

미국 전력연구원(EPRI) 선정 발전기 고정자 냉각 회로 막힘 현상 연구 수행

박 병 기

서울대학교 핵재료연구실

미국 전력연구원(Electri Power Research Institute, EPRI)이 기획한 「대형 발전기 고정자 냉각 회로의 유로 막힘 현상에 관한 연구(Clogging and Plugging in Generator Cooling Water Circuits)」는 세계 도처에서 발생하고 있는 대형 발전기의 고정자 냉각 회로에서 고정자 구리소선의 부식으로 생성된 부식 생성물들에 의하여 유로가 막히는 문제를 해결하기 위한 연구 과제이다.

지난 1999년 9월 EPRI는 서울대 원자핵공학과 황일순 교수의 핵재료연구실(국가지정연구실)로 연구 과제 참여 요청서를 보내와 참여 의향서를 접수시킨 후 서울대학교 핵재료연구실(황일순 교수·박병기 박사)과 한전 전력연구원(김기태 박사·정한섭 박사)의 연합팀을 구성하여 연구 과제를 수탁하기 위한 연구 계획서를 접수시켰다.

EPRI는 서울대학교와 한전 전

력연구원의 연합팀과 세계적인 8개 부식 전문 연구 기관들의 연구 계획서를 심사·평가하여 미국의 Electromechanical Engineering Associates, Inc.와 함께 연구 과제의 주계약자로 서울대학교 핵재료연구실을 선정하였다.

연구 과제의 계약 및 착수를 위하여 2000년 6월 25일 미국 Palo Alto에서 개최된 Kick-off meeting에서 본 연구 과제의 계약 및 추진 방안에 관한 회의가 개최되었다.

본 연구 과제를 수행하기 위한 연구팀은 서울대 핵재료연구실의 황일순 교수를 연구 책임자로 박병기 박사, 순천향대학교 이인형 교수와 한전 전력연구원의 김기태 박사과 정한섭 박사로 구성되며 전체 연구 조직은 <그림 1>과 같다.

본 연구 과제는 국내 연구진이 미국 EPRI의 연구 과제를 받은 첫 사례로서, 우리 원자력 기술이 세계적 수준에 다가가고 있음을 알리는 신

호탄의 의미를 갖는다.

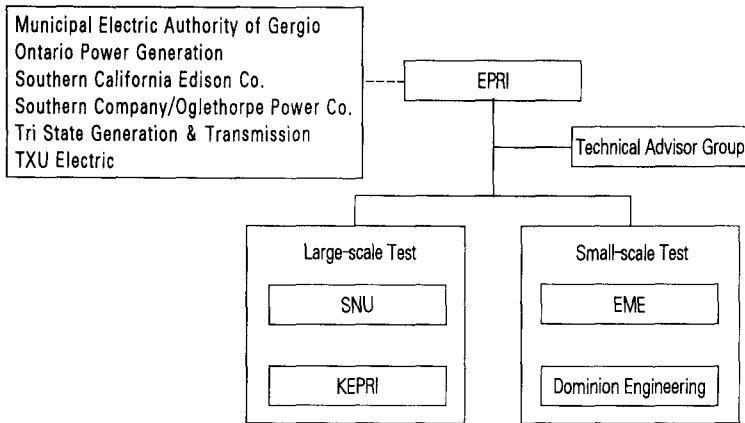
연구 배경

발전기는 회전자와 고정자로 구성되어 있다. 회전자는 증기발생기에서 생성된 증기의 힘으로 회전하며 고정자에 유도 전류를 발생시키고 이 전류가 발전소 외부로 공급된다.

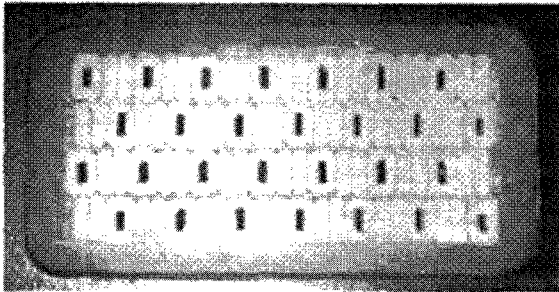
고정자는 구리 권선을 발전기 길이 방향으로 배열한 원통형 구조를 가지며 원자력발전소의 경우, 이의 크기는 약 1m의 직경에 약 10 m의 길이를 가진다.

유도된 전류가 고정자 구리 권선을 따라 흘러나올 때 약 0.3%의 에너지가 구리의 전기 저항에 의해 열로 변환된다.

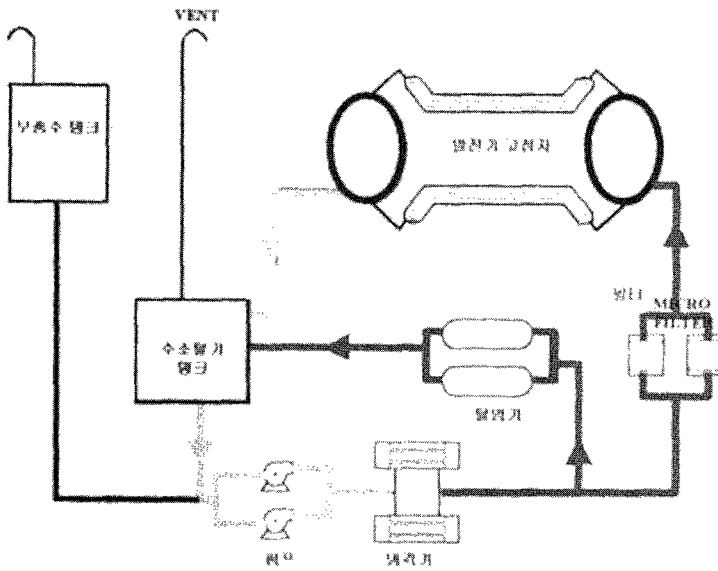
이 열은 <그림 2>에 보여진 바와 같이 구리 권선에 가로 3mm, 세로 1.5mm의 유로를 가지는 구리 소선을 설치하여 <그림 3>과 같은 냉각 회로에 초순수 냉각수를 흘려 제거



<그림 1> EPRI 연구 과제의 수행 조직



<그림 2> 발전기 고정자 권선의 단면



<그림 3> 원자력발전소 발전기 고정자 냉각 회로의 개략도

한다.

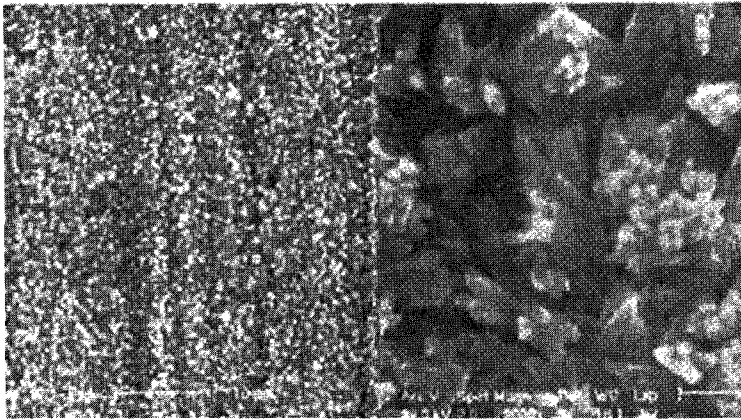
구리는 물에서 내부식성이 좋은 재료로 알려져 있지만, 냉각수의 수화학 조건에 따라 발생하는 구리의 부식과 이에 수반되는 구리 부식 생성물들의 침전 현상에 의하여 고정자 냉각 회로의 냉각수 유량을 감소시키거나 유로의 막힘 현상을 일으킨다.

일반적으로 고정자 냉각 회로의 유량 감소가 경보치에 도달하면 발전소의 가동이 중지됨으로써 막대한 경제적 손실을 가져온다.

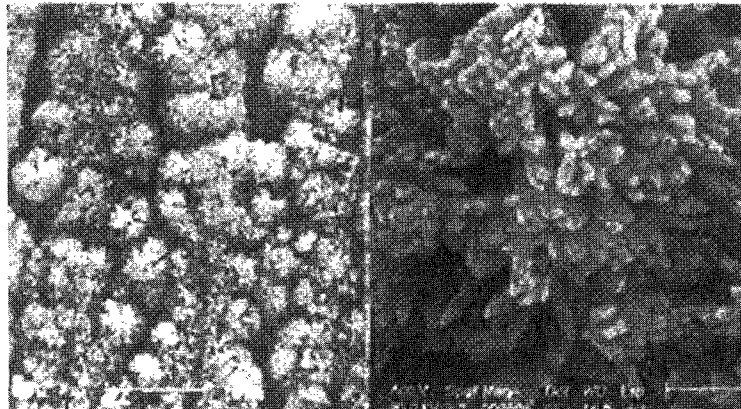
냉각 회로의 유량 감소 현상이 자주 발생하거나 국부적으로 구리 소선의 유로가 막힐 경우 냉각 회로의 냉각 능력이 급격히 감소하여 고정자 권선의 전기 절연 재료가 파손되고 발전기 자체를 교체하는 사례도 보고된 바가 있다.

이 문제를 해결하기 위한 방안으로 발전기 제작 회사들은 원자력발전소와 같은 발전소에서 사용되는 수냉각 발전기의 고정자 냉각수는 구리의 부식 현상이 최소화되는 용존 산소 영역인 2ppm 이상의 고용존 산소 조건이나 50ppb 이하인 저용존 산소 조건의 수화학 환경에서 운전되도록 설계·제작하여 공급하고 있다.

그러나 운전중 용존 산소의 양이 100~1000ppb 영역이 되는 운전조건이 형성되면 구리의 부식이 급격하게 증가하여 냉각 회로의 유량감



〈그림 4〉 저용존 산소에서 산소 유입이 계속되어 고용존 산소 수화학 조건으로 천이된 후 구리 표면에서 산화물 사진



〈그림 5〉 저용존 산소 조건에서 산소의 유입에 의하여 생성된 구리 산화물 사진

1993년)에서 수행한 저용존 산소 운전 방식의 실험 결과, 〈그림 4〉에 보여진 바늘 모양의 Cu_2O 구리 부식 생성물들이 산화 피막을 형성하고 있는 것을 확인하였다.

저용존 산소에서 고용존 산소로 수화학 환경을 바꾸었을 때 바늘 모양의 구리 부식 생성물들의 냉각수 유입은 일정한 시간 동안 계속된 후 감소하며, 고용존 산소 수화학 환경을 계속 유지한 후 관찰한 구리 소선 표면의 산화물 피막은 〈그림 5〉에 보여진 바와 같이 바늘 모양의 산화물들이 사라지며 구리 표면에 육각 모양의 산화물로 바뀌는 현상을 확인하였다.

즉 구리 부식에 의하여 냉각 회로가 막히는 현상은 구리 소선 표면의 산화물들이 용존 산소의 변화에 따라 안정된 산화물 구조에서 변화된 용존 산소 영역에서 안정화된 산화물로 바뀌면서 냉각수로 산화물들이 급격하게 유입하여 발생한다고 볼 수 있다.

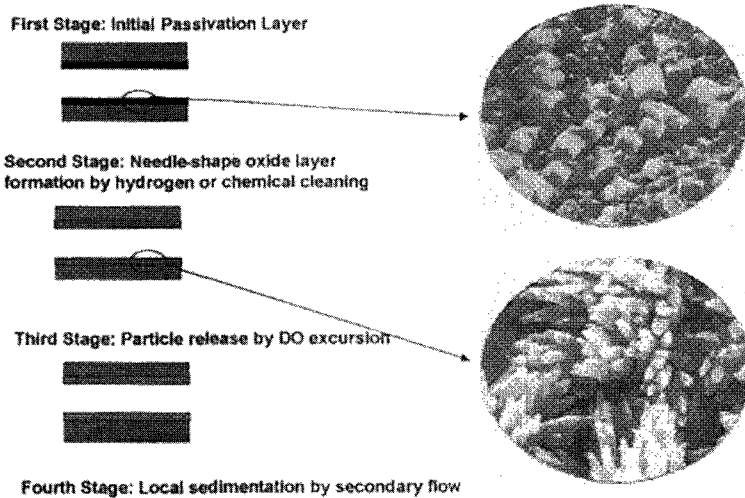
현재까지의 연구 결과로부터 〈그림 6〉에 보여진 바와 같이 고정자 냉각 회로의 막힘 현상이 발생하는 메커니즘을 추론할 수 있다.

초기 고정자 권선의 제작시 형성되는 안전한 부동 피막은 산소의 유입이나 화학 세정 등에 의하여 바늘 모양의 산화물 피막으로 변화되며 이후 용존 산소의 농도가 정상 운전 상태에서 벗어날 경우 산화물입자

소 및 유로의 막힘 현상이 발생한다. 유로 막힘 현상은 고정자 구리 소선 안에서 구리 부식 생성물의 성장 및 침전에 의한 유량 감소와 구리 부식 생성물들이 필터나 스트레이너에 침적되어 발생하는 유량 감소 현상으로 구분되며 이러한 현상은 저용존 산소와 고용존 산소 운전 방

식 모두에서 발생하는 것으로 알려져 있다.

서울대학교 핵재료연구실이 1993년 「고리 3호기 고정자 권선에 서 구리 부식에 의한 유량 감소 현상에 관한 연구 과제(고리 3·4호기 고정자 냉각수 유량 감소 현상에 대한 연구, 한국전력공사 발주,



〈그림 6〉 고정자 냉각 회로 막힘 현상의 기구학적 이해도

가 급격히 냉각수로 유입되고 구리 소선 유로 안에 형성되는 이차 유동에 의하여 국부적으로 침적되어 발생한다고 볼 수 있다.

연구 추진

본 연구는 서울대학교 핵재료연구실의 저용존 산소 운전 조건에서 수행한 연구 결과를 바탕으로 고용존 산소 및 저용존 산소 발전기 고정자 냉각 회로에서 구리 소선 부식 현상의 기구학적 이해, 고정자 냉각 회로의 막힘 현상을 유발하는 수화학 조건의 원인을 이해하고 초기 경고 위한 방법 고안, 고정자 냉각 회로의 막힘 현상을 유발하는 수화학 조건의 상호 관계 이해, 고정자 냉각회로 막힘 현상 예방법 고안, 천이 현상 발생시 정상 운전 상태로 회귀를 위한 절차 권고를 목표로 한다.

본 연구진은 이러한 목표를 달성하기 위하여 서울대학교 핵재료연구실에서 고정자 냉각 회로의 모사 실험을 수행하고, 한전 전력연구원은 실제 발전소 환경의 감시 및 자료 수집 연구를 수행하는 방안으로 역할을 분담하였다.

고정자 냉각 회로의 막힘 현상을 기구학적으로 이해하기 위한 고정자 모사 냉각 회로는 실제 발전기 고정자 소선과 같은 길이의 구리 소선을 사용하여 고정자 구리 소선의 열 발생 원인 저항 가열로 온도를 제어하고, 모사 냉각 회로의 수화학 환경을 제어하면서 실험을 수행한다.

모사 냉각 회로는 발전기 고정자 냉각 회로를 물리 화학적으로 scale-down하여 제작하여 실험 결과를 실제 고정자 냉각 회로의 운전에 적용할 수 있으며, 실제 현상을 재현할 수 있다.

냉각 회로의 고정자 소선 입구와 출구에 실제 고정자 권선에 존재하는 격임 부분(Roebel Transposition)을 모사하는 시창구를 설치하여 구리 소선 표면의 산화막 미세 조직을 온라인으로 관찰함으로써 구리 산화물 거동을 수화학 조건에 따라 파악하고자 한다.

고정자 냉각 회로의 모사 냉각수에서 용존 산소, 용존 수소, 용존 이산화탄소, 산화 환원 전위, 물의 전도도, pH, 부식 전위와 같은 수화학 환경 변수를 제어하고 측정함으로써 고정자 냉각 회로의 운전 조건을 모사 실험 장치와 일치시켜 구리 소선 막힘 현상을 일으키는 조건을 형성하는 수화학 변수 상호간의 관계를 규명한다.

구리 소선의 압력 강하를 측정하여 구리 부식 생성물들에 의한 유로 저항 증가를 예측하고, 구리 부식 생성물들의 입도 분포, 개수, 및 표면 미세 조직을 관찰하여 구리 부식과 환경 변수와의 관계를 도출한다.

본 연구진은 구리 부식 생성물들의 상변태에 의한 유량 감소 현상 이론을 입증하고 근본적인 치유책을 마련하기 위하여 서울대학교 핵재료연구실과 한전 전력연구원과의 산·학·연 연구 체제를 공고함으로써 대형 발전기 고정자 냉각 회로 유로 막힘 현상에 대한 근본적인 문제 해결과 치유책 제시를 위한 노력을 경주할 것이다. ☞