

# 음향방출기법을 이용한 극저온 환경하에서 초전도 계자코일의 퀘칭탐지 적용에 관한 연구

이준현\* · 이민래\*\* · 손명환\*\*\* · 권영길\*\*\*  
(1999년 4월 15일 접수)

## Application of Acoustic Emission Technique for On-Line Monitoring of Quench in Racetrack Superconducting Coil at Cryogenic Environment

Joon-Hyun Lee, Min-Rae Lee, Myöng-Hwan Sohn and Young-Kil Kwon

**Key Words:** Racetrack Superconducting Magnet(레이스트랙형 초전도 마그네트), Training Effect(트레이닝효과), Quenching Phenomenon(퀘칭현상), Acoustic Emission(음향방출), Quench Source Location(퀘칭발생원 위치표정)

### Abstract

It is well recently recognized that quench is one of the serious problems for the integrity of superconducting magnets, which is mainly attribute to the rapid temperature rising in the magnet due to some extrinsic factors such as conductor motion, crack initiation etc. In order to apply acoustic emission(AE) technique effectively to monitor and diagnose superconducting magnets, it is essential to identify the sources of acoustic emission. In this paper, an acoustic emission technique has been used to monitor and diagnose quenching phenomenon in racetrack shaped superconducting magnets at cryogenic environment of 4.2K. For these purposes special attention was paid to detect AE signals associated with the quench of 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. In addition, the source location of quench in superconducting magnet was also discussed on the basis of correlation between magnet voltage and AE energy.

### 1. 서론

최근 에너지 문제와 관련된 새로운 첨단 기술 분야에 있어서 초전도 기술의 응용이 세계 선진국을 중심으로 활발히 진행 중에 있다. 특히 초전도 기술의 주요 핵심부분인 초전도 마그네트는 최근 국내에서도 정부 주도 첨단기술개발과제의 하나인 핵융합장치(KSTAR, Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)뿐만 아니라 자기공

명영상진단기(Magnet Resonance Imaging System, MRI), 고체 핵자기 공명분광기(Nuclear Magnetic Resonance Spectrometer System, NMRI)등 응용범위가 확대되면서 초전도 마그네트의 개발기술은 물론 개발된 초전도 마그네트의 응용 및 실제 주요 핵심부품으로서 효율적인 적용을 위한 신뢰성 확보와 관련한 연구의 필요성이 강하게 대두되고 있다. 일반적으로 초전도 마그네트의 신뢰성 확보와 관련된 가장 중요한 문제는 초전도 마그네트 가동 중에 예기치 못하게 나타나는 퀘칭(quench)현상으로서 초전도 마그네트의 열화현상(degradation)에 기인하여 취약부분의 국부적인 발열에 의해서 초전도 상태가 깨어지게 되면 심각한 에너지 손실을 유발하게된다. 즉, 퀘칭현상이란 초전도 마그네트를 여자 시키면 각종 교란

\* 회원, 부산대학교 기계공학부  
E-mail : johlee@hyowon.cc.pusan.ac.kr  
TEL : (051)510-2430 FAX : (051)512-9835

\*\* 부산대학교 대학원

\*\*\* 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀

이 발생하게 되는데, 특히 전자기적인 힘에 의한 코일내부 선재의 움직임과 그로 인한 인접선재 사이의 내부마찰 등에 의한 발열로 도체의 온도가 상승하여 도체에 상전도부부를 발생시킴으로서 초전도성을 잃어버리게되는 현상이다. 따라서, 초전도 마그네트의 효율적인 적용을 위하여는 가동 중 발생하는 퀘칭현상의 모니터링이 중요한 연구 과제로 대두되고 있다.<sup>(1)</sup>

일반적으로 직접적인 퀘칭 검출은 전압탭에 의한 신호를 모니터링 하는 방법이 가장 일반적이다. 하지만 외부시변자장 하에서 권선의 동작시 S/N비가 작아 퀘칭의 검출이 매우 어려울 뿐만 아니라 많은 수의 증폭기를 요구함으로써 민감도를 향상시키기 위한 비용이 상당히 증가하는 단점이 있다.

초전도 마그네트의 퀘칭검출을 위한 음향방출기법<sup>(2,3)</sup> 적용은 1970년 후반에 처음으로 시도되어 최근에 이르기까지 많은 연구가 진행되고 있다. O. Tsukamoto, J. F. Maguire<sup>(4)</sup>은 비합침 초전도 마그네트에서 도체사이의 절연재인 space와 도체간 슬립 현상에 대해서 AE를 이용하여 실험적으로 규명하였다. H. Nomura, Y. Iwasa<sup>(5)</sup>은 초전도 마그네트내에서 플럭스 거동시 자기력(magnet force)에 의한 탄성변형으로 유발되는 상전이 영역을 평가하고 탄성체 모델을 기초로 한 초전도 마그네트에서의 AE거동에 대한 이론적인 방법을 제시하였다. H. Fujita<sup>(6,7)</sup> 등은 에폭시가 합침된 초전도 마그네트의 극저온 환경(4.2K)하에서 에폭시 균열에 의한 불안정성에 대해서 음향방출기법을 이용하여 이론 및 실험적으로 평가하였다. 그러나 이들 연구의 대부분은 퀘칭에 따른 AE현상 자체에 대한 연구들로서 실제 초전도 마그네트 가동시 퀘칭발생원(Quench source) 위치검출의 실질적 적용을 위한 구체적인 언급이 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 레이스트랙형 초전도 계자코일에 대한 퀘칭특성을 모니터링하기 위해서 음향방출기법을 이용하여 퀘칭시 발생하는 마그네트 전압 및 전류신호특성과 AE 특성과의 상호관계를 분석함으로써 퀘칭발생원 위치를 규명하고, 또 초전도 마그네트에 대한 진단기법으로서의 타당성을 평가하고자 하였다.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1 재료 및 시험편

본 연구에서의 초전도발전기용 계자코일은 임계전류(Ic)가 설계 기준인 운전전류(operating current) 200A 보다 큰 NbTi 초전도선재로서 계자코일 1개당 초전도선의 길이는 약 405m이고, 총 소요권선길이는 1620m이다. 본 연구에 사용된 레이스트랙형 초전도 계자코일은 직경 1mm에 NbTi 필라민트가 60여개 합침 되어져 있는 초전도선재를 사용하여 계자코일을 제작하였다. Fig. 1은 NbTi 선재의 다심 필라민트(multi-filamentary)에 대한 단면사진을 나타낸 그림이며, Table 1에 계자코일의 사양에 대해서 나타내었다.

### 2.2 실험장치 및 방법

먼저 적합한 초전도 계자코일을 선택하기 위해서, 두 가지 레이스트랙형 NbTi 초전도 계자코일을 제작하여 2차원 해석과 더불어 여자상태 및 퀘칭시의 과도상태에서 방출되는 AE신호특성을 평가하여 이를 근거로 초전도발전기용 레이스

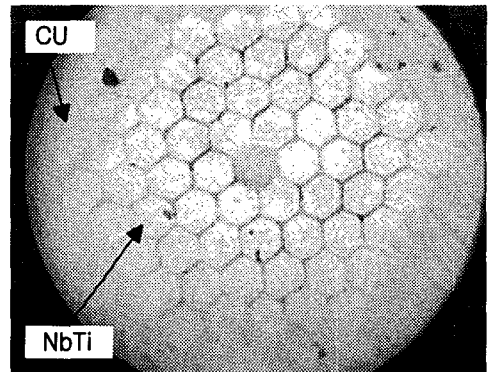


Fig. 1 The cross section of typical multifilamentary NbTi superconducting coil

Table 1 Specification of NbTi superconducting coil

| Superconductor       | NbTi       |
|----------------------|------------|
| Diameter             | 1[mm]      |
| Number of filaments  | 60         |
| Number of turns      | 532[turns] |
| Total length of wire | 405[m]     |
| Bobbin type          | SUS316L    |

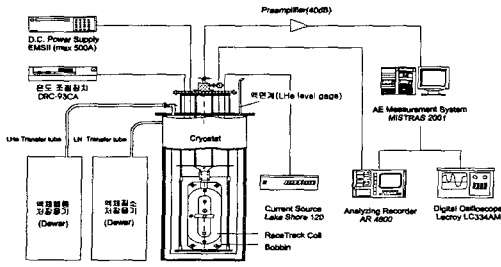


Fig. 2 The schematic diagram of experimental apparatus

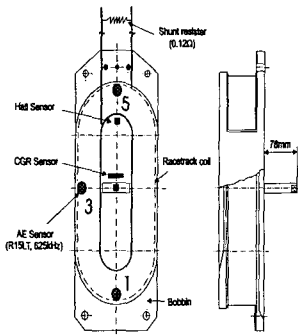


Fig. 3 Sensor position of the racetrack magnet

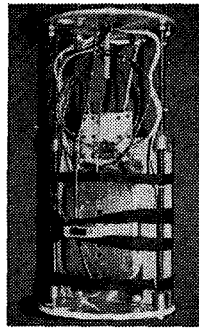


Fig. 4 The photograph of the test coil

트랙 계자코일을 선택, 제작하여 마그네트 성능 및 AE특성평가에 대한 실험을 수행하였다.

본 연구의 기초실험결과<sup>(6)</sup>에서 일반적인 보빈(bobbin)형태로서 양쪽에 직선부를 가지는 레이스트랙형과 선재가 보빈에 정확히 밀착 되도록 하기 위하여 직선부를 개선한 레이스트랙형 중에서 보빈의 형상을 개선한 경우가 그렇지 않은 경우보다 켄치전류( $I_q$ )특성이 우수한 결과를 보였다. 따라서 초전도 발전기를 제작할 때의 보빈형태는 직선부를 개선한 경우를 선택하여 제작하였다. 본 연구에서는 레이스트랙 초전도 계자코일의 켄치 성능에 따른 AE특성을 평가하기 위하여 Fig. 2와 같은 극저온 측정 시스템을 구성하였다.

그림에서 보는 바와 같이 본 시스템은 레이스트랙형 계자코일을 극저온 상태로 유지시키기 위한 액체 질소 및 액체 헬륨 dewar, 그리고 헬륨 레벨을 측정하기 위한 LHe 레벨 게이지와 Cryostat라고 불리는 단일 진공용기로 구성되어 있다. 일반적으로 Cryostat(이하, 극저온 챔버)는 중심축에 액체헬륨용기와 그것을 둘러싼 진공 단

열층 혹은 액체 질소층으로 이루어져 있다.

먼저 Fig. 3에 나타난 바와 같이, 계자코일을 보빈 홀더에 부착하여 상온으로부터 열차폐를 위하여 극저온 챔버 내에 설치한다. 그런 다음 초전도 코일에 여자전류(excitation current)를 공급하기 위한 직류전원장치(D.C. Power Supply)와 계자코일을 current lead로써 연결한다. 그리고 운전전류(operating current)에 따른 자장측정은 극저온용 Hall 센서를 이용하여 측정하며, 이에 따른 Hall 센서 부착위치는 계자코일의 안쪽 가장자리와 중심부 및 중심에서 위쪽으로 78mm 위치한 곳에 각각 부착하였다. 그리고 보빈 윗면에 탄소저항 온도센서(CGR sensor)를 부착하여 인가 전류에 따른 극저온 온도를 측정하였으며, 켄치에 따른 온도상승으로 인한 초전도 계자코일의 손상을 방지하기 위하여 보호저항(상온  $0.12\Omega$ )을 코일 양단에 병렬로 연결하고, 켄치시 전압측정을 위해서 Voltage tap을 설치한다. 한편, AE센서는 Fig. 3에 보는 바와 같이 레이스트랙 직선부 및 상, 하 곡선부 가장자리에 각각 1개씩 모두 3개의 극저온 센서를 부착한 다음, 수신감도를 높이기 위하여 Coupling agent(진공그리스)를 바른 후, 접착 테이프로 압착하였다. 그리고 AE센서에서 검출된 신호를 증폭하기 위해서 프리앰프(1220A)를 사용하여 40dB로 증폭하고 또한 100~300kHz의 대역필터를 통하여 Background Noise를 제거한다.

본 연구에 사용된 AE센서는 PAC社의 극저온 센서(R15LT, 625kHz)이며, AE 측정장비로는 MISTRAS 2001을 사용하였다. 계자코일에 대한 전원공급은 EM社의 EMS II Power Supply와 AMI Current Controller를 이용하여 전류를 공급하고 자장은 Lake Shore 120 Current Source로 일정 전류(100mA)를 공급하였다. 발생전압은 Analyzing Recorder(Yokowa AR4800)를 이용하여 측정하였으며, 냉각온도측정은 Lake Shore DRC-93A 온도조절장치를 사용하였다. 그리고 켄치시 전압상승에 따른 AE신호의 광형분석을 위해서 디지털 오실로스코프(Lecroy LC334M)를 사용하였다.

실험은 레이스트랙형 계자코일을 극저온 챔버에 넣은 다음, 액체 질소를 극저온 챔버의 main dewar에 주입하여 예냉(82.8K) 시킨 후, 헬륨가스로 가압 하면서 내부의 액체질소를 외부로 빼내고 극저온 챔버내부에 잔존하는 액체질소를 완전히 제거하기 위해서 진공 배기와 헬륨을 충전하

는 작업을 반복하여 피징처리를 한다. 그런 다음 액체 헬륨을 극저온 챔버 내부 main dewar로 옮겨서 초전도 상태(4.2K)로 만든다. 본 연구에서는 액체헬륨 shower시 bubble현상으로 인하여 발생하는 AE신호를 제거하기 위하여 극저온 챔버 내부가 충분히 안정된 상태에서 threshold level를 설정하였으며, 최저 55~60dB에서 안정화됨을 알 수 있었다. 이는 실온상태에서 보다 약 18dB이상 높게 나타났다. Fig. 4는 실험을 위해 플랜지에 보빈을 부착한 계자코일의 형상을 나타낸 사진이다.

### 3 실험결과 및 고찰

#### 3.1 퀘칭시 AE신호 및 퀘칭특성

앞에서 언급한 바와 같이, 일반적으로 초전도 마그네트 계자코일의 퀘칭요인은 초전도 선재의 미소슬립과 같은 기계적인 동요에 의한 국부적인 발열로 인하여 도체가 열화되기 때문에 발생한다. 보고된 바에 의하면,<sup>(9,10)</sup> 초전도 마그네트 코일의 퀘칭현상에 따른 AE신호특성은 일반적으로 2가지 타입으로 나타난다.

첫 번째는 AE신호가 퀘칭 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 합침에 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 퀘칭에 대한 신뢰할 수 있는 발생원을 평가할 수 있다.

##### 3.1.1 AE 이벤트와의 상관관계

Fig. 5는 앞에서 언급한 바와 같이 형상이 개선된 레이스트랙형 계자코일에 대한 퀘칭 반복수에 따른 퀘칭전류특성과 AE이벤트수의 변화를 나타낸 결과이다.

그림에서 보는 바와 같이, 계자코일에 대한 초기 퀘칭전류는 363A로서 short sample 임계전류(5T, 580)의 약 61%에서 퀘칭이 발생하였으며 퀘

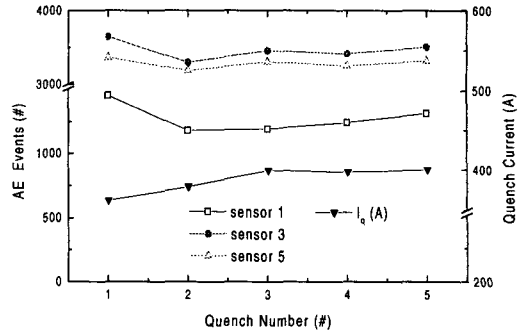


Fig. 5 The quench current and AE events versus quench number

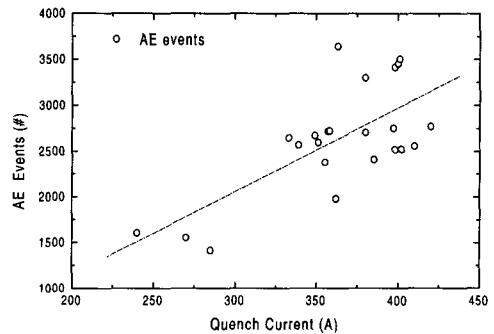


Fig. 6 AE event counts versus quench current

칭수가 반복됨에 따라서 401A 정도에서 최종적으로 포화됨을 알 수 있다. 결과에서 보여 주는 바와 같이, 트레이닝 효과(training effect)에 기인하여 퀘칭전류가 초기보다 향상되었음을 알 수 있다. 트레이닝 효과는 초전도 마그네트에 있어서 반복적인 퀘칭에 의해서 임계허용전류 즉, 퀘칭전류가 점차적으로 상승하는 현상을 말한다.

한편, 그림에 나타나 있는 바와 같이, 각 센서에 대한 AE이벤트수를 살펴보면 퀘칭전류와 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 퀘칭전류가 증가할수록 AE이벤트도 증가하는 것으로 판단된다. Fig. 6은 퀘칭전류에 따른 AE이벤트수와 관계의 관계를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 퀘칭전류가 높을수록 일반적으로 AE이벤트수가 증가하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 7은 시간에 따른 AE이벤트수의 변화를 나타낸 결과로서 초기에는 AE이벤트가 거의 발생하지 않다가 30~40초 부근에서 중간 직선부와 상부 곡선부에 부착된 센서에서 이벤트가 급격하게 발생하여 40초 이후에는 비교적 일정하게 발생함을 알 수 있다. 그리고 이 때 마그네트 계자코일에 인가된 전류는 130~140A 정도로서 퀘칭 전류의 약 30~40% 정도에서 미소슬립과 같은 기계적인 동요가 가장 많이 발생한다는 사실을 알 수 있다.

3.1.2 AE 진폭과의 상관관계

Fig. 8은 계자코일의 AE신호에 대한 진폭(amplitude)분포를 나타낸 그림으로서, 일반적으로 대부분 신호들은 60~65dB사이의 저 진폭 신호들이 가장 많고, 일부 신호는 90dB이상의 고 진폭 신호들이 검출됨을 알 수 있다. 이러한 90dB이상의 고 진폭 신호들은 주로 퀘칭시 발생하는 신호들로서 신호의 지속시간이 길고 에너지가 큰 것이 특징이다.

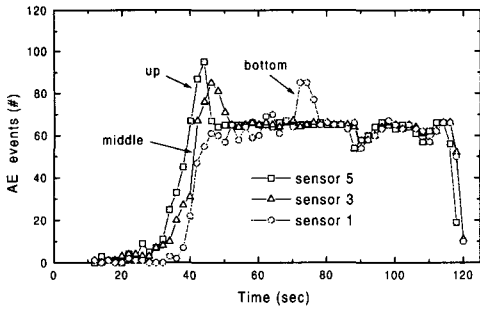


Fig. 7 AE event counts behavior of the second quench number

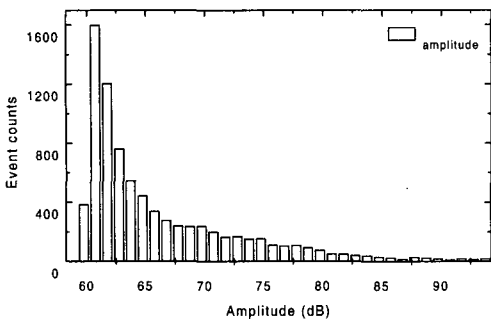


Fig. 8 AE amplitude distribution histogram of field coil

3.1.3 AE 에너지와의 상관관계

Fig. 9는 계자코일의 2회째(run2) 퀘칭에 대한 퀘칭시간에 따른 AE에너지 및 누적분포를 나타낸 그림이다. 그림에 도시된 바와 같이, 마그네트 전류와 누적 AE에너지를 통하여 각 센서에서의 에너지를 비교해 보면, 3개의 센서 중 레이스트랙 중앙 직선부 센서에서 AE에너지가 최대치(peak)를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 퀘칭시 도체의 국부적인 발열에 따른 급격한 온도 상승에 기인하여 열에너지 방출이 가장 크고 이와 같은 퀘칭점에서 검출되는 AE신호 역시 최대가 된다는 사실을 고려하면 이러한 최대 AE에너지

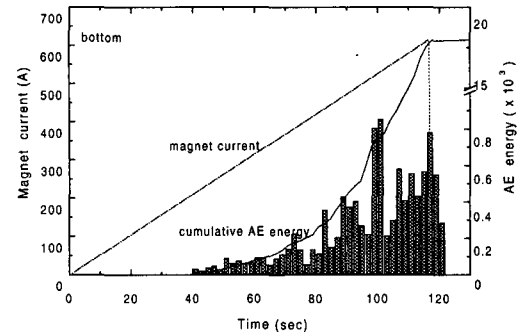
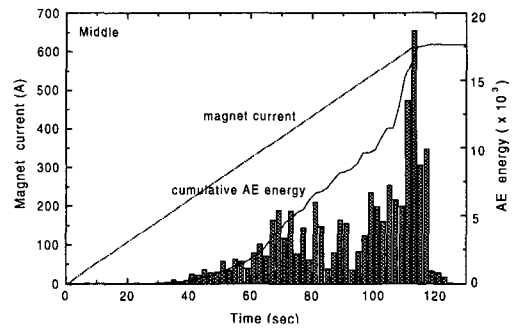
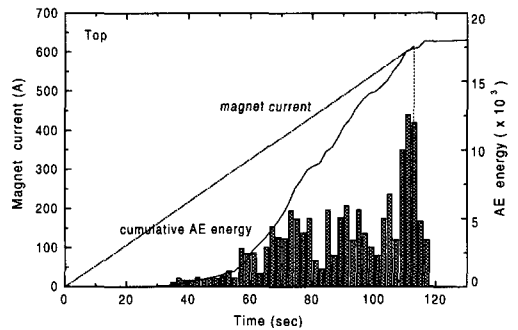


Fig. 9 Location of quench source using AE energy

는 결국 퀘칭 발생원(source)으로부터 검출된 AE 신호라는 사실을 확실하게 알 수 있다. 따라서 위의 경우에 있어서는 레이스트랙 중앙 직선부에서 퀘칭이 발생하였을 가능성이 가장 큰 것으로 판단된다.

한편 Fig. 10은 퀘칭 반복수에 따른 AE에너지 관계를 나타낸 것으로서 그림에서 보는 바와 같이, 일반적으로 AE에너지는 퀘칭수가 증가할수록 초기 퀘칭시보다 AE에너지가 증가하였다. 이는 트레이닝 효과에 의한 퀘칭전류의 상승과 더불어 AE이벤트수의 증가에 따른 결과로 판단된다. Fig. 11은 AE진폭에 따른 AE에너지 분포를 나타낸 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이, 진폭이 크고(90dB이상) AE에너지가 큰 신호들(peak)이 퀘칭에 의한 신호원임을 확인할 수 있었다.

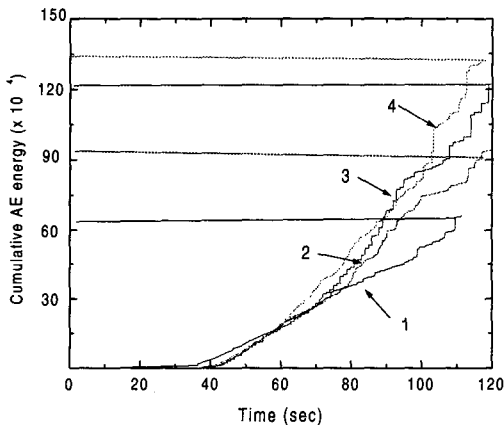


Fig. 10 Cumulative AE energy versus quench number

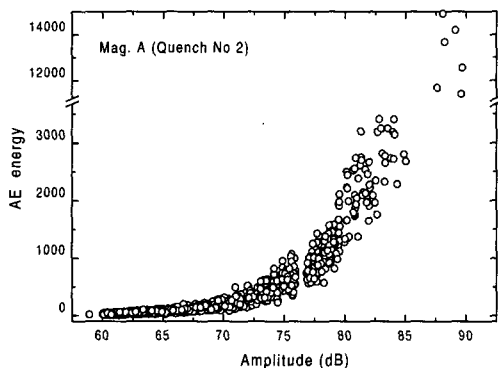


Fig. 11 The AE energy versus AE amplitude

### 3.2 퀘칭발생원에 대한 위치표정

본 연구에서는 퀘칭 발생원에 대한 위치표정(quench source location)에 있어서, 두 가지의 데이터를 분석함으로써 평가할 수 있었다. 즉, AE신호특성과 퀘칭시 마그네트 전압 및 전류특성을 이용하여 퀘칭 발생위치를 분석하였다.

먼저, 레이스트랙 계자코일의 상부 및 직선부에 각각 센서를 부착하여 상온 및 저온(88.6K)에서 탄성파의 속도를 측정된 결과 약 2200~2400m/s의 속도가 측정되었다. 실제로 초전도 계자코일의 극저온(4.2K)하에서 탄성파 전파속도는 대략 2000m/s로 보고되고 있다.<sup>(11)</sup> 따라서 상온에서의 전파속도와 큰 차이가 발생하지 않으므로 본 실험에서는 이들 속도를 평균하여 2100m/s로 설정하였다.

Fig. 12는 예비실험에서 탄성파 속도를 측정하기 위하여 레이스트랙형 계자코일의 중간 직선부와 상부 곡선부 센서에서 pencil break을 이용하여 측정된 전파도달시간차(arrival time difference)를 오실로스코프 상에서 나타낸 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 두 센서간 거리가 90mm일 때, 센서간 도달시간차  $\Delta t$ 는 40  $\mu$ sec 정도로서 이에 따른 속도는 2250m/s 정도로 나타났다.

한편 Fig. 13은 계자코일의 퀘칭시 AE파형 및 주파수를 분석한 결과에 대해서 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이, 퀘칭시 AE파형은 고진폭(90dB이상)의 긴 지속시간(800)을 가지며, 주파수 특성은 대략 140kHz 정도임을 알 수 있다. Fig. 14는 퀘칭시 3개의 센서에서 측정된 AE 파형을 나타낸 결과로서, 퀘칭시 중앙 직선부에 위치한 센서로부터 상부 곡선부 및 하부 곡선부

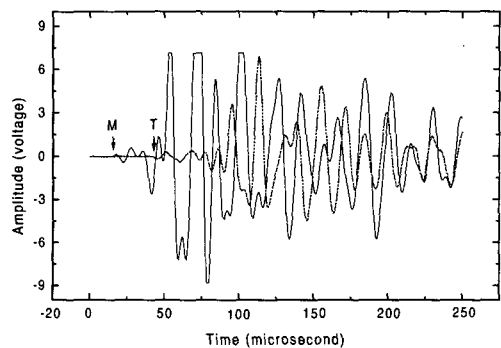
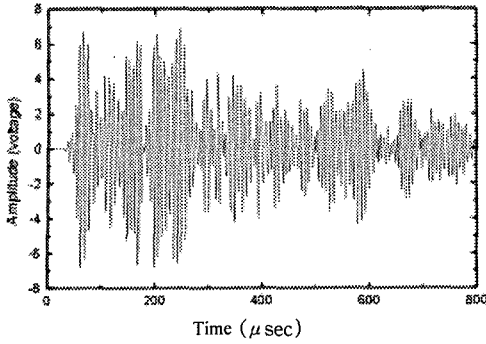
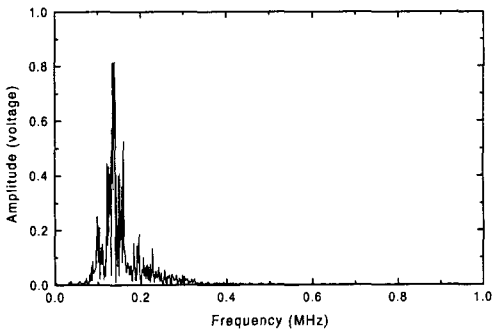


Fig. 12 Oscillogram of AE signal for top sensor and middle sensor



(a) AE waveform



(b) FFT

Fig. 13 AE waveform and FFT due to quench events

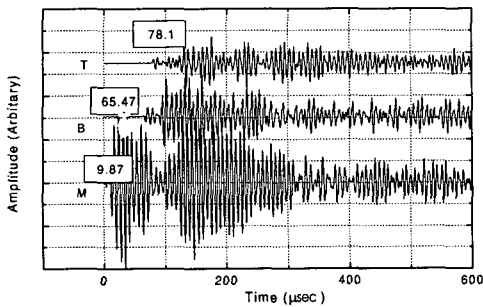


Fig. 14 The oscilloscope trace of a quench event

에 위치한 센서까지의 시간차연이 나타나고 있다. 따라서 위의 경우에서는 퀘칭 발생위치가 중앙 직선부에서 발생하였을 가능성이 가장 높게 나타난다고 볼 수 있다. 이와 같이 각 센서에서

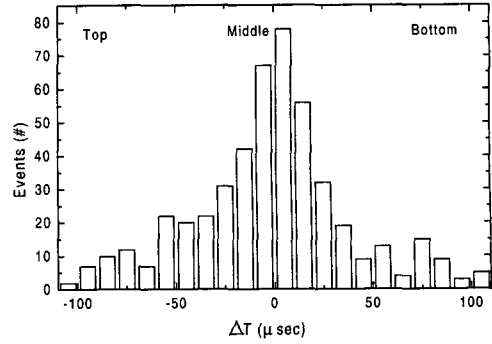


Fig. 15 AE distribution histogram expressed in term of signal arrival time difference

의 신호도달 시간차를 이용하여 각 계자코일의 AE신호 분포상태를 Fig. 15에 나타내었다.

그림에 나타난 바와 같이 계자코일의 중앙 직선부에서 국부적으로 AE이벤트가 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 선재의 미소슬립에 의해서 AE거동이 레이스트랙 직선부에서 더 많이 발생 함으로써, 이 지역에 대한 퀘칭 가능성이 가장 높다. 이는 앞선 Fig. 9의 마그네트 전류 및 AE에너지 결과와 비교해 볼 때 퀘칭현상과 잘 일치됨을 보여주고 있다.

한편, 일반적으로 레이스트랙형 마그네트를 여자시키면 마그네트 자체에 의한 자장과 상작용으로 로렌즈힘이 발생하고 이러한 로렌즈힘은 각 초전도선에 마그네트 바깥쪽으로 작용하여 레이스트랙 중앙 직선부에서 가장 큰 힘이 작용하게 된다. 따라서 이로 인하여 선재간 미소슬립이 가장 심하게 발생하며 퀘칭 발생가능성이 가장 클 것으로 판단된다. 본 연구에서는 이러한 사실을 AE거동을 통하여 확인할 수 있었다.

그러므로 위와 같이 국부적인 발열 위치를 조기에 검출함으로써 이 지역에서의 열을 신속히 제거하고 냉각조건을 좋게 함으로써 초전도 계자코일의 성능을 향상시킬 수가 있으리라 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 초전도 발전기의 핵심 요소인 레이스트랙형 NbTi 초전도 계자코일에 대한 퀘칭 특성 및 퀘칭탐지를 위한 건전성을 평가하는데

있어서 음향방출기법(Acoustic Emission Technique)을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 초전도 마그네트의 경우에 보빈의 형상에 따라 퀸칭특성이 다르게 나타난다는 사실을 알 수 있었으며, 본 연구에서는 레이스트랙의 직선부를 곡면이 되도록 개선한 레이스트랙형 계자코일에서 퀸칭전류특성이 더 향상되었음을 확인할 수 있었다.

(2) 퀸칭실험을 통하여, 퀸칭시 발생하는 AE신호특성과 마그네트 신호특성은 마그네트의 퀸칭발생원을 규명하는데 아주 유용함을 확인할 수 있었다. 즉, AE에너지 및 에너지 누적분포와 마그네트 전압, 전류신호특성을 분석하여 도체의 안정성 및 퀸칭검출에 대한 적합성 평가가 가능하였다. 따라서 위와 같이 국부적인 발열 위치를 조기에 검출함으로써 신속히 발열을 제거하고 냉각조건을 좋게함으로써 초전도 계자코일의 성능을 향상시킬 수 가 있으리라 판단된다.

(3) 퀸칭 발생원에 대한 위치표정은 모두 3개의 센서를 이용하여 평가하였으며, 퀸칭시 각 센서에서의 신호도달시간 및 마그네트 전류와 더불어 AE신호가 가장 큰 성분을 분석함으로써 퀸칭 위치를 정량화 할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 성균관 대학교 산업설비 안전성 연구센터의 논문 지원비에 의하여 수행된 연구결과입니다.

## 참고문헌

- (1) 한국전기학회, 1993, "超傳導의 基礎와 應用," pp. 229~247.
- (2) 정희돈, 1994, "음향방출법의 공학적 이용을 위한 기초," 대기기계학회, Vol. 34 (1), pp. 20~31.
- (3) Nondestructive Handbook, 1987, "Acoustic Emission Diagnostic and Monitoring Techniques for Superconducting Magnets," Vol. 5, pp. 389~401.
- (4) O. Tsukamoto, 1981, "Identification of quench origins in a superconductor with acoustic emission and voltage measurements," Appl. Phys. Letters, Vol. 39, pp. 172.
- (5) H. Nomura, Y. Iwasa, 1977, "Acoustic emission from superconducting magnet," Cryog., August, pp. 471~481.
- (6) E. S. Bobrov, 1985, "Experimental and theoretical investigation of mechanical disturbances in epoxy-impregnated superconducting coil. 3. Fracture-induced premature quenches," Cryog., Vol. 25, pp. 317~322.
- (7) H. Fuita, et al, 1985, "Experimental and theoretical investigation of mechanical disturbances in epoxy-impregnated superconducting coil. 4. Fracture-induced premature quenches," Cryog., Vol. 25, pp. 323~326.
- (8) 손명환, 백승규, 권영길, 1998, "레이스트랙형 초전도 계자코일의 AE신호 특성평가," 대한 전기학회 하계학술대회 논문집 A, EMP. 29, pp. 186~189.
- (9) H. Yoshimura, A. Ueda, M. Morita, 1992, "Acoustic Emission Monitoring on a Model Field Winding for the 70MW Class Superconducting Generator," Cryog., Vol. 32, No. 5, pp. 502~507.
- (10) O.O. Ige, A.D. McIntuff, Y. Iwasa, 1985, "Acoustic Emission Monitoring Results from a Fermi Dipole," Cryog., Vol. 26, pp.131~140.
- (11) K. Ikizawa, N. Takasu, Y. Murayama, 1991, "Instability of Superconducting Racetrack Magnets," IEEE Trans. Magn., Vol. 27, No. 2, pp. 2128~2131.