

### 레이스트랙형 초전도계자코일의 AE 신호 특성평가

손명환, 백승규, 고락길, 이연용, 배준한, 권영길, 류강식  
한국전기연구소 초전도응용연구사업팀

### Investigation of Acoustic Emission Signals in Racetrack Superconducting Field Winding Coils

M. H. Sohn, S. K. Baik, R. K. Ko, E. Y. Lee, J. H. Bae, Y. K. Kwon, and K. S. Ryu  
Applied Superconductivity Project Team, Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - Acoustic emission monitoring on two racetrack superconducting field winding coil was performed during excitation and quenches to diagnose the integrity of the field winding coils. Two field windings were not impregnated with epoxy. The results confirm that the acoustic emission signals are mainly due to conductor motions which cause premature quenching of the winding. The quench current of modified racetrack type field winding coil (Type B) are more higher than that of conventional field winding coil (Type A).

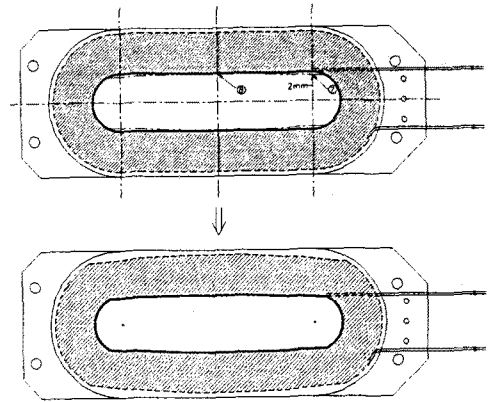


그림 1. 직선부를 개선하기 전(위, Type A)과 후(아래, Type B)의 계자코일 보빈.

#### 1. 서 론

초전도마그네트로부터 방출되는 Acoustic Emission (이하 AE라 함)은, 마그네트나 초전도선재의 상태변화를 검토하는 방법으로 연구가 시작되어,<sup>1)</sup> 금속계 초전도마그네트<sup>2,3)</sup>나 산화물 고온초전도마그네트<sup>4)</sup>등에 관한 AE연구가 행해졌다. 본 보고에서는, 30kVA 발전기의 초전도계자코일용으로 선택하고자 하는 두 가지의 레이스트랙형 NbTi 초전도계자코일에서, 여자상태 및 켄치시의 과도상태에서 방출되는 AE 신호 검출에 관하여 보고한다. 일반적인 레이스트랙형 계자코일과 직선부를 약간 곡면이 되도록 한 개선된 레이스트랙형 계자코일을 제작하고 비교 분석하여 어떤 것이 계자코일형태로 적합할 것인가 하는 것이 본 연구의 기본적인 고찰방향이다.

#### 2. 실 험

그림 1에 제작한 두 종류의 계자코일 보빈들을 나타내었다. 위의 것은 일반적인 양쪽의 직선부를 가지는 레이스트랙형(Type A)이고, 아래의 것은 Type A 보빈에 권선을 할 때에 직선부의 가운데 부분이 볼록해 지는 현상에 착안하여 직선부를 약간 곡면이 되도록 하여, 권선할 때 NbTi 초전도선재가 보빈에 정확히 밀착되도록 한 개선된 레이스트랙형(Type B)이다.

초전도계자코일은 그림 2에 나타낸 것처럼 보빈 홀더에 부착되어 조립되어 있고, 공진주파수 625kHz의 3개의 AE센서가 한 쪽의 직선부와 양쪽의 곡선부 위의 보빈에 그리스로 밀착되어 부착되어 있다. 운전전류에 따른 자장의 세기를 측정하기 위해 3개의 홀소자를 계자코일 중심과 안쪽 가장자리 그리고 중심에서 98mm 위에 부착 시켰으며, 온도를 감지하기 위해 보빈 윗면에 탄소저항온도센서(CGR 센서)를 부착하였다. 켄치가 일어날 때 계자코일의 보호를 위해 보호저항(상온에서 0.12Ω)을 계자코일 양단에 병렬로 연결하였으며, 켄치시의 전압측정을 위해 전압단자도 만들었다.

계자코일에는 Electronic Measurements INC.의 EMSII Power Supply(max 500A)와 AMI Current Controller를 이용하여 전류를 공급하였으며 선터저항을 사용하여 전류를 측정하였다. 자장은 Lake Shore

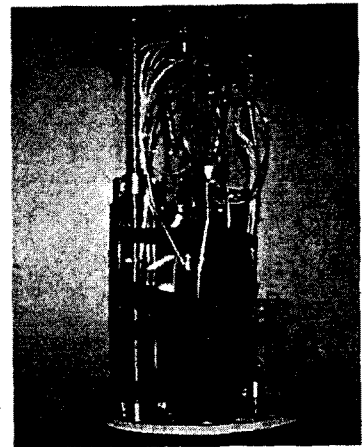


그림 2. 보빈 홀더에 부착된 초전도 계자코일.

120 Current Source로 100mA의 일정전류를 공급하고 발생전압을 Yokokawa AR4800 Analyzing Recorder로 읽어서 자장값으로 환산하였다. 냉각시의 온도측정을 위해 Lake Shore DRC-93CA 온도조절장치를 사용하였고, AE 신호는 Physical Acoustics Corporations의 MISTRAS 2001을 사용하였으며, 사용한 threshold level은 60dB 이었다. 또, AE파형은 LeCroy LC334AM 500MHz Oscilloscope로 잡았다.

먼저, 시험할 크라이오스타트 내에 계자코일을 넣은 후 액체 질소로 예냉을 한다. 액체질소를 빼내고, 액체 헬륨을 주입하여 초전도 상태로 만들었다. 인가전류를 증가시키면서 전류에 대한 발생 자장과 AE 신호 및 계자코일 양단의 전압을 동시에 측정하였다

### 3. 결과 및 논의

그림 3은 초전도체자코일에 사용한 NbTi 초전도선재의 단면을 나타낸다. 임계전류 값은 5T에서 580A이다.

그림 4는, 2종류의 계자코일에서 측정된 퀠치에 의한 트레이닝효과(training effects)이다. Type A 계자코일의 경우, 최초의 퀠치 전류는 175A로 굉장히 낮았으나, 수회의 퀠치를 거친 후 약 355A정도에서 포화되었다. Type B 계자코일은 최초의 퀠치전류가 Type A보다 훨씬 높은 284A이었으며, 5회의 퀠치동안에 계속하여 퀠치전류 값은 증가함을 보였는데, 이것으로 포화 퀠치전류 값이 400A를 훨씬 넘을 것으로 생각된다.

그림 5와 6에 Type A와 B의 계자코일에서 직접 측정된 인가전류에 따른 자장의 수직 성분의 크기와 비오-사바르법으로 계산한 결과를 각각 나타내었다. 두 계자코일 모두 측정치와 계산치는 매우 잘 일치함을 알 수 있었으며, Type B의 결과 값들이 모두 Type A보다 높은 데 이것은 권선보빈의 트랙이 약간 안으로 들어왔기 때문이다.

그림 7에 Type A 계자코일에 전류를 공급하면서 퀠치가 일어 날 때까지 계자코일에서 발생하는 AE 신호를 나타내었는데, 이것은 19번째의 퀠치 실험에서 얻은 결과이다. 이 때 퀠치 전류는 348A 이었다. 양 직선부에는 센서 B와 C를 그리고 곡선부 한쪽에는 A센서를 부착하였다. 직선부에 부착된 B와 C센서에서의 신호가 크게 나타났으며, 퀠치가 일어나기 전에도 간혹 크고 짧은 신호가 검출되었다. 코일 양단 사이의 전압은 퀠치 직후에 10V가 되었다가 약 1.7 초 경과한 후에 감소하는데, 이것은 실험에서 전류 제어를 손으로 조작하였기 때문에 생긴 것이고, 전압의 크기 10V는 전원장치의 최고 전압이다.

그림 8에는 개선된 직선부를 가진 Type B 계자코일에서 퀠치시 발생하는 AE 신호를 나타내었는데, 이것은 4번째의 퀠치 실험에서 얻은 결과이다. 이 때 퀠치 전류는 379A 이었다. 이번에는 그림 7에서의 실험과는 달리 직선부에 센서 B를 그리고 곡선부 양쪽에 A와 C센서를 부착하였다. 역시 직선부에 부착된 B센서에서의 신호가 상대적으로 크게 나타났으며, 퀠치가 일어나기 전에 수회의 신호들이 검출되었다. 퀠치 직전에 검출된 신호가 Type A 계자코일보다도 더 많았는데, 이것은 퀠치에 의한 트레이닝 회수도 적었고, 공급된 전류가 더 높아서 계자코일에 미치는 전자력도 큰 때문으로 생각된다. 이 두 AE 실험 모두에서 퀠치 직후의 AE 신호의 급격한 감소를 관찰하였는데, 이것은 퀠치에 의해 전류의 공급이 차단되어 초전도체자코일에 작용하는 전자력

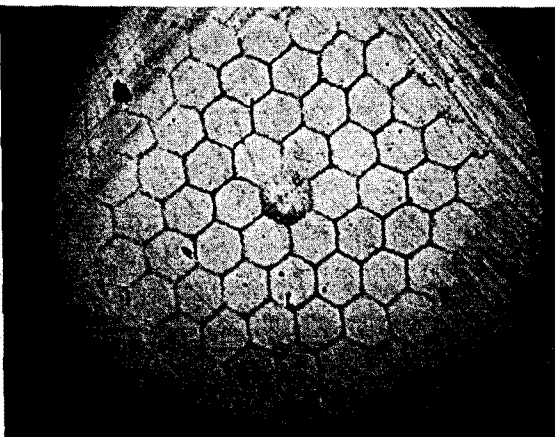


그림 3. 두 계자코일에 사용한 NbTi 도체의 단면.

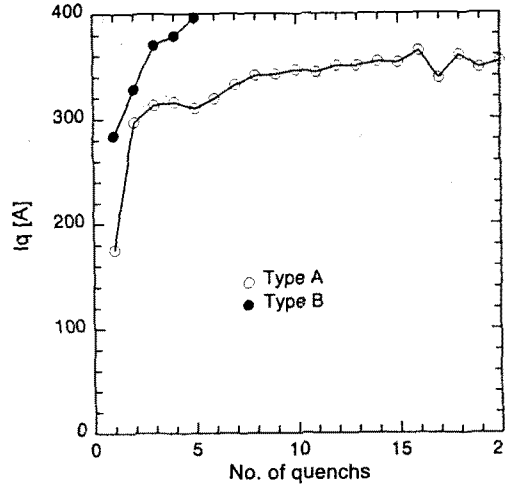


그림 4. Type A와 B 계자코일에서의 training effects.

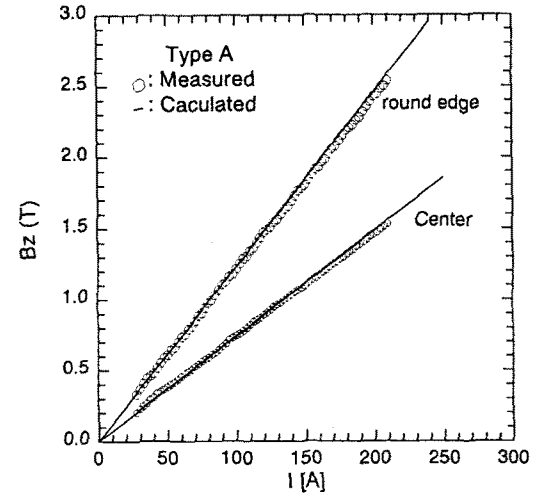


그림 5. Type A 계자코일에서 인가전류에 따른 발생 자장세기와 계산한 자장세기와와의 비교.

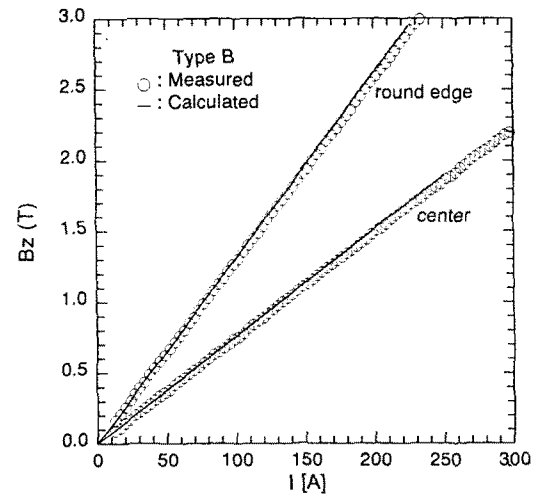


그림 6. Type B 계자코일에서 인가전류에 따른 발생 자장세기와 계산한 자장세기와와의 비교.

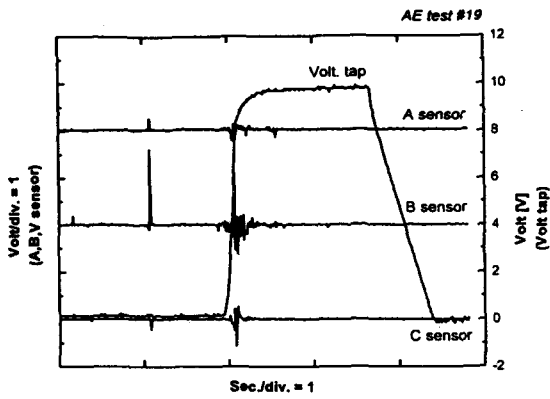


그림 7. Type A 계자코일의 켄치시의 AE 특성.

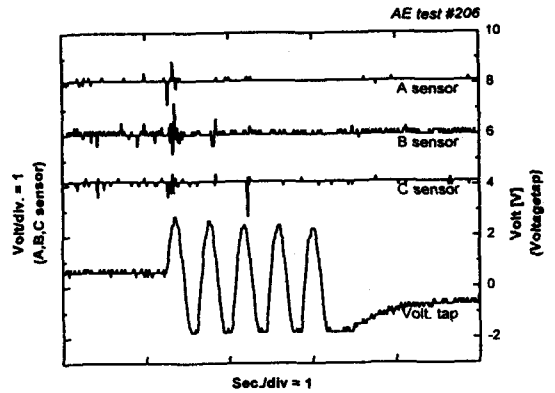


그림 9. Type B 계자코일에서의 변동전류에 대한 AE 신호.

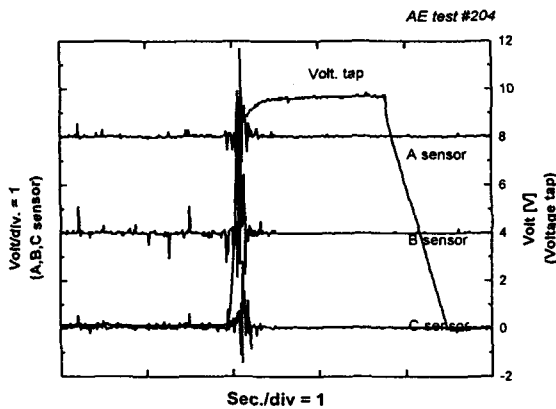


그림 8. Type B 계자코일의 켄치시의 AE 특성.

이 사라졌기 때문이다.

그림 9에는 Type B의 계자코일에 350A를 공급한 후 1.25Hz의 주파수로  $\pm 10A$  정도의 전류변동을 주었을 때의 AE 신호의 변화를 나타내었다. 이 변동 전류에 대해 계자코일 양단의 전압변동  $\Delta V$ 는 4V이었다. 실제 운전 중에 켄치는 일어나지 않았지만, AE 신호들은 많은 이벤트들을 발생시켰다. 레이스 트랙형 마그네트에 전류가 흐를 때에 마그네트 자체에 의한 자장과의 상호작용으로 로렌쯔힘이 각 초전도선에 마그네트의 바깥쪽으로 작용한다. 3센서 신호들 중에서 직선부에 있는 B 센서의 신호가 가장 크고 민감하여, 역시 AE 신호의 근원을 직선부로 추정할 수 있다. 공급전류가 증가하는 동안 초전도선은 로렌쯔힘이 지속적으로 작용하고 인접한 초전도선들 사이의 마찰에 의해 AE 신호를 계속 발생시키는 것을 확인 할 수 있었고, 갑작스런 변동전류에 의해 AE 파형이 크게 검출되는 것도 확인하였다. 그럼에 전류의 파형은 나타내지 않았지만, 마그네트 양단간 전압의 변화로 전류의 변동을 간접적으로 알 수 있었다. 특이한 것은 이 때의 AE 신호는 전류 증가 때보다 작고, 이벤트수도 적음을 확인한 것이다. 이것은 공급되는 전류가 350A에서  $\pm 10A$ 로 변동하는 동안에 초전도선에 작용하는 로렌쯔힘 역시 그 크기가 변하기 때문에 인접한 선재들간의 마찰들이 줄어 이벤트수가 적은 것으로 판단된다. 이런 현상은 Type A 계자코일에서도 마찬가지로 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

30kVA 초전도발전기의 계자코일 형태로 채택한 레이

스트랙형 NbTi 초전도 마그네트의 안정성에 대한 실험을 AE 검출장치로 행하였다. 켄치 직전에 불규칙하고 큰 AE 신호들을 검출할 수 있었고, 특히 켄치시에는 많은 이벤트들을 발생 시켰다. 실험에 사용된 마그네트는 에폭시 등으로 함침하지 않았기 때문에 두 권선 형태 모두 선형적인 직류전류의 증가에 대하여도 AE 신호를 검출할 수 있었다. 따라서, AE 측정장치는 계자코일에서 도체의 안정성 시험과 켄치검출에도 적합하다.

보빈의 모양에 따라 같은 초전도선으로 만든 마그네트 임에도 불구하고 굉장한 켄치전류의 차이를 보였다. 그러므로 함침을 하지 않고 레이스 트랙형 마그네트를 제작할 때에는 권선들의 개선이 필히 요구되고, 30kVA 발전기용 회전자의 레이스 트랙형 계자코일 보빈의 형태는 직선부가 개선된 Type B가 적합하다고 결론 지을 수 있다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] H. Nomura et. al. : "Acoustic emission from superconducting magnets", Cryogenics 17 471 (1977)
- [2] O. Tsukamoto et. al. : "Sources of acoustic emission in superconducting magnets", J. Appl. Phys. 54 997 (1983)
- [3] N. Higuchi et al. : "A study on stability of conductors under a high gravitational field", ICEC 16 proceeding 2, 1297 (1996)
- [4] K. Arai et al. : "Heating induced acoustic emission in an adiabatic high-temperature superconducting winding", Cryogenics 37, 473 (1997)