

대전류용 초전도 연속전위도체의 외부자장 인가방향에 따른 자화손실 특성

논문

59-1-9

Angular Dependency of Magnetization Losses in Continuously Transposed Coated Conductors for Large Current Applications

한 병 육^{*} · 김 우 석[†] · 이 지 광^{**} · 이 세 연^{***} · 박 상 호^{***} · 김 영 일^{*} · 최 경 달[§]
(B. W. Han · W. S. Kim · J. K. Lee · S. Y. Lee · S. H. Park · Y. I. Kim · K. Choi)

Abstract - AC loss is main issue for power applications using YBCO coated conductor. The striated YBCO CC(Coated Conductor) has been proposed by several researchers to decrease a magnetization loss. A continuously transposed coated conductor (CTCC), suggested by our research group before, could be very useful for lower magnetization loss of large current power applications. In this paper, an AC loss reduction effect by the stack, striation and transposition of YBCO CCs under a time varying external magnetic field. To estimate the reduction effects for perpendicular magnetization loss, several CTCC samples were prepared and tested. Also, we measured angular dependency of magnetization losses of various CTCC samples.

Key Words : AC Loss, Continuously Transposed Coated Conductor(CTCC), Magnetization Loss

1. 서 론

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

고온 초전도선재에 직류전류를 통전시킬 경우에는 저항이 없기 때문에 손실이 발생하지 않는다. 그러나 고온 초전도선재에 교류전류를 통전시키거나 외부교번 자장이 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 초전도 전력기기들의 개발이 늦어지고 있다. 따라서 고온 초전도선재를 사용하여 전력기기를 개발하기 위해서는 교류손실을 저감 시킬 수 있는 고온 초전도선재의 개발이 선행되어야 한다. 또한 초전도전력기기에는 고온 초전도선재를 코일 형태로 제작하여 사용하며, 코일 여자 시 코일을 구성하는 각 초전도선

재에는 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 고려사항이다.

고온 초전도선재를 대용량 전력기기에 적용하기 위해서는 수십 가닥의 선재를 한 가닥의 도체처럼 사용하는데, 각 선재를 간의 임피던스 차이에 의한 전류 불균형 문제를 해결해야 하며, 대용량 전력기기의 가격에서 가장 많은 비중을 차지하는 냉동기 가격은 교류손실에 의해 좌우되기 때문에 교류손실의 저감에 대한 연구가 진행 중이다. 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 함으로서 비슷한 효과를 얻을 수 있다.[2][3] 본 논문에서는 트위스트의 방법을 적용하기 위해서 자체 제작한 편침기를 이용하여 주기적인 퍼치를 가지는 전위형상선재를 제작하였으며, 반도체 공정에서 사용하는 화학적 애칭방법인 포토마스킹 방법을 이용하여 초전도체의 분할을 하였다. 이렇게 제작된 분할형 전위형상선재를 서로 교차 적층하여 샘플을 제작하였으며, 이 샘플을 분할형 연속전위도체(Continuously Transposed Coated Conductor, CTCC)라 한다.[4] 제작된 분할형 연속전위도체의 외부교번자장에 의한 자화손실의 특성을 알아보기 위해 비분할과 1분할 선재의 적층 수를 달리한 샘플을 준비하였으며, 분할형 연속전위도체 샘플의 넓은 면에 30°, 60°, 90°(수직) 방향으로 외부교번자장이 인가될 경우의 자화손실을 측정하여 비교 분석하였다.

* 준희원 : 한국산업기술대학교 전기공학과 석사과정

** 정희원 : 우석대학교 소방안전학과 교수

*** 정희원 : 한국산업기술대학교 위촉연구원

§ 정희원 : 한국산업기술대학교 에너지대학원 교수

† 교신저자, 정희원 : 서울대학교 재료공학부 계약교수

E-mail : h-e-love@hanmail.net

접수일자 : 2009년 6월 8일

최종완료 : 2009년 11월 24일

2. 자화손실 측정 및 결과

2.1 측정 샘플 제작

표 1은 샘플제작에 사용된 YBCO CC의 제원으로서 Superpower 사에서 제작된 선재이다. 표 1의 YBCO CC를 연속전위도체로 만들기 위해 편창기를 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, 1분할 선재들을 단일, 2, 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. F1은 필라멘트가 1개이므로 비분할 선재, F2는 필라멘트가 2개이므로 1분할 선재를 의미한다.

표 1 YBCO CC의 제원

Table 1 Specification of YBCO CC

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

표 2 분할형 연속전위도체 샘플의 제원

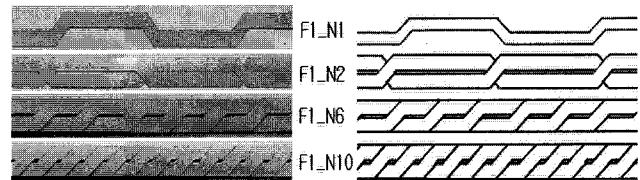
Table 2 Specification of Sample

전위형상선재	
폭	4.5 mm
피치	80 mm
길이	120 mm
연속전위도체 샘플	
분할 개수	비분할(F1), 1분할(F2)
전위형상 선재의 적층 개수	1(N1), 2(N2), 6(N6), 10(N10)

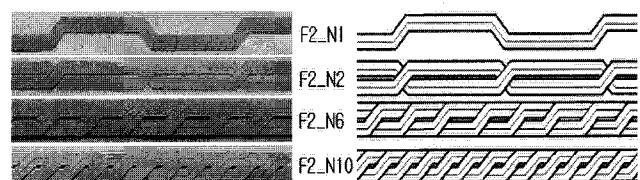
2.2 자화손실측정

초전도선재에 외부로부터 교변자장이 가해지면 초전도선

재의 히스테리시스 특성에 의하여 교류손실이 발생하며 이를 자화손실(Q_m)이라고 한다. 자화손실은 교변자장이 초전도선재에 인가될 때 초전도선재에서 소비되는 손실이며, 측정된 전압과 전류 신호를 이용하여 고온 초전도선재의 1 주기 당, 단위 체적 당 자화손실을 아래의 식 (1)을 이용하여 계산 할 수 있다.



(a) No-striated CTCC Sample



(b) 1-striated CTCC Sample

그림 1 분할형 연속전위도체 샘플의 형상

Fig. 1 Samples having different striation and transposed stacking number.

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

여기서, k 는 자장인가용 코일자석의 단위 전류 당 발생자속 밀도를 나타내는 자석상수이고, C_{pu} 는 픽업코일의 보정상수, V_s 는 샘플의 체적이다. 실험에 사용된 k 값은 4.615×10^{-3} 이며, C_{pu} 값은 2 이다.

그림 2의 (a)는 자화손실을 측정하기 위한 회로도이며, (b)는 마그넷 안에서 측정샘플을 원하는 위치로 이동시키기 위한 실험대를 나타내고 있다. 분할형 연속전위도체 샘플에 교변자장을 인가하기 위해서는 레이스 트랙형 마그넷이 필요하며, 여기에 전류를 공급하기 위해 교류전원이 필요하다. 일반적인 형태의 교류손실 측정을 위하여 60 Hz의 정현파 교류전류를 인가하였다. 또한 약 100 mT 정도의 자장을 만들어내기 위해서는, 마그넷에 15 A 정도의 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 뱅크를 제작하였다. 자화손실 측정 시 샘플선재는 픽업코일 내부에 위치하게 되며, 외부 자장이 인가되는 경우에 픽업코일에서 유기되는 전압은 샘플선재에서 발생하는 자장과 외부자장과의 합성을 의해 나타난다. 따라서 샘플선재에서 발생하는 자장만을 얻기 위해서 픽업코일과 동일한 턴 수의 캔슬코일을 연결하여, 외부 자장에 의해 발생하는 유기기전력을 충분히

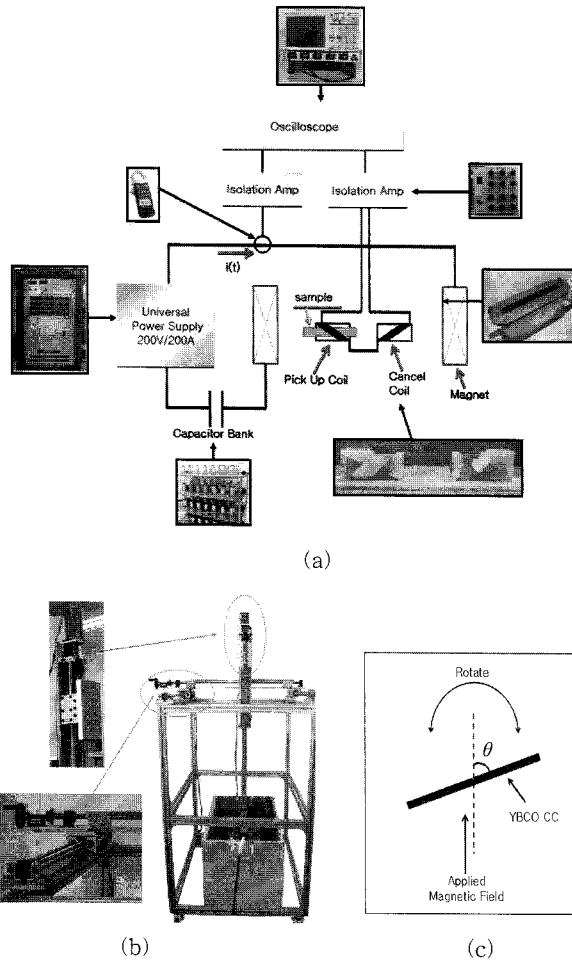


그림 2 자화손실 측정 회로도와 외부인가자장 각도
Fig. 2 Experimental circuit for magnetization loss measurement and External Magnetic Field Angular

상쇄시켜서 자화손실을 측정하였다. 그리고 샘플선재의 넓은 면에 대하여 임의의 각도로 인가되는 외부자장의 형태를 그림 2의 (c)에 나타내었다.

2.3 외부자장 인가방향에 따른 자화손실 결과

비분할과 1분할 단일 소선들의 수직 자화손실 측정결과를 브란트(Brandt)가 제안한 스트립(Strip) 모델식의 계산결과와 비교하였으며, 그 결과를 그림 3에 나타내었다.[5] 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 계산 값이 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 영향들이 포함되기 때문이다. 그러나 인가자장이 커져서 완전침투자장을 넘어서게 되면 분할된 초전도 필라멘트들에 자장이 통과하게 되므로 자장의 상호 영향이 줄어들게 되어 측정결과와 계산결과가 일치하게 된다.

그림 4는 비분할 선재와 1분할 선재를 1, 2, 6, 10 적층하여 제작된 샘플의 수직 자화손실을 측정한 결과이다. 측정결과를 통해서 외부에서 가해주는 자장이 작을 때는 샘플을 구성하는 선재의 수가 많을수록 자화손실이 작고, 외부에서 가해주는 자장이 100 mT가 되면, 각 샘플의 자화손실이 비슷해지는 것을 확인 할 수 있다. 이는 외부에서 가해주는 자장이 커지면서 각 초전도체에 자장이 최대로 침투되어 적층효과가 없어지기 때문이다. 또한 그래프를 통해 F1_N1 선재와 F1_N2 선재의 자화손실이 외부 자장 20 mT 이후부터 동일하게 발생되는 것을 알 수 있다. 이것은 단일선재와 2적층선재는 적층되는 부분이 거의 없기 때문에 자화손실 값이 비슷하게 나온 것으로 보인다. 하지만 F2_N1 선재와 F2_N2 선재의 경우에는 예상의 영향으로 자화손실이 차이를 보이고 있다.

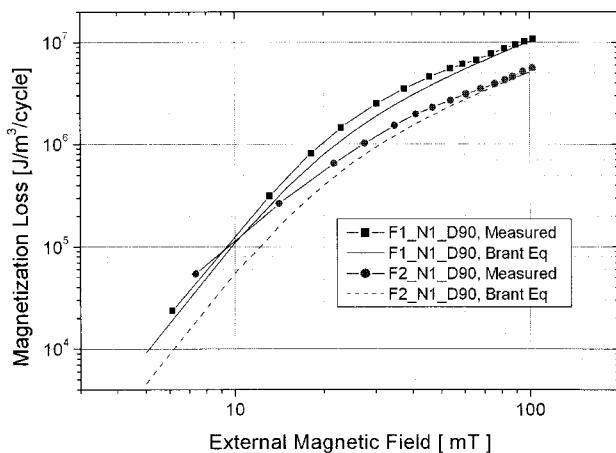


그림 3 F1_N1 선재와 F2_N1 선재의 수직 자화손실 측정값과 브란트 모델식의 계산 값 비교
Fig. 3 Comparison of the measured and calculated perpendicular magnetization losses of No, 1-striated and 1-transposed stack conductors

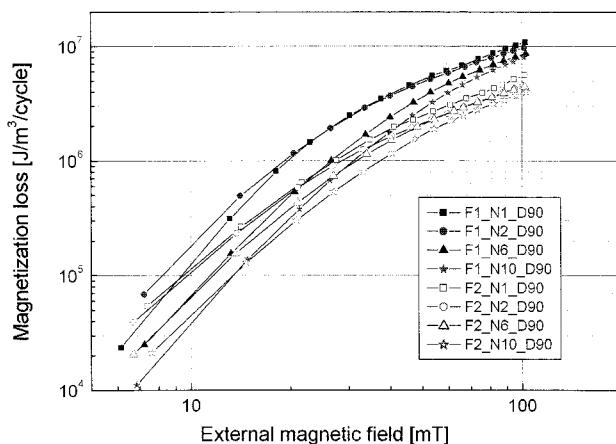


그림 4 비분할 선재와 1분할 선재의 적층별 수직 자화손실 측정값 비교
Fig. 4 Comparison of the measured perpendicular magnetization losses of No, 1-striated and 1, 2, 6, 10-transposed stack conductors

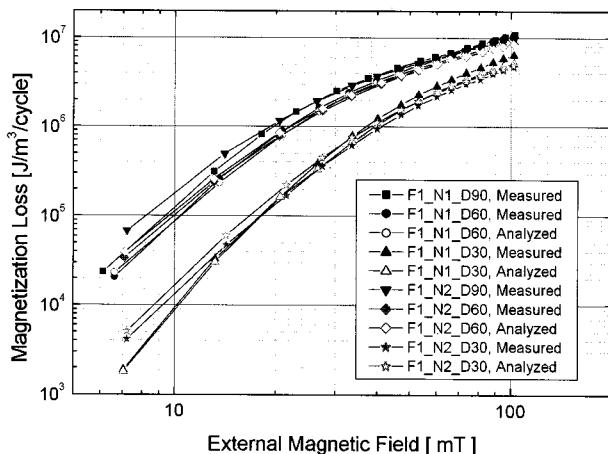


그림 5 F1_N1 선재와 F1_N2 선재의 각도별 자화손실 측정 값과 계산 값 비교

Fig. 5 Comparison of the measured and calculated magnetization losses of No-striated and 1, 2-transposed stack conductors

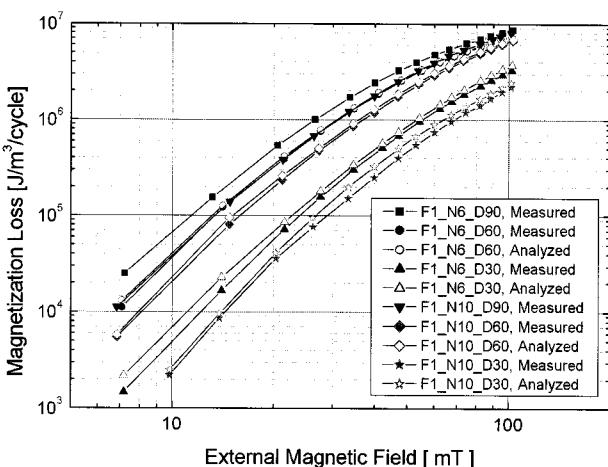


그림 6 F1_N6 선재와 F1_N10 선재의 각도별 자화손실 측정 값과 계산 값 비교

Fig. 6 Comparison of the measured and calculated magnetization losses of No-striated and 6, 10-transposed stack conductors

그림 5와 그림 6은 비분할 선재로 1, 2, 6, 10 적층하여 제작한 샘플에 대해 자화손실을 외부인가 자장의 각도에 따라 측정한 결과이며, 그림 7과 그림 8은 1분할 선재로 1, 2, 6, 10 적층하여 제작한 샘플에 대해 자화손실을 외부인가 자장의 각도에 따라 측정한 결과이다. 외부인가자장이 90°에서 30°로 줄어들수록 자화손실이 감소함을 확인할 수 있었다. 또한 그림 5, 6, 7, 8에서 클로즈 심벌은 실험을 통해서 얻어진 손실 값이며, 오픈 심벌은 수직으로 자장이 가해질 때 발생한 자화손실 값을 이용하여 계산한 자화손실 값이다. 측정값과 계산값을 비교하면, 방향 30°에서 가해주는 자장에 의한 측정값과 계산값이 약 10% 정도의 오차를 보이는데, 이는 외부인가자장의 인각각도가 수평에 가까울 수록 자화손실이 작아 측정하기 어렵기 때문으로 보인다.

하지만, 자화손실의 변화 형태를 확인 할 수는 있었으며, 임의방향 자장에 대한 자화손실을 시편의 수직 자화손실 측정 결과로도 계산이 가능함을 알 수 있다.

그림 9와 그림 10은 F1_N1 선재와 F2_N1 선재에 대해 측정된 자화손실과 F1_N10 선재와 F2_N10 선재에 대해 측정된 자화손실을 단위체적당의 자기저장에너지밀도로 나누어 표현한 정규화된 자화손실이다. 그리고 식(2)와 같이 표현된 정규화손실은 로스팩터(loss factor)의 개념으로 생각할 수 있다.

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

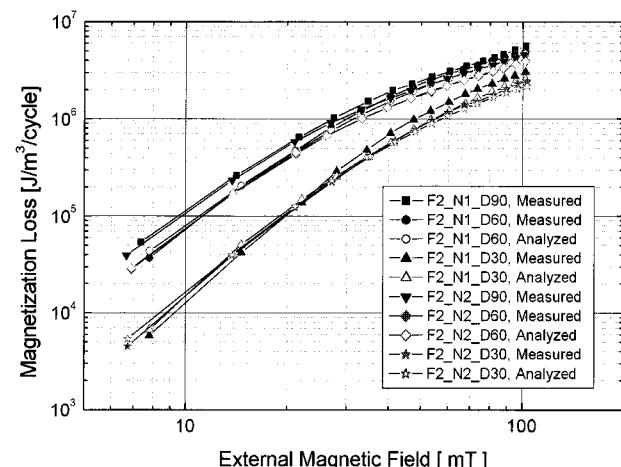


그림 7 F2_N1 선재와 F2_N2 선재의 각도별 자화손실 측정 값과 계산 값 비교

Fig. 7 Comparison of the measured and calculated magnetization losses of 1-striated and 1, 2-transposed stack conductors

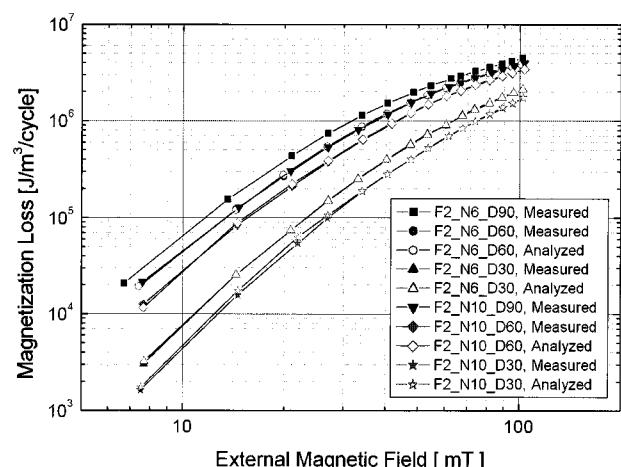


그림 8 F2_N6 선재와 F2_N10 선재의 각도별 자화손실 측정 값과 계산 값 비교

Fig. 8 Comparison of the measured and calculated magnetization losses of 1-striated and 6, 10-transposed stack conductors

앞의 그림 5, 6, 7, 8의 그래프에서 순실증가 패턴이 변하는 외부자장의 크기를 쉽게 판별할 수 있다. 그림 9와 그림 10에서 그래프들의 극대점에 해당하는 외부자장의 크기는 앞의 그래프들에서 순실증가의 기울기가 변하는 외부자장의 크기를 의미하며, 이는 각 샘플들에서 완전침투자장을 나타낸다. F1_N1에서 수직방향의 외부자장이 인가되는 경우 약 25 mT정도에서 극대 값이 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이 때는 초전도 선재 내부에 자장이 완전히 침투하는 시점이기도 하다. 그림 11은 F1_N1과 F2_N1, F1_N10, F2_N10 선재의 완전침투자장을 각도별로 나타낸 그림이다. 그림 11에서 비분할 선자와 1분할 선재의 경우 분할 개수가 늘어날수록 완전 침투자장이 작아짐을 알 수 있으며, 이는 분할된 부분으로 자장이 통과하기 때문이다. 그러나 외부인가자장의 각도

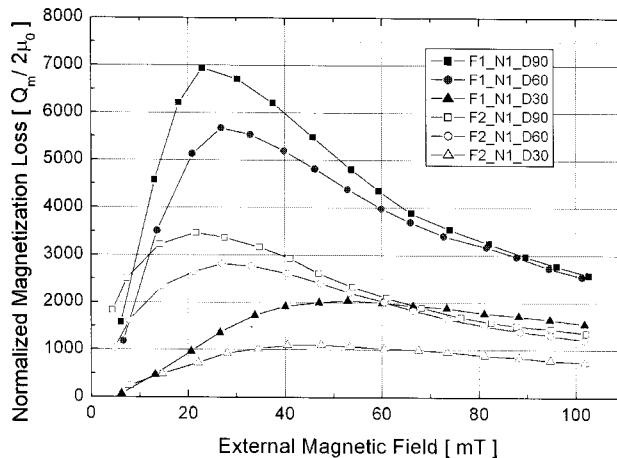


그림 9 F1_N1 선재와 F2_N1 선재의 각도별 자화손실 측정 값을 $B_m^2 / 2\mu_0$ 으로 나눈 정규화 값

Fig. 9 Normalized value divided by $B_m^2 / 2\mu_0$ of measured magnetization loss of No, 1-striated and 1-transposed stack conductors

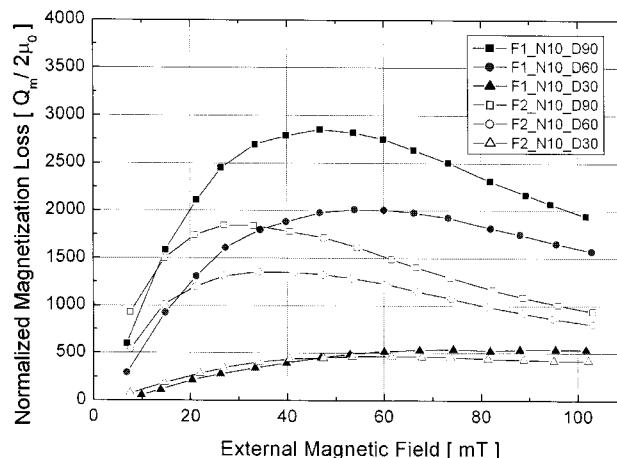


그림 10 F1_N10 선재와 F2_N10 선재의 각도별 자화손실 측정 값을 $B_m^2 / 2\mu_0$ 으로 나눈 정규화 값

Fig. 10 Normalized value divided by $B_m^2 / 2\mu_0$ of measured magnetization loss of No, 1-striated and 10-transposed stack conductors

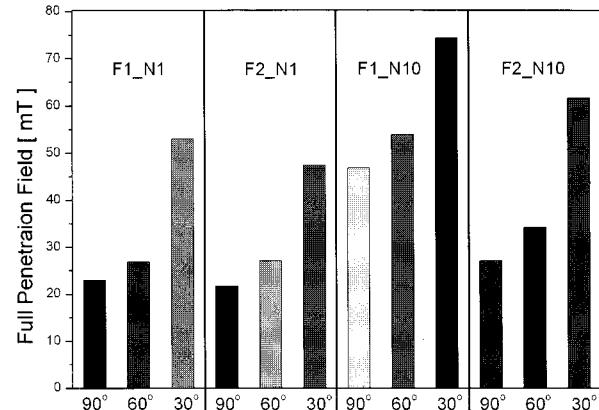


그림 11 F1_N1과 F2_N1, F1_N10, F2_N10 선재의 각도별 완전침투자장 비교

Fig. 11 Comparison of full penetration field of No, 1-striated and 1, 10-transposed stack conductors

가 감소함에 따라서 완전침투자장이 증가함을 알 수 있다. 또한 적층개수가 증가함에 따라서도 완전침투자장이 증가함을 알 수 있다.

3. 결 론

고온초전도 선재를 사용한 전력기기의 설계 및 제작에 있어서 교류손실의 계산 및 평가는 전력기기의 효율 산정 및 냉각시스템의 결정에 반드시 필요한 작업이며, 저온초전도 선재와는 달리 고온초전도 선재의 경우에는 그 형상의 이방성으로 인하여 외부자장의 인가 각도에 영향을 많이 받게 된다. 현재까지는 단일 선재에 있어서 외부자장의 인가각도별 손실의 변화에 대한 연구와 시험이 많이 진행되어 왔으나, 적층선재 혹은 연속전위선재에 대한 연구 및 측정시험은 연구된 바가 없다. 따라서 본 논문에서는 대전류용 초전도 연속전위도체의 외부자장 인가방향에 따른 자화손실의 특성을 알아보기 위해 비분할, 1분할된 YBCO CC선재를 이용하여 적층수를 다르게 한 연속전위도체들을 제작하였으며 자화손실을 측정하였다. 측정결과로 부터 분할에 의한 자화손실 특성은 높은 자장에서는 분할 개수만큼 자화손실이 감소하는 것을 알 수 있었으며, 이러한 효과는 외부인가자장이 높을수록 명확하게 나타났다. 또한 비분할, 1분할 선재를 적층하여 제작한 연속전위도체의 수직 자화손실이 감소하는 것을 알 수 있으며, 이는 적층에 의한 자기차폐효과에 의한 것이다. 선재의 완전침투자장은 분할 개수가 늘어날수록 작아짐을 알 수 있으며, 이는 분할된 부분으로 자장이 통과하기 때문이며, 외부인가자장의 각도가 감소하거나 적층개수가 증가함에 따라서 완전침투자장이 증가함을 알 수 있다. 그리고 수직으로 가해지는 자장에 의한 자화손실 값으로부터 얻어낸 60°, 30°의 자장성분에 의한 자화손실 값과 실제로 60°, 30°로 인가된 자장에 의한 자화손실 값이 잘 일치하는 것을 확인하였다. 이런 결과는 임의방향 자장이 발생하는 초전도 코일에서 자화손실을 시편의 수직 자화손실 측정 결과만으로도 계산할 수 있으므로 초전도 교류전력기기 설계 및 제작 시 코일의 손실 평가에 유용하게 사용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도용융기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다.



이 지 광 (李 志 光)

1966년 6월 1일생, 1989년 서울대 전기공학과 졸업, 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 우석대학교 소방안전학과 교수

E-mail : jikwang@woosuk.ac.kr

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. 1787-11792, 2005
- [2] O. Tsukamoto et al., "AC magnetization loss reduction by striation in YBCO-123/Hastelloy coated conductors," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 15, pp. 2839-2842, 2005
- [3] Ji-kwang Lee et al., "Effects of striations on magnetization loss of transposed coated conductors," Physica C: Superconductivity, Vol. 468, pp. 1727-1730, 2008.
- [4] 변상범 외., "분할형 YBCO CC의 전기적 특성," 대한전기학회 하계학술 대회, pp. 806-807, 2008
- [5] Ernst Helmut Brandt, "Type-II superconductor strip with current in a perpendicular Magnetic," Physical review B, Vol. 48, No. 17, pp.893-906, November, 1993

저 자 소 개



한 병 융 (韓 炳 煙)

1982년 1월 13일생, 2008년 2월 순천향대학교 정보기술공학부 졸업, 2009년 현재 한국산업기술대학교 에너지대학원 전기공학과 석사과정

E-mail : h-e-love@hanmail.net



김 우 석 (金 佑 錫)

1970년 6월 12일생, 1996년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업, 1998년 동 대학원 공학석사, 2002년 동 대학원 공학박사, 2009년 현재 서울대학교 재료공학부 계약교수

E-mail : wskim612@gmail.com



이 세 연 (李 世 淵)

1979년 2월 25일생, 2005년 대진대 전기공학과 졸업, 2007년 성균관대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2009년 현재 한국산업기술대학교 위촉연구원

E-mail : eon0255@gmail.com



박 상 호 (朴 相 浩)

1969년 2월 10일생, 1996년 한국해양대 전기공학과 공학사, 2004년 한국해양대 동대학원 공학박사, 2009년 현재 한국산업기술대학교 겸임교수

E-mail : sanghop@kpu.ac.kr



김 영 일 (金 榮 一)

1984년 8월 30일생, 2009년 2월 한국산업기술대학교 전자공학과 졸업, 2009년 현재 한국산업기술대학교 에너지대학원 전기공학과 석사과정

E-mail : mart24h@hotmail.com



최 경 달 (崔 景 達)

1962년 2월 12일생, 1984년 서울대 전기공학과 졸업(공학사), 1986년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1993년 동대학원 전기공학과 공학박사, 2009년 현재 한국산업기술대학교 에너지대학원 교수

E-mail : choidal@kpu.ac.kr