

Coated Conductor를 사용한 무유도 팬케이크형 한류 코일의 통전 손실 특성

Transport Loss Characteristic of the Bifilar Pancake Type Fault Current Limiting Coil using Coated Conductor

박동근^{1*}, 방주석¹, 양성은¹, 안민철², 심기덕³, 윤용수⁴, 남관우⁵, 석복렬⁵, 고태국⁶

Dong Keun Park^{1*}, Joo Seok Bang¹, Seong Eun Yang¹, Min Cheol Ahn², Kideok Sim³, Yong Soo Yoon⁴, Kwan woo Nam⁵, Bok-Yeol Seok⁵, and Tae Kuk Ko⁶

Abstract: Superconducting fault current limiter (SFCL) is attractive apparatus to reduce fault current in power grid. Since it is applied to the alternating current (AC) power line, the SFCL has losses in the normal operation. Recently, coated conductor (CC) is noticeable material employed for resistive bifilar winding type SFCL in many research groups. Bifilar structure is expected to have low AC loss by magnetic field offset as compared with the single tape structure in the same length. This paper reports about characteristic of bifilar pancake type coil for SFCL application in AC loss aspect. The bifilar coil is wound using CC with facing on HTS sides each other. Transport AC loss measurement and characteristic analysis of the bifilar coil using CC have been performed at 77 K. The test results are compared with the Norris equations and the test results of non-inductively wound paralleled solenoid type coil which is suggested and tested in this group at present.

Key Words: ac loss, bifilar, coated conductor, pancake, superconducting fault current limiter.

1. 서 론

전력수요가 증가하면서 계통에서의 단락 용량이 증가하였다. 증가하는 단락 용량에 대응하기 위해 차단기 교체 및 추가, 모선 분리 등의 다양한 방안이 제시되었지만, 초전도 한류기가 최선의 방안으로 대두되었다. 한류기는 정상 시에 초전도 상태가 유지되어 저항이 사라져 낮은 임피던스를 가지고, 사고 시에는 임계전류 이상의 사고전류로 인하여 퀘치가 발생하여 순간적으로 임피던스를 투입하는 전류 제한 메커니즘을 가진 신개념 전력기기이다. 초전도체는 임계 조건하에서 저항이 영이지만, 교류 자기장에 의한 히스테리시스

영향으로 인하여 교류 전류 통전 시에는 손실이 발생하게 되고, 이를 교류 손실이라고 한다. 현재 모든 송·배전 계통은 교류 계통이므로 투입된 초전도 한류기의 교류 손실 연구는 매우 중요하며, 세계적으로 다양한 연구가 이루어지고 있다[1].

CC 선재를 이용한 한류기의 경우, 정상 상태에서의 임피던스를 최소화하기 위해 무유도 권선이 반드시 필요하다. 무유도 권선법은 대표적으로 팬케이크형 권선과 솔레노이드형 권선으로 구분할 수 있다[2]. 초전도 선재의 무유도 권선은 전류 통전 시 발생하는 자기장을 상쇄시키는 구조이므로 교류 손실을 구조적으로 줄일 수 있는 유일한 방법이다. 본 논문에서는 그 중 가장 작은 교류 손실을 가질 수 있을 것으로 예상되는 무유도 팬케이크형 한류 코일의 교류 손실을 측정하고, Norris식과 무유도 병렬 솔레노이드형 한류 코일의 교류 손실과 비교 해석하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 무유도 팬케이크형 코일의 교류 손실

CC는 기존의 PIT 공법으로 개발되는 선재인 BSCCO 선재의 한계를 극복할 수 있는 제 2세대 고온 초전도 선재이다. 본 연구의 모든 실험에서 미국의 초전도 선재 제조회사인 AMSC에서 개발한 CC 중 stainless steel 316L을 안정화재로 가지는 344S가 사용되었다. 사용된 CC를 이루는 구성 물질과 각각의 두께는 Table 1에 명시하였다. 344S CC는 자성체인 Ni-5%W substrate를 사용하였으므로 단일 선재로는 기존의 BSCCO 선재에 비하여 높은 교류 손실을 가지게 된다[3].

초전도 선재의 교류 손실은 외부 자기장 변화에 따른 손실과 통전 교류 전류에 의한 손실로 이루어져 있다. 무유도 팬케이크형 코일은 인접한 반대 방향의 전류가 서로 발생하는 자기장을 상쇄시켜 외부 자기장을

Table 1. Structure of AMSC 344S CC.

CC 구조	물질	두께
Stabilizer	Stainless steel 316L	50 μ m
Shunt	Silver	1 μ m
HTS	YBCO	1 μ m
Buffer	CeO ₂ , YSZ, Y ₂ O ₃	225 nm
Substrate	Ni-5%W	75 μ m

¹학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학부

²정 회 원 : 기초전력연구원

³정 회 원 : 한국전기연구원 초전도기기연구그룹

⁴정 회 원 : 안산공과대학 전기공학과

⁵정 회 원 : 현대중공업 기계전기연구소

⁶정 회 원 : 연세대 전기전자공학과

*교신저자 : dogma@yonsei.ac.kr

원고접수 : 2007년 1월 4일

심사완료 : 2007년 2월 26일

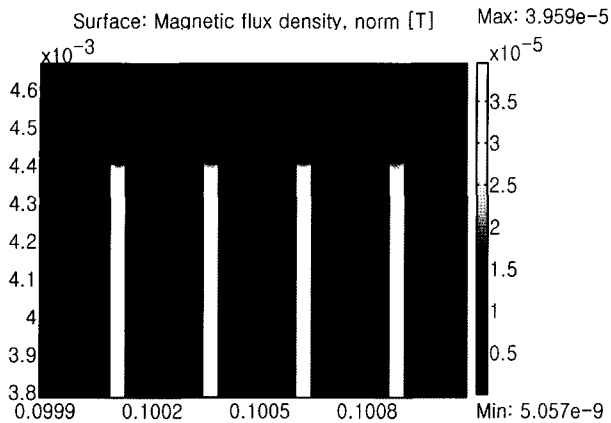


Fig. 1. Magnetic field of cross section of bifilar pancake coil by FEM.

줄이는 구조를 가진다. 무유도 팬케이크형 코일의 자기장 특성을 해석하기 위하여 유한요소법 (finite element method: FEM)을 사용하였다. Fig. 1은 유한요소법을 이용한 무유도 팬케이크형 코일 단면의 자기장 해석 결과를 와이어 프레임으로 나타낸 것이다. CC의 YBCO층이 서로 마주보는 사이 공간에서 최대 자기장인 3.959×10^{-5} T를 가지고 그 외 모든 부분에서 10^{-6} T 이하로 외부 자기장이 거의 없음을 확인하였고, 외부 자기장 변화로 인한 교류 손실은 고려할 필요가 없음을 확인하였다.

2.2. 통전 손실 해석을 위한 Norris식

외부 자기장이 없는 경우, 교류 전류 통전에 의한 단일 초전도 선재의 교류 손실은 Norris가 제안한 strip 모델을 사용하여 실험값과 비교하고 해석할 수 있다[4]. 또한 무유도 팬케이크형 코일은 권선 방법에 의해 반대 방향의 전류가 흐르는 YBCO층이 서로 근접한 CC 모델로 생각할 수 있다. Fig. 2는 무유도 팬케이크형 코일의 단면 구조이다. 외부 자기장 조건 및 구조적 한계로 인한 차이가 있지만, 그림의 점선 부분을 Norris가 제안한 antiparallel 모델로 근사하여 해석할 수 있다. Norris antiparallel 모델은 식 (1)과 같다 [5].

$$L_c = \frac{2\mu_0 s^2 j^2}{\pi^3} \int_0^{v_0} v(1 - v \cot v) dv \quad (1)$$

여기서 L_c 는 한 주기, 단위길이 당 발생하는 손실 에너지이며, s 는 역방향으로 적층된 선재 사이의 간격, j 는 선재의 폭 당 임계전류, 즉 임계전류 밀도, $v_0 = \pi F$ 를 의미한다. 또한 $F = \frac{i}{i_c}$ 로 정의된다.

식 (1)에서 서로 반대 방향으로 흐르는 YBCO층 사이의 간격이 좁아질수록 통전 손실은 제품에 비례하여 줄어드는 것을 알 수가 있다. 따라서 무유도 팬케이크형 코일을 권선할 때, 권선 장력의 정도에 따라 손실의 차이가 클 것으로 예상되며, 선재의 임계전류 감소가 없는 범위 내에서 큰 장력으로 권선을 하는 것이 교류 손실 측면에서 매우 유리함을 예상할 수 있다.

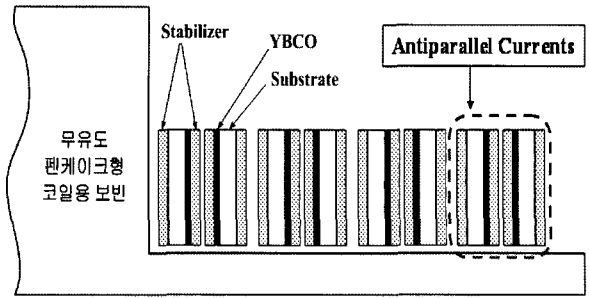


Fig. 2. Schematic of cross section structure of bifilar pancake coil.

3. 실험 및 결과 분석

3.1. 실험 방법

무유도 팬케이크형 코일의 통전 손실을 측정하기 위하여 전기적인 방법인 통전법으로 측정을 하였다. 또한 특성 비교를 위하여 무유도 병렬 솔레노이드형 코일을 제작하고 동일한 조건으로 실험하였다. 실험에 사용된 무유도 팬케이크형 코일과 병렬 솔레노이드형 코일의 상세한 사양은 Table 2에 표기하였다. Fig. 3(a)은 무유도 팬케이크형 코일이다. 보빈 위의 태극 모양 곡선을 지난 후 두 선이 동시에 감겨 무유도 권선 구조를 이룬다. Fig. 3(b)은 안층과 바깥층의 이층 구조를 가지는 무유도 이병렬 솔레노이드형 코일이다. 안층과 바깥층이 반대 방향으로 권선되는 무유도 권선 구조이다. Table 2의 인덕턴스를 보면 외부 누설 자속은 팬케이크형 코일이 크지만, 통전 손실 저감을 위한 antiparallel 구조는 팬케이크형 코일이 더욱 일치하므로 낮은 교류 손실을 예상할 수 있다.

무유도 팬케이크형 코일에 교류 전류를 흘리고 전압을 측정하여 유효전력을 계산하여 코일의 통전 손실을 측정할 수 있다. Fig. 4는 통전 손실을 측정하기 위한 측정 시스템의 구성도를 나타낸 것이다. 코일에 흐르는 교류 전류와 일치하는 동상의 전압 신호를 찾아 유효 전력을 계산하기 위하여 cancel 코일을 사용하여 90°의 위상차의 신호는 상쇄시켰다. 이 때 초전도 선재에서 발생하는 전압 신호는 전류 신호에 비해 매우 미약하여 노이즈 및 고조파의 영향을 많이 받으므로 fast fourier transform (FFT)를 사용한 대역 통과 필터를 사용하였다. 또한 기본적으로 공기 중에 존재하는 노이즈의 영향을 최소화하기 위해 100 Hz에서 실험을 수행하였다. 모든 실험은 액체질소 냉각 조건에서 수행하였다.

Table 2. Specification of bifilar coils used in test.

	팬케이크형	2병렬 솔레노이드형
임계전류	45 A	130 A (각 선재의 $I_c = 65$ A)
길이	6 m	1.8 m
상온저항	2.01 Ω	0.31 Ω
인덕턴스	1.5 μ H	0.3 μ H
권선 직경	200 mm	100 mm

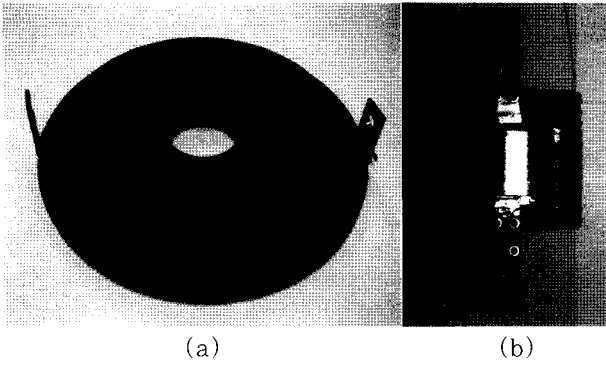


Fig. 3. FCL coils using CC (a) bifilar pancake coil (b) non-inductively wound paralleled solenoid coil.

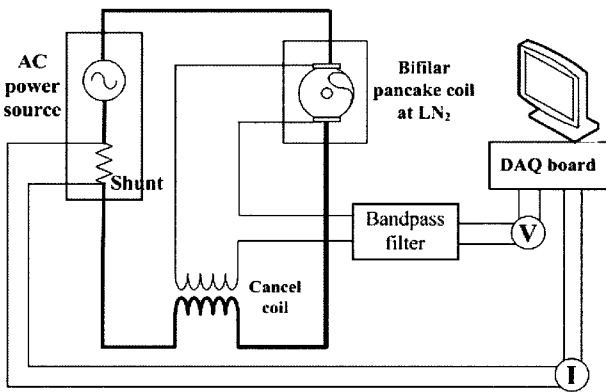


Fig. 4. Schematic of transport ac loss measurement.

3.2. 실험 결과

무유도 팬케이크형 코일에 흐르는 전류의 최대값을 변화시키며 통전 손실을 측정하였다. Fig. 5는 통전 전류의 최대값을 임계 전류값으로 나눈 비에 따른 통전 손실을 측정 한 결과이다. 그래프에서 보는 바와 같이 무유도 팬케이크형 코일의 통전 손실은 Norris strip 모델과 비교하여 매우 작은 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다. Norris strip 모델은 단일 선재가 펼쳐져 있다는 가정을 바탕으로 도출된 식이므로, 무유도 권선을 통해 교류 손실을 줄일 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서의 무유도 팬케이크형 코일의 근사 모델인 Norris antiparallel 모델과 비교한 경우, 전반적으로 교류손실 값이 더 큰 것을 볼 수 있다. 이는 Norris antiparallel 해석 모델과 실제 팬케이크 사이의 구조적 차이 때문이다. Fig. 2에서 확인할 수 있듯이, 실제 코일은 antiparallel 구조가 적층된 형태로 서로에게 영향을 줄 수 있기 때문이다. 동일한 비교를 위하여 Norris 모델은 45 A의 임계전류를 가지는 가정으로 해석하였다. 통전 전류비가 0.3 이하인 경우는 매우 작은 손실 값을 가지므로 정확한 측정이 어렵고 측정값의 신뢰도가 낮다. 전류비가 0.95일 때 무유도 팬케이크형 코일의 통전 손실이 전류비가 0.5일 때의 Norris strip 모델, 즉 단일 선재 모델의 손실 값보다 작음을 확인할 수 있었다. 이는 일반적으로 긴 선재를 필요로 하는 대용량 한류기용 코일을 제작할 경우, 팬케이크형 무유도 권선으로 교류 손실을 획기적으로 줄일 수 있음을 의미한다.

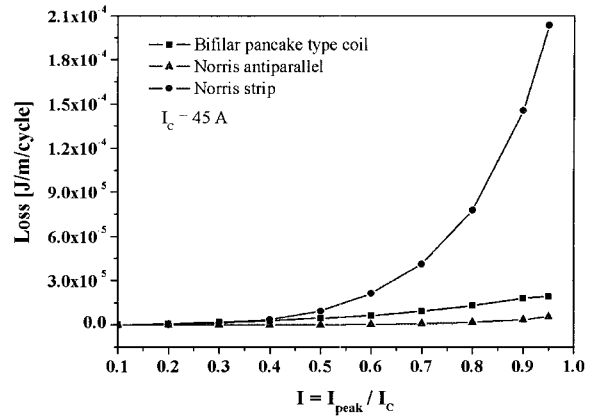


Fig. 5. Transport current loss measured of bifilar pancake coil with the variations of the peak current.

Fig. 6은 무유도 팬케이크형 코일을 다른 무유도 권선법의 병렬 솔레노이드형 코일과 비교하여 통전 전류비에 따른 통전 손실을 나타낸 그래프이다. 결과적으로 병렬 솔레노이드형 코일은 Norris strip 모델보다 낮은 통전 손실을 가졌지만, 무유도 팬케이크형 코일과 비교하면 여전히 큰 손실 특성을 가짐을 알 수 있었다. 같은 무유도 권선이지만, 무유도성을 나타내기 위한 팬케이크형과 병렬 솔레노이드형의 구조적인 차이가 통전 손실의 차이로 이어졌다. 병렬 솔레노이드형의 경우, 안쪽 층과 바깥 층간의 거리를 최소화하며 권선 방향을 반대로 하여 안쪽과 바깥층에서 각각 발생하는 외부 자기장을 서로 상쇄하는 구조이다. 이는 전체 외부 자기장은 상쇄시킬 수 있는 구조이지만, 각각의 선재에 미치는 영향은 팬케이크형 코일과 비교하여 상대적으로 적다. 반면, 무 유도 팬케이크형 코일은 외부 자기장을 상쇄하기 위한 구조가 선재간의 antiparallel한 구조에 의한 것이므로 통전 손실을 상대적으로 많이 줄일 수 있다. 실험에 사용된 두 무유도 코일은 각각 임계전류가 45 A, 50 A로 약간의 차이가 있기 때문에, 한 주기에서의 단위길이 당 손실 값에 임계전류의 제곱한 값을 나누어 주어 동일한 조건에서의 비교를 수행하였다.

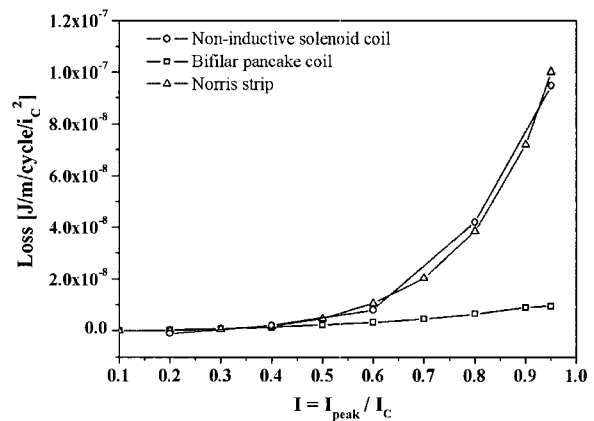


Fig. 6. Comparison of transport ac loss of the bifilar pancake coil with that of the solenoid coil.

4. 결 론

본 연구에서는 다양한 한류기의 특성 중, 교류 손실에 집중하여 무유도 코일의 특성을 연구하였다. 무유도 팬케이크형 코일의 통전 손실 값은 동일한 길이의 펼쳐 놓은 선재보다 훨씬 작았고, 무유도 병렬 솔레노이드형 코일과 비교하여도 우수한 통전 손실 특성을 가지고 있음을 확인하였다.

동일한 선재를 사용하고, 동일한 직·병렬 개수를 가지는 무유도 팬케이크형 한류기와 무유도 병렬 솔레노이드형 한류기를 개발한다면, 임계전류의 70% 이상의 최대값을 가지는 통전 전류로 운전 시, Fig. 6의 비교 결과에 따라 무유도 팬케이크 코일의 통전 손실은 무유도 솔레노이드 코일과 비교하여 약 7배 이상 줄어들 것으로 예상된다. 교류 손실 측면에서 매우 우수한 특성을 가지지만 실제 한류기 응용을 위해서는 무유도 팬케이크형 코일이 가지는 고전압 절연 문제 등의 문제점 해결에 관한 연구가 더 필요하다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Daisuke Miyagi and Osami Tsukamoto, "Characteristics of AC Transport Current Losses in YBCO Coated Conductors and Their Dependence on Distributions of Critical Current Density in the Conductors," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.12, No.1, pp. 1628-1631, 2002.
- [2] Dong Keun Park, Min Cheol Ahn, Seong Eun Yang, Il Gu Yoon, Young Jae Kim, Tae Kuk Ko, "Short-circuit Analysis of Solenoid and Pancake Type Bifilar Winding Magnets using BSCCO tape," Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, Vol.7, No.4, pp. 28-31, 2005.
- [3] "Substrate and Stabilization Effects on the Transport AC Losses in YBCO Coated Conductors," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.15, No.2, pp. 1583-1586, 2005.
- [4] Luigia Gianni, Massimiliano Bindi, Franco Fontana, Stefano Ginocchio, Luciano Martini, Elena Perini, and Sergio Zannella, "Transport AC Losses in YBCO Coated Conductors," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.16, No.2, pp. 147-149, 2006.
- [5] W. T. Norris, "Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying ac: isolated conductors and edges of thin sheets," J. Phys. D 3, pp. 489-507, 1970.

저 자 소 개



박동근(朴東瑾)

1980년 11월 4일생, 2003년 연세대 공대 기계전자공학부 졸업, 2005년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



방주석(方遯錫)

1980년 10월 09일생, 2006년 연세대학교 공대 전기전자공학과 졸업, 현재 동 대학원 전기전자공학과 석사과정.



양성은(梁盛銀)

1978년 12월 3일생, 2003년 연세대 공대 기계전자공학부 졸업, 2005년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



안민철(安敏哲)

1976년 9월 20일생, 1999년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기·컴퓨터공학과 졸업(공학석사), 2006년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사). 현재 기초전력연구원 연구원.



심기덕(沈基德)

1973년 2월 1일생, 1997년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구원 초전도 응용연구그룹 선임연구원.



윤용수(尹庸銖)

1961년 8월 27일생, 1983년 성균관대 공대 전기공학과 졸업, 1995년 연세대 공학석사, 2001년 동 대학원 공학박사, 현재 안산공과대학 전기과 부교수.



남관우(南寬祐)

1996년 고려대학교 기계공학과 졸업, 2004년 한국과학기술원 기계공학과 대학원 졸업(공학박사), 현재 현대중공업 기계전기연구소 선임연구원.



석복렬(石福烈)

1971년 2월 16일생. 1994년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1994년 10월~1995년 8월 국제단기교환유학생(일본 큐슈대학). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학 석사). 2000년 3월 일본 큐슈대학 시스템 정보과학연구과 졸업(공학박사). 2000년 4월~2001년 3월 일본 통상산업성 공업 기술원 특별연구원(AIST fellow). 현재 현대중공업(주) 기계전기연구소 책임연구원.



고태국(高太國)

1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업(M.SC), 1986년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업(Ph. D), 1986~1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수, 현재 한국초전도·저온공학회 부회장.