

# 핵융합로 초전도 마그네트 퀘칭 모니터링 기술

이 준 현 · 부산대학교 기계공학부, 교수

e-mail : johlee@pusan.ac.kr

이 글에서는 차세대 초전도 핵융합로의 초전도 마그네트의 건전성을 평가하기 위한 퀘칭 모니터링 기술 방법과 응용에 대해 소개하고자 한다.

## 초전도 핵융합 장치

핵융합 연구는 상당히 오래 전부터 진행되어오던 것으로서 이미 1932년에 영국의 코크로프트-윌튼(Cockroft-Walton) 박사가 핵융합 반응을 실험적으로 입증함으로써 본격적인 실험 연구가 가능해졌다. 또한 시대적 요구에 부응하여 핵융합 발전을 실현하기 위한 개념설계와 공학적 개념 설계 연구가 근간 반세기에 걸쳐 지속적으로 진행되어 현재는 장치개발 연구를 중심으로 기존 기술의 한계성에 도전하고 있다.

핵융합로란 융합에서 해방되는

에너지를 생성입자의 운동에너지 형태로 만들고 이를 다시 열에너지로 바꾸어 최종적으로 전기에너지로 변환시키는 장치를 말한다. 핵융합로에서 연료가 되는 원자를 초고온 상태로 두고 플라즈마를 응축시켜, 이때 열운동 과정에서 발생하는 충돌을 이용하여 핵융합 반응을 일으킨다. 지구상에서 현재까지 알려진 실행 가능한 핵융합연구 방법으로는 자장 밀폐(magnetic confinement) 방식과 관성밀폐(inertial confinement) 방식 등 크게 두 가지로 나뉘어져 이루어지고 있다. 자장밀폐는 고온의 플라즈마를 강

력한 자장을 이용해서 핵융합반응이 일어나도록 가둬두는 방식이고, 관성밀폐는 중수소와 삼중수소를 얼려서 작은 고체의 알갱이로 만든 다음 여기에 레이저를 이용한 강력한 에너지를 집중시켜 핵융합반응을 이끌어내는 방식이다. 그러나 이들 방식 모두가 아직은 커다란 기술적 장벽에 부딪혀 있다.

핵융합로 장치는 플라즈마의 물리학적 개념설계와 공학적 설계과정을 거치고 나서 각 각의 요소에 대한 기술 연구를 체계적으로 총 집산하여 순차적으로 건설해 나아가는 일련의 과정을 필

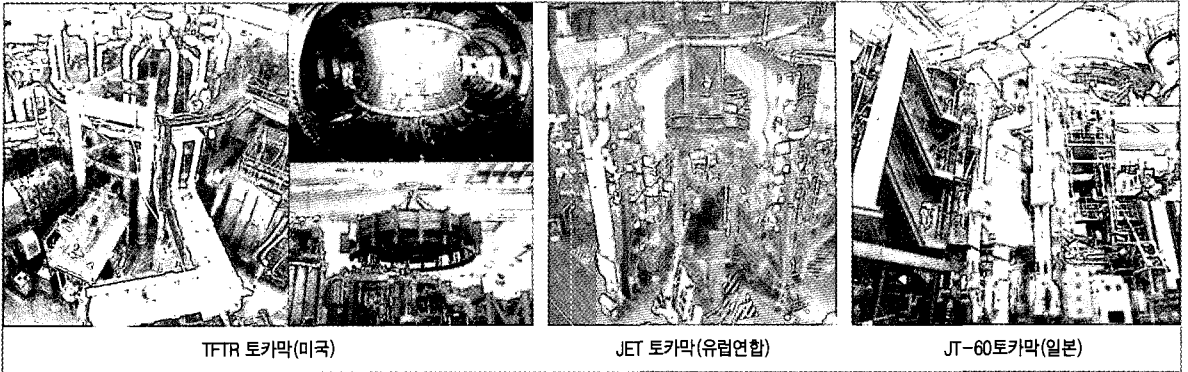


그림 1 개발 중인 세계 각국의 토카막

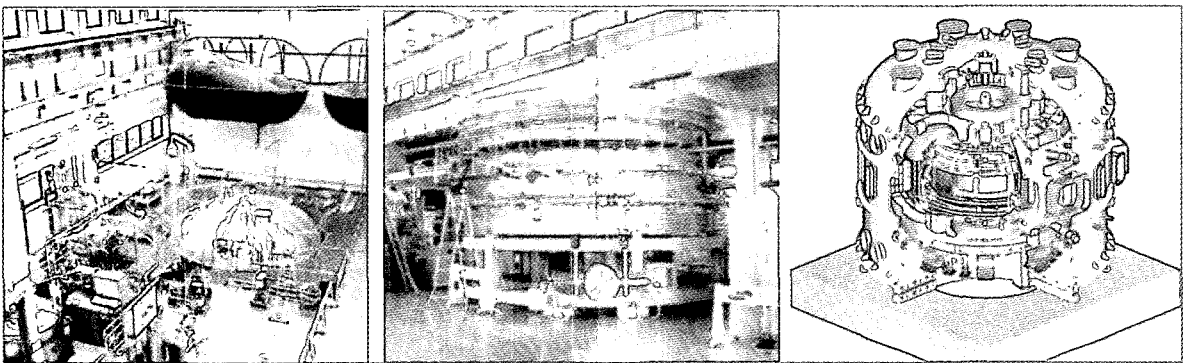


그림 2 개발 중인 KSTAR(초전도자석 및 토카막)

요로 한다. 이제까지 각 국에서 개발해 온 대형 토카막(Tokamak) 장치로서는 EC의 JET, 미국의 TFTR, 일본의 JT-60, 러시아의 T-20 등이 있으며, 국내에서도 세계 최초의 초전도자석을 이용한 도넛 형태의 토카막 방식 핵융합 장치인 KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)를 개발 중에 있다. 토카막이란 러시아말인 Toroid Kamera(chamber) Magnit(magnet) Katushka(coil)의 첫자를 따서 만든 합성어이며, 구조

련의 아치모비치가 1965년 발표한 후 세계적으로 그 성능의 우수성을 인정받아, 현재 작동 중이거나 새로 짓는 실험용 핵융합로는 대부분 이 방식을 택하고 있다. 이 방식의 원리를 이해하려면 플라즈마와 자기장과의 상호작용을 이해하여야 한다. 플라즈마는 전리 기체로서 거시적으로는 전기적 중성을 띄고 있지만 자기장이 인가되면 플라즈마를 구성하고 있는 이온과 전자가 서로 반대 방향으로 나선운동을 하며 진행하게 되는데 이때 자석의 위치 구성을 도넛 형태로 배열하면 진

행경로가 갇혀진 모양으로 구속되게 된다. 따라서 플라즈마는 공간적으로 갇혀지게 되고, 다양한 가열장치를 통하여 플라즈마를 가열하게 되면 핵융합 반응이 일어날 수 있는 태양의 중심과 같은 환경이 만들어진다. 토카막의 주장치 구조를 살펴보면 플라즈마를 발생시키고 가두어둘 진공용기, 플라즈마를 구속하는 토로이달(Toroidal) 자석, 플라즈마가 진공 용기 내에서 안정적 상태를 유지하기 위해 제어하기 위한 폴로이달(Poloidal) 자석으로 나눌 수 있고, 또한 플

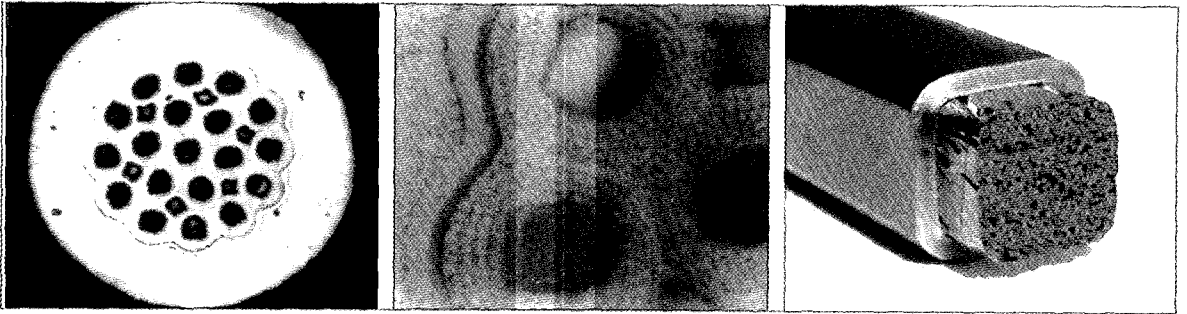


그림 3 KSTAR 초전도선재

라즈마 전류를 구동하기 위한 중앙 슬레노이드 코일이 있으며, 진공상태를 유지하기 위한 진공 배기계통과 고온 플라즈마가 직접 맞닿는 부분인 플라즈마 인접 부품 및 용기보호 장치가 있다. 또한 사용 자석의 종류는 상온에서 사용하는 상전도 자석과 전류를 오랫동안 흘려 자기장의 세기와 반응시간을 충분히 늘일 수 있게 하는 액체헬륨을 사용하는 초전도 마그네트의 경우가 있는데, 초전도 마그네트의 경우는 저온 냉각 상태 보호를 위한 Cryostat 라는 장치가 추가로 필요하다.

### 초전도체의 퀘칭

핵융합 반응이 안정한 상태에서 지속 가능한 규모의 장치를 개발하기 위해서는 현재보다 3~4배 정도 대형인 토카막 장치가 필요하다. 또한 플라즈마 장치가 거대해짐에 따라 기존의 장치로는 열손실이 매우 크기 때문에 마그네트의 개발이 현실적으로 불가능하므로 초전도 마그네트

를 사용하는 것이 필수적이다. 종전에는 상전도 타입의 시험장치로 기초실험을 해 왔으나 파일럿 시스템 장치에서는 장치가 대형화됨에 따라서 플라즈마의 잠금, 가열에 대단히 높은 전자장이 필요하다. 따라서 마그네트의 도체 전류가 수천 암페어(A)에 이르게 되어 기존의 상도체(구리선)를 사용할 경우, 도체의 단면적이 너무 커지고 열이 많이 발생하여 기존 냉각시스템으로는 구현이 불가능하다. 따라서 현재 상용화된 초전도 선재(NbTi, Nb<sub>3</sub>Sn 등)를 이용하면 액체헬륨(He) 온도에서 거의 저항이 제로이므로 손실을 극소화할 수 있기 때문에 초전도 핵융합 마그네트의 구성이 가능하다. 현재 토카막 장치의 초전도화는 필수적인 요소로 인식되고 있으며 세계적으로 관심이 커짐에 따라서 국제 에너지 기구(IEA)를 중심으로 공동연구가 활발하게 진행되고 있다.

초전도체의 특징 중 하나는 작은 면적으로 대전류가 흐르기 때문에 전류가 어떤 값 즉 임계전

류 이상이 되면 상전도로 급격히 바뀌는 현상이 발생하게 된다. 이를 초전도체에서는 퀘칭(quench)가 발생하였다고 규정을 하게 된다. 초전도체에 퀘칭이 발생되었을 때는 제로인 저항이 상전도체의 저항으로 바뀌면서 많은 전압이 걸리게 되는데, 이에 따른 급격한 온도 상승과 저항값의 증가와 더불어 전체적으로 퀘칭을 파급시키게 되어 모든 초전도체를 상전도체로 바꿀 수 있다. 이러한 초전도체에서 퀘칭 요소 세 가지는 온도와 전류 및 자기장이다. 이는 각각 독립된 게 아니라 퀘칭이 발생하게 되면 온도를 상승시켜서 초전도체를 상전도 상태로 변화시키는 연쇄적인 결과가 발생된다.

### 초전도 마그네트(계자 코일)의 퀘칭특성 및 검출기법

앞서 언급한 바와 같이, 초전도 마그네트가 고온의 상태에 이르

면 그에 따른 냉각에 대한 부분이 필수적이며 따라서 실시간으로 모니터링 할 수 있는 부분이 중요하게 된다. 초전도 계자코일은 계통의 안정도를 높이기 위해 동기 리액턴스를 낮추면서 강자계를 만들기 위해서 코일 내에 높은 전류가 흐르게 된다. 그러나 이러한 큰 전류의 통전은 전자기력에 의해 초전도 코일 간 마찰을 일으켜서 취약부분에 국부적인 퀘치 영역을 발생시킨다. 퀘치는 이러한 국부적인 마찰열에 기인하는 것으로 계자코일의 안정도를 떨어뜨리고, 심한 경우에는 코일 내의 절연파괴로 인한 선간 단락을 일으켜 초전도선이 타버리는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 국부 퀘치에 의해 만들어지는 상전도 영역의 최대 온도가 초전도선이 손상을 입을 온도에 도달하기 전에 코일에 흐르는 전류를 제로로 감쇄시켜야 한다. 따라서 초기 퀘치 영역의 최대 상승 온도를 감지하고 보호할 수 있는 퀘치 검출·보호 시스템이 필수적이다.

퀘치 보호란 퀘치가 발생하기 전에 이를 감지하여 퀘치를 억제하거나 감소시키는 작용을 뜻한다. 핵융합로의 초전도 마그네트에서 퀘치가 발생되어 손상을 입게 된다면 허용전류가 감소하여 초전도 마그네트의 성능을 저하시키는 것은 물론 코일의 소손이라는 심각한 문제가 발생할 수 있다. 이러한 관점에서 초전도 마

그네트의 퀘치의 검출과 검출에 다른 보호기가 있어야 한다.

일반적으로 퀘치 검출방법들은 퀘치가 발생되었을 때 퀘치 발생 위치를 알아내기 위해 사용될 수 있다. 그러나 초전도 마그네트의 특성상 퀘치가 발생되었다면 계자코일 자체에 손상을 입었다고 보아야 하기 때문에 초전도 마그네트에 대한 신뢰가 떨어지게 된다. 초전도 마그네트 설계 시 많은 여유를 두고 설계되었다고 하더라도 예상치 못한 요인에 의해 퀘치가 발생되기도 하는데 이때 퀘치가 발생되기 전에 검출하여 마그네트 전체에 퀘치를 방지하기 위한 보호기가 필요하다.

초전도 마그네트에서 퀘치를 판단할 수 있는 요소들로는 주변 요소로서 냉각제의 압력상승, 온도상승과 직접적인 요소로서 계자코일의 저항 발생, 온도 상승, 전류 증가 등이 있다.

퀘치의 검출을 위해서 사용되는 센서들은 그 신호의 신뢰성을 확보하기 위해서 많은 노력이 진행되고 있다. 현재까지 몇 가지 센서들이 연구·개발 중에 있고 또한 퀘치 검출을 위해서 직접적으로 사용되지 않는 센서들도 많다. 결국, 직접적인 퀘치의 검출은 주로 전압탭에 의한 신호를 모니터링 하는 방법이 가장 일반적이다. 일반적으로 초전도 계자코일의 퀘치 시 센서 신호들은 외부시변자장에 의한 자기전압의 발생을 최소화하도록 장착되지만

완전히 그 영향을 제거할 수는 없다. 따라서 신호의 신뢰성을 확보하기 위한 몇 가지 기술들이 소개되어 있으며, 대표적으로 두 가지의 검출 기술을 소개한다.

먼저, Central-Difference Averaging Technique으로서, 극저온 용기(cryostat)로부터 나온 전압신호를 각각 모니터링 하지 않고, 단지 3개의 신호를 복합적으로 처리하여 얻어지는 중앙차 평균 전압을 감시하는 방법이다. 전압탭의 신호와 중앙차 평균기술의 결합하면 외부시변자장에 의해 발생하는 최대 노이즈 전압(자기전압+외부노이즈)을 크게 감소시킬 수 있다. 그러나 대개의 경우 시변자장 하에서 코일의 동작 시 S/N비가 1보다 작기 때문에 퀘치의 검출은 매우 어려워진다. 이러한 난점을 극복하기 위해서 무유도성 전압탭(co-wound voltage taps)과 이 기술과의 결합함으로써 매우 크게 향상되었음이 보고된 바 있다.

한편, 또 다른 하나는 Ishigohka에 의해 개발된 방법으로서, 각각의 전압 신호에 gain을 주고 이들을 연속적으로 더해가는 방법이다. 이 때, 각각의 gain 값을 적절히 조절함으로써 퀘치 저항이 존재하지 않을 경우의 출력 전압을 최소화할 수 있다. 이러한 기술은 많은 수의 증폭기를 요구함으로써 그 민감도를 향상하기 위한 비용이 상당히 증가하는 단점이 있다.

한편, 일반적으로 재료가 외부로부터 응력을 받아 변형을 일으킬 때나 물체 내의 균열이 발생하거나 성장할 때 원자의 재배열이 일어나며, 이 때 물체는 급격한 에너지 해방에 의해서 탄성파 (elastic wave)를 방출하게 되는데, 이러한 탄성파 방출을 음향 방출(Acoustic Emission, 이하 AE)이라 한다. 특히 AE는 재료 내부에 있어서의 소성변형, 균열의 발생 및 성장 등의 동적과정을 모니터링할 수 있을 뿐만 아니라 외부에서 작용하는 응력이 재료의 탄성한계보다 훨씬 낮은 경우에 있어서도 재료 내부의 미시적 변형을 실시간(on-line)으로 모니터링할 수 있는 매우 유

용한 수단이다. 초전도 마그네트에 대한 음향방출기법 적용은 1970년 후반에 처음으로 시도되어 최근에 이르기까지 많은 연구가 진행되고 있다. 지금까지 보고된 바에 의하면, 초전도 마그네트에 있어서 AE신호 발생원(source)은 초전도 선재의 변형과 미소슬립에 기인한 마찰거동 및 에폭시 균열과 같은 기계적인 교란에 의해서 주로 방출된다는 사실이 입증되었다. 즉, 초전도 마그네트에서 AE신호 발생원은 다음 사항에 기인한다는 사실이 보고되고 있다.

- (1) 초전도 선재의 미소슬립
- (2) 초전도 선재의 플렉스 거동 (flux motion)

- (3) 액체 헬륨의 bubble현상
- (4) 에폭시 균열

AE신호는 위의 각 각의 경우에 대해서 모두 발생하기 때문에 마그네트 전압과 AE신호를 동시에 검출함으로써 조기 퀘칭에 대한 신뢰할 수 있는 AE이벤트의 발생원을 평가할 수 있다. 보편적으로 에폭시가 함유된 초전도 마그네트에 대한 퀘칭 이벤트는 다음 세 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째의 경우는 퀘칭 시 도체의 갑작스런 슬립으로 인하여 전압 스파이크를 수반하여 AE신호가 발생된 경우이며, 두 번째의 경우 AE신호는 발생하지만 전압 스파이크가 발생하지 않는 퀘칭으로서 이 경우는 주로 도체의 거동과는

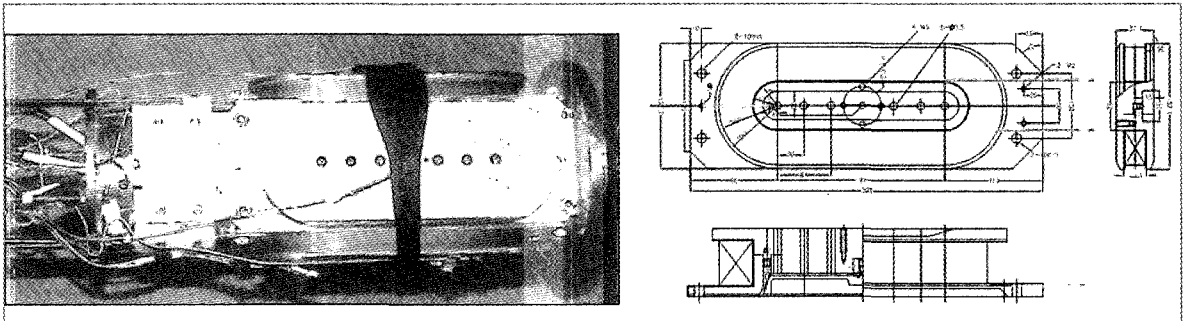


그림 4 AE를 이용한 초전도 마그네트의 퀘칭 검출시험(KERI)



그림 5 플라즈마 코팅



그림 6 플라즈마 용접

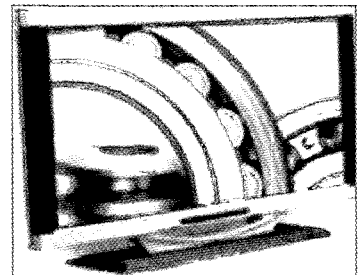


그림 7 플라즈마 디스플레이

상관없이 에폭시 균열과 같은 이벤트에 의해서 발생된다. 셋째, 켄치 시 AE신호와 전압 스파이크가 모두 발생하지 않는 경우로서 이러한 켄치는 마그네트의 순수한 주울(joule)열에 의해서 도체가 임계전류에 이르면서 상전이(non-superconducting)를 유발시키는 경우이다. 이 때 켄치는 기계적인 교란에 의한 것보다는 순수 발열에 의해서 발생하기 때문에 켄치 시작점에서 마그네트 전압이나 AE신호가 감지되지 않는다. 초전도 마그네트에서의 켄칭기법으로서 삼각법(triangulation)을 이용하여 켄치 발생원에 대한 위치를 평가할 수 있다. 즉 간단한 경우에 있어서는 몇 개의 AE 센서로도 음향방출의 위치를

평가할 수 있으며, 대형 마그네트의 경우는 보다 많은 센서를 이용하여 켄치가 발생하게 될 때, 마그네트 전압 및 탄성파의 도달 시간을 계산하여 켄치 위치를 평가할 수 있다.

현재 핵융합 발전설비에 대한 모니터링 시스템을 비롯한 대부분의 개념설계는 그 동안 이미 이루어진 기초 연구의 성과와 부대장치 개발의 경험을 토대로 성숙단계에 있다고 할 수 있다. 현재의 계획대로라면 21세기 초에는 자기점화(ignition)가 가능한 핵융합 발전이 실현될 것으로 보인다. 핵융합 연구에 대한 파급효과 또한 궁극적으로 미래의 핵융합로의 개발에 밝은 전망을 안겨 줄 것이다. 한 가지 예로서, 플라

즈마의 산업적 응용은 플라즈마 디스플레이, 플라즈마 용접, 플라즈마 코팅, 플라즈마 전구 등뿐만 아니라 핵융합 기술과 관련해서는 위성통신, 자기부상열차, 첨단특수소재, 반도체 등에 이르기까지 다양하게 연구 부산물들이 응용되고 있다.

현재 과학자들은 핵융합 상용화시기를 향 후 4~50년으로 전망하고 있는 가운데 정부에서도 차세대 초전도 핵융합 실험장치의 개발 사업(G7)에 착수하여 향후 에너지 문제에 적극 대처하고 핵융합 기술의 선진화를 꾀하겠다는 목표로 가지고 지속적인 연구를 진행 중에 있다.

## 기계용어해설

### 선택적 촉매 저감(SCR : Selective Catalytic Reduction)

다양한 혼합물인 배기가스 중에 특성 유해물질을 줄여주기 위하여 촉매 저감 효율을 높일 수 있는 물질을 분사시켜 주는 기술을 말한다.

### 후류열차풍(Slipstream)

사전적 의미는 프로펠러에 의해 뒤로 밀리는 공기의 흐름을 말하고 있지만 철도 차량 공기역학 관련하여서는 열차풍으로 번역되고 있다. 고속전철의 등장으로 차량이 통과하면서 발생하는 열차풍은 차량 공력 설계와 밀접한 관계를 가지고 있을 뿐만 아니라 일반 승객들에게도 영향을 미치고 있다.

### 지로터 펌프(GeRotor Pump)

내륜기어(inner rotor)와 외륜기어(Outer rotor)가 맞물려 회전하면서 펌프역할을 하는 기계로서 한 쪽(inner 혹은 outer) 치형에 대하여 미끄럼을 최소로 하는 상대치형을 생성할(Generate) 수 있다. 이렇게 쌍으로 이루어진 Generated Rotor(GeRotor)를 사용하여 회전하는 동안 치형 사이의 공간의 변화를 이용하여 펌프작용을 한다.

### 비정상열선법(Transient Hot-wire Method)

측정대상 액체 속에 놓인가는 열선센서를 순간적으로 가열시켜 과도적으로 일어나는 열전도 현상을 이용하여 액체의 열전도율을 측정하는 방법, 액체시료의 경우 가장 편리하고 정확하여 널리 사용되는 방법.