

## 음향방출을 이용한 극저온 환경하에서의 초전도 계자코일의 퀸칭탐지에 관한 연구

이준현<sup>\*</sup>, 이민래<sup>\*</sup>, 권영길<sup>\*\*</sup>, 류강식<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> 부산대학교 기계공학부, <sup>\*\*</sup> 한국전기연구소 초전도 응용연구사업팀

### Application of AE Technique for On-line monitoring of Quench in superconducting coil at Cryogenic Environment

J.H. Lee<sup>\*</sup>, M.R. Lee<sup>\*</sup>, Y.K. Kwon<sup>\*\*</sup>, K.S. Ryu<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> School of Mechanical Engineering, Pusan National University

<sup>\*\*</sup> Applied Superconductivity Project Team, KERI

jhlee@hyowon.pusan.ac.kr, lmin97@hyowon.pusan.ac.kr

**Abstract** - An acoustic emission(AE) technique has been used to monitor and diagnose quenching phenomenon in racetrack shaped superconducting magnets at cryogenic environment of 4.2K. The ultimate goal is to ensure the safety and reliability of large superconducting magnet systems by being able to identify and locate the sources of quench in superconducting magnets. The characteristics of AE parameters have been analyzed by correlating with quench number, winding tension of superconducting coil and charge rate by transport current. It was found in this study that there was good correlation between quench current and AE parameters. The source location of quenching in superconducting magnet was also discussed on the correlation between magnet voltage and AE energy.

#### 1. 서 론

일반적으로 가속기용 위글러(Wiggler) 및 초전도 발전기용으로 주로 사용되고 레이스트랙형 초전도 계자코일은 기존 발전기의 계자코일을 초전도화한 것으로서 원리적으로는 기존의 발전기와 동일하지만 구조적으로는 초전도 계자코일을 냉각하기 위한 복잡한 냉각시스템 및 단열시스템이 요구된다. 이러한 초전도 발전기용 계자코일은 전자기력에 의한 마찰뿐만 아니라 운전 중 회전으로 인한 외란에 의해서 취약부분이 국부적으로 발열됨으로서 퀸칭이 발생하여 초전도 계자코일의 성능을 저하시키게 된다. 일반적으로 4.2K의 극저온 환경하에서 피 냉각체인 초전도체의 비열은 상온보다 약 1/100~1/10000배 정도로 작아기 때문에 매우 적은 열 침입에도 선재의 온도가

급상승하게 된다. 따라서 초전도선이 손상을 입을 온도에 도달하기 전에 이러한 국부적인 발열 위치를 조기에 검출하여 퀸칭에 대한 신뢰성을 확보하는 것이 필수적이다<sup>[1]</sup>.

한편, 음향방출(Acoustic Emission, 이하 AE)이란 일반적으로 재료가 외부로부터 응력을 받아 변형을 일으킬 때나 물체내의 균열이 발생하거나 성장할 때 원자의 재배열이 일어나며, 이 때 물체는 급격한 에너지 해방에 의해 탄성파(elastic wave)를 방출하게 되는데, 이러한 탄성파 방출을 음향방출이라고 한다. 특히 AE는 재료내부에 있어서의 소성변형, 균열의 발생 및 성장 등의 동적과정을 모니터링 할 수 있을 뿐만 아니라 외부에서 작용하는 응력이 재료의 탄성한계보다 훨씬 낮은 경우에 있어서도 재료내부의 미소 균열선단부 같은 곳에서 발생하는 응력집중에 의한 소성변형의 미소변형을 감지할 수 있다. 그리고 다른 비파괴적인 방법으로는 접근하기 어려운 극저온 환경 하에서 재료의 건전성을 평가하는데 매우 유용한 수단이다.<sup>[2-3]</sup>

따라서, 본 연구에서는 레이스트랙형 초전도 계자코일에 대한 단열 극저온 환경(4.2K)하에서의 퀸칭특성을 모니터링하기 위해서 음향방출기법을 이용하여 퀸칭시 발생하는 마그네트 전압 및 전류신호특성과 AE 특성과의 상호관계를 분석함으로써 퀸칭 발생원(quench source location)을 규명하고, 또 초전도 마그네트에 대한 진단기법으로서의 타당성을 평가하고자 하였다.

#### 2. 재료 및 실험방법

##### 2.1 재료 및 시험편

초전도발전기에 사용되는 계자코일은 임계전류(IC)가 설계 기준인 운전전류(operating current) 200A 보다 큰 러시아에서 제작된 NbTi 초전도 선재로서 계자코일 1개당 초전도선의 길이는 약 405m이고, 총 소요권선길이는 1620m가 된다. 연구에 사용된 레이스트랙형 초전도계자코일은

직경 1mm에 NbTi 필라멘트가 60개 함침 되어  
 져있는 초전도선재(#1)를 사용하여 계자코일을  
 제작하였다. Fig. 1은 NbTi 선재의 다심 필라  
 멘트(multi-filamentary)에 대한 단면사진을  
 나타낸 그림이며, Table 1에 계자코일의 사양을  
 나타내었다.

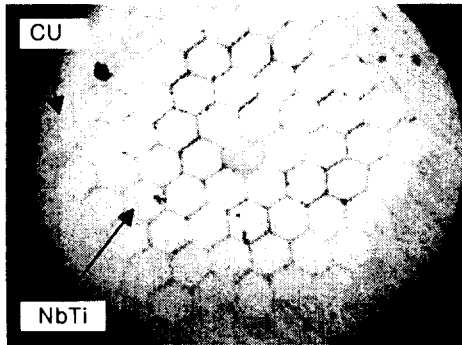


Fig. 1 Cross section of typical multifilam  
 tary NbTi superconducting coil (584A at

Table 1. Specification of NbTi supercond  
 ting coil

Superconductor	NbTi
Diameter	1[mm]
Number of filament	60
Number of turns	532(turns)
Total length of wire	400[m]
Bobbin type	SUS316L

## 2.2 실험장치 및 방법

본 연구에서는 레이스트랙형 초전도 계자코일  
 의 퀘칭 성능에 따른 AE특성을 평가하기 위하여  
 Fig. 2와 같은 극저온 측정 시스템을 구성하였다  
 먼저 Fig. 3에 나타난 바와 같이, 계자코일을 보  
 빈(bobbin) 홀더에 부착하여 상온으로부터 열차  
 폐를 위하여 극저온 챔버 내에 설치한다. 그런  
 다음 초전도 코일에 여자전류(excitation current)  
 를 공급하기 위한 직류전원장치(D.C. Powe  
 Supply)와 계자코일을 current lead로써 연결  
 다. 그리고 운전전류(operating current)에 따  
 자장 측정은 극저온용 Hall 센서를 이용하여 측  
 정하며, 이에 따른 Hall 센서 부착위치는 계자코  
 일의 안쪽 가장자리와 중심부 및 중심에서 위쪽  
 으로 78mm 위치한 곳에 각 각 부착하였다. 한  
 편, AE센서는 Fig. 3에 보는 바와 같이 레이스트  
 랙 직선부 및 상, 하 곡선부 가장자리에 각 각 1  
 개씩 모두 3개의 극저온 센서를 부착한 다음, 수  
 신감도를 높이기 위하여 Coupling agent(진공  
 리스)를 바른 후, 접착 테이프로 압착하였다. 그  
 리고 AE센서에서 검출된 신호를 증폭하기 위해  
 서 프리앰프(1220A)를 사용하여 40dB로 증폭  
 고 또한 100-300kHz의 대역필터를 통하  
 Background Noise를 제거한다. 본 연구에 사

된 AE센서는 PAC社의 극저온 센서(R15LT,  
 625kHz)이며, AE 측정장비로는 MISTRAS  
 2001를 사용하였다. 그리고 퀘칭시 전압상승에  
 따른 AE신호의 파형분석을 위해서 디지털 오실  
 로스코프(Lecroy LC334M)를 사용하였다.

실험은 레이스트랙형 계자코일을 극저온 챔버  
 에 넣은 다음, 액체 질소를 극저온 챔버의 main  
 dewar에 주입하여 예냉(82.8K) 시킨 후, 헬륨  
 스로 가압 하면서 내부의 액체질소를 외부로 빼  
 내고 잔존하는 극저온 챔버내부의 액체질소를 완  
 전히 제거하기 위해서 진공 배기와 헬륨을 충전  
 하는 작업을 반복하는 퍼징처리를 한다. 그런 다  
 음 액체 헬륨을 극저온 챔버 내부 main dewar로  
 옮겨서 초전도 상태(4.2K)로 만든다. 한편, 인  
 전류는 3, 30, 40, 50A/sec로 증가시켜 가면서  
 그네트 전류에 대한 자장발생 및 계자코일의 양  
 단 전압과 그에 따른 AE 신호특성을 측정하였  
 다. 본 연구에서는 액체헬륨 shower시 bubble현  
 상으로 인하여 발생하는 AE신호를 제거하기 위  
 하여 극저온 챔버 내부가 충분히 안정된 상태에  
 서 threshold level를 설정하였으며, 최하 55  
 60dB에서 안정화됨을 알 수 있었다. 이는 실온상  
 태에서 보다 약 18dB이상 높게 나타났다

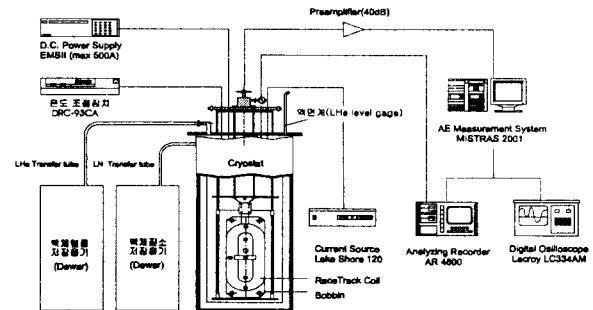


Fig. 2 Schematic diagram of experim  
 apparatus

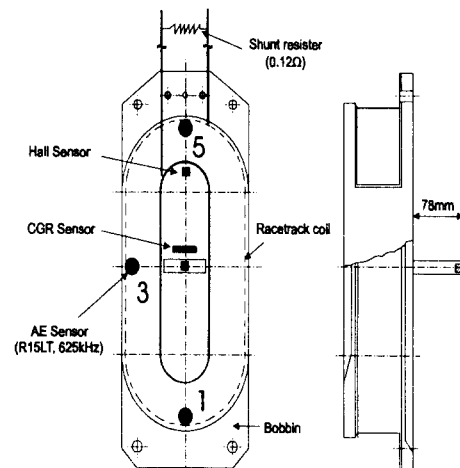


Fig. 3 Sensor position of  
 racetrack magnet

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 퀘치시 AE신호 및 퀘치특성

앞에서 언급한 바와 같이, 일반적으로 초전도 마그네트 계자코일의 퀘치요인은 초전도 선재의 미소슬립과 같은 기계적인 동요에 의한 국부적인 발열로 인하여 도체가 열화되기 때문에 발생한다. 보고된 바에 의하면<sup>[4-6]</sup>, 초전도 마그네트 코일의 퀘치현상에 따른 AE신호특성은 일반적으로 2가지 타입으로 나타난다.

첫 번째는 AE신호가 퀘치 직전 도체 내의 마그네트 전압변화를 수반하여 발생하는 경우와 두 번째는 마그네트 신호와는 전혀 상관없이 AE신호가 발생하는 경우이다. 전자의 경우는 주로 선재의 미소슬립과 같은 기계적인 동요에 기인하며, 후자의 경우는 절연재와 같은 삽입재료 및 함침에 의한 에폭시 균열에 의해 발생하는 경우이다. 즉, 손상을 받은 마그네트의 경우, AE신호는 주로 기계적인 이벤트(선재의 미소슬립이나 인접선재간 마찰 및 에폭시 균열 등)에 의해서 AE신호가 방출된다. 따라서 AE신호특성과 마그네트 전압 및 전류특성을 고려하면 조기 퀘치에 대한 신뢰할 수 있는 발생원을 평가할 수 있다.

#### 3.2 AE 이벤트와의 상관관계

Fig. 4는 레이스트랙형 계자코일에 대한 퀘치 반복수에 따른 퀘치전류특성과 AE이벤트수의 변화를 나타낸 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이, 계자코일에 대한 초기 퀘치전류는 270A로서 short sample 임계전류(5T, 580)의 약 47%에서 퀘치가 발생하였으며 퀘치수가 반복됨에 따라서 397A정도에서 최종적으로 포화됨을 알 수 있다. 결과에서 보여 주는 바와 같이 트레이닝 효과(training effect)에 기인하여 퀘치전류가 초기보다 크게 향상되었음을 알 수 있다. 트레이닝 효과는 초전도 마그네트에 있어서 반복적인 퀘치에 의해서 임계허용전류 즉 퀘치전류가 점차적으로 상승하는 현상을 말한다.

한편, 그림에 나타나 있는 바와 같이, 각 센서에 대한 AE이벤트수를 살펴보면 퀘치전류와 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 마그네트 전류가 증가할수록 선재 내에 발생하는 전자기력(Lorentz force)이 상대적으로 크게 작용하여 선재간 미소슬립이 더욱 활성화되기 때문에 퀘치전류가 증가할수록 AE 이벤트도 증가되는 것으로 판단된다.

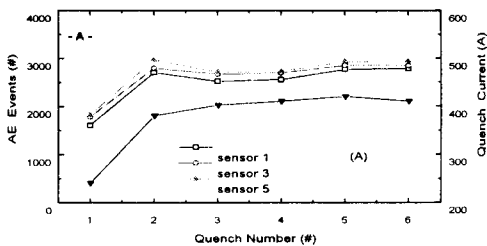


Fig. 4 Quench current and AE events versus quench number

#### 3.3 AE 에너지와의 상관관계

Fig. 5는 계자코일의 2회째 (run 2) 퀘치에 한 퀘치시간에 따른 AE에너지 및 누적분포를 나타낸 그림이다. 그림에 도시된 바와 같이, 마그네트 전류와 누적 AE에너지를 통하여 각 센서에서의 에너지를 비교해 보면, 3개의 센서 중 레이스트랙 상부센서에서 AE에너지가 최대치(peak)를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 퀘치시 도체의 국부적인 발열에 따른 급격한 온도 상승에 기인하여 열에너지 방출이 가장 크고 이와 같은 퀘치점에서 검출되는 AE신호 역시 최대가 된다는 사실을 고려하면 이러한 최대 AE에너지는 결국 퀘치 발생원(source)으로부터 검출된 AE신호라는 사실을 확실하게 알 수 있다. 따라서 위의 경우에 있어서는 레이스트랙 상부 극선부에서 퀘치가 발생하였을 가능성이 가장 큰 것으로 판단된다.

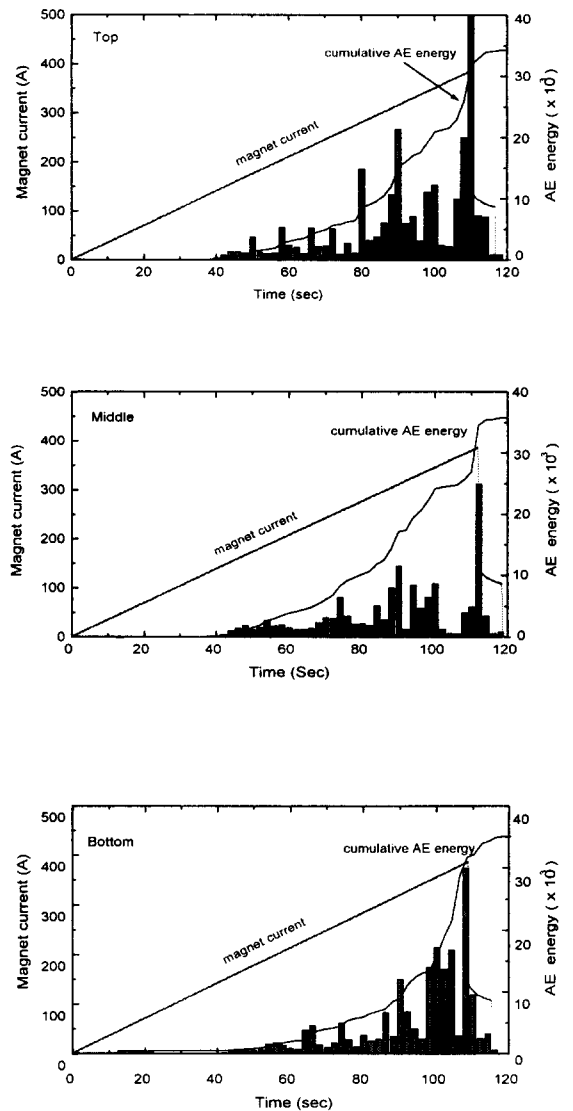
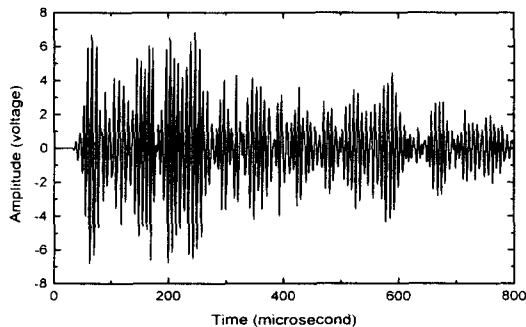


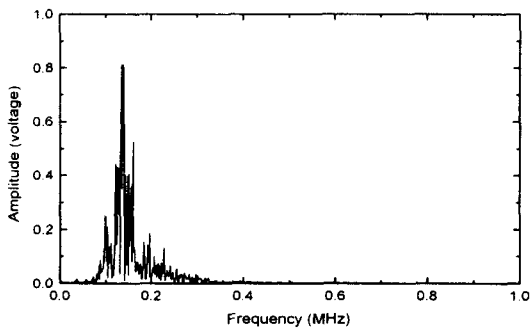
Fig. 5 Location of quench source using AE energy (run 2)

### 3.4 퀘치발생원에 대한 위치표정

본 연구에서는 퀘치 발생원에 대한 위치표정에 있어서, 두 가지의 데이터를 분석함으로써 평가할 수 있었다. 즉, AE신호특성과 퀘치시 마그네트 전압 및 전류특성을 이용하여 퀘치 발생위치를 분석하였다. Fig. 6은 계자코일의 퀘치시 AE 파형 및 주파수를 분석한 결과에 대해서 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이, 퀘치시 AE 파형은 고진폭(90dB이상)의 긴 지속시간(800  $\mu$  sec)을 가지며, 주파수 특성은 대략 140KHz정도임을 알 수 있다.



(a) AE waveform



(b) FFT

Fig. 6 AE waveform and FFT due to quench events

Fig. 7은 퀘치시 3개의 센서에서 측정된 AE 파형을 나타낸 결과로서, 퀘치시 상부 곡선부에 위치한 센서로부터 직선부 및 하부 곡선부에 위치한 센서까지의 시간지연이 나타나고 있다. 따라서 위의 경우에는 퀘치발생위치가 상부 곡선부에서 발생하였을 가능성 가장 높게 나타난다고 볼 수 있다 이와 같이 각 센서에서의 신호 도달시간차를 이용하여, 계자코일에 대한 AE신호 분포상태를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 계자코일의 상부 곡선부에서 국부적으로 AE 이벤트가 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 선재의 미소슬립에 의해서 AE거동이 레이스트랙상부에서 더 많이 발생함으로써, 이 지역에 대한 퀘치 가능성이 가장 높다. 이는 앞선 Fig. 5의 마그네트 전류 및 AE에너지 결과와 비교해 볼

때 퀘치현상과 잘 일치됨을 보여주고 있다. 따라서 위와 같이 국부적인 발열 위치를 조기에 검출함으로써 이 지역에서의 열을 신속히 제거하고 냉각조건을 좋게 함으로써 초전도 계자코일의 성능을 향상시킬 수 가 있으리라 판단된다.

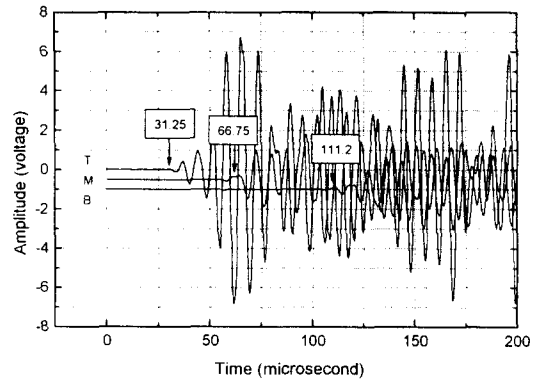


Fig. 7 Oscilloscope trace of a quench event

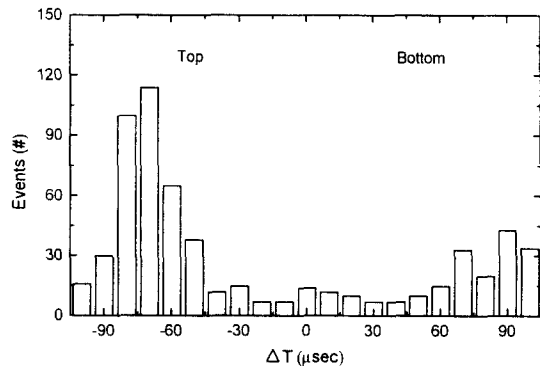


Fig. 8 AE distribution histogram expressed in terms of signal arrival time difference

## 4. 결론

본 연구에서는 초전도 발전기의 핵심요소인 레이스트랙형 NbTi 초전도 계자코일에 대한 퀘치 특성 및 퀘칭탐지를 위한 건전성을 평가하는데 있어서 음향방출기법(Acoustic Emission Technique)을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

[1] 퀘치실험을 통하여, 퀘치시 발생하는 AE신호 특성과 마그네트 신호특성은 마그네트의 퀘치 발생원을 규명하는데 아주 유용함을 확인 할 수 있었다. 즉, AE에너지 및 에너지 누적분포와 마그네트 전압, 전류신호특성을 분석하여 도체의 안정성 및 퀘치검출에 대한 적합성 평가가 가능하였다.

[2] 퀘치 발생원에 대한 위치표정은 모두 3개의 센서를 이용하여 평가하였으며, 퀘치시 각 센서에서의 신호도달시간 및 마그네트 전류와 더불어 AE 신호가 가장 큰 성분을 분석함으로써 퀘치 위치를 정량화 할 수 있었다.

한편, 본 연구를 통하여, 퀘치시 코일의 정확한 퀘치위치를 측정하기 위해서는 보다 보완적인 실험방법이 요구되며 향후, 계자코일을 함침한 경우의 퀘치실험과 비교, 검토해 볼 필요가 있다. 특히 함침시 극저온 환경에서 에폭시 균열과 같은 기계적인 특성과 이에 따른 AE특성을 평가하는 것도 중요하리라 판단된다.

### [참고문헌]

- [1] 한국전기연구소, “차세대 고효율 발전플랜트 기술개발”, 1997
- [2] 이준현, 이민래, “음향방출에 의한 Nb3Sn 복합초전도 테이프의 미시적 변형거동 특성 평가” 한국비파괴검사학회 춘계학술대회 논문집, pp.289-300, 1998
- [3] Nondestructive Handbook, “Acoustic Emission Diagnostic and Monitoring Techniques for Superconducting Magnets”, Vol. 5, pp. 389-401, 1987
- [4] H. Yoshimura, A. Ueda, M. Morita et al. , “Acoustic emission monitoring on a model field windign for the 70MW class superconducting generator”, Cryogenics, Vol. 32, No.5, pp. 502-507, 1992
- [5] O.O. Ige, A.D. McIntuff, Y. Iwasa “Acoustic emission monitoring results from a Fermi dipole”, Cryogenics, Vol. 26, pp.131-140 1985
- [6] K. Ikizawa, N. Takasu, Y. Murayama “Instability of Superconducting Racetrack Magnets”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 27, No. 2, pp. 2128-2131, 1991

-