

무유도 초전도 한류 코일의 층간 간격에 따른 전자기적 특성 연구

양성은*, 박동근*, 김영재*, 장기성*, 안민철**, 고태국*
연세대학교*, 군산대학교**

Electromagnetic characteristics of non-inductively wound coil according to gap length between layers

Seong Eun Yang*, Dong Keun Park*, Ki Sung Chang*, Young Jae Kim*, Min Cheol Ahn**, Tae Kuk Ko*
Yonsei University*, Kunsan National University**

Abstract - Superconducting fault current limiters (SFCLs) provide one of the most effective solutions to cope with enormous increase of fault current level. The 13.2 kV/ 630 A class resistive SFCL using coated conductor (CC) was developed and its short-circuit test was successful. Successful commercialization of the SFCL requires that no loss is produced by impedance of limiting coil during normal operation. Since the limiting coil consists of inner layer and outer layer, gap length between the layers is an important parameter to analyze the electromagnetic characteristics of coil. This paper deals with the electromagnetic characteristics of coil according to gap length through the simulation and analysis in comparison with experiment results.

<표 1> 344S 선재와 보빈의 사양

| | | | |
|----------|------------------|---|-------------|
| HTS Wire | HTS material | YBa ₂ Cu ₃ O _y (Tc of 95K) | |
| | Stabilizer | Stainless steel 316L | |
| | Width | 4.3mm | |
| | Thickness | 0.15mm | |
| | Critical Current | 70 A (@77K, self-field) | |
| Bobbin | | Inner Layer | Outer Layer |
| | Resistance(300K) | 1.54Ω | 1.54Ω |
| | Inductance | 9.8μH | 10.1μH |

1. 서 론

초전도 전력기기의 개발은 초전도 선재의 개발 속도와 밀접한 관계를 갖고 있다. 현재 초전도 선재의 개발은 제 1세대 초전도 선재인 BSCCO 선재에 이어 제 2세대 선재인 CC도 상용화를 눈앞에 두고 있다. Superpower 사에서는 이미 릴의 길이가 600m인 선재를 이미 개발하여 판매중이다[1]. 이러한 CC의 개발 속도에 맞춰 초전도 전력기기도 활발히 개발 중이며 몇몇 기기들은 실증 테스트 중이다. 실증 테스트 중 인 전력기기 중에는 케이블, 한류기 등이 있으며 특히 한류기는 전력계통에서 지속적인 부하 증가에 따른 고장전류를 제한하는 효과로 인해 필요성이 더욱 부각되고 있는 실정이다.

초전도 한류기의 종류에는 유도형, 저항형 등의 다양한 한류기가 존재한다. 그 중 저항형 한류기는 초전도 선재의 고유특성인 퀘치 현상을 이용하여 고장 전류를 제한하는 타입으로 정상 시에는 초전도 상태이기 때문에 저항이 0이었다가 고장 시에는 임계전류를 초과하는 고장 전류에 의해 퀘치가 발생하며 고장 전류를 제한한다. 저항형 한류기의 경우 고장 시 효과적인 전류 제한과 전류 제한 동작 후 발생할지 모르는 선재의 손상을 막기 위해서는 장선의 초전도 선재가 필요하기 때문에 코일 형태로 초전도 선재를 권선하여야 한다. 하지만 이렇게 초전도 선재를 코일 형태로 권선하여 제작할 경우 정상 시 코일의 임피던스에 의한 전압강하를 고려해야만 한다. 그래서 저항형 한류기에서는 한류 코일을 제작할 때는 무유도로 권선한다. 연세대학교와 현대 중공업에서는 무유도 코일을 이용하여 배전급 용량인 13.2kV/630A 급 한류기를 개발하여 성공적으로 단락 실험을 끝마쳤다[2]. 개발된 한류기를 계통에 적용하기 위해서는 몇가지의 문제점을 해결해야하며, 그중 아주 작은 크기지만 한류 코일의 임피던스에 의해 정상 시 생기는 전압강하에 대해서 연구해야 한다.

이 논문에서는 무유도 코일의 내측 코일과 외측 코일 사이의 간격에 따른 한류코일의 임피던스를 3D시뮬레이션을 통해 예측하였으며, 제작한 한류코일의 실제 측정값과 비교 분석하였다.

2. 본 론

2.1 한류코일의 모델링

연세대학교에서는 AMSC 사에서 제조한 344S 선재를 이용하여 220V/250A급 무유도 저항형 한류기를 제작하여 실험하였다[3]. 그림 1은 344S 선재의 구조이며, 표 1은 344S와 보빈의 사양이다. 344S 선재는 안정화제인 25 μm의 스테인리스 스틸이 초전도층의 위와 기판 밑에 각각 적층되어 있으며, 안정화제는 솔더를 이용하여 전기적으로 연결되어 있다. 그림 2는 제작한 한류모듈이다. 모듈은 4병렬 구조이며 내측에는 2개의 선재가 시계 방향으로 권선되어 있고 외측 2개의 선재는 시계 반대방향으로 권선되어서 무유도성을 갖게 된다. 보빈의 높이는 230mm이며, 내반경은 90mm이고, 외반경은 130mm이다. 선재 권선을 위하여



<그림 1> 344S 선재의 단면



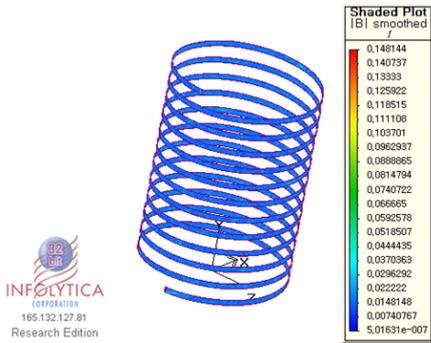
<그림 2> 제작한 한류 코일



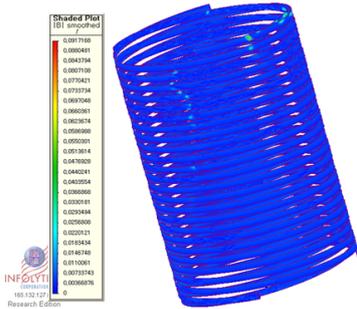
<그림 3> 한류 코일의 모델링

4.4mm의 홈을 내었고, 홈 사이의 길이는 2.7mm이다. 한 층의 권선에 사용된 초전도 선재의 길이는 4.4m이며 4병렬 구조이기 때문에 모듈 제작에 사용된 총 길이는 17.6m이다.

임피던스 계산을 위한 시뮬레이션은 Infolytica 사의 MagNet 을 이용



〈그림 4〉 내측 한turn의 시뮬레이션 결과



〈그림 5〉 3D 시뮬레이션 결과

하여 수행하였다. 그림 3은 제작한 한류코일을 3D로 모델링한 것이다. 내측과 외측의 선제간 거리는 1mm 이며, 내측 반경과 선제 길이는 제작한 한류코일과 같다. 자장 해석과 코일의 인덕턴스 계산이기 때문에 선재의 재료는 초전도 선재와 같은 크기의 구리를 이용하여 해석하였다.

2.2 3D 시뮬레이션

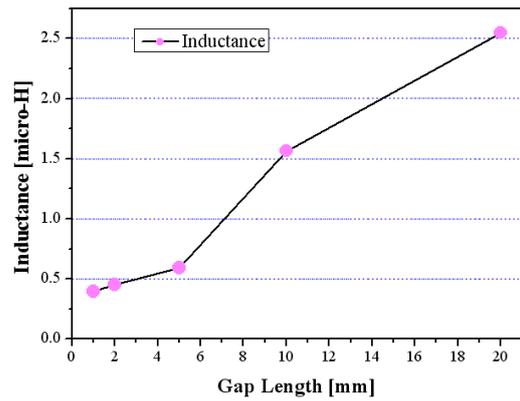
3D 해석 결과의 정확성을 위해 그림 4처럼 내측 레이어의 한 개의 코일에 대해서 해석을 먼저 수행하였다. 전류는 50A의 DC 전류가 흐를 때이며 이때 저장된 에너지는 12.37mJ이다. 이 결과를 토대로 환산한 인덕턴스 값은 9.9uH 이다. 이는 표 1에서 보듯이 측정값 9.8uH와 아주 비슷한 결과이다. 이를 토대로 3D 해석이 가능함을 알 수 있다. 매쉬 사이즈는 프로그램에서 적용 가능한 최소의 크기로 결정하여 해석의 정확도를 높였다.

그림 5는 층간 거리가 1mm 이고 각 선재에 인가한 전류의 크기가 40A일 때 선재에 분포하는 자기장의 크기이다. 그림에서 볼 수 있듯이 내측과 외측의 전류가 서로 반대 방향으로 흐르기 때문에 자장이 거의 상쇄되는 것을 볼 수 있다. 그림 6은 층간 간격에 따라 수행한 시뮬레이션 결과이다. 층간 간격이 1mm는 실제 제작한 코일과 같은 길이이며, 2mm 일 때는 절연을 위해 추가적으로 캡톤 테이프를 층 사이에 감았을 때를 가정한 것이다. 그리고 5mm는 하나의 보빈에 내측과 외측을 동시에 권선하지만, 효과적인 냉각을 위해 5mm 간격의 스페이서 등을 통하여 냉각 채널을 설치했을 때를 가정한 것이다. 또한 10mm, 20mm는 하나의 보빈에 내측과 외측을 동시에 권선하는 방식이 아니라 두개의 보빈에 각각 내측과 외측을 따로 권선하는 형태이다. 이는 솔레노이드 무유도 권선법을 고전압 한류기에 적용할 때 절연과, 냉각을 위해 정상 시 인덕턴스에 의한 손실을 감수하고 서라도 사용하기 위할 때 사용한다. 4.4m의 선재를 권선하는 이 모델에서는 층간 간격이 커지면 인덕턴스가 급격히 증가하지만 그 크기가 작아서 인덕턴스에 의한 큰 손실이 발생하지는 않는다.

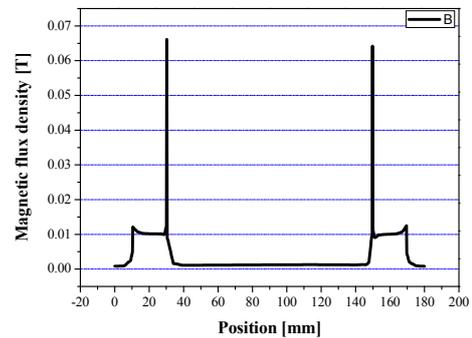
그림 7은 층간 거리가 20mm 일 때의 한류 코일에서 발생하는 자장의 크기이다. 그림에서 보듯이 코일 중심부에서는 자장 발생이 거의 없다. 하지만 외측과 내측 사이에서 발생하는 자기장을 확인할 수 있다. 이로 인하여 인덕턴스가 발생하여 정상 시 손실로 이어진다.

3. 결 론

이 논문에서는 이미 단락 실험을 끝낸 220Vrms 급 한류 코일을 이용하여 층간 거리에 따른 인덕턴스를 시뮬레이션을 통하여 수행하였다. 보빈의 크기가 작은 소용량의 한류 코일이기 때문에 층간 간격이 길어지



〈그림 6〉 층간 간격에 따른 인덕턴스



〈그림 7〉 층간 간격이 20mm일 때의 자장 분포

더라도 인덕턴스 크기 자체는 크게 증가하지 않았지만, 층간 거리에 따라 인덕턴스의 크기가 증가하는 패턴을 확인할 수 있었다. 또한 계산된 인덕턴스의 크기로 정상 시 발생하는 임피던스의 크기를 계산할 수 있었다. 배전급 및 송전급 저항형 한류기를 개발함에 있어 대용량의 코일 해석이 반드시 필요하며, 이 논문에서 얻은 결과를 이용하면 한류 코일 설계 시 코일의 무유도성을 판단할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업으로 수행된 연구임 (R0A-2009-000-20063-0)

[참 고 문 헌]

- [1] <http://www.superpower-inc.com>
- [2] Kang, Hyoungku, Seok, Bok-yeol, Chang, Ho-Myung, Yoon, Yong Soo, Nam, Kwanwoo, Lee, Chanjoo, Tae Kuk Ko, "Development of a 13.2 kV/630 A (8.3 MVA) high temperature superconducting fault current limiter" IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 18, pp628-631, 2008.6
- [3] Seong Eun Yang, Dong Keun Park, Min Cheol Ahn, Yeong Sik Kim, Min Jae Kim, Yong Soo Yoon, Member IEEE, Chanjoo Lee, Bok-yeol Seok, and Tae Kuk Ko, Member IEEE, "Manufacture and test of the bifilar wound coil using CC with stainless steel stabilizer", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 3, pp1867-1870, 2007.6