

불균일 전류분포가 Bi-2223/Ag 초전도선재의 통전손실에 미치는 영향

최세용, 나완수, 주진호*, 김정호**, 류경우***, 손명환*, 권영길*

성균관대학교 정보통신공학부, **성균관대학교 신소재공학과, **호주 울릉공 대학교, ***전남대학교 전기공학과

Influence of non-uniform current distribution on transport ac loss in Bi-2223/Ag tapes

S. Choi*, W. Nah*, J. Joo*, J. H. Kim**, K.W. Ryu***, *M.H. Sohn, *Y.K. Kwon

*Sungkyunkwan Univ., **ISEM Univ. of Wollongong, ***Chonnam National Univ., *KERI

Abstract - In this study, we estimate the transport current loss of Bi-2223/Ag tapes with non-uniform current distribution. The conductor was consisted of three Bi-2223/Ag tapes and the each tapes were attached in parallel. The loss of conductor was investigated both numerical and experimental methods. The numerical code to predict ac loss was developed, and finite element method was introduced. It contained intrinsic properties of superconducting tape, which was obtained from nonlinear current voltage relation with external magnetic field and its orientation. Two results were compared and discussed. They showed good agreements with each other.

1. 서 론

최근 초전도용융분야에 사용될 수 있는 유력한 초전도 재료 중 하나인 Bi-2223/Ag 초전도선재를 이용한 전력 기기들의 연구가 국내외에 걸쳐 활발하게 이루어지고 있다. 기존 전력기기 효율의 극대화를 위해서 사용될 초전도 용융분야는 교류 상황 하에서 사용 가능성이 높아지고 있으나 교류전원 혹은 교류자체에 노출 되면 손실을 발생시키는 초전도 특유의 특성들이 극저온의 냉동환경 하에서 사용되게 될 초전도 용융에 있어 반드시 넘어야 할 큰 장벽으로 작용하고 있다. 그간의 연구들을 통해 초전도선재의 교류손실을 현상을 규명하고 정확하게 측정할 수 있는 연구들이 활발하게 진행되어 왔으나 초전도선재들이 다층으로 적층되거나 배열될 경우 단독선재의 경우와는 상이한 손실특성을 보이게 되며 이러한 손실 특성들은 초전도 선재들로 구성된 시스템의 교류 손실의 예측을 힘들게 한다.

실제 초전도 선재들이 코일 혹은 유사 코일시스템에 적용될 때 수십 혹은 수백가닥의 초전도선재들로 구성된다. 그러므로 실제 용융시스템의 경우 여러군데의 접합부가 존재하게 되고 또한 시스템 자체의 인더터스로 심각한 불균일 전류분포를 야기할 수 있으며 이는 임계전류 저하, 교류손실 증가 등으로 이어져 시스템 성능에 치명적인 영향을 미칠 수도 있다. 그러므로 본 연구에서는 모델 Bi-2223/Ag 선재 시스템에 인위적으로 불균일한 전류분포를 발생시켜서 손실특성에 미치는 영향을 평가하였다. 교류손실을 예측하기 위해서 수치해석기법을 도입하였으며 유한요소법이 사용되었다. 해석과정에서 강력한 Bi-2223/Ag 선재의 비선형 특성이 반영되었으며 입력된 비선형 데이터는 다양한 외부자체 및 각도에 대한 실측치를 사용하였다. 불균일 전류분포하에서 예측된 도체의 통전손실량은 측정결과와 비교하여 검토되었다.

2. 본 론

2.1 Bi-2223/Ag 초전도 선재 및 손실 측정

본 연구에서는 American Superconductor사의 Bi-2223/Ag 초전도선재를 모델로 하여 교류손실을 예측하고 측정하였다. 평가에 사용된 초전도선재의 사양은 표 1에 자세히 기술하였다. 불균일 전류분포가 교류손실에 미치는 영향을 평가하기 위해서 그림 1에서와 같이 수평으로 3개의 초전도선재를 배열하였다. 기존의 연구에 의하면 수평으로 배열된 도체의 경우 각 선재의 임계전류가 유사하다면 도체의 임계전류는 각 선재의 임계전류의 합으로 평가될 수 있는 것으로 조사되어 도체배열로 인한 임계전류 저하가 매우 미미한 것으로 조사되었으며 본 연구에서도 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 그림 1에 도시한 바와 같이 평행하게 배열된 도체에 전류를 인가하기 위하여 교류용 전원이 연결되어 교류전류가 도체에 입력되었다. 손실검압 측정 시 유도성분을 배제하기 위한 상쇄코일(cancel coil)역시 부착하여 도체에 설치되었다. 도체를 구성하는 각 선재에 인가되는 전류의 크기를 조절하기 위해서 도체의 말단부에 인더터를 설치하였다. 인더터의 역할은 말단부에서 인더터스를 조절하여 각 선재에 불균일한 전류분포를 발생시켜 교류손실에 미치는 영향을 평가하였다. 본 연구에서의 모든 결과는 액체질소하에서 평가되었다 [1].

표 1. Bi-2223/Ag 초전도선재의 사양

size (mm)	3.1 × 0.17
filamentary region (mm)	3.0 × 0.11
critical current (A) @77.3 K	75-80
index n @77.3 K	20

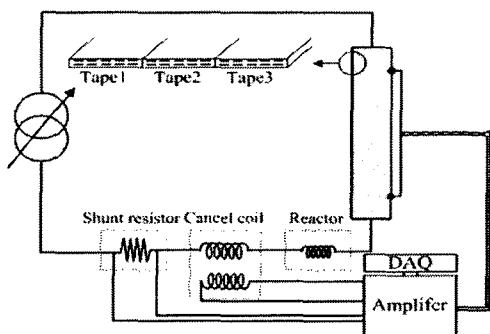


그림 1. 수평 배열된 도체의 구성도 및 측정 개념도

2.2 교류손실 해석 코드개발

본 연구에서는 유한요소법을 도입하여 초전도선재들로 구성된 다도체에서의 통전손실을 예측할 수 있는 해석 코드를 개발하였다. 해석코드는 자기벡터포텐셜 A 와 전기스칼라포텐셜 V 를 미지수로 하게 되며, 암페어의 법칙 $\nabla \cdot B = \mu_0 J$ 과 $B = \nabla \times A$ 의 관계로부터 식 (1)과 같은 2차원 지배방정식이 정립 된다 [2].

$$\nabla \cdot (\nabla A_z^2) = -\mu_0 J_z \quad (1)$$

이때 J_z 는 2차원장에서 정의된 전류밀도 분포를, μ_0 는 공기중의 투자율을 의미한다. 전류밀도분포 J_z 는 외부전원에 의한 항과 초전도선재에 유도된 유도 전류항으로 구분될 수 있으며, σ_{sc} 를 초전도체의 전기전도도로 정의하면 식 (2)와 같이 정리 된다.

$$J_z = \sigma_{sc} \left(-\frac{\partial A_z}{\partial t} - \nabla V \right) \quad (2)$$

초전도 선재의 σ_{sc} 는 비선형 전압-전류특성으로부터 실현적으로 얻어지게 된다. Power law는 Bi-2223/Ag 초전도 선재의 비선형성을 가장 잘 정의하는 방법으로 알려져 사용되어 왔다. 그러므로 Power law와 움의 법칙으로부터 σ_{sc} 를 정의할 수 있다. 하지만 σ_{sc} 를 정의하는데 있어 필수적으로 사용되는 임계전류(J_c) 및 인데스(n) 성분은 외부자계의 크기 및 인가 방향에 대해서도 비선형적인 특성을 가지게 되며 이러한 자계에 대한 이방성을 고려해야만 정확한 예측이 가능해 진다. 그러므로 식 (3)과 같이 외부자계의 효과를 고려하여 초전도선재를 모델링해야 하며 여기서 E 는 전계, E_c 는 임계전류를 정의하는 전계의 기준(일반적으로 10^4 V/m), B 는 외부자계의 크기를, θ 는 외부자계의 각도를 나타낸다.

$$\sigma_{sc}(B, \theta) = \frac{J_c(B, \theta)}{E_c} \frac{\frac{1-n(B, \theta)}{n(B, \theta)}}{|E|} \quad (3)$$

식 (1), (2) 그리고 (3)으로 구성된 지배방정식들은 시간분할법에 의해 정식화 과정을 거쳐 해석되었다. 해석 결과 손실은 한주기의 전압 및 전류를 내적하여 초전도 선재의 단면적 및 시간에 대해 적분하여 얻어내게 된다.

3. 결과 및 토의

3.1 균일한 전류분포하의 통전손실

AMSC사의 Bi-2223/Ag 초전도선재를 다중 배열하여 구성된 도체의 통전손실을 평가하기 위해 우선 균일한 전류분포를 갖고 있을 때 도체의 통전손실을 예측하였으며 이를 측정결과와 비교하였다. 그림 2에서는 균일한 전류분포를 갖는 도체에서의 예측 결과(Q_c)와 측정결과(Q_m)를 도시한 것이다. 선행 연구에서도 입증되었듯이 임계전류가 유사한 선재들로 평행하게 배열된 도체의 경우 각 선재들의 임계전류 저하가 거의 발생되지 않는 것으로 조사되었으며 평행배열 된 선재들의 임계전류는 임계전류를 조사한 전압신호선의 접촉위치에 무관하게 약 226 A를 갖는 것으로 조사되었다. 또한 그림 2에서 보이는 바와 같이 측정된 손실도 측정위치에 무관하게 동일한 값을 갖는 것으로 조사되었다. 또한 그림 2에서 보이는 바와 같이 제안된 수치해석기법을 통한 해석결과와 측정결과는 매우 잘 일치하는 것으로 판찰되었으며 해석결과의 정확도가 우수한 것으로 판단된다.

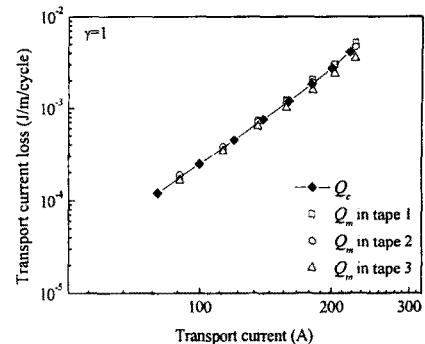


그림 2. 균일한 전류분포 하에서의 통전손실

그림 3과 4에서는 불균일한 전류분포하에서의 수평으로 배열된 Bi-2223/Ag 초전도선재 시스템의 교류손실을 각각 도시하였다. 전류분포가 불균일한 정도를 불균일상수 γ 를 도입하여 정의하였다. 전류분포 파라미터 γ 는 Tape 2에 흐르는 전류에 대한 Tape 1 또는 Tape 3에 대한 전류분포를 정의한 것이다. 본 연구에서는 $\gamma = 1$, $\gamma = 0.7$, 그리고 $\gamma = 1.3$ 인 경우에 대한 전류분포에서의 교류손실을 평가하였다. 예를 들어 $\gamma = 1$ 인 경우는 각 선재에 동일한 전류분포, 즉 $i_1 = i_2 = i_3$ 인 경우를 의미하고 $\gamma = 0.7$ 인 경우는 i_2 가 i_1 과 i_3 에 비해서 약 70% 작은 전류가 통전될 때 ($i_2 = 0.7i_1 = 0.7i_3$)를 의미한다. 마찬가지로 $\gamma = 1.3$ 인 경우는 i_1 과 i_3 에 비해 i_2 에 1.3배 큰 전류가 통전되는 상황을 의미한다.

우선 그림 3에서는 $\gamma = 1.3$ 인 경우 해석된 교류손실(Q_c)은 실측치(Q_m)와 거의 모든 전류 범위에서 유사한 분포를 보이는 것으로 조사되었다. 다만 실측치의 경우 전류분포가 균일한 경우 그림 2에서도 도시한 바와 같이 측정위치에 따른 손실의 차이가 없었던 반면에 전류분포가 불균일하도록 파라메타를 조정할 경우 측정위치에 다소 의존하는 것으로 관찰되었다. 이러한 현상은 통전전류가 커질수록 그 차이가 커지게 되었다. $\gamma = 1.3$ 인 경우 Tape 2에서 측정한 임계전류가 270 (A)이고 Tape 1 또는 Tape 3에서 측정한 임계전류가 190 (A)인 것으로 조사되어 전류분포가 불균일한 경우 임계전류의 정의 및 전압리드의 위치에 따라 Bi-2223/Ag 초전도선재 시스템의 임계전류 및 교류손실의 정의에 있어 주의가 요구될 것으로 사료된다.

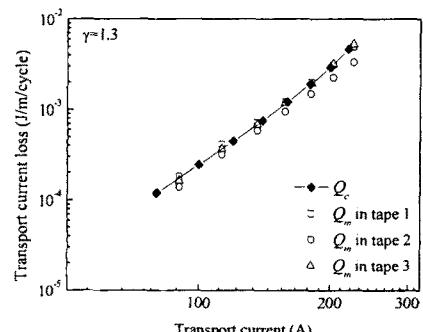


그림 3. 전류분포계수 $\gamma = 1.3$ 에서의 통전손실

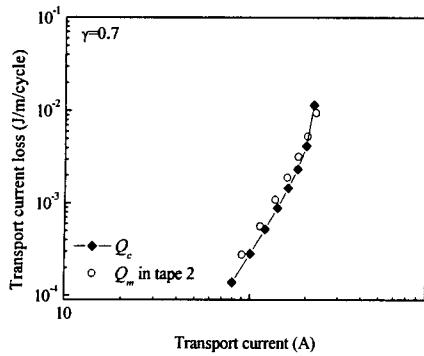


그림 3. 전류분포계수 $\gamma = 0.7$ 에서의 통전손실

그림 4에서는 그림 3에서와 마찬가지로 $\gamma = 0.7$ 인 경우 예측된 손실(Q_c)과 측정된 손실(Q_m)을 비교하였다. 그림에서 보는바와 같이 분포 파라메터가 0.7인 경우는 1.3인 경우에 비해 측정된 손실이 측정된 위치에 대해서 현격하게 의존함을 알 수 있었다. 특히 $\gamma = 0.7$ 인 경우는 외부 통전전류가 220 (A)에 해당할 때 Tape 1과 Tape 3의 경우 약 64 (A) 그리고 Tape 2에는 92 (A)의 전류가 통전된 상태이다. 최초에 조사된 Tape 2의 임계전류가 75 (A)였음을 감안할 때는 임계전류보다 약 20%를 상회하는 전류가 통전된 상태이다. 이에 반해 $\gamma = 1.3$ 인 경우는 동일한 220 (A) 통전의 경우에도 Tape 1과 Tape 3이 약 80 (A)의 전류가 Tape 2의 경우 61 (A)의 전류가 통전된 상황이므로 모든 선재가 임계상황을 많이 넘지 않거나 이내인 상황이다. 그러므로 $\gamma = 1.3$ 인 경우 전류분류가 다소 완화된 상황이므로 $\gamma = 0.7$ 인 경우에 비해 위치에 대한 손실의 의존성이 약한 것으로 판단된다. 이러한 결과들을 바탕으로 전류의 불균일도에 따른 손실의 의존성을 조사하였으며 이를 그림 4에 도시하였다. 그림에서 보는바와 같이 동일한 도체에 대해서 전류 불균일 파라메터가 각각 0.7, 1, 1.3인 경우에 대해서 각각 해석적 방법(Q_c)과 실험적 방법(Q_m)을 통한 손실을 비교하였다. 그럼 2-4의 결과에서도 추측할 수 있듯이 전류분류가 동일한 경우가 손실이 가장 적음을 알 수 있고 $\gamma = 1.3$, $\gamma = 0.7$ 의 순서대로 점차 손실이 커지는 것을 관찰 할 수 있다. 이는 전류분류가 발생하더라도 각 선재에 최대한 전류가 나뉘어 분류가 일어날 때 손실이 작아지는 것으로 판단된다.

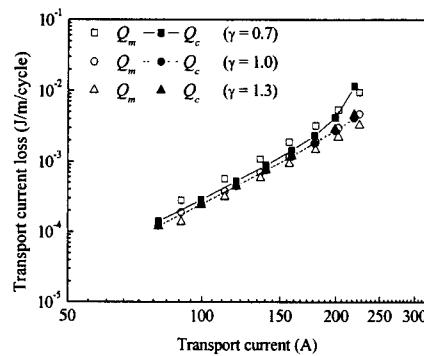


그림 4. 전류분포계수에 따른 통전손실 비교

3. 결 론

본 연구에서는 AMSC사의 Bi-2223/Ag 초전도선재를 다중 배열하여 도체를 구성하였으며 이 도체의 통전손실을 수치적 그리고 실험적 방법으로 평가하였다. 평가과정에서 우선 균일한 전류분포를 갖고 있을 때 도체의 통전손실을 예측하였으며 불균일한 전류분포를 보일 때의 손실에 미치는 영향을 조사하였다. 다중배열도체의 경우 우수한 균일한 전류분포일 때 가장 적은 손실을 나타냈으며 전류분류가 발생되더라도 그 차이가 최소화 될 때 손실이 더 작아짐이 관찰되었다. 그러므로 다중배열도체의 경우 각 선재의 전류분류를 최소화 하여 각 선재에 통전되는 전류를 최대한 일정하게하는 것이 교류손실을 저감할 수 있는 하나의 대책이 될 수 있으리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발사업인 차세대 초전도용융기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 류경우, 마용호, 최병주, 황시돌, “임계전류 및 전류분포가 다중테이프 초전도도체의 교류손실 측정에 미치는 영향”, 한국초전도저온공학회 논문지, 7권 1호, pp. 47-50, 2005
- [2] Seyong Choi, Wansoo Nah, Jung Ho Kim, Jinho Joo, Young-Ho Jo, and Kyung-Woo Ryu, “AC Transport Current Loss of Horizontally Attached Bi-2223/Ag tapes”, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 14, NO. 2, pp. 1894-1897, June 2004.