

대구경 초전도 코일의 퀘치 전류 특성

Characteristics of the Quench Current of Superconducting Coils with Large Bore

趙全旭*·裴俊漢*·金海鐘*·沈基德**·成耆哲***

(Jeonwook Cho · Joonhan Bae · Haejong Kim · Kideok Sim · Kichul Seong)

Abstract - The quench current characteristics of the superconducting solenoids with large diameter were experimentally investigated. Three solenoids with inside diameter of 450 mm were fabricated with different tensions and different types of epoxy applications. The quench current of each solenoid was measured according to the various ramping rates of current. The highest quench current was obtained in the solenoid impregnated with epoxy after winding with tension of 20 percents of the yield strength of the superconducting wire. It was found that the quench currents were almost independent of the ramp rate of current. From the results, although the training effect in the solenoid appeared with epoxy impregnation, the quench current of solenoid impregnated with epoxy was higher than that without epoxy impregnation. The test results are presented and discussed.

Key Words : quench current, superconducting solenoids, large bore, winding tensions, epoxy impregnation

1. 서 론

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

초전도 코일이 대형화되면 코일의 중심자장을 높이기 위해서 운전전류를 높여야 한다. 그러나 코일내의 전자력 또한 증가하게 되어서 초전도 코일의 안정도는 저하되어 조기퀘치가 발생한다. 이처럼 코일의 크기가 증가함에 따라 퀘치전류가 저하되는 현상을 Size Effect라고 불리고 있으나[3],[4] 불행하게도 아직까지 대구경 초전도 코일의 조기퀘치 원인은 명확히 밝혀지지 않고 있어서 일반적으로 저온초전도체를 사용하는 DC 초전도 코일의 경우, 사용된 초전도선의 임계전류의 최대 60% 수준에서 운전하고 있다[5]. 대구경 초전도 코일 설계시 중심자장을 높이면서 작게 만들기 위해서는 코일의 운전전류를 높이는 연구가 선행되어야 하며, 이러한 필요에 의해 본 논문에서는 권선장력과 함침조건을 변화시켜가면서 대구경 초전도 코일의 퀘치전류 특성을 알아보고, 초전도 코일의 퀘치전류를 향상시킬 수 있는 최적권선법을 제시하였다.

2. 실험 구성

대구경 초전도 코일의 퀘치전류 특성을 알아보기 위해서 그림 1과 같은 3개의 솔레노이드 코일을 제작하였다. 초전도 코일의 size effect를 규명하기 위한 코일의 내경에 대한 정확한 기준은 없지만 그동안 진행한 소형코일과 1MJ급 SMES 코일의 연구결과에 따라[6],[7],[8], 각 코일의 내경은 Size Effect를 반영하기 위하여 450mm로 하였고, 층당 권선수는 20개로서 총 34층으로 구성되었으며, 사용된 초전도선은 표 1에 나타내었다. 각 코일은 권선장력 및 함침효과를 알아보기 위해서 표 2의 방법으로 제작되어 시험되었다. 먼저, 코일 A는 초전도선의 항복강도 대비 0%의 장력으로 권선하였고, 코일 B는 초전도선의 항복강도 대비 20%의 장력으로 권선한 후 여차시 전자력에 의한 코일의 움직임을 억제하기 위해서 유리섬유 테이프를 이용하여 초전도선의 항복강도의 17%의 장력으로 코일 최외층에 권선하였다.

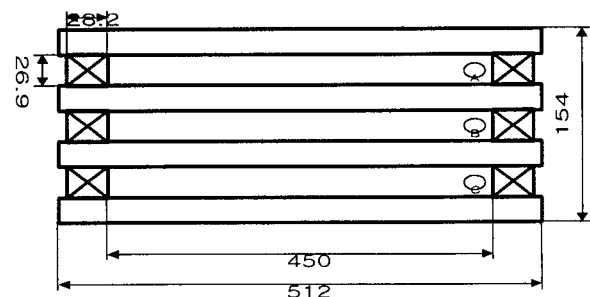


그림 1. 초전도 코일의 단면도

Fig. 1 The cross section of superconducting coils

* 正 會 員 : 韓國電氣研究員 超電導應用研究그룹 先任研究員

** 正 會 員 : 韓國電氣研究員 超電導應用研究그룹 研究員

*** 正 會 員 : 韓國電氣研究員 超電導應用研究그룹 責任研究員

接受日字 : 2003年 9月 16日

最終完了 : 2004年 3月 2日

표 1. 초전도 선재의 주요 사양

Table 1. Specifications of the superconductor

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

코일 C는 상온경화용 에폭시수지를 이용하여 초전도선의 항복강도 대비 20%의 장력으로 권선한 후 코일 B와 동일하게 유리섬유 테이프를 이용하여 초전도선의 항복강도의 17%의 장력으로 코일 최외층에 권선하였다.

코일의 여자는 퀘치검출 및 보호장치가 장착된 일본의 IDX사의 초전도 기기용 전원을 사용하였고, 요코가와 사의 데이터분석기록계(AR 4800)를 이용하여 출력신호를 저장 및 분석하였다. 퀘치의 검출을 위해서는 일반적으로 사용되는 Bridge 회로를 이용하는 방법으로 각각의 초전도 코일의 중심부와 양단에 전압탭을 설치하고 전압평형회로를 이용하여 퀘치시 발생하는 저항의 변화를 측정하여 퀘치 여부와 발생 부위를 측정하였다.

또한, 각 코일의 중심자장을 측정하기 위해서 Lakeshore사의 극저온용 홀 자장센서를 각 코일의 중앙에 설치하였고, 측정된 중심 자장값을 이용하여 각 코일에서 발생된 최대 자장값을 계산하였다.

실험은 먼저 함침 전의 코일 A, 코일 B 및 코일 C를 대상으로 퀘치전류를 측정하였으며, 시험이 완료된 코일 A와 코일 B를 완전히 건조시키고 수분을 제거한 후 장시간 진공 배

표 2. 초전도 코일의 제작조건

Table 2. Fabrication methods of superconducting coils

Coil identification	A	B	C	D	E
Winding tension of the superconducting wire (kg/mm ²)	0	8	8	0	8
Winding tension of the fiber glass tape (kg/mm ²)	0	6.8	6.8	0	6.8
Epoxy resin impregnation	×	×	×	○	○
Wet winding	×	×	○	×	×

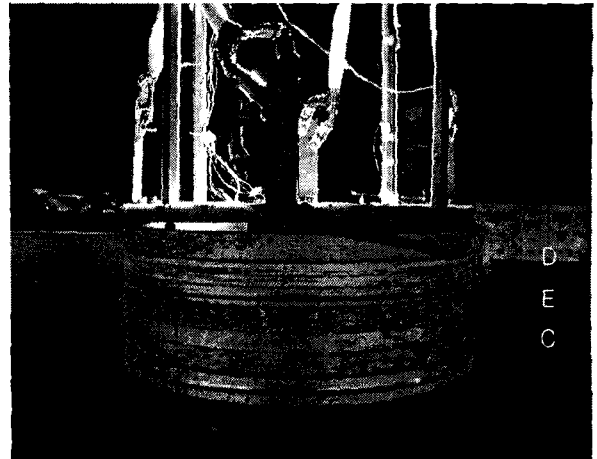


그림 2. 제작된 초전도 코일

Fig. 2 The fabricated solenoids

기를 하여 코일중의 공기를 제거한 후 진공상태에서 초전도 코일에 에폭시레진을 가압하여 에폭시 함침을 하는 에폭시 진공 함침방법으로 코일 D와 코일 E를 제작하였다. 이와같이 제작된 코일 C, D, E에 대하여 퀘치전류를 측정하여 함침 전후의 코일의 퀘치 전류특성을 비교하였다. 그림 2는 퀘치 특성 실험을 위해서 제작된 코일 C, D, E 3개의 솔레노이드 코일의 에폭시 진공 함침된 후의 모습이다.

3. 결과 및 고찰

그림 3은 권선장력과 함침조건을 변화시켜 가면서 전류증가율이 3A/sec 일 때 초전도 코일의 퀘치전류를 측정한 그래프이다. 초기 퀘치전류는 코일 D에서 377A로 가장 높게 나타났다고, wet winding을 한 코일 C에서 227A로 가장 낮게 나

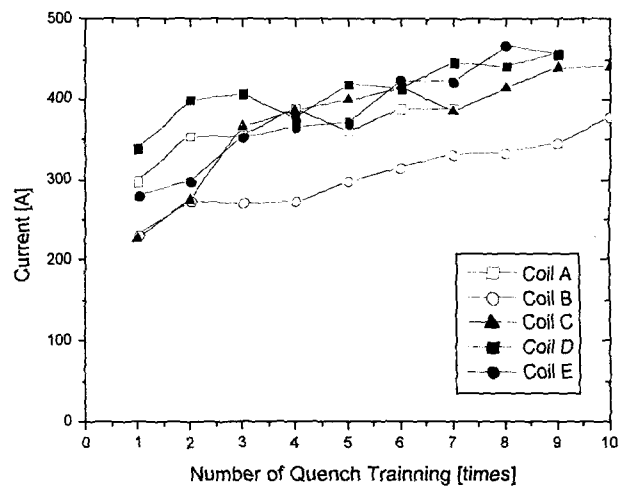


그림 3. 권선장력 및 함침조건에 따른 퀘치전류

Fig. 3 Quench currents of the coils with different winding tensions and epoxy application



그림 4. 에폭시 함침후 초전도 코일내에서 발생된 void
 Fig. 4 The void formed in the superconducting coil after the epoxy impregnation

타났다. 반면에 9번 이상의 트레이닝 과정 후에는 코일 E에서 466A로 가장 높게 얻어졌고, 코일 B에서 388A로 가장 낮게 얻어졌다. 최대자장은 코일 E의 내벽에서 퀘치전류가 466A일 때 4.72T로 계산되었다.

그래프를 통해 알 수 있듯이 모든 조건에서 트레이닝 효과가 발생하였고, 코일 A, 코일 B의 경우에는 함침전 보다는 함침 후의 퀘치전류가 높게 얻어졌다. 한편, 9번의 트레이닝 후 코일 A를 함침한 코일 D와 코일 B를 함침한 코일 E의 퀘치전류는 wet winding한 코일 C 보다 4~5% 높게 나타났다

그림 4는 초전도 코일 B를 에폭시 수지로 함침한 후 초전도 코일 내부의 함침 상태를 알아보기 위해서 코일을 축방향으로 절단 후의 코일 단면이다. 그림에서 볼 수 있듯이 약

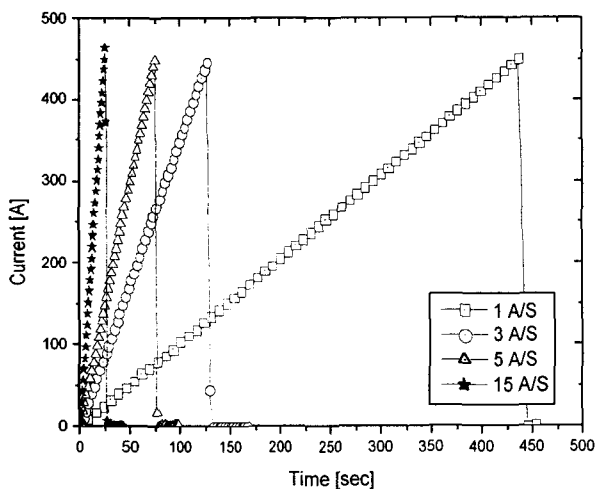


그림 5. 코일 D의 전류증가율에 따른 퀘치전류
 Fig. 5 The quench currents of the coil D impregnated with epoxy according to different ramping rates of current

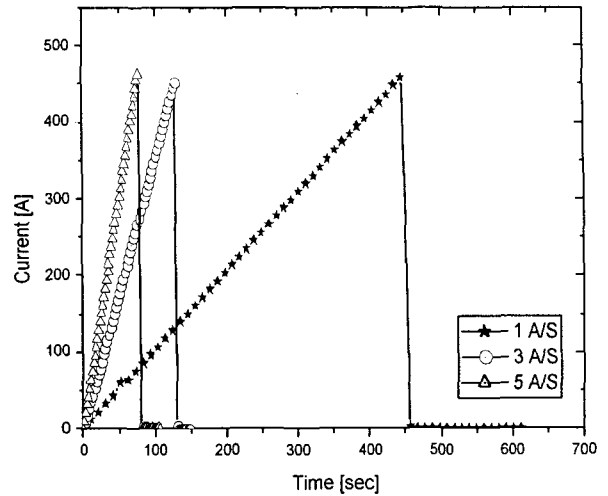


그림 6. 코일 E의 전류증가율에 따른 퀘치전류
 Fig. 6 The quench currents of the coil E impregnated with epoxy according to different ramping rates of current

0.54mm × 0.27mm 크기의 void가 발생하였는데 이것은 에폭시 제조과정에서 유입된 공기가 진공함침 중에 배출되지 못하고 빈 공간이 발생한 것으로 판단된다. 일반적으로 초전도 코일의 자장이 증가하면 전자력으로 인한 초전도선의 움직임으로 quench training 효과가 발생하는 것으로 알려져 있다.

이러한 초전도선의 움직임을 방지하기 위해서 초전도 코일을 권선한 다음 에폭시 또는 왁스를 사용하여 진공함침을 한다. 그러나 본 연구에서는 에폭시에 포함된 공기를 완전히 제거하지 못하고 일부 초전도선들 사이에 Void가 존재한 상태로 Epoxy 함침과 경화가 이루어져 냉각과 전류인가 중에 초전도선의 움직임이 발생하여 그림 3과 같이 초전도 코일내에서 quench training 효과가 발생한 것으로 추측된다.

그림 5는 코일 D의 전류증가율의 변화에 따른 퀘치전류의 특성을 파악하기 위한 실험결과이다. 그림 5를 통해 퀘치전류는 전류증가율에 거의 무관함을 알 수 있으며, 최대 퀘치전류는 전류증가율이 15A/sec일 때 470A로 얻어졌다.

한편, 그림 6은 함침된 코일 E의 전류증가율의 변화에 따른 퀘치전류 특성으로서 코일 D와 마찬가지로 퀘치전류는 전류증가율에 거의 무관하며, 최대 퀘치전류는 전류증가율이 5A/sec일 때 467A로 얻어졌는데 이는 동일한 전류증가율에서 코일 D의 퀘치전류 457A 보다는 12A 높게 나타났다.

4. 결 론

장력의 유무 등의 권선조건 및 dry winding, wet winding, 에폭시 진공함침 등 함침방법 등 여러 조건에서 대구경 초전도 코일의 퀘치전류 특성을 알아보았다. 그 결과 초전도선의 항복강도 대비 20% 장력인 8kg/cm²의 장력으로 권선한 후 에폭시 함침한 코일E에서 467A의 최대 퀘치전류를 얻었다. SMES와 같이 고속 충방전 특성이 요구되는 초전도코일에서

전류증가율에 따른 특성의 파악이 필요하여 전류증가율의 변화에 따른 퀘치전류를 측정하였으나 전류증가율과 코일 제작 조건과는 무관하며, 동일한 전류증가율(3A/sec)에서는 코일B의 388A와 코일E의 466A로 함침된 코일의 퀘치전류가 함침 전 코일의 퀘치전류 보다 높게 얻어졌다.

이상의 결과로부터 대구경 초전도 코일의 퀘치전류를 높이기 위해서는 일정한 장력으로 권선한 후 에폭시로 진공함침하는 조건이 최적의 코일 제조법이며, 설령 함침이 완전하지 못해 트레이닝 효과가 나타날지라도 함침하지 않은 경우보다는 높은 퀘치전류가 얻을 수 있어 보다 효율적인 초전도코일을 제작할 수 있다. 이러한 연구결과는 현재 진행중인 전력 품질 보상을 목적으로 하는 SMES용 초전도코일개발에 활용하고 있으며 초전도코일의 최적화 및 SMES 시스템의 효율 향상을 위하여 이에 대한 계속적인 연구와 에폭시 함침기술에 대한 연구를 진행할 예정이다.

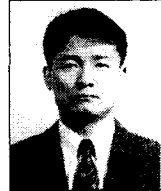
감사의 글

본 연구는 산업자원부의 민군겸용사업에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

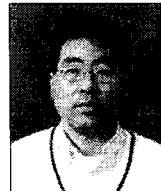
- [1] H. Ogihara, Superconducting Application Techniques, CMC, 1991[1]
- [2] F. M. asner, High Field Superconducting Magnets, Clarendon Press, Oxford, 1999
- [3] M. N. Wilson, Superconducting Magnets, Clarendon Press, Oxford, 1983
- [4] L. J. Donadieu and D. J. Rose, Conception and Design of Large Volume Superconducting Solenoid, Proceedings of the International Conference on High Magnetic Fields, MIT Press and John Wiley & Sons, Inc., pp.358-369, 1962
- [5] Y. Iwasa, Case Studies in Superconducting Magnets Design and Operational Issues, Plenum Press, 1994
- [6] K. Ryu, H.J. Kim, K.C. Seong, E.Y. Lee, H.B. Jin, K.S. Ryu, "Test results of the small model coil for a small-sized superconducting magnetic energy storage device", IEEE Trans. on Magnetism, Vol. 35, No. 5, September 1999.
- [7] H.J. Kim, K.C. Seong, J.W. Cho, S.W. Kim, Y. K. Kwon, K.S. Ryu, K. Ryu, "Fabrication and Test of the Model Coil for a SMES", IEEE Trans. on Appli. Superconductivity, Vol. 12, No. 1, pp.770-773, 2002.
- [8] 성기철, 김해중, 조전욱, 이연용, 권영길, 류강식, 류경우, "1MJ SMES 마그네트 제작 및 특성시험", 2001년도 학술대회논문집, 한국초전도·저온공학회, pp. 125-127, 2001.

저 자 소 개



조 전 욱 (趙 全 旭)

1960년 3월 2일 생, 1983년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업, 2001년 연세대학교 전기공학과 졸업(공학박), 1990년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원



배 준 한 (裵 俊 漢)

1966년 4월 30일 생, 1992년 건국대학교 전기공학과 졸업, 1994년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도 응용연구그룹 선임연구원



김 해 중 (金 海 鍾)

1965년 11월 25일생, 1993년 경상대학교 전기공학과 졸업, 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1995년~1996년 (주)현대정공 근무, 1996년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원



심 기 덕 (沈 基 德)

1973년 2월 1일 생, 1997년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 연구원



성 기 철 (成 耆 哲)

1956년 2월 20일생, 1980년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1983년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2002년 창원대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 1986년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 책임연구원