

대구경 초전도 솔레노이드 코일의 전류특성의 실험적 고찰

배준한, 심기덕, 최석진, 김석환, 조전욱, 이연용, 권영길
한국전기연구원

Experimental Study on Current Capacity of Superconducting Solenoids with Large Inner Diameter

J. H. Bae, K. D. Sim, S. J. Choi, S. W. Kim, J. W. Cho, E. Y. Lee, Y. K. Kwon
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - The quench current characteristics of the superconducting solenoids with large diameter were experimentally investigated. Three solenoids with the inside diameter of 450mm were fabricated and tested for various winding tensions and epoxy impregnation conditions.

The highest quench current was obtained in the solenoid impregnated with epoxy after wound with winding tension of 20 percents. Although the training effect in the solenoid appeared after epoxy impregnation, The quench current of solenoid impregnated with epoxy was higher than that before impregnation. The test results and discussions were presented.

1. 서 론

초전도선은 전기저항이 없기 때문에 대용량의 전류를 흘릴 수 있다. 이러한 장점을 이용하여 초전도 마그네트를 만들면 동일한 크기에서 강력한 자장을 발생시킬 수 있어서 MRI, NMR, SMES, 자기분리기, 자기부상열차, 초전도발전기 등의 다양한 분야에 사용되고 있으며, 초전도 응용기기의 성능 향상 및 용량 증대를 위하여 초전도 마그네트의 크기 및 자장을 높이려는 연구가 활발히 진행되고 있다.[1-2]

초전도 마그네트가 대형화되면 마그네트의 중심자장을 높이기 위해서 운전전류를 높여야 한다. 그러나, 코일내의 전자력 또한 증가하게 되어서 초전도 마그네트의 안정도는 저하되어 조기켄치가 발생한다. 이처럼 마그네트의 크기가 증가함에 따라 켄치전류가 저하되는 현상을 size effect라고 불리고 있으나[3-4], 불행하게도 아직까지 초전도 마그네트의 조기켄치 원인은 명확히 밝혀지지 않고 있어서 일반적으로 저온초전도체를 사용하는 DC 초전도 마그네트의 경우, 사용된 초전도선의 임계전류의 최대 60% 수준에서 운전하고 있다.

따라서, 대구경 초전도 마그네트 설계시 중심자장을 높이면서 compact하게 만들기 위해서는 초전도 마그네트의 운전전류를 높이는 연구가 선행되어야 하며, 이러한 필요에 의해 본 논문에서는 권선장력과 함침조건을 변화시켜가면서 대구경 초전도 마그네트의 켄치전류 특성을 알아보고, 초전도 마그네트의 켄치전류를 향상시킬 수 있는 최적권선법을 제시하였다.

2. 실험 구성

대구경 초전도 마그네트의 켄치전류 특성을 알아보기 위해서 그림 1과 같은 3개의 솔레노이드 코일을 제작하였다. 각 코일의 내경은 size effect를 충분히 반영하기 위해서 450mm로 하였고, 층당 권선수는 20개로 총 34층으로 구성되었으며, 사용된 초전도선은 표 1에 나타내었다. 각 코일은 권선장력 및 함침효과를 알아보기 위해서 표 2의 방법으로 제작되어 시험되었다.

먼저, 코일 1번은 초전도선의 항복강도 대비 0%의

장력으로 권선하였고, 코일 2번은 초전도선의 항복강도 대비 20%의 장력으로 권선한 후 여차시 전자력에 의한 코일의 움직임을 억제하기 위해서 Fiber Glass tape를 이용하여 17%의 장력으로 코일 최외층에 권선하였다. 코일 3번은 상온경화용 에폭시수지를 이용하여 초전도선의 항복강도 대비 20%의 장력으로 권선한 후 코일 2번과 동일하게 Fiber Glass tape를 이용하여 17%의 장력으로 코일 최외층에 권선하였다.

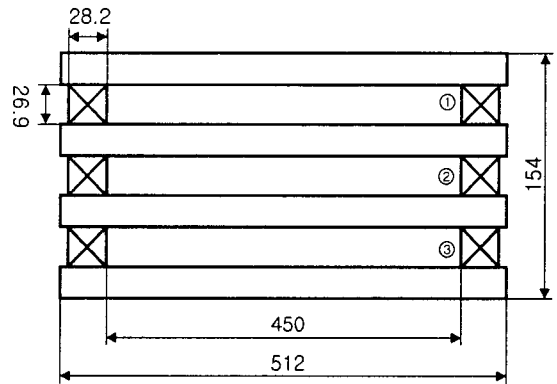


그림.1 초전도 코일의 단면도

표 1. 초전도 선재의 주요 사양

Composition	Cu/NbTi
Shape	Rectangle
Bare size of conductor	1.2×0.75mm
Diameter of filament	90 μm
Number of filaments	54
Cu/Sc ration	1.4
Insulation	Former
Critical current	510 A @7T
Yield strength	40kg/mm ²

실험은 먼저 함침 전의 코일 1번, 2번과 wet winding한 코일 3번을 대상으로 켄치전류를 측정하였고, 1차 시험이 완료된 후에는 코일 1번과 2번을 함침한 후 다시 켄치전류를 측정하였다. 각 코일의 중심에는 저온 홀센서를 설치하여 켄치시 코일부분에서 발생하는 최대자장을 계산하였다. 그림 2는 켄치실험을 위해서 제작된 3개의 솔레노이드 코일의 함침된 후의 모습이다.

표 2. 초전도 코일의 제작조건

코일 번호	권선장력(%) (항복강도 대비)	Fiber Glass 벤딩(%) (항복강도대비)	에폭시 함침	wet winding	비고
1	0	×	○	×	실험 2회
2	20	17	○	×	실험 2회
3	20	17	×	○	실험 1회

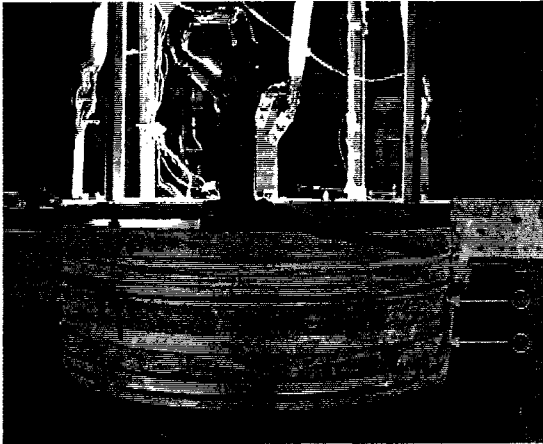


그림 2 제작된 초전도 코일

3. 결과 및 고찰

그림 3은 권선장력과 함침조건을 변화시켜 가면서 전류증가율이 3A/sec 일 때 초전도 코일의 켄치전류를 측정 한 그래프이다. 초기 켄치전류는 함침한 1번 코일에서 377A로 가장 높게 얻어졌고, wet winding을 한 코일 3번에서 227A로 가장 낮게 얻어졌다. 반면에 9번 이상의 트레이닝 과정 후에는 함침한 2번 코일에서 466A로 가장 높게 얻어졌고, 함침전의 2번 코일에서 388A로 가장 낮게 얻어졌다. 최대자장은 함침한 2번 코일의 내벽에서 켄치전류가 466A일 때 4.72T로 계산되었다.

그래프를 통해 알 수 있듯이 모든 조건에서 트레이닝 효과가 발생하였고, 코일 1번, 2번의 경우에는 함침전보다는 함침 후의 켄치전류가 높게 얻어졌다. 한편, 9번의 트레이닝 후 함침된 코일 1번, 2번의 켄치전류는 wet winding한 코일 3번 보다 약간 높게 나타났다.

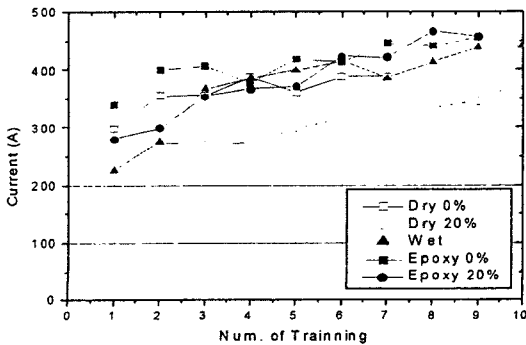


그림 3 권선장력 및 함침조건에 따른 켄치전류

그림 4는 함침된 코일 1번의 전류증가율의 변화에 따른 켄치전류 특성이다. 그림을 통해 켄치전류는 전류증가율에 거의 무관함을 알 수 있고, 최대 켄치전류는 전류증가율이 15A/sec일 때 470A로 얻어졌다.

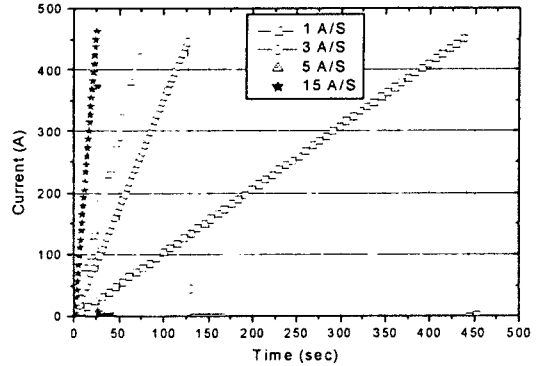


그림 4 함침된 코일 1번의 전류증가율에 따른 켄치전류

한편, 그림 5는 함침된 코일 2번의 전류증가율의 변화에 따른 켄치전류 특성으로서 함침된 코일 1번과 마찬가지로 켄치전류는 전류증가율에 거의 무관하며, 최대 켄치전류는 전류증가율이 5A/sec일 때 467A로 얻어졌는데 이는 동일한 전류증가율에서 코일 1번의 켄치전류 457A 보다는 12A 높게 나타났다.

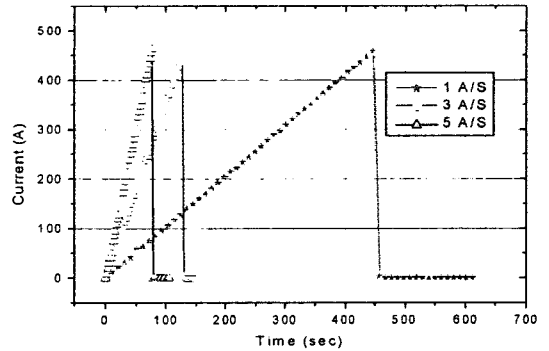


그림 5 함침된 코일 2번의 전류증가율에 따른 켄치전류

4. 결 론

권선장력과 함침조건을 변화시켜가면서 대구경 초전도 마그네트의 켄치전류 특성을 알아보고, 최대 켄치전류는 초전도선의 항복강도 대비 20% 장력으로 권선한 후 함침한 코일 2번의 경우에서 얻어졌고, 동일한 전류증가율의 경우에도 가장 높은 켄치전류가 얻어졌다.

이상의 결과로부터 대구경 초전도 마그네트의 켄치전류를 높이기 위해서는 일정한 장력으로 권선한 후 에폭시 진공함침하는 조건이 최적의 권선법이며, 설령 함침이 완전하지 못해 트레이닝 효과가 나타날지라도 함침하지 않은 경우보다는 높은 켄치전류가 얻을 수 있다.

감사의 글

본 연구는 보건복지부에서 시행한 선도기술·의료공학 기술개발 사업에 의하여 지원되었으며, 이에 감사 드립니다.

(참 고 문 헌)

- [1] H. Ogihara, Superconducting Application Tech
CMC, 1991
- [2] F .M. asner, High Field Superconducting M
Clarendon Press, Oxford, 1999
- [3] M. N. Wilson, Superconducting Magnets,
Clarendon Press, Oxford, 1983
- [4] L. J. Donadieu and D. J. Rose, "Conception and D
Large Volume Superconducting Solenoid", Proceedin
the International Conference on High Magnetic Fields