께를 줄이고, 저항률을 증가시킴으로써 와전류에 의한 영향을 감소시키는 것이 교류손실 감소 측면에서 유리하다. 또한 해석 결과와 이론값이 잘 일치 하지 않는 것은 초전도 특성이 고려되지 않은 것과 와전류에 의한 손실이 큰 이유로 들 수 있다.

본 연구는 과학기술부 과학재단 목적기초연구 (R01-2006-000-10499-0) 지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] K.Funaki, et al., "Development of a 22kV/6.9kV Single-Phase Model for a 3MVA HTS Power Transformer," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, pp. 1578-1581, March, 2001.
- [2] Alex Povilus, et al., "Electronic Properties of Metals and Semiconductors," Physics, 441, Fall, 2003.
- [3] Hyang-beom Lee, et al., "Estimation of the AC loss of a YBCO coated conductor with metal substrate by using numerical calculation," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 15, No. 2, pp. 1558-1561, 2004.
- [4] A.O. Ijaduola, et al., "Magnetism and ferromagnetic loss in Ni-W textured substrates for coated conductors," Physica C: Superconductivity, Vol. 403, Issue 3, pp. 163-171, April, 2004.
- [5] Martin N. Wilson, Superconducting Magnets, Oxford University Press Inc., New York, pp. 159-199, 1997.
- [6] E.H. Brandt, et al., "Type-II superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field," Phys. Rev. B, Vol. 48, pp. 12893-12906, Nov. 1993.