

분할형 YBCO CC 필라멘트 전류의 비접촉 측정

박상호*, 양귀상*, 변상범*, 김우석**, 이지광***, 박찬**, 최경달*
 한국산업기술대*, 서울대**, 우석대***

Noncontact Current Measurement in Filaments of a Striated YBCO Coated Conductor

Sang Ho Park*, Kwy Sang Yang*, Sang Beom Byun*, Woo-Seok Kim**, Ji Kwang Lee***, Chan Park**, Kyeongdal Choi*
 Korea Polytechnic University*, Seoul National University**, Woosuk University***

Abstract - 현재 고온 초전도전력기기를 실용화하는데 교류손실이 문제가 되고 있다. 이러한 교류손실을 저감하기위해서 선재를 분할하는 방법에 대한 연구가 진행중이다. 분할된 초전도선재의 각 필라멘트의 전류 분류가 일정하지 않을 경우 필라멘트의 임계전류 이상이 인가될 수 있다. 따라서 각 필라멘트에 흐르는 전류를 측정하여야 한다. 그러나 초전도선재의 필라멘트 각각의 전류를 측정하기는 어렵다. 본 연구에서는 초전도선재의 필라멘트의 각각의 전류를 비접촉 방식으로 측정할 수 있는 서치코일을 이용한 방법을 제안하였고 실험을 통해 이를 확인하였다.

1. 서 론

현재 고온 초전도 선재를 사용한 초전도 전력기기가 연구개발 중이고 실용화하기위한 예비단계에 있다. 그러나 초전도 전력기기의 실용화에 앞서 교류손실이 문제화되고 있다. 이러한 교류손실을 저감하는 방법으로는 초전도선재를 세심화하거나 꼬는 방법이 제안되고 있으나 YBCO CC와 같이 테이프형태의 초전도선재는 위에 방법을 사용할 수 없다. 그래서 YBCO CC를 분할하여 필라멘트형태로 제작하는 방법들이 제안되었다 [1~6]. 분할한 초전도선재의 필라멘트 각각의 전류분류가 분균일할 경우 초전도선재 필라멘트의 임계전류 이상이 인가될 수 있다. 그래서 초전도선재의 필라멘트 각각에 흐르는 전류의 측정이 요구된다. 초전도선재 전체의 전류는 측정할 수 있으나 각각의 필라멘트에 흐르는 전류를 초전도선재를 단선하여 측정하는 등의 직접 측정하는 방법은 불가능하다.

본 논문에서는 초전도선재의 필라멘트 전류를 서치코일을 이용하여 비접촉으로 측정하는 방법을 제안하였으며, 서치코일 보빈의 재질을 여액체절소와 같은 저온에서도 측정 가능하도록 FRP로 제작하였다.

2. 본 론

2.1 지배방정식

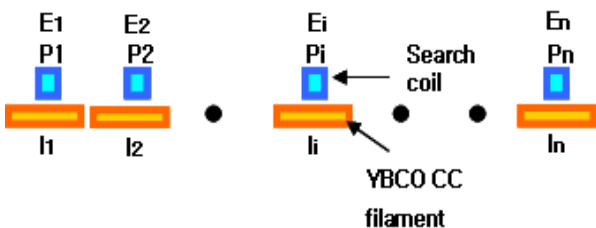
하나의 YBCO CC 필라멘트에 식(1)과 같은 교류 전류가 흐를때

$$i(t) = \sqrt{2} I \sin \omega t \tag{1}$$

서치코일 양단에 발생하는 전압 $e(t)$ 는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$e(t) = -L \frac{di(t)}{dt} = \sqrt{2} E \cos \omega t \tag{2}$$

그림 1은 필라멘트 형태의 초전도 선재와 서치코일의 개요도이다. 초전도선재 각각의 필라멘트에 전류가 흐르면 식(2)와 같은 전압이 서치코일 양단에 발생한다. 서치코일 양단전압을 측정하고 측정된 전압값으로부터 이를 이용하여 필라멘트 각각에 흐르는 전류를 계산할 수 있다.



<그림 1> 초전도 선재의 비접촉 측정 개요도

그림 1과 같이 n개의 필라멘트 각각에 전류가 흐를 때, 발생하는 P_i점에서의 서치코일의 전압 E_i는 각각의 필라멘트의 전류 I₁, I₂, ... I_i, ... I_n에 의해 중첩하여 나타 낼 수 있으며, 각 서치코일에서의 전압은 식(3)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} E_1 &= G_{11}I_1 + G_{12}I_2 + G_{13}I_3 + \dots + G_{1n}I_n \\ E_2 &= G_{21}I_1 + G_{22}I_2 + G_{23}I_3 + \dots + G_{2n}I_n \\ &\vdots \\ E_i &= G_{i1}I_1 + G_{i2}I_2 + G_{i3}I_3 + \dots + G_{in}I_n \\ &\vdots \\ E_n &= G_{n1}I_1 + G_{n2}I_2 + G_{n3}I_3 + \dots + G_{nn}I_n \end{aligned} \tag{3}$$

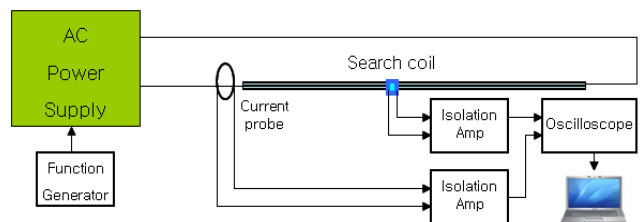
여기서 G_{ij}는 j번째 필라멘트에만 1 [A]의 전류가 흐를 경우 i번째의 서치코일에 발생하는 전압이다. 식(3)의 행렬 [G]의 역행렬을 [K]라고 하면 식(4)과 같이 나타낼 수 있으며

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & \dots & K_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_i \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} \tag{4}$$

[K]행렬에 서치코일의 측정전압 E₁, E₂, E₃ ... E_n을 대입하면 필라멘트 각각의 전류 I₁, I₂, I₃ ... I_n를 계산할 수 있다.

2.2 서치코일을 이용한 비접촉 측정

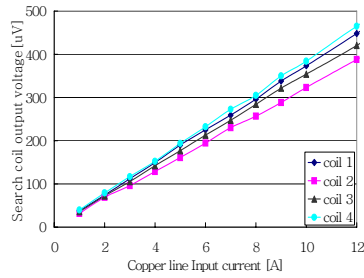
그림 2는 서치코일을 이용한 비접촉 측정 블록 다이어그램이다. YBCO CC의 흐르는 전류는 280 [A/cm]의 대용량의 전류가 흐르며, 필라멘트에 흐르는 전류를 측정하기 위하여 필라멘트 각각에 단자를 접속하여 전류를 흘린다는 것은 어렵다. 그래서 2.2.1절에 구리선을 사용하여 서치코일을 이용한 비접촉 전류 측정법의 타당성을 검토하고, 2.2.2절에 YBCO CC의 서치코일을 이용하여 측정된 필라멘트 각각의 계산전류의 합과 인가전류와 비교하였다.



<그림 2> 서치코일을 이용한 비접촉 측정 블록 다이어그램

2.2.1 구리선의 전류분류 측정

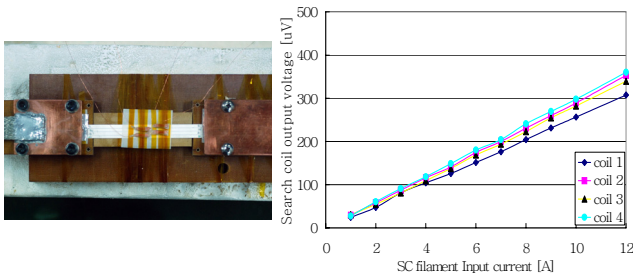
YBCO CC의 필라멘트의 비접촉 전류 측정법의 타당성을 검증하기 위하여 액체절소에서 냉각 후 4가닥의 구리선에 전류를 인가하여 서치코일의 전압으로부터 식(4)를 이용하여 구리선에 흐르는 전류를 계산하였다. 측정에 사용될 서치코일은 3 [mm] × 1 [mm] × 10 [mm]의 FRP 막대에 50턴을 감은 그림 3(a)와 같은 서치코일을 제작하였으며, 그림 3(b)는 코일의 인가전류에 대한 서치코일의 전압을 나타낸 그림이다. 서치코일의 단면적등의 차이로 인한 서치코일간의 전압차는 있으나 코일의 인가전류에 대하여는 서치코일 측정전압은 선형적으로 증가함을 알 수 있다.



(a) 서치코일 (b) 인가전류에 대한 서치코일전압
〈그림 3〉 서치코일 및 구리선에 대한 서치코일 특성

2.2.2 YBCO CC의 필라멘트 전류 측정

그림 4(b)는 YBCO CC의 전류에 대한 서치코일의 특성이며 구리선에 대하여서와 같이 선형인것을 확인할 수 있었다. YBCO CC 필라멘트중 하나만 전류를 인가하여 서치코일 양단전압을 측정하고 측정된 전압으로부터 식(3)과 같은 [G]행렬과 식(4)와 같은 [K]행렬을 구하였다. 여러 개의 필라멘트에 전류를 인가한 후 서치코일의 전압을 측정하고 측정된 전압값으로부터 필라멘트 각각의 전류를 계산하여 필라멘트 각각의 전류의 합과 인가전류를 비교하였다. 그림 4(a)는 YBCO CC의 필라멘트 전류를 서치코일을 이용하여 측정하기 위한 비접촉 측정 장치이다.



(a) 측정 장치대 (b) 인가전류에 대한 서치코일전압
〈그림 4〉 YBCO CC 비접촉측정 장치대 및 서치코일 특성

2.3 결과

실험은 액체질소에서 실시하였으며, 표 1은 구리선 4개의 선로중 2개의 선로에만 전류를 흘린 후 서치코일 양단전압을 측정하고 측정된 전압값으로부터 코일에 흐르는 전류를 계산하고 인가전류와 비교하였다. 오차를 최대 1.3 [%]로 측정되었다. 표 2는 4개의 구리선의 선로중에서 3개 또는 4개의 선로에 전류를 흘리고 서치코일을 양단전압을 측정하고 측정된 전압값으로부터 코일에 흐르는 전류를 계산하고 인가전류와 비교하였다. 오차율은 최대 1.8 [%]정도로 측정되었다.

YBCO CC의 경우 각각의 필라멘트에 접속하여 전류를 측정하기 어려우므로 구리선을 이용하여 서치코일을 이용한 비접촉 측정 방법을 검토하였으며 표 1과 표 2의 실험결과로 서치코일을 이용한 방법이 적용가능하다는 것을 확인하였다. YBCO CC 필라멘트 각각에 전류를 인가하여 서치코일 양단전압을 측정하여 식(3)과 같은 행렬[G]와 식(4)와 같은 역행렬[K]를 구하였으며, 표 3과 같이 전류를 흘린 후 서치코일 양단전압을 측정하고 측정된 전압값으로부터 필라멘트에 흐르는 전류를 계산하고 필라멘트 각각의 계산전류의 합과 인가전류와 비교하였다. 오차율은 최대 1.3 [%]정도 측정되었으며, 표 3의 Case 3은 필라멘트 각각에 동시에 전류를 인가하더라도 필라멘트에 동일한 전류가 흐르지 않음을 알 수 있다.

〈표 1〉 구리선의 인가전류와 계산전류 비교-1

	인가전류 [A]	계산전류 [A]	인가전류 [A]	계산전류 [A]
coil 1	0	0.09	10.02	10.15
coil 2	0	0.12	0	0.064
coil 3	10.05	9.99	10.03	10.08
coil 4	10.03	10.06	0	0.04
coil 1	10.02	10.06	0	0.01
coil 2	10.03	9.99	10.05	9.94
coil 3	0	0.13	0	0.08
coil 4	0	0.04	10.03	10.03

〈표 2〉 구리선의 인가전류와 계산전류 비교-2

	인가전류 [A]	계산전류 [A]	인가전류 [A]	계산전류 [A]
coil 1	12.67	12.49	0	0.06
coil 2	6.28	6.25	12.57	12.57
coil 3	6.38	6.28	6.42	6.30
coil 4	0	0.11	6.25	6.24
coil 1	5.98	6.01	9.42	9.37
coil 2	6.72	6.63	10.56	10.54
coil 3	0	0.04	10.01	9.87
coil 4	12.53	12.44	9.87	9.79

〈표 3〉 YBCO CC에서 계산전류 합과 인가전류의 비교

	Case 1	Case 2	Case 3
filament 1 계산전류 [A]	0.33	0.34	8.17
filament 2 계산전류 [A]	13.16	1.1	4.36
filament 3 계산전류 [A]	0.6	7.72	5.08
filament 4 계산전류 [A]	11.11	10.61	7.01
계산전류 합계 [A]	25.2	19.77	24.62
인가전류 [A]	25.3	20	24.3
오차율 [%]	0.3	1.1	1.3

3. 결 론

본 논문은 YBCO CC 선재의 필라멘트 각각에 흐르는 전류를 비접촉으로 측정하는 방법이다. YBCO CC의 필라멘트 각각에 흐르는 전류를 측정하기 위해서 서치코일을 이용한 비접촉 측정법을 제안하였다. YBCO CC 각각의 필라멘트의 전류를 측정하기 위하여 구리선을 사용하여 서치코일을 이용한 측정법의 타당성을 검토하였다. 오차율이 1.8 [%]정도로 적용가능하다는 확인하였다. YBCO CC의 필라멘트에 여러 가지 경우의 전류를 인가한 후 인가전류와 서치코일을 이용한 계산값과 비교하였다. 최대 오차율이 1.3 [%]로 측정방법이 우수하다는 것을 확인하였다. 또한 선재접속부의 접속저항 차이등으로 인한 필라멘트간 전류 분류의 불평형도 측정이 가능하다. 이 측정법은 교류손실등 필라멘트 각각의 전류 측정이 필요한 곳에 유용하게 사용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도 응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참고 문헌]

- [1] N. Amemiya, K. Yoda, S. Kasai, Z. Jiang, G.A. Levin, P.N. Barnes and C.E. Oberly, "AC loss characteristics of multifilamentary YBCO coated conductors," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 15, pp. 1637-1642, 2005
- [2] O. Tsukamoto, M. Cizek, N. Sekine and H. Suzuki, "AC magnetization loss reduction by striation in YBCO-123/Hastelloy coated conductors," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 15, pp. 2839-2842, 2005
- [3] P. N. Barnes, G.A. Levin, C. Varanasi and M.D. Sumption, "Low AC loss structures in YBCO coated conductors with filamentary current sharing," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 15, pp. 2827-2830, 2005
- [4] O. Tsukamoto, N. Sekine, M. Cizek and J. Ogawa, "A method to reduce magnetization losses in assembled conductors made of YBCO coated conductors," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 15, pp. 2823-2826, 2005
- [5] C.L.H. Thieme, D. Aized and O.A. Chevtchenko, "Novel 2G HTS Multifilamentary Conductor Design for AC Applications," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 17, pp. 3203-3026, 2007
- [6] S. Takacs, "Coupling Losses in Superconductors With Twisted Filaments, Stripes, or Striations," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 17, pp. 3151-3154, 2007