

0.7 MJ 펄스 코일용 초전도 케이블의 웨인치특성

류경우*. 김해종**, 조재옥***, 진홍범**, 이언용**, 성기철**, 류강식**

* 전남대학교, ** 한국전기연구소, *** 창원대학교

Quench Characteristics of the Superconducting Cables for the 0.7 MJ Pulsed Coil

K. Ryu*, H.J. Kim**, J.O. Cho***, H.B. Jin**, O.Y. Lee**, G.C. Sung**, K.S. Ryu

* Chunnam National Uni., ** KERI, *** Changwon National Uni.

Abstract – 0.7 MJ, 100 kVA UPS용 초전도 펄스 코일 제작을 위해 수 kA급 초전도 도체의 권선장력-웨인치전류사이의 관계를 실험적으로 조사하였으며, 시험결과에 근거하여 코일제작시 한계 권선장력을 도출했다.

1. 서 론

전류밀도가 수 백 A/mm^2 의 고 전류밀도로 운전해야 하는 UPS용 초전도 펄스 코일의 경우, 구조 및 운전 특성상 본질적으로 초전도선의 운동에 의한 외란(Disturbance)을 완전히 배제할 수 없어 작은 외란에 의해서도 코일 전체가 웨인치해 버리는 불안정성의 문제가 야기된다. 이와 같은 외란을 억제하기 위해서는 코일 제작시 재료강도 내에서 가능한 한 도체에 큰 권선장력을 주어 전자력에 의해 초전도선이 움직이지 않도록 해야한다. 따라서 초전도선의 운동에 관련되는 권선장력이 수 kA급 초전도 도체의 웨인치특성에 미치는 영향 및 한계 권선장력을 실험적으로 조사하였다.

2. 본 론

2.1 실험 및 방법

권선장력이 도체의 웨인치전류에 미치는 영향을 조사하기 위해 먼저 UPS용 초전도 펄스 코일에서 요구되는 수 kA급 초전도 도체를 선정 하였다. 시험도체로 써는 GEC Alsthom사의 직경 1 mm의 초전도선 9본을 케이블화시킨 폭 4.8 mm, 두께 1.8 mm의 초전도 케이블(이하 Alsthom9본 케이블이라 함)을 대상으로 하였으며 이에 대한 사양을 표1에 나타내었다.

총 길이 약 1.6 m의 Alsthom9본 케이블 및 초전도선을 직경 50 mm, 높이 130 mm의 보빈에 권선피치 10 mm, 권선방향을 Z형으로 하여 권선하였다. 특히 시험시 액체헬륨(LHe)으로의 열 전달을 좋게 하기 위해 보빈 주위에 축방향으로 깊이 1 mm, 폭 10 mm의 냉각체널을 균일한 간격으로 10개를, 도

체의 최소전반길이(Minimum Propagation Zone)를 고려하여 도체와 보빈이 접촉하는 폭을 5.7 mm로, 또한 도체의 보빈 축방향의 운동을 억제하기 위해 나선형의 홈을 가공 하였다.

표1 Alsthom9본 케이블의 사양

Cable	Width [mm]	4.8
	Thickness [mm]	1.8
	Number of strands	9
	Transposition pitch [mm]	46.0
	Transposition direction	Left
Strand	Diameter [mm]	1.0
	Cu/CuNi/NbTi Ratio	5/1/1
	Twist pitch [mm]	19.3
	Twist direction	Right

권선장력이 웨인치특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 시험샘플 준비시 권선장력을 초전도선의 경우 7.63, 10.18 및 12.73 kg/mm²로, Alsthom9본 케이블의 경우 9.90, 12.30 kg/mm²로 각각 달리하였으며, 웨인치시험에 이용된 장치의 개략도를 그림1에 나타내었다.

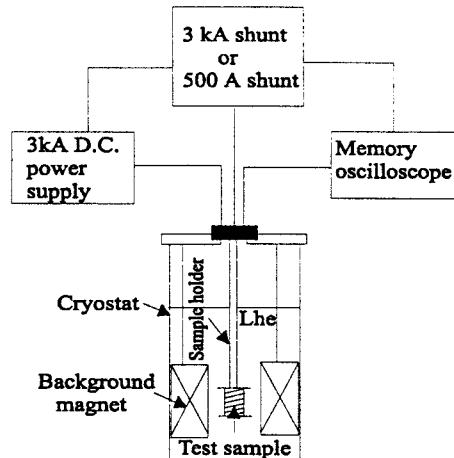


그림1 시험장치의 개략도

또한 전류리드와의 접속부에서의 과대한 발열에 의한 웨인치를 방지하기 위해 84 및 240 mm²의 동 편

조선 전류리드를 샘플홀다에 부착해 두 종류의 샘플홀다를 제작하였으며, 초기 펜치발생 위치의 검출을 위해 4개의 전압탭을 전류리드에 2개, 전류리드 양단에서 2단 멀어진 위치에 2개를 두었다. 시험샘플에 외부자계를 인가하기 위해 내직경 100, 외직경 240, 높이 240 mm, 자석상수 0.031 T/A인 초전도 자석의 내부중심에 시험샘플을 배치하였으며, UPS용 초전도 필스 코일에서 예상되는 외부자계 세기를 고려하여 3 - 6 T의 자계를 인가했다.

외부자계 발생용 초전도 자석은 5 V, 300 A, 시험샘플은 20 V, 3000 A 전원으로 각각 여자하였으며, 0.7 MJ, 100 kVA UPS용 초전도 필스 코일의 충·방전속도를 고려하여 시험시 여자속도에 따른 Alsthom9본 케이블의 펜치전류 열화특성을 조사하기 위해 50 - 600 A/s의 범위에서 시험을 행하였으며, 외부자계 발생용 초전도 자석 및 샘플 전류는 그림1의 선트저항으로 측정하여 메모리오실로스코프에 기록·저장하였다.

2.2 실험결과

본 시험에서 펜치전류는 펜치발생 직전의 최대 전류값으로, 최소 2회 이상의 펜치시험을 한 결과를 평균하여 취했으며, 매회 시험에서의 펜치전류는 평균치와 비교해 5 %이내 편차를 보였다. 또한 매회 펜치시험에서 샘플 준비시 부착해 두었던 전압탭의 전압을 확인하여 초기 펜치발생 위치를 확인한 결과 대부분 시험샘플의 중심부로부터 펜치가 발생되는 것을 확인하였다.

여자속도를 8.3 A/s, 초전도선의 권선장력을 7.63, 10.18 및 12.73 kg/mm²(NbTi/Cu 초전도선의 항복강도=약 30 kg/mm²)로 달리했을 때 펜치전류-외부자계 사이의 관계를 그림2에 나타내었다.

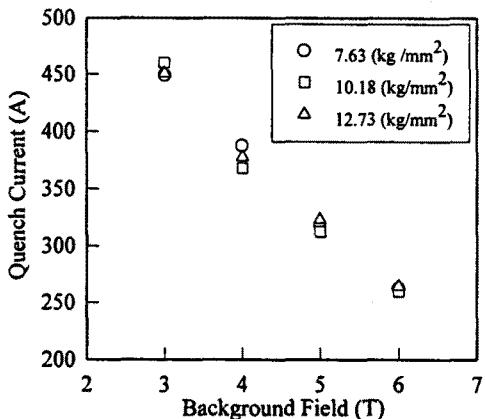


그림2 초전도선의 펜치전류-외부자계

그림2의 펜치전류는 외부자계에 의해 초전도선에 작용하는 전자력이 내부 반경방향일 때의 시험결과로써 초전도선의 권선장력에 거의 영향을 받지않음을 알 수 있다.

여자속도를 50 A/s, Alsthom9본 케이블의 권선장을 9.90 및 12.30 kg/mm²로 달리했을 때 펜치전류

-외부자계 사이의 관계를 그림3에 나타내었다.

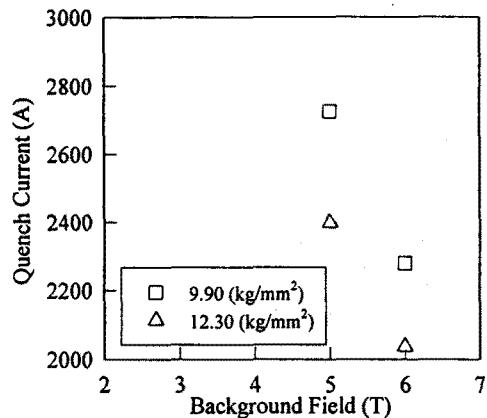


그림3 Alsthom9본 케이블의 펜치전류-외부자계

Alsthom9본 케이블의 펜치시험에서 외부자계가 3, 4 T의 경우 본 시험에 사용된 전원의 최대 전류인 3000 A에서 펜치가 발생하지 않았음을 의미하며, 그림3의 펜치전류는 Alsthom9본 케이블에 작용하는 전자력이 내부 반경방향일 때의 시험결과이다.

그림2 및 3의 결과로부터 초전도선의 펜치전류는 권선장력에 거의 영향을 받지않으며, 5, 6 T에서 권선장력이 9.90 kg/mm²일 때 Alsthom9본 케이블의 펜치전류는 거의 동일한 권선장력(10.18 kg/mm²)에서 초전도선의 펜치전류의 약 9배임을 알 수 있다. 그러나 Alsthom9본 케이블의 권선장력이 12.30 kg/mm²로 증가함에 따라 펜치전류는 거의 동일한 초전도선의 권선장력(12.73 kg/mm²)에서 펜치전류와 비교해 약 15 %정도 열화가 발생됨을 알 수 있다.

여자속도를 8.3 A/s, 초전도선의 권선장력을 12.73 kg/mm², 전자력의 방향을 달리했을 때 펜치전류-외부자계 사이의 관계를 그림4에 나타내었다.

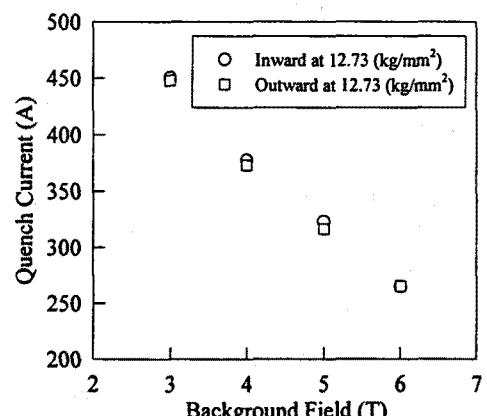


그림4 초전도선의 펜치전류-외부자계

그림4에서 ○는 초전도선에 작용하는 전자력이 내부 반경방향일 때, □는 외부 반경방향일 때의 펜치전류로써 초전도선에 작용하는 전자력 방향에 무관함을 알 수 있다.

Alsthom9본 케이블의 권선장력을 9.90 kg/mm^2 , 여자속도를 $50, 600 \text{ A/s}$ 로 달리했을 때 훈치전류-외부자계 사이의 관계를 그림5에 나타내었다.

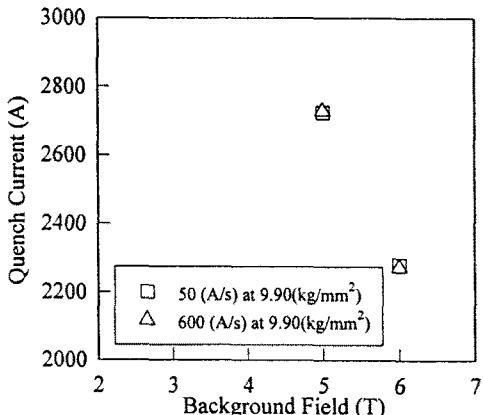


그림5 Alsthom9본 케이블의 훈치전류-외부자계

그림5의 훈치전류는 외부자계에 의해 Alsthom9본 케이블에 작용하는 전자력이 내부 반경방향일 때의 시험결과로써 Alsthom9본 케이블의 여자속도에 거의 영향을 받지않음을 알 수 있다.

2.3 실험결과에 대한 검토

외부자계 내에 있는 원형도체의 전류가 외부자계와 직각으로 흐를 때 도체 단위 면적당 방위각 방향의 전자력(σ_L)은 식(1)로 표현된다.

$$\sigma_L = JBR \quad (\text{N/m}^2) \quad (1)$$

여기서 $J(\text{A/m}^2)$ 는 도체의 전류밀도, $B(\text{T})$ 는 외부자계, $R(\text{m})$ 은 원형도체의 반경이다. 그림2의 결과에서 훈치전류가 초전도선의 권선장력에 거의 영향을 받지 않는 것은 권선장력 및 식(1)의 전자력이 모두 내부 반경방향으로 작용한 결과, 초전도선의 운동이 보빈에 억제되었기 때문으로, 그림4의 결과에서 훈치전류가 전자력 방향에 무관한 것은 외부 반경방향의 전자력(3, 6 T에서의 훈치전류를 기준할 때 식(1)의 전자력은 각각 $0.45, 0.5 \text{ kg/mm}^2$)이 권선장력(12.73 kg/mm^2)과 비교해 무시될 정도로 작아 초전도선의 외부 반경방향으로의 운동이 불가능했기 때문으로 생각된다.

그러나 그림3의 결과에서는 Alsthom9본 케이블의 권선장력이 12.30 kg/mm^2 로 증가함에 따라 훈치전류가 거의 동일한 초전도선의 권선장력(12.73 kg/mm^2)에서 훈치전류와 비교해 약 15 %정도 열화가 발생하는 것은 시험샘플 권선시 인가한 87 kg 의 장력이 각각의 초전도선에 균일하게 분포되지 않고 몇몇 초전도선에 집중된 결과, 기계적 변형에 의한 열화로 생각된다. 따라서 0.7 MJ, 100 kVA UPS용 초전도 펄스 코일에 Alsthom9본 케이블을 사용할 경우, 최대 권선장력은 훈치전류의 열화가 발생하지 않는 9.90 kg/mm^2 와 열화가 시작되는 12.73 kg/mm^2 사이로 생각된다.

그림5의 결과에서 Alsthom9본 케이블의 훈치전류가 여자속도에 거의 영향을 받지 않는 것은 시험샘플에 인가한 외부자계가 5, 6 T로 높아 초전도선의 임계전류가 작을 뿐만아니라 통전전류의 주파수가 낮아 시변 자기자계에 의해 발생될 수 있는 과도적 자기자계 손실이 작기 때문이며, Alsthom9본 케이블에 사용된 초전도선 단면내의 필라멘트 및 동 안정화재가 고 저항의 CuNi장벽으로 포위되어 있어 필라멘트간의 결합손실초차도 충분히 억제되고 있기 때문으로 생각되며, 또한 시험샘플 준비시 충분한 냉각체널의 확보로 인해 LHe으로의 충분한 냉각결과로 생각된다. 일반적으로 낮은 외부자계하에서 용융되는 고 전류밀도의 초전도선의 경우 우수한 냉각구조로 해도 주파수 증가에 따라 특히 저주파수 영역(약 20 Hz이하)에서 열·자계 불 안정성에 기인한 훈치전류의 급격한 열화가 발생되는 반면 높은 외부자계(약 1 T이상)에서는 훈치전류의 열화는 발생되지 않는 것으로 보고되고 있다[1].

3. 결 론

그림2 및 4의 결과로부터 초전도선의 훈치전류는 권선장력 및 전자력 방향에 거의 영향을 받지 않고, 그림3의 결과로부터 5, 6 T에서 권선장력이 9.90 kg/mm^2 일 때 Alsthom9본 케이블의 훈치전류는 거의 동일한 권선장력(10.18 kg/mm^2)에서 초전도선의 훈치전류의 약 9배임을 알 수 있는 반면 Alsthom9본 케이블의 권선장력이 12.30 kg/mm^2 로 증가함에 따라 훈치전류는 거의 동일한 초전도선의 권선장력(12.73 kg/mm^2)에서 훈치전류와 비교해 약 15 %정도 열화가 발생됨을 알 수 있고, 그림5의 결과로부터 Alsthom9본 케이블의 훈치전류는 여자속도에 거의 영향을 받지않음을 알 수 있다. 따라서 0.7 MJ, 100 kVA UPS용 초전도 펄스 코일에 Alsthom9본 케이블을 사용할 경우, 초전도선의 운동에 의한 외란을 최대한 억제하기 위해서는 가능한 한 권선장력을 크게해야 하지만 케이블의 훈치전류 열화를 방지하기 위해서는 최대 권선장력을 훈치전류의 열화가 발생하지 않는 9.90 kg/mm^2 와 열화가 시작되는 12.73 kg/mm^2 사이 값으로 하는 것이 바람직하다고 생각된다.

(참 고 문 헌)

- [1] 류경우, “초임계헬륨에서 고전류 교류 초전도선의 훈치전류 열화”, 전기학회논문지, 46권 1호, pp.64-69, 1997년