

0.7 MJ UPS용 초전도 케이블의 켄치 특성

논문
11-7-11

Quench Characteristics of the Superconducting Cable for a 0.7 MJ UPS

류 경우*, 김 해종**

(Ryu Kyung Woo, Kim Hae Jong)

Abstract

Recently a few MJ superconducting magnetic energy storage (μ SMES) devices become commercially available as one of the energy storage devices for uninterruptible power supply (UPS) systems. For such a μ SMES device, a few kA class superconducting cables with high current density, high stability and excellent pulse characteristics are required. To acquire data for the superconducting cables related to design and fabrication of a 0.7 MJ μ SMES device, we tested critical currents and quench characteristics for several winding tensions and various ramping rates especially. It is shown from the results that winding tensions have much influence on quench currents of the μ SMES devices.

Key Words(중요용어) : Uninterruptible Power Supply(무정전전원), Superconducting Magnetic Energy Storage(초전도자기에너지저장), Superconducting Cable(초전도케이블), Quench Current(켄치전류), Quench Propagation Velocity(켄치전파속도)

1. 서 론

최근 미국을 중심으로 전력의 질에 매우 민감한 전기·전자 및 정보 기기와 같은 전력 부하에 양질의 전력을 공급하는 무정전전원(Uninterruptible power supply, 이하 UPS라 함)시스템의 에너지저장 요소로서 급속 충·방전이 가능한 수 MJ급 이하의 초전도 자기에너지 저장(Superconducting magnetic energy storage, 이하 μ SMES라 함)장치를 이용하여 상업화에 성공한 바 있다.

이와 같이 UPS용 에너지 저장 요소로서의 μ SMES장치는 본질적으로 수백 A/mm²의 고전류 밀도 운전 및 우수한 펄스 운전 특성이 요구되며, 이를 달성하기 위해서는 μ SMES장치 내에 효과적인 냉각을 위한 냉각 채널의 설치가 불가피하게 되며, 이와 같은 구조의 μ SMES장치에서는 여자시 발생

되는 자기력에 의해 초전도 케이블의 구성 요소인 초전도선의 운동 즉 초전도선 사이의 마찰에 의한 국부적 발열을 완전히 배제할 수는 없다. 특히 UPS용 μ SMES장치와 같이 고전류 밀도로 운전되는 초전도 코일에 있어서는 초전도선의 운동에 의해 발생되는 대단히 작은 량의 국부적 발열에 의해서도 코일 전체가 켄치되어 버리는 불안정성의 문제가 발생된다. 따라서 UPS용 초전도 코일을 안전하게 운전시키기 위해서는 먼저 코일의 제작시 초전도 케이블의 기계적 강도 한계 내에서 가능한 한 초전도선이 움직이지 않도록 권선 장력을 크게해야 할 것이며, 또한 발열에 의해 초전도선이 국부적으로 켄치된다 할지라도 코일 전체로 전파하지 않도록 냉각 채널 및 냉각 스페이스의 폭등을 적절히 선정해야 한다.

본 연구에서는 에너지저장 용량이 0.7 MJ인 UPS용 초전도 코일의 설계 및 제작에 사용될 수 kA급 초전도 케이블에 대한 켄치 특성뿐만 아니라 초전도 케이블의 기본 구성 요소인 초전도선에 대한 임계전류, 켄치 전파속도 및 최소 전파영역등을 실험적으로 조사하였다.

*전남대학교 공과대학 전기공학과
(광주광역시 북구 용봉동 300, Fax: 062-530-1749,
E-mail: kwryu@orion.chonnam.ac.kr)

**한국전기연구소 초전도응용연구사업팀
1998년 3월 28일 접수, 1998년 5월 19일 심사완료

2. 본론

2.1 샘플 및 시험 방법

초전도 케이블로써는 0.7 MJ UPS용 초전도 코일의 설계 및 제작에 필요한 수 kA급을 선정하였으며, 케이블을 구성하는 초전도선의 단면 내부에는 CuNi 장벽으로 구분된 다량의 동(Cu) 안정화재가 존재하며, NbTi 초전도체를 외부에 배치시켜, 특히 안정성에 중점을 둔¹⁾ 직경 1 mm의 초전도선 9본을 트위스트(Twist)한 GEC Alsthom사의 초전도 케이블(이하 Alsthom 9본 케이블이라 함)을 조사 대상으로 하였으며 이에 대한 단면도 및 상세 사양을 그림 1 및 표 1에 각각 나타내었다.

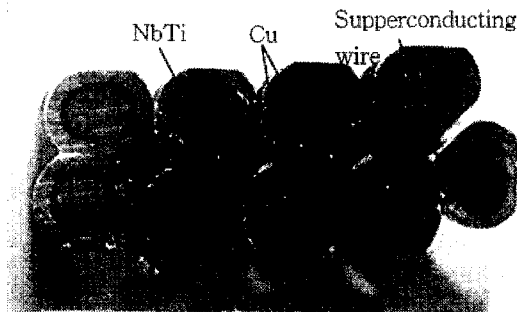


그림 1. Alsthom 9본 케이블의 단면
Fig. 1. Cross-section of the Alsthom 9 cable

표 1. Alsthom 9본 케이블의 사양
Table 1. Parameters of the Alsthom 9 cable

Wire	Cu/CuNi/NbTi Ratio	5/1/1	
	RRR	120	
	Diameter	1.0 mm	
	Filament diameter	5 μm	
	Number of filaments	5,712	
	Filament twist pitch	19.5 mm	
	Filament twist direction	Right	
	Yield strength	40×10 ⁶ kgf/m ²	
	Insulation	Bare	
Cable	Width	4.8 mm	
	Thickness	1.8 mm	
	Number of strands	9	
	Transposition pitch	45.0 mm	
	Transposition direction	Left	
	Insulation	Material	Kapton tape
		Thickness	25 μm
Width		10 mm	

Alsthom 9본 케이블 및 케이블을 구성하는 초전도선에 대한 퀀치 특성을 조사하기 위해 총 길이 약 1.6 m의 케이블 및 초전도선을 직경 50 mm, 높이 130 mm의 베크라이트 보빈에 권선 피치 10 mm, 권선 방향을 Z형으로 하여 샘플을 제작하였다. 특히 초전도선의 퀀치 전과속도 및 최소 전과영역등을 조사하기 위해 직경 0.17 mm(절연피복의 두께를 제외)인 Cr20%Ni 히터선을 초전도선 주위에 길이 약 5 mm로 감았으며 전압탭 및 히터에 대한 상세 배열을 그림 2에 나타내었다.

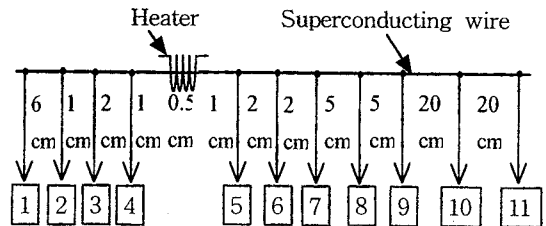


그림 2. 히터 및 전압탭의 배열
Fig. 2. Arrangement of a heater and voltage taps

또한 액체 헬륨으로의 열전달을 좋게 하기 위해 보빈 외부에 축 방향으로 길이 1 mm, 폭 10 mm의 냉각 채널 10개를 균일한 간격으로 설치하였으며, 샘플의 축 방향의 운동을 억제하기 위해 두께 1 mm, 폭 5.7 mm의 스페이서에 나선형의 홈을 가공하여 케이블 및 초전도선을 고정시켰다. 또한 전류 리드와 샘플과의 접속부에서 과도한 주열 발열에 의해 퀀치가 발생하는 것을 방지하기 위해 단면적이

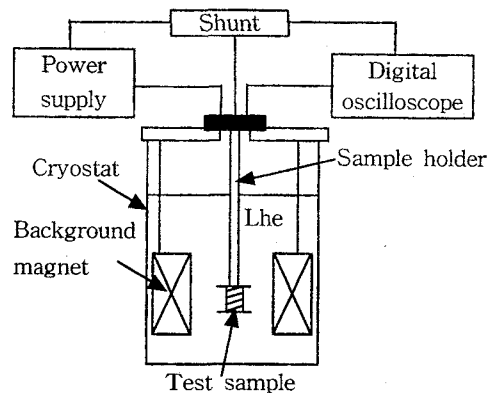


그림 3. 시험 장치의 개략도
Fig. 3. Schematic of the test apparatus.

충분히 큰 84 및 240 mm²의 동 편조선을 각각 FRP 봉에 고정시켜 샘플홀대를 제작하였으며, 본 시험에 이용된 장치의 개략도를 그림 3에 나타내었다.

퀠치 특성 시험에서 외부 자계를 샘플에 인가하기 위해 샘플 외부에 내직경 100 mm, 외직경 240 mm, 높이 240 mm 및 자석상수 0.031 T/A인 솔레노이드형 초전도 자석을 배치시켰으며, 이 자석은 300 A, 5 V 전원으로, 샘플은 3000 A, 10V 전원으로, 초전도선의 운동에 의해 발생하는 국부적 발열을 실험적으로 모의하기 위해 설치한 히터는 50 A, ±5 V의 펄스 전원으로 각각 여자하였으며 최초의 퀠치 발생 위치를 확인하기 위해 샘플에는 최소 4 개 이상의 전압탭을 전류리드와 샘플과의 접속부에 2개, 접속부에서 2 턴 떨어진 곳에 2개를 각각 두었으며, 시험에서 샘플의 최초 퀠치 발생 위치를 확인한 결과 샘플에 접속된 두 전압탭 사이에서 발생하는 것을 확인하였다. 또한 초전도선의 임계 전류 - 외부 자계 특성에 대한 조사에서는 0.7 MJ UPS용 초전도 코일에서 예상되는 외부 자계를 고려하여 3 - 6 T 범위에서 조사하였으며, 임계 전류는 0.1 μV/cm를 기준으로 하여 측정하였다. 그리고 Alsthom 9본 케이블 및 초전도선의 퀠치 특성은 초전도선의 운동을 억제시키는 권선 장력과 밀접한 관계가 있을 것으로 생각되어 샘플 제작시 권선 장력을 각각 달리 하여 제작하였으며, 마지막으로 0.7 MJ UPS용 초전도 코일의 펄스운전 특성을 고려하여 충·방전 속도 즉 샘플의 여자 속도가 퀠치 특성에 미치는 영향을 50 - 3000 A/s의 여자 범위에서 조사하였다.

2.2 실험 결과

0.7 MJ UPS용 초전도 코일의 제작에 사용될 초전도선 및 케이블의 임계 전류를 여러 가지의 외부 자계에 대해 조사한 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림4에서 샘플 제작시 초전도선의 권선 장력은 10.1 kgf/mm²로 하였으며, 외부 자계에 의한 자기력의 방향을 내부 반경 방향이 되도록 하여 초전도선의 운동에 의한 퀠치를 충분히 배제시켰으며 여자 속도는 5 A/s로 하였다. 또한 그림4에서 Alsthom 9본 케이블에 대한 임계 전류는 초전도선에 대해 측정된 값에 선의 본 수 즉 9본을 곱하여 계산된 임계 전류를 나타낸다.

그림 5에는 그림 4의 시험 샘플에 설치한 그림 2의 히터를 이용해 초전도선을 국부적으로 가열시켰을 때 퀠치 전파속도를 여러 가지의 운전 전류에 대해 조사한 결과를 나타내었다.

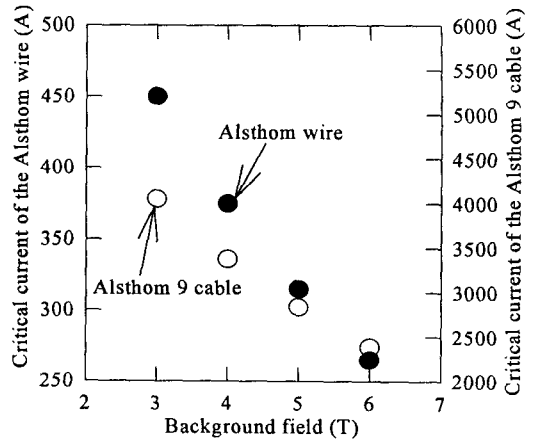


그림 4. Alsthom 9본 케이블 및 초전도선의 임계 전류 - 외부 자계 관계

Fig. 4. Critical current v.s. background field for the Alsthom 9 cable and wire

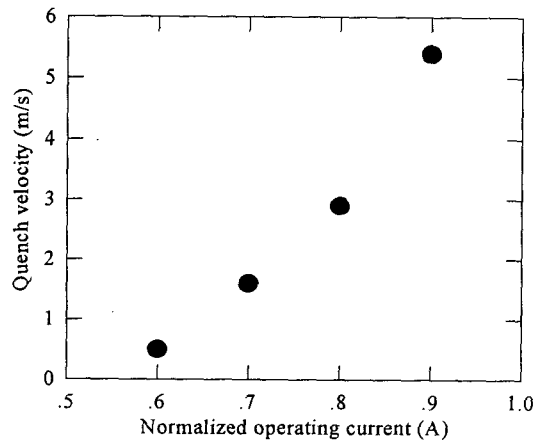


그림 5. 4 T에서 Alsthom 초전도선의 퀠치 전파 속도 - 정규화된 운전 전류 관계

Fig. 5. Quench propagation velocity v.s. normalized operating current for the Alsthom wire at 4 T

그림 5의 시험 결과에서는 0.7 MJ UPS용 초전도 코일의 설계 결과로부터²⁾ 초전도선이 경험하는 최대 외부 자계가 4.51 T임을 참고하여 4 T의 외부 자계를 초전도선에 인가하였으며, 초전도선의 운동에 의한 발열 지속 시간이 수 백 μs임을³⁾ 고려하여 히터용 전원의 최소 한계 펄스 폭인 10 ms로 하였다. 특히 초전도선의 퀠치 전파속도는 그림 2에서 5번 전압탭과 9번 전압탭 사이의 거리 즉 14 cm를 진행

하는데 소요된 시간으로 나눈 값으로 하였다.

어떤 히터 전류를 기준으로 이보다 조금 작은 전류(본 시험의 $I_{op}/I_c = 0.6$ 에서 히터 전류 = 1.02 A)에 대해서는 초전도선이 퀘치로부터 회복되는 반면, 조금 큰 전류(본 시험의 $I_{op}/I_c = 0.6$ 에서 히터 전류 = 1.038 A)에 대해서는 퀘치가 초전도선 전체로 전파되는 경계(이하 안정성 경계라 함)가 존재함과 안정성 경계를 제외하고는 히터 전류가 1.18 A에서 1.96 A로 약 66 % 증가에도 불구하고 퀘치 전파속도는 0.52 m/s에서 0.6 m/s로 약 15 % 정도밖에 증가하지 않는다는 사실로부터 초전도선의 퀘치 전파속도는 안정성 경계를 제외하면 히터 전류 즉 발열량에 거의 무관함을 알 수 있다.

또한 다수본의 초전도선을 트위스트시켜 만든 Alsthom 9본 케이블은 그 구조 특성상, 코일의 제작시 케이블에 인가한 권선 장력이 각각의 초전도선에 불균일하게 분포 될 가능성이 크고, 따라서 케이블의 퀘치 특성은 권선 장력과 밀접한 관계가 있을 것으로 생각되어 여러 가지의 권선 장력에 대하여 Alsthom 9본 케이블의 퀘치 전류를 조사하였으며 그 결과를 그림 6에 나타내었다.

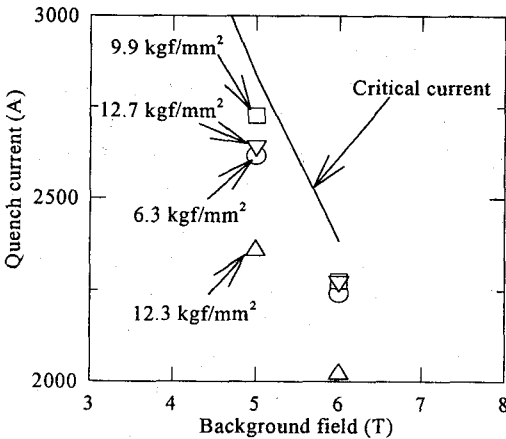


그림 6. Alsthom 9본 케이블의 퀘치 전류 - 외부 자계 관계

Fig. 6. Quench current v.s. background field for the Alsthom 9 cable

그림 6에서 퀘치 전류는 퀘치 직전의 전류 값으로 하였고, 수회의 시험 결과를 평균하여 취하였으며, 각각의 시험 결과에서 퀘치 전류의 편차는 평균값의 3 % 이내였다. 또한 외부 자계에 의한 샘플의 자기력 방향은 내부 반경 방향으로 하였고, 여자 속도는

50 A/s로 하였으며, 특히 3, 4 T의 외부 자계에 대해서는 전원의 최대 한계 전류인 3000 A에서도 샘플이 퀘치되지 않았음을 의미한다. 또한 샘플의 권선 장력은 초전도선의 한계 응력이 40 kgf/mm²임을 참조하여 항복 강도의 약 30 % 이하의 범위에서 조사하였다.

그림 6의 결과에서 샘플의 권선 장력이 6.3 kgf/mm²(45 kgf)에서 9.9 kgf/mm²(70 kgf)사이에서는 앞서 지적한 바와 같이 퀘치 전류의 편차가 3 % 이내임을 고려하면 5, 6 T의 외부 자계에서 Alsthom 9본 케이블의 퀘치 전류는 본 시험 범위에서 권선 장력에 무관함을 알 수 있다. 또한 샘플의 권선 장력이 각각 12.3 kgf/mm²(87 kgf) 및 12.7 kgf/mm²(90 kgf)로 증가하면 Alsthom 9본 케이블의 퀘치 전류는 12.3 kgf/mm²의 권선 장력에 대해서는 6.3 및 9.9 kgf/mm²일 때 퀘치 전류와 비교하여 약 10 % 정도 열화가 일어나는 반면 12.7 kgf/mm²의 권선 장력에 대해서는 퀘치 전류의 열화가 일어나지 않는 불안정한 상태임을 알 수 있다. 또한 샘플의 자기력 방향이 퀘치 전류에 미치는 영향을 조사하기 위해 자기력 방향을 외부 반경 방향으로 하여 조사하였으나 Alsthom 9본 케이블의 퀘치 전류는 변화가 없었다.

그림 6에서 권선 장력이 약 12 kgf/mm²부근에서 Alsthom 9본 케이블의 퀘치 전류가 불안정하게 되는 원인을 규명하기 위해서 초전도선의 권선 장력을 각각 7.6, 10.1 및 12.7 kgf/mm²로 달리하여 초전도선의 퀘치 전류를 조사하였으며 그 결과를 그림 7에 나타내었다

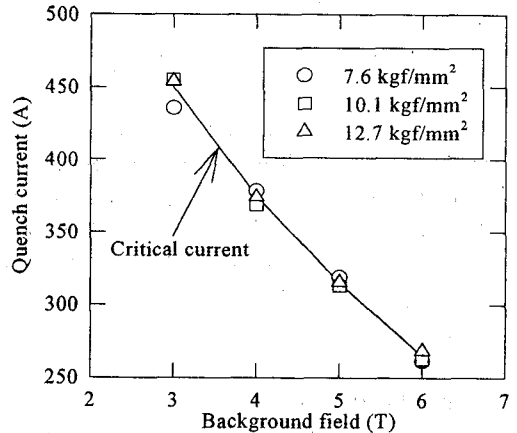


그림 7. 초전도선의 퀘치 전류 - 외부 자계 관계

Fig. 7. Quench current v.s. background field for the Alsthom wire

그림 7에서 외부 자계에 의한 샘플의 자기력 방향은 그림 6의 시험과 동일하게 하였고, 여자 속도는 8 A/s로 하였다.

그림 7의 결과에서 초전도선의 권선 장력을 Alsthom 9본 케이블의 권선 장력과 동일하게 12.7 kgf/mm²로 하였음에도 불구하고 초전도선의 퀘치 전류는 열화가 일어나지 않음을 알 수 있다.

또한 0.7 MJ UPS용 초전도 코일의 펄스 운전 특성을 고려하여 충·방전 속도 즉 샘플의 여자 속도에 따른 Alsthom 9본 케이블의 퀘치 전류를 조사하였으며, 그 결과를 그림 8에 나타내었다.

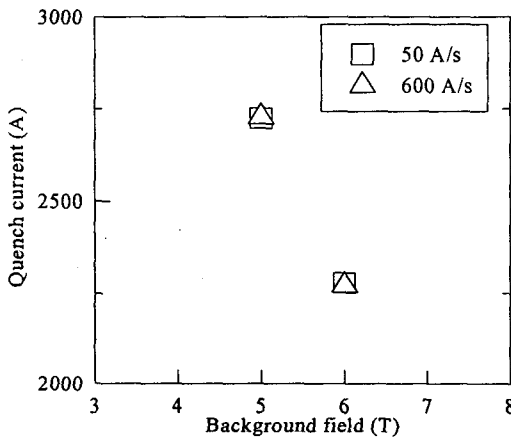


그림 8. Alsthom 9본 케이블의 퀘치 전류 - 외부 자계 관계

Fig. 8. Quench current v.s. background field for the Alsthom 9 cable

그림 8에서 샘플의 권선 장력은 9.9 kgf/m²로 제작하였고, 외부 자계에 의한 자기력 방향은 그림 6의 시험과 동일하게 하였으며, 여자 속도는 50 A/s 및 600 A/s로 하였다. 또한 시험에 사용된 전원의 한계 전류 변화율인 3000 A/s의 여자 속도까지 시험을 하였으나 퀘치 전류의 열화는 관측되지 않았다. 따라서 케이블의 길이가 짧은 샘플의 경우에는 한해는 Alsthom 9본 케이블의 퀘치 전류는 여자 속도에 무관하다는 것을 알 수 있다.

2.3 실험 결과에 대한 검토

그림 6의 시험 결과에서 케이블의 권선 장력이 약 12 kgf/mm²부근에서 Alsthom 9본 케이블의 퀘치 전류가 불안정한 이유는 샘플의 제작시 인가된 약 90 kgf의 큰 장력이 수 본의 초전도선에 집중된 결

과 초전도선의 장력이 이의 항복 강도 즉 40 kgf/mm²를 초과한 결과 초전도선에는 기계적 손상이 초래되어 퀘치 전류의 열화가 발생되는 것으로 생각된다. 이는 그림 7에서 초전도선의 장력을 Alsthom 9본 케이블의 퀘치 전류가 불안정하게 되는 권선 장력으로 샘플을 제작해도 초전도선의 퀘치 전류는 열화하지 않는다는 사실로부터 유추 할 수 있다.

또한 그림 6의 결과에서 Alsthom 9본 케이블의 퀘치 전류가 자기력 방향에 무관한 것은 다음의 원인으로 설명될 수 있다. 외부 자계에 노출된 원형 도체 전류가 자계에 직각방향으로 흐를 때 도체 단위 면적당 원주 방향의 자기력(σ_L)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 J 는 도체의 전류 밀도(A/m²), B 는 외부 자계(T), R 은 원형 도체의 반경(m)이다. 그림 6의 결과에서 Alsthom 9본 케이블의 퀘치 전류가 자기력 방향에 무관한 이유는 자기력이 내부 반경 방향으로 작용하는 경우에 있어서는 항상 내부 반경 방향으로 작용하는 권선 장력과 식(1)에 의한 자기력이 모두 내부 반경 방향으로 작용한 결과, 초전도선의 운동이 보빈에 의해 억제되었기 때문으로 설명할 수 있고, 식(1)에 의한 자기력이 외부 반경 방향으로 작용할 경우에도 케이블 샘플의 직경이 50 mm, 6 T에서 퀘치 전류 즉 약 2250 A를 식(1)에 대입할 때 외부 반경 방향의 자기력은 4.8 kgf/mm²로 샘플 제작시 Alsthom 9본 케이블에 인가했던 항상 내부 반경 방향으로 작용하는 최소 권선 장력인 6.3 kgf/mm²보다도 작아 초전도선의 외부 반경 방향으로의 운동이 불가능했기 때문으로 설명될 수 있다.

그리고 그림 7에서 초전도선의 퀘치 전류는 초전도선의 임계 전류와 거의 비슷한 반면 그림 6에서 Alsthom 9본 케이블의 퀘치 전류는 케이블의 임계 전류보다 약 7%정도 열화가 일어나는 것을 알 수 있으며 그 이유는 케이블 내에는 도체뿐만 아니라 공간(Void)도 존재하기 때문에 샘플의 여자 시 발생하는 자기력에 의해 초전도선이 움직인 결과로 생각된다.

그림 8의 결과에서 Alsthom 9본 케이블의 퀘치 전류가 여자 속도에 무관한 것은 설계된 0.7 MJ UPS용 초전도 코일이 제작되어 운전될 때 실제 경험하게 되는 자계가 4.51 T임을 고려하여, 케이블 샘플에 인가한 외부 자계가 5, 6 T로 대단히 커, 초전도선의 임계 전류 밀도가 낮아졌기 때문으로 사료

되며, 일반적으로 낮은 외부 자계 즉 약 1 T정도 이하에서는 초전도선의 전류 밀도가 대단히 커, 특히 저 주파수 영역 즉 약 20 Hz이하에서 주파수 증가에 따라 열·자계 불안정성이 그 중요 원인으로 작용하여 초전도선의 퀘치 전류가 급격히 열화되는 것으로 보고되고 있다⁴⁾.

3. 결 론

0.7 MJ UPS용 초전도 코일의 설계 및 제작에 사용될 Alsthom 9본 케이블에 대한 연구 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) UPS용 초전도 코일의 제작시 초전도선의 운동에 의해 발생하는 케이블의 퀘치를 최대한 억제하기 위해서는 재료의 항복 강도 내에서 가능한 한 권선 장력을 크게 해야 하며, 또한 권선 장력의 불균일한 분포로 야기 될 수 있는 케이블의 퀘치 전류 열화가 발생되지 않도록 해야한다.
- 2) UPS용 초전도 코일의 펄스 운전 특성을 고려하여 길이가 짧은 케이블 샘플에 대하여 여자 속도를 50 A/s에서 3000 A/s까지 시험한 결과 퀘치 전류의 열화는 발생하지 않았다. 그러나 UPS용 초전도 코일에서 처럼 길이가 수 km의 케이블이 사용되는 코일에서는 충·방전 시, 코일 자신의 자계가 수 T일뿐만 아니라 코일 전류와 동일한 주파수로 자계도 변함으로 차후 이와 같은 시변 자계하에서 케이블의 퀘치 전류 특성을 조사할 필요가 있다.
- 3) UPS용 초전도 코일의 설계 및 제작에 선행하여 필수적으로 요구되는 Alsthom 9본 케이블의 임계 전류 - 외부 자계 데이터와 초전도 코일의 보호 시스템의 구성에서 대단히 중요한 Alsthom 9본 케이블을 구성하는 초전도선의 퀘치 전류에 대한 데이터를 확보했다.

참 고 문 헌

1. P. Maccioni and B. Turk, " Influence of copper location on stability of composites made of superconducting filaments in a highly resistive matrix," *Cryogenics*, vol. 31, pp. 738-748, August 1991.
2. 류강식, 진홍범, 류경우, 정승기의 다수, "UPS용 SMES의 소형 초전도 코일 및 전력변환기 요소 기술 개발에 관한 중간보고서(2차년도)," 통산산업부, pp. 208-227, 1997
3. Y. Iwasa, "Case Study in Superconducting Magnets," Plenum, pp.268-273, 1994.
4. 류경우, "초임계헬륨에서 고전류 교류 초전도선의 퀘치전류 열화," 대한전기학회 논문지, 46권 1호, pp. 64-70, 1997.