

대전류용 초전도 연속전위도체의 외부자장 인가방향에 따른 자화손실 특성

한병욱\*, 김우석\*\*, 이지광\*\*\*, 이세연\*, 박상호\*, 김영일\*, 최경달\*  
 한국산업기술대학교\*, 서울대학교\*\*, 우석대학교\*\*\*

Angular Dependency of Magnetization Losses in Continuously Transposed Coated Conductors for large current applications

B.W. Han\*, W.S. Kim\*\*, J.K. Lee\*\*\*, S.Y. Lee\*, S.H. Park\*, Y.I. Kim\*, K. Choi\*  
 Korea Polytechnic University\*, Seoul National University\*\*, Woosuk University\*\*\*

**Abstract** - 초전도선재를 사용한 전력기에서 발생하는 교류손실은 전력기기의 효율을 저하시키기 때문에 매우 중요한 요소이다. 본 논문에서는 교류손실을 저감시키기 위해 분할형 초전도 연속전위도체(Continuously Transposed Coated Conductor, CTCC)를 제작하였으며, 제작된 분할형 CTCC에 교번자장을 인가하였을 때 발생하는 교류손실을 측정하였다. 측정 결과 분할된 필라멘트 수와 선재의 적층수가 증가함에 따라 교류손실 값의 변화 패턴을 확인하였다. 또한, 분할형 CTCC에 가해지는 외부교번자장의 인가 각도에 따른 자화손실을 측정하여 그 경향을 확인하였다.

1. 서 론

고온 초전도선재를 사용한 전력기기는 상전도 도체를 사용한 전력기기와 비교하여 에너지 효율을 증가시킬 수 있으며, 냉각을 위해 액체질소를 사용하므로 환경 친화적이다. 또한 높은 전류용량을 가지고 있으므로 상전도 도체를 사용한 전력기기와보다 부피와 무게를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 따라서 고온초전도 선재를 사용한 초전도 변압기, 초전도 모터, 초전도 송전 케이블과 같은 전력기기의 산업적 응용을 눈앞에 두고 있다.[1]

고온 초전도선재에 직류전류를 통전시킬 경우에는 저항이 없기 때문에 손실이 발생하지 않는다. 그러나 고온 초전도선재에 교류전류를 통전시키거나 외부교번자장이 가해지는 경우 초전도체에서 히스테리시스손실이 발생하며, 이것을 교류손실(AC loss)이라 한다. 이러한 교류손실은 냉매의 온도를 상승시키며, 상승된 냉매의 온도를 낮추기 위하여 소모하는 에너지가 크기 때문에, 고온 초전도선재를 사용한 전력기기의 개발이 늦어지고 있다. 따라서 고온 초전도선재를 사용하여 전력기기를 개발하기 위해서는 교류손실을 저감시킬 수 있는 고온 초전도선재의 개발이 선행되어야 한다. 또한 초전도전력기기에는 고온 초전도선재를 코일 형태로 제작하여 사용하며, 코일 여자 시 코일을 구성하는 각 초전도선재에는 여러 방향의 자장이 발생한다. 이러한 여러 방향의 자장은 외부교번자장처럼 작용하여 코일 각 부분에서 자화손실을 발생시키기 때문에, 외부자장 인가방향에 따른 자화손실은 초전도 전력기기 설계 시 중요한 고려 사항이다.[2]

고온 초전도선재를 대용량 전력기에 적용하기 위해서는 수십 가닥의 선재를 한 가닥의 도체처럼 사용하는 데, 각 선재들 간의 임피던스 차이에 의한 전류 불균형 문제를 해결해야 하며, 교류손실의 저감이 필요하다. 이를 위해 저온선재에서와 마찬가지로 초전도선재를 가느다란 필라멘트 형태로 제작하는 극세다심화와 필라멘트들이 자기적으로 결합하여 덩어리로서 작용하는 것을 방지하기 위해 필라멘트들을 서로 꼬는 트위스트가 필요하다고 할 수 있다. 그러나 YBCO CC처럼 평판과

같은 구조에서는 극세다심화와 트위스트는 매우 어려우므로 극세다심화 대신 분할(striation)을, 트위스트 대신 전위(transposition)를 함으로써 비슷한 효과를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 분할형 CTCC를 제작하기 위해, 초전도체의 분할은 반도체 공정에서 사용하는 화학적 에칭방법인 포토마스킹 방법을 이용하였다. 또한 연속전위도체를 만들기 위해, 자체 제작한 펀칭기를 이용하여 주기적인 피치를 가지는 전위형상선재를 제작하였다.[3] 제작된 분할형 CTCC는 외부교번자장에 의한 자화손실의 특성을 알아보기 위해 비분할과 2분할 선재의 적층수를 달리한 샘플로 준비하였다. 이러한 분할형 CTCC 샘플의 넓은 면에 30°, 60°, 90°(수직) 방향으로 외부교번자장이 인가될 경우의 자화손실을 측정하였다.

2. 자화손실 측정 및 결과

2.1 측정샘플 제작

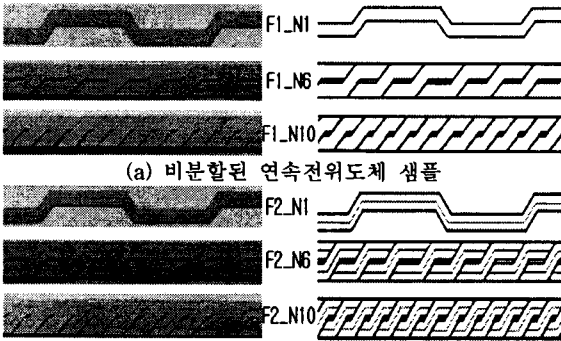
표 1은 샘플제작에 사용된 YBCO CC의 제원으로서 Superpower사에서 제작된 선재이다. 표 1의 YBCO CC를 연속전위도체로 만들기 위해 펀칭기를 이용하여 일정한 주기를 가지는 전위형상선재를 제작하였으며, 전위형상선재를 반도체공정에서 사용하는 화학적인 에칭방법인 포토마스킹 방법으로 한 번 분할하여 2개의 소선을 가지는 선재를 제작하였다. 자화손실을 측정하고자 하는 분할형 연속전위도체 샘플은 비분할, 2분할 선재들을 단일, 6, 10 개수만큼 적층하여 제작하였으며, 표 2는 전위형상선재의 제원과 연속전위도체 샘플의 종류를 나타내고 있다. 그림 1은 제작된 분할형 연속전위도체 샘플의 형상을 보여준다. 그림 1의 분할형 연속전위도체 샘플의 이름에서 "F"는 분할형 연속전위도체의 필라멘트 수를 의미하며, "N"은 적층개수를 의미한다. F1는 필라멘트가 1개이므로 비분할 선재, F2는 필라멘트가 2개이므로 2분할 선재를 의미한다.

<표 1> YBCO CC의 제원

분류	값
입계전류( $I_c$ )	290 A ( 77K, Self_Field, $1\mu V/cm$ )
선재 폭	12 mm
선재 두께	0.05 mm
초전도 층 두께	1 $\mu m$
기판 두께	0.05 mm (Hastelloy)
기판 저항률	125 $\mu\Omega \cdot cm$

<표 2> 분할형 연속전위도체 샘플의 제원

전위형상선제	
폭	4.5 mm
피치	80 mm
길이	120 mm
연속전위도체 샘플	
분할 개수	비분할(F1), 2분할(F2)
전위형상선제의 적층 개수	1(N1), 6(N6), 10(N10)



(a) 비분할된 연속전위도체 샘플

(b) 2분할된 연속전위도체 샘플

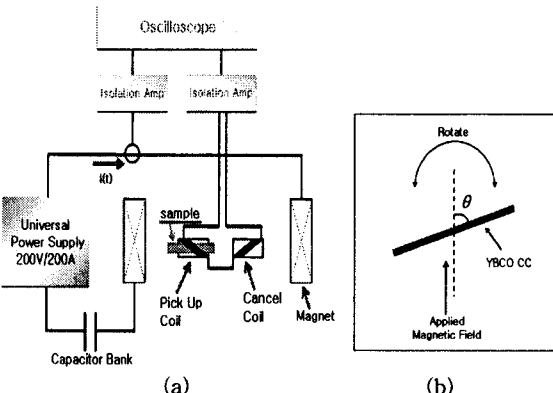
<그림 1> 분할형 연속전위도체 샘플의 형상

## 2.2 자화손실 측정

초전도선제에 외부로부터 교번자장이 가해지면 초전도선제의 히스테리시스 특성에 의하여 교류손실이 발생하며 이를 자화손실( $Q_m$ )이라고 한다. 자화손실은 교번자장이 초전도선제에 인가될 때 초전도선제에서 소비되는 손실이며, 손실 에너지는 전원 공급기의 마그넷에 의해 유도된다. 따라서 측정된 전압과 전류 신호를 이용하여 고은 초전도선제의 1 주기 당, 단위 체적 당 자화손실을 아래의 식 (1)을 이용하여 계산 할 수 있다.

$$Q_m = \frac{C_{pu}k}{V_s} \int_0^T v(t)i(t)dt \quad (1)$$

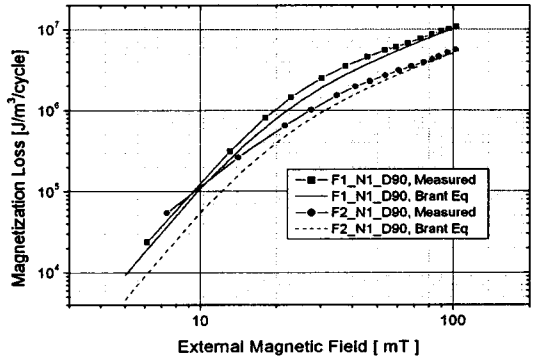
여기서,  $k$ 는 자장인가용 코일자석의 단위 전류당 발생 자속 밀도를 나타내는 자석상수이고,  $C_{pu}$ 는 픽업코일의 보정상수,  $V_s$ 는 샘플의 체적이다.



(a)

(b)

<그림 2> 자화손실 측정 회로도와 외부인가자장 각도



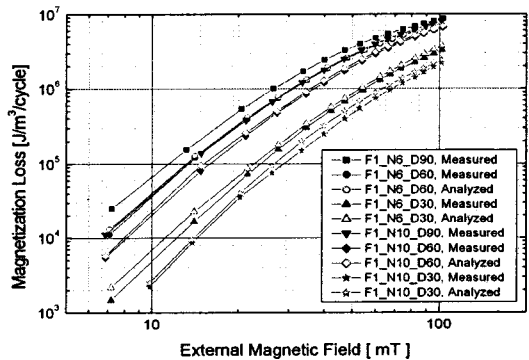
External Magnetic Field [ mT ]

<그림 3> F1\_N1 선제와 F2\_N1 선제의 각도별 자화손실 측정결과와 Brandt 모델식의 계산결과 비교

그림 2의 (a)는 자화손실을 측정하기 위한 회로도를 나타내고 있다. 분할형 연속전위도체 샘플에 자장을 인가하기 위해서는 레이스트랙형 마그넷이 필요하며, 여기에 전류를 공급하기 위해 교류전원이 필요하다. 또한 약 100 mT정도의 자장을 만들어내기 위해서는, 마그넷에 15 A정도의 전류를 통전 시켜야 한다. 이때, 마그넷의 양단에는 수 kV 이상의 고전압이 필요하나, 실험실에서 이러한 고전압을 사용하는 것은 불가능하므로 커패시터를 이용하여 마그넷과 직렬 공진을 시켜 전체 임피던스 값을 낮추기 위해 커패시터 बैं크를 제작하였다. 자화손실 측정 시 샘플선제는 픽업코일 내부에 위치하게 되며, 외부 자장이 인가되는 경우에 픽업코일에서 유기되는 전압은 샘플선제에서 발생하는 자장과 외부자장과 합성에 의해 나타난다. 따라서 샘플선제에서 발생하는 자장만을 얻기 위해서 픽업코일과 동일한 턴 수의 캔슬 코일을 연결하여, 외부 자장에 의해 발생하는 유기기전력을 충분히 상쇄시켜서 자화손실을 측정하였다. 그리고 샘플선제의 넓은 면에 대하여 임의의 각도로 인가되는 외부자장의 형태를 그림2에 나타내었다.

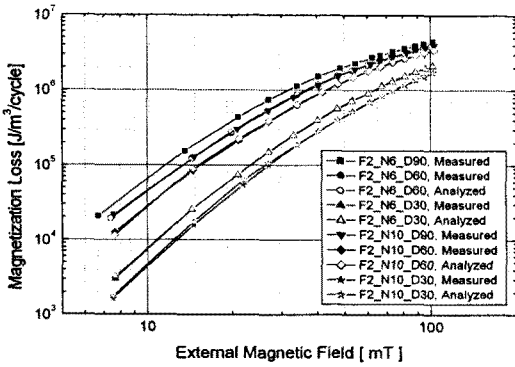
## 2.3 외부자장 인가방향에 따른 자화손실 결과

비분할과 2분할 단일 소선들의 수직 자화손실 측정결과를 브란트(Brandt)가 제안한 스트립(Strip) 모델식의 계산결과와 비교하였으며, 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 점선 및 실선은 브란트가 제안한 스트립 모델에 의한 계산결과이다. F1\_N1의 경우에는 측정결과와 계산결과가 일치함을 알 수 있다. 그러나 F2\_N1의 경우에는 낮은 외부 인가자장 영역에서는 측정값과 계산값이 차이를 보이고 있다. 그 이유는 스트립 모델에 의한 자화손실 계산에서는 분할된 각 필라멘트들 간의 초전도 반자성에 의한 자기적인 상호 영향이 고려되지 않고 서로 독립적인 것으로 계산되지만, 측정값에는 이러한



External Magnetic Field [ mT ]

<그림 4> F1\_N6 선제와 F1\_N10 선제의 각도별 자화손실 측정값과 계산 값 비교



<그림 5> F2\_N6 선재와 F2\_N10 선재의 각도별 자화손실 측정값과 계산 값 비교

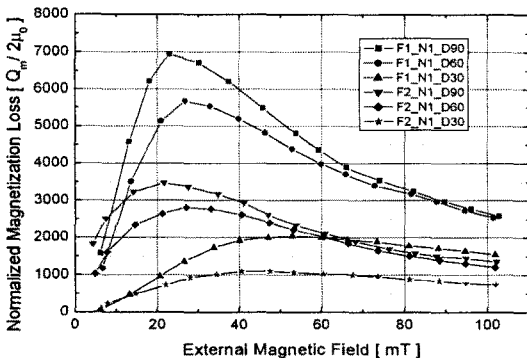
영향들이 포함되기 때문이다. 그러나 인가자장이 커져서 완전침투자장을 넘어서게 되면 분할된 초전도 필라멘트들이 자장이 통과하게 되므로 자장의 상호영향이 줄어들게 되어 측정결과와 계산결과가 일치하게 된다.

그림 4와 그림 5는 F1\_N6과 F1\_N10에 대해 측정된 자화손실과 F2\_N6과 F2\_N10에 대해 측정된 자화손실을 외부인가자장의 각도에 따라 측정된 결과이다. 외부인가자장이 90°에서 30°로 줄어들수록 자화손실이 감소함을 확인할 수 가 있다. 또한 그림 4와 5에서 클로즈 심벌은 실험을 통해서 얻어진 손실 값이며, 오픈 심벌은 수직으로 자장이 가해질 때 발생한 자화손실 값을 이용하여 계산된 자화손실 값이다. 측정값과 계산 값을 비교하면, 방향 30°에서 가해주는 자장에 의한 측정값과 계산 값이 약 10% 정도의 오차를 보이고 있다. 이는 외부에서 가해주는 자장이 작아 손실을 측정하기 어렵기 때문으로 보인다. 하지만, 자화손실의 변화 형태를 확인할 수 는 있었으며, 임의방향 자장에 대한 자화손실을 시편의 수직 자화손실 측정결과로도 계산이 가능함을 알 수 있다.

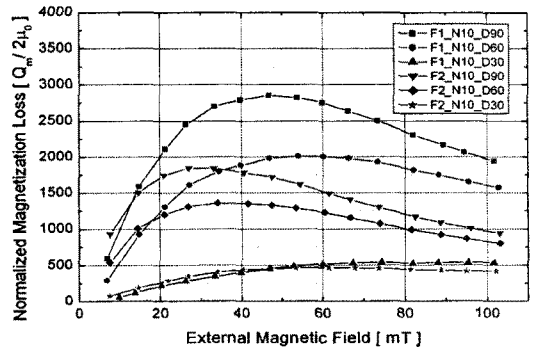
그림 6과 그림 7은 F1\_N1 선재와 F2\_N1 선재에 대해 측정된 자화손실과 F1\_N10 선재와 F2\_N10 선재에 대해 측정된 자화손실을 단위체적당 자기저장에너지밀도로 나누어 표현한 식(2)의 정규화된 자화손실을 나타낸다.

$$\text{Normalized loss} = \frac{\text{Measured loss}}{B_m^2/2\mu_0} \quad (2)$$

식(2)과 같이 표현된 정규화손실은 로스팩터(loss factor)의 개념으로 생각할 수 있으며, 앞의 그림4, 그림5의 그래프에서 손실증가 패턴이 변하는 외부자장의 크기를 쉽게 판별할 수 있다. 그림6과 그림7에서 그래프들의 극대점에 해당하는 외부자장의 크기는 앞의 그래프들에



<그림 6> F1\_N1 선재와 F2\_N1 선재의 각도별 자화손실 측정값을  $B_m^2/2\mu_0$ 으로 나눈 정규화 값



<그림 7> F1\_N10 선재와 F2\_N10 선재의 각도별 자화손실 측정값을  $B_m^2/2\mu_0$ 으로 나눈 정규화 값

서 손실증가의 기울기가 변하는 외부자장의 크기를 의미 하며, 이는 각 샘플들에서 완전침투자장을 나타낸다. F1\_N1에서 수직방향의 외부자장이 인가되는 경우 약 30 mT정도에서 극대 값이 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이 때는 초전도 선재 내부에 자장이 완전히 침투하는 시점 이기도 하다. 그림 6과 그림 7에서 비분할 선재와 2분할 선재의 경우 분할 개수가 늘어날수록 완전침투자장이 작 아짐을 알 수 있으며, 이는 분할된 부분으로 자장이 통 과하기 때문이다. 그러나 외부인가자장의 각도가 감소함 에 따라서는 완전침투자장이 증가함을 알 수 있다.

### 3. 결 론

대전류용 초전도 연속전위도체의 외부자장 인가방향에 따른 자화손실의 특성을 알아보기 위해 비분할, 2분할된 YBCO CC선재를 이용하여 적층수를 다르게 한 연속전 위도체들을 제작하였으며 자화손실을 측정하였다. 측정 결과로부터 분할에 의한 자화손실 특성은 높은 자장에서 는 분할 개수만큼 자화손실이 감소하는 것을 알 수 있었 으며, 이러한 효과는 외부인가자장이 높을수록 명확하게 나타났다. 또한 비분할, 2분할 선재를 적층하여 제작한 연속전위도체의 수직 자화손실이 감소하는 것을 알 수 있으며, 이는 적층에 의한 자기차폐효과에 의한 것이다. 그리고 수직으로 가해지는 자장에 의한 자화손실 값으로 부터 얻어낸 60°, 30°의 자장성분에 의한 자화손실 값과 실제 60°, 30°로 인가된 자장에 의한 자화손실 값이 잘 일치하는 것을 확인하였다. 이런 결과는 임의방향 자장 이 발생하는 초전도 코일에서 자화손실을 시편의 수직 자화손실 측정결과만으로도 계산할 수 있으므로 초전도 교류전력기 설계 및 제작 시 코일의 손실 평가에 유용 하게 사용될 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용 기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Maguire et al., "Development and demonstration of a long length HTS cable to operate in the long island power authority transmission grid," IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 15, pp. 1787-1792, 2005
- [2] Ji-kwang Lee et al., "Magnetization loss and shield effect in Multi-Stacked Tapes with various stacking configurations," IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 16, pp. 131-134, 2006.
- [3] 변상범 외, "분할형 YBCO CC의 전기적 특성," 대한전기 학회 하계학술 대회, 2008