



공학전문석사학위 연구보고서

전기집진기 고전압관 절연애자의 전기적 파손원인 분석 및 구조 개선에 관한 연구

A Study on the Analysis and Structural Improvement of Electrically Damaged High-tension Line Duct in Electrostatic Precipitator

2021년 2월

서울대학교 공학전문대학원

응용공학과 응용공학전공

최기영

전기집진기 고전압관 절연애자의 전기적 파손원인 분석 및 구조 개선에 관한 연구

지도교수 김 용 권

이 프로젝트 리포트를 공학전문석사 학위 연구보고서로 제출함 2021년 2월

> 서울대학교 공학전문대학원 응용공학과 응용공학전공 최 기 영

최기영의 공학전문석사 학위 연구보고서를 인준함 2021년 2월



초 록

전기집진기는 석탄화력발전소에서 석탄 연소 후 배출되는 먼지 의 99.8% 이상을 포집하는 대표적인 환경설비이다. 최근 미세먼지 주의보가 발령되면 화력 발전 출력의 80%를 넘지 못하는 화력 발 전 상한 제약이 발령될 정도로 규제가 강화되고 있으며, 미세먼지 에 대한 전 국민적 관심과 함께 미세먼지 저감을 위한 활동이 점 차 강화되고 있다.

본 연구에서는 액화천연가스(LNG) 발전소와 비교해도 탄소 배 출량이 크게 높지 않은 친환경 기술로, 출력은 원자력발전소 1기 에 해당하는 1000[MW] 초초임계압 발전소가 건설되면서 전기집 진기도 대용량으로 확장되고, 코로나 방전을 위한 정류형 변압기 는 소형 경량화로 신기술이 적용되면서 발생한 고전압관 절연애자 파손 사례를 바탕으로 전기적인 파손원인을 분석하고, 고전압관 구조 개선 후 현장실험을 통해 문제를 해결하였다.

기존 정류형 변압기와 신형 정류형 변압기의 구조 검토를 통해 결로 발생 고전압관에서 절연애자의 파손이 발생한다는 공통점을 확인하고 다양한 가설을 검증하는 과정으로 연구를 진행하였다.

고전압관 결로 발생 메커니즘을 분석하고 원인을 제거하기 위 한 현장실험과 관찰을 통해서 최적의 구조를 확인하고 24개 전체 정류형 변압기에 설치하여 모두 습기 발생 없이 개선됨을 검증하 였다.

또한, 절연애자 파손원인을 분석하기 위해 COMSOL Multiphysic 를 이용한 직류 전계해석을 통해 실제 현장의 절연애자 파손 부위 와 시뮬레이션 결과를 비교하여 일치함을 확인하고, 전기적 파손 원인을 개선하여 전기집진기의 안정적인 설치와 운전에 기여할 수 있었다.

- i -

본 연구에서 도출된 정류형 변압기의 고전압관 구조는 전국의 신규 건설 중인 1000[MW]급 전기집진기에 적용되어 결로 발생 및 절연애자 파손 문제를 개선하고 안정적으로 운전하며 신뢰성을 검증하였다.

주요어 : 전기집진기, 절연애자, 직류 전계해석, COMSOL, 결로 학 번 : 2019-28188

차

요 지	i
표 목록	iv
그림 목록	iv
제 1 장 서론	1
1.1 연구배경 및 목표	1
1.2 연구보고서 구성	3
1.3 전기집진기 구성	4
제 2 장 고전압관 절연애자 손상 사례	13
2.1 파손경과 및 증상	13
2.2 전기집진기 습기 발생 원인	19
2.3 전계해석 과정	24
2.4 온도와 전계의 상관관계	31
제 3 장 고전압관 구조 개선 실험	32
3.1 구조 개선 실험조건 및 방법	32
3.2 구조 개선 실험 결과	32
제 4 장 직류전계분포 시뮬레이션	38
4.1 COMSOL Multiphysics 시뮬레이션 조건 및 방법	38
4.2 시뮬레이션 시험 결과	44
제 5 장 결론	52
참고문헌	56
Abstract	58

표 목 차

[표 2-	-1]	전기집진기	성능/	시험깂	Ļ		•••••	14
[표 2·	-2]	1000[MW] 석	탄화력	발전 띠	내기오염물질	의 배출허용	용기준 ··	17
[표 4-	-1]	시뮬레이션	적용	물성	값	•••••	•••••	40
[표 4-	-2]	온도변화에	따른	자기	절연애자	물성값 …		41
[표 4	-3]	물 성분별 및	도전율					49

그림 목차

[그림 1-1] 전기집진기 전경	5
[그림 1-2] 환경설비 개략도	5
[그림 1-3] 전기집진기 구조	6
[그림 1-4] 방전극 구조	7
[그림 1-5] 집진극 구조	7
[그림 1-6] 추타장치 구조	8
[그림 1-7] 정류형변압기 구조	9
[그림 1-8] 정류형 변압기 외관	10
[그림 1-9] 집진기 절연애자 형태	10
[그림 1-10] 전기집진 원리	12
[그림 2-1] 고전압관 습기 발생	15
[그림 2-2] 절연애자 파손 사진	18
[그림 2-3] 전기집진기 온도분포	19
[그림 2-4] 전기집진기 고전압관 온도분포	20
[그림 2-5] 결로 발생의 물리적 메커니즘	21

[그림 2-6] 습	공기선도 상의 결로 발생 과정	23
[그림 2-7] 고	전압관 결로 발생 과정	23
[그림 2-8] 고?	전압관 내부 철 구조물 부식	24
[그림 2-9] 일이	반적인 고체절연물 온도에 따른 도전율	31
[그림 3-1] 고	전압관 개스킷 설치 위치	33
[그림 3-2] 고경	전압관 습도 제거 실험	34
[그림 3-3] 고	전압관 고온 제거 실험	35
[그림 3-4] 고?	전압관 밀폐 제거 실험	37
[그림 4-1] 자	기 절연애자 축 대칭 형상(Geometry)	39
[그림 4-2] 절여	연애자 습기 경계조건	41
[그림 4-3] 절여	연애자 온도 경계조건	42
[그림 4-4] 절여	연애자 Mesh 형성	43
[그림 4-5] 직	류 정상상태 해석결과	44
[그림 4-6] 직	류 습기상태 해석결과	46
[그림 4-7] 직책	류 습기상태와 온도변화 다중 물리해석 결과…	47
[그림 4-8] 도	전율 변화에 따른 전류밀도 변화 결과	49
[그림 4-9] 전	류밀도 변화 시뮬레이션 결과	50
[그림 4-10] 시	뮬레이션 결과와 절연애자 파손 부위 비교…	51

제 1 장 서론

1.1 연구배경 및 목표

최근 미세먼지에 대한 사회적 관심이 급증하고 있고, 미세먼지 주의 보가 발령되면 석탄화력발전소는 발전 출력의 80%를 넘지 못하는 화력 발전 상한 제약이 발령된다. 2020년 정부는 그린뉴딜의 비전을 선포하고 신재생에너지 확대와 LNG 발전소 건설과 같은 전력산업의 변화를 본격 적으로 추진하며 저탄소 시대를 넘어 탄소 중립 선언으로 탄소 배출량을 '0(Zero)'으로 만드는 시대로 접어들고 있고, 석탄발전의 환경규제는 점차 강화되고 있다.

기존 석탄화력발전소의 환경설비는 천문학적인 설비 투자금액과 높 은 효율의 운전으로 환경 유해 물질을 대부분 걸러내고 있지만, 2017년 이후부터 건설되어 운영 중인 1000[MW] 초초임계압 석탄화력발전소는 액화천연가스(LNG) 발전과 비교해도 탄소 배출량이 크게 높지 않은 친 환경 기술로 각 발전사에서 많은 건설이 이루어지고 있다. 1000[MW]급 대용량 발전소로 발전량이 증가하면서 보조기기와 환경설비도 설비 규모 가 확장되는 등 새로운 기술의 적용이 필요하다.

석탄화력발전소에서 미분탄의 연소 후 발생하는 회(ash)는 공급된 석탄량의 약 15%이며 그 중 보일러 노내 하부로 떨어지는 저회(Bottom Ash)는 약 10%이고 보일러 출구 연도를 통해 배출되는 양은 보통 90% 에 이른다. 보일러 출구 연도로 배출되는 분진은 전기집진기에서 대부분 인 99% 이상 집진이 되며 전기집진기의 성능 저하 및 석탄의 성상에 따 라 출구 분진농도가 변화된다[1].

기존 석탄발전소보다 성능이 향상된 초초임계압 석탄화력발전소는 세계적으로 운전 실적이 거의 없는 모델들의 상업 운전으로 크고 작은 문제점들이 발생하였다. 그중에서 전기집진기는 표준석탄 화력 규모에서 1000[MW]급 대용량 전기집진기로 집진실의 규모가 커지고, 정류형 변압 기는 고효율화되어 소형 경량화로 유지보수가 용이하게 개발되면서 운전 중에 정류형 변압기의 고전압관 절연애자의 파손 사례가 발생하였다. 초 초임계압 발전소 건설은 각 발전사가 세계 각지의 기술로 건설하지만, 국내 전기집진기 생산 및 설치 기업은 한정되어 있고 소수 업체에서 제 작된 전기집진기를 설치하므로 해당 문제는 전국의 1000[MW]급 전기집 진기에서 동시에 발생할 수 있는 중요한 문제이다.

또한, 환경설비의 고장으로 배출허용기준을 초과하여 일정 시간 발 전할 경우 TMS(TeleMetering System) 설비로 실시간 환경부 산하 관 리기관에 통보되어 비계획 발전정지를 해야 하므로 상당 기간 발전수익 이 감소하게 된다.

따라서 본 연구에서는 실제 K사에서 제작된 1000[MW]급 전기집진 기에 설치된 정류형 변압기의 고전압관 내부의 절연애자 파손 사례를 분 석하고, 전기적으로 원인을 검증하여 구조 개선을 통해서 문제를 해결하 고 실제 현장에 설치하여 검증해 나갈 것이다.

1.2 연구보고서 구성

본 연구에서는 대용량 석탄화력발전소에 설치된 신형 정류형 변압기 의 고전압관 내부의 절연애자 파손원인을 분석하고 COMSOL Multiphysics 를 이용하여 직류 전계분포 해석과 실제 파손 부위가 일치함을 확인하였 다.

총 5장으로 구성되어 있으며 '1장 서론'에서는 전기집진기의 구성에 대해서 환경설비의 기준으로 설명하였으며, 신형과 기존 정류형 변압기 에 대한 구조적 차이점과 본 연구의 대상인 절연애자의 특징, 전기집진 원리를 설명하였다.

'2장 고전압관 절연애자 손상 사례'에서는 절연애자 파손 경과 분석, 결로 발생 메커니즘 설명, 시뮬레이션을 위한 전계해석의 이론적 배경 설명, 온도와 전계의 상관관계를 각각 설명한다.

'3장 고전압관 구조 개선 실험'에서는 2장의 결로 발생 메커니즘을 바탕으로 다양한 가설을 세우고 현장에서 실제 구조 개선 실험을 시행하 여 검증하는 과정이다. 개선 결과를 확인하고 24개의 정류형 변압기에 적용하여 최종 결과를 확인한다.

'4장 직류전계분포 시뮬레이션'에서는 절연애자 파손원인을 2.3장 전 계해석의 이론적 배경을 바탕으로 COMSOL Multiphysics를 이용한 직 류 전계해석을 통해서 절연애자 파손원인을 분석하고 실제 현장의 파손 형상과 비교하여 검증한다.

마지막으로 '5장 결론'에서는 절연애자 파손원인 분석과 구조 개선 실험의 결과를 토대로 적용 가능한 분야에 대해 생각해보고 향후 추가 과제를 제안하고자 한다.

1.3 전기집진기 구성

전기집진기는 보일러 노내로부터 배출되는 배기가스를 전기집진기의 집진극과 방전극으로 구성되는 전계층에 통과시켜 배기가스 중에 포함된 비회(Fly Ash)의 미립자를 전기적으로 포집함으로써 분진에 의한 대기 오염을 방지하기 위한 설비이다. [그림 1-1]은 실제 발전소의 전기집진 기 설치 사진이다. [그림 1-2]와 같이 발전설비에서 환경설비의 설치 위 치를 배기가스의 흐름으로 살펴보면 보일러 노내에서 석탄의 연소 후 배 출된 배기가스는 배연탈질설비(DeNOx System)에서 질소산화물(NOx)을 제거하고 공기예열기(Air Preheater)의 출구를 거쳐 보일러 건물 외부에 별도로 설치된 전기집진기에서 비회를 제거하고, 보일러 건물 외부의 유 인통풍기(Induced Draft Fan)를 거쳐서 배연탈황설비(Flue Gas Desulfurizer) 로 연결되어 황산화물(SOx)을 제거하여 굴뚝을 통해 대기로 방출되는 흐름으로, 전기집진기는 공기예열기 출구와 유인통풍기 입구 사이에 설 치된다.

전기집진기의 구성은 집진극과 방전극이 설치된 집진실, 전기집진기 상부에 설치되어 교류 전원을 공급받아서 직류 전원으로 변환하고 방전 극에 전압을 인가하는 정류형 변압기와 고전압관, 집진 된 분진을 임시 저장하기 위한 호퍼(Hopper)와 포집된 비회를 털어내는 추타장치, 점검 로와 점검구가 설치된 철 구조물로 구성되어 있으며, 집진기 입구와 출 구 측 배기가스 덕트(Duct)에 각각 댐퍼(Damper)가 설치되어 전기집진 기 정비 시 배기가스를 차단하게 되어있다. 집진기 운전 조작 및 운전 상태 점검을 위한 제어반이 고압차단기반에 설치되어 있고 주 제어실에 서 운전 상황을 점검하고 조작을 할 수 있다.



[그림 1-1] 전기집진기 전경



[그림 1-2] 환경설비 개략도

1.3.1 집진실

집진실은 집진극과 방전극이 설치되어 먼지를 포집하는 구역이며, 외부 케이싱, 집진실 내부의 집진극 및 방전극, 절연장치, Hot roof, 추타 장치, 내부로 들어가기 위한 점검구로 구성되어 있다. 대용량 전기집진기 의 집진실은 6단(Stage)으로 구성되어 있고, 각 단 하부는 분진 배출을 위한 호퍼(Hopper)가 설치되어 있다. 다수의 방전극과 집진극을 기계적 으로 지지하기 위한 지지기구를 갖고 있으며, 외부 케이싱과 절연을 시 키기 위하여 절연지지물에 수직으로 매달려있다.



[그림 1-3] 전기집진기 구조[1]

1.3.2 방전극

[그림 1-4]와 같이 방전극은 금속판 두 장을 맞대기로 하여 중간부 여러 곳을 용접한 구조로 정류형 변압기의 하전 전력을 Hot roof에서 고 전압선으로 분배하고 각 실의 방전극에 인가하여 코로나 방전을 일으킨 다. 판형으로 되어있어 운전 중 단선 사고 우려가 없고 각각 독립된 볼 트로 상하부에 체결되어 있어 간극이 좁혀지면 Spark가 발생하므로 간 극을 조정할 수 있다. 집진기 상부에 솔레노이드 추타장치를 설치하여 추를 들어 올려 떨어트림으로써 방전극에 붙은 회(Ash)를 털어낸다.



1.3.3 집진극

방전극에서 코로나 방전을 일으켜 전계를 형성하고, 대전 된 미립자 는 집진극에서 포집한다. 포집된 미립자가 가스 유동과 집진극 추타장치 에 의해 재비산을 방지하는 것이 중요하다. 일반적으로 주름형 형태로 제작되어 재비산을 방지하고 추타장치로 포집된 미립자를 호퍼(Hopper) 로 낙하시켜서 미립자를 별도의 처리시설로 이송한다. 고압의 양극이나 음극이 접속되며 집진기의 케이싱에 접지되어 있다. 집진극의 간격과 평 면을 유지하기 위해 케이싱에 견고히 지지 되어있고 대부분 집진극은 직 사각형의 철판 구조로 압력손실과 가스 흐름의 편류를 방지한다.



[그림 1-5] 집진극 구조[1]

- 7 -

1.3.4 추타장치

일반적으로 전기집진기는 건식을 사용한다. 습식은 상시 물로 세정 할 수 있지만, 건식은 분진 제거를 위해서 추타장치를 사용해야 한다. 집 진극과 방전극에 부착된 분진을 털어주지 않으면 분진으로 인해 극이 비 대해져서 집진 효율이 저하된다. [그림 1-6]의 (a) 집진극 추타장치는 집 진극에 부착된 분진을 구동축(Driving Shaft)에 연결된 해머가 앤빌(Anvil) 을 타격하여 하부로 떨어뜨리는 추타장치로 집진기 상부와 하전실 사이 의 Hot roof에 설치된다. 각 실의 추타장치는 연결된 Motor의 속도를 조 절하여 다른 속도로 회전하며 추타한다. 방전극 표면에도 분진이 부착되 는 작용이 끊임없이 진행되므로 방전극이 비대해져서 코로나 방전이 저 하되어 집진 효율이 떨어질 수 있으므로 [그림 1-6] (b) 솔레노이드 식 방전극 추타장치가 집진기 상부에 설치된다. 포집된 분진으로 인해 방전 극과 집진극의 간격이 좁아지면 퇴적층에서 Spark 또는 Arc 발생의 원 인이 되어 하전 전압의 상승을 방해한다. 따라서 운전 중에 발생하는 방 전극과 집진극의 분진 퇴적으로 불꽃 섬락의 발생 또는 집진율이 저하되 는 상태가 되기 전에 부착된 분진을 제거하기 위하여 추타장치가 설치되 어 있다.



(a) 집진극 추타장치
 (b) 방전극 추타장치
 [그림 1-6] 추타장치 구조

1.3.5 정류형 변압기(Transformer Rectifier)

가. 정류형 변압기 기능

[그림 1-7]은 본 연구에서 분석하는 고전압관이 부착된 정류형 변압 기로 교류 저전압을 직류 고전압으로 변환시키는 정류형 변압기, 고전압 관으로 보호되어 직류 모선인 고전압선이 방전극까지 연결되며, 집진기 상부에 설치된다. 변압기는 고전압관과 조립형으로 체결되며 접합부에 비석면 Gasket으로 밀봉하여 외부 공기의 유입을 차단한다. 고전압관은 'ㄱ'자 형태의 관으로 상부는 변압기와 볼트로 체결되어 연결되며 하부는 Hot Roof 상부와 용접되어 체결된다.

별도 건물의 'Load Center'라고 불리는 차단기반에서 480[V] 3상 4선 식 교류 전원을 전기집진기 상부까지 케이블 트레이를 사용하여 입력 전 원으로 공급한다. 정류기의 IGBT 정류방식으로 최대 82[kV]의 직류 고 전압으로 변환한다. 정류된 전원은 고전압선을 통해 방전극에 하전 하며 집진기 케이싱과는 절연애자를 통해서 절연되어 있다. 점검 보수 시 직 류 고전압이 집진실에 하전 되는 것을 방지하기 위해서 접지설비와 접지 점검 창이 설치되어 있다. 한 호기의 전지집진기에는 A와 B의 두 챔버 로 구성되어 가스 유동을 분산하며 한 개의 챔버에는 12개의 정류형 변 압기로 구성되어 있어서 한 호기의 발전소에는 24개의 정류형 변압기가 설치된다.



[그림 1-7] 정류형 변압기 구조

나. 신형 정류형 변압기와 기존 정류형 변압기 비교



(a) 신형 정류형 변압기



(b) 기존 정류형 변압기

[그림 1-8] 정류형 변압기 외관

지난 40년간 석탄화력발전소에서는 전기집진기를 중요한 환경설비로 적용하며 지속해서 사용해왔다. [그림 1-8]의 (b)는 500[MW]급 표준석 탄 화력에서 사용하는 기존 전력용 변압기이다. 특징으로는 고전압관이 크고 고전압선은 변압기 인출 단자와 상부에서 볼트로 체결된다. 접지점 검창이 고전압관 상부에 있고 변압기의 크기가 대형이다. 반면 [그림 1-8] (a)의 1000[MW]급 대용량 전기집진기의 전력용 변압기는 고전압관 의 면적이 작고 변압기 측면에 있으며, 접지 점검 창이 고전압관과 함께 측면에 설치되어 있고 변압기는 소형 경량화되었다. 신형 변압기와 기존 변압기의 구조적인 차이점을 본문에서 분석하여 문제를 해결하고 구조 개선에 참고하여 연구를 진행한다.

다. 고전압관 절연애자



(a) 변압기 측 절연애자
 (b) 고전압관 절연애자
 [그림 1-9] 집진기 절연애자 형태

[그림 1-9]는 고전압관 내부에 설치된 두 개의 절연애자다. [그림 1-9] (a)는 전력용 변압기 측의 절연애자로 변압기와 함께 조립되어 현 장에 운송되고 이후에 고전압선과 볼트로 체결되어 고전압관을 통해서 방전극과 연결된다. [그림 1-9] (b)는 고전압관 측의 절연애자로 변압기 에서 인출된 고전압선은 방전극과 연결되는데 집진기 케이싱과 집진극과 의 절연을 위해서 고전압관 내부에 설치된다. 두 종류의 절연애자 모두 자기(Porcelain) 소재로 전기절연성과 내후성이 우수하고 화학적 안정도 가 높아서 송배전선로에도 널리 사용된다. 반면에 오손에 취약한 단점이 있다. 본 논문에서 연구하고자 하는 절연애자는 [그림 1-9] (b)의 고전압 관 절연애자이다. 절연애자의 파손원인 분석과 구조 개선을 통해서 파손 을 방지하는 연구를 본문에서 설명하고자 한다.

1.3.7 전기집진기 집진 이론

전기집진기는 배기가스 흐름 중에 포함된 입자를 전기장(Electric Field)에 통과시키면서 집진하는 장치이며, 양전극 또는 음전극의 고전압 을 방전극에 인가하면, 방전극 주위에 있는 전자들은 매우 빠른 속도로 가속되어 이동하고, 이때 가속 전자들과 주위 중성 기체분자와의 충돌에 따라 중성 기체분자로부터 전자들이 이탈한다. 이후 이탈된 전자들 역시 가속되어 또 다른 기체분자와 충돌하고, 이와 같은 가속 전자와 중성 기 체분자의 충돌과정이 연속적으로 반복되어 고전압이 인가되는 방전극 주 위에 전자와 양이온의 수는 기하급수적으로 증가하게 되며, 이러한 일련 의 과정을 전자사태라고 한다. 전자사태는 기체분자의 이온화 에너지와 방전극 주위의 전기장 강도에 의존하며, 전자사태가 일어나는 영역에서 는 발광하게 되고, 이와 같은 발광현상이 코로나 방전이다. 코로나는 강 한 전기장(Electric Field)내에서 가스상태의 분자가 전자충격을 받아 이 온화되는 방전 현상이다. 코로나에 의해 가스분자가 이온화되어 형성된 부극성 가스이온(Negative Gas Ion)은 접지된 집진극으로 이동한다.

기체 이온들이 코로나 영역을 이탈하여 집진극으로 이동할 때, 전극 사이의 공간에 존재하는 입자들과 만나게 되면 기체 이온들은 입자에 부 착된다. 이처럼 기체 이온들이 입자에 부착되어 '입자들이 전기적인 극성 을 가지는 현상'을 대전(하전, Charging)이라고 하며, 대전 된 입자는 집 진기 내부에 형성된 전기장에서 전기력에 의하여 집진극에 포집된다.

코로나 방전에 의해 생긴 양이온과 음이온은 서로 이극성의 전극을 향해 이동하게 된다. 이때 전리 영역이 방전극 즉, 음극 근방에 국한되어 있어 양이온은 단거리 행정을, 음이온은 장거리 행정을 갖게 되므로 분 진 입자의 대부분은 음이온으로 대전 되어 양극으로 이동하게 된다[2].



[그림 1-10] 전기집진 원리

제 2 장 고전압관 절연애자 손상 사례

2.1 파손경과 및 증상

2.1.1 전기집진기 성능 기준

석탄화력발전소 건설 단계의 공정 중 각종 보조 기기의 시험 운전에 필요한 전력을 외부 수전 계통에서 처음으로 받는 최초 수전(Initial Power Receiving)을 시작으로 각종 설비의 시험 운전이 시작된다. 전기 집진기의 정류형 변압기에 입력 전원을 공급할 수 있으므로 최초 수전 이후에 다양한 시험 운전을 시행할 수 있다. 본격적인 비회 포집 성능을 확인하기 위해서는 다음 공정이 필요하다. 보일러에 석탄을 공급하고 버 너로 점화를 하여 보일러를 처음 기동하는 공정을 최초 점화(Initial Ignition)라고 하며, 보일러로부터 최초로 터빈에 증기를 공급받는 최초 통기(Initial Steam Admission) 시행 후 설계기준을 만족할 경우 계통 연결 (Synchronize)까지 시행하면 전기집진기의 성능시험이 가능하다. 이 과정 은 건설공사와 함께 진행되며 수개월의 기간이 소요되고 다양한 시험을 통해서 발전설비의 시험 운전을 마치고 대관 사용을 신고한 다음 영업 운전을 개시하는 일을 의미하는 상업 운전(Commercial Operation)을 시 행하기 전까지 다양한 시험을 통해서 혹시나 있을 상업 운전의 시 문제 가 발생하여 비계획 정지를 예방하기 위해서 계획 공정에 맞게 적절하게 시행해야 한다. [표 2-1]은 상업운전 전에 시험 운전에서 전기집진기의 성능시험에 따른 기준값과 결과를 나타낸다.

이 기준에 따라서 전기집진기는 성능시험 기준을 만족해야 하고 그 성능 기준에 만족하기 위해서 각각의 정류형 변압기의 기능은 중요하다. 집진실은 6단(Stage)으로 구성되어 있고 1단과 6단은 각각의 다른 유속 으로 먼지를 포집한다.

구 분	단 위	성능보증조건	측정결과	판정결과
1. 전기집진기 출구 분진농도	[mg/Sm ³]	30 이하	3.37	합격
2. 전기집진기 효율	[%]	99.86 이상	99.89	합격
 전기집진기 본체 가스온도강하 	[°C]	6 이하	0.75	합격
4. 전기집진기 본체 통풍손실	[mmH2O]	15 이하	11	합격
5. 소비전력	[kW]	2,200	1002	합격

[표 2-1] 전기집진기 성능시험값

최종 6단에서는 느린 유속으로 최종 미세 분진을 포집하기 때문에 각각의 단은 매우 중요한 기능을 담당한다. 1000[MW]급으로 대용량 석 탄화력발전소의 전기집진기는 1단을 추가하여 미세한 분진을 더욱 정밀 히 포집한다. 따라서 한 개의 정류형 변압기의 고장으로 각 단의 분진이 포집되지 못하고 다음 단으로 이동하면 환경규제를 초과할 수 있으므로 각각의 성능보증조건은 중요하다.

2.2.2 전기집진기 습기 발생

[그림 2-1]은 전기집진기 접지 점검 창의 결로 발생을 보여준다. 접 지 점검 창의 기능은 발전소 정지 및 전기집진기 집진실 내부 점검 시 오작동으로 인한 고전압 하전으로 집진실 내부 작업자의 인명 손실을 방 지하고자 고전압관 내부 고전압선을 접지와 레버 형태로 조작 후 단락하 여 정류형 변압기가 오동작하더라도 접지로 모든 하전 전류가 방전되도 록 하는 기능을 담당하며 고전압선과 접지 바의 단락 여부를 육안으로 확인하기 위한 기능으로 접지 점검 창이 설치되어 있다. 하지만 고전압 관 내부에 습기가 발생하고 접지 점검 창에 물방울이 맺혀서 육안으로까지



(a) 접지점검창 외부 (b) 접지점검창 내부 (c) 접지점감창 상부 [그림 2-1] 고전압관 습기 발생

결로 발생 여부를 확인할 수 있었다. 심할 경우 물방울이 접지 점검 창 유리로 흘러 내리며 고전압관 내부에 물이 고일 정도로 많은 양의 습기 가 발생하였다. 이와 동시에 고전압관 내부에 Spark가 발생하는 것을 확 인할 수 있었으며, 습기가 발생한 고전압관을 중심으로 절연애자의 파손 이 발생하여 습기와 Spark의 상관관계를 검증하면 절연애자 파손원인 분석을 할 수 있겠다는 가설을 세우고 연구가 진행되었다.

2.1.3 전기집진기 고전압관 절연애자 파손 경과

전기집진기의 성능시험에서 정류형 변압기를 가압하고, 방전극에 하 전 하여 코로나 방전을 일으켜 비회를 집진하여 성능시험을 시행하는 공 정은 석탄화력발전소의 시험 운전 중 제일 마지막 단계이며, 상업운전 개시일 전에 이루어진다. 최초 수전을 통해 정류형 변압기 시험 운전이 가능해지고 최초점화와 최초 통기를 통해 석탄 연소 후 비회가 전기집진 기 집진실 내부로 유입되어야 하기 때문이다. 따라서, 연속운전의 시험 운전을 통해서 최종 설비의 건전성을 확인하는 단계에서 전기집진기는 매우 중요한 역할을 한다. 모든 설비의 건전성이 확보되어도 전기집진기

의 출구 분진농도와 집진기 효율이 환경규제와 성능보전조건에 부합하지 않으면 몇 년간의 건설의 노력이 전기집진기로 인해 종합준공을 미루는 일까지 발생하기 때문이다. 고전압관 절연애자 파손은 2.1.2장의 고전압 관 내부 결로 발생부터 시작되었다. 고전압관 내부에 결로가 발생하더니 운전원이 접지 점검 창을 통해 눈으로 확인할 수 있을 만큼 고전압관 내 부에서 간헐적으로 Spark가 발생하였다. 전기집진기 제어반에서는 Spark 와 Arc의 발생 횟수를 확인하는 기능이 포함되어 있다. 건설 공정에서 집진실 내부에는 무수히 많은 이물질이 낙하하여 방전극과 집진극 사이 에 놓이게 되며 이는 많은 Spark와 Arc를 발생시킨다. 사전에 육안검사 후 시험 운전을 시행하더라도 집진판, 방전극의 철사 또는 작업 중 발생 한 잔여물로 인해 Spark와 Arc가 발생하는 경우가 대부분이다. 이럴 경 우 해당 집진실의 정류형 변압기는 하전 전압까지 상승하지 못하고 기동 이 중지하게 되며, 발생 수량을 모니터링 시스템으로 확인하여 시험 운 전 완료 후 집진실 내부로 작업자가 들어가서 이물질을 제거하여 시험 운전을 재개한다. 운전 중에도 Spark와 Arc는 발생하는데 추타장치로 방전극과 집진극의 비회를 제거하더라도 특정 부위에 비회가 쌓이게 되 어 발생하게 되며, 그 횟수로 수세정의 시기를 조정하기도 한다. 따라서, 전기집진기의 집진실에서 Spark와 Arc는 흔히 발생하는 현상이지만 고 전압관 내부는 밀폐되어 어떠한 이물질도 없는 상태에서 밀봉하기 때문 에 이와 같은 현상의 발생은 이례적이다. 고전압관 내부에서 간헐적 Spark 가 발생하기를 반복하고 집진기 기동 시 정류형 변압기의 하전 전압이 상승하지 않고 자동 정지되는 상황이 반복되어 시험 운전을 중단하고 고 전압관 덮개를 개방해보니 고전압관 절연애자의 파손이 발견되었다.

절연애자의 파손은 곧 Casing과의 단락을 의미하며 24개의 정류형 변압기 중 차례로 파손이 되어 미세먼지 환경기준을 초과할 경우 시험 운전은 중지되며, 상업 운전에까지 영향을 미치는 큰 사고이다. [표 2-2] 는 대기오염물질 허가 배출기준을 보여주며, 발전소의 '연돌'이라고 부르 는 굴뚝에는 TMS(TeleMetering System)가 부착되어 24시간 자동 측정 되어 실시간으로 대기 오염물질의 양과 농도를 환경부 산하 관제센터로 전송하게 되어있다. 먼지의 허가 배출기준을 초과하게 되면 발전소는 환 경규제 초과로 정지한다. [표 2-2]와 같이 2020년 이후 환경규제는 기존 보다 평균 33% 더 강화되었고 앞으로도 더욱 강화될 예정으로 높은 집 진 효율의 집진기를 설치하고, 운전 시 집진기의 고장을 예방하기 위한 각종 예방정비가 필요한 실정이다.

[표 2-2] 1000[MW] 석탄화력발전 대기오염물질의 배출허용기준[3]

물 질 명	단 위	허가기준 (~(10,10,21)	허가기준 (20.01.01~)
		(19.12.31)	(20.01.01)
황산화물(SOX)	[ppm]	50(6)	25(6)
질소산화물(NOX)	[ppm]	50(6)	15(6)
먼지	[mg/Sm ³]	10(6)	5(6)

※ 표준산소농도(%): 오염물질 별 허용기준 괄호 안의 숫자
 (예) 황산화물 50(4)ppm - "4"가 표준산소농도를 의미

[그림 2-2]는 절연애자의 파손 사진이다. 대부분 절연애자가 여러 조 각으로 분리될 정도로 강한 충격에 의한 파손이고 고전압선이 전기집진 기 Casing에 단락되어 정류형 변압기는 정지하게 된다.

고전압관 내부의 절연애자는 파손된 후 즉시 보수할 수 없다. 시험 운전과 상업 운전 시 전력거래소에 사전에 신고하고 기동 정지를 수행하 며, 전력수급에 맞춰 정지해야 하고 비계획 정지 시 발전소에 페널티가 부과되어 각종 평가에 불이익을 받게 되며 발전정지로 인한 막대한 손실 이 발생한다. 발전소 정지 이후에도 각종 Fan을 이용하여 강제 냉각을 하지 않으면, 집진실에 들어갈 수 없다. 제한된 시간 안에 정비를 마쳐야 한다. 고전압관 절연애자는 Hot roof와 하나의 절연애자로 관통되어 연 결되어 있고 그사이를 Rubber Gasket으로 밀봉한다. 따라서, 절연애자를 교체하기 위해서는 집진기 상부의 고전압관만 분해하면 교체할 수 없고 집진실의 Chamber를 개방하고 Hot roof 안으로 작업자가 들어가서 분해 해야 한다. 운전 중에 전기집진기의 절연애자가 파손된다면 그대로 파손 된 절연애자의 정류형 변압기를 정지하고 환경규제를 넘지 않는 범위에 서만 운전할 수밖에 없다. 차례로 정류형 변압기가 절연애자의 파손으로 정지하여 환경규제를 초과한다면 발전기를 정지해야 하고, 발전소는 천 문학적인 발전 손실을 감수해야 한다. 따라서, 본 연구에서는 고전압관 구조 개선을 통해서 절연애자 파손을 방지하고 시뮬레이션을 통해 전기 적 파손원인을 분석하고자 한다.



[그림 2-2] 절연애자 파손 사진

2.2 전기집진기 습기 발생 원인

2.2.2 전기집진기 온도분포

[그림 2-3]은 전기집진기의 평균 온도분포를 나타내고 있다. 집진실 의 경우 보일러에서 석탄의 연소 후 비회와 함께 뜨거운 배기가스가 지 나가며 먼지를 포집하는 구역이므로 배기가스 온도와 같으며 평균 온도 는 120℃이며, 집진판 추타장치와 고전압선이 방전극과 체결되어 있고 집진기 상부인 외부와 집진실 사이에 별도의 실로 분리된 Hot roof의 평 균 온도는 달궈진 철판 구조물과 일부 배기가스의 영향으로 평균 온도 90℃이다. 고전압관의 경우 Hot Roof와 고전압관 사이를 하나의 절연애 자로 관통하고 Rubber Gasket으로 밀봉되어 있고, 절연애자의 경우 재 질은 자기(Porcelain) 소재이므로 하부 절연애자의 고온이 영향을 미치게 되어 상부의 절연애자로 전달된다. 따라서, 운전 중의 고전압관 내부의 온도는 평균 50℃이다. 절연애자의 온도는 그보다 높은 90℃ 내외로 추 정할 수 있다. 고전압관 외부의 온도는 [그림 2-4]와 같이 대기 온도 27℃ 기준에서 고전압관 표면 평균 온도는 35℃로 측정되었으며, 한낮의 강한 태양으로 인해 고전압관 외부를 달구고 있다. 대기 온도 19℃ 기준 으로는 고전압관 표면 평균 온도는 24℃이다. Hot Roof와 근접할수록 고전압관 표면 온도는 높은 것을 알 수 있다.



[그림 2-3] 전기집진기 온도분포



(a) 대기온도 27℃ 기준



(b) 대기온도 19℃ 기준

[그림 2-4] 전기집진기 고전압관 온도분포

2.2.3 결로 발생 과정

결로란 수증기를 포함한 공기가 노점 온도 이하의 물체 표면과 접촉 하였을 경우 수증기가 응축하여 물방울이 맺히는 현상으로서 발생 위치 에 따라 표면 결로와 내부 결로로 나뉜다. 표면 결로는 실내의 습한 공 기가 노점 온도 이하의 물체나 구조체 표면에 맺혀서 발생하는 것이고, 내부 결로는 미소 공극 내로 투습 된 수증기에 의해 나타나는 현상으로 실내, 외 수증기압의 차이에 의하여 구조체 속에 투습 되어 상대적으로 노점 온도 이하로 떨어지는 저온부에서 발생하는 것을 말한다.

일상생활에서 가장 쉽게 볼 수 있는 결로 현상은 차가운 음료수 컵 표면에 물방울이 맺히거나, 샤워 중 욕실 거울 표면에 김이 서리는 현상 등이다. 공기 중의 수증기가 상대적으로 차가운 물체 표면에서 노점 온 도 이하가 형성되어 표면에 액화되는 현상이다. 특정 온도의 공기가 포 함할 수 있는 최대의 수증기를 함유할 때를 포화공기(Saturated Air)라 고 하며, 이때 수증기의 압력을 포화수증기압(Saturated Vapor Pressure, 단위: mmHg)이라고 한다.



[그림 2-5] 결로 발생의 물리적 메커니즘

[그림 2-5]는 결로 발생의 물리적 메커니즘으로서 같은 무게의 건조 공기 중에 포함될 수 있는 최대포화수증기량은 온도가 높을수록 많아지 게 된다. 불포화 상태의 수증기를 함유한 공기 온도가 낮아지면 공기의 함유할 수 있는 수증기의 양은 점차 줄어들게 되며 특정 온도에 이르게 되면 기존에 함유한 공기 내부의 수증기 일부가 응축되어 물로 변하여 결로가 발생하기 시작하는데 이 특정 시점의 온도를 노점 온도(Dew Point Temperature)라고 부르며, 노점 온도 이하인 순간부터 결로가 발생하기 시작한다[4].

[그림 2-6]과 같이 결로를 해석하기 위해서는 습공기 선도 (Psychometric Chart)를 사용한다. 습공기 선도 상에서 설명하면, 고온 다습한 ①의 공기(40℃, 상대습도 70%)가 차가운 표면을 만나 온도가 떨 어짐에 따라 ③의 공기(24℃)로 된다. 이때, ①의 공기(40℃ 상대습도 70%)의 절대습도 변화가 없으므로 ②의 지점 30℃에서 상대습도 100% 가 되어 포화공기가 되며, 그 이상의 습기가 물방울이 되어 결로가 된다. 24℃의 상대습도 100% 포화공기가 될 때까지 절대습도의 양이 감소하여 야 하며, 이것이 모두 물방울로 나타나는데, 이와 같은 과정으로 결로가 발생하는 것이다.

따라서, [그림 2-7]과 같이 고전압관 내부 건구온도 40℃, 대기 상대 습도 70%의 고온 다습한 고전압관 내부의 공기가 대기 건구온도 19℃ 기준으로 상대적으로 차가운 평균 건구온도 24℃의 고전압관 표면과 접 촉하여 온도가 낮아져서 표면에 이슬이 맺혀서 생기는 결로로 판단할 수 있다.

이 결로 현상은 절연애자 표면에도 그대로 영향을 미치고 자기애자 의 특성상 오손의 오염에 취약한 특성으로 전계분포에 매우 큰 영향을 미친다. 표면에서의 물은 표면의 재료에 따라 필름 형태로 퍼지기도 하 고 방울 형태로 뭉치기도 하는데 물의 표면장력은 73[dyn/cm]로서 자기 (Porcelain)이나 유리(Glass) 재료의 표면장력보다는 작고 유기고분자의 표면장력보다는 크다. 따라서, 자기 표면에 있는 물은 필름 형태로 확산 하며 고분자 표면에 있는 물은 방울 형태로 뭉치므로 자기 표면은 고분 자 표면보다 쉽게 젖는다[5].

[그림 2-8]은 고전압관 내부 철 구조물 부식과 절연애자 주변의 물 고임 현상을 보여준다. 고전압관 내부 철 구조물 부식은 단기간 결로가 아닌 장기간의 결로 현상 발생을 나타내며, 절연애자 상부에서 발생한 습기가 애자를 타고 하부로 흘러서 물이 고이는 것도 확인할 수 있다.



[그림 2-6] 습공기선도 상의 결로 발생 과정[12]



[그림 2-7] 고전압관 결로 발생 과정

본 논문에서는 전계해석을 통해서 절연애자에 습기가 필름 형태로 도 포 시에 전계분포의 변화와 함께 온도변화에 따른 절연애자의 전계분포 변화까지 함께 살펴보고자 한다.



[그림 2-8] 고전압관 내부 철 구조물 부식

2.3 전계해석 과정

2.3.1 전계의 정의

대전체 주위의 모든 점전하에는 반드시 전기력이 작용한다. 이처럼 전 하 사이에 쿨롱력의 작용으로 다른 대전체에 대하여 전기력이 미치는 공 간을 전계(Electric Field)라고 하며, 전기장이라고도 부른다. 정지하고 있 는 전하에 의해서 발생하는 전계를 정전계(Electrostatic Field)라 한다. 전계가 존재하는 곳에 있는 미소 단위 전하에 작용하는 힘을 전계의 세 기(Electric Field Intensity)라고 하며 \vec{E} 로 표기하며 단위는 [V/m]이다.

2.3.2 정전계 해석 방법

식 (2.1) 의 패러데이 법칙과 식 (2.2) 의 가우스 법칙, 식 (2.3) 의 옴의 법칙, 식 (2.4) 의 전류 연속방정식을 통해서 본 연구에서 다루고자 하는 전계의 특성과 지배방정식을 유도하여 습기에 의해 과도적(Transient) 으로 직류 전압이 단락되거나 차단되면서 발생하는 전위분포와 전계분포 를 해석하고 습기에 의한 전계의 변화를 이해할 수 있다.

$\overrightarrow{\nabla} \times \overrightarrow{E} + \frac{\partial \overrightarrow{B}}{\partial t} = 0$	(Faraday's law) (2.1)
$\overrightarrow{\nabla} \bullet \overrightarrow{D} = \overrightarrow{\nabla} \bullet \overrightarrow{\epsilon E} = \rho_v$	(Gauss's law) (2.2)
$\vec{J} = \sigma \vec{E}$	(Ohm's law) (2.3)
$\overrightarrow{\nabla} \bullet \overrightarrow{J} + \frac{\partial \rho_v}{\partial t} = 0$	(Continuity law of current) (2.4)

여기서,	<i>Ē</i> : 전계의 세기 [V/m]	<i>ऄ</i> : 자속 밀도 [Wb/m ²]
	D : 전속 밀도 [C/m²]	ρ _v : 체적 전하밀도 [C/m ³]
	\vec{J} : 전류밀도 [A/m²]	σ : 도전율 [S/m]

면저 정전계를 수학적으로 해석하는 기본 방정식은 식 (2.1) 패러데 이 법칙이다. 정전계의 경우 준 정적 전계 시스템(Quasi-static Electric Field System)으로 자계가 변하지 않으므로 ∂*B*/∂t = 0 이 되어 식 (2.1) 은

$$\overrightarrow{\nabla} \times \overrightarrow{E} = 0$$
 (2.5)

식 (2.5) 와 같이 단순화되며 전계 *E*는 회전량이 없는 벡터를 의미 하고 보존장(Conservative Field)이 됨을 알 수 있다. 도체는 등전위체이 고, 전하는 전계가 내부에서는 0이 되도록 스스로 도체 표면에 분포함을 나타낸다. 식 (2.2) 을 체적적분으로 식 (2.6) 을 얻고, 발산의 정리 (Divergence Theorem)를 이용하여 식 (2.7) 을 얻을 수 있다.

$$\int_{V} \overrightarrow{\nabla} \cdot (\epsilon \overrightarrow{E}) dV = \int_{V} \rho dV \quad (2.6)$$

$$\oint_{s} \vec{E} \cdot \vec{ds} = \frac{Q}{\epsilon} \qquad (2.7)$$

식 (2.7) 과 같이 어떤 폐곡면 S를 통과하는 전속(Electric Flux)은 체적 V에 내포된 총 전하량은 Q와 같다는 식을 유도할 수 있다. 식 (2.7) Gauss's Law를 통해 가상 폐표면(Gaussian Surface)을 적용하여 Q 전하를 중심으로 하는 임의의 반지름 r 거리만큼 떨어져 있는 구면을 통해서 식 (2.8) 의 전계의 세기를 구할 수 있다.

$$E_r = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2} \qquad (2.8)$$

식 (2.5) 에 스토크스 정리(Stokes Theorem)와 개표면에 대해서 적 분함으로 식(2.9)과 같이 적분형으로 정리할 수 있다. 전계의 세기는 그 주위 임의의 폐 경로를 따라 스칼라 선적분 한 양은 0이고, $\vec{E} \cdot \vec{dl}$ 은 경 로를 따르는 전압을 나타낸다. 따라서, 임의의 폐회로 주위의 흐르는 전 압 강하의 대수적 합은 0이며, 비회전계는 보존계임을 설명할 수 있다.

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \qquad (2.9)$$

또한, 식 (2.5) 로부터 스칼라 전위 *v*를 식 (2.10) 와 같이 정의할 수 있다. 회전이 없는 벡터계는 스칼라계의 기울기로 표현이 가능하다. 벡터 보다 스칼라양이 다루기 편리하고 *E*는 간단한 미분 과정인 기울기 식에 의해 구할 수 있다.

$$\overrightarrow{E} = -\overrightarrow{\nabla}v \qquad (2.10)$$

본 연구에서 전계해석을 위해 사용하는 COMSOL Multiphysics에서 는 유한요소해석법 FEM(Finite Element Method)으로 정전계 지배방정 식에 의해 전위분포와 전계분포를 유도하고 해석하게 된다.

2.3.2. 정전계 지배방정식

2.3.1 정전계 해석 방법에서 전계의 특성을 이해하고 식 (2.1~2.4) 을 사용하여 절연물에서 전계를 형성하는 전위분포에 대한 지배방정식을 유 도하고 전계의 세기를 구할 수 있다.

직류회로 이론으로부터 금속 도선과 같은 도체에 흐르는 전류에 익 숙해 있지만, 매질이 진공이거나 개방 회로에서 전류가 흐르는 설명은 전도전류(Conduction Current)의 발생으로 자유전하가 이동하는 것으로 설명할 수 있다. 본 연구의 해석 대상인 절연애자와 같이 절연체 또는 유전체에서는 구속 전하(Bound Charge)를 움직이게 하여 결국에는 분극 현상을 일으킨다. 구속 전하란 비록 유전체의 분자가 거시적으로 중립일 지라도 외부에 존재하는 전계가 각 대전 된 입자에 영향을 주고 반대 방 향으로 전하의 작은 이동을 일으키는 전하를 말한다. 전계를 가하면 작 은 이동에도 불구하고 유전체는 분극이 되어 전기쌍극자가 형성되며 그 척도는 유전 상수 또는 비유전율로 알 수 있다. 또한, 절연물 해석 시 중 요한 요소인 도전율(Conductivity)과 유전율(Permittivity)의 관계를 파악 하고, 전계강도와 도전율의 관계를 수식으로 접근해보고 절연물 해석의 주요 변수로 활용하고자 한다.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$
 (2.3)

금속 도체에서 \vec{J} [A/m²]와 \vec{E} [V/m] 관계는 식 (2.3) 과 같이 도전율 σ (Conductivity)을 사용한 옴의 법칙으로 나타낼 수 있다.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho_v}{\partial t} = 0 \qquad (2.4)$$

전하의 보존원리를 적용하여 전하는 결코 발생하거나 소멸하는 일이 없이 폐곡면에 둘러싸여 있는 한 영역에 적용해서 식 (2.4) 와 같이 전류 의 연속식을 미분형 또는 점형의 연속방정식으로 나타낼 수 있다. 이를 바탕으로 정전계 지배방정식을 구해보면 식 (2.4) 에 식 (2.2) 와 식 (2.3) 을 대입하여 정리하면 식 (2.11) 과 식 (2.12) 가 된다.

$$\overrightarrow{\nabla} \cdot (\overrightarrow{\sigma E}) + \frac{\partial \rho_v}{\partial t} = 0$$
 (2.11)

$$\overrightarrow{\nabla} \bullet (\overrightarrow{\sigma E}) + \frac{\partial}{\partial t} (\overrightarrow{\nabla} \bullet \overrightarrow{\epsilon E}) = 0 \qquad (2.12)$$

식 (2.12) 에 식 (2.10) 을 대입하면 전계를 형성하는 전위분포에 대 한 지배방정식인 식 (2.13) 을 유도할 수 있다.

$$\sigma \nabla^2 v + \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon \nabla^2 v) = 0 \qquad (2.13)$$

실제의 계산에서는 전위를 계 변수로 하는 것이 경계조건의 처리에 쉽고 미지수를 줄일 수 있으므로 전자장 문제를 해석하는 데 있어서 쉽 다. 즉, 계에 관련된 일계 편미분 방정식을 전위와 관련된 2계 편미분 방 정식으로 바꾸어 계산한다. 식 (2.13) 을 통해서 전계는 유전율(ϵ)과 도 전율(σ)에 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 최종 절연물의 전 계를 형성하는 전위분포에 대한 지배방정식을 유도하기 위해 식 (2.2) 에 식 (2.10) 을 대입하면

$$\overrightarrow{\nabla} \bullet \left(\epsilon \overrightarrow{\nabla} v \right) = -\rho_v \qquad (2.14)$$

식 (2.14) 가 된다. *ϵ*는 균질한 단순 매질에 대하여 상수이고 발산 연산자 바깥으로 나올 수 있다. 따라서,

$$\nabla^2 v = -\frac{\rho_v}{\epsilon} \qquad (2.15)$$

식 (2.15) 과 같이 나타낼 수 있고 이를 Poisson 방정식이라 한다. ▽²는 기울기의 발산 또는 ▽· ▽을 의미하며 Laplacian 연산자이다. 직 각좌표계로 정리하면,

$$\overrightarrow{\nabla} \cdot \overrightarrow{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{z}\right) \cdot \left(\frac{\partial}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{z}\right)$$
$$= \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$
직각좌표계와 자유 전하가 없는 단순 매질에서 $\rho_v = 0$ 이므로

$$\nabla^2 v = 0 \qquad (2.16)$$

식 (2.16) 로 줄어들며, 이를 Laplace 방정식이라 한다. 따라서, 직각 좌표계에서

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \theta)$$

$$v(t) = Re(V_m e^{j(\omega t + \theta)})$$

$$\nabla^2 v(t) = \nabla^2 \operatorname{Re}(V_m e^{j(\omega t + \theta)}) = \operatorname{Re}[e^{j(\omega t + \theta)} \nabla^2 V_m] = 0$$

 $\nabla^2 V_m = 0$

$$Re\left(e^{j(\omega t+\theta)}\right)\left(\frac{\partial^2 V_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_m}{\partial z^2}\right) = 0 \qquad (2.17)$$

식 (2.17) 는 전계를 형성하는 전위분포에 대한 지배방정식으로 전위 분포와 전계분포의 계산에 사용된다. 또한, 지배방정식 (2.3) 과 같이 직 류전계분포 절연물 해석에서 도전율(σ)에 대한 값을 절연물의 해석에 중 요하게 사용하여 해석을 진행하고자 한다. 일반적으로 사용되는 절연물 들의 상대 유전율(ε)은 고체, 기체, 액체를 막론하고 1~10 사이의 값을 갖으나 절연물들의 도전율은 낮게는 수십 배, 많게는 수천 배 차이가 나 기 때문에 직류전계의 집중 현상이 극명하게 나타날 수 있다. 따라서 직 류 절연설계에 있어 직류 전계분포 해석은 더욱 중요하다.

2.4 온도와 전계의 상관관계

2.4.1 온도변화에 따른 직류전계분포

직류전계분포는 도전율에 크게 의존한다. 본 절에서는 직류전계분포 에 영향을 주는 도전율이 온도와 어떤 관계에 있고, 온도에 의해 직류전 계분포가 어떤 영향을 받는지 알아본다.

[그림 2-9]는 일반적인 고체절연물로 사용되는 물질들의 도전율과 온도와의 상관관계를 나타내는 그래프이다.



[그림 2-9] 일반적인 고체절연물 온도에 따른 도전율

 $\sigma = \sigma_0 e^{\alpha T} \quad (2.18)$

σ₀: 기준온도, 기준전계에서의 도전율 (예, 20℃, 1kV/mm)
 α: 온도계수 [1/K]

[그림 2-9]와 같이 고체절연물로 사용되는 물질들의 도전율과 온도 와의 상관관계를 보여준다. 일반적으로 고체절연물의 도전율은 식 (2.18) 과 같이 온도에 지수적으로 증가한다. 따라서, 직류 전계해석을 수행하면 서 물질의 도전율을 상수로 입력했을 때, 오류가 발생하게 되므로 온도 에 관한 함수를 입력해야 한다[7].

제 3 장 고전압관 구조 개선 실험

3.1 구조 개선 실험조건 및 방법

기존에 40년 이상 석탄화력발전소에서 환경설비로 설치된 전기집진 기 전력용 변압기에서는 습기로 인한 절연애자 파손의 사례는 보고되지 않았다. 하지만 대용량 전기집진기로 집진실은 확장되고 통과하는 배기 가스 온도는 상승했으며 전류형 변압기와 고전압관은 소형 경량화되었 다. 이로 인해 발생하는 고전압관의 결로 발생에 대해서 2장에서는 발생 원인을 분석해보았고 이를 바탕으로 구조 개선 실험을 하였다.

본 실험에서는 결로 발생 조건 세 가지를 차례로 제거함으로써 고전 압관 내부 습기 발생 제거를 목표로 실험을 시행하였다. 2.2장에서 검토 하였듯이 결로가 발생하는 조건은 온도, 습도, 밀폐가 중요한 요소이다. 고온 다습한 공기가 차가운 표면을 만나면 결로가 발생한다. 고전압관 내부의 고온 다습한 조건을 제거하여 결로를 방지하기 위한 다양한 실험 을 시행하였다.

3.2 구조 개선 실험 결과

3.2.2 습도 제거 실험

고전압관의 기본 설계는 밀폐 조건으로 설계되고 제작되었다. 따라 서, 고전압관 내부는 외부의 고온 다습한 공기가 침투되지 않도록 밀폐 되어야 한다. 고전압관에 고온 다습한 공기의 유입을 막으면 결로를 방 지할 수 있다는 가설을 세우고 실험을 시행하였다. 이 실험방법을 첫 번 째로 시행한 이유는 내열용 실리콘이라는 간단한 재료로 개스킷을 보강 하여 완벽한 밀폐가 가능하다면 큰 비용과 시간을 들이지 않고 설비를 개선할 수 있기 때문이다. 정류형 변압기는 두 곳의 고전압관을 볼트로 체결하여 집진기 Hot Roof에 연결된다. [그림 3-1]과 같이 연결 부위는 모두 개스킷을 사용하여 외부 공기가 유입되지 않도록 밀봉한다. 절연애 자가 통과하는 Hot Roof 관통 부위는 작은 구멍을 통해서 절연애자가 관통하게 되며 그사이는 개스킷으로 모두 밀봉하여 Hot Roof의 배기가 스가 고전압관 내부로 침투하지 못하도록 설계되어 있다. 고전압관은 비 석면 Gasket과 Rubber Gasket을 이용하여 모두 밀폐 상태를 유지하도 록 설계되어 있으나 다양한 조립 과정이 이루어졌기 때문에 밀폐가 깨지 게 되어 외부 공기 또는 Hot Roof 하부의 고온 다습한 공기가 침투하여 결로가 발생했을 가능성에 대해서 가설을 세우고, 실험을 통해서 검증하 고자 한다. 24개의 정류형 변압기 중에서 6대의 변압기에 설치하여 공통 으로 습기가 개선되는지를 관찰하였다.

[그림 3-2]는 습기가 유입될 가능성이 있는 접합부에 대해서 내열용 실리콘을 도포하여 밀폐를 개선하고 지속적으로 관찰하여 습기 발생 여부를



[그림 3-1] 고전압관 개스킷 설치 위치



[그림 3-2] 고전압관 습도 제거 실험

확인하였다. 이 실험에서 습기가 제거된다면 개스킷의 재질을 개선하여 향후 설비에 사용하여 결로를 방지한다는 가정에서 내열용 실리콘을 사 용하였다. 공사 후에 습기 제거를 위한 실리카젤 장착 부위를 제거하고 압력계를 통해서 압력의 변화가 없음을 확인하여 완벽한 밀폐가 이루어 졌는지 검증한 후에 관찰을 시작하였다.

실험 결과는 습도를 제거하고자 다양한 조치를 했음에도 재차 습기 가 발생하였다. 이 실험 결과를 통해서 세 곳의 개스킷 접합부의 밀폐를 개선하여 습도를 제거하여도 결로가 제거될 만큼의 효과가 없음을 확인 할 수 있었다. 따라서 습도 제거 실험에 추가하여 다른 요소를 함께 차 단하는 방법을 통해서 결로를 제거하는 실험을 시행하였다.

3.2.3 고온 제거 실험



[그림 3-3] 고전압관 고온 제거 실험

정류형 변압기 고전압관의 구조는 Hot Roof와 철판 하나를 두고 맞 당아 있는 구조로 설계되어 있다. 따라서 2장 전기집진기 온도분포와 같 이 Hot Roof의 90℃ 고온이 철판 하나로 전달되어 고전압관 내부의 온 도는 50℃ 이상으로 추정되며 절연애자는 자기(Porcelain) 소재의 특성 으로 90℃ 내외로 추정된다. 따라서 이번 실험에서는 보온재를 이용하여 고전압관으로 전해지는 온도를 차단하여 고온 다습한 조건에서 발생하는 결로의 조건 중 고온의 온도에 대한 요소를 제거하고자 실험을 시행하였 다.

실험방법은 [그림 3-3]과 같이 고전압관 하부에 보온재를 설치하여 온도 전달을 방지하고, 반대편인 Hot Roof 상부의 고전압관 부위에 같은 보온재를 설치하여 상·하부에서 전달되는 고온을 단열하고자 실험을 하 였다. 이 실험에서는 두 종류의 비교군을 두고 실험하였다. 3.2.2장에서 실험했던 습기 외부 유입방지를 개선한 정류형 변압기에 온도차단 공사 를 추가한 6대의 정류형 변압기를 관찰하고, 6대는 온도차단 실험만 단 독으로 시행하여 개선 여부를 관찰하였다. 실험 결과는 [그림 3-3]과 같이 두 개의 비교군 모두 습기 개선 효 과를 확인할 수 없었고, 계속해서 결로가 발생하는 것을 확인할 수 있었 다. 이 실험 결과를 통해서 보온재 이용하여 온도 확산을 차단하고 세 곳의 개스킷 접합부의 습기 유입을 차단하여도 결로가 제거될 만큼의 효 과가 없음을 확인할 수 있었다. 따라서 온도, 습도 제거 실험에 추가하여 다른 요소를 함께 제거하는 방법을 통해서 결로를 제거하는 실험을 시행 하였다.

3.2.4 밀폐 제거 실험

고온 다습한 공기를 완전히 막을 수 없거나 완전히 막더라도 결로를 발생시킬 조건을 개선할 수 없다면 고전압관 내부의 뜨거운 공기가 고전 압관 표면의 차가운 표면을 만나서 생기는 원인에서 내·외부 공기의 온 도 차이를 줄일 수 있는 밀폐 조건을 제거하는 방법을 추가하여 결로를 방지하는 실험을 시행하였다. 고전압관을 밀폐형에서 개방형으로 구조 개선을 하면 향후 절연애자 부위에만 국한적으로 결로가 발생하여 더 많 은 절연애자 파손이 발생할 수 있다는 위험성과 예상치 못한 부위의 오 작동으로 집진 성능에 영향을 미칠 수 있다는 위험성 인식하고 추가 관 찰하며 실험을 하였다.

실험방법은 [그림 3-4]와 같이 정류형 변압기 측 유지보수를 위한 개폐도어에 빗물 유입이 되지 않도록 하부를 향하게 제작된 배관이 부착 된 커버를 설치한다. 또한, 절연애자 유지보수를 위한 개폐도어에 배관이 역시 하부를 향하게 부착된 커버를 설치한다. 각각의 배관에는 각종 이 물질의 유입을 막기 위하여 촘촘한 망을 설치한다. 이 실험 역시 두 개 의 비교군으로 실험을 하였다. 첫 번째는 고온 제거 실험과 밀폐 제거 실험을 함께 시행하고, 두 번째는 밀폐 제거 실험만 단독으로 적용하여 실험군을 선정하고 관찰하였다.

실험 결과 모든 실험군에서 습기가 발생하지 않는 것을 확인하였다. 따라서, 밀폐 제거 실험 단독으로 설치한 정류형 변압기의 고전압관에서 도 습기가 발생하지 않는 것을 확인하고, 모든 24개의 고전압관에 설치 하여 확인한 결과 모두 개선됨을 확인하였다. 이를 통해서 고온 다습한 고전압관 내부의 공기가 상대적으로 차가운 고전압관 표면과 접촉하여 온도가 낮아져서 표면에 이슬이 맺혀서 생기는 결로를 자연순환 배관을 적용한 커버의 설치로 뜨거운 공기가 밖으로 배출이 되어 고전압관 내부 건구온도를 대기 온도와 열적 평형을 이뤄서 고전압관 표면의 온도 차를 줄임으로 결로의 문제를 해결할 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다.



[그림 3-4] 고전압관 밀폐 제거 실험

제4장 직류전계분포 시뮬레이션

4.1 COMSOL Multiphysics 시뮬레이션 조건 및 방법

고전압관 내부의 결로로 인해 절연애자에 맺히는 습기는 필름 형태 로 막을 형성하여 도포된다. 정상상태와 습기상태의 전위분포와 전계분 포의 변화를 시뮬레이션을 통해서 비교하여 절연애자의 전기적 파손원인 을 분석하고자 한다. 이를 위해서 다중 물리해석(Multiphysics) 프로그램 인 COMSOL Multiphysics 5.5를 사용하였다. 다중 물리해석으로 절연애 자의 전계해석과 함께 열전달 해석 기능을 적용하여 절연애자의 온도변 화에 따른 전계해석까지 다중 물리 시뮬레이션이 가능하다.

COMSOL은 수식 기반 모델링과 해석을 위한 플랫폼으로 편미분방정 식(PDE : Partial Differential Equation)으로 구성된 다중 물리현상 해석 을 위해 유한요소법(FEM : Finite Element Method)을 이용하여 해석하 는 시뮬레이션 소프트웨어이다. 유한요소법은 다루고자 하는 전체 영역 을 유한개의 영역으로 나누어 지배방정식을 이용하여 각 영역에서의 특 성을 근사화시키고 편미분방정식으로 유한개의 미지수를 구하여 전체의 영역을 해석하는 방법이다. 편미분방정식은 미분형으로 주어진 지배방정 식으로부터 해를 얻어내는 방법으로, 시간 및 공간에 대한 상태 변화를 기본 물리법칙에 근거하여 표현하며 계산시간의 절감과 복잡한 재료의 전기적인 특성을 쉽게 고려할 수 있다는 장점이 있다.

COMSOL은 다양한 Module로 각 물리 특성에 맞는 해석 솔루션을 제공한다. 그중에서 AC/DC Module은 2.3장에서 도출한 지배방정식을 계산하여 전자기의 광범위한 모델링 기능 및 수치적 해석 방법을 제공하 고 있어서 직류 전위분포, 전계분포를 해석한다. 해당 Module 내에 Electric Current Physics로 직류 해석과 함께 Heat Transfer Physics를 이용하 여 열전달을 동시에 해석하여 다른 물리적 효과에 미치는 영향을 해석한 다. CAD Import Module을 이용하여 세부 형상을 제작하여 해석하였다.

4.1.1 시뮬레이션 조건

COMSOL을 이용한 직류 전위분포와 전계분포의 시뮬레이션을 위해 서는 다양한 시험 조건이 필요하다. 형상(Geometry)을 실제 자기(Porcelain) 절연애자와 같이 형성하고, 재료(Material)의 물성값 입력과 Physics에서 전계는 Electric Currents 항목의 경계조건을 입력하고 열전달은 Heat Transfer in Solids 항목에서 온도 조건을 입력한다. 유한요소해석을 위 해 형상(Geometry)에 맞는 요소 구성(Mesh)을 나눠주면 Study에서 해석 을 진행하고 후처리(Result)에서 결과값을 확인할 수 있다.

가. 형상(Geometry)

시뮬레이션 형상(Geometry)은 [그림 4-1]과 같이 축 대칭 Geometry 를 사용한다. 유한요소에서 Mesh의 크기와 분포는 매우 중요한 요소이 다. 3D 형상으로 Mesh를 생성하고 해석할 경우 직관적인 비교는 가능하 나 좌·우측이 완벽하게 똑같은 Mesh의 형성이 어려우므로 오차가 발생 할 가능성이 커서 전계 집중 현상의 판단이 달라질 수 있다. 축 대칭을 이용하여 2D 단면의 오른쪽을 형상화한 후 COMSOL의 기능을 이용하 면 결과값으로 축 대칭 회전하여 3D 모형으로도 전위, 전계분포를 확인 할 수 있다. 따라서, 본 연구는 2D 축 대칭으로 해석을 진행한다.



나. 재료(Material)

해석하려고 하는 각각의 영역을 Domain이라고 하며, 각각 물성값을 지정해주어야 한다. 고전압관의 외부 Domain 순으로 고전압관은 Iron, 공기는 Air, 절연애자는 Porcelain, 애자 표면의 습기는 Water, 고전압선 은 Iron을 적용한다. 교류 전계분포에서는 도전율(ơ) 항과 유전율(ɛ) 항 이 모두 유효하나 주파수성분과 유전 상수의 곱이 절연물의 도전율에 비 해 매우 크기 때문에 도전율(ơ)에 의해 형성되는 전계의 크기는 무시한 다. 하지만 직류 전계분포는 시간에 대한 미분항이 0이 되므로, 교류 전 계분포 계산 시에 무시할 수 있었던 도전율(ơ) 항이 지배적으로 작용한 다. 따라서, 물질의 도전율(ơ)에 크게 영향을 받아서 분포하게 된다. 각 각의 물성값은 COMSOL의 Material Library의 물성값을 사용하며 [표 4-1]은 시뮬레이션에 사용되는 물성값을 나타낸다.

[표 4-1] 시뮬레이션 적용 물성값

구 분	Porcelain	Air	Water	Iron
상대유전율(ϵ_r)	6	1	80.4	1
도전율 [S/m]	$1 imes 10^{-14}$	$1.8 imes 10^{-14}$	5.5×10^{-6}	$1.12 imes 10^7$

온도변화에 따른 직류 전계분포를 해석하기 위해서는 절연물인 Porcelain의 도전율을 온도에 대한 함수로 입력하여야 한다. 아래 식 (4.1) 은 Porcelain 시편을 이용하여 온도에 따라 측정한 도전율의 실험 식이다. 열전달에 따른 도전율 변화는 해석하고자 하는 대상인 Porcelain 에 적용하였다[6].

$$\sigma(T) = 8.69 \times 10^{-6} \cdot \exp\left(\frac{-0.56 \cdot q}{kT}\right)$$
 [S/m] (4.1)
여기서, q (기본 전하량) : 1.6022×10⁻¹⁹ [C]
k (Boltzmann 상수) : 1.3806×10⁻²³ [m²·kg/(s²·K)]
T : 온도[K]

[표 4-2] 온도변화에 따른 자기 절연애자 물성값

구 분	Porcelain
상대유전율(ϵ_r)	6
도전율 [S/m] (온도별 수식)	$8.69 \times 10^{-6} \cdot exp[(-0.56 \times q)/(k \times T)]$

다. 다중 물리 특성(Physics)

1) 전계

COMSOL의 AC/DC Module에서 도전율(σ)을 적용한 직류 전계해석 을 실행하기 위해서는 Physics의 Electrostatics와 Electric Currents 중 에서 Electric Currents로 해석해야 한다. Electrostatics는 물질의 유전율 을 고려한 교류 전계해석에 사용된다. Physics에서 Electric Currents의 경계조건 중 Electric Potential은 30[kV]의 경계조건을 입력하였다. [그 립 4-2]는 경계조건 중 Water 층은 Floating Potential로 입력하여 자기 절연애자에 습기로 인한 전계해석의 변화를 해석하였다.



[그림 4-2] 절연애자 습기 경계조건



[그림 4-3] 절연애자 온도 경계조건

2) 열전달

COMSOL의 Physics에서 제공하는 다중 물리현상 중에서 열전달은 Heat Transfer의 Heat Transfer in Solids를 사용하여 해석한다. 절연애 자는 1장에서 설명한 구조와 같이 Hot Roof와 관통되어 있어서 하부로 부터 90℃로 가열된다. 따라서 절연물의 도전율은 열에 의해서 변하므로 이를 적용하기 위해서 절연애자의 경계조건을 [그림 4-3]과 같이 설정하 고 절대온도 363[K]의 경계조건을 입력한다.

라. 요소 구성(Mesh)

유한요소해석법에서 가장 중요한 해석 설정 중 하나가 Mesh이다. 축 대칭 형상을 사용한 이유도 Mesh의 좌우가 완전하게 같을 수 없으므 로 오차가 증가하기 때문에 대칭인 형상의 경우 한쪽 축 형상을 해석하 고 전위분포와 전계분포를 확인하여 Mesh의 오차를 줄인다. 해석 후 Results에서 회전하여 3D로 결과를 얻음으로 직관적으로 확인도 가능하 다. Mesh 형성 시 Physic-Controlled Mesh에서 Extremely Fine을 입력 하여 Mesh를 조밀하게 형성하고 Geometry의 오류가 없는지 검증 후 해 석을 진행한다. [그림 4-4]와 같이 Mesh가 형성되어 총 48,666개의 요소 가 생성되었고 절연애자의 굴곡 부분에 Mesh가 집중된 것을 확인할 수 있다.



[그림 4-4] 절연애자 Mesh 형성

4.2 시뮬레이션 시험 결과

4.2.1 직류 정상상태 해석

직류 정상상태 전계분포 해석은 COMSOL Multiphysics의 Electric Currents(es)의 Physics를 이용하였다. 정상상태 직류 전계분포 해석을 위해서는 4.1.1장 실험조건의 상대유전율(Relative Permittivity)과 도전율 (Conductivity) 물성값을 사용하였다.

고전압관 상부에 Electrical Potential 30[kV] 경계조건 설정과 고전 압관 외부 철 구조에 Ground 경계조건을 설정하였다. 절연애자 표면의 Water 층은 제거하고 고전압관 내부 물성값인 Air로 합류하였다.



(a) 직류 전위분포

(b) 직류 전계분포

[그림 4-5] 직류 정상상태 해석결과

[그림 4-5]는 습기가 없는 정상상태에 대한 직류 전위분포와 전계분 포 해석결과이다. 해석결과 전위분포는 30[kV]가 고전압선을 기준으로 고르게 분포하고 있다. 고전압선과 절연애자 사이의 공기층도 27[kV]로 상대적으로 높은 전위분포를 나타낸다. 전위분포는 2장의 식 (2.15) 와 같이 물질의 유전율에 반비례하여 분포하게 된다. 유전율은 공기와 주 절연 매질인 애자와의 비율이 1 : 6이므로 상대적으로 애자보다 공기에 더 높은 전위분포가 형성된다.

직류 정상상태에서 전계는 저항성 분포를 하게 되며 도전율이 낮은 절연애자 내부로 집중된다. 파손이 발생한 절연애자 하부 모서리 부위의 전계 강도는 정상상태에서 500[V/mm]을 나타낸다. 시뮬레이션 결과 한 부 분에 대하여 전계 집중 현상은 발생하지 않고 전계는 고르게 분포한 것 을 확인할 수 있다.

4.2.2 직류 습기상태 해석

직류 습기상태 전계분포 해석도 정상상태와 같이 COMSOL Multiphysics 의 Electric Currents(es) Physics를 단독으로 사용하였다. 직류 습기상태 전계분포 해석에서 추가 사항은 4.1.1장 실험조건의 상대유전율(Relative Permittivity)과 도전율(Conductivity) 중 절연애자 표면의 Water 층 경계 조건을 입력하고 물성값을 적용하였다. 고전압관 상부에 Electrical Potential 30[kV] 경계조건 설정과 고전압관 외부 철 구조에 Ground 경 계조건을 설정하였고 Water 층에 Floating Potential 경계조건을 설정하 였다.

[그림 4-6]은 결로가 발생한 상태에서 습기가 필름 형태로 막을 형 성하여 절연애자에 도포가 된 상태에 대한 직류 전위분포와 전계분포 해 석결과이다. 해석결과 전위분포는 30[kV]가 고전압선과 절연애자, 공기 층까지 전체적으로 분포하게 된다. 전위분포는 물질의 유전율의 비율에 따라 분포하게 되며 유전율은 자기(Porcelain)와 물(Water)의 비율이 6: 80이므로 상대적으로 Water 층보다 절연애자에 더 높은 전위분포가 형성



[그림 4-6] 직류 습기상태 해석결과

되지만, Water 층에 Floating Potential의 경계조건으로 전압이 유기되어 전체가 30[kV]가 분포되어 확인이 불명확하게 전체적으로 분포한다. 30[kV] 이상이면 공기 중의 절연파괴가 가능하다. 따라서, 좁은 공간의 고전압관 내부에 절연애자의 절연파괴가 공기 중의 절연파괴로 이어져 Spark의 간헐적인 발생으로 절연애자의 파손 가능성이 확인되었다.

직류 습기상태에서 전계분포는 Water 층보다 도전율이 낮은 자기 절연애자로 집중되며 하부에 전계 집중 현상이 발생한다. 그 크기는 3000[V/mm]이고, 정상상태의 500[V/mm]의 6배로 높게 형성된다.

4.2.3 직류 습기상태와 온도변화 다중 물리해석

직류 습기상태 전계분포 해석은 COMSOL Multiphysics의 Electric Currents(es) Physics와 Heat Transfer Physics의 Heat Transfer in Solid를 이용하여 다중 물리해석을 수행한다. 직류 습기상태와 온도변화 의 다중 물리해석의 조건은 4.2.1장의 물성값 조건과 열전달을 추가로 설



(a) 전위분포

(b) 전계분포

[그림 4-7] 직류 습기상태와 온도변화 다중 물리해석 결과

정하여, 절연애자의 온도 조건을 90℃(363[K])로 설정하고 도전율은 온 도에 따라 변하는 [표4-2]의 함수값을 사용하였다.

[그림 4-7]은 습기가 발생한 상태에서 고온의 열전달이 적용된 직류 전위분포와 전계분포 해석결과이다. 해석결과 전위분포는 30[kV]가 고전 압선에 고르게 분포하고, 기준온도 20℃(293[K])에서 90℃(363[K])로 온 도가 올라간 절연애자의 전위분포는 2.4.1절과 같이 온도가 상승하면 도 전율도 함께 상승하므로 식 (2.3) Ohm의 법칙에 따라 절연물의 도전율 이 상승하면 저항은 내려가고 전위는 내려가므로, 절연물의 전위분포는 30[kV]에서 23[kV]으로 내려간 것을 확인할 수 있다.

반면에, 4.2.2에서 집중적으로 한 부위에만 분포한 전계가 하부의 넓 은 부위로 전계분포가 확대되고 그 크기는 2500[V/mm]이고, 정상상태의 500[V/mm]보다 5배로 높게 분포한다.

4.2.4 염분 영향에 따른 전류밀도 변화

기존 송전설비에 사용하는 자기(Porcelain) 절연애자의 연구 보고에 따르면 자기 절연애자는 염해에 취약하다는 연구 결과가 보고되고 있다. 석탄화력발전소는 복수기 사용 시 냉각을 위한 발전용수를 해수로 사용 하기 때문에 바닷가 인근에 건설된다. 따라서 발전설비 및 구조체는 염 해의 영향을 받게 된다. 본 연구 대상인 전력용 변압기 고전압관 절연애 자의 경우 결로로 인한 습기의 발생으로 습기가 도포된다. 도전율은 물 속에 함유된 총고형물질(TDS : Total Dissolved Solids)의 양이 많을수 록 물속에 전하를 띤 이온이 많아져서 도전율이 높아진다. 즉, 물속에 이 온 함유량이 많으면 전기가 잘 통하고, 이온이 전부 제거되면 물은 전기 를 통하지 않는 부도체가 된다. 대기 중의 습기는 불순물이 함유되어 있 고, 특히 고전압관 내부의 습기는 철 구조물 부식으로 인한 불순물의 함 유와 바닷가 인근에 있으므로 염분의 영향으로 도전율이 상승하여 전류 가 흐른다. 따라서, 추가 시뮬레이션은 염분의 영향으로 도전율이 상승하 였을 때 절연애자의 전류밀도를 확인하여 파손에 미치는 영향을 분석하 였다. [표4-3]은 물 성분에 따른 도전율의 변화를 나타낸다.

구 분	순수	증류수	담수	바닷물
도전율 [S/m]	$5.5 imes10^{-6}$	$2 imes 10^{-5}$	$1 imes 10^{-3}$	4

[표 4-3] 물 성분별 도전율[13]

도전율 변화에 따른 전계분포 시뮬레이션 결과 전위분포와 전계분포 의 변화를 극명히 확인하기 어렵다. 시뮬레이션의 Water 층이 일정량의 이온 함유량의 조건을 갖추고 도전율을 상승시키면 높은 수준의 전위분 포와 전계분포로 인해 차이점을 확인하기 어렵기 때문이다. 따라서, 염분 및 이온 함유량에 따른 도전율 변화를 적용하여 전도전류의 변화가 절연 애자에 미치는 영향을 확인하는 방법으로 염분 및 이온의 함유량 증가에 따른 도전율 상승 시 절연애자에 미치는 영향을 확인하였다.

[그림 4-9]와 같이 순수 기준의 도전율부터 바닷물보다 극한의 역분 함유 조건의 도전율 변화 시 전류밀도의 변화를 확인하였다. 바닷물의 평균 염분 농도는 3.5%이고. 그 이상의 염분 농도를 확인하기 위하여 바 닷물 이상의 도전율을 적용하였다. 순수 수준의 5.5×10⁻⁶[S/m]에서 10 배씩 증가하여 전류밀도 변화를 확인하였다. 담수는 순수한 H₂O가 아니 고 반드시 약간의 염분을 함유하고 있어 순수와 구별되는 물의 종류이 다. 시뮬레이션 결과 도전율이 증가하여 염분이 함유된 담수 수준의 도 전율 5.5×10⁻³[S/m] 증가 시까지 전류밀도는 급격히 상승하나 바닷물 이상의 수준으로 도전율 상승 시 전류밀도의 변화는 극히 미비하게 변화 하다. 따라서. 순수한 물에서 염분 등 총고형물질(TDS)의 함유에 따른 담수 수준으로 도전율이 상승하면 전류밀도가 급격히 변화하지만, 염분 및 이온의 농도가 진해지며 도전율이 그 이상으로 상승하여도 절연애자 의 전류밀도 변화에 따른 영향이 적은 것으로 확인되었다. 다만, 고전압 관 내부는 지름 1[m]의 습기상태 조건에서 담수 수준의 이온이 함유된 도전율에서 전류밀도의 포화가 발생할 가능성이 있으므로 좁은 면적의 직류 고전압관에 적용할 수 있고 송전선로용 가공 혀수애자는 특성이 다 를 수 있다. 또한, 기계적, 화학적 특성으로 인한 영향을 제외하고 전기 적 특성만을 고려하여 시뮬레이션을 시행하였다.





(b) 도전율 55[S/m] [그림 4-9] 전류밀도 변화 시뮬레이션 결과

4.2.5 절연애자 파손원인 시뮬레이션 분석 결과

4.2.2의 직류 습기상태 해석의 결과로 절연애자 표면의 습기로 인해 표면 전위분포가 30[kV]으로 형성되어 공기 중의 절연파괴 전압이 형성 된다. 따라서, 습기 형성 조건이 만들어지면 간헐적으로 고전압관 내부에 서 Spark가 발생한다. 또한, 4.2.3의 직류 습기상태와 온도변화 다중 물 리해석의 결과로 열전달을 적용한 직류 전계분포는 절연애자 하부에 넓 은 부위로 정상상태의 500[V/mm]에서 습기상태는 최대 3000[V/mm]으 로 6배가량 높게 형성된다. 식 (4.2) 와 같이 Stress는 전계의 제곱에 비 례하여 지수적으로 상승하므로 6배가량 상승한 전계는 절연애자 하부에 36배가량의 Stress를 발생시킨다. 따라서, 절연애자 하부에 강한 응력의 발생과 절연애자의 습기 도포로 인해 형성된 막이 간헐적으로 공기 절연 을 파괴하여 Spark의 발생이 동시에 이루어지는 조건이 형성되면 절연 애자의 국부적인 절연파괴와 최종적으로 절연애자가 파손되는 현상이 나 타날 수 있다는 것을 시뮬레이션 결과 확인할 수 있다.

Stress $\propto E^2$ (4.2)

[그림 4-10]은 최종 시뮬레이션 결과와 실제 파손된 절연애자 부위 를 비교하였다. 실제 절연애자의 파손 부위가 모두 하부에서 발생하였고 실제 발생한 파손과 시뮬레이션의 결과와 일치함을 확인하였다.



[그림 4-10] 시뮬레이션 결과와 절연애자 파손 부위 비교

제5장 결론

5.1 요 약

본 연구에서는 대용량 석탄화력발전소에 설치된 전기집진기의 신형 정류형 변압기의 고전압관 내부의 절연애자 파손원인 분석을 위해 시뮬 레이션을 시행하고 고전압관 내부의 결로 발생 원인을 분석하였다. 이를 기반으로 고전압관 구조 개선 공사로 최적의 구조로 개선하여 결로 발생 을 방지하고 절연애자 파손 문제를 해결하였다. 구조 개선을 완료한 정 류형 변압기와 고전압관은 1년 이상 절연애자의 파손 없이 안정적으로 운영되고 있으며, 대용량 1000[MW]급 석탄화력발전소의 안정적 운전에도 기여하고 있다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫 번째, 절연애자 파손 경과를 분석하고 공통적으로 고전압관의 결 로가 발생한 정류형 변압기에서 절연애자의 파손이 발생하는 것을 확인 하였다. 기존 정류형 변압기와 신형 정류형 변압기의 비교를 통해서 구 조적 차이점을 찾아내고 다양한 가설로 연구를 시작하였다.

두 번째, 고전압관의 결로 발생 물리적 메커니즘을 분석하여 원인을 찾아내고 개선할 수 있는 조건을 정립하였다. 결로 발생 조건은 온도, 습 기, 밀폐의 세 가지 조건이 있다. 고전압관은 Hot roof로 달궈진 철판에 의해 고온이고 여름철과 같이 습한 환경에서 내부로 습한 공기가 침투할 가능성이 있으며 기존 고전압관과 동일하게 기본적인 설계는 밀폐 조건 으로 설계되었다. 기존 모델과 다르게 신형 고전압관은 면적이 작고 바 닥 면과 가깝게 설치되어 온도변화에 취약하며, 접지 점검 창을 통해서 작업자가 낮은 위치에서 결로 여부를 확인할 수 있다. 따라서, 고전압관 내부의 고온 다습한 공기가 상대적으로 차가운 고전압관 표면과 접촉하 여 온도가 낮아져서 표면에 이슬이 맺혀서 생기는 결로 발생 원인을 확 인할 수 있었다.

세 번째, 결로 발생 원인이 확인됨에 따라 다양한 가설로 현장에서 구조 개선 실험을 하고 최종 결로가 제거된 구조를 확인하여 현장 전체 정류형 변압기에 적용 후 모두 개선됨을 확인하였다. 결로 발생의 세 가 지 원인 중 밀폐를 강화하여 외부의 습기가 침투하지 못하게 구조를 개 선한 후 실험한 결과 결로는 개선되지 않음을 확인하였다. 다음으로 고 온의 Hot roof와의 열전달을 차단하고 고전압관 내부의 온도 차가 발생 하지 않도록 구조를 개선한 후 실험한 결과 역시 개선되지 않았다. 마지 막으로 밀폐 조건을 제거하기 위해 두 개의 점검 창에 배관을 달아 자연 순환 배관 커버를 설치하여 관찰하였고 설치한 12대의 정류형 변압기에 서 습기가 모두 개선됨을 확인하였다. 이를 통해서 자연순환 배관을 적 용한 커버 설치로 뜨거운 공기가 밖으로 배출이 되어 고전압관 내부 건 구온도를 대기 온도와 열적 평형을 이뤄서 고전압관 표면의 온도 차를 줄임으로 결로의 문제를 해결할 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다. 우려 하였던 절연애자 표면의 국부적인 습기 발생 및 추가적인 파손은 발생하 지 않았다.

네 번째, 절연애자의 염분 영향을 시뮬레이션한 결과 염분 및 불순 물의 변화에 따른 이온의 증가를 도전율로 적용하여 전류밀도의 변화를 통해서 염분의 영향을 확인할 수 있었다. 순수의 도전율을 적용했을 경 우와 바닷물 이상의 상태까지 도전율을 적용해보면, 담수 정도의 도전율 변화 시 급격히 전류밀도의 상승이 이루어지지만, 그 이상의 도전율 적 용 시에는 전류밀도의 변화가 미비한 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 염 분이 포함되면 절연애자에 전류밀도와 전계분포에 영향을 끼치지만, 그 함량이 바닷물 이상의 수준으로 과다해진다고 하여 비례적으로 전류밀도 및 전계분포에 과다한 영향을 끼치지 않는 것으로 확인할 수 있었다. 마지막으로 다섯 번째, COMSOL Multiphysic을 이용하여 전계해석 시뮬레이션 결과로 절연애자 파손원인을 확인할 수 있었다. 절연애자의 정상상태와 습기상태, 습기와 열전달이 동시에 적용되는 다중 물리해석 을 통해서 직류 전위분포와 전계분포를 확인하였다. 정상상태에서는 자 기 절연애자의 절연 성능으로 30[kV]이 고전압선을 통해서 정상적으로 방전극에 전달됨을 확인하였다. 하지만, 절연애자의 습기상태로 절연이 파괴될 경우 고전압선과 절연애자, 공기 중에 30[kV]의 전위분포가 형성 되어 공기 중의 절연이 국부적으로 파괴되고 간헐적으로 Spark가 발생 할 조건이 형성되었다. 마지막으로 절연애자에 습기와 열전달이 동시에 적용되는 다중 물리해석을 통해서 전계해석을 수행한 결과 절연애자 하 부에 넓은 범위의 전계분포가 형성되고 정상상태의 6배의 전계의 세기로 36배의 Stress가 형성되어 강한 응력과 Spark의 간헐적인 발생으로 절 연애자의 파손이 가능함을 시뮬레이션으로 확인하였고 실제 애자 파손 부위가 모두 절연애자 하부인 것도 시뮬레이션의 결과와 일치함을 확인 하였다.

본 연구를 통해서 신형 정류형 변압기의 구조 개선에 성공하여 S사 발전소 이외에 1000[MW]급 신규 석탄화력발전소의 전기집진기에 사용 하여 동일한 원인으로 파손되는 절연애자의 파손을 방지할 수 있었다. 향후 전기집진기뿐만이 아니라 고압 직류의 자기 절연애자 사용 시 구조 개선에 관한 본 연구가 활용될 수 있을 것으로 기대하고 동일한 문제를 겪고 있는 산업 현장의 고전압 직류 설비의 문제점 개선에 기여할 것으 로 판단한다.

5.2 제 언

본 연구에서는 정류형 변압기 고전압관의 구조 개선으로 결로를 제 거하여 문제를 해결하였고, 고전압관 전기적 파손원인을 분석하여 추가 문제 발생에 대처할 수 있도록 원인을 규명하였다. 좁은 면적의 고전압 관 내부에서 결로로 인한 습기가 자기 절연애자 표면에 필름 형태로 분 포하여 전계의 영향이 극대화되었다. 습기 발생을 제거하여 전계 집중 현상을 완화하고 Spark 발생 요소를 제거하였으나 향후 장기간 관찰을 통해서 고전압관 개방 구조 변경으로 인한 추가 문제점이 없는지 추적 관찰이 필요하다.

또한, 향후 전기집진기 고전압관 절연애자 제작 시 습기가 발생하더 라도 접지된 고전압관 하부 철판과의 접촉 부위에서 전계의 강도가 집중 되지 않도록 절연애자 하부의 형상을 굴곡으로 처리하고 절연애자와 고 전압관 하부 철판 사이에 큰 폭의 간격을 형성하도록 자기(Porcelain) 소 재 이외의 두꺼운 절연재료를 추가하여 현장에 적용한다면 고전압관 개 방 구조와 함께 더욱 보강된 구조 개선으로 부분 습기 발생에 대처할 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] 박흥실, "화력발전실무 I", 청오출판사, 2015, pp. 157-161.
- [2] 이영기, "화력발전소 습식전기집진기 미세먼지 저감 특성에 관한 연구", 연세대학교 석사학위논문, 2019, pp. 8-9.
- [3] 대기환경보전법 시행규칙 제2장 사업장 등의 대기오염물질 배출규제 제15조(배출허용기준).
- [4] 윤성도, "여름철 지중 공간의 표면 결로 방지를 위한 외기 이용 강제 환기 방법 연구", 한양대학교 대학원 학위논문, 2009, pp. 14-39.
- [5] 조성수, "Labview를 이용한 고전압 절연재료의 누설전류 측정 및 분석 시스템 개발", 충남대학교 석사학위논문, 2000, pp. 5-6.
- [6] 성재규, "직류 전계분포 해석 기법을 적용한 500 kV급 HVDC 폴리머 애자 최적 절연 설계", 한양대학교 박사학위논문, 2015, pp. 61-66.
- [7] S.Boggs, D.H.Damon, J.Hjerrild, et al., "Effect of Insulation Properties on the Field Grading of Solid Dielectric DC Cable", *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 16, No. 4, Oct., 2001.
- [8] F.H.Kreuger "Industrial High DC voltage", *Delft Univ. Press*, 1995, pp. 1–34.
- [9] 홍석민, "유한요소법을 이용한 전류가 흐르는 도체의 내외부 전계분포 및 표면 전하밀도 수치해석"성균관대학교 석사학위논문, 2014, pp. 6-10.
- [10] 이온유, "친환경 Cable 개발을 위한 Polyolefin 수지의 열·기계·전기적 특성 분석", 한국교통대학교 일반대학원, 2017, pp. 4-20.
- [11] 황재상, "HVDC 전력 케이블 접속함 개발을 위한 도전율 계측 기반 직류

전계해석 및 최적 절연설계 연구", 한양대학교 박사학위논문, 2016, pp. 18-77.

- [12] ASHRAE, ASHRAE Handbook Fundamentals. USA, ch. 6, 1997.
- [13] David K. Cheng, "Fundamentals of Engineering Electromagnetics", 2016, pp. 526–527.

Abstract

A Study on the Analysis and Structural Improvement of Electrically Damaged High-tension Line Duct in Electrostatic Precipitator

Ki Young, Choi Department of Engineering Practice The Graduate School of Engineering Practice Seoul National University

The electrostatic precipitator is a typical environmental facility that collects more than 99.8% of the dust emitted after burning coal in coal-fired thermal power plant. Recently, the upper limit of thermal power generation, which is not allowed to exceed 80 percent of thermal power output when a fine dust warning is issued, strengthening activities to reduce fine dust along with public interest in fine dust.

In this study, the application of eco-friendly technology does not significantly increase carbon emissions compared to liquefied natural gas (LNG) power plants, and the problem of electrostatic precipitator caused by the construction of 1000 [MW] USC power plants corresponding to the output of one nuclear power plant is studied. Based on the case of damage of high-voltage duct porcelain insulator caused by the application of new technology that increases the volume of electrostatic precipitator to large capacity and the rectified transformer for corona discharge, the cause of electrical damage was analyzed and the improvement of high-voltage duct structure was solved through field experiments.

Through the structural review of existing rectified transformers and new rectified transformers, the research was conducted in the process of verifying various hypotheses, confirming the common point of breakage of Porcelain insulator in condensation-producing high voltage duct.

The mechanism of high-voltage duct condensation generation was analyzed and the optimal structure was checked through field experiments and observations to eliminate the cause, and all were installed in 24 whole rectified transformers to verify that they were improved without moisture generation.

In addition, DC electric field analysis using COMSOL Multiphysics to analyze the causes of breakage of the insulator confirmed that it was consistent with the broken insulation at the actual site, and the causes of electrical damage could be verified and improved, contributing to the stable installation and operation of the electrostatic precipitator.

The high-voltage duct structure of rectified transformers derived from this study was applied to the 1000 [MW] class electrostatic precipitator under new construction nationwide to improve the problem of condensation generation and insulator breakage, operate stably and verify reliability.

keywords : Electrostatic precipitator, Porcelain insulator, Electric field analysis, COMSOL, Condensation

Student Number : 2019-28188