

고온초전도선재를 이용한 팬케이크 코일과 솔레노이드 코일의 전기적 특성 비교

박명진*, 이상수*, 차귀수*, 이지광**
*순천향대학교, **우석대학교

Comparison of Electrical Characteristics of Pancake Coil and Solenoid Coil using HTS Tape

Myungjin Park*, Sangsoo Lee*, Gueesoo Cha*, Jikwang Lee**
*Soonchunhyang Univ., **Woosuk Univ.

Abstract - 최근 높은 임계전류를 지닌 고온초전도선재를 이용한 초전도 전력기기의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 고온초전도선재의 임계전류는 자장에 대한 의존성을 지니고 있으며 이로 인해 고온초전도선재가 코일의 형태로써 초전도 전력기기의 개발에 이용되는 경우, 권선 방식에 따라 다른 전기적 특성을 지니게 된다. 이러한 특성은 초전도선재의 전력기기의 효율에 큰 영향을 미치므로 권선 방식에 따른 코일의 특성을 연구하는 것은 초전도선재를 이용한 전력기기의 효율을 높이는데 있어서 중요한 의미를 갖는다.

본 논문에서는 권선 방식에 따른 코일의 특성을 비교하기 위해 동일한 턴 수와 사용 선재길이를 가진 팬케이크 코일과 솔레노이드 코일을 설계, 제작하고 두 코일의 임계전류를 측정하였다. 또한 인가전류에 대한 두 코일의 전압, 저항특성과 교류손실 특성을 측정하고 비교하였다. 측정결과, 두 코일의 임계전류는 솔레노이드 코일이 109A로 팬케이크 코일에 비해 약 36% 더 높았다. 코일에 가해진 인가전류가 증가함에 따라 코일에서 발생하는 전압 중 손실에 관련된 저항성 성분의 전압이 변화하고 있음을 확인하였다. 또한 교류손실은 인가 전류의 피크값이 팬케이크 코일의 임계전류 이하인 구간에서 팬케이크 코일이 솔레노이드 코일의 교류손실보다 9배 크며, 팬케이크와 솔레노이드의 임계전류 사이에서는 8.3배 컷다.

1. 서 론

전력기기의 응용을 위해 고온초전도선재를 이용한 권선의 형태로서 팬케이크형과 솔레노이드형이 많이 이용되고 있다. 솔레노이드형 권선은 그 구조상 권선 시 선재가 축 방향으로 위치하기 때문에 팬케이크 코일을 권선 할 때 보다 보빈의 부피가 커지지만, 턴과 턴 사이에 대한 절연이 용이하고, 초전도선재가 냉매인 액체질소에 직접 노출되기 쉽기 때문에 냉각 효율도 팬케이크 코일에 비해 우수하다. 초전도선재를 코일의 형태로 제작하게 되면 초전도 코일의 임계전류는 코일을 이루고 있는 선재들이 발생시키는 자장에 영향을 받게 되며 이로 인해 코일형태에 따라 다른 전기적 특성을 나타내게 된다. 본 논문에서는 동일한 턴 수와 선재의 총 길이를 가진 솔레노이드형과 팬케이크형 코일을 제작하여, 두 코일의 임계전류의 크기, 전류 인가 시 두 코일에서 발생하는 전기적 특성과 코일의 형태에 따른 교류손실을 측정하여 비교해 보았다.

2. 본 론

2.1 팬케이크와 솔레노이드 코일의 설계 및 제작

두 가지 방식의 코일에 대한 전기적 특성을 비교하기 위해 직경이 동일한 팬케이크형과 솔레노이드형 코일의 보빈을 설계 제작하였다. 보빈이 액체질소에 들어가면, 냉각에 따른 보빈의 수축현상이 발생하는데, 이는 상온에서 권선한 선재가 액체질소 내에서 느슨해지는 현상을

표 1. 솔레노이드, 팬케이크 코일의 사양

초전도 선재	종류	BSCCO 2223
	임계전류(I _c)	120A
	폭	4.1mm
	두께	0.21mm
솔레노이드 코일	재질	G 10 FRP
	내반경	91mm
	외반경	101mm
	높이	145mm
	턴수	13 (단층)
	턴 사이의 간격	1mm
팬케이크 코일	턴 사이의 가이드높이	3mm
	재질	G 10 FRP
	내반경	91mm
	외반경	101mm
	높이	15mm
	턴수	13
	턴 사이의 간격	0.2mm

초래하게 된다. 이런 현상을 방지하기 위해 냉각시 내수축성이 우수한 G-10 FRP를 사용하여 보빈을 제작하였으며 자세한 사양은 표 1에 나타내었다.

2.2 측정 및 실험 방법

초전도 선재를 이용한 코일의 전기적 특성을 측정하기 위해서는 전원을 인가하였을 때의 전류와 전압 특성을 파악해야 한다. 코일의 임피던스는 크게 저항성분과 리액턴스 성분으로 볼 수 있는데 코일의 경우 리액턴스 성분의 크기가 저항성 성분보다 매우 크기 때문에 측정을 통하여 얻어지는 전압파형은 전류와 거의 90°의 위상을 가지게 된다. 측정된 전압 중에서 리액턴스 성분은 초전도 코일의 교류손실과 무관하므로 코일의 교류손실을 측정하기 위해서는 측정된 전압을 저항성 성분과 리액턴스 성분으로 분리해야만 한다. 전압성분을 분리하기 위해 일반적으로 사용되는 측정방법으로는 Lock-in-amp를 이용하는 것과 상쇄코일을 사용하는 방법이 있다. Lock-in-amp를 사용할 경우, 별도의 유도성 성분을 보상하지 않고 측정하여도 저항성 성분만을 측정 할 수 있으나, 리액턴스 성분에 의한 전압이 매우 크기 때문에 이를 해결하지 못하면 이 또한 측정에 어려움을 갖게 된다. 상쇄코일을 이용하는 방법은 측정회로에 유도성 성분을 감쇄시키는 보상회로를 둔다. 이 보상회로는 코일의 인덕턴스를 감쇄시킬 수 있도록 순수한 유도성 성분을 발생 시켜야 하며, 보상회로의 주위 환경에 유도성 물질이 있어 측정에 장애가 되지 않도록 주의를 기울여야 한다. 또한 코일의 전압 탭으로부터 얻어진 전압신호는 그 크기가 굉장히 작아, 노이즈에 민감한 특성을 지니고 있다.

전압신호의 측정을 위해 증폭시 입력과 출력의 위상차가 없는 절연증폭기를 이용하여 측정된 전압을 증폭하였다. 그림 1은 팬케이크 코일과 솔레노이드 코일의 전기적 특성을 측정하기 위한 회로도를 나타내고 있다.

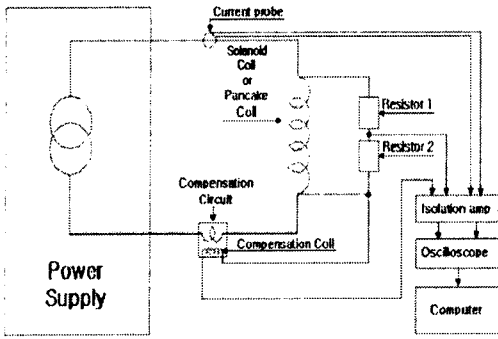


그림 1. 코일의 전기적 특성 측정을 위한 회로도

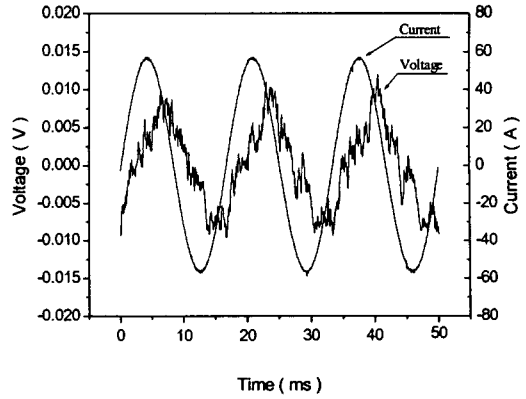


그림 2. 솔레노이드 코일의 전압, 전류 파형

2.3 실험결과 및 고찰

초전도선재를 이용한 솔레노이드 코일과 팬케이크 코일의 전기적 특성에서 가장 기본적인 것은 코일의 임계전류이다. 초전도선재의 임계전류는 자장의 크기 및 방향에 대한 의존성이 있으므로 코일의 권선방식에 따라 코일의 자장분포가 다르게 되어 임계전류의 크기도 큰 차이를 나타 낼 수 있다. 초전도선재를 이용한 권선의 임계전류 측정방법은 시편의 임계전류 측정과 동일하다. 권선에 직류 전원 공급기를 이용하여 전류를 인가하고 $1 \mu V/cm$ 의 기준을 적용하여 임계전류를 측정하였다. 제작된 솔레노이드 코일과 팬케이크 코일의 임계전류는 각각 109A, 80A로 솔레노이드 코일의 임계전류가 팬케이크 코일의 임계전류보다 높았다.

팬케이크 코일과 솔레노이드 코일의 저항은 두 코일에서 측정된 전압 중 전류와 동상인 성분의 전압을 이용하여 입력전류에 대한 전압의 비로 나타내었다.

2.3.1 솔레노이드 코일의 전압, 전류 관계 특성

그림 2는 솔레노이드 권선의 임계전류인 109A의 0.52 I_c 에 해당하는 피크 값을 가진 40A의 교류전류를 솔레노이드 코일에 흘려주었을 때의 전압, 전류 파형을 3주기 동안 나타낸 그림이다.

그림 2의 전압 파형에서 고조파 성분의 크기를 알아보기 위해 Fast-Fourier-Transform (FFT)을 이용하여 고조파 분석을 하여 고조파 스펙트럼을 분석해 본 결과, 측정된 전압 파형은 대부분이 홀수 고조파 성분에 의해 지배적으로 나타나고 있음을 확인 할 수 있었다.

그림 3과 그림 4는 각각 솔레노이드 코일에 60, 80, 103, 119A_{rms}를 흘려주었을 때의 측정된 전압 중 전류와 동상인 저항성 성분의 전압과 저항의 파형과 크기를 나타내고 있다. 저항성 성분의 전압은 인가 전류가 증가함에 따라 변화하고 있음을 확인 할 수 있다.

그림 4의 (c), (d)는 인가전류의 피크치가 솔레노이드 코일의 임계전류 보다 54% 이상 큰 119A_{rms}인 경우의 전압과 저항의 파형을 나타낸 것이다. 전압의 파형이 점점 인가전류와 비슷한 cosine 파형에 접근해 가고 있음을 알 수 있으며 저항 파형의 진폭의 크기도 줄어들고 있음을 알 수 있다.

2.3.2 팬케이크 코일의 전압, 전류 관계 특성

그림 5와 그림 6는 각각 팬케이크 코일에 41, 57, 82, 102A_{rms}를 흘려주었을 때의 측정된 전압, 전류 파형과 전압의 고조파 스펙트럼, 전압의 저항성 성분, 전압의 유도성 성분의 파형과 크기를 나타내고 있다. 팬케이크 코일에 41A_{rms}의 전류를 인가하였을 때 전압의 저항성 성

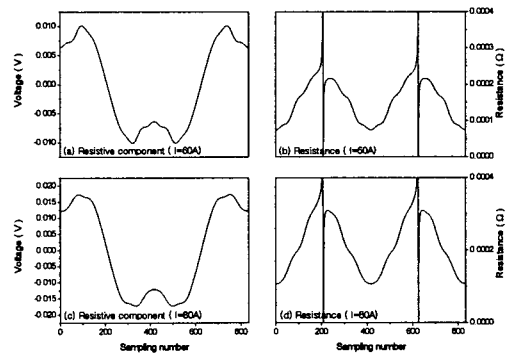


그림 3. 솔레노이드 코일의 전압과 저항 (a) 저항성성분 전압 (b) 저항 (at $I=60A_{rms}$) (c) 저항성성분 전압 (d) 저항 (at $I=80A_{rms}$)

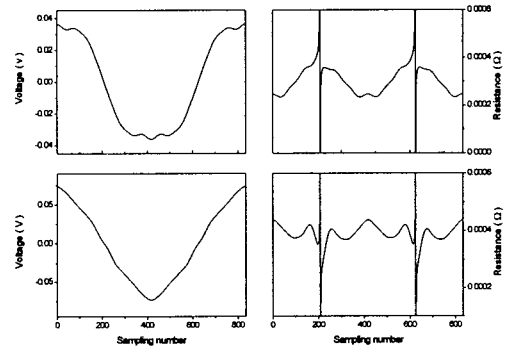


그림 4. 솔레노이드 코일의 전압과 저항 (a) 저항성성분 전압 (b) 저항 (at $I=103A_{rms}$) (c) 저항성성분 전압 (d) 저항 (at $I=119A_{rms}$)

분의 실효값은 21.5mV이고, 솔레노이드 코일에 40A_{rms}의 전류를 인가했을 때는 2.9mV이다. 1A 정도의 차이를 크게 고려하지 않는다면 저항성 성분 전압은 약 7.4배의 차이를 보이며, 이는 두 코일의 교류손실의 차이가 7.4배정도 차이를 가짐을 의미한다.

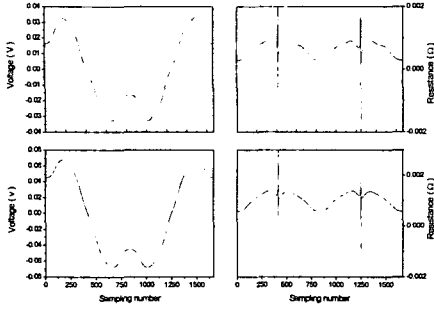


그림 5. 팬케이크 코일의 전압과 저항
(a) 저항성성분 전압 (b) 저항 ($I=41A_{rms}$)
(c) 저항성성분 전압 (d) 저항 ($I=57A_{rms}$)

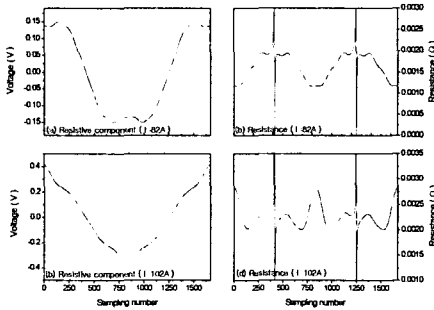


그림 6. 팬케이크 코일의 전압과 저항
(a) 저항성성분 전압 (b) 저항 ($I=82A_{rms}$)
(c) 저항성성분 전압 (d) 저항 ($I=102A_{rms}$)

2.4 교류손실

그림 7은 측정된 솔레노이드와 팬케이크 코일의 교류손실을 나타내고 있다. 그림에서 I_p 는 팬케이크 코일과 솔레노이드 코일의 임계전류와 동일한 교류전류의 피크치를 나타낸다. 검정색으로 표시된 사각형 심벌은 측정 데이터를 이용해 전기적 방법으로 계산한 손실측정 결과이고, 흰색 심벌은 측정된 전압으로부터 전류와 동상인 성분의 전압을 찾아내고, 전압과 전류의 관계로부터 계산된 저항을 $P=I^2R$ 에 적용시켜 계산한 팬케이크와 솔레노이드 코일의 손실측정 결과이다. 두 결과를 비교하여 알 수 있듯이 그림 3~그림 6에서 나타난 저항성 성분의 전압이 그대로 손실에 관여하고 있음을 알 수 있다.

또한 그림 7의 결과로부터 권선 방식에 따라 교류손실을 저감시킬 수 있음을 나타내고 있다. 본 논문에서 측정된 두 코일의 교류손실의 차이는 팬케이크 코일의 임계전류 이하인 구간 a에서는 약 9배 정도이고, 팬케이크 코일의 임계전류 이상과 솔레노이드 코일의 임계전류 이하인 범위인 구간 b에서는 약 8.3배의 차이를 보였다.

그림 8은 측정된 전압 중 전류와 동상 성분인 저항성 전압 성분을 이용하여 솔레노이드와 팬케이크 코일에 인가된 전류의 크기에 대한 전압의 비로써 저항의 크기를 나타내고 있다. 팬케이크 코일의 경우 전류의 피크치가 임계전류와 같은 $57A_{rms}$ 이상에서는 저항성장의 기울기가 급격해지고 있음을 알 수 있다. 또한 솔레노이드 코일의 경우에는 팬케이크의 저항성장의 크기가 작아 마치 $95A_{rms}$ 까지 커다란 변화가 없는 것 같아 보이지만 그림 8 내에 별도로 그려진 그림을 살펴보면 팬케이크 코일의 저항변화의 형태와 유사함을 확인할 수 있고 임계전류 이상이 되면 더 급격히 증가하고 있음을 나타내고 있다.

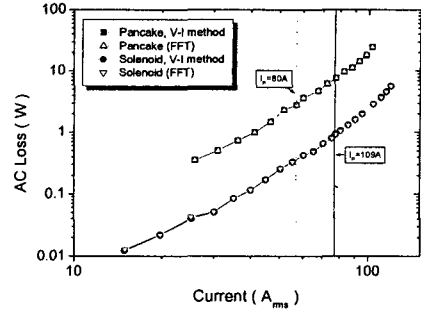


그림 7. 솔레노이드와 팬케이크 코일의 측정 교류손실

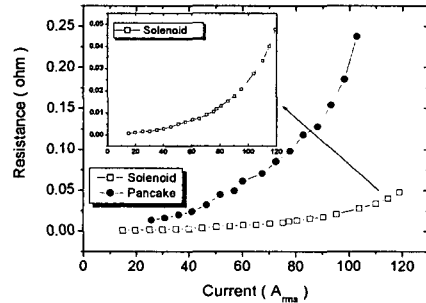


그림 8. 인가전류의 크기에 따른 솔레노이드와 팬케이크 코일에서의 저항 변화

3. 결 론

본 논문에서는 직경과 턴 수가 동일한 솔레노이드 코일과 팬케이크 코일을 설계, 제작하였다. 두 코일의 임계전류 및 교류손실을 측정하기 위해 전기적 방법을 이용하여 측정 하였다. 실험결과, 두 코일의 임계전류는 솔레노이드 코일이 팬케이크 코일의 임계전류보다 약 36% 더 높았으며, 교류전류를 인가하여 코일로부터 측정된 전압을 FFT 분석을 통하여 코일의 저항성 성분에 의한 전압과 그 파형의 변화를 확인 할 수 있었다. 또한 인가전류와 전압의 저항성 성분으로부터 두 코일의 저항변화를 확인하였다. 코일의 교류손실은 인가전류가 $57A_{rms}$ 이하인 구간에서 팬케이크 코일의 교류손실이 솔레노이드의 교류손실보다 9배 큼을 확인하였다. 이는 초전도선재를 이용한 코일의 설계에 있어서 권선의 방법에 따라 코일에서 발생하는 교류손실을 크게 감소시킬 수 있음을 나타낸다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R05-2003 000 11692 0) 지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] J. J. Rabbers, B. ten Haken and H. H. J. ten Kate, "Transport current loss of BSCCO/Ag tape in different orientations of the external alternating magnetic field," IEEE Transactions on Applied superconductivity, vol. 9, No. 2 pp. 801-804, 1999.
- [2] M. Polak, P. Usak, J. Pitel, L. Jansak, Z. Timoransky, F. Zizek, H. Piel, "Comparison of Solenoidal and Pancake Model Windings for Superconducting Transformer," IEEE Transactions on Applied superconductivity, vol. 11, No. 1, pp. 148-1481, 2001.