

Numerical Analysis of Transport Current Losses in Stacked HTS Conductors

Seyong Choi^a, Wansoo Nah^{*a}, Jung Ho Kim^b, Jinho Joo^b, K. Ryu^c

^a School of information and communication engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

^b School of metallurgical and materials engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

^c Department of electrical engineering, Chonnam National University, Kwangju, Korea

Received 15 August 2003

적층 형태의 고온 초전도선재에서의 통전손실 수치해석

최세용^a, 나완수^{*a}, 김정호^b, 주진호^b, 류경우^c

Abstract

We have studied alternating transport current losses in the vertically stacked high temperature superconducting tapes(HTS) using numerical techniques. In the case of stacked conductors, HTS tapes are exposed to self-field generated by transport current itself and also experienced external magnetic field around adjacent tapes. It is well known that magnetic interactions between neighbored tapes have significant effect on their properties of superconducting tapes such as current distribution, AC loss, and critical current. In this paper, we investigated the transport current losses in stacked conductors consisting of a few of the HTS tapes using numerical analysis. Current distributions are calculated in HTS tape cross-section taking account of magnetic field dependencies, which are represented superconducting nonlinear properties. Dissipated losses in tape and stacked conductors were integrated with current distribution and electric field intensity in the whole conductor region. Finally estimated results were discussed and verified through the analytical theory.

Keywords : Transport current loss, Current distribution, Stacked conductors

I. 서론

초전도체가 가지고 있는 무궁한 장점들로 인해서 차후 전기전자 분야의 핵심 소자로서의 사용이 유력할 것으로 예상된다. 미래의 산업 및 경제에 미칠 파급효과를 예상하여 국내외에

서 초전도 재료 및 응용에 관한 많은 연구가 활발하게 진행중이다. 기존의 전력기기에 대체 될 초전도 소자는 교류상황에서의 사용이 필수적이며 이때 초전도체는 손실을 발생하게 된다. 특히 대전류 통전을 위해서는 다도체의 형태로 적층 되거나 권선 되는데 이렇게 초전도 선재들이 조합되어 있는 경우, 스스로 발생하는 자계에 의한 자기자계손실뿐만 아니라 인접한 초전도 선재에서 발생하는 자기작용에 의해 전류

*Corresponding author. Fax : +82 31 290 7179

e-mail : wsnah@yurim.skku.ac.kr

밀도 분포에 영향을 미치게 된다 [1,2]. 이러한 영향은 예측치 못했던 추가 손실을 발생시켜 전반적인 시스템의 성능 저하를 가져오므로, 설계 단계에서 충분히 예측할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 AMSC사에서 제작된 고용량 초전도 선재로 적층된 도체에 교류 전류가 인가되었을 때 초전도 선재에서의 전류밀도 분포와 이를 근거로 교류손실을 예측하였다. 유한요소법(FEM: Finite Element Method)을 통한 전자기해석으로 수직으로 적층된 다층구조 형태의 도체에서 전류밀도 분포를 계산하였으며 통전손실을 해석하였다. 해석과정에서 초전도체의 비선형 특성, 즉 자계의 크기에 대한 임계 전류와 인덱스(n-value)의 이방성이 고려되었다. 해석 결과들은 Norris에 의해서 제시된 타원형 해석해와 비교되어 검증되었으며 각 전류에 대한 전류밀도분포를 비교 분석하였다.

II. 고온초전도 선재의 교류손실 해석

고온초전도선재는 특유의 비선형 전압-전류 특성을 가지며 이를 Eq. (1)과 같은 power-law에 의해서 표현할 수 있다 [3].

$$E = E_c \cdot \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \quad (1)$$

여기서 E_c 와 J_c 는 각각 초전도선재에서의 임계전계(V/m) 및 임계전류밀도($A \cdot m^{-2}$)이며, E 는 전계의 세기(V/m), J 는 전류밀도($A \cdot m^{-2}$)를 의미한다. n 은 인덱스 값으로서 초전도선재의 전압전류 곡선으로부터 실험적으로 정의되는 값으로 0.1-1 ($\mu V/cm$) 사이의 전계 범위에서 결정하는 것이 일반적이다. Fig. 1은 본 논문에서 해석 및 실험에 사용한 초전도 선재의 자계 이방성에 관한 곡선들로서, 외부 자계의 크기 및 방향에 대한 임계전류와 인덱스 특성을 도시한 것이다. 이와 같은 특성이 반영된다면 초전도체의 전기전도도는 Eq. (1)으로 부터 자계의 크기 및 각도에 대한 비선형 함수로써 Eq. (2)와 같이 정의된다.

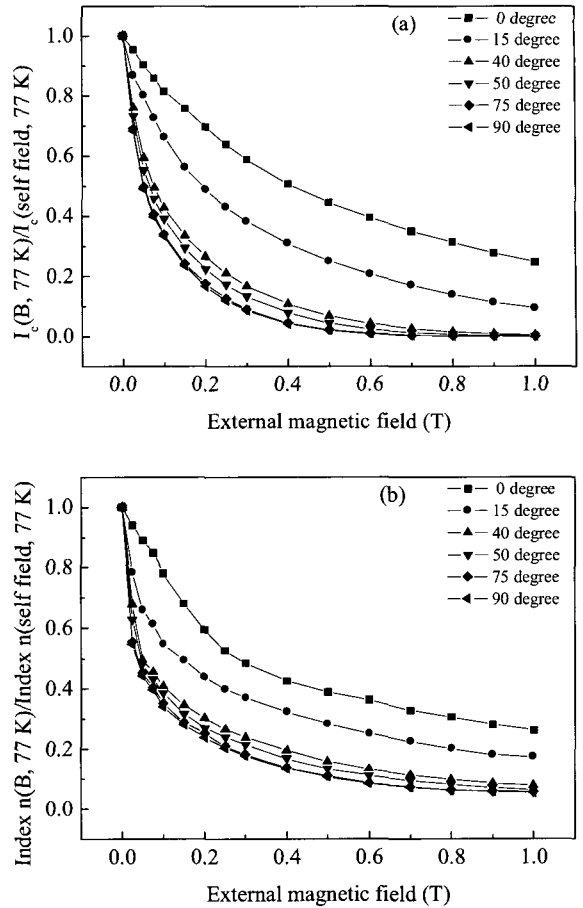


Fig. 1. Critical current and index n as a function of external magnetic field in AMSC superconducting tape. (a) is the normalized critical current and (b) is the normalized index.

$$\sigma(E, B) = \frac{J_c(B)}{E_c} \cdot |E|^{1-\frac{n(B)}{n(B)}} \quad (2)$$

고온초전도 선재에서의 전류밀도 분포 및 교류손실을 계산하기 위해서 유한요소법을 이용하였다. 암페어의 법칙(Ampere's law)으로부터 유도된 지배 방정식은 자기벡터포텐셜과 전기스칼라포텐셜을 미지수로 하여 정식화되며 이때 지배식은 Eq. (3)과 같다. 본 연구에서는 2차원 장을 가정하여 전자기적인 현상의 해석을 수행하였다.

$$\nabla \cdot \frac{1}{\mu} (\nabla A_z) = \sigma E_z, \quad E_z = -\frac{\partial A_z}{\partial t} - \nabla \phi \quad (3)$$

이때 A_z 와 ϕ 는 각각 자기벡터포텐셜과 전 기스칼라포텐셜이고, σ 는 초전도체의 전기전도도이다. 해석대상이 2차원 계이므로 변수들은 z 방향의 성분만을 갖게 된다. 제시된 지배방정식 Eq. (3)는 갤러킨법을 적용하여 공간 및 시간적으로 이산화하여 연산을 수행 하였다. 해석을 통해서 각 단위 시간별로 계산된 전류밀도 분포와 전계 분포를 단위 주기와 전 면적의 적분을 통해서 손실량(Q)을 얻을 수 있다.

$$Q = \iint \mathbf{E} \cdot \mathbf{J}(\mathbf{E}, \mathbf{B}) \, dSdt \quad (4)$$

여기서 \mathbf{E} 는 전계, \mathbf{J} 는 전류밀도를 의미한다.

해석에 사용된 초전도 선재의 단면사진은 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3의 초전도 선재는 폭과 두께가 4.1 mm x 0.21 mm 인 다심선재로서, 55 필라멘트로 구성되어 있다. 자기자계 하에서 단척 시료의 임계전류는 약 $I_{c1}=125\sim130$ (A)이며 인덱스 값은 약 20이다. Fig. 4에서는 수직으로 적층된 다층 도체의 개념도를 도시하였다. 널리알려진바와 같이 적층 시 인접 선재의 영향으로 인해서 도체의 임계전류는 각 단독 선재의 산술적인 합보다 낮아지게 되며 [4], 각각 2개와 3개의 선재를 적층 했을 경우 임계전류는 $I_{c2}=220$ (A)와 $I_{c3}=305$ (A)인 것으로 조사되었다.

III. 결과 및 고찰

본 논문에서는 적층된 고온초전도 선재에서의 교류손실과 전류밀도 분포를 수치적인 해석 기법을 이용하여 수행하였다. 초전도선재에 인가되는 전류는 임계전류 대비 일정한 비율을 최대값으로 하는 정현파 전류로 하여 해석하였으며 실제 실험에서도 이와 동일한 상황을 구현하여 측정하였다 [5]. Fig. 5에서는 단독 선재에서의 해석 결과를 도시하였으며, 이를 측정치 그리고 Norris 해석식의 결과와 함께 도시했다. 특히 Norris의 타원형 식은 초전도 코어를 타원형태로 근사하여 보는 모델로서 측정된



Fig. 3. Cross section micrograph of AMSC superconducting tape

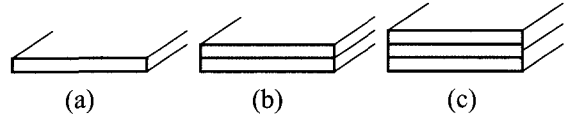


Fig. 4. Schematics of stacked superconductors, (a) single tape, (b) double-stacked conductor, and (c) triple-stacked conductor.

손실과 비교적 잘 일치하여 보편적으로 채택되는 해석 모델이다. 수치해석을 위해 초전도체의 다심필라멘트들을 자기적으로 결합된 즉, 다심 세선들을 필라멘트영역(filamentary region)으로 상정해서 하나의 연속체의 개념으로 모델링 하였다 [6].

이때 필라멘트영역은 면적은 동일하지만 타원형태와 직사각 형태를 갖는 것으로 모델링 하였다. 그 결과 Fig. 5에서와 같이 계산 결과는 실험치나 해석식 모두에 근사하게 일치하는 것으로 나타났다. 특히 필라멘트영역을 타원형태로 한 모델이 직사각형 모델에 비해 해석해

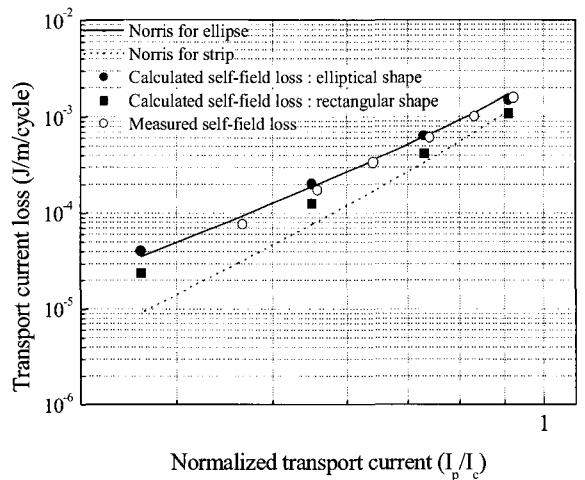


Fig. 5. Self field loss of single tape. Analytic solution of Norris ellipse and strip are respectively represented with solid line and broken line, the filled circle and square denote the numerical results in elliptical and rectangle shapes model. The open circle denotes measured results.

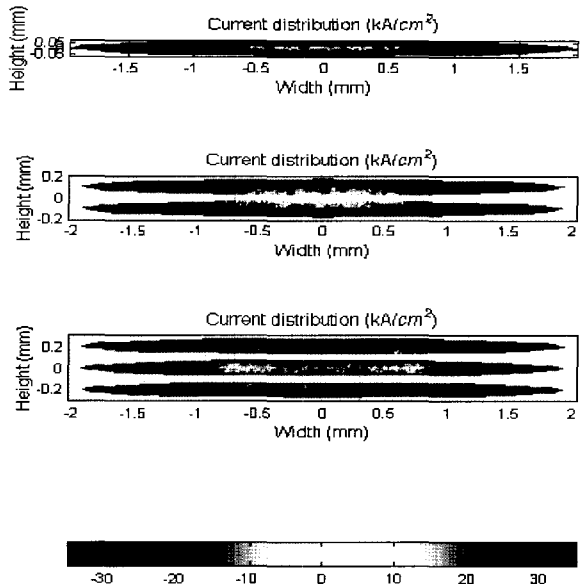
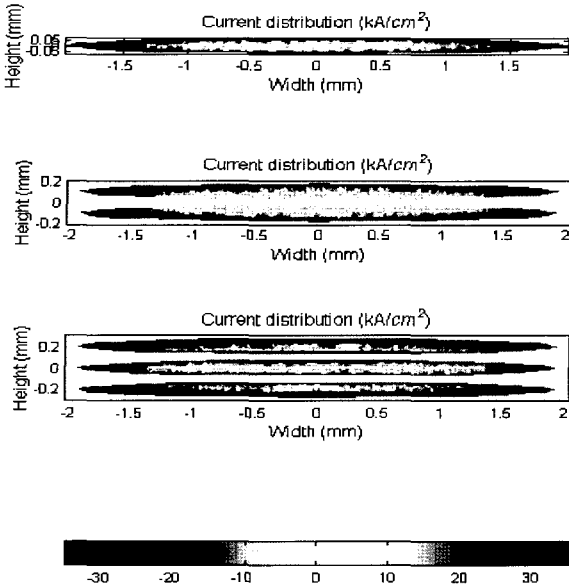


Fig. 6. Current distribution in stacked conductor; above is single tape, middle is double stacked conductor, and below is triple stacked conductor. In all cases, $I_0=0.5$ when $t=2k\pi + \pi/2$ (k means any integer).

Fig. 7. Current distribution in stacked conductor; above is single tape, middle is double stacked conductor, and below is triple stacked conductor. In all cases, $I_0=0.9$ when $t=2k\pi + \pi/2$ (k means any integer).

나 실험치에 한층 근접함을 알 수 있고 이는 필라멘트영역의 모양이 전류분포에 영향을 미치기 때문인 것으로 보고되고 있다 [7].

제안된 수치해석 모델을 바탕으로 Fig. 4에서 제시한 다층도체 모델을 해석에 적용하였다. 임계전류 (I_c)에 대한 인가전류 (I_p)의 비율이 $I_0=I_p/I_c$ 일 때, 입력전류가 $i=I_0 \sin(\omega t)$ 인 교류 정현파의 형태로 입력 되었으며, Fig. 6과 Fig. 7에서는 $I_0=0.5$, $I_0=0.9$ 에서의 전류밀도분포를 시간 $t=2k\pi+\pi/2$ (k 는 정수)에서 도시한 그림이다. Fig. 6과 7의 전류밀도를 비교해 보면 입력전류 크기가 증가할수록 초전도체의 안쪽까지 전류가 침투하였음을 알 수 있다. 전류의 크기가 임계전류의 50%에서 90%로 커지면 침투깊이가 깊어지는 것을 의미하는 것이다. 그리고 시간이 지날수록 전류는 필라멘트영역의 외부에서부터 침투하기 시작해 점점 초전도체의 안쪽으로 침투하며 다시 인가전류의 크기가 작아지면 바깥쪽에서부터 전류분포가 줄어들며 변화하는 비 가역적인 현상을 보인다.

수직으로 적층된 도체의 경우 전류밀도 분포가 마치 단독 도체의 전류와 유사한 분포를

보이고 있다. 특히 2단 적층 된 도체의 경우는 선재 한 개의 전류밀도 분포처럼 보여 두 개의 적층된 도체는 자기적으로 결합된 형태의 분포를 보이고있다. 그러나 3층으로 적층 된 도체의 경우 바깥쪽 선재와 가운데 있는 선재의 전류밀도 분포가 다르며 이는 인접 선재에서 발생한 자계에 의해 전류밀도 분포가 다르게 나타난 것으로 사료된다.

Fig. 8에서는 다층선재들의 통전전류손실결과를 각각의 정규화 된 전류의 크기에 대해 요약하여 도시하였다. Fig. 8에서 실선은 Norris의 타원형식에 의한 단독 선재의 자기자계 손실율, 사각형(■)과 원형(●)으로 연결된 파선은 2단, 3단 적층도체를 하나의 도체로 간주하고 이때의 임계전류를 Norris해석식에 적용하여 구한 손실의 해석 결과이다. 마름모(◆)와 사각형(■) 그리고 원형(●)은 수치적으로 계산한 단독, 2단 적층, 3단 적층 된 도체의 해석 결과다. 이미 충분히 예상되는 바와 같이 적층 도체의 통전손실은 단독 선재의 개수만큼의 산술적인 곱으로는 예측할 수 없을 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 2단 혹은 3단 도체의 통전 손실

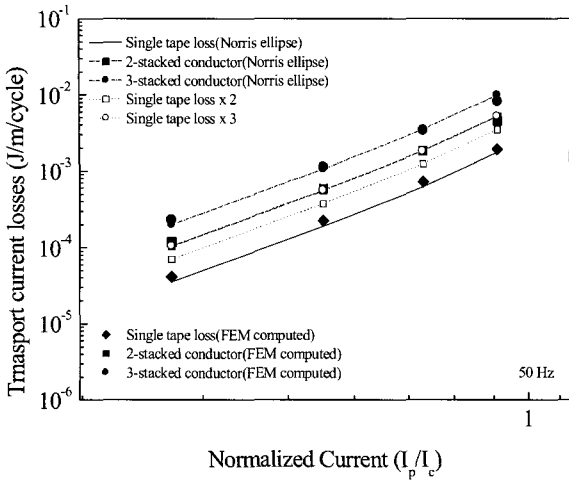


Fig. 8. Computed transport current losses in stacked tapes with analytic solution of Norris.

은 단독 선재의 자기자기 손실의 2배 혹은 3배보다도 훨씬 큰 양상을 보이고 있다. 또한 해석결과 적층 된 도체의 통전손실은 충분히 밀착되어 있고 자기적으로 결합되어 있는 경우라면 한 개의 도체로 간주하여 Norris 타원형식에 적용하여도 유사한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 6과 7에서의 전류밀도 분포에서 미루어 볼 수 있는 것처럼, 적층 된 도체의 전류밀도 분포는 도체 한 개의 전류밀도분포와 유사함을 갖게 되므로 충분한 이격거리 없이 적층 된 도체는 자기적으로 결합되어 있음이 유추된다. 그러므로 최적의 이격거리를 산출하여 적층에 적용한다면 교류손실 저감 효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

III. 결론

본 논문에서는 AMSC사의 실용 초전도 선재의 자기자기 손실과 다층도체의 경우 전류밀도 분포를 수치적인 방법으로 계산하고 이를 바탕으로 통전 손실을 예측하였다. 단독 선재의 경우 자기자기손실은 실측치와 매우 근사하게 일치함을 알 수 있었으며 널리 이용되는 해석 이론인 Norris의 타원형식에도 일치하였다. 다층으로 적층 된 도체의 경우 일정한 임계전류를 갖는 한 개의 도체와 같이 결합되는 현상을 보

였으며 이를 적층 도체의 전류밀도 분포 및 통전손실의 결과로부터 확인하였다. 수직으로 적층 된 도체의 경우 최적의 거리로 이격시켜서 각 선재들을 자기적으로 분리시킨다면 교류손실을 절감할 수 있을 것으로 예상되며 이에 대한 계속되는 연구가 필요할 것이다.

Acknowledgments

This work was financially supported by grant No. R01-2000-00248 from the Basic Research Program of the Korea Science and & Engineering Foundation. It was also financially supported by MOCIE through IERC program.

References

- [1] A. Melini, R. Tebano, and R. Mele, "Analysis of the DC and AC behavior of BSCCO tapes arranged in z-stack configuration", *Physica C* **340**, 308-316 (2000).
- [2] K. Ryu, K.B. Park, and G. Cha, "Effect of the neighboring tape's AC currents on transport current loss of a Bi-2223 tape", *IEEE Transactions. on Applied Superconductivity*, **11**, 2220. (2001).
- [3] J. Rhyner, "Magnetic properties and AC-losses of superconductors with power law current-voltage characteristics", *Physica C*, 292 (1993).
- [4] Wansoo Nah, Joonsun Kang, Seyong Choi and etc., "Numerical Calculation of Critical Current in Bi-2223 Stacked Tapes", *IEEE Transactions. on Applied Superconductivity*, **11**, 3908 (2000).
- [5] 김현준, 허대행, 조영호, 류경우, 최병주, "실용 고온 초전도테이프의 교류손실 특성", 한국초전도저온공학회 2003년도 학술대회 논문집, 11-14 (2003).
- [6] N. Amemiya, S. Murasawa, N. Banno, and K. Miyamoto, "Numerical modelings of superconducting wires for AC loss calculations", *Physica C* **310**, 16 (1998).
- [7] N. Nibbio and S. Stavrev, "Effect of the geometry of HTS on AC loss by using finite element method simulation with B-dependent E-J power law", *IEEE Transactions. on Applied Superconductivity*, **11**, 2627 (2001).