

Development of new current path pattern of YBCO thin films for Superconducting fault current limiters

B. W. Lee*, J. S. Kang, K. B. Park, I. S. Oh
R&D Research Center, LG Industrial Systems, Cheongju, Korea

초전도 한류기용 YBCO 박막 전류 Path Pattern 개발

이방욱*, 강종성, 박권배, 오일성

Abstract

In this study, electromagnetic analysis of current paths including meander pattern, spiral pattern, and bi-spiral pattern were performed and in order to verify the analysis results, experiments tests including quench test, and insulation tests were performed. In addition, bubble corner concepts were introduced to enhance insulation reliability.

From our study, bi-spiral pattern of YBCO thin films were rather effective for quench and insulation than the other patterns. So this current path pattern was adopted for YBCO thin films in order to develop 6.6 kV resistive fault current limiters. Finally YBCO thin films were connected in series and parallel to enhance capacity, and the test results of current limiting characteristics of 6.6kV resistive SFCL were successful.

The Progress in Superconductivity is published every six month and serves as a channel for publications on superconductivity and related topics. The author(s) are required to submit THREE copies of the manuscripts along with original figures directly to the Editor.

Keywords : YBCO thin films, current path patterns, Superconducting fault current limiters

I. 서론

전력 계통에서의 한류기(Fault Current Limiters)의 역할은 계통 사고로 인한 고장 전류 발생시 부스바(busbar), 애자, 차단기 등에 가해지는 기계적, 열적, 전기적 스트레스를 제한시키는 것이다. 하지만 실제적으로 계통에 적용 가능한 한류 기술의 개발은 기술적 어려움과 상업화의 난점으로 인해 지연되어 왔다

그러나 고온 초전도체가 발견되면서, 이 새

로운 소자의 비선형적인 전압-전류 특성을 적용한 가격 경쟁력을 갖춘 상용화 초전도 한류기의 개발 가능성이 제시되었으며, 1986년부터 액체 질소를 냉매로 사용하는 고온 초전도 한류기 개발이 본격적으로 시작되었다.

세계 우수 전력 기기 메이커에서도 경쟁적으로 초전도 한류기 개발에 뛰어들고 있으며, 향후 10년 내에 전력 계통에 실적용 가능한 한류기 개발이 이루어지리라 예상하고 있다[1,2]. 이에 부응하여 국내에서도 초전도 한류기 개발을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다 [3,4].

LG산전과 한전전력연구원에서도 154kV 송전급 초전도 한류기 개발을 최종 목표로 2001

*Corresponding author. Fax : +82 43 261 6629

e-mail : bwlee@lgis.com

년 공동 프로젝트를 착수하였으며, 2004년 5월, 1단계 목표인 6.6kV/200A급 삼상 초전도 한류기를 성공적으로 개발 완료하였다.

본 논문에서는 6.6kV급 초전도 저항형 한류기 개발에 있어서 이루어진 연구 활동 중 특히 YBCO 박막 소자를 초전도 저항형 한류기의 모듈로 적용하기 위해 개발된 전류 PATH PATTERN에 관한 내용을 중점으로 다루고자 한다. 또한 개발된 한류 소자를 적용하여 설계된 삼상 초전도 한류 모듈 설계에 관하여 소개하고, 최종적으로 본 개발 한류기에 대한 시험 결과에 관해 언급하고자 한다.

II. 초전도 한류소자 개발

YBCO 초전도 박막 소자 개발시 가장 우선적으로 고려해야 될 점은, 단위 소자 용량 증대 방안, hot spot 발생에 의한 열 적 소손 방지, 단위 한류 소자 최적 설계에 관한 것이다. 특히 단위 한류 소자 설계시 저항형 한류기에서 초전도 소자의 통전로로 사용되며 켄치시 저항 역할을 수행하는 전류 통전로 형상 결정이 가장 중요하다. 왜냐하면 전류 통전로의 길이, 두께, 형상 등에 따라 켄치시 발생하는 저항이 결정되며, 전계 및 자계의 집중을 완화하기 위한 패턴 설계를 통해 초전도 소자의 열적, 전기적, 기계적 파괴를 방지하고, 교류 손실 또한 저감할 수 있기 때문이다.

저항형 초전도 한류기에 사용되는 YBCO 박막소자는 일반적으로 전압 용량 증대 및 필요상전도 저항을 얻기 위해 여러 가지 패턴으로 제작되어 이용되고 있는데, 패턴의 형상에 따

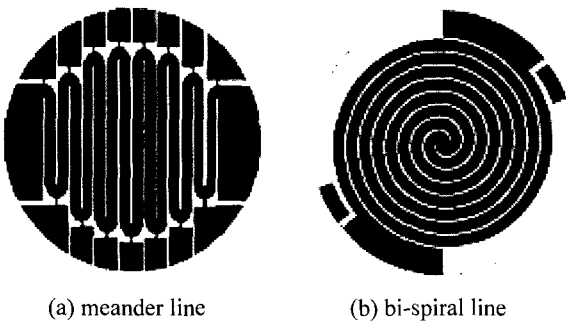


Fig. 1. Current path pattern for YBCO thin film.

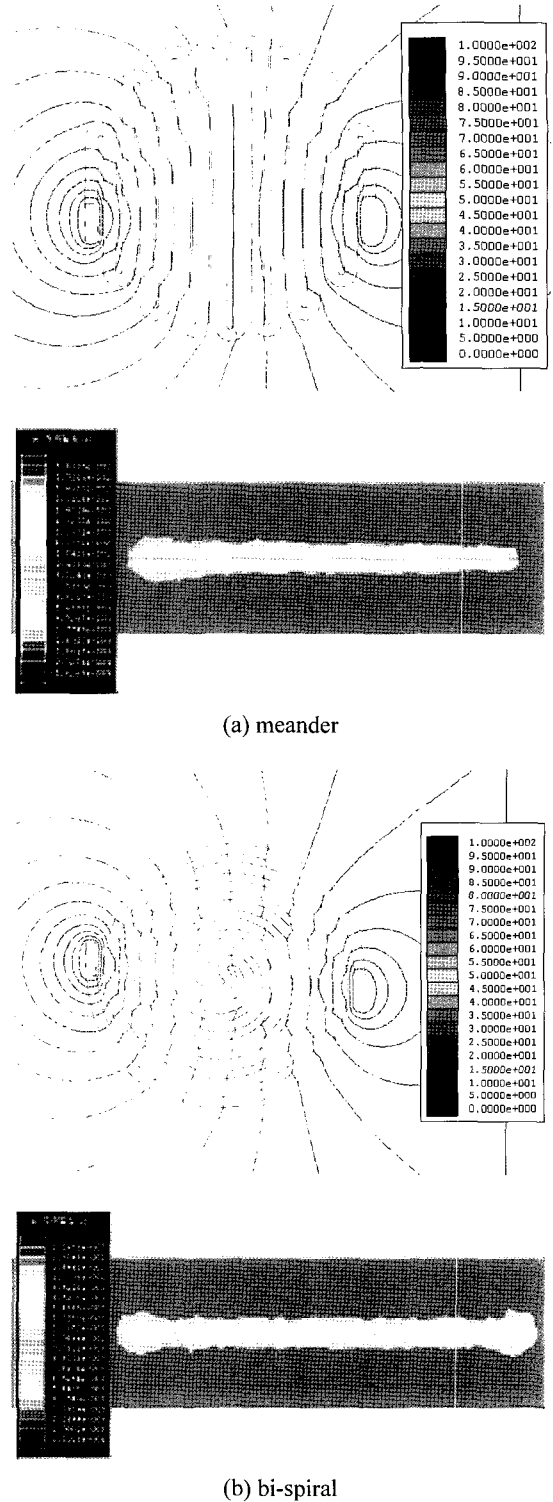


Fig. 2. Voltage and magnetic field distributions.

라, meander 형태 혹은 spiral 형태, bi-spiral 형태 등이 있다. Fig. 1은 YBCO 박막 패턴으로 주로 사용되는 meander 패턴 및 본 연구를 통해 제안된 bi-spiral 패턴의 기본 형상이다.

본 연구에서는 일반적으로 박막형 초전도 한류소자 패턴으로 사용되는 meander line과 새롭게 구상 설계한 bi-spiral line에 대한 전자계 해석과 고속카메라를 이용한 동시 켄치 현상 분석, 단위 한류 소자에 대한 극한 실험 등을 통해 YBCO 박막의 최적 패턴을 결정하였다.

Fig. 2는 YBCO 박막 패턴별 전위 분포 및 자속밀도 분포를 보여주고 있다. 전자계 해석을 통한 결과로는 전계 측면에서는 meander line의 경우 외곽 굴곡 path 부근에 전계가 상대적으로 집중하였으나, bi-spiral 패턴의 경우 전계 분포가 완만하였으며, 자계해석 측면에서도 meander line보다 bi-spiral line의 경우가 자속 밀도가 더 균일하게 분포하는 것을 확인하였다.

Fig. 3은 두가지 패턴에 관해 고속카메라를 이용하여 켄치시 발생하는 버블을 관측하여 동시 켄치 및 켄치 전파 측면에서 어떤 패턴이 더 유리한지 비교 분석한 결과를 보여 준다.

켄치 전파 특성을 보면 meander line의 경우 주로 외곽 굴곡부분 및 임계 전류 밀도가 낮은 부분에서 켄치가 시작되어 금박막 및 사파이어 기판을 통해 켄치가 전파되고, bi-spiral 패턴의 경우에도 양상은 유사하지만 meander line의 경우 외곽 굴곡 부분의 존재로 인한 weak point 발생 가능성에 비해 상대적으로 국부적인 켄치 집중 현상은 나타나지 않았다.

Fig. 2의 전자계 해석 결과와 Fig. 3의 고속촬영을 통한 켄치 현상 분석을 통해 bi-spiral 패턴의 가능성을 확인하고, 실전압을 인가하여 절연 특성을 분석해 보았다. 그 결과 기존의 4인치 meander 패턴의 경우 외곽 굴곡부분의 전계 집중 및 hot-spot 발생으로 인해 600V 정격 전압 이상에서는 소손이 발생함을 확인하였다.

반면에 bi-spiral 패턴으로 식각된 4인치 박막의 경우 1kV 이상의 전압 인가시에도 박막이 파손되지 않는 것을 알 수 있었으며, 또한 고속카메라를 이용하여 살펴본 켄치 전파 특성도 정격 전압에서의 특성과 동일하게 양호함을 알 수 있었다. 또한 bi-spiral 패턴의 경우 중앙 부

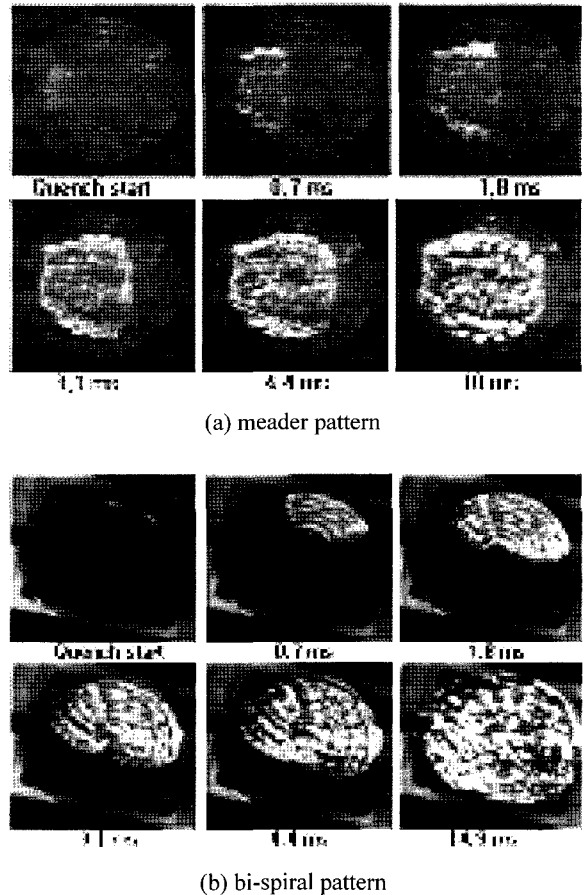


Fig. 3. Quench imitations and propagations.

분의 전류 집중을 완화하기 위한 일환으로 패턴 중앙부에 버블 모양의 완충지대를 삽입하였고, 전자계 특성을 고려하여 전류 통전 단면적이 외곽으로 갈수록 일정 비율로 커지는 형태의 bi-spiral 패턴을 적용하였다(Fig. 4).

단위 박막의 고압에 대한 절연 특성 향상 및 극한 내력 향상을 위해 상기 패턴에 관한 3차원 전자계해석, 내압시험 및 켄치 시험을 수행 실시하여 한류 소자로서의 성능을 검증하고, 6.6kV급 초전도 한류기용 YBCO 박막의 전류 통전 path 형상으로 bi-spiral 패턴을 적용하여 한류 특성을 시험한 결과 1/2 cycle 이내에 사고 전류의 80% 이상을 한류 할 수 있는 매우 양호한 특성을 얻을 수 있었다.

Fig. 5는 최종 결정된 박막 패턴을 적용한 YBCO 단위 소자에 대한 전류 밀도 분포 및

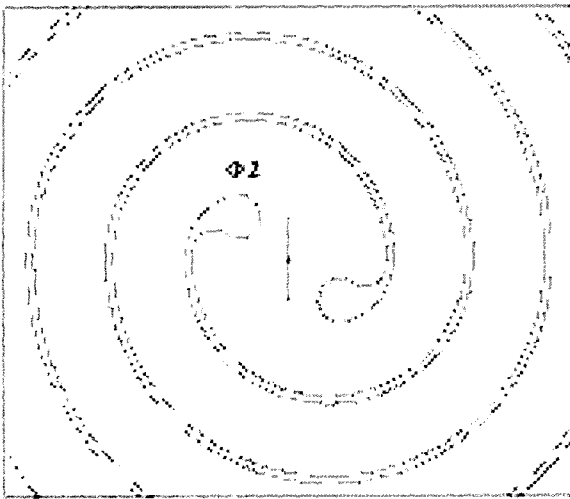


Fig. 4. Center region of YBCO current path pattern.

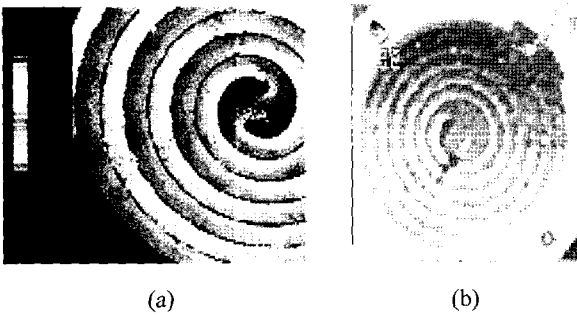


Fig. 5. Current density distribution (a) and quench characteristics (b) of final YBCO current path patterns.

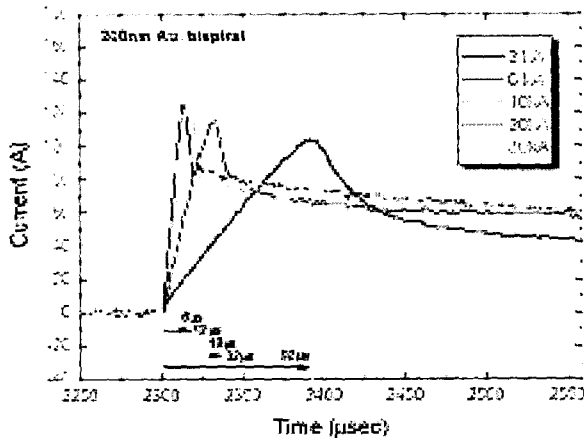


Fig. 6. Short circuit test of YBCO films.

동시퀀치 특성을 보여 주고 있다.

또한 Fig. 6은 단위 bi-spiral 박막에 대해 2kA~30kA까지의 사고 전류에 대하여 1/2 cycle 이내 한류 동작을 완료하는 특성을 나타내고 있다.

III. 초전도 한류기 개발

6.6kV/200A급 초전도 한류기 개발을 위해서는 초전도 한류 모듈의 직, 병렬 연결이 반드시 이루어져야 하며, 이때 직렬 연결 모듈에서의 동시 퀀치 및 전압 배분 문제, 병렬 연결 모듈에서의 전류 배분 문제가 원활히 이루어져야 한다. 상기 초전도 한류기의 단상 모듈 구성은 YBCO 박막 소자를 8직렬, 6병렬로 구성하였으며, 총 48개의 소자가 사용되었다. 또한 직렬 연결모듈의 동시퀀치를 원활히 하기 위해 각 소자에 병렬로 션트 저항을 취부하여 제작하였다(Fig. 7). Fig. 8은 단상모듈의 한류 특성을 보여주고 있으며, 사고 전류를 1/4주기 이내 양호하게 한류하는 것을 볼 수 있다.

최종 설계 및 제작 완료된 6.6kV/200A급 초전도 한류기를 대상으로 LG산전 PT&T에서 성능시험을 실시하였다. 시험은 계통에서 발생할 수 있는 모든 단락 상황을 가정하여, 1선 지락, 선간 단락, 삼상 단락 사고를 모의하여 실시하였다. 단락 전류는 1kA부터 시작하여 10kA까지 인가하였으며, 시험 결과 모든 단락 상황에 대하여 제작된 초전도 한류기는 단락 사고 발생 후 1/2 cycle 이내 사고 전류치를 70% 이

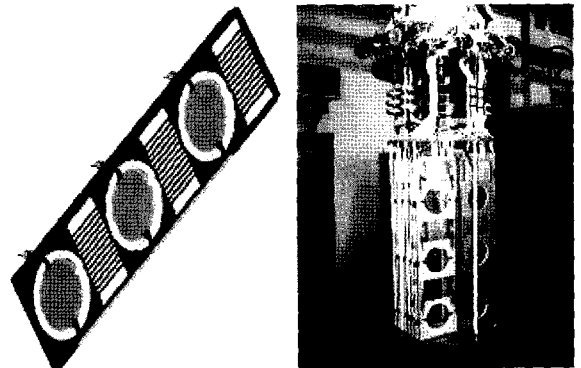


Fig. 7. Current limiting modules.

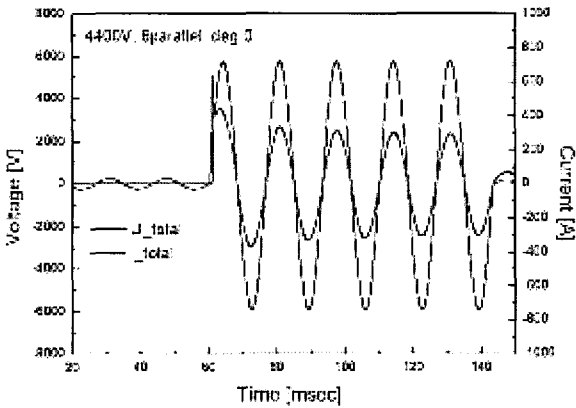


Fig. 8. Current limiting characteristics.

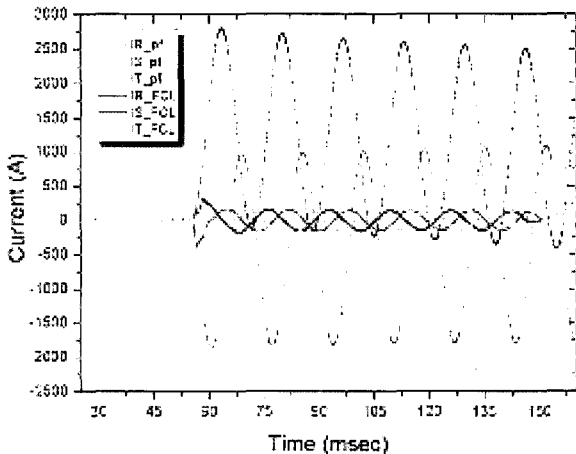


Fig. 9. Three phase short current test results.

상 저감하는 양호한 한류 성능을 나타내었다 (Fig. 9).

이러한 초전도 한류기가 향후 배전급, 송전급까지 개발되어 계통에 투입된다면 전력 계통의 단락 전류가 확실하게 제어가 가능하므로 신계통의 구성 또는 기존 계통에 적용시 기존 차단기의 교체 주기 증가 및 단락 사고시 인접 선로의 과급 효과 축소, 정전 범위 축소 등 많은 장점을 제공할 것으로 예상된다.

IV. 결론

본 논문에서는 6.6kV급 초전도 저항형 한류

기 개발을 위한 연구 활동 중 특히 YBCO 박막 소자를 초전도 저항형 한류기의 모듈로 적용하기 위해 개발된 bi-spiral 패턴을 적용한 초전도 한류기 개발에 관하여 언급하였다.

특히 1kV 이상의 절연 내력을 갖고 전자기적 특성이 우수한 bi-spiral 패턴을 적용한 YBCO 박막 전류 통전 path를 개발하였으며 이를 적용한 초전도 한류소자의 설계, 초전도 한류 모듈 설계, 삼상 초전도 한류기의 제작 및 성능시험 결과를 제시하였다.

본 논문에서 언급한 연구 결과물 이외에도 많은 실험 및 해석, 시행 오차를 거쳐 초전도 한류기 분야에서 세계적으로도 뒤지지 않는 연구 결과를 얻어낼 수 있었다. 현 시점에서 개발 완료된 초전도 한류기용 한류 소자 패턴 및 직, 병렬 연결 방안 등은 향후 배전급 및 초고압급 초전도 한류기 개발에 응용될 것이며, 극저온에서의 고압화 대응량화 시의 절연 기술의 확보, 냉각 기술의 신뢰성 확보, 장기 운전 기술 확보 등이 이루어진다면 초전도 한류기 상용화가 2010년 경 가능하리라 사료된다.

Acknowledgments

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

References

- [1] Makan Chen et al., "6.4 MVA resistive fault current limiter based on Bi-2212 superconductor", EUCAS 2001, Copenhagen.
- [2] B. Gromoll et al., "Resistive current limiters with YBCO films", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.7, No. 2, 1997.
- [3] H. Kubota et al., "A new model of fault current limiter using YBCO thin film", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.9, No. 2, 1999.
- [4] 박권배, 이방욱 et al., "자기장이 인가된 YBCO 박막형 한류기의 웬치 특성", 한국초전도 저온 공학회 2002년도 학술대회 논문집, pp.365~367.