

**AE센서를 이용한 초전도자석의 퀘치 검출기법**

김호민\*, 이방욱\*, 오일성\*, 이해근\*\*, 유키카즈 이와사\*\*  
 \* LG 산전(주) 전력연구소, \*\* 메사추세츠 공과대학

**The quench detection technique of the superconducting magnet using an AE sensor**

Ho Min Kim, Bang-wook Lee, Il-Sung Oh, Haigun Lee, Yukikazu Iwasa  
 LG Industrial Systems, Massachusetts Institute of Technology

**Abstract** - This paper deals with the detection method of the Quench phenomenon for superconducting magnet using the Acoustic Emission (AE) sensor. AE sensor is the elements, which is used to change the Acoustic signal to the voltage value. This signal may be used to detect whether the superconducting magnet has been at the quench state or not. Recently, the development of the quench detection technique, which is the using voltage and current signals, fiber-optic sensor, and so on, for the superconducting applications is widely studying. This method for the quench detection of the superconducting magnet is also studying at some kinds of institute in Japan and the united state. Because of the large-scale superconducting magnet like International Thermonuclear Experimental Reactor(ITER) is charged a lot of energy, when the quench phenomenon is being at the superconducting magnet it is happen to the problem of the protection for the applications. In this paper, we concluded that the quench detection was possible when the mechanical stress by means of the local heat is generated at the part of inside superconducting magnets.

**1. 서 론**

초음파는 현재 해양, 의료, 비파괴 검사 등 사회 여러 분야에서 사용되고 있는 검출기법 중 하나이며 현상이다. 초전도 응용분야에서 AE센서는 초전도자석과 같은 시스템의 퀘치 현상을 검출할 수 있는 소자로 다양한 분야에서 연구가 진행되고 있다. 초전도자석이 충·방전될 때 혹은 냉각 시스템의 동작에 의해 냉각되거나 상온상태로 되돌아 올 때 기계적이거나 열적으로 변화가 생긴다. 이 때 초전도자석에서는 AE 신호가 발생될 수 있다. AE검출 기법은 고자장 초전도권선에서 기계적인 진동이 발생한 것을 신속하게 검출할 수 있는 훌륭한 방법으로 소개되고 있다 [1]. 이러한 AE 검출방법은 1970년대 후반에 소개가 되었으며 [2-4], 1980년대에 초전도 자석내에서의 권선움직임과 에폭시변형 같은 주된 퀘치 요소의 검출기법을 확립하게 되었다 [5-7]. AE 신호는 초전도자석의 퀘치 시점을 정확히 알려줄 수 있기 때문에, 이 기법은 초전도자석 내에서 국부적인 열이 발생할 때 뿐만아니라 초전도자석 시스템 전체의 열적 전이상태를 검출하는데 유용하다. 이러한 초전도자석의 국부적인 열적 변형을 효과적으로 검출하는 방법은 1980년부터 실험적으로 입증되기 시작하였다 [8,9].

초기의 AE 검출기법은 4.2K 온도의 액체헬륨 냉각조에 초전도자석을 위치시키고 권선의 일부에 히터를 장착하여 국부적인 열에너지를 주입하여 실험하였다 [9]. 당시의 실험에서 AE 신호를 검출하기 위해서는 초전도자석의 온도가 거의 30 K로 증가했을 때 관측되었다.

AE 신호가 발생하는 조건으로는 4-30 K 온도범위에서 상대적으로 큰 온도편차가 요구되었다. 왜냐하면 이러한 온도범위에서 매질 사이의 열적 팽창은 아주 작기 때문이다. 고온초전도자석의 경우에는 운전온도가 20-80 K 범위에 있기 때문에 위에서 언급한 경우와는 다르다. 실제로 77 K 액체질소에 담겨진 초전도자석의 경우 수 K의 온도변화에 대해 AE 신호가 검출되었다.

본 논문에서는 고온초전도체를 이용한 초전도자석에서의 퀘치현상을 AE센서를 이용하여 충분히 검출할 수 있음을 실험을 통해서 보여주려고 한다.

**2. 실험 구성**

**2.1 AE 센서 와 Data Acquisition**

실험에 사용된 AE 센서는 직접 제작하였다 [1]. 그림 1에서는 AE 신호 처리과정을 나타내었다. 발생된 AE 신호는 전처리 증폭기를 통과하면서 신호의 크기가 높아지고 Labview 신호처리 시스템으로 디지털화 한 후 저장매체에 AE 신호를 저장한다. 동시에 전처리 증폭기를 통해 나온 신호는 아날로그 오실로스코프에서 모니터링을 하였다. 온도측정을 위하여 E-type 열전대를 사용하였으며 측정된 값은 디지털 멀티미터를 이용하여 모니터링하고 동시에 Labview 시스템에 저장하였으며 초전도자석 양단에 전압탭을 설치하여 전압을 측정하였다. 또한 히터와 초전도자석의 통전전류는 셉트저항을 이용하여 모든 신호들과 시간적으로 동기 되도록 측정하였다. 그림 2는 실제 실험을 위해 구성된 장비들과 제작된 시스템을 연결한 실험구성도 이다. 중앙 아래에 액체 질소를 넣을 수 있는 용기가 위치해 있으며 그 안에 초전도자석이 담겨지게 된다. 왼쪽에는 신호를 증폭하는 절연증폭기가 위치해 있으며, 오른쪽에는 데이터 처리장치인 Labview 시스템이 위치해 있다.

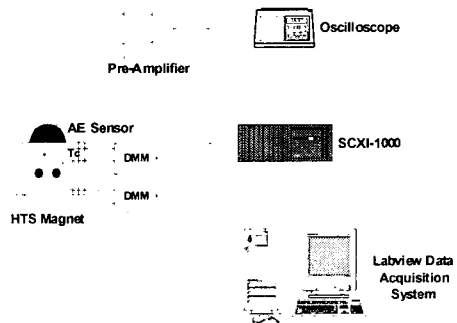


Fig 1 Block diagram of the AE data acquisition instrumentation

**2.2 시스템 구성**

실험에 사용된 초전도자석은 미국 AMSC에서 만든 Bi-2223/Ag 고온초전도선재를 사용하여 팬케익 형태로 권선을 하였다. 초전도자석은 내경 78.2 mm, 외경 120.3 mm 크기로 더블 팬케익 형태로 권선되었으며 상·하에 원형의 G10 판으로 구조물을 만들어 고정하였다. 초전도선재는 두께가 0.25 mm, 폭이 3.1 mm이며 77 K 온도에서 임계전류값 60 A를 갖는다. 실제 제작된 초전도자석은 자기장제와 권선에 의한 장력을 받기 때문에 권선 후의 실제 임계전류값은 30 A였으며 자석의 총 권선 수는 144턴이다. 초전도자석의 외곽층 안쪽에 길이 20 mm의 저항을 삽입하고 극저온 에폭시로 절연하여 외부인가 에너지로 사용할 수 있는 히터를 위치시켰다. 또한, 히터 표면에는 극저온 열전대 E-type을 사용하여 히터가 동작할 때 초전도자석 표면의 온도를 측정할 수 있도록 하였다. 그림 3은 제작된 시스템 모습을 보여준다.

### 3. 실험 결과

그림 4는 초전도자석에 수송전류를 흘리지 않고 히터 전류를 인가하여 국부적으로 열을 가하였을 때 얻어진 신호들이다. 그림 윗쪽은 펄스형태의 히터전류 7A를 인가했을 때 발생한 열량을 열전대를 이용하여 얻은 온도값을 나타내었다. 아래에 AE 센서를 통해 얻어진 전압 파형을 도시하였다. 그림에서 보듯이 AE센서의 감도가 우수하지만 노이즈가 또한 증폭되어 있음을 알 수 있다. 히터전류가 가해진 구간에 대해 살펴보면 히터 동작에 의한 AE 신호가 발생하고 있음을 보여주고 있다. 초전도자석의 국부적인 온도상승이 2 K이상 발생한 것에 기인하여 AE 신호가 생겨났음을 알 수 있다. AE신호를 확대하여 살펴보면 약 10~20 ms동안 연속적으로 발생하고 있다는 것을 알 수 있었다.

변압기, 모터, 한류기, 그리고 케이블과 같은 교류기에 켜치가 발생했을 때 이를 검출하기 위한 실험을 수행하였다. 그림 5는 60 Hz 최대치 7A의 교류를 초전도자석에 흘려주었을 때 AE 센서를 이용하여 검출된 신호를 보여주고 있다. 이 결과를 통해서 초전도 교류시스템에도 AE센서를 이용한 켜치 검출이 가능함을 보여주었다.

그림 6에서는 히터전류를 증가하면서 AE센서에 의해 검출된 신호를 비교한 것이다. 히터전류를 4A로 인가하였을 때는 전혀 AE센서는 반응하지 않았다. 즉, 초전도자석의 권선내에서 기계적인 움직임이 없었다고 여기진다. 하지만 6A이상으로 히터전류를 증가시키면 AE 신호가 검출되어 초전도자석이 기계적인 진동이 생겼다는 것을 알 수 있다.

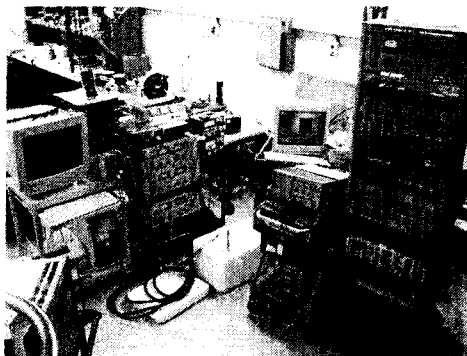


Fig 2 Block diagram of the AE data acquisition instrumentation

그림 7은 실험에 앞서 제작된 초전도자석의 임계전류값을 알아보기 위해 초전도선재의 임계전류를 측정하는 기

준인 1 $\mu$ A/cm 항등식으로 알아본 결과이다. Bi2223/Ag 고온초전도선재 50 m를 권선하였기 때문에 초전도자석에서 검출된 전압값이 50 mV일 때 이 자석의 임계전류를 구해 본 결과 약 34 A로 밝혀졌다.

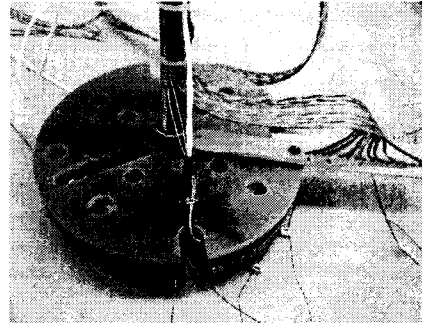


Fig 3 photograph of the AE sensor and double-pancake coil

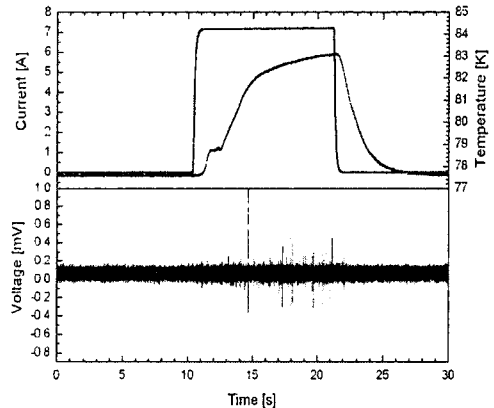


Fig 4 AE signals generated by local heating of a double-pancake coil wound with Bi2223/Ag The heater current is the square trace in the top (left-hand side vertical axis), the temperature response is also in the top (right-hand side vertical axis) AE sensor output voltage is in the bottom.

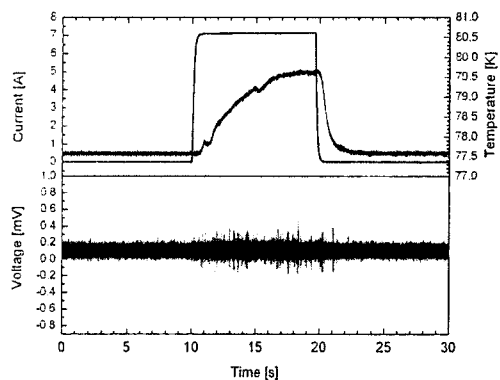


Fig 5 AE signals generated by local heating of a double-pancake coil wound with Bi2223/Ag carrying a 60-Hz transport current The heater current is the square trace in top, the temperature response is also in the top

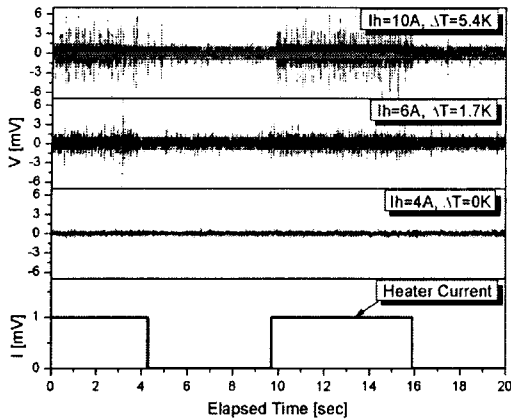


Fig. 6. AE signals generated by local heating of a double-pancake coil.

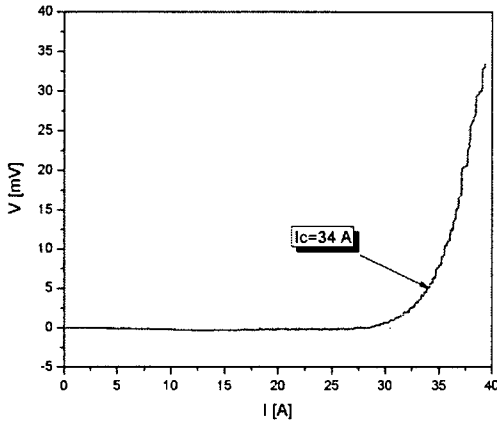


Fig. 7. V(I) trace of a double-pancake load

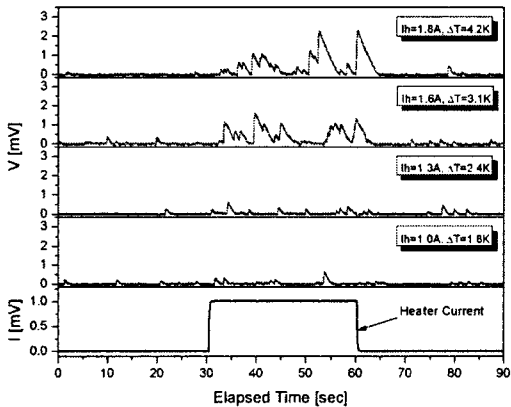


Fig. 8. the AE data for a pancake coil subjected to a heat current.

그림 8은 초기 실험으로서 히터전류의 크기를 수 백 mA 단위로 증가시켰을 때 초전도자석에 위치한 히터 주변의 온도변화치와 AE신호의 변화를 살펴본 결과이다.

과거에 여러 논문에서 발표된 바와 같이 약 3 K 정도의 온도변화가 생겨나면 초전도권선은 국부적으로 기계적인 움직임이 생겨나 그 진동에 의한 AE신호가 발생하고 있음을 알 수 있다. 그림 6과 달리 그림 8은 AE 신호가 다를 수 있다. 이것은 초기 AE 신호인 아날로그 신호를 디지털로 바꿔주는 DAQ 장비의 문제로 나중에 하드웨어를 바꿈으로서 해결하였다. 그 결과 그림 6에서와 같은 실제 발생하는 AE 신호와 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구결과 AE 센서를 이용한 초전도자석의 퀘칭현상 검출에 관한 연구는 충분한 가능성이 있다는 것을 입증시켰다. 지금까지는 직류전원을 이용하는 대용량 고자장 마그네트의 퀘칭 현상연구에 AE 기술을 접목시키고자 연구가 진행되어 왔는데, 교류를 사용하는 초전도자기에도 본 논문에서 알 수 있듯이 충분히 하나의 검출기법으로서 이용될 수 있다는 결론을 내릴 수 있었다.

본 연구에서는 소형의 초전도자석을 이용하여 AE 검출기법을 이용한 초전도자기의 퀘칭현상을 연구하였지만, 대용량의 초전도자석 시스템에 이용하여 상용화할 수 있는 방법을 모색할 필요성이 있음을 알 수 있었다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Yukikazu Iwasa, Case Studies in Superconducting Magnets. Plenum Press, New York, 1994.
- [2] H. Nomura, K. Takahisa, K. Koyama, and T. Sakai, Acoustic emission from superconducting magnets, Cryogenics 17, 1977, p. 471.
- [3] Curt Schmidt and Gabriel Pasztor, Superconductors under dynamic mechanical stress, IEEE Tran. Magn. MAG 13, 1977, p. 116.
- [4] H. Brechna and P. Turowski, Training and degradation phenomena in superconducting magnets, Proc. 6th Intl. Conf. Magnet Tech. [MT 6 ALFA, Bratislava, Czechoslovakia, 1978, p. 597.]
- [5] O. Tsukamoto, J.F. Maguire, E.S. Bobrov, and Y. Iwasa, Identification of quench origins in a superconductor with acoustic emission and voltage measurements, Appl. Phys. Lett. 39, 1981, p. 172.
- [6] O. Tsukamoto and Y. Iwasa, Acoustic emission triangulation of disturbances and quenches in a superconductor and a superconducting magnet, Appl. Phys. Lett. 40, 1982, p. 538.
- [7] O. Tsukamoto and Y. Iwasa, Sources of acoustic emission in superconducting magnets, J. Appl. Phys. 54, 1983, p. 997.
- [8] T. Ishigohka, O. Tsukamoto, and Y. Iwasa, Method to detect a temperature rise in superconducting coils with piezoelectric sensors, Appl. Phys. Lett. 43, 1983, p. 317.
- [9] O. Tsukamoto and Y. Iwasa, Correlation of acoustic emission with normal zone occurrence in epoxy impregnated windings: an application of acoustic emission diagnostic technique to pulse superconducting magnets, Appl. Phys. Lett. 44, 1984, p. 922.