

적층형 도체를 이용한 2병렬 솔레노이드 코일의 교류손실 연구

황영진\*, 최석진\*, 장기성\*, 고태국\*  
연세대\*

A Study on AC Loss in the Two-parallel Solenoid Coil using Multi-stacked conductors

Young Jin Hwang\*, Sukjin Choi\*, Ki Sung Chang\*, Tae Kuk Ko\*  
Yonsei University\*

**Abstract** - 전력기기는 일반적으로 상용주파수인 60 Hz의 교류 전원 하에서 운용된다. 따라서 고온초전도체를 전력기기에 응용하는데 있어 교류전류나 교류자장에 의한 교류손실 발생 문제는 전력기기의 경제적인 운용과 관련하여 중요하게 부각되어 왔다. 또한 고온초전도체에서 발생하는 교류손실은 에너지의 열적 변환으로 인한 냉동부하 문제와도 관련되어 있기 때문에 전력기기의 안정적인 운용을 위해서도 반드시 연구되어야 할 부분이다. 특히 변압기와 같이 유도형 권선이 필요한 전력기기의 경우에는 무유도 권선 형태가 적용되는 다른 전력기기에 비해 교류손실의 크기가 매우 크기 때문에 이를 줄이기 위한 방안에 대한 연구가 다각도로 이루어지고 있다.

본 연구에서는 임계전류와 인덕턴스의 크기는 동일하지만 권선 형태를 다르게 할 수 있는 유도형 솔레노이드 코일을 제작하였다. 그리고 제작된 솔레노이드 코일의 병렬연결 구조를 달리하여 각각의 구조에 대한 교류손실의 차이를 측정하고 분석하였다. 그리하여 측정된 결과를 토대로 고온초전도 선재를 이용한 솔레노이드 코일에서 교류손실을 줄이기 위한 구조적 방안을 제시하고자 한다.

1. 서 론

고온 초전도체는 임계 조건 내에서 손실 없이 직류 전류를 전달할 수 있다. 하지만 특정한 주파수를 가진 교류 전류 수송 시에는 자기 자계에 의한 자기적 히스테리시스 현상 때문에 초전도체에는 손실이 발생하게 된다. 이러한 손실은 상용주파수를 이용한 전력기기에 초전도체를 응용하는데 있어 시스템의 안정적 운용과 관련된 중요한 요소이다. 이로 인해 현재 초전도 전력기에서 교류 손실을 줄이기 위한 연구가 다각도로 진행되고 있으며 그 중 대표적인 방법이 무유도 권선이다. 무유도 권선은 통전 시 인접 선재에서 발생하는 자장의 영향이 거의 없기 때문에 유도형 권선보다 교류손실이 매우 작다. 하지만 변압기 및 케이블 등의 경우 인덕턴스 성분이 있는 유도형 권선 형태가 적용되므로 유도형 권선형태에서의 교류손실에 대한 연구가 필수적이다. 동일한 크기의 임계전류나 인덕턴스를 갖는 모듈이라 할지라도 초전도 도체의 기하학적 배열 및 전류방향 등에 따라 교류 손실의 크기는 매우 달라진다.

본 논문에서는 유도형 솔레노이드 코일에서 병렬연결 형태를 다르게 하여 이에 따른 교류손실의 차이를 측정하고 특성을 파악하였다. 이를 통해 인덕턴스와 임계전류에는 변화를 주지 않으면서도 교류손실의 크기를 줄일 수 있는 솔레노이드 코일의 도체 배열구조를 제시하도록 하였다.

2. 본 론

2.1 실험장치 및 실험 방법

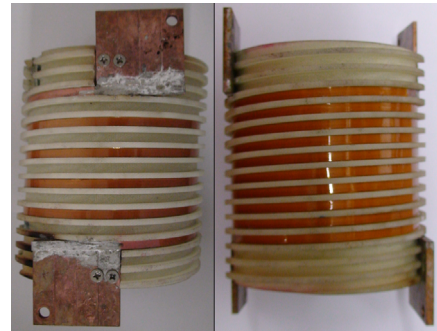
본 연구에 사용된 YBCO CC는 미국 SuperPower社의 SCS4050 선재이다. <표 1>은 SCS4050 선재의 주요사항을 나타낸다.

병렬연결 형태에 따른 교류 손실의 차이를 분석하기 위해 솔레노이드 코일은 <그림 1>과 같은 형태로 제작하였다. 본 모듈은 동일한 인덕턴스와 임계전류를 갖지만 두 가지 다른 형태의 병렬연결이 가능한 구조로 제작되었다. 첫 번째 형태는 한 쪽 구리 바 쌍만을 이용하여 선재의 직층만으로 병렬연결을 구성한 Face-to-Face 구조이고, 두 번째 형태는 양 쪽 구리 바 쌍을 모두 이용하여 Edge-to-Edge 구조에서 선재의 직층이 가능하도록 하였다. 또한 전류 도입부인 구리바는 적층에 따른 선재의 전류 분배 불균등 문제를 개선하기 위해 단단 형태로 제작하였다. 이를 통해 구리 바와 선재 간의 접촉성을 향상시켜 모듈 가장 안쪽에 권선되는 선재 뿐 아니라 선재 위로 적층되어 가는 다음 단의 권선 선재도 구리 바에서 직접 통전이 가능하도록 하였다.

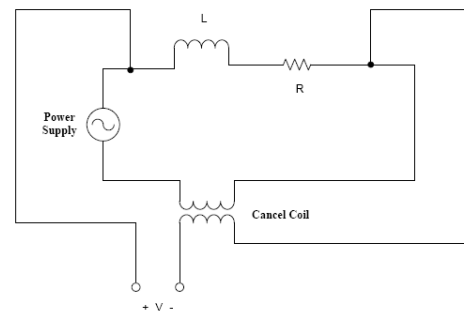
<그림 2>는 교류손실 및 통전 특성 평가에 이용된 시험장치의 개략도이다. 교류손실은 통전법을 이용하여 측정하였으며, 상용주파수인 60Hz 정현파를 입력전류로 설정하였다. 솔레노이드 코일은 손실성 자속

<표 1> 고온 초전도 선재의 사양

Specifications	Value
Width	4 mm
Thickness	0.095 mm
Copper Stabilizer Thickness	0.04 mm
Critical Tensile Stress	1200 MPa
Critical Bend Diameter	11 mm



<그림 1> 제작된 2가지 형태의 유도형 솔레노이드 코일



<그림 2> 교류손실 평가 장치 개략도

을 충분히 포획할 수 있도록 엠씨나일론 재질의 원통에 넣고 원통 표면을 따라 전압리드를 배열하였다.

본 연구에서 이용한 통전법은 솔레노이드 코일에 상용 주파수인 60 Hz의 교류전류를 인가하여 솔레노이드 코일에서 발생하는 전압과 위상차를 측정하여 유효전력을 계산하는 방법이다. 통전법으로 얻어진 전압으로 교류손실을 산출하는 방법은 다음과 같다.

$$i = I_M \sin 2\pi ft$$

$$v = V_M \sin (2\pi ft + \delta)$$

$$W = \frac{V_M I_M \cos \delta}{2}$$

여기서  $i$ 는 입력 전류,  $I_M$ 은 전류의 최대치,  $f$ 는 입력전류의 주파수

(본 연구에서는 상용주파수 60 Hz로 동일),  $v$ 는 전압피크로 측정된 전압,  $V_M$ 은 전압의 최대치,  $\delta$ 는 전류와 전압의 위상차,  $W$ 는 교류손실을 의미한다.

## 2.2 실험 결과

솔레노이드 코일의 교류손실을 측정하기에 앞서 코일 전체의 임계전류와 인덕턴스를 측정하였다. 측정 결과는 <표 2>에 나타내었다. 측정 결과를 살펴보면 제작된 솔레노이드 코일은 권선 구조에 따라 임계 전류는 최대 12%, 인덕턴스는 최대 3% 정도의 오차를 갖는 것으로 나타났다. 이러한 오차의 원인은 권선 구조의 차이보다는 다단 형태의 구리 바로 인해 Face-to-Face 구조가 Edge-to-Edge 구조보다 선재 소모량이 약 20mm 더 많다는 데 있다. 그리고 교류 손실 측정 결과를 살펴 볼 때, 측정된 임계전류와 인덕턴스의 오차의 수준은 권선 구조에 따른 솔레노이드 코일의 교류 손실의 차이를 분석하는 데는 문제가 없다.

<그림 3>와 <그림 4> 그리고 <그림 5>는 동일한 병렬 개수에서 병렬 구조에 따른 교류 손실 측정값을 나타낸다. 측정값을 살펴보면 통전

<표 2> 솔레노이드 코일의 사양

병렬구조	Face-to-Face 2적층	Edge-to-Edge 2병렬
임계전류	140A	160A
인덕턴스	$2.4\mu H$	$2.32\mu H$
병렬구조	Face-to-Face 4적층	Edge-to-Edge 2적층 2병렬
임계전류	220A	210A
인덕턴스	$2.4\mu H$	$2.36\mu H$
병렬구조	Face-to-Face 6적층	Edge-to-Edge 3적층 2병렬
임계전류	330A	330A
인덕턴스	$2.42\mu H$	$2.4\mu H$

전류의 크기가 작은 구간 즉,  $I_M/I_c$ 의 비율이 낮은 통전 전류 하에서는 병렬연결 형태를 달리하여도 교류손실의 차가 작지만 통전전류가 커짐에 따라 병렬연결 구조에 따른 교류 손실의 차는 매우 큰 것으로 나타났다. 이는 통전 전류의 크기가 작을수록 노이즈와 같은 외부 신호의 간섭으로 인해 위상각 제어가 정확히 이루어지지 못해 발생한 측정 오차로 판단된다.

2병렬 솔레노이드 코일의 구성 시 Face-to-Face 형태의 선재 적층만으로 병렬을 구성하였을 경우가 병렬 통전부를 따로 두어 Edge-to-Edge 형태로 병렬을 구성하였을 때보다 교류손실이 220%에서 최대 380% 정도 큰 것으로 나타났다. 또한 4병렬 솔레노이드 코일 구성 시에는 Face-to-Face 배열만으로 이루어진 병렬 구조에서의 교류손실이 Face-to-Face 배열과 Edge-to-Edge 배열을 혼합한 형태의 병렬 구조에서 보다 140%에서 최대 210% 정도 큰 것으로 나타났다. 마찬가지로 6병렬 솔레노이드 코일의 경우 Face-to-Face 배열만으로 이루어진 병렬 구조에서의 교류손실이 Face-to-Face 배열과 Edge-to-Edge 배열을 혼합한 형태의 병렬 구조에서 보다 170%에서 최대 360% 정도 큰 것으로 나타났다.

측정 결과를 살펴 볼 때 솔레노이드 코일에서의 병렬 구성은 추가적인 통전부를 따로 두어 Edge-to-Edge 배열을 이용하는 것이 Face-to-Face 배열만을 이용하는 것보다 교류손실측면에서 훨씬 더 유리하다. 이런 측정 결과는 교류 통전 손실이 주로 자기 자계의 수직 성분에 의해 발생하기 때문인 것으로 추측된다. Face-to-Face 배열에서는 선재의 통전으로 인한 자기 자계가 인접 선재에 수직 자계 성분으로 영향을 미쳐 손실이 더욱 커지지만 Edge-to-Edge 배열에서는 자기자계의 수직 성분이 상쇄되므로 자기자계에 의한 교류손실이 작게 나타난다.

## 3. 결 론

현재 고온 초전도 전력기기의 개발에 있어 대전류 통전을 위해 초전도 선재의 병렬 구성은 필수적이다. 특히 고온 초전도 변압기와 같이 유도형 권선이 병행되어야 하는 전력기기의 개발에 있어 초전도 선재의 병렬 구성과 이에 따른 교류손실에 대한 평가는 반드시 필요한 부분이다. 본 논문에서는 임계전류와 인덕턴스의 크기에는 큰 차이가 없으면서도 교류손실의 크기가 작은 솔레노이드 코일의 구조에 대해 기초적인 연구를 수행하였다. 결과적으로 솔레노이드 코일의 병렬 구성 시 선재 적층만을 이용한 Face-to-Face 형태보다는 Edge-to-Edge 형태나 Face-to-Face 형태와 Edge-to-Edge 형태를 병행한 구성이 교류 통전 전류에 의한 교류 손실 측면에서 더 유리하다.

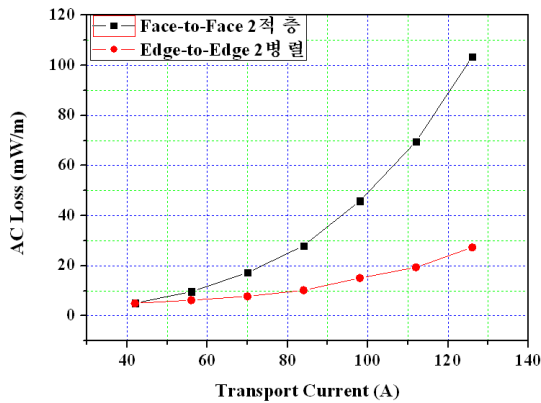
추후 연구에서는 Edge-to-Edge 형태의 배열을 추가한 구조의 솔레노이드 코일을 제작하여 본 연구에서의 결과를 검증할 예정이다.

### 감사의 글

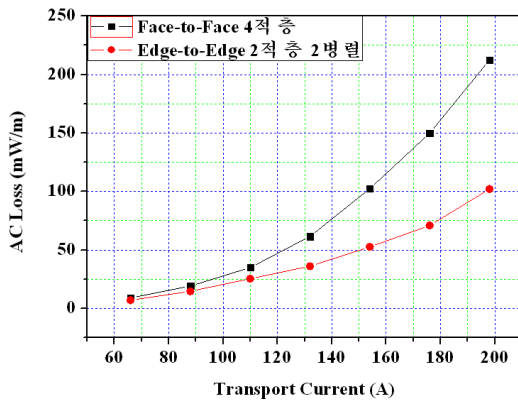
본 결과물은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업을 통한 연세대학교 대학전력연구센터의 연구결과입니다.

### [참 고 문 헌]

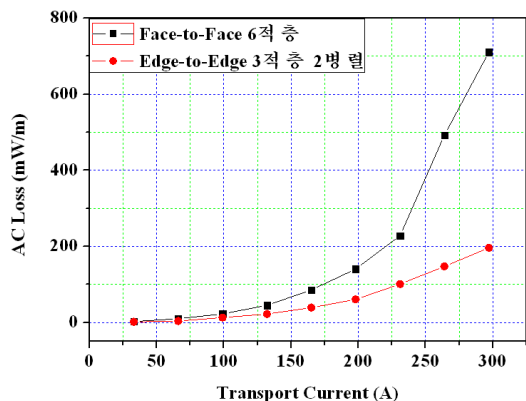
- [1] Marijin Pieter Oomen, "AC LOSS IN SUPERCONDUCTING TAPES AND CABLES", pp126-143, April 2000
- [2] 마용호 외, "도체의 배열 및 전류방향이 코일형 환류소자의 교류손실 특성에 미치는 영향", 한국초전도 저온공학회 논문지, 7권, 3호, 2005년 9월
- [3] K. Ryu, K. B. Park, G. Cha, "Effect of the neighboring tape's ac currents on transport current loss of a Bi-2223 tape", IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 11, no. 1, p.2220, 2001



<그림 3> 병렬 형태에 따른 2병렬 솔레노이드 코일의 교류손실



<그림 4> 병렬 형태에 따른 4병렬 솔레노이드 코일의 교류손실



<그림 5> 병렬 형태에 따른 6병렬 솔레노이드 코일의 교류손실