

권선장력을 고려한 초전도 계자코일의 퀘칭특성 및 AE 신호특성에 관한 연구

A Study on Quench Characteristics considering Winding Tension in Superconducting Coil using Acoustic Emission Technique

이준현*, 이민래**, 손명환***, 권영길***

Lee Joon Hyun*, Lee Min Rae**, Sohn Myōng Hwan***, Kwon Young Kil***

Abstract: In this study, acoustic emission(AE) technique has been applied to detecting quench which is one of the serious problems to assure the integrity of superconducting coil at cryogenic temperature. The characteristics of AE parameters have been analyzed by correlating with the number of quenches, winding tension of superconducting coil and charge rate of transport current. The quench localization was also performed using AE signals and there was also good correlation between quench current and AE parameters such as AE energy and AE events.

In this study, it was confirmed that AE signals were mainly due to the conductor motion which caused by premature quenching. It was also found that optimized winding tension at superconducting coil was needed to prevent quench caused by conductor motion.

Key Words : acoustic emission, superconducting generator, quench, winding tension

1. 서 론

초전도 발전기용 계자코일은 전자기력에 의한 마찰 뿐만 아니라 운전 중 회전 때문에 취약부분에서 발생하는 국부적인 발열현상으로 인하여 퀘칭 유발 가능성이 보다 크며, 이는 초전도 계자코일의 안정성과 관련하여 발전기의 전체적인 성능을 저하시키는 요인중의 하나이다[1].

일반적으로 4.2K의 극저온 환경에서 피 냉각체인 초전도체의 비열은 상온보다 약 1/100~1/10000배 정도로 작아지기 때문에 매우 적은 열 침입에도 선재의 온도가 급상승하게 된다. 또한 초전도 발전기는 고(전)압, 고에너지밀도 및 대용량화를 위하여 전기 저항이 제로인 초전도 상태

에서 이용되며 구조적으로 복잡한 냉각 시스템 및 단열 시스템이 요구된다. 본 연구의 경우 초전도 발전기에 사용된 계자코일은 모두 4개의 레이스트랙형 초전도 코일로 이루어져 있다. 그러나 이러한 초전도 계자코일은 제작시 초전도 선재에 권선 혹은 굽힘 등에 의한 기계적인 응력이 과다하게 작용하면 열화현상(degradation)으로 인하여 임계전류특성이 무응력 상태에 비하여 크게 저하된다.

특히, 장시간에 걸친 고자장, 고전류밀도 하에서의 초전도 계자코일의 특성은 발전기의 효율 및 안정성에 중요한 영향을 미치게 된다. 따라서 초전도 발전기를 효율적으로 적용하기 위해서는 제작에 따른 초전도 계자코일의 신뢰성 확보가 필수적이다.

한편, 음향방출(AE; Acoustic Emission)이란 재료 내부의 국부적인 응력변화에 의해서 변형에너지가 순간적으로 방출될 때 발생하는 탄성파(elastic wave)를 말하며[2], 이러한 AE 신호특성을 검출, 해석함으로써 금속 및 복합재료의 미시적 파괴거동 뿐만 아니라 다른 비파괴평가 방법으로는 접근하기 어려운 극저온 환경하에서의 진단기법으로도 응용이 기대되고 있다[3].

따라서, 본 연구에서는 계자코일 제작시 초전도 선재에 작용하는 권선이나 굽힘등의 기계적인 응력을 고려하여 권선장력이 퀘칭전류의 특성에 미치는 영향을 분석하고 퀘칭시 발생하는 마그네트 전압 및 전류신호특성과 AE신호 특성과의 상관관계를 이용하여 퀘칭 발생원에 대한 위치표정을 규명하고 진단 기법으로서의 타당성을 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 초전도 계자코일에는 임계전류(IC)가 설계 기준인 운전전류(operating current) 200A 보다 크고, 1mm의 직경에 60여개의 필라멘트로 구성된 NbTi 초전도 선재를 사용하였다. 계자코일 1개당 초전도선의 길이는 약 405m이며, 권선장력에 따른 퀘칭특성을 분석하기 위하여 모두 4개의 레이스트랙형 초전도 계자코일을 제작하여 실험하였다. 각 계자코일 중 A, C, D는 선재 #1을 사용하여 제작하였으며, 계자코일 B는 선재 #2를 사용하였다. 그림1은 본 연구에 사용된 NbTi 초전도 선재들의 단면사진을 나타낸 그림이며, 각 계자코일에 대한 자장에 따른 임계전류 특성과 권선장력 및 계자코일의 사양에 대해서는 표1.2에 각 각 나타내었다.

* 정 회 원 : 부산대 기계공학부 부교수
 ** 학생회원 : 부산대 대학원 기계설계공학과 박사과정
 *** 정 회 원 : 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 선입연구원
 *** 정 회 원 : 한국전기연구소 초전도응용연구 그룹장
 원고접수 : 1999년 6월 14일
 심사완료 : 1999년 10월 5일

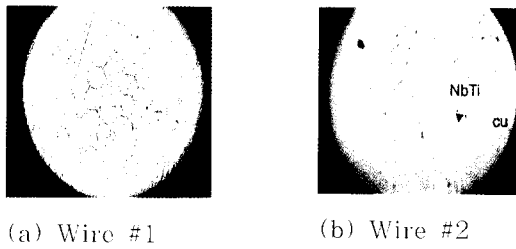


그림 1. NbTi 선재의 단면
Fig 1. Cross-section of NbTi superconducting wire.

표 1. 마그네트 제작시 임계전류 특성 및 권선장력.
Table.1 Characteristics of the critical current of magnet with respect to winding tension.

| Magnet No. | Type of test wire | Winding Tension(N) | Critical Current |
|------------|-------------------|--------------------|------------------|
| A | Wire #1 | 43.3 | 348A (7T) |
| B | Wire #2 | 43.3 | 580A (5T) |
| C | Wire #1 | 55.6 | 478A (6T) |
| D | Wire #1 | 61.9 | 584A (5T) |

표 2. 초전도 계자코일의 사양.
Table 2. Specification of superconducting coil.

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

2.2 실험장치 및 방법

그림 2는 초전도 발전기용 레이스트랙형 초전도 계자코일의 권치 성능에 따른 AE신호특성을 평가하기 위한 실험의 전체적인 개요도를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이, 본 시스템은 레이스트랙형 계자코일을 극저온 상태로 유지시키기 위한 액체 질소 및 액체 헬륨 저장용기, 트랜스퍼 튜브(transfer tube) 그리고 헬륨 레벨을 측정하기 위한 액면계와 극저온 용기(cryostat)로 구성되어 있다. 먼저, 계자코일을 보빈홀더에 부착하여 상온으로부터 열차폐를 위하여 극저온 용기내에 설치한 다음 초전도 코일에 여자전류를 공급하기 위한 직류전원장치와 계자코일을 전류도입선(current lead)으로 연결한다. 그리고 운전전류에 따른 자장 측정은 극저온용 홀 센서를 이용하여, 이에 따른 홀 센서 부착위치는 계자코일의 안쪽 가장자리와 중심부 및 중심에서 윗쪽으로 78mm 위치한 곳에 각각 부착한다. 그리고 보빈 윗면에 탄소저항온도센서(CGR sensor)를 부착하여 인가 전류에 따른 극저온 온도를 측정하며, 권치에 따른 온도상승으로 인한 초전도 계자코일의 손상을 방지하기 위하여 보호저항(상온 0.12Ω)을 코일 양단에 병렬로 연결하고, 권치시 전압측정을 위해서 전압 탭을 설치한다.

한편, AE측정은 그림 3에 나타난 바와 같이 레이스

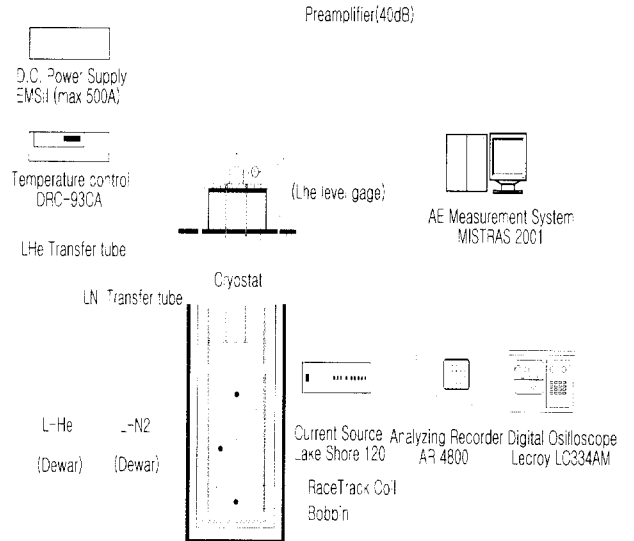


그림 2. 실험의 전체적인 개요도.
Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

트랙 직선부 및 상, 하 곡선부 가장자리 각각 1개씩 모두 3개의 극저온용 센서를 부착한 다음, 수신감도를 높이기 위하여 진공그리스를 바른 후, 접착 테이프를 압착하였다. 그리고 기계적인 잡음과 같은 불필요한 주변잡음(background noise)을 제거시키기 위하여 프리앰프에서 100-300kHz의 대역필터를 사용하여 필터링 시킨 후 40dB로 증폭시켰다. 본 연구에 사용된 AE센서는 일반적으로 초전도 마그네트에서 발생하는 AE신호의 주파수가 300kHz이하임을 감안하여 최대 사용주파수가 625kHz인 PAC사의 R15LT 극저온용 센서를 사용하였으며, AE 측정장비로는 MISTRAS 2001를 사용하였다. 계자코일에 대한 전원공급은 EM사의 EMS II Power Supply를 이용하여 전류를 공급하고 자장은 홀센서에 Lake Shore 120 current source로 정전류(100mA)를 공급하면서 전압을 측정하여 계산하였다. 발생전압은 Analyzing Recorder(Yokokawa AR4800)를 이용하여 측정하였으며, 냉각온도측정은 Lake Shore DRC-93A 온도측정장치를 사용하였다. 그리고 권치시 전압상승에 따른 AE신호의 파형분석을 위해서 디지털 오실로스코프(LeCroy LC334M)를 사용하였다. 실험은 먼저 레이스트랙형 계자코일을 극저온 용기에 넣은 다음, 액체 질소를 주입하여 예비 냉각 시킨 후, 헬륨가스로 가압 하면서 내부의 액체질소를 외부로 빼내고 잔존하는 극저온 용기 내부의 액체질소를 완전히 제거하기 위해서 퍼징처리(purging)를 한다. 그런 다음 액체 헬륨을 용기 내부로 옮겨서 4.2K의 초전도 상태로 만든다. 한편, 인가전류는 3, 30, 40, 50A/s로 증가시켜 가면서 마그네트 전류에 대한 자장발생 및 계자코일의 양단 전압과 그에 따른 AE 신호특성을 측정하였다. 그림 4는 실험을 위해 플랜지에 보빈을 부착한 계자코일의 형상을 나타낸 사진이다. 한편 본 연구에서는 액체헬륨 주입시 버블(bubble)현상으로 인하여 발생하는 AE신호를 제거하기 위하여 극저온 용기 내부가 충분히 안정된 상태에서 기준값(threshold level)을 설정하였으며, 최하 55~60dB에서 안정화됨을 알 수 있었다. 이는 상온상태에서의 값 보다 약 18dB이상 높은 값이다.

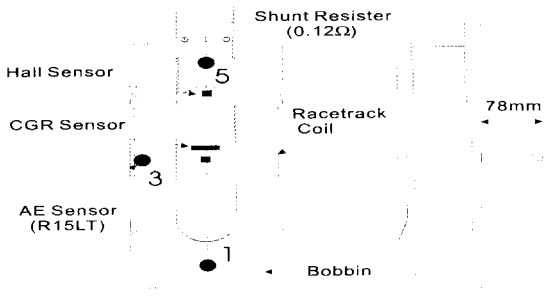


그림 3. AE 센서부착 위치.
Fig. 3. AE sensor position of the racetrack magnet.

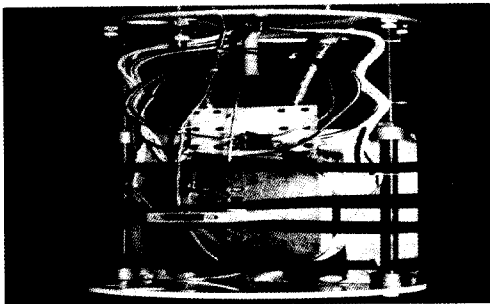


그림 4. 계자코일 사진.
Fig. 4. The photograph of the test coil.

3. 실험결과 및 고찰

이미 보고된 바에 따르면 일반적인 보빈형태로서 양쪽에 직선부를 가지는 레이스트랙형과 선재가 보빈에 정확히 밀착 되도록 하기 위하여 직선부를 개선한 레이스트랙형 중에서 보빈의 형상을 개선한 경우가 그렇지 않은 경우보다 퀘치전류(I_q)특성이 우수한 결과를 나타냄을 알 수 있다[4]. 따라서 본 연구의 30kVA 발전기용 회전자의 레이스트랙형 계자코일의 보빈형태는 직선부를 개선한 레이스트랙형 계자코일을 이용하여 실험을 수행하였다.

3.1 권선장력에 따른 각 계자코일의 퀘치 및 AE 신호 특성

3.1.1 퀘치특성과의 상관관계

그림 5는 앞 절에서 언급한 바와 같이 형상이 개선된 4개의 레이스트랙형 계자코일에 대한 퀘치 반복수에 따른 퀘치전류특성을 나타낸 결과이다. 먼저 계자코일 A의 경우, 초기 퀘치전류는 240A로서 short sample 임계전류(5T, 584A)의 41%에서 퀘치가 발생하였으며 퀘치가 반복됨에 따라서 420A정도(임계전류의 71%)에서 최종적으로 포화되었다. 그리고 계자코일 B의 경우는 A의 경우와 마찬가지로 초기 퀘치전류는 270A로서 short sample 임계전류(5T, 580)의 47%에서 퀘치가 발생하였으며, 397A 정도에서 포화되었다. 한편, 계자코일 A, C, D는 동일 초전도 선재를 이용하여 권선장력을 각기 다르게 하여 제작한 계자코일이다. 실험결과, 계자코일 A, B는 계자코일

C, D의 경우보다 모두 트레이닝 효과가 훨씬 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그리고 계자코일 C보다 권선장력이 큰 D의 경우는 평균 퀘치전류가 C의 경우와 비교해 볼 때 약 50A정도 더 낮게 발생하였다. 일반적으로 초전도 마그네트는 반복적인 퀘치에 의한 트레이닝 현상으로 인하여 퀘치전류가 어느 정도 상승하는 것이 일반적인 경향이지만 계자코일 D의 경우는 트레이닝 효과가 뚜렷하게 나타나지 않고 일정한 전류에서 퀘치가 발생하는 것으로 미루어 보아 마그네트의 제작상 문제라기 보다는 계자코일의 제조공정에서 과다한 권선장력으로 인한 초전도 선재의 국부적인 결함으로 말미암아 마그네트 특성이 전체적으로 저하된 것으로 사료된다. 그리고 위의 결과에 나타난 바와 같이, 대부분의 계자코일이 short sample의 임계전류보다 낮은 온도에서 퀘치가 발생하는 것은 초전도 선재의 열화현상에 기인하기 때문이다. 일반적으로 초전도 선재는 고전류 밀도상태에 놓여지기 때문에 전자기적인 힘에 의한 도체의 미소슬립과 인접선재간 마찰 및 선재를 구성하고 있는 금속들 사이의 내부마찰 등에 의한 국부적인 발열로 인하여 전체적인 초전도 특성이 저하된다. 한편 이러한 열화현상의 원인이 되는 도체의 기계적인 동요를 감소시키기 위하여 선재를 에폭시 수지나 왁스에 함침 시키기도 하며 권선시 인장력을 달리하기도 한다.

본 실험의 경우에 있어서는 권선장력을 달리한 결과, 계자코일 C의 경우(5.68kgf)가 최적인 것으로 판단되어진다. 따라서 본 실험에서는 트레이닝 효과는 계자코일 A, B가 현저하게 높게 나타나지만 초기 퀘치전류가 다소 낮은 점을 감안하면 계자코일 C의 경우가 가장 안정적인 특성을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

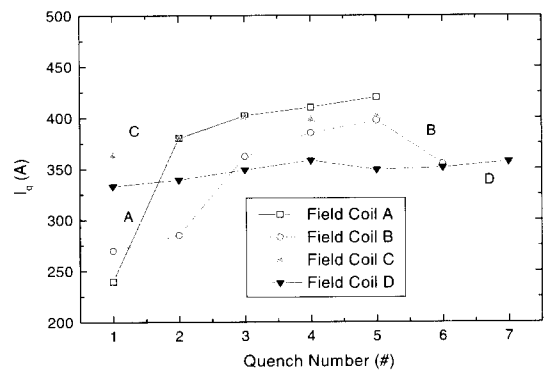


그림 5. 각 계자코일에 대한 퀘치전류-퀘치반복수.
Fig. 5. Quench current vs. quench number for the field coil.

3.1.2 AE신호특성과의 상관관계

초전도 마그네트에서 도체의 움직임을 최소화하고 반경방향의 인장응력에 의한 층간박리를 방지하기 위하여 권선시에 인장력을 인가한다. 이 경우 권선장력의 최적화를 고려할 필요가 있으며, 본 연구에 있어서는 마그네트가 모두 함침이 되어있지 않은 비함침(non-pregnant)계자코일을 이용하여 실험하였기 때문에 함침이 되어있는 계자코일에서의 권선장력이 퀘치전류에 미치는 영향과는 다를 것으로 생각된다.

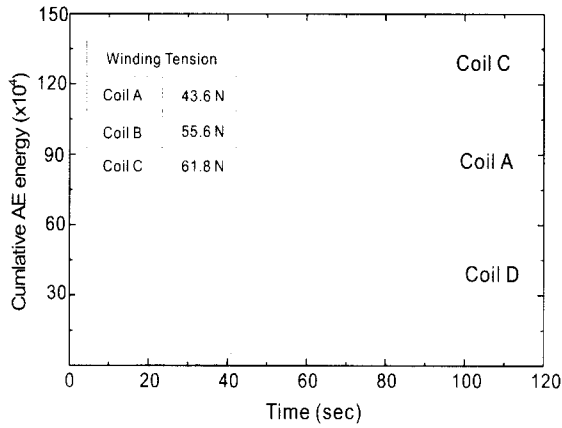


그림 6. 권선장력에 따른 계자코일의 총 AE에너지.
 Fig. 6. Total AE energy curves with respect to winding tension.

그림 6에 나타난 바와 같이, 각 계자코일의 권선장력에 따른 AE에너지 관계를 살펴보면 권선장력이 클수록 전체 AE에너지도 증가하는 경향을 볼 수 있다. 하지만 계자코일 D의 경우처럼 권선장력이 너무 큰 경우에는 오히려 AE에너지가 감소함을 알 수 있다.

일반적으로 함침(impregnant)이 되어있는 마그네트의 경우, 권선시 권선장력이 작은 코일에 대한 퀘칭전류(I_q)가 권선장력이 큰 코일보다 더 높게 나타난다고 보고되고 있다[5~7]. 본 실험의 경우에는 위의 결과에서 보는 바와 같이 권선장력이 너무 과다하면 오히려 퀘칭전류특성이 저하된다는 사실을 알 수 있었다. 이는 권선시 과다한 굽힘응력에 의해서 초전도 선재가 이미 상당 부분이 열화가 되었을 가능성이 크기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 그림 7은 각 계자코일에 대한 퀘칭 반복수에 따른 AE 이벤트 관계를 나타낸 것으로서, 함침 계자코일에서는 카이저 효과(Kaiser effect)에 의해서 이벤트수의 감소가 나타나지만 본 실험의 비함침 계자코일에서는 퀘칭 반복횟수에 따른 AE 이벤트수의 뚜렷한 감소는 관찰되지 않았다[8].

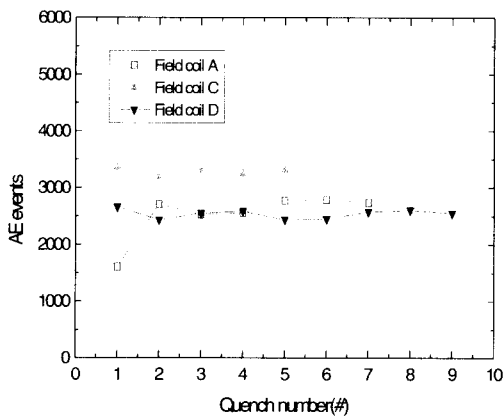


그림 7. 권선장력에 따른 AE이벤트 카운트-퀘칭수.
 Fig. 7. AE events counts vs. quench numbers of test magnet with respect to winding tension.

3.2 인가전류속도에 따른 퀘칭특성

함침 계자코일의 경우에 있어서 전류인가속도(current ramp rate)가 일정한 경우, 일반적으로 퀘칭전류가 높을수록 AE에너지도 증가하는 것과 마찬가지로 본 연구에서 비함침 계자코일의 경우, 전류인가속도가 일정(3A/s)할 때 퀘칭전류가 높을수록 AE 에너지 곡선의 기울기가 크고 전체 AE 에너지도 증가하는 경향을 나타내었다[9]. 그림 8은 인가전류속도가 각각 3, 30, 40, 50A/s인 경우에 있어서, 마그네트 전류에 따른 AE 이벤트수의 변화를 나타낸 것으로 전류인가속도가 빠를수록 전체 AE 이벤트수는 감소함을 알 수 있다. 또한 그림 9에서 보는 바와 같이 AE 에너지 변화 역시 AE이벤트의 경우와 마찬가지로 전류인가속도가 빠를수록 전체 AE에너지가 감소하는 경향을 나타내었다.

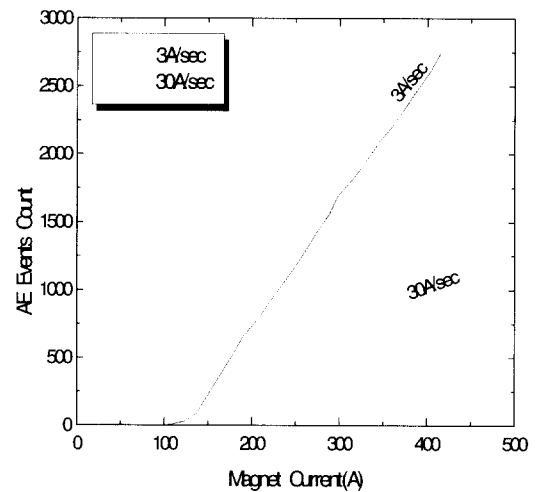
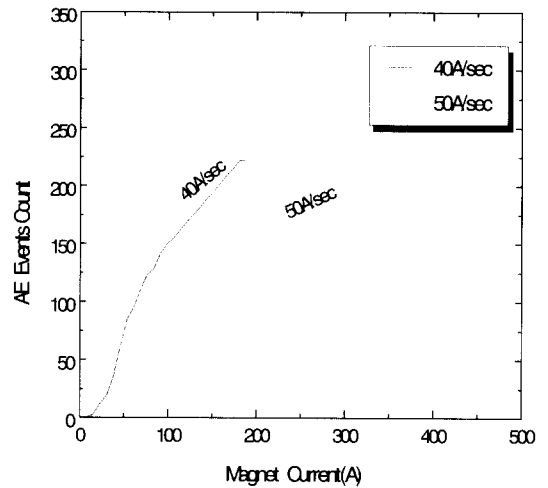


그림 8. 전류인가속도에 따른 총 AE이벤트 카운트-마그네트 전류.

Fig. 8. Total AE event counts vs. magnet current by current ramp rate.



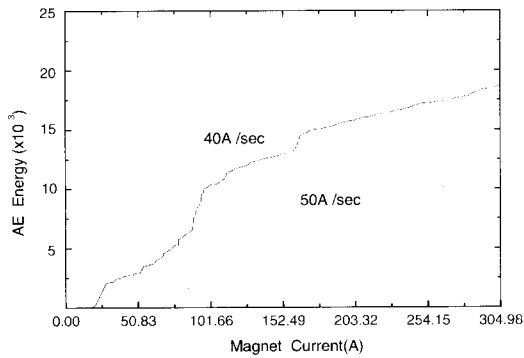
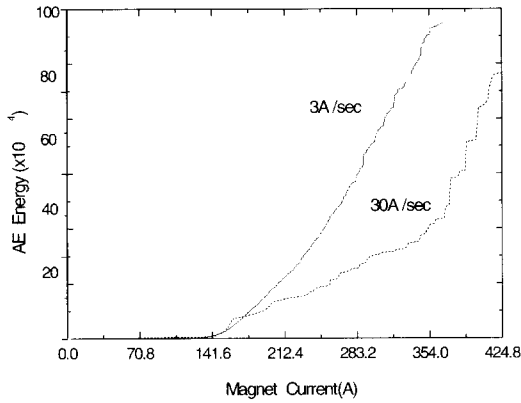


그림 9. 전류인가속도에 따른 AE에너지-마그네트 전류.
Fig. 9. Total AE energy vs. magnet current by current ramp rate.

3.3 퀘치발생원에 대한 위치표정

퀘치발생원에 대한 위치표정은 모두 3개의 센서를 사용하였으며, 퀘치시 도체의 극부적인 발열에 따른 급격한 온도상승에 기인하여 AE에너지가 최대치 (peak)가 되는 사실을 고려하여 퀘치시 마그네트 전압특성과 AE신호특성을 이용함으로써 평가가 가능함을 이미 보인바 있다[9].

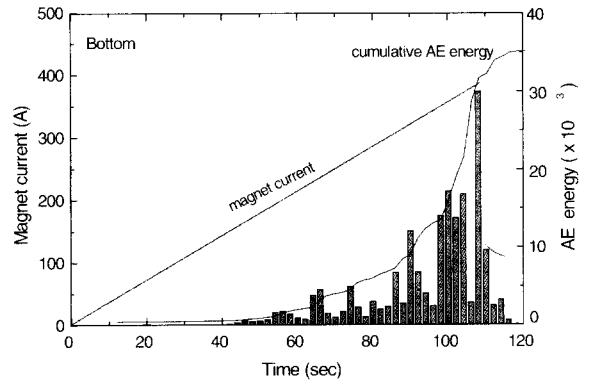
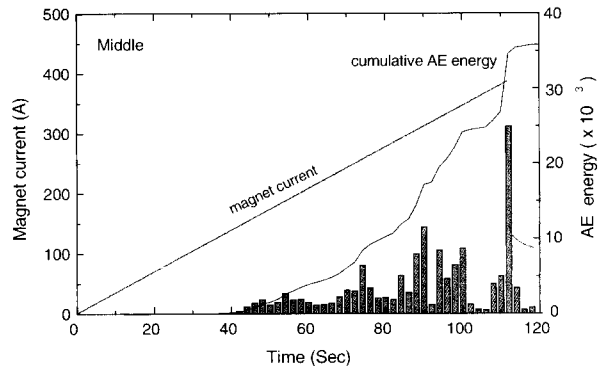
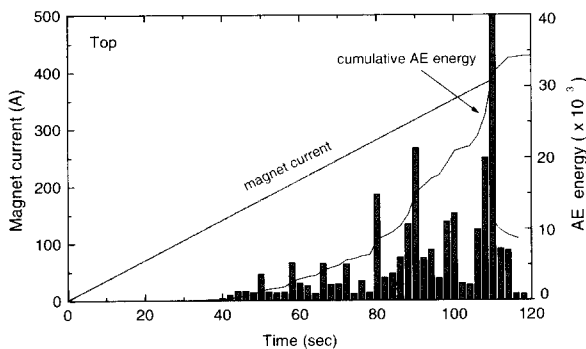


그림 10. AE 에너지를 이용한 퀘치위치 표정.
Fig. 10. Location of quench source using AE energy (field coil A, run 2).

그림 10에 나타난 바와 같이, 퀘치시간에 따른 AE에너지 및 누적분포를 통하여(계자코일 A, run2), 퀘치시 각 센서에서의 에너지를 비교해 보면, 3개의 센서 중 레이스트랙 상부센서에서 AE에너지가 최대치 (peak)를 나타내고 있다.

이는 퀘치시 도체의 극부적인 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. 또한 이 때 각 센서에서 측정된 AE파형을 살펴보면(그림 11), 퀘치시 상부 곡선부에 위치한 센서로부터 중앙 직선부 및 하부 곡선부에 위치한 센서까지의 시간지연이 나타나고 있다. 이러한 신호 도달시간차를 이용하여 AE신호 분포상태를 살펴보면 그림 12에 나타난 바와 같이 상부에 AE 발생원이 극부적으로 위치함을 알 수 있다. 따라서 위의 경우(계자코일 A)에 있어서는 퀘치발생위치가 상부 곡선부에서 발생하였을 가능성이 가장 높게 나타난다고 볼 수 있다.

이상과 같은 결과를 토대로 각 계자코일에 대한 퀘치발생원 위치표정 결과를 표 3에 나타내었다. 한편, 일반적으로 레이스트랙형 마그네트를 여자시키면 마그

네트 자체에 의한 자장과 상호작용으로 로렌츠힘이 발생하고 이러한 로렌츠힘은 각 초전도선에 마그네트 바깥쪽으로 작용하기 때문에 레이스트랙 중앙 직선부에서 선재간 미소슬립에 의한 마찰이 가장 심하게 발생하며, 이로 인하여 퀘치가 발생할 가능성이 가장 클 것으로 사료된다.

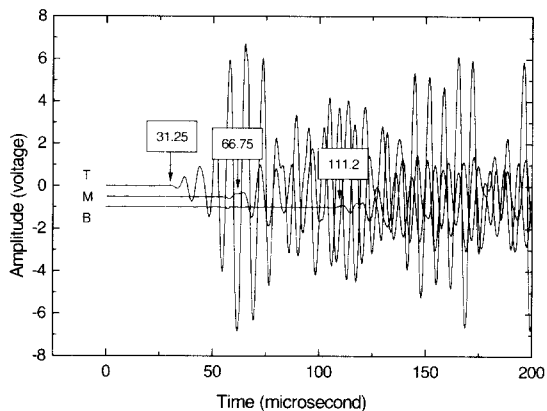


그림 11. 퀘치 이벤트에 대한 오실로스코프 파형.
Fig. 11. Oscilloscope trace of a quench event.

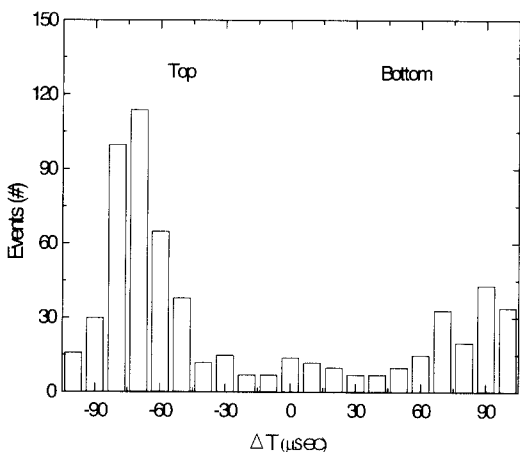


그림 12. 신호도달시간차로 나타낸 AE분포 히스토그램.
Fig. 12. AE distribution histogram expressed in term of signal arriving time difference.

위의 결과로부터, 계자코일 A, B의 경우는 예상과 달리 퀘치에 따른 AE 거동이 레이스트랙 상, 하부에서 더 많이 발생하였으며, 코일 C의 경우는 예상대로 직선부에서 두드러지게 나타났다. 한편 계자코일 A, B의 결과는 계자코일 자체가 함침이 되지 않은 상태이고 권선장력이 다소 낮은 점을 감안해 볼 때, 여자시 도체의 미소슬립과 같은 선재의 동요와 더불어 선재 자체의 기계적 성질등에 의해서 국부적인 취약 부분이 다소 불규칙적으로 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

표 3. 각 계자코일에 대한 퀘치위치표정 결과

Table 3. Summary of quench locations and numbers for test coils

| Magnet No. | Number of quenches | | | Uncertain location |
|------------|--------------------|--------|-----|--------------------|
| | Bottom | Middle | Top | |
| A | 2 | 1 | 4 | 2 |
| B | 4 | 3 | 0 | 4 |
| C | 1 | 6 | 1 | 3 |
| D | 3 | 3 | 6 | 0 |
| 계 | 10 | 13 | 11 | 9 |

4. 결 론

본 연구에서는 초전도 발전기의 핵심요소인 레이스트랙형 NbTi 초전도 계자코일에 대한 퀘치특성 및 퀘칭 탐지를 위한 건전성을 평가하는데 있어서 음향방출기법을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

먼저, 권선장력의 경우는 동일 선재에 대해서 권선장력이 클수록 전체 AE에너지 및 퀘치전류가 증가하는 반면, 트레이닝 효과는 적게 나타난다는 사실을 확인할 수 있었다. 또한 전류인가속도가 일정할 때 퀘치전류가 높을수록 AE 에너지 선도의 기울기가 크고 전체 AE에너지도 증가하는 경향을 나타내었다. 한편, 퀘치 발생원에 대한 위치표정은 모두 3개의 센서를 이용하여 평가 하였으며, 퀘치시 각 센서에서의 신호도달시간 및 마그네트 전류와 더불어 AE 신호가 가장 큰 성분을 분석함으로써 퀘치 위치를 정량화 할 수 있었다.

그리고 퀘치현상을 유발시키는 선재의 미소슬립을 최소화하기 위하여 권선장력의 최적화와 이에 따른 보빈 형상을 고려할 필요가 있음을 알 수 있었다.

이상의 결과들을 통하여 음향방출기법을 이용한 퀘치 검출기법은 단지 검사수단으로서 뿐만 아니라 초전도 마그네트에 대한 상호 보완적인 방법으로서 매우 유용한 기법임을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국전기연구소의 “차세대 고효율 발전플랜트 기술 개발” 과제의 일환 및 한국과학재단 산하 성균관 대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 한국전기연구소, “차세대 고효율 발전플랜트 기술 개발”, 1997
- [2] ASNT, “Nondestructive Testing Handbook”, Vol. 5, 1987
- [3] 이준현, 이민래, “음향 방출에 의한 Nb3Sn 복합 초전도테이프의 미시적 변형거동 특성평가” 비파괴검사학회 춘계학술대회 논문집, pp. 289-300, 1998
- [4] 손명환, 백승규, 권영길, “레이스트랙형 초전도 계자코일의 AE신호 특성 평가”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집 A, EMP 29, pp. 186-189, 1998

- [5] H. Yoshimura, A. Ueda, M. Morita et al., "Acoustic emission monitoring on a model field winding for the 70MW class superconducting generator", Cryogenics, Vol. 32, No.5, pp. 502-507, 1992
- [6] Nondestructive Handbook, "Acoustic Emission Diagnostic and Monitoring Techniques for Superconducting Magnets", Vol. 5, pp. 389-401, 1987
- [7] O. Ige, A.D. McIntuff, Y. Iwasa "Acoustic emission monitoring results from a Fermi dipole", Cryogenics, Vol. 26, pp.131-140, 1985
- [8] K. Ikizawa, N. Takasu, Y. Murayama "Instability of Superconducting Racetrack Magnets", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 27, No. 2, pp. 2128-2131, 1991
- [9] 이준현, 이민래, 손명환 외, "음향방출기법을 이용한 극저온 환경하에서 초전도 제자코일의 퀘칭탐지 적용에 관한 연구", 대한기계학회지 논문 투고 중

저 자 소 개



이준현(李俊鉉)

1956년 5월 15일생, 1983년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1988년 일본동북대학 대학원 졸업(공학석사, 박사), 현재 부산대학교 기계공학부 부교수



이민래(李珉來)

1971년 10월 16일생, 1997년 금오공대 기계설계공학과 졸업, 1999년 부산대학교 대학원 기계설계공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 기계설계공학과 박사과정 재학 중



손명환(孫明煥)

1963년 4월 21일생, 1986년 부산대학교 물리학과 졸업, 1988년 부산대학교 대학원 물리학과 졸업(이학석사), 1998년 부산대학교 대학원 물리학과 졸업(이학박사), 1988년~ 현재 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 선임연구원



권영길(權永吉)

1959년 7월 28일생, 1982년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1984년 대학원(공학석사), 1990년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 1990년~1991년 한국기계연구원 선임연구원, 현재 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 그룹장