creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학전문석사 학위 연구보고서

배전급 진공인터럽터(VI) 아크쉴드 부유전압을 이용한 내부 진공절연 상태판정에 관한 연구

A Study on Internal Vacuum Insulation State Judgment Using Distribution-Class Vacuum Interrupter (VI) Arc Shield Floating Voltage

2022년 02월

서울대학교 공학전문대학원

응용공학과 응용공학전공

성 재 경

배전급 진공인터럽터(VI) 아크쉴드 부유전압을 이용한 내부 진공절연 상태판정에 관한 연구

지도교수 문 승 일

이 프로젝트 연구보고서를 공학전문석사 학위 연구보고서로 제출함

2022년 02월

서울대학교 공학전문대학원
응용공학과 응용공학전공
성 재 경

성재경의 공학전문석사 학위 연구보고서를 인준함

2022년 02월

위 원 장 윤 용 태 (인)

위 원 문 승 일 (인)

위 원 김 국 헌 (인)

국문초록

최근 기후변화에 따른 온실가스 배출 저감을 위한 전 세계적인 환경규제가 강화되고 있으며, 이에 따라 대표적인 절연 매질로 사용 중인 SF_6가스는 친환경 절연물로 대체되고 있는 추세이다.

현재 국내에서 사용 중인 배전용 개폐기의 경우 기존 SF_6가스 절연개폐기에서 진공인터럽터를 내장한 친환경 개폐기로 전환 중에 있으며, 현재 약 9만 대의 진공 절연 개폐기가 운전 중에 있다.

진공 절연의 경우 절연능력과 아크소호 능력이 매우 우수한 특성을 갖고 있으나, 진공도가 저하될 경우 절연능력이 현격히 낮아져 절연파괴의 위험성이 존재한다. 따라서 진공인터럽터의 내부 진공도에 대한 진단 및 측정은 매우 중요하지만, 현재 진공인터럽터 제조사에서의 제품 출고 이후 진공인터럽터의 진공 및 절연상태를 확인할 수 있는 방법은 부재한 상황이다. 진공상태를 측정하기 위한 연구는 전통적으로 사용되고 있는 Penning discharge 방식과 Magnetron 측정기술이 대표적이지만 여러 제약조건으로 전력계통 현장에서의 적용이 불가하다. 또한, 1985년 S.Tanigaki와 M.Sakaki에 의해 제안되어 현재까지 연구되고 있는 PD를 활용한 진공 측정방법은 아직까지 실제 적용할 수 있을 만큼의 신뢰성을 확보하지 못한 상황이다.

본 연구보고서는 기존에 알려진 진공측정기술의 문제점을 극복할 수 있는 방안에 대해 고찰하였으며, 진공인터럽터 내부 아크쉴드에 형성되는 부유전압 특성의 도출을 통해 진공인터럽터 내부 진공의 절연상태를 확인하였다.

향후 진공인터럽터 진공 측정 센서의 제작에 있어 진공도와 부유전압의 기본적인 특성이 도움이 될 수 있을 것이라고 기대한다.

주요어 : 진공인터럽터, 진공도, 부유전압, 전리, 플라즈마 방전
학　번 : 2020-23262

목 차

제 1 장 서론 ····· 1

제 1 절 연구의 배경 ····· 1

제 2 절 연구모델 정의 ····· 6

제 2 장 이론적 배경 ····· 10

제 1 절 기체의 운동 법칙 ····· 10

1. 평균자유행정 ····· 10
2. 전자에 의한 충돌전리 ····· 11
3. 이동도와 확산계수 ····· 13
4. 기체의 방전특성 ····· 16

제 2 절 플라즈마(Plasma) ····· 18

1. 플라즈마(Plasma) 정의 ····· 18
2. 디바이 길이(Debye length) 및 플라즈마 쉬스(sheath) ····· 19
3. 플라즈마 내 양극성 확산(ambipolar diffusion) ····· 22

제 3 장 종래의 진공 측정기술 ····· 23

제 1 절 진공 측정 기술 ····· 23

1. 진공의 정의 및 분류 ····· 23
2. 진공 측정 원리에 따른 진공게이지 분류 ····· 24

제 2 절 진공인터럽터 진공도 측정 기술 ····· 26

1. Penning discharge 진공 측정 기술 ····· 29
2. Magnetron 진공 측정 기술 ····· 31
3. 부분방전(Partial discharge)을 이용한 진공 측정 기술 ····· 34

제 4 장 진공인터럽터 진공도 실험 ····· 36
제 1 절 실험 개요 ····· 36
1. 시료제작 ····· 36
2. 실험 회로 구성 ····· 37

제 2 절 실험결과 및 분석 ····· 40
1. 진공도 정상 상태 시 아크쉴드 전압 특성 ····· 40
2. 진공도 대기압 상태 시 아크쉴드 전압 특성 ····· 43
3. 진공도 가변 상태 시 아크쉴드 전압 특성 ····· 49

제 6 장 결론 ····· 61

참고문헌 ····· 65
Abstract ····· 68

표 목 차

[표 1-1] 온실가스 별 지구온난화지수(100년 기준) ····· 2
[표 1-2] 국내 배전 개폐기 운영현황(2021.06 기준) ····· 3
[표 2-1] 진공 영역에 따른 분자 수와 평균자유행정 ····· 11
[표 2-2] 기체의 전리 전압 ····· 12
[표 2-3] 전리확률 상수 α ····· 12
[표 3-1] 진공도의 일반적인 분류 ····· 23
[표 3-2] 진공 측정기술의 특성 비교 ····· 27
[표 3-3] 진공인터럽터 누설유형에 따른 누설률 ····· 28
[표 3-4] Magnetron 방전전류와 압력 관계 ····· 33
[표 4-1] 쉴드룸 차폐 성능 기준 ····· 39
[표 4-2] 인가전압에 따른 아크쉴드 전압 측정 데이터 (정상 진공) ····· 42
[표 4-3] 인가전압에 따른 아크쉴드 전압 측정 데이터(대기압) 44
[표 4-4] 절연 후 인가전압에 따른 아크쉴드 전압 측정 데이터 (대기압) ····· 48
[표 4-5] 진공 영역에 따른 아크쉴드 전압 및 방전특성 ····· 53

그 림 목 차

[그림 1-1] 배전용 Eco-부하개폐기 내부구조 및 VI 소손사례 ·· 2
[그림 1-2] 진공인터럽터 내부 소손사례 ····· 4
[그림 1-3] 진공인터럽터 진공도 저하 원인분석 사례 ····· 5
[그림 1-4] 진공인터럽터의 구조 ····· 6
[그림 1-5] VI 절연 용기 내 아크쉴드의 거치 형태 ····· 7
[그림 1-6] VI 내부 전극과 아크쉴드 사이 진공 매질에
대한 모델링 ····· 9
[그림 2-1] 전극 사이 영상전하의 거동(유동전류) ····· 14
[그림 2-2] 확산_농도의 균일화 과정(확산전류) ····· 15
[그림 2-3] DC 방전 특성 ····· 17
[그림 2-4] 플라즈마의 발생 원리 ····· 18
[그림 2-5] 플라즈마 쉬스 개념도 ····· 21
[그림 3-1] 간접 측정 방식의 진공계 분류 ····· 24
[그림 3-2] 주요 진공계의 사용범위 ····· 25
[그림 3-3] 진공인터럽터 진공도에 대한 Paschen Curve ····· 27
[그림 3-4] 페닝 방전 진공계 구조 ····· 29
[그림 3-5] 페닝 방전 진공계 내 측정원리 ····· 30
[그림 3-6] 페닝 방전 진공계의 압력과 방전전류 특성 ····· 30
[그림 3-7] 진공인터럽터 내부 방전전류 형성경로 ····· 32
[그림 3-8] 진공인터럽터 내부 Magnetron 방전전류 형태 ····· 33
[그림 3-9] 진공인터럽터 내부 등가회로 ····· 35
[그림 3-10] PD 전자기파 검출을 통한 진공도 측정방안 ····· 35
[그림 4-1] 진공인터럽터 시료 ····· 36
[그림 4-2] 진공인터럽터 아크쉴드 전압 측정 회로구성 ····· 37

[그림 4-3] 진공측정 게이지 및 Callibration ····· 38
[그림 4-4] 실험 회로 전경 ····· 39
[그림 4-5] 진공도 정상상태 시 아크쉴드 전압 측정회로 ····· 40
[그림 4-6] 인가전압에 따른 아크쉴드 전압 측정 파형
(정상 진공) ····· 41
[그림 4-7] 인가전압에 따른 아크쉴드 전압 선형회귀분석 ····· 42
[그림 4-8] 인가전압에 따른 아크쉴드 전압 측정회로(대기압) ·· 43
[그림 4-9] 진공도 정상과 대기압 상태의 아크쉴드 전압 비교 · 44
[그림 4-10] 인가전압에 따른 아크쉴드 전압 측정 파형(대기압) 45
[그림 4-11] 진공인터럽터 내부 절연파괴 시작구간
확대(대기압) ····· 46
[그림 4-12] 절연 후 인가전압에 따른 아크쉴드 전압
측정파형(대기압) ····· 47
[그림 4-13] 아크쉴드 절연 유·무에 따른 아크쉴드 전압 비교 · 48
[그림 4-14] 진공도에 따른 아크쉴드 전압 측정회로 ····· 49
[그림 4-15] 진공도에 따른 아크쉴드 전압 실효치 측정값 ····· 50
[그림 4-16] 진공 영역별 아크쉴드 전압 구분 ····· 51
[그림 4-17] 진공 영역에 따른 아크쉴드 전압 순시 파형
및 FFT(1) ····· 54
[그림 4-18] 진공 영역에 따른 아크쉴드 전압 순시 파형
및 FFT(2) ····· 55
[그림 4-19] 진공 영역에 따른 아크쉴드 전압 순시 파형
및 FFT(3) ····· 56
[그림 4-20] 진공도에 따른 아크쉴드 전압 THD 특성 ····· 57
[그림 4-21] 진공영역 ③에서의 아크쉴드 전압 THD 및 FFT · 58
[그림 4-22] 진공영역 ①에서의 실험 전경 및 진공도 ····· 59
[그림 4-23] 진공영역 ②에서의 발광 현상 및 진공도 ····· 59

[그림 4-24] 진공영역 ③에서의 발광 현상 및 진공도 ····· 60
[그림 4-25] 진공영역 ④에서의 발광 현상 및 진공도 ····· 60
[그림 5-1] 아크쉴드 전압에 따른 진공 구간 및 절연상태 판단 63
[그림 5-2] 진공도에 따른 아크쉴드 전압 크기 변화의 물리적 이해 ····· 64

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경

기후변화에 대한 관심과 대응방안 마련을 위한 노력은 국가 차원을 넘어 전 세계적인 이슈로 부각되고 있으며, 국제사회는 전 지구적 기후변화 대응을 위하여 신기후체제 출범 및 다양한 적응대책을 수립 중에 있다. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 1.5℃ 특별보고서('18)에 따르면, 현재 속도로 지구 온난화가 지속될 시 2030~2052년 사이 전 지구 온난화 1.5℃ 상승에 도달할 가능성이 크며, 파리 협정에 따라 제출된 국가별 감축 목표를 통해 계산 시 2030년 연간 온실가스 배출량은 520~580억 CO_2 톤에 달해 1.5℃ 달성에 필요한 배출량(250~350억 CO_2 톤)을 크게 초과하여, 2100년 기준 산업화 이전 대비 약 3℃ 상승을 초래하여 생태계 및 인간계에 매우 높은 기후 영향 위험(Risk)을 초래할 것으로 예상하고 있다[1].

우수한 절연성능과 높은 안정성으로 고전압 전력기기의 절연매질로 널리 사용되어 온 SF_6가스는 교토의정서에서 설정한 지구온난화 원인 물질 규제대상 가스 6개 물질(CO_2 , CH_4 , N_2 O, HFCs, PFCs, SF_6) 중 가장 높은 지구온난화지수(GWP, Global Warming Potentials)를 가진 물질(CO_2 대비 23,900배)로서 온실가스 배출 저감을 위해 우선적으로 대체되어야 할 물질이다[2].

표 1-1. 온실가스 별 지구온난화지수(100년 기준)[2].

온실가스	GWP	온실가스	GWP
CO_2	1	HFC-227ea	2,900
CH_4	21	HFC-236fa	6,300
N_2O	310	HFC-4310mee	1,300
HFC-23	11,700	CF_4	6,500
HFC-32	650	C_2F_6	9,200
HFC-125	2,800	C_2F_{10}	7,000
HFC-134a	1,300	C_6F_{14}	7,400
HFC-143a	3,800	SF_6	23,900
HFC-152a	140		

국내 전력회사인 한국전력공사에서는 SF_6가스를 절연매질로 사용하는 주요 설비인 개폐기 및 차단기를 대체하기 위하여 친환경 개폐기로의 전환을 진행 중이며, 그 대체 방식으로는 진공 절연 방식의 진공인터럽터(Vacuum Interrupter)를 내장한 형태의 개폐기(차단기)를 채택하고 있다. 진공은 어떤 물질보다 절연 및 아크소호 능력이 월등히 뛰어나며, 환경을 저해할 요소를 지니고 있지 않아 배전급은 물론 초고압 송·변전급 설비에 이르기까지 향후 도입을 위한 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

현재, 한국전력공사에서 운영 중인 배전급 개폐기(차단기 포함)는 2021년 06월 기준으로 가공 약 14만대, 지중 약 8만 대 수준이며, 이 중 진공절연 및 아크소호 방식의 개폐기는 가공은 약 58%, 지중은 약 11%의 점유율 보이고 있다[3]. 특히, 가공개폐기의 경우 2016년 12월 이후로 SF_6가스절연 개폐기에 대한 신규구매가 중단되어 신규 설치되는 개폐기는 모두 진공절연 방식의 Eco-부하개폐기로 출고되고 있으며, 지중개폐기는 현재 개발 중인 Dry-가스를 활용한 진공절연 방식의 친환경개폐기의 개

발이 완료 예상되는 2022년 전·후로 SF_6가스절연 개폐기에 대한 신규구매 중지가 예정되어 있다. 이러한 진공절연 개폐기의 보급속도를 고려했을 때, 향후 10년 안에 모든 배전용 개폐기는 진공절연 방식의 개폐기가 운용될 것으로 예상된다.

표 1-2. 국내 배전 개폐기 운영현황(2021.06 기준).

구 분		SF_6절연	진공절연	소 계
가 공	운영수량	58,146대	80,737대	138,883대
	점유율	42%	58%	100%
지 중	운영수량	70,269대	8,915대	79,184대
	점유율	89%	11%	100%

이러한 진공 절연 및 아크소호 방식의 개폐기는 현재까지 SF_6가스 개폐기 대비 우수한 절연성능과 소형화 가능 등 많은 장점을 보이고 있으나, 아직까지 짧은 운용기간에 따른 고장데이터 부족 및 고장모드가 미정립된 상태이다. 특히, 최근 발생하고 있는 개폐기 내부 핵심 부품인 진공인터럽터 내부의 진공도 저하 문제는 개폐기의 동작책무 및 역할을 고려했을 때 매우 중요한 고장 유형으로 꼽히고 있다.

개폐기 내부 진공인터럽터의 진공도 저하 시, 주회로 양 전극 간 절연내력은 그 정도에 따라 일반적인 대기압에서의 공기절연보다 현격히 낮은 특성을 보일 수 있다. 이에 따라 개폐기 내부 전극 간 물리적인 개방상태가 유지되어도 전기적인 통전 상태가 가능하여 배전선로의 사·활선 구분의 혼선을 가져올 수 있으며, 이는 배전선로 작업자의 안전사고를 유발할 수 있는 심각한 문제로 인식된다. 또한, 투입 상태로 운전 중인 개폐기의 진공도가 저하된 상태에서 개방 동작 수행 시, 아크 소호 불능에 따른 개폐기 소손 및 선로 정전을 유발할 수 있다.

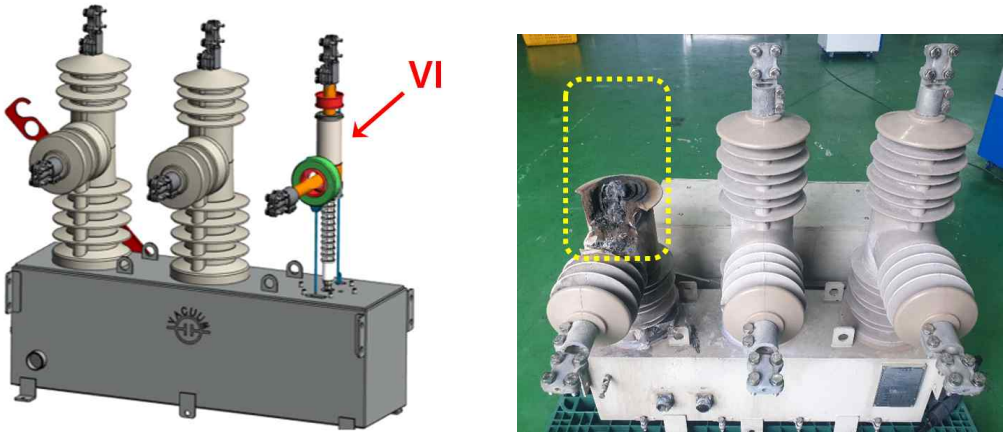
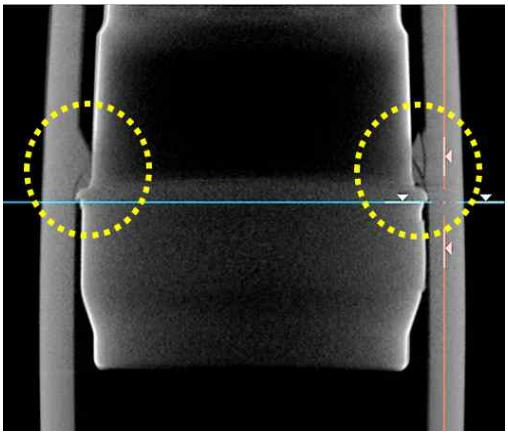


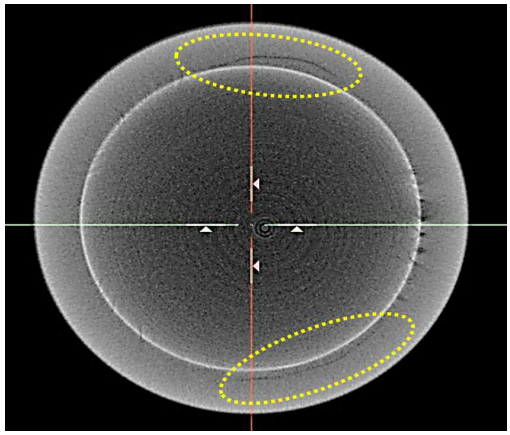
그림 1-1. 배전용 Eco-부하개폐기 내부구조 및 VI 소손사례.

그림 1-2. 진공인터럽터 내부 소손사례.

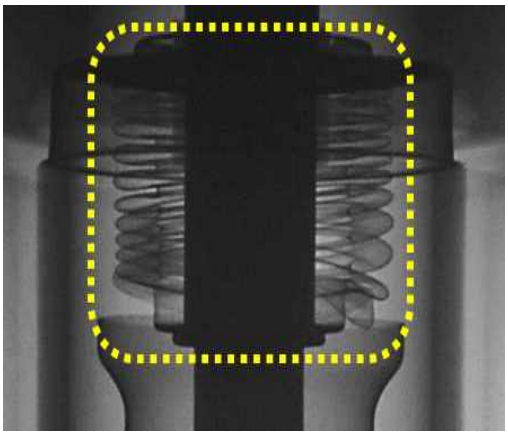
이러한 진공개폐기의 진공도 저하 문제는 현재 꾸준히 발생하고 있으나, 이를 해결하기 위한 근본적인 대책인 진공도 감시에 대한 방법은 최근 진공인터럽터 내부 부분방전 신호를 이용하여 진공도를 판별하고자 하는 연구가 진행 중에 있지만[19, 20], 아직까지 명확한 해결방안은 제시되고 있지 못하고 있는 실정이다.



(1) 세라믹 외벽 균열_수평 촬영



(2) 세라믹 외벽 균열_수직 촬영



(3) 벨로우즈 손상

(4) 금속플랜지 핀홀

그림 1-3. 진공인터럽터 진공도 저하 원인분석 사례.

이에 따라 본 연구에서는 진공인터럽터 내부 진공도 저하에 대한 감시 방법을 모색하고자 한다. 이를 위해 진공과 플라즈마 및 기체 방전에 대한 이론적 근거에 대해 고찰한 후, 실제 모의실험을 통해 진공 인터럽터 내부의 진공도와 아크쉴드에 형성되는 부유전위(Floating potential)에 대한 상관관계를 도출하고, 최종적으로 진공도 및 진공절연 상태판정을 위한 방안에 대하여 고찰해보고자 한다.

제 2 절 연구 모델 정의

1. 진공인터럽터(Vacuum Interrupter)의 구조 및 역할

진공인터럽터(Vacuum Interrupter : 이하 VI)의 내부구조는 크게 가동부와 고정부, 절연부로 구분할 수 있다. 가동부는 가동전극과 접점 및 가동전극의 움직임에 따라 진공 기밀을 유지하는 스테인리스강 소재의 벨로우즈(Bellows)로 구성되며, 고정부는 고정전극과 접점으로 이루어져 있다. 절연부는 가스 투과성이 낮고, 가스방출이 적으며, 기계적 강도가 우수한 알루미나 세라믹 재질의 절연 용기의 상·하부에 금속 플랜지를 접합하여 내부 고진공(약 1×10^{-5}[Torr] ~ 1×10^{-7}[Torr]) 상태를 유지한다. 또한, 절연 용기 내부 전극 인근에는 아크 쉴드(Floating shield)가 위치하여 개방 동작 시 접점에서 발생하는 금속 증기가 절연 용기 표면에 부착되어 절연내력을 저하시키는 것을 방지하고, 진공인터럽터 내부의 전계분포를 균일하게 유지하며, 아크 생성물을 냉각·응결시켜 아크 소멸 후 잔류플라즈마를 감소시키는 역할을 담당한다[4, 5].

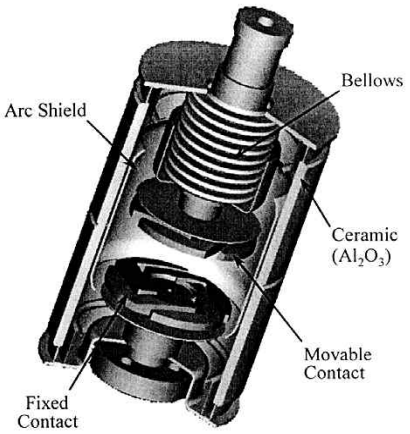
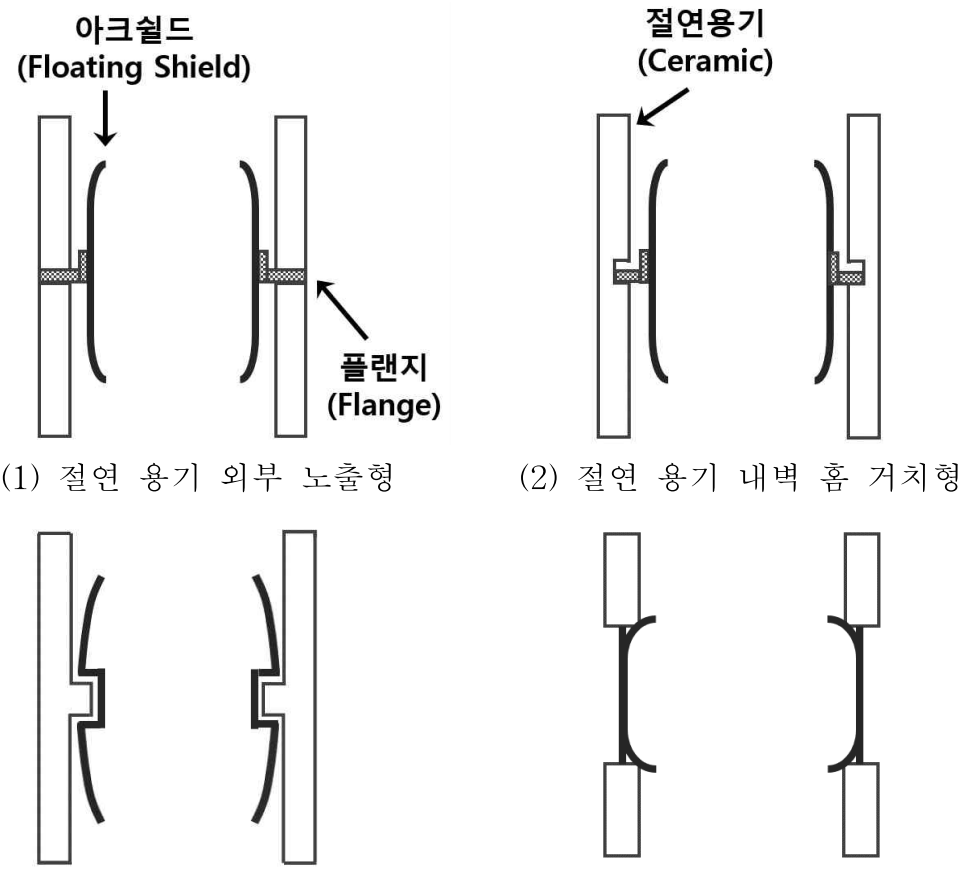


그림 1-4. 진공인터럽터의 구조[5].

2. 진공인터럽터(VI) 내부 진공도 측정

배전용 개폐기에 사용되는 진공인터럽터의 경우, 에폭시(Epoxy)몰드 형태의 부싱(Bushing) 내부에 위치하여 외부로 노출되지 않는 구조이기 때문에 개폐기 내부에 삽입된 진공인터럽터의 내부 진공도 측정 및 감시는 현재로서는 불가능한 상황이다.

이에, 본 연구는 개폐기 내부에 삽입된 상태의 진공인터럽터가 전극이 닫힌(Closed) 상태에서 내부 진공도를 측정할 수 있는 방안에 대해 고찰하고자 한다.



(1) 절연 용기 외부 노출형　　(2) 절연 용기 내벽 홈 거치형

(3) 절연용이 내벽 돌출부 거치형　　(4) “Belly-band” 접합형

그림 1-5. VI 절연 용기 내 아크쉴드(floating shield)의 거치 형태[6].

진공인터럽터 절연 용기 내부의 아크쉴드는 그림 (1-5)와 같이 여러 가지 형태로 절연 용기(세라믹) 내벽에 거치된다. 이 중 그림 (1-5)의 (1) 형태에서의 진공인터럽터 유형을 토대로 본 연구를 진행하며, 아크쉴드에 유기되는 부유전위(Floating potential)를 측정함으로써 진공인터럽터 내부의 진공도를 추정하고자 한다.

이론적으로 진공은 모든 기체분자가 존재하지 않는 공간의 상태이지만, 실제적인 진공은 대기압보다 낮은 압력인 상태로 정의하며, 압력의 단위인 진공도로 표현된다. 이러한 진공도는 압력의 단위이기 때문에 기체의 분자 수를 의미하며, 고전계 내 기체분자의 전리 및 이동, 확산 등의 메커니즘을 통해 진공인터럽터 내부의 아크쉴드에 부유전위(Floating potential)가 형성되는 것으로 추정된다. 아크쉴드는 진공인터럽터 내부에 고정되어 전극과의 거리가 일정하며, 공기의 비유전율은 1.00059[F/m]로서 진공상태와 거의 비슷하기 때문에 아크쉴드에 형성되는 전위는 고전계 내 플라즈마 상태의 기체분자(전자와 이온으로 전리)의 수량과 거동에 의해 형성되는 도전율에 지배된다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구는 일정 전계(인가전압) 내에서 기체분자의 수량으로 표현되는 진공도의 변화에 따라 아크쉴드에 형성되는전압이 어떠한 상관관계를 보이는지 알아보고자 한다.

즉, 그림 (1-6)의 회로에서 유전율은 기체분자의 종류 및 조성비의 종속 변인으로 볼 수 있고, 도전율은 기체분자의 압력(진공도)인 분자 수의 종속 변인으로 볼 수 있다. 또한, 공기로 이루어진 기체분자의 조성비는 달톤(Dalton)의 분압법칙[1]에 의해 일정하다고 볼 수 있으므로 진공도의 변화에도 유전율은 일정하다고 볼 수 있다.

---

1) 달톤(Dalton)의 분압법칙 : 혼합기체의 전체 압력은 혼합기체를 구성하는 개개의 기체 압력의 합과 같음

이러한 진공인터럽터 내부 진공도에 따른 도전율의 변화와 아크쉴드에 형성되는 부유전위의 물리적 현상을 이해하기 위하여 먼저, 방전공학의 기초가 되는 기체의 운동 법칙 및 전자와 이온의 거동을 설명하는 이동도와 확산계수, 플라즈마 상태의 물리현상 등 이론적 배경에 대해 정리한 후, 진공인터럽터 모의 진공도 가변 시험을 통해 아크쉴드에 형성되는 부유전위를 측정함으로써 최종적으로 아크쉴드 측정전압을 통한 진공인터럽터 내부 진공도를 추정할 수 있는 방안을 모색하고자 한다.

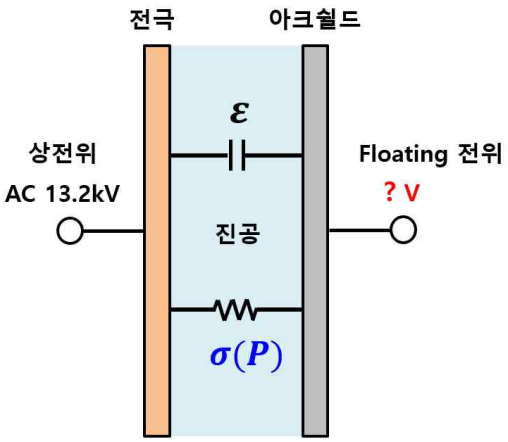


그림 1-6. VI 내부 전극과 아크쉴드 사이 진공 매질에 대한 모델링.

제 2 장 이론적 배경

제 1 절 기체의 운동 법칙

1. 평균자유행정

기체는 전기적으로 중성인 탄성구가 연속적으로 무질서한 운동을 하며, 온도가 상승함에 따라 그 운동속도가 증가하여 탄성구 간 충돌 가능성이 높아지는 분자들의 집합이다[7].

기체분자는 다른 분자와 충돌하지 않으면 직선운동을 하지만, 다른 분자와 충돌할 경우 탄성충돌(에너지 및 운동량 보존)이므로 충돌 후 다른 방향으로 꺾여서 진행하므로 분자의 운동궤적은 불규칙한 지그재그형이 된다. 이러한 기체분자 간 충돌이 압력·온도·밀도 등이 공간적 분포를 이루는 비평형 상태에서 이루어지면 기체의 흐름, 확산, 열전도 등 기체의 물리적 성질에 큰 영향을 끼친다.

자유행정거리(mean free path, λ)는 기체분자가 충돌 없이 비행한 평균 거리로서 식 (2.1) 로 표현된다.

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}n\pi d^2} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 P} \qquad (2.1)$$

(d: 분자의 지름, n : 분자밀도, k : Boltzman상수)

식 (2.1) 을 통해서 기체분자의 자유행정거리는 기체 압력에 반비례하고, 기체 온도에 비례함을 알 수 있다.

표 2-1. 진공 영역에 따른 분자 수와 평균자유행정[10].

진공영역	압력[Torr]	분자 수[cm^{-3}]	평균자유행정[㎝]
대기압	760	2.5×10^{19}	6.6×10^{-6}
저진공	1	3.3×10^{16}	5.0×10^{-3}
중진공	10^{-3}	3.3×10^{13}	5.0×10^{0}
고진공	10^{-6}	3.3×10^{10}	5.0×10^{3}
초고진공	10^{-10}	3.3×10^{6}	5.0×10^{7}
극초고진공	10^{-13}	3.3×10^{3}	5.0×10^{10}

2. 전자에 의한 충돌 전리

기체분자의 경우 외부로부터 에너지의 전달이 없는 평형상태의 경우 Maxwell 및 Boltzmann 분포에 의해 안정된 상태를 유지한다. 그러나 전계·온도·광자 등 외부 에너지가 가해질 때, 그 에너지의 크기가 기체의 전리 에너지보다 크면 기체분자는 전리(ionization)되어 전자가 방출된다.

이 중 전계에 의한 전리는 전계에 의해 가속된 전자가 전리 에너지보다 큰 운동에너지를 갖은 상태로 중성 기체분자와 충돌하여 해당 기체분자를 전리시키거나, 전리 에너지보다 낮은 운동에너지를 지녔지만 충돌 전 이미 여기상태에 있던 기체분자와 충돌하여 전리시키는 형태를 보인다.

$$A^{*}+e^{-}+K_{E} \rightarrow A^{+}+2e^{-} \tag{2.2}$$

$$A^{*}+A^{*} \rightarrow A^{+}+A+e^{-} \tag{2.3}$$

(A : 중성 기체분자, K_E : 전자의 운동에너지)

기체분자는 종류에 따라 전리에 필요한 전리에너지가 모두 다르며, 최대 전리확률을 갖는 전자에너지 대를 갖고 있다. 즉, 전자는 전리에 필요한 에너지 이상의 운동에너지를 갖더라도 일정한 전리확률(ionization probability)로 기체분자를 전리시키며, 전리확률 P_i는 0[℃], 1[torr]의 기체 내를 전자가 자유행정만큼 진행하는 동안 발생하는 이온 수로 정의된다. 전리 확률은 각 기체의 전리전압(V_i)과 전리확률 상수(α)를 통해 식(2.4)으로 표현된다.

$$P_i = \alpha(V - V_i) \tag{2.4}$$

표 2-2. 기체의 전리전압

가스	전리전압	가스	전리전압
He	24.58	H	13.54
Ne	21.55	O_2	12.20
Ar	15.75	O	13.57
Kr	13.96	N_2	15.58
Xe	12.12	N	14.51
Hg	10.42	K	4.33
H_2	15.44	Cs	3.87

표 2-3. 전리확률 상수 α

기체 종류	He	Ne	Ar	Hg	H_2	Cs	공기
$\alpha \times 10^2$	4.6	5.6	71	83	21	280	26

3. 이동도와 확산계수

공간상의 이온 또는 전자의 이동 현상은 크게 전계에 의한 가속과 밀도 분포에 의한 확산으로 설명된다. 전계에 의해 설명되는 전자의 이동에 따른 전류는 유동전류(drift current)로 불리며, 전자의 확산에 의한 전류는 확산전류(diffusion current)로 표현된다. 또한, 전체 전류는 유동전류와 확산전류의 합으로 나타낼 수 있다.

이는 진공인터럽터 내부의 낮은 압력상태의 전리된 기체분자의 거동에 대한 이론적 배경으로 설명될 수 있으며, 이를 통해 2장 1절 4항(기체의 방전특성)에 후술할 낮은 전류 영역인 암전류 영역에서의 전류의 형성을 이해할 수 있다.

3.1 이동도(mobility)

두 전극 사이에 존재하는 하전입자(이온 및 전자)는 전계에 의해 가속되며, 하전입자의 이동속도 v와 전계 E의 관계는 식 (2.5) 와 같다.

$$v = \mu E \tag{2.5}$$

식 (2.5) 에서 속도와 전계 사이의 비례상수 μ를 이동도(mobility)로 정의하며, 공간상의 이온밀도(n_i) 및 전자밀도(n_i)가 주어진 경우에 전류는 식 (2.6) 으로 표현할 수 있고, 이를 유동전류(drift current)로 정의한다.

$$J = e n_i v_i + e n_e v_e = e(n_i \mu_i + n_e \mu_e) E \tag{2.6}$$

식 (2.6) 은 옴의 법칙으로 알려져 있으며, 우변 항의 $e(n_i \mu_i + n_e \mu_e)$은 전도도(conductivity)를 나타낸다.

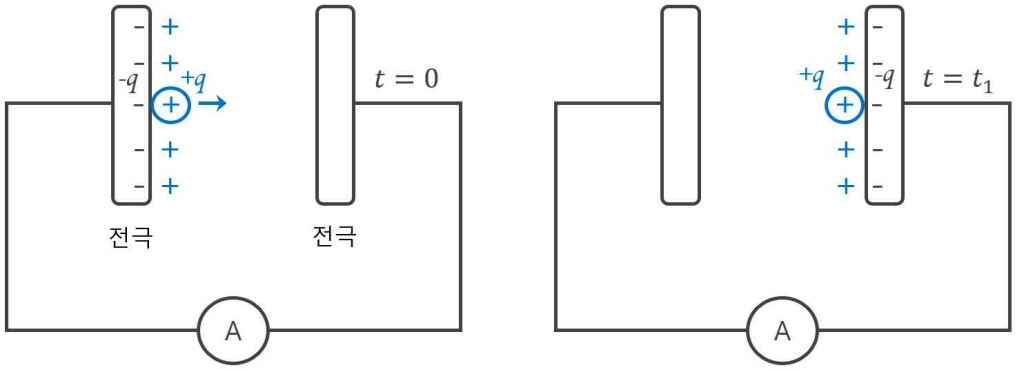


그림 2-1. 전극 사이 영상전하의 거동(유동전류)[7].

3.2 확산계수(diffusion coefficient)

확산 현상이란 기체분자의 밀도분포가 일정하지 않아 밀도가 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 기체분자가 이동하여 밀도분포가 균일해지는 현상이다.

입자 밀도의 변화량과 입자의 확산 유량(diffusion flux) 간의 관계는 식 (2.7) 의 픽의 확산법칙(Fick's law of diffusion) 제1 법칙으로 설명된다.

$$J = -D\nabla n = -D\frac{dn}{dx} \tag{2.7}$$

여기서, 확산계수(diffusion coefficient) D는 확산 유량(J)와 밀도(n) 기울기 간의 비례상수로서 식 (2.8) 로 정의된다.

$$D \equiv \frac{v_T^2}{3\nu} = \frac{1}{3}\lambda v_T \tag{2.8}$$

(v_T : 입자의 열운동속도, ν : 충돌진동수, λ : 평균자유행정)

식 (2.7) 의 픽의 확산 제 1 법칙은 밀도의 분포가 공간적으로 다른 경우를 설명하며, 제 1 법칙과 연속방정식으로부터 식 (2.9) 의 제 2 법칙이 유도되며, 이는 밀도가 시간적으로 변화하는 경우를 나타낸다.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D\nabla^2 n \tag{2.9}$$

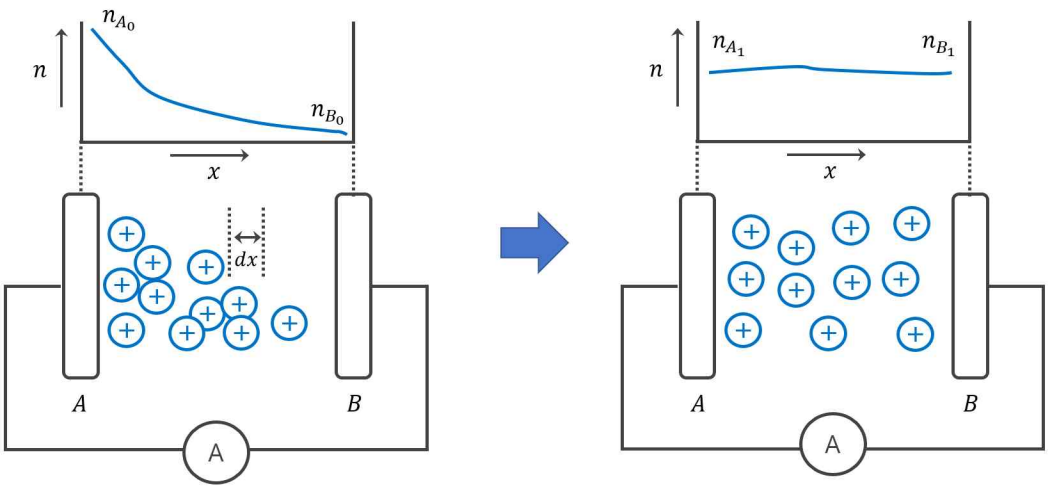


그림 2-2. 확산_농도의 균일화 과정(확산전류).

3.3 이동도와 확산계수의 관계

전계 내에서 전리된 기체분자(이온 및 전자)의 위치분포 및 속도에 따른 방전전류는 이동도와 확산계수를 통해 정해진다. 이때, 이동도와 확산계수 사이에는 식 (2.10)의 아인슈타인 관계식(Einstein's relation)이 성립한다.

$$\frac{D_{i,e}}{\mu_{i,e}} = \frac{kT_{i,e}}{e} \tag{2.10}$$

4. 기체의 방전특성

기체에서의 방전 현상은 기체가 갖고 있는 절연성능 이상의 전압(전계)이 인가될 때, 기체분자의 충돌전리현상으로 인해 방전전류가 형성되며, 인가전압의 크기와 기체의 압력상태, 방전거리 등의 특성에 따라 방전전류의 크기 및 형태가 정해진다. 이러한 방전 현상은 크게 비자속방전(non-self sustaining discharge)과 자속방전(self sustaining discharge)으로 분류되며, 비자속방전은 포화전류와 암류 단위의 방전전류를 포함하는 방전으로서 외부전계의 작용이 사라지면 방전도 함께 사라져 방전전류가 0이 되는 범위의 방전을 말한다. 자속 방전의 경우엔 암류 이상의 높은 전류 범위를 갖는 방전으로 글로우방전과 아아크방전 영역으로, 외부전계의 작용과 무관하게 충돌전리작용에 의해서 방전전류를 지속시키는 절연파괴 영역에 속한다.

그림 (2-3)은 평행 판 전극 사이에서의 일방적인 직류 방전특성으로 방전전류 영역 중 0~A 구간은 옴의 법칙이 적용되는 영역으로서, 전극사이 기체분자의 전리 작용에 의해 만들어지는 이온과 전자가 전계에 의해 가속되어 전극에 흡수되며, 이때 방전전류와 인가전압은 대략 비례하여 증가한다. 이때 일부 전자와 이온은 확산과 부착, 재결합 등으로 소실되지만 전극에 흡수되는 전자와 이온이 더 많은 상태이며, 인가전압이 더 높아지는 A~B 구간에서는 하전입자들이 전계에 의해 더 빨리 가속되어 소실되는 양이 더욱 적어지기 때문에 전극에 도달하는 하전입자 수는 다소 증가한다. 그러나, 단위시간 동안 전리 작용으로 만들어지는 이온과 전자의 양은 한정되기 때문에 생성되는 이온과 전자가 모두 전극에 흡인되어도 전류의 양은 증가하지 않으며, 이때의 전류를 포화전류로 분류한다. 이 구간의 포화전류는 극히 작은 전류 밀도(10^{-17}[A/㎠])를 갖는다.

B~C 구간은 전계에 의해 더욱 가속화된 전자가 전리속도를 얻어 중성 기체분자와 충돌하여 충돌전리를 일으키는 단계로서 C 지점 이전까지는 기체의 절연성은 유지되며, 암류(dark current)의 범위로서 비자속방전 영역에 속한다.

C 지점 이후의 전류 범위(C~H)는 자속방전 구간으로서 전리속도 이상으로 가속된 전자들이 급격히 증가하여 전자사태(electron avalanche)가 일어나며, 이때의 기체는 절연파괴 상태로서 도전체로서 작용한다[7].

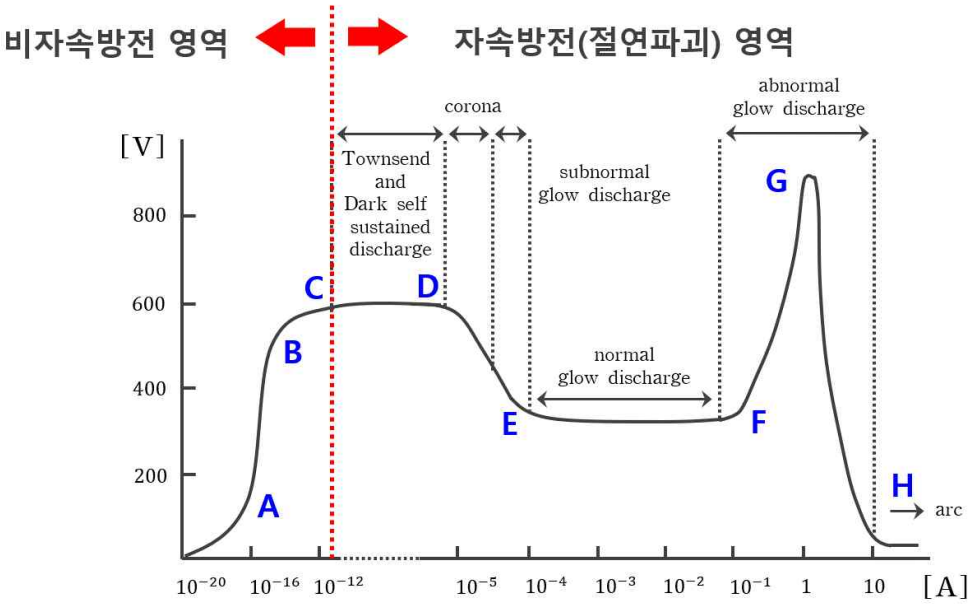


그림 2-3. DC 방전 특성[7, 12].

제 2 절 플라즈마(Plasma)

1. 플라즈마(Plasma) 정의

1928년 어빙 랭뮤어(Irving Langmuir, 1881~1957)는 기체분자가 전기적 또는 열적 외부 에너지에 의해 전자와 이온의 하전입자로 전리될 때, 전자와 양이온의 밀도가 일정하여 전기적으로 중성인 상태를 물질의 제4상태인 “플라즈마(Plasma)”로 명명했으며, 플라즈마는 현재 학계에서 “집단행동(collective behavior)을 하며 준 중성(quasi-neutral)인 전리 기체”로 정의된다[11].

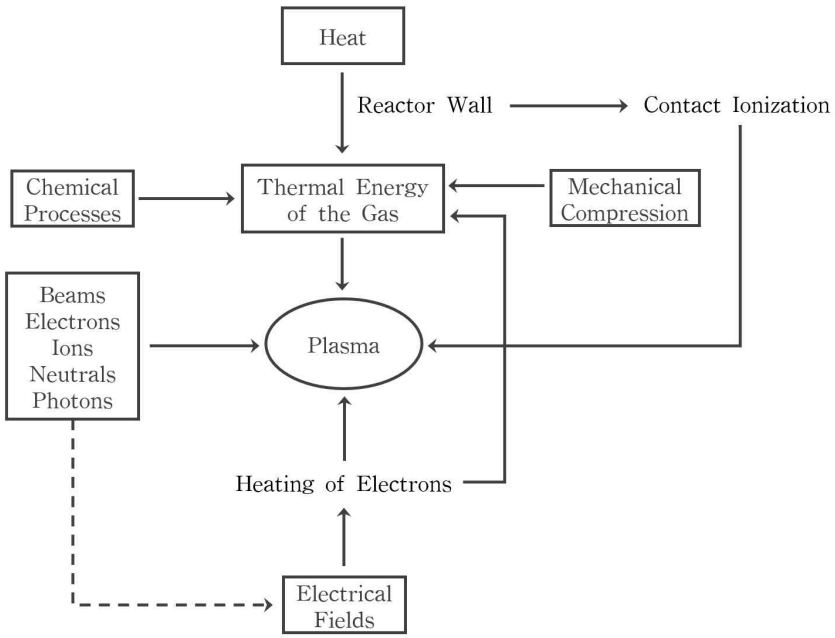


그림 2-4. 플라즈마의 발생 원리[12].

플라즈마는 크게 자연계 플라즈마, 열 플라즈마, 방전 플라즈마로 나뉘며, 이 중 전기 방전에 의해 전리된 기체를 갖는 방전 플라즈마는 인가

하는 전위의 시간적 변화에 따라 다시 직류 방전 플라즈마(DC plasma), 교류 방전 플라즈마(AC plasma), 고주파 방전 플라즈마(RF plasma), 펄스 방전 플라즈마로(Pulse plasma), 극초단파 방전 플라즈마(Microwave plasma) 등으로 분류할 수 있다[7, 8].

특히 교류 방전 플라즈마는 상용 주파수(50~60Hz)의 교류 전압을 인가했을 때 나타나는 플라즈마로서, 플라즈마 전류의 방향이 반주기 별로 변화하는 상태가 유지된다[7].

2. 디바이 길이(Debye length) 및 플라즈마 쉬스(Sheath)

2.1 디바이 길이(Debye length)

플라즈마의 가장 큰 특성은 전기적 중성이며, 이는 플라즈마 내 불평형 전하 분리에 의한 전위차(전기장) 발생 시 하전입자의 거동이 해당 전위차를 상쇄시키는 방향으로 되돌아가는 성질에 있다. 디바이(Debye)란 이러한 불평형 전하 분리에 의해 형성된 전위차를 전자에너지를 통해 평형을 이루려는 미소 범위를 말하며, 디바이 차폐란 이러한 플라즈마 내 발생한 전기장을 차폐하기 위한 하전입자의 움직임을 뜻한다. 디바이 길이(Debye length)란 하전입자 군을 전기적 중성으로 볼 수 있는 최소 공간적 거리로서, 플라즈마 내에 있는 하전입자 간 쿨롱력(쿨롱포텐셜)과 열운동에 의한 상대적 배타력이 같아질 때까지의 상대적 거리이다.

디바이 길이는 식 (2.11) 로 정의되며, 기체의 종류에는 무관하지만, 플라즈마 내 하전입자(전자)의 밀도와 온도에 따라 달라진다.

$$\lambda_D = (\frac{\epsilon_0 k T_e}{n_e e^2})^{1/2} \qquad (2.11)$$

디바이 길이는 플라즈마의 전기적 중성의 성질이 깨지는 영역의 길이를 의미하므로, 플라즈마 상태가 유지되기 위해선 플라즈마의 기하학적 크기가 디바이 길이 보다 매우 커야 한다[7, 8].

2.2 플라즈마 쉬스(Sheath)

플라즈마와 접촉하는 기벽의 표면은 이온과 전자가 재결합 등으로 소실돼, 이온과 전자는 기벽 표면으로 확산한다. 이때, 전자의 열속도가 이온보다 매우 크기 때문에 전자는 이온보다 먼저 표면에 도달하며, 이에 따라 표면 근처의 플라즈마는 양전하인 이온만 존재하여 전위가 형성된다. 한편, 표면에 모인 전자들 사이엔 전기적인 반발력이 생겨 새로운 전자를 감속시키고, 이온은 가속하면서 표면에서는 전자의 유입은 적어지고 양이온의 이온은 증가로 인해 평형상태에 이르게 된다. 그 결과 표면에 남아있는 전자의 양 만큼 표면은 음 전위(플라스마에 대한 음의 자기 바이어스)를 갖게 되며, 플라즈마는 접촉하고 있는 어떤 표면보다 항상 높은 전위를 갖는다. 플라즈마 쉬스(Sheath)는 이러한 플라즈마 공간 중 음전하가 거의 없는 양전하 영역이며, 그 두께는 디바이 길이와 플라즈마의 평균자유행로에 의해 달라진다.

플라즈마 쉬스에 걸리는 전압은 쉬스전압으로서 쉬스를 통과하는 전자들의 선속과 이온의 선속이 같아지도록 형성되며, 그 값은 평판과 구형 각각의 경우에 따라 식(2.12) 와 식(2.13)으로 표현된다. 여기서 쉬스전압은 부유(Floating) 전압과 동일한 의미를 갖는다.

$$V_s = \frac{kT_e}{2e}\ln\left(\frac{m_e}{2.3m_i}\right) \tag{2.12}$$

$$V_s = \frac{kT_e}{2e}\ln\left(\frac{\pi m_e}{2m_i}\right) \tag{2.13}$$

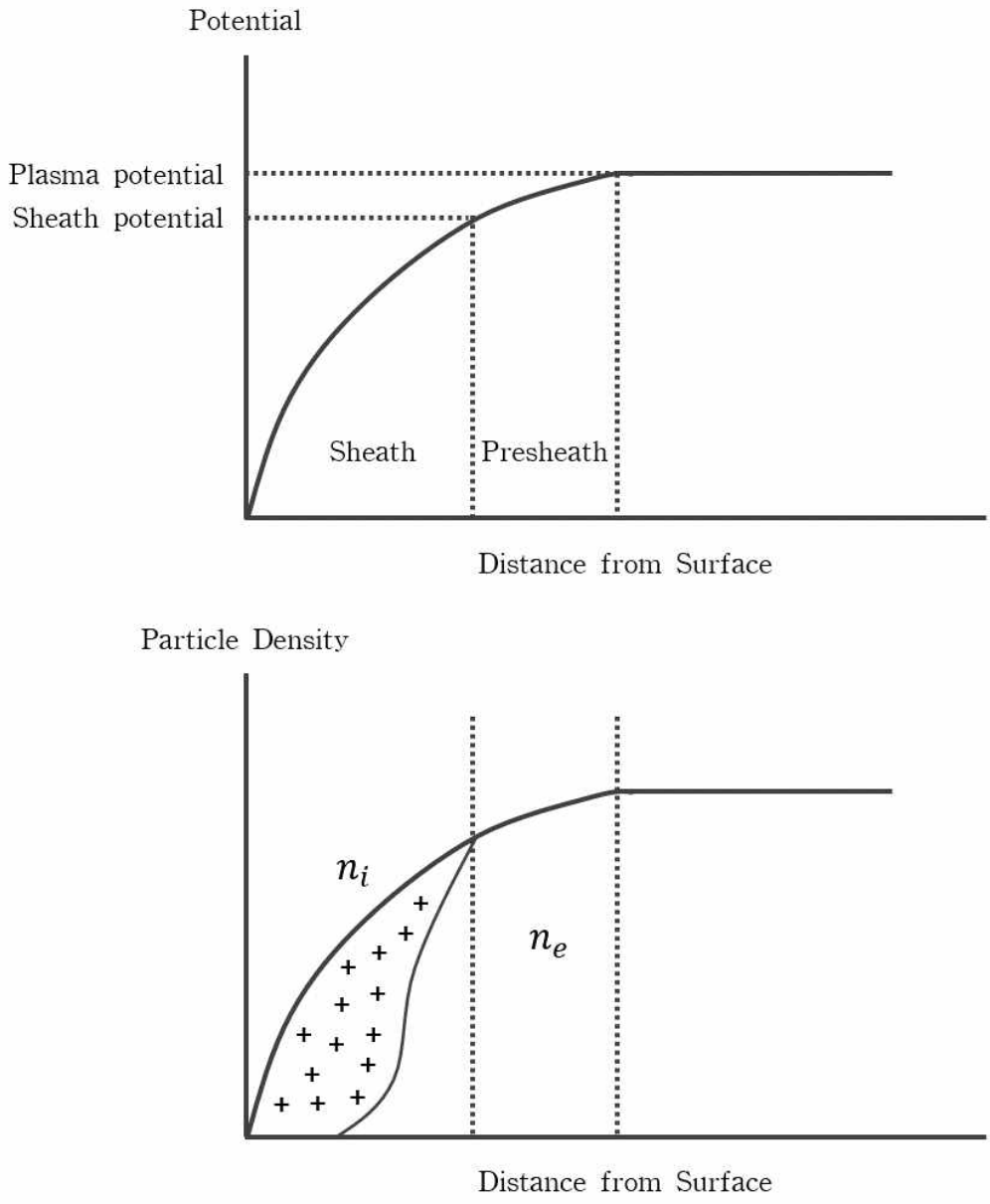


그림 2-5. 플라즈마 쉬스 개념도[8].

3. 플라즈마 내 양극성 확산(ambipolar diffusion)

플라즈마 내 이온과 전자는 밀도의 기울기를 갖고 높은 밀도에서 낮은 밀도로 확산하며, 확산 중 중성 기체와의 충돌 등으로 불균일한 분포를 갖는다. 이러한 하전입자들의 확산으로 플라즈마의 전도도가 결정된다.

하전입자의 확산속도는 식 (2.5) 의 이동도로 정해지며, 확산계수는 식 (2.10) 의 아인슈타인 관계식으로 이동도를 통해 계산된다. 전자의 확산계수는 이온보다 크므로 이온보다 빠르게 확산하며, 이에 따른 공간전하의 형성은 디바이 차폐에 해당하는 디바이 길이보다 짧은 거리에 분포하여, 공간전하 전기장을 형성한다. 이 전기장은 다시 전자의 확산을 감소시키고, 이온의 확산은 가속시키기 때문에 최종적으로 전자와 이온은 같은 정도의 확산 정도를 갖게 된다. 이렇게 반대극 전하가 함께 상호작용하며 이동하는 형태의 확산을 양극성 확산((ambipolar diffusion)이라 한다.

이러한 이온과 전자의 확산은 양극성 확산계수 D_a에 의해 결정되며 식 (2.14) 와 같이, 전자와 이온 온도에 따라 정해진다[8].

$$D_a = \frac{D_i\mu_e + D_e\mu_i}{\mu_e + \mu_i} = D_i(1+\frac{T_e}{T_i}),\ (\because\ \mu_e \gg \mu_i) \qquad (2.14)$$

제 3 장 종래의 진공측정 기술

제 1 절 진공 측정기술

1. 진공의 정의 및 분류

진공이란 이론적으로는 비어있는 공간을 나타내는 절대적 진공이지만, 현실적으로 절대진공은 불가능하며, 대기압보다 낮은 상태의 상대적인 압력을 진공이라고 일컫는다. 진공기술에 대한 국제적인 규격을 제시하고 있는 국제표준화기구(International Standard Organization)와 미국진공학회(AVS; American Vacuum Society)는 진공을 “대기압보다 낮은 상태의 압력을 의미하거나 분자 밀도가 2.5×10^{19}[분자/㎤]보다 적은 경우를 의미한다.”라고 정의한다. 진공의 압력상태를 나타내는 진공도는 규격으로 정해져 있지 않지만, 표 (3-1)과 같이 저진공~고진공의 영역으로 널리 통용되고 있다[10, 13]. 개폐기에 사용되는 국내 배전급 진공인터럽터의 진공도는 대략 6.7×10^{-3}[Pa] ~ 10^{-5}[Pa]의 고진공~초고진공 영역의 진공도를 갖는다.

표 3-1. 진공도의 일반적인 분류[13].

진공 영역	압력[Pa]
저진공(Low vacuum, LV)	대기압 ~10^{-1}
고진공(High vacuum, HV)	10^{-1} ~ 10^{-4}
초고진공(Ultra high vacuum, UHV)	10^{-4} ~ 10^{-7}
극고진공(extremely high vacuum, XHV)	10^{-7} 이하

2. 진공 측정원리에 따른 진공 게이지 분류

진공을 측정하기 위한 진공계(vacuum gauge)는 동작 원리와 기능에 따라 다양하게 분류되며, 기체분자들이 액체나 고체 면에 가해지는 힘을 통해 직접적인 압력을 측정하는 직접 측정법과 기체의 물리적 특성이 압력에 따라 변하는 것을 이용한 간접 측정법으로 나눌 수 있다. 일반적으로 저진공 영역에서는 직접 측정법이 이용되며, 100[Pa] 이하의 낮은 진공 영역에서는 주로 간접 측정법이 사용된다. 그림 (3-1)은 간접 측정법을 활용한 진공계의 분류를 나타내며, 이 중 전하의 생성을 이용하는 전리 진공계(ionization gauge)는 고진공 영역에서 가장 많이 사용되는 방식이다. 전리 진공계는 전자가 기체분자와 충돌할 때 발생하는 이온의 수가 압력(분자 밀도)과 비례한다는 기본 원리를 이용한다.

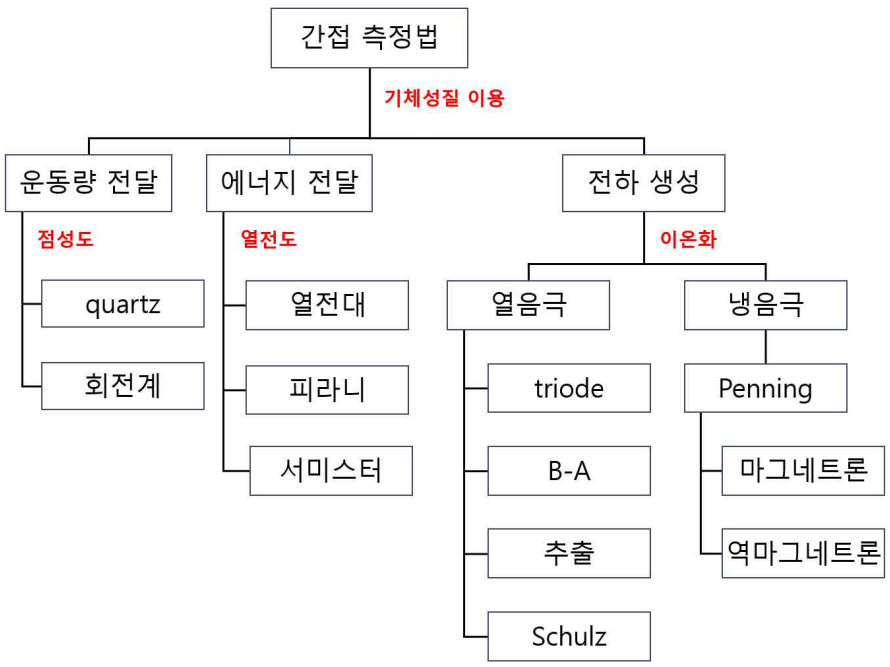


그림 3-1. 간접 측정 방식의 진공계 분류[10].

전리 진공계는 전리를 위한 전자 방출방법에 따라 고온의 필라멘트로부터 방출된 열전자를 이용한 열음극형(hot cathode)과 전계 방출을 통해 전자를 얻는 냉음극형(cold cathode)으로 분류된다. 이 중 현재 진공인터럽터 내부 진공도 측정을 위한 방식으로 3장 2절에 후술할 페닝방전(Penning discharge)을 이용한 역마그네트론 및 마그네트론 방식을 채택하여 활용되고 있다[9].

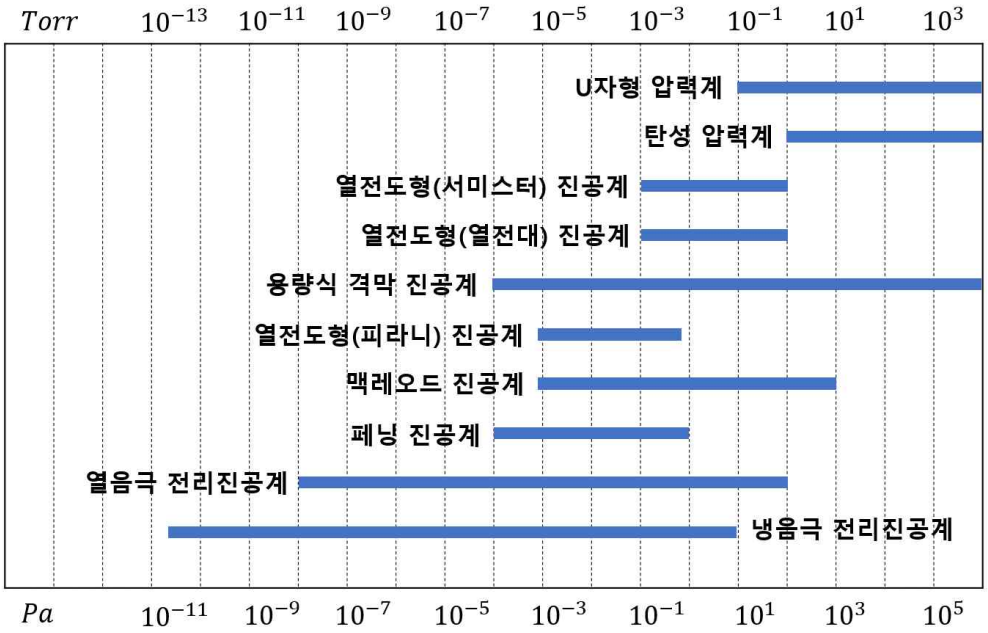


그림 3-2. 주요 진공계의 사용범위[9].

제 2 절 진공인터럽터 진공도 측정기술

Hans Schellekens는 그림 (3-3)과 같이, 파센(Paschen Curve)곡선의 형태를 취하는 진공인터럽터 내부 진공도(압력)와 절연파괴 전압(방전 개시 전압)의 그래프를 진공측정 방식에 따라 4가지 영역으로 분류하였다[14].

첫 번째 영역은 HiPoT(High Potential Test)로 알려진 방식으로 진공인터럽터 내부 극간에 고전압을 인가하는 내전압시험을 통해 진공상태를 판별하는 방식이다. HiPoT 방식은 세계적으로 50년 동안 사용되어왔으며 높은 신뢰도를 갖지만, 연속적인 진공상태의 측정이 불가한 점과 진공인터럽터를 회로로부터 분리해야 하는 단점이 있다.

두 번째 영역은 고진공 게이지(High Vacuum Pressure Gauge) 방식으로 페닝 방전(Penning Discharge) 및 마그네트론(Magnetron) 기술로 널리 알려져 있다. 이 방식은 고진공 영역을 높은 정확도로 측정이 가능하지만, HiPoT 방식과 마찬가지로 측정을 위해서 진공인터럽터를 회로와 분리해야 하는 단점으로 현장 운영 중 적용이 현실적으로 불가능하다.

세 번째 영역은 저진공 게이지(Low Vacuum Pressure Gauge)로 진공인터럽터 내부 부분방전(Partial discharge)을 이용하는 방법으로서 PD 패턴 분석 또는 PD로부터 발생하는 전자기파를 수집하는 기술로 분류된다. 진공인터럽터를 회로로부터 분리하지 않은 상태에서 측정할 수 있는 장점이 있으나, 현재 연구가 진행 중인 분야로 실제적인 적용을 위한 검증이 완료되지 않은 상태이다[6].

마지막 영역은 대기압 게이지(Barometric Gauge)로서 상용전원에서 절연파괴 범위를 벗어난 영역(10^4[Pa] ~ 10^5[Pa])을 측정할 수 있으며, 절연파괴 구간의 진공도는 측정할 수 없는 단점이 있다.

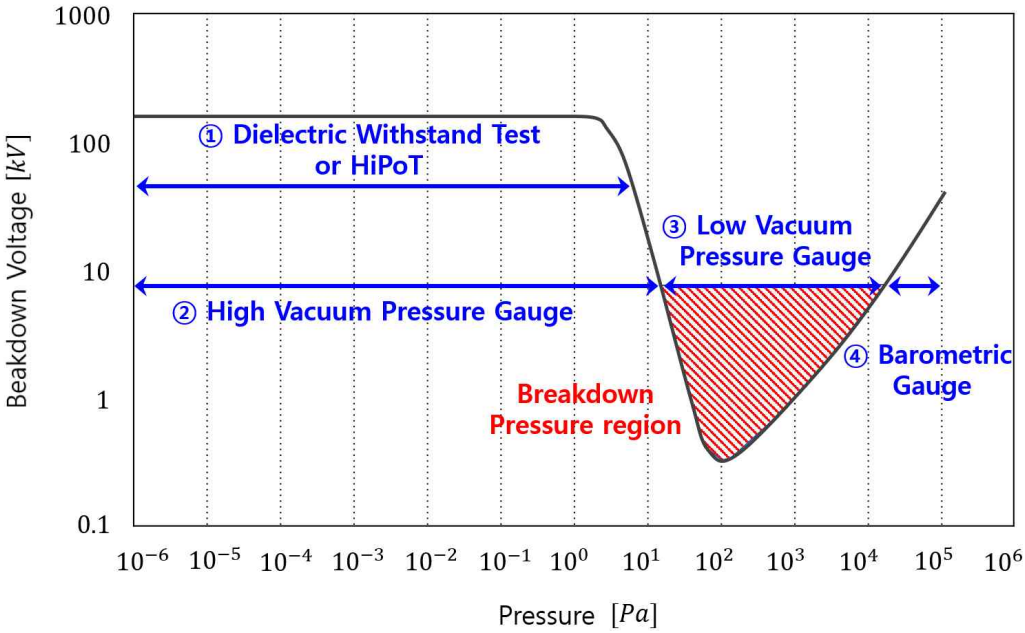


그림 3-3. 진공인터럽터 진공도에 대한 Paschen Curve[14].

표 3-2. 진공 측정기술의 특성 비교[14].

구 분	HiPoT	고진공 게이지	저진공 게이지	대기압 게이지
측정범위[Pa]	$2.10^{0} \sim 10^{5}$	$2.10^{-4} \sim 5.10^{-1}$	$10^{1} \sim 10^{4}$	$10^{4} \sim 10^{5}$
수명 예측	불가	가능	불가	불가
상시 감시	불가	가능	가능	가능
$T_{RESPONSE}$	점검 주기	2[sec]	3[hours]	무제한
T_{BLIND_SPOT}		-	40[min]	46[days]

진공인터럽터 진공도에 대한 파센곡선을 토대로 분류한 위의 네 가지 영역에 대한 진공도 측정기술은 표 (3-2)와 같이 그 특성이 분류되며, 항목 중 $T_{RESPONSE}$ 은 진공도 변화에 대해 측정장치가 반응하는 최소시간을 의미하며, 식 (3-1)로 표현된다. 또한 T_{BLIND_SPOT} 은 가장 미세한 누설률로 절연파괴되는데 걸리는 최대시간을 의미하며, 식 (3-2)로 표현된다.

$$T_{RESPONSE} = P_{\max}^{detector} \times Vol/(dQ/dt)_{Highest} \tag{3.1}$$

$$T_{BLIND_SPOT} = P_{\min}^{detector} \times Vol/(dQ/dt)_{Highest} \tag{3.2}$$

여기서, 누설률을 나타내는 dQ/dt는 Renz에 의해 표 (3-3)과 같이 네 개의 유형으로 분류된다[15].

표 3-3. 진공인터럽터 누설유형에 따른 누설률[15].

누설유형	누설률[Pa×ltr/sec]
■ **Failures during manufacturing**	1
■ **Flashover outside** and through the ceramic	10^{-1}
■ **Mechanical damage** (Bellows, flanges)	10^{-2}
■ **Corrosion**	5×10^{-3}

1. Penning discharge 진공 측정기술

페닝 방전(Penning discharge)을 이용한 진공 측정기술은 냉음극 전리 진공계의 방법으로 자기장을 통한 전자의 비행 궤도 증가를 이용한다.

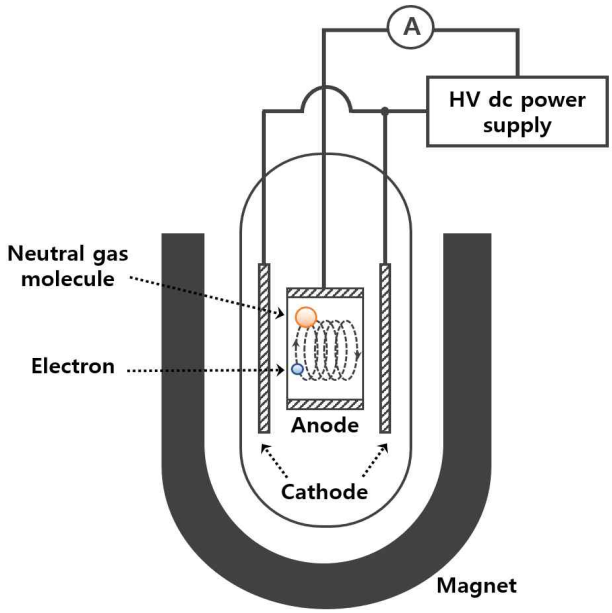
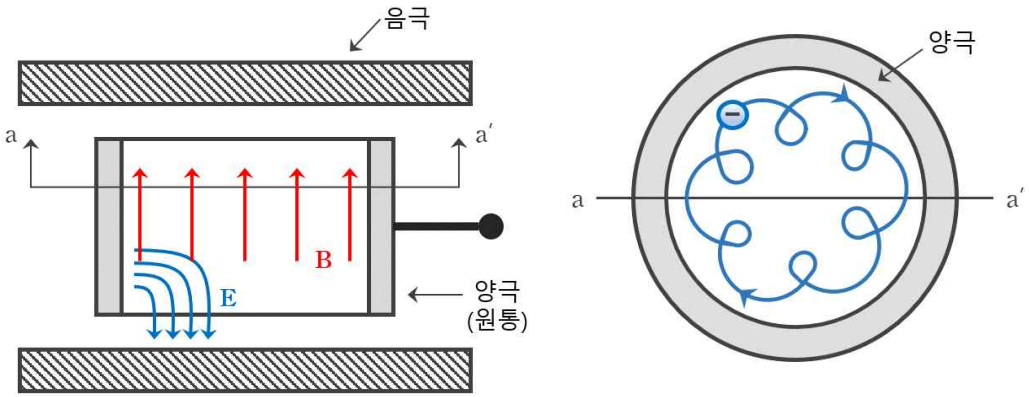


그림 3-4. 페닝 방전 진공계 구조[6].

그림 (3.4) 는 페닝 방전 진공계의 구조로서 유리 용기 내에 평행한 두 개의 음극판 사이 원통 형태의 양극이 존재하며, 유리 용기 외부에 영구 자석이 위치한다. 그림 (3.5) 와 같이 외부 전원에 의한 전기장으로 음극(cathode)에서 방출된 전자는 양극(anode)으로 이동하지만, 자기장의 영향으로 전자는 나선형의 비행궤도를 갖게 되어 비행거리가 증가하며 중성 기체분자와의 충돌 및 전리 작용이 증폭된다. 이렇게 증폭된 전리 작용으로 양극과 음극 사이에는 플라즈마가 형성되며, 높은 전류 밀도를 갖게 된다. 음극에 들어오는 이온과 음극에서 방출되는 전자에 의해 정해지는 방전전류는 압력이 낮은 영역에서 압력에 비례하며, 페닝 방전

진공계에서의 압력 P와 방전전류 I는 대략 10^{-8}[Pa] ~ 10^{-1}[Pa]까지의 범위 내에서 선형성을 유지한다. 여기서 측정 하한값(10^{-8}[Pa])은 압력이 낮아지면 이온 전류값이 낮아지는 특성으로 정해지며, 상한값(0.1[Pa])은 압력이 높아짐에 따라 펜닝 방전에서 글로 방전으로 전환되어 압력과 방전전류의 상관관계가 없어짐에 따라 정해진다[6, 9, 10].



(1) 전기장과 자기장의 구성　　(2) 전자의 비행궤적

그림 3-5. 펜닝 방전 진공계 내 측정원리[10].

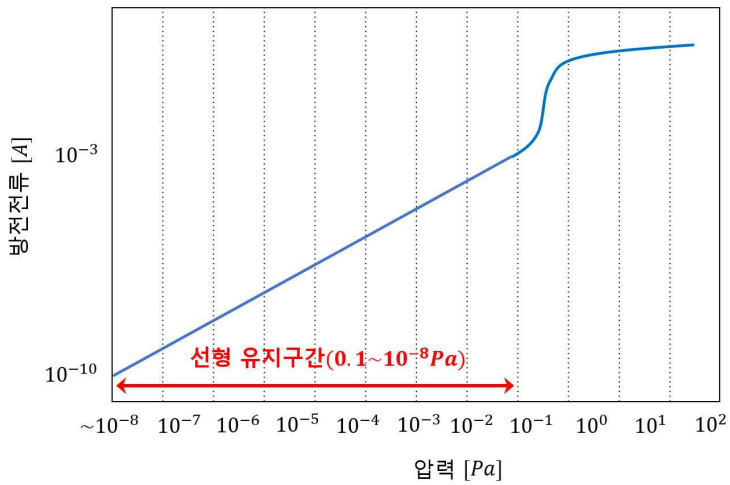


그림 3-6. 펜닝 방전 진공계의 압력과 방전전류 특성[14].

2. Magnetron 진공 측정기술

마그네트론(Magnetron) 진공 측정기술은 앞 절에 기술한 페닝 방전을 응용한 방법으로써 현재까지 알려진 진공인터럽터 진공 측정기술 중 매우 높은 신뢰성을 보이며, 진공인터럽터 제조사에서 널리 쓰이는 방식으로 채택되고 있다[6].

개폐기 및 차단기류에 사용되는 진공인터럽터의 경우, 개폐 동작 시의 기계적 충격을 버티기 위해서 진공측정 구성부품은 개폐기를 구성하고 있는 구성요소를 활용하는 방식이 제안되고 있다. 이러한 제안의 대표적인 방식인 마그네트론 방식은 진공인터럽터 내부의 전극과 아크쉴드를 이용하며, 페닝 방전 방식과 마찬가지로 외부 자기장을 형성하여 전자 비행궤적의 증폭 및 방전전류를 형성한다. Katsuhiro Kageyama는 전극과 아크쉴드 사이에 형성되는 전자 군집(trapped electron swarm) 및 방전전류의 이동 경로에 대해 규명하였으며, 다양한 아크쉴드와 전극 형태를 통해 방전전류의 대부분은 전극에서 아크쉴드로 흐른다는 것을 실험적으로 증명했다. 마크네트론 측정 방식에서 특징적인 부분은 그림(3-5)와 같이 전극과 아크쉴드 사이의 전자가 전계와 자계의 작용($\mathbf{E}\times\mathbf{B}/\mathbf{B}^2$)으로 편류(drift) 및 속박되어 전리가 증폭되는 구간이 존재하는 것이다. 아크쉴드(V_s) 전위는 $0 < V_s < V$ 이므로 상부 전극의 경우 전극이 양극(Anode)으로 작용하고 아크쉴드가 음극(Cathode)이 되어 많은 방전전류가 형성되고, 이를 IMD(Inverted Magnetron Discharge)라 명명하며, 전극이 상대적인 음극(Cathode)이 되는 하부 전극의 경우 아크쉴드가 양극(Anode)이 되어 IMD보다 비교적 방전전류가 작으며, 이를 MD(Magnetron Discharge)로 표현한다[16].

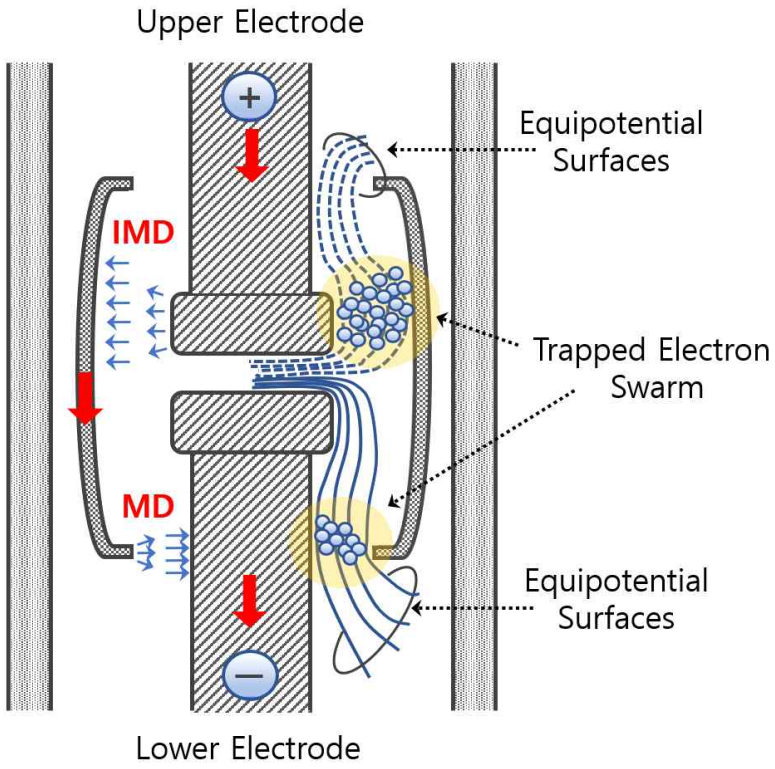


그림 3-7. 진공인터럽터 내부 방전전류 형성경로[16].

마그네트론 방전전류의 형태는 그림 (3-7)과 같으며, 진공인터럽터 내부의 압력(진공도)과 식 (3.3) 의 관계를 갖는다[17].

$$I_{(peak)} = k \times (U - U_e) \times P^a \qquad (3.3)$$

여기서, U 는 인가전압, U_e 는 방전 전압, $a \approx 1$

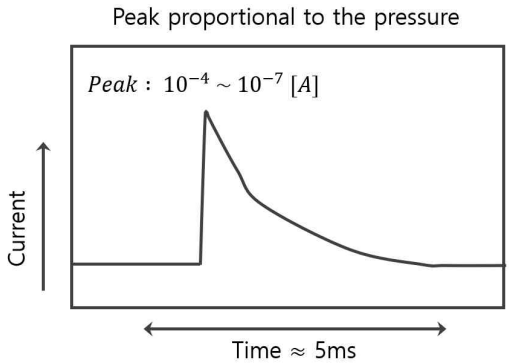


그림 3-8. 진공인터럽터 내부 Magnetron 방전전류 형태[6].

부유(floating) 아크쉴드를 갖는 지름 60㎜인 진공인터럽터의 경우, 일반적으로 방전전류(최고치)에서의 내부 압력의 크기는 표 (3-4)와 같다[18].

표 3-4. Magnetron 방전전류와 압력 관계[18].

방전전류[A]	압력[Pa]
3.1×10^{-5}	10^{-2}
7.7×10^{-6}	10^{-3}
3.8×10^{-6}	10^{-4}
1.8×10^{-7}	10^{-5}

마그네트론 방식은 높은 신뢰도로 진공도를 측정할 수 있지만, 의미 있는 수준의 방전전류를 얻기 위해선 자기장을 형성하기 위한 장치가 필요하며, 진공인터럽터 내부 전극 및 아크쉴드의 기하학적 구조에 따라 인가전압, 방전전류, 압력 간 특성이 모두 다르므로 진공인터럽터 제품의 종류에 따라 그 값 또한 달라진다. 또한, 선로에 운영 중인 가압 상태 개폐기의 경우 계통의 부하전류 때문에 진공인터럽터의 방전전류를 획득할 수 없으므로 진공도 측정에 한계가 있다.

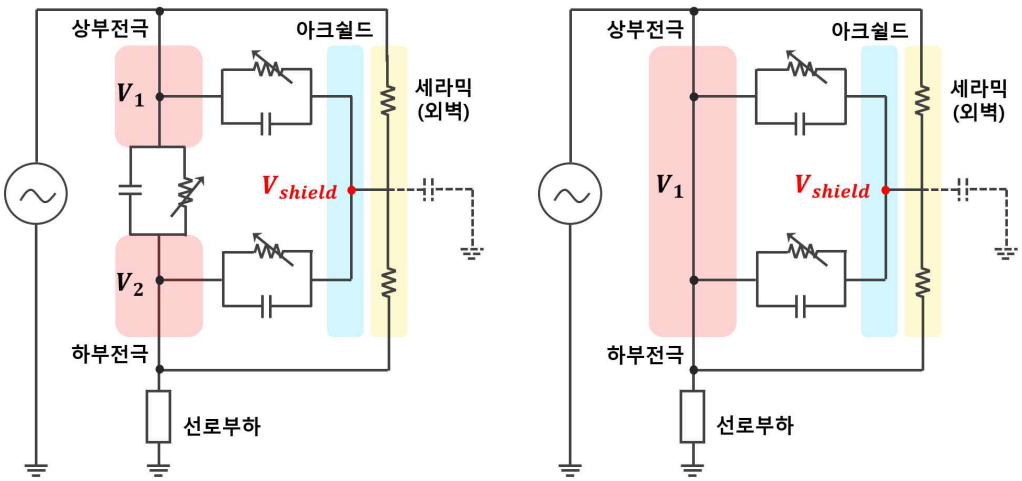
3. 부분 방전(Partial discharge)을 이용한 진공 측정기술

진공인터럽터 진공도 측정과 관련된 최근의 기술 동향은 활선 상태인 개폐기에서 측정 가능한 방법을 찾아내기 위해 연구되고 있으며, 진공인터럽터 내부의 부분 방전(Partial discharge) 특성을 이용하여 진공도 저하 상태를 알아내고자 하는 방법이 제안되고 있다.

PD를 활용한 진공측정 방안은 1985년 S.Tanigaki와 M.Sakaki가 등록한 미국 특허에서 제안되었다. 해당 특허에서는 진공인터럽터 내부구조에 대한 등가회로를 그림 (3-9)와 같이 제시했으며, 진공인터럽터 내부 진공도에 따른 전극과 아크쉴드 사이의 방전특성을 가변저항으로 표현했다. 진공도가 저하됨에 따라 가변저항의 값은 낮아지며, 그림 (3-10)과 같이 전극과 아크쉴드 간 전위차 및 부분 방전으로 방출되는 전자기파를 진공인터럽터 외부에 위치하는 안테나를 통해 검출하는 방식이다. 즉, 진공 절연특성이 저하됨에 따라 발생하는 전자기파에 포함된 고주파 성분을 특정하여 진공인터럽터의 진공 절연상태를 판단하는 원리이다[19].

부분 방전은 다양한 형태의 에너지로 변환되어 방출되는 현상이기 때문에 진공인터럽터 내부 전극과 아크쉴드 간에 발생하는 PD는 전자기파 이외에도 전기적 방전 임펄스 전류와 빛을 통해서도 측정이 가능하다. M.Kamarol과 S.Ohtsuka는 CT를 이용한 임펄스 전류 계측, ICCD (Intensified charge coupled device) 카메라 및 PMT(Photomultiplier tube)를 통한 방전 시 광도 측정 등을 이용하여 진공도에 따른 PD 특성에 관해 실험하였다. 해당 연구는 PD의 방전 개시전압(partial discharge inception voltage, PDIV)과 방전 시 발생하는 광 펄스의 특성 등을 확인하였으며, 이를 토대로 방전이 개시되는 진공도 영역을 찾는 데 주목하였다[20, 21].

이러한 PD 특성을 통해 진공인터럽터 내부 진공 절연상태를 판단하는 방법은 내부 전극의 개폐 여부에 상관없이 활선 상태에서 확인 가능한 점에서 좋은 방안으로 제시되고 있지만, 외부 노이즈에 취약한 부분 방전의 특성상 진공도 변화 추이에 대한 신뢰성을 확보하기 어려울 것으로 예상한다.



(1) 전극 개방상태 (2) 전극 투입상태

그림 3-9. 진공인터럽터 내부 등가회로[19].

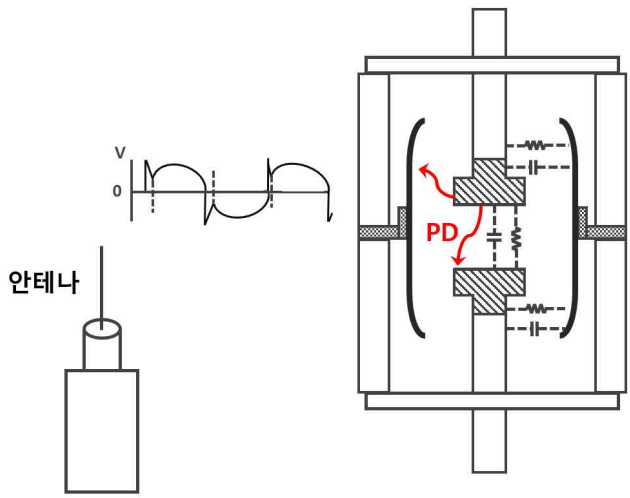


그림 3-10. PD 전자기파 검출을 통한 진공도 측정방안[19].

제 4 장 진공인터럽터 진공도 실험

제 1 절 실험 개요

1. 시료 제작

시료 ①

시료 ②

시료 ③

그림 4-1. 진공인터럽터 시료.

실험에 사용된 진공인터럽터는 그림 (1-5)의 (1) 절연 용기 외부 노출형 구조로서 국내 배전급 개폐기에 사용되는 제품을 선정하였으며, 그림(4-1)과 같이 시료 ①은 내부 진공이 정상인 진공인터럽터로서 아크쉴드 전압을 직접 측정할 수 있도록 세라믹 외부로 노출된 아크쉴드에 전압 신호용 케이블을 직접 용접하여 접속하였다. 시료 ②는 진공인터럽터 내부 진공을 가변하기 위하여 상부 금속플랜지에 구멍을 낸 후, 스테인리

스 튜브(ASTM A269)를 레이저 용접하여 진공펌프와 연결하였으며, 시료 ①과 같은 방식으로 아크쉴드에 직접 케이블을 접속하였다. 시료 ③의 경우 내부 진공도는 가변할 수 있도록 스테인리스 튜브를 연결하고, 세라믹 외부 노출된 아크쉴드를 절연 테이핑한 후 동 테이프 및 전압 신호 케이블을 부착하여 아크쉴드와 전압 신호용 케이블 사이의 절연을 확보하였다.

2. 실험 회로 구성

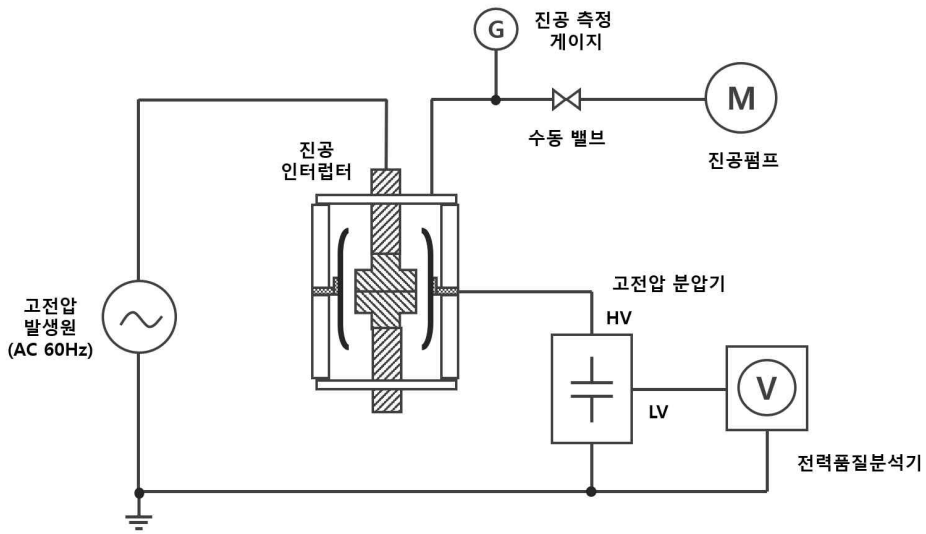


그림 4-2. 진공인터럽터 아크쉴드 전압 측정 회로 구성.

투입상태의 진공인터럽터 내부 진공도에 따른 아크쉴드의 부유 전위 값을 측정하기 위해서 그림 (4-2)와 같이 회로를 구성하였다. 실험 회로는 외부 노이즈를 차단하기 위해서 쉴드룸 내부에서 진행하였으며, 쉴드룸의 차폐규격은 IEEE 299에 따라 표 (4-1)의 기준을 만족한다.

실험에 사용된 진공펌프는 로터리펌프(Rotary Pump)로서 배기속도 600[L/min], 최대 진공압력 5×10^{-4} [Torr]의 정격을 갖는다.

진공측정 게이지(Model : CVM 211 Stinger, InstruTech社)의 진공측정 범위는 1×10^{-4}[Torr] ~ 1×10^{3}[Torr]이며, 그림 (4-3)과 같이 측정 전 Calibration 장비를 통해 1×10^{-5}[Torr]의 진공도로 Calibration을 수행하였다.

진공도의 조절은 진공펌프와 진공인터럽터 사이 배기관에 수동밸브의 조작을 통해 수행하였으며, 진공펌프 OFF 또는 수동밸브의 완전 닫힘 시 진공이 빠른 속도로 누기 되는 진공 시스템의 한계로 인해 진공펌프는 상시 동작 생태에서 수동밸브의 조절을 통해 진공도의 변화를 조절하였다.

아크쉴드 전압은 고전압 분압측정기(Model : KVM100, Phenix 社)와 전력품질분석기(Model : DEWE-57x, Dewetron 社, C=≤200[pF], R=380[MΩ])를 통해 측정하였으며, 고전압 분압비(측정 Scale)는 10,000 : 1 및 Sampling rate 10,000[s/sec]으로 AC RMS 전압값을 측정하였다.

(1) 진공측정 게이지(CVM 211) (2) 진공측정 게이지 Calibration

그림 4-3. 진공측정 게이지 및 Calibration.

표 4-1. 쉴드룸 차폐 성능 기준.

항 목	주파수	규 격(최소값)
Magnetic Field	14[㎑]	60 [dB]
	200[㎑]	60 [dB]
Electric Field	200[㎑]~30[㎒]	100 [dB]
Plane Wave	30[㎒]~100[㎒]	100 [dB]

그림 4-4. 실험 회로 전경

제 2 절 실험결과 및 분석

1. 진공도 정상상태 시 아크쉴드 전압 특성

진공인터럽터 내부 진공도 정상상태(10^{-5}[Torr]) 일 때, 인가전압(V_s)과 아크쉴드 전압(V_f) 간의 상관관계를 알아보기 위하여 그림 (4-1)의 시료 ① 및 그림 (4-5)와 같이 구성한 측정 회로에서 인가전압을 AC 실효치 기준 1[kV]에서 15[kV]까지 0.5[kV] 단위씩 상승하여 인가 시, 아크쉴드에 유도되는 전압의 크기 및 파형을 10초간 측정하였으며, AC RMS 평균치를 표 (4-2)에 기록하였다.

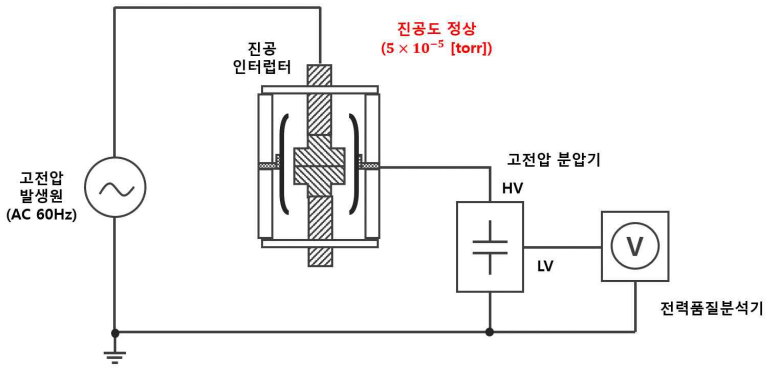


그림 4-5. 진공도 정상상태 시 아크쉴드 전압 측정 회로.

측정 결과, 그림 (4-6) 및 표 (4-2)와 같이 인가전압에 비례하여 아크쉴드 전압이 형성되는 것을 알 수 있으며, 아크쉴드 전압의 크기는 인가전압의 약 9.62% 값(평균)을 보인다. 또한, 두 변인 간의 상관관계를 알아보기 위하여 각 구간의 평균값을 활용한 선형 회귀분석 결과, 그림 (4-7)의 데이터 분포와 상관계수 $r^2 = 0.9995$를 가지며 통계학적으로 '강한' 양의 상관관계가 있다고 볼 수 있다.

전극에 인가되는 전압(전계)에 따른 아크쉴드 전압의 선형적 비례관계

는 식 (2.5) 의 전자 이동도 및 식 (2.14)의 양극성 확산계수의 변화로서 설명될 수 있으며, 정상적인 고진공 절연상태에서는 인가되는 일정한 전압에 비례하여 일정한 아크쉴드 전압이 형성됨을 알 수 있다.

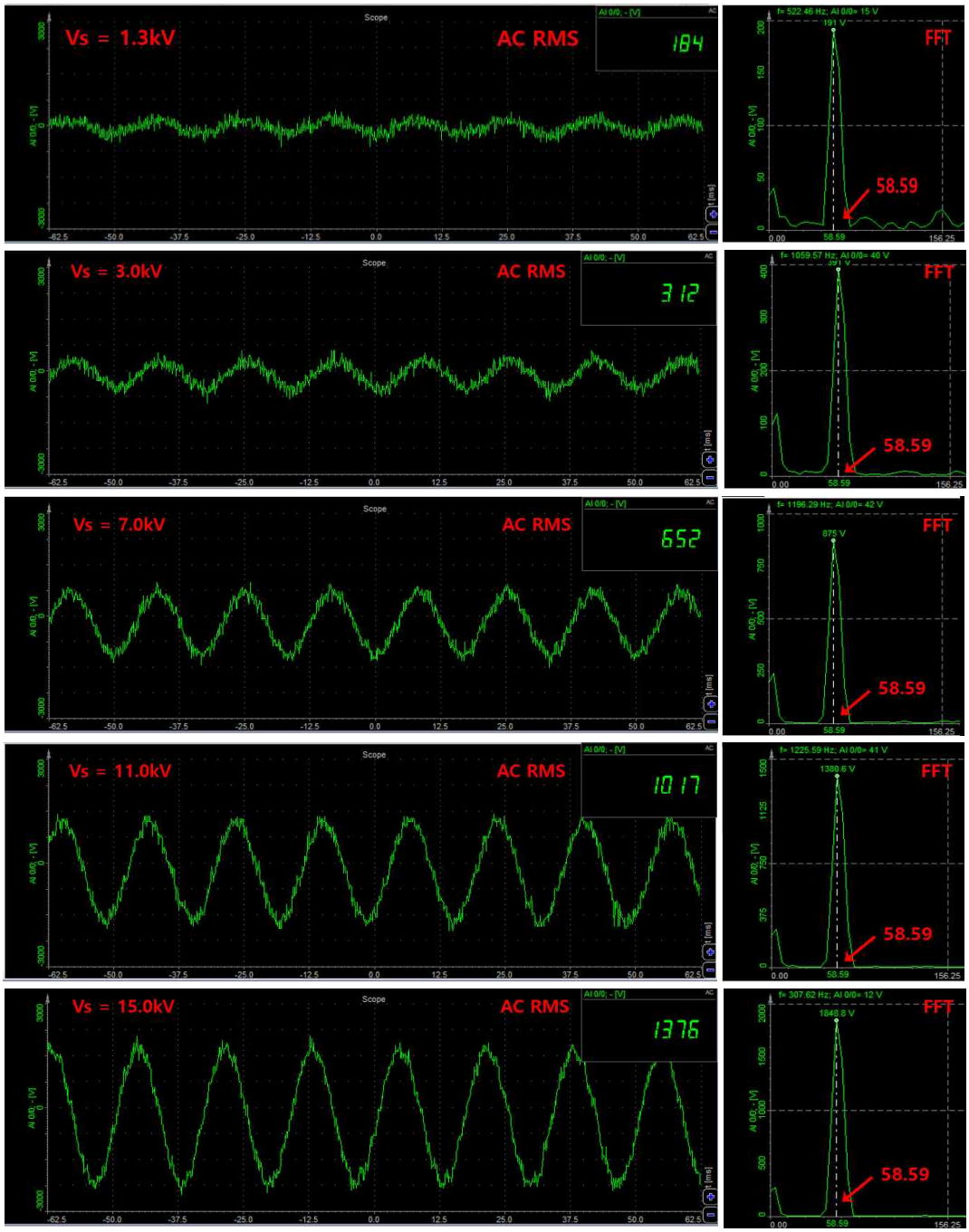


그림 4-6. 인가전압에 따른 아크쉴드 전압 측정 파형(정상 진공).

표 4-2. 인가전압에 따른 아크쉴드 전압 측정 데이터(정상 진공).

인가전압 (V_s)	아크쉴드 전압 평균값(V_f) [V]	인가전압 (V_s)	아크쉴드 전압 평균값(V_f) [V]
1.3[kV]	184	9.0[kV]	834
2.5[kV]	273	9.5[kV]	879
3.0[kV]	312	10.0[kV]	922
3.5[kV]	352	10.5[kV]	973
4.0[kV]	394	11.0[kV]	1,017
4.5[kV]	440	11.5[kV]	1,051
5.0[kV]	483	12.0[kV]	1,109
5.5[kV]	521	12.5[kV]	1,145
6.0[kV]	565	13.0[kV]	1,184
6.5[kV]	607	13.5[kV]	1,239
7.0[kV]	652	14.0[kV]	1,273
7.5[kV]	694	14.5[kV]	1,320
8.0[kV]	742	15.0[kV]	1,376
8.5[kV]	788		

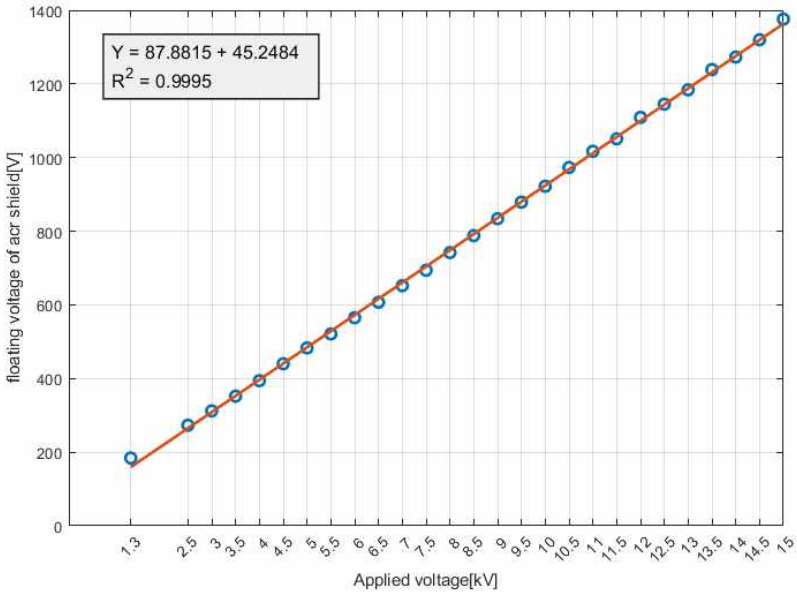


그림 4-7. 인가전압에 따른 아크쉴드 전압 선형 회귀분석.

2. 진공도 대기압 상태 시 아크쉴드 부유전압 특성

그림 (4-1)의 시료 ②를 이용하여 진공인터럽터 내부 진공이 완전 누기되어 대기압 상태(760 [Torr])를 모의하기 위하여 그림 (4-8)과 같이 구성한 후 인가전압(V_s)에 따른 아크쉴드 전압(V_f)을 측정하였다.

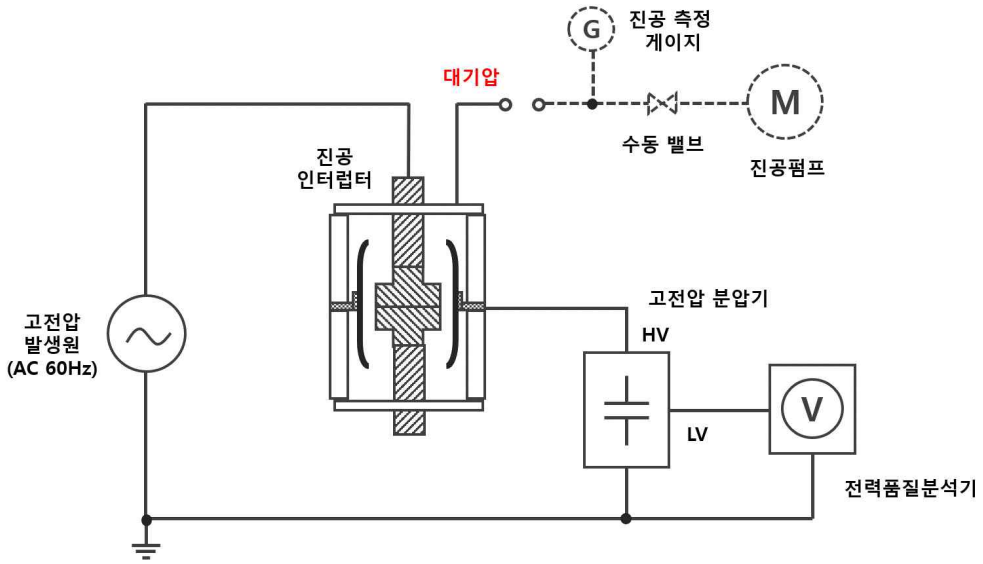


그림 4-8. 인가전압에 따른 아크쉴드 전압 측정 회로(대기압).

측정 결과, 표 (4-3)의 측정값 및 그림 (4-10)의 전압 파형과 같이 인가전압 9.5[kV]까지는 인가전압에 따라 아크쉴드 전압이 선형적인 증가형태를 보이지만, 그림 (4-10)과 같이 인가전압 약 9.2[kV] 이상에서 절연파괴되어 서지성 과전압 및 인가전압 이상의 기본파 전압(약 2~3배)이 유도됨을 확인하였다. 또한, 그림 (4-9)와 같이 진공인터럽터 내부 진공이 대기압 상태일 경우 정상상태보다 아크쉴드 전압이 낮게 형성됨을 알 수 있었다.

표 4-3. 인가전압에 따른 아크쉴드 전압 측정 데이터(대기압).

인가전압 (V_s)	아크쉴드 전압 평균값(V_f) [V]	인가전압 (V_s)	아크쉴드 전압 평균값(V_f) [V]
1.8[kV]	187	6.5[kV]	498
2.5[kV]	232	7.0[kV]	525
3.0[kV]	259	7.5[kV]	566
3.5[kV]	293	8.0[kV]	594
4.0[kV]	330	8.5[kV]	630
4.5[kV]	359	9.0[kV]	667
5.0[kV]	393	약 9.2[kV]	절연파괴 (서지 과전압 발생)
5.5[kV]	424		
6.0[kV]	459		

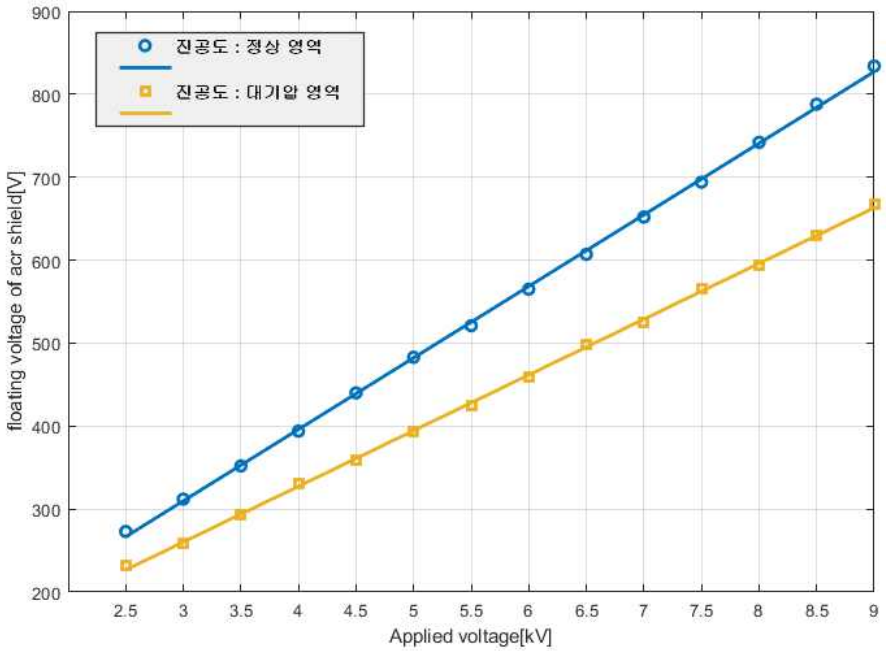


그림 4-9. 진공도 정상과 대기압 상태의 아크쉴드 전압 비교.

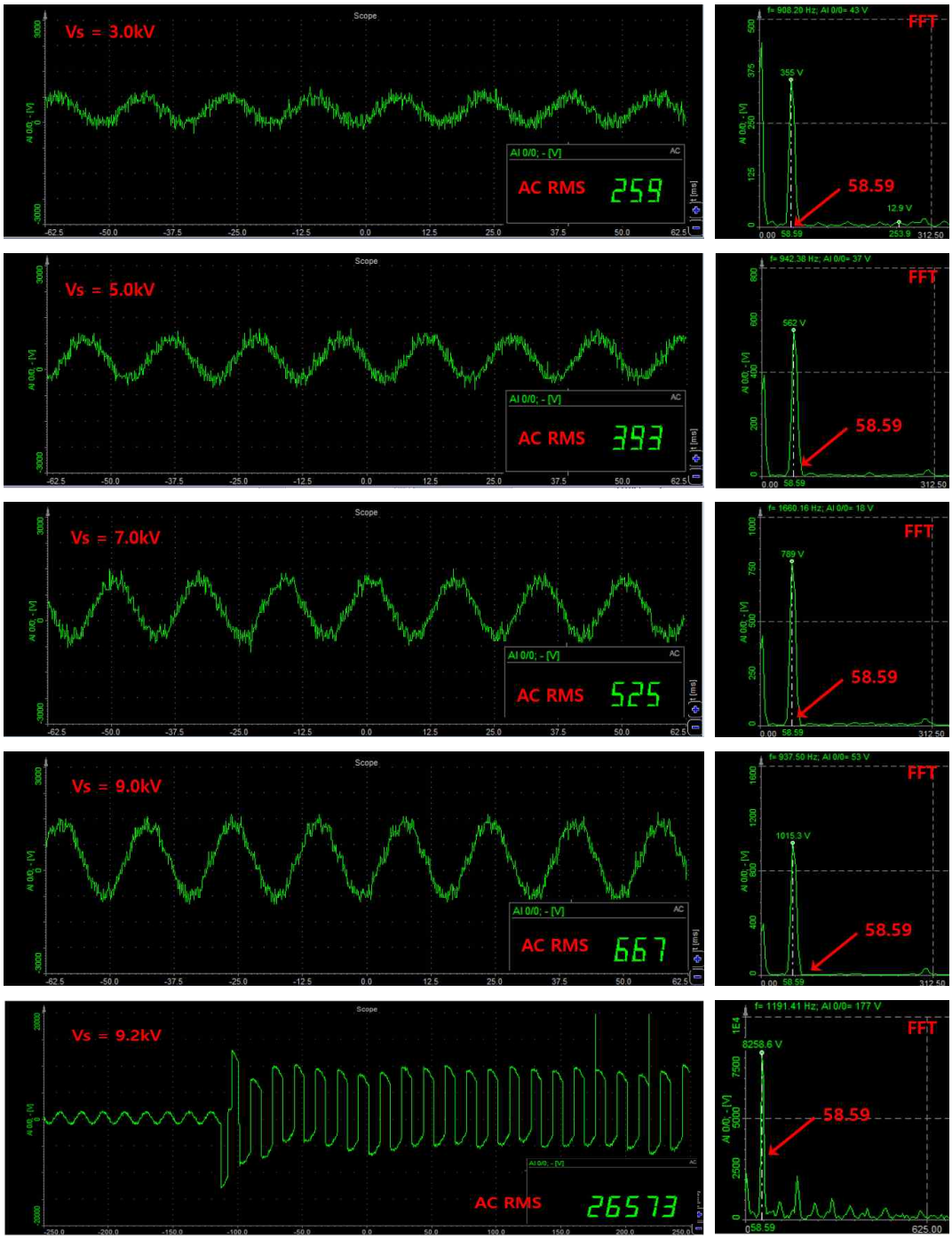


그림 4-10. 인가전압에 따른 아크쉴드 전압 측정 파형(대기압).

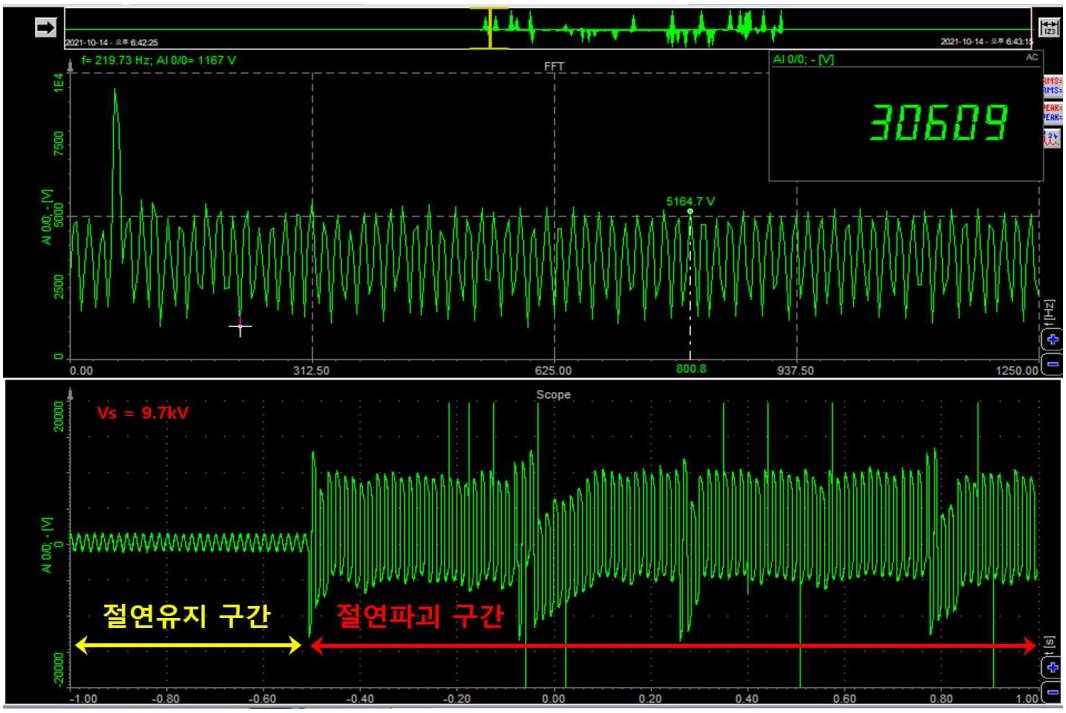


그림 4-11. 진공인터럽터 내부 절연파괴 시작구간 확대(대기압)

일반적인 배전선로 공칭 상전압 AC RMS 13.2[kV]까지의 측정을 위하여 그림 (4-1)의 시료 ③과 같이 외부 노출된 아크쉴드를 절연테이프를 통해 절연 확보(테이핑 두께 : 약 2[㎜]) 후 재측정하였으며, 표 (4-4)와 그림 (4-12)와 같이 AC RMS 15[kV] 인가 시까지 안정적인 아크쉴드 전압을 측정할 수 있었다.

아크쉴드의 절연처리 후 측정한 전압의 크기는 그림 (4-13)과 같이, 아크쉴드와 직접 접속하여 측정했을 때보다 일정 부분 상승한 값을 보였으며, 절연테이프의 유전율과 두께, 절연테이프에 부착한 동 테이프 등이 영향을 미쳤을 것으로 생각된다. 이는 향후 아크쉴드 전압을 계측하기 위한 센서 제작 시 센서(도체) 형태 및 센서와 아크쉴드 사이 절연물의 설계가 중요하게 검토되어야 할 부분임을 알려준다.

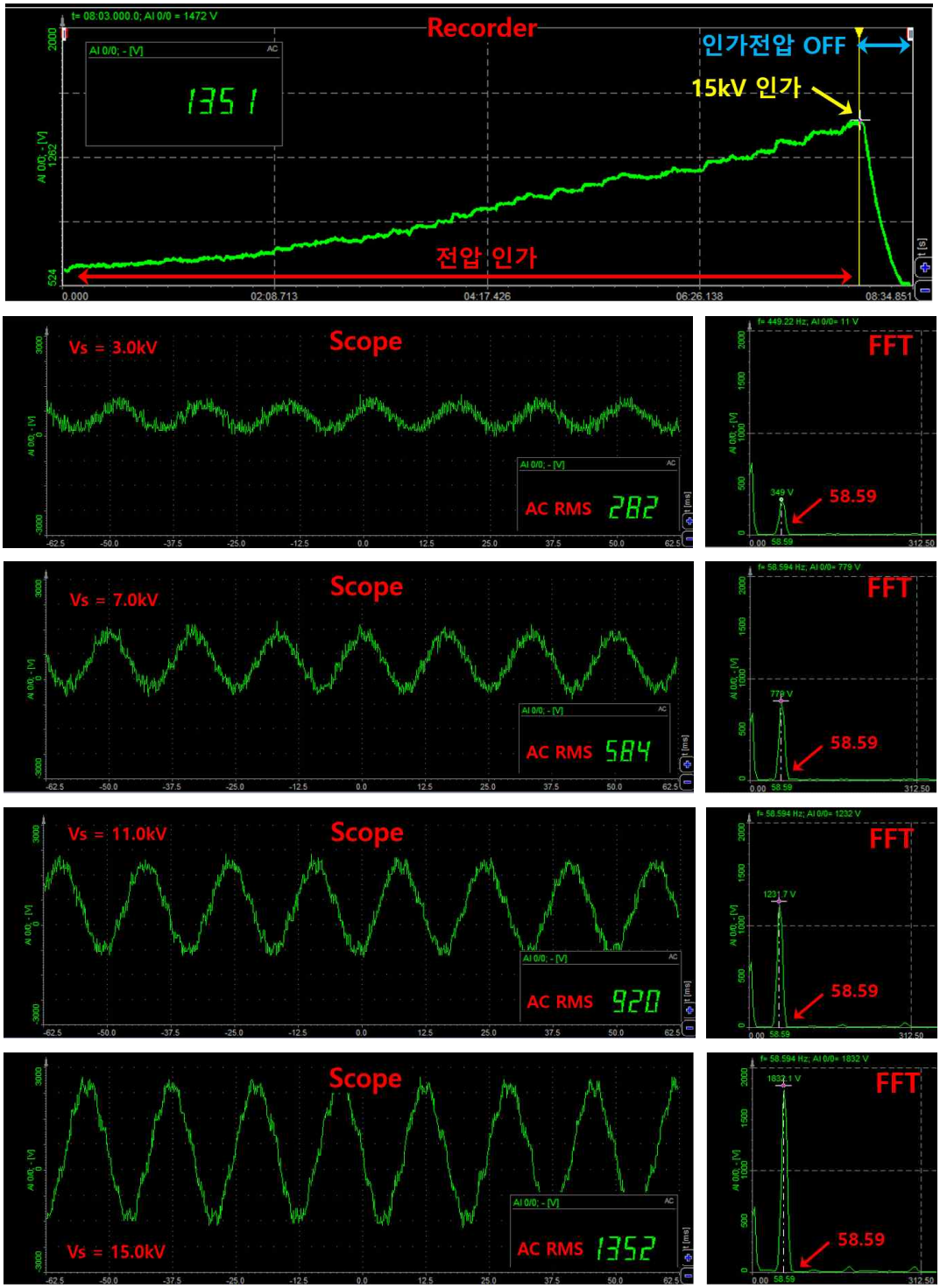


그림 4-12. 절연 후 인가전압에 따른 아크쉴드 전압 측정 파형(대기압)

표 4-4. 절연 후 인가전압에 따른 아크쉴드 전압 측정 데이터(대기압).

인가전압 (V_s)	아크쉴드 전압 평균값(V_f) [V]	인가전압 (V_s)	아크쉴드 전압 평균값(V_f) [V]
2.15[kV]	223	9.0[kV]	741
2.5[kV]	249	9.5[kV]	786
3.0[kV]	282	10.0[kV]	828
3.5[kV]	323	10.5[kV]	879
4.0[kV]	357	11.0[kV]	921
4.5[kV]	392	11.5[kV]	964
5.0[kV]	429	12.0[kV]	1,013
5.5[kV]	467	12.5[kV]	1,062
6.0[kV]	505	13.0[kV]	1,112
6.5[kV]	543	13.5[kV]	1,178
7.0[kV]	584	14.0[kV]	1,229
7.5[kV]	620	14.5[kV]	1,290
8.0[kV]	661	15.0[kV]	1,351
8.5[kV]	700		

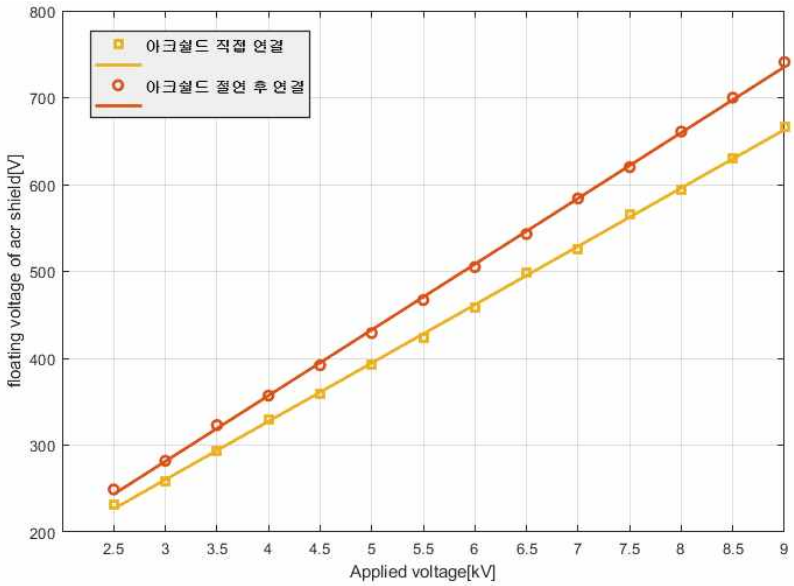


그림 4-13. 아크쉴드 절연 유·무에 따른 아크쉴드 전압 비교.

3. 진공도 가변 상태 시 아크쉴드 전압 특성

진공도에 따른 아크쉴드 전압 특성을 알아보기 위하여 그림 (4-14)와 같이 회로 구성 후, 일정한 인가전압 중 진공도 변화에 따른 아크쉴드 전압 특성을 확인하였다.

진공도는 5.0×10^{-3}[Torr]~8.5×10^{2}[Torr] 범위에서 수동밸브를 통해 가변하였으며, 진공인터럽터 상부 전극에 전압을 인가 후 초기 대기압 수준의 진공도에서 진공도를 감소시키면서 아크쉴드 전압의 변화를 측정하였다. 또한, 최저 진공 영역(5.0×10^{-3}[Torr]) 중 전압인가 시 약 9~10[kV]에서 절연파괴되어 배전선로 공칭 상전압 13.2[kV]의 인가전압에서는 원활한 실험 진행이 불가했으며, 최저 진공 영역에서 절연파괴되지 않는 전압 레벨 중 공칭 상전압의 1/2 수준인 6.6[kV]을 인가하여 실험을 진행하였다.

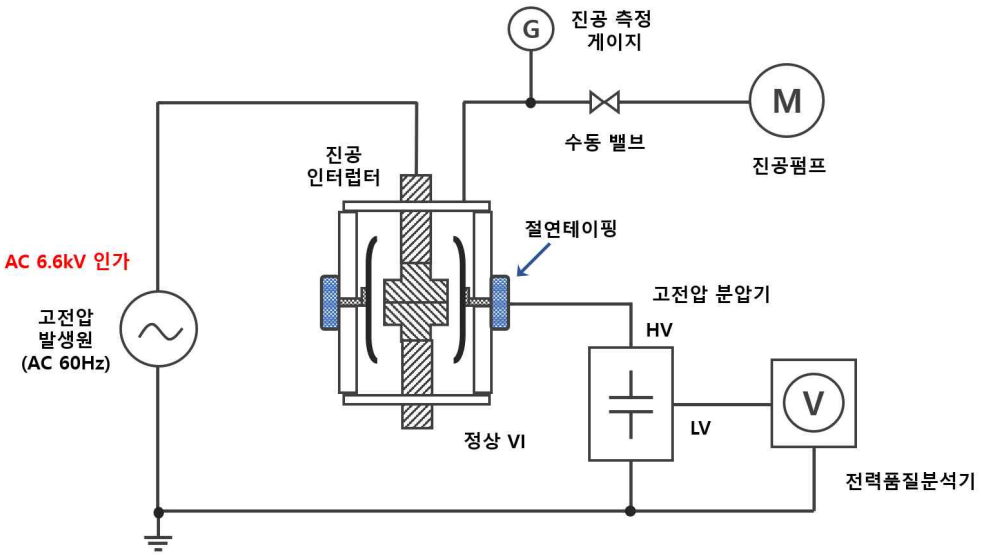


그림 4-14. 진공도에 따른 아크쉴드 전압 측정 회로.

초기 대기압 수준의 압력상태에서 진공도를 감소시키면서 측정한 아크쉴드 전압 실효값은 그림 (4-15)와 같다. 특히, 진공도 100[mTorr] 영역 도달 시 기체 방전으로 인한 강전리 현상으로 이온화된 기체분자 수의 증가로 인해 진공도가 순간적으로 급격히 증가하여 100[mTorr] 이하의 구간으로 도달하지 못하였다. 따라서 진공인터럽터 인가전압을 OFF 후 최저 진공 도달영역인 5.0×10^{-3}[Torr]에서 6.6[kV] 전압을 인가 후 진공도를 상승시키면서 아크쉴드 전압을 측정하였으며, 약 20[mTorr] 도달 시 다시 강한 방전이 시작되어 진공도에 따른 아크쉴드 전압 측정이 불가하였다. 따라서 측정 불가영역에 대한 특성은 Matlab (R2021a) 소프트웨어에서 제공하는 형태보존보간법을 통해 추정하였다.

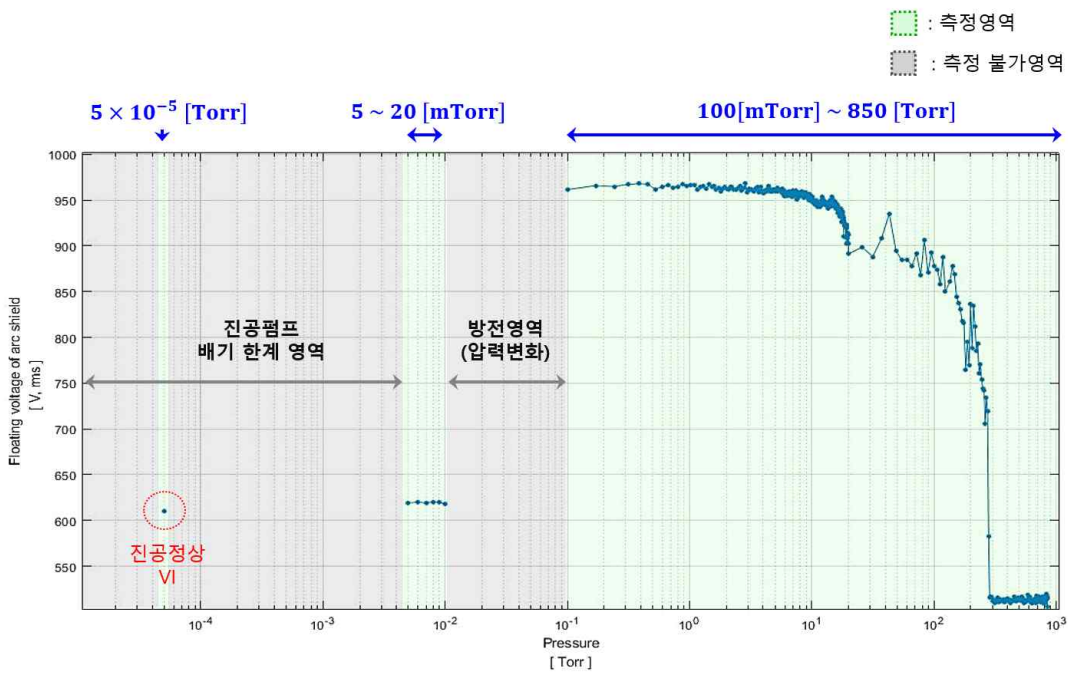


그림 4-15. 진공도에 따른 아크쉴드 전압 실효치 측정값.

진공도에 따른 진공인터럽터 내부 절연상태는 광전리(발광) 현상과 아크쉴드 전압에 발생하는 서지성 과전압으로 확인 가능하였으며, 그림(4-16)에 방전영역과 절연상태를 유지하는 영역을 구분하였다. 또한, 아크쉴드 전압의 특성에 따라 진공 구간을 ①~⑥로 구분하였다.

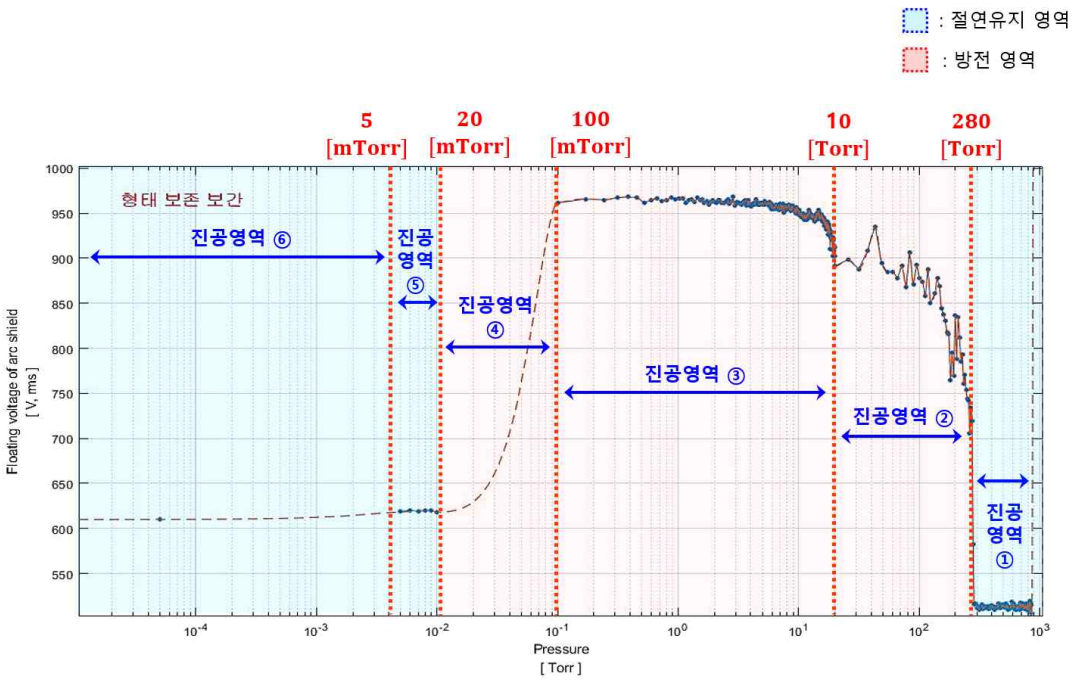


그림 4-16. 진공 영역별 아크쉴드 전압 구분.

초기 대기압 영역 (진공영역 ①)에서 측정된 아크쉴드 전압의 실효치 평균값은 약 513[V]으로서 안정적인 전압 크기를 유지하였으며, 광전리 및 방전 현상은 관측되지 않았다.

진공도가 약 280[Torr] (진공영역 ②) 도달 시 서지성 과전압이 일부 발생했으며, 아크쉴드 전압의 기본파 실효치가 약 950[V]까지 급격히 증가하였다. 또한, 글로우 방전이 개시되어 약한 백색광의 광전리가 관측되었지만, 전리 강도는 약해 안정적인 진공 배기(진공 감소)가 진행되어 안

정적인 전압 측정이 가능하였다.

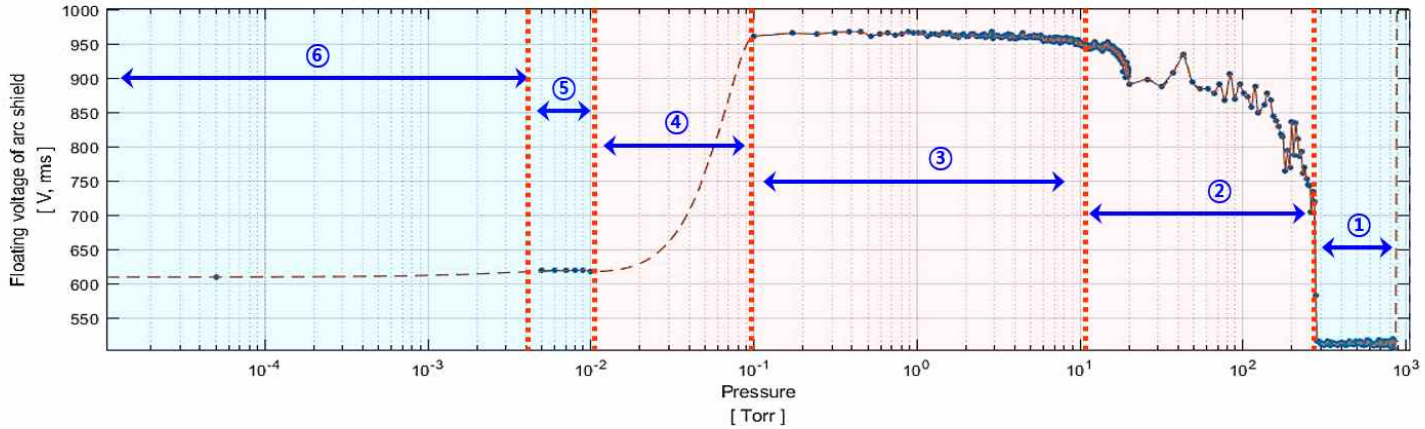
이후 진공도가 10[Torr] (진공영역 ③) 도달 시 아크쉴드 전압은 미세하게 증가하였으나 평균 950[V]의 값으로 안정적으로 포화되었으며, 서지성 과전압은 발생하지 않았다. 이 구간에서는 진공영역 ② 구간과 마찬가지로 약한 백색광이 안정적으로 지속되었으며, 그림 (2-3)의 E-F 구간인 normal glow 방전영역으로 추정된다.

그러나 진공도가 100[mTorr] (진공영역 ④)에 가까워질수록 붉은 계열의 방전 광이 간헐적으로 발생하였으며, 100[mTorr] 영역 도달 시 매우 강한 백색광의 방전이 지속적으로 발생하였다. 진공영역 ④ 구간에서는 매우 강한 방전(abnormal glow discharge)과 더불어 다수의 서지성 과전압이 발생하였으며, 강한 전리현상으로 인한 이온화된 기체분자 증가로 진공도가 급격히 상승하였기 때문에 진공도에 따른 아크쉴드 전압의 측정이 불가능하였다.

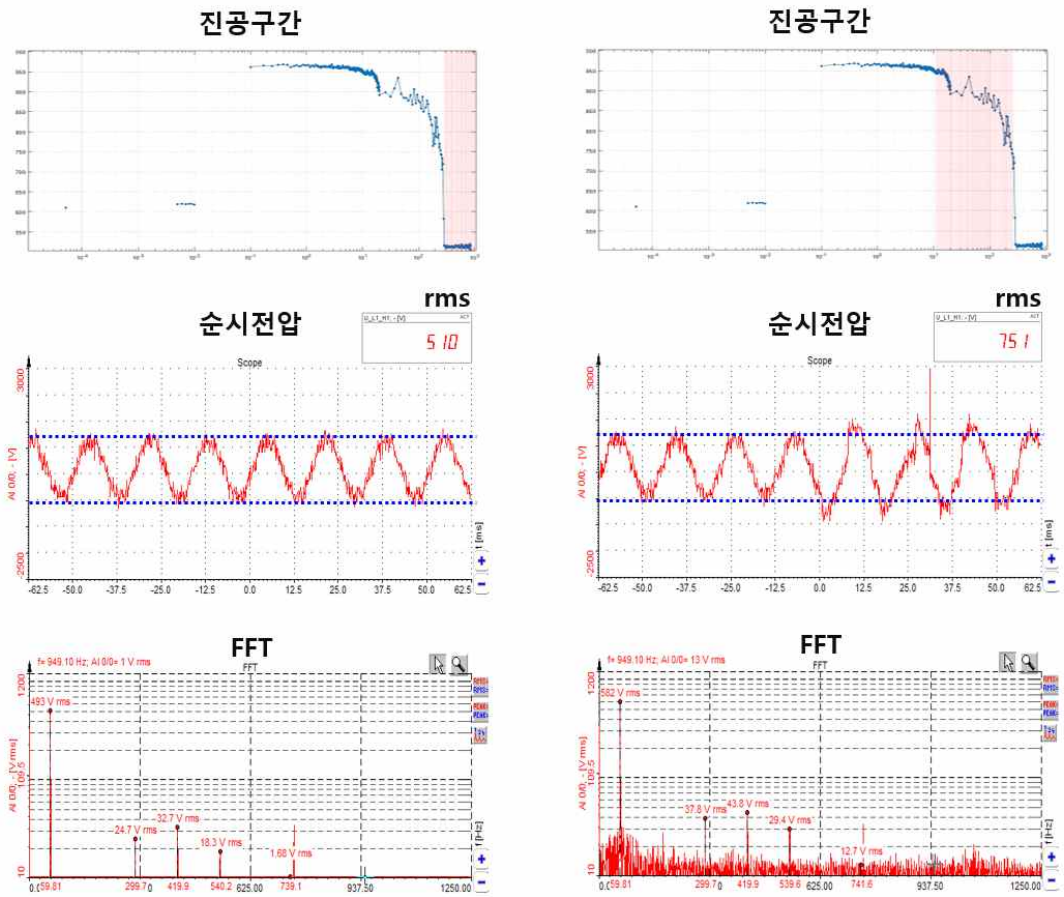
진공 배기 한계인 5[mTorr] 영역에서는 진공도를 증가시키면서 아크쉴드 전압을 측정하였으며, 강한 방전이 개시되는 20[mTorr] 이하의 영역에서 안정적인 전압특성을 보였다. 이 구간에서는 방전이 발생하지 않았으며, 진공인터럽터 정상 진공영역인 5.0×10^{-5}[Torr]의 아크쉴드 전압값과 유사한 범위의 값이 측정되었다.

이상의 진공도에 따른 아크쉴드 전압의 특성은 표 (4-5)와 같이 정리할 수 있으며, 각 구간에서의 순시 전압 파형과 주파수 특성은 그림 각각 (4-17), (4-18), (4-19)와 같다.

표 4-5 진공 영역에 따른 아크쉴드 전압 및 방전특성.

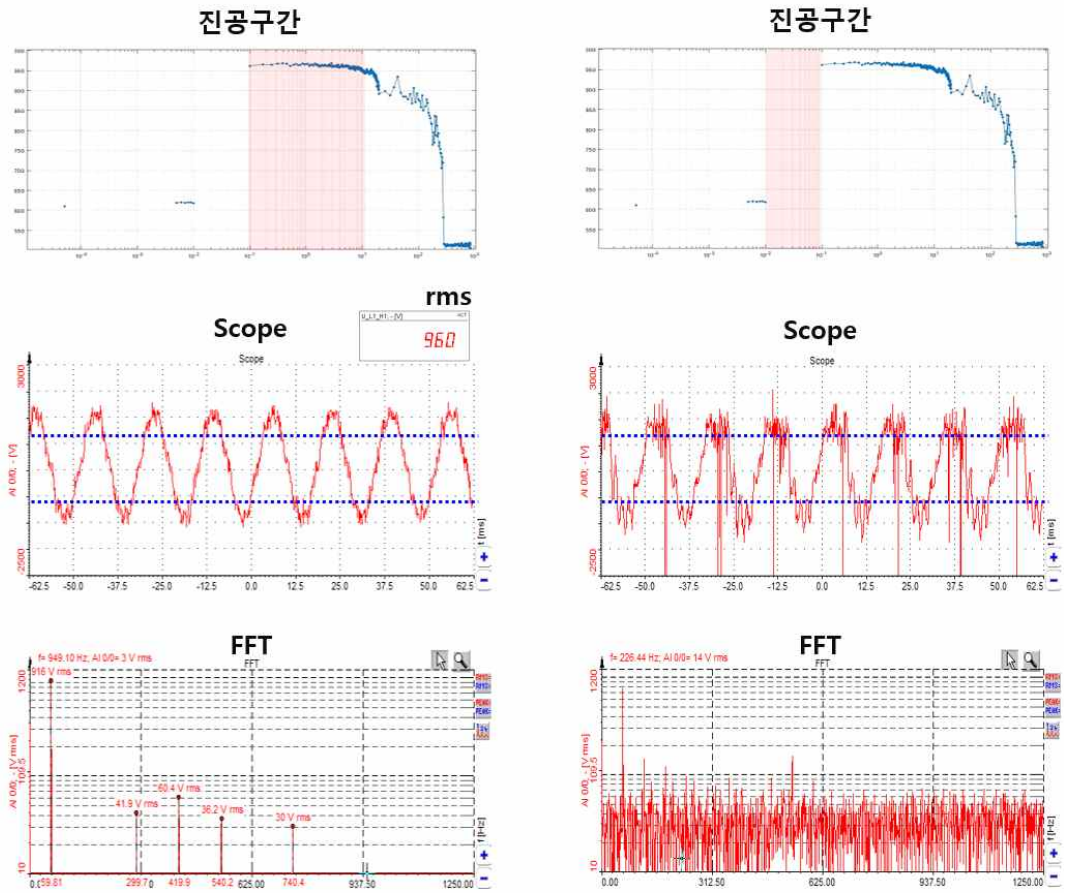


구분	진공영역 ⑥	진공영역 ⑤	진공영역 ④	진공영역 ③	진공영역 ②	진공영역 ①
진공도[Torr]	~ 5m	5 ~ 20m	20m ~ 100m	100m ~ 10	10 ~ 280	280 ~ 대기압
RMS 전압 (평균)[V]	610 (유지)	632 (유지)	(변화) 진공도와 비례	949 (유지)	(변화) 진공도와 반비례	513 (유지)
서지성 과전압	없음	없음	다수 발생	없음	일부 발생	없음
방전특성	없음	없음	강전리 방전 (abnormal glow discharge)	강전리 방전 (normal glow discharge)	강전리 방전 (normal glow discharge)	없음



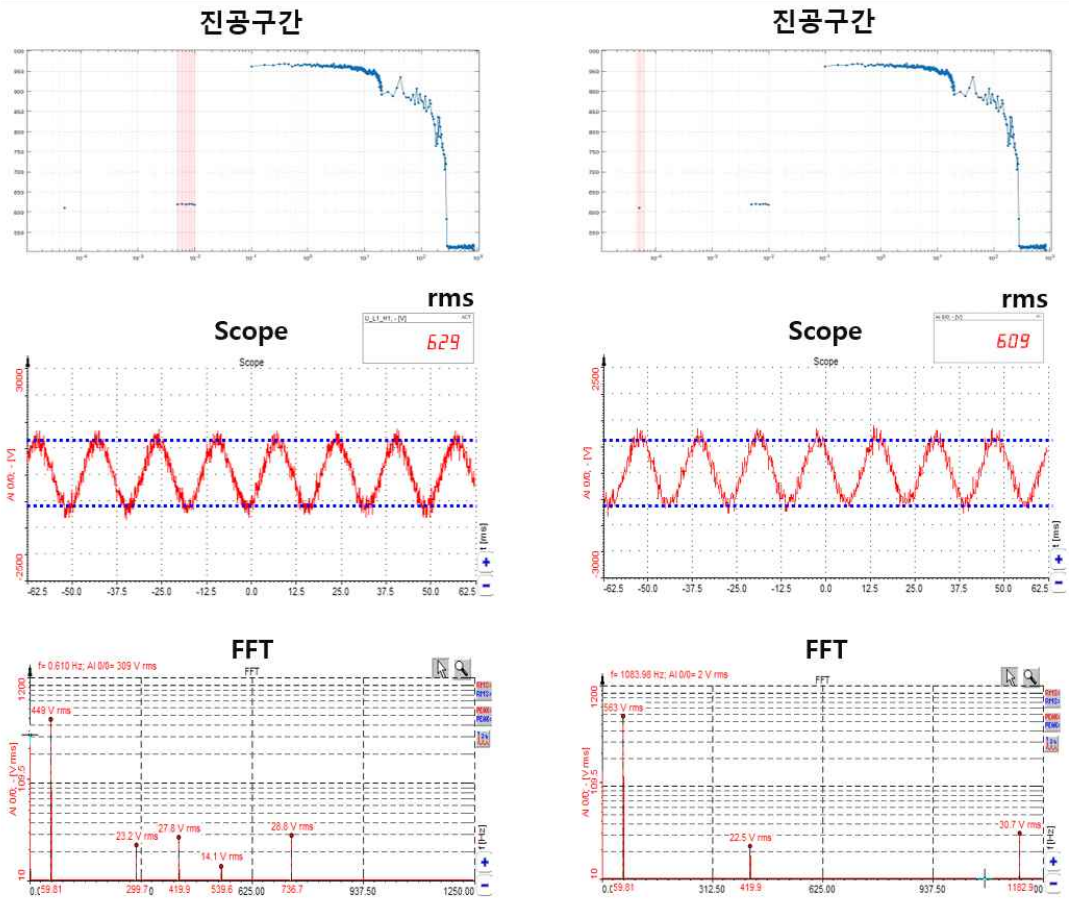
(1) 진공영역 ①　　(2) 진공영역 ②

그림 4-17. 진공 영역에 따른 아크쉴드 전압 순시 파형 및 FFT(1).



(1) 진공영역 ③ (2) 진공영역 ④

그림 4-18. 진공 영역에 따른 아크쉴드 전압 순시 파형 및 FFT(2).



(1) 진공영역 ⑤ (2) 진공영역 ⑥

그림 4-19. 진공 영역에 따른 아크쉴드 전압 순시 파형 및 FFT(3).

진공 영역별 고조파 특성을 알아보기 위하여 진공도와 전고조파왜율(THD)을 그림 (4-20)과 같이 도시하였으며, 아크쉴드 부유전압이 상승하는 진공영역 ② ~ ④ 중 10[Torr] ~ 100[mTorr] 영역인 진공영역 ③에서의 주파수 특성이 안정된 특징을 보인다. 그림 (4-21)의 ⑴은 진공영역 ③의 구간을 확대한 THD이며, 약 10[%] 내외의 수준으로서 기본파 대비 고조파 함유량은 미미한 수준임을 알 수 있다. 따라서, 진공영역 ③의 구간에서는 과전압 및 고조파의 영향 없이 안정적인 아크쉴드 전압 계측이 가능하며, 실효치 크기가 정상 진공상태와 대비하여 약 55.7[%] 증가된 수치를 보이기 때문에 아크쉴드 계측 전압의 실효치를 통해 진공도 저하 구간의 판단기준을 수립할 수 있을 것으로 예상한다.

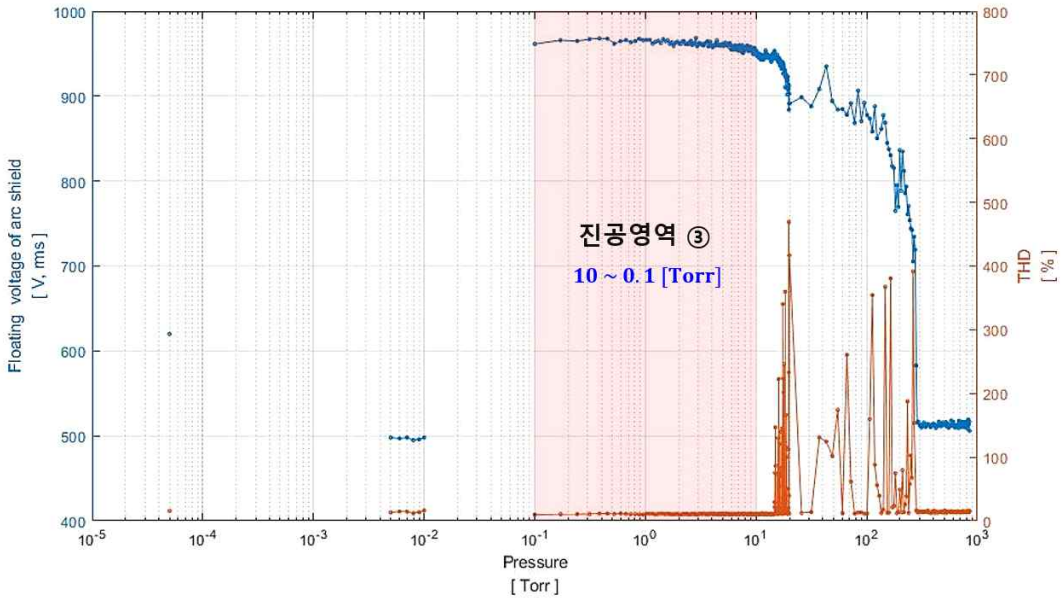
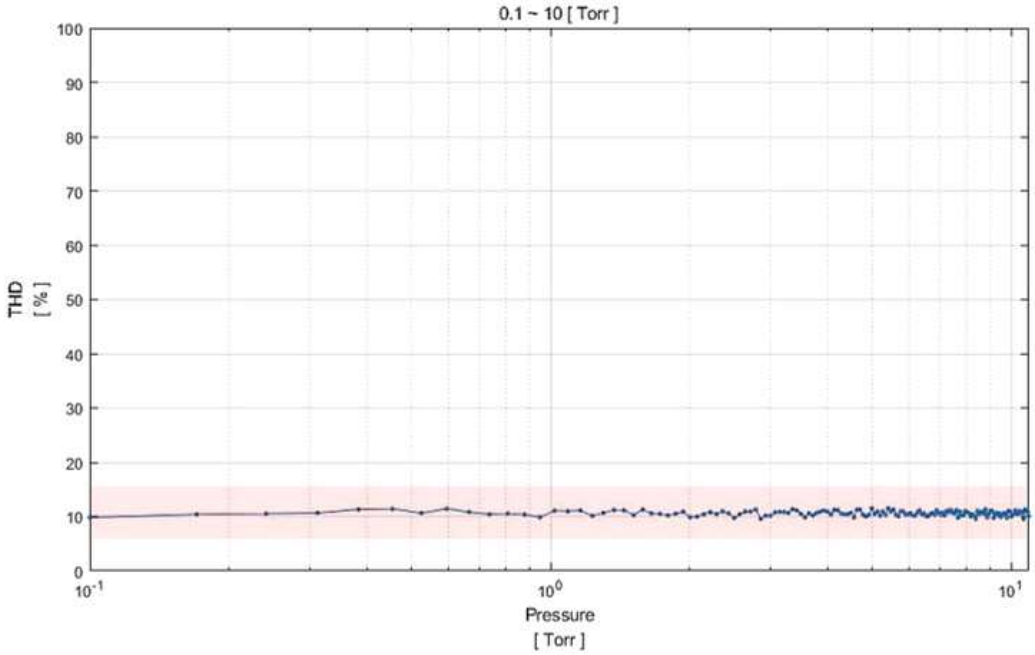
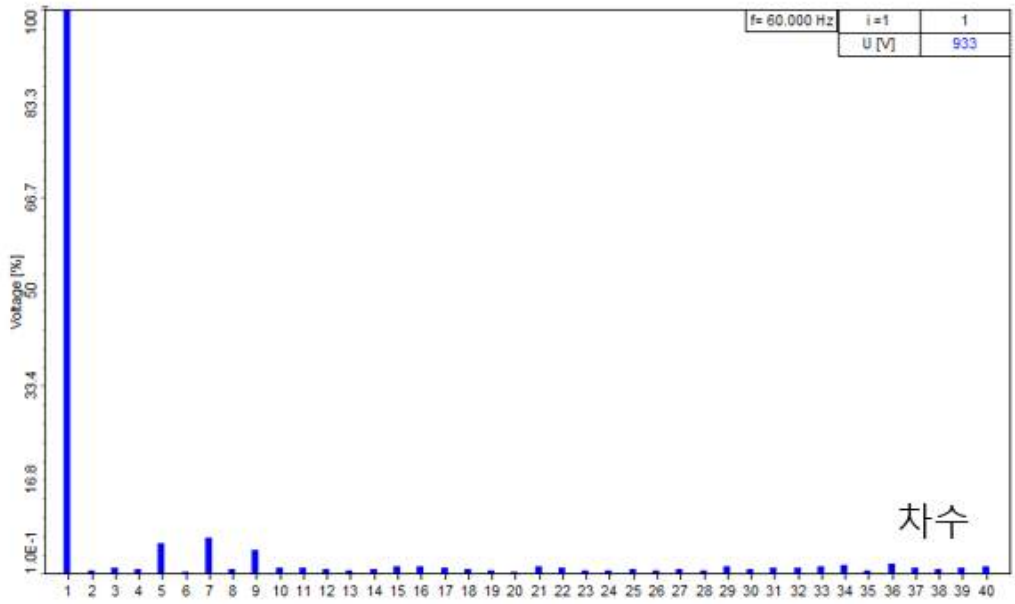


그림 4-20. 진공도에 따른 아크쉴드 전압 THD 특성.



(1) THD



(2) FFT 순시치

그림 4-21. 진공영역 ③에서의 아크쉴드 전압 THD 및 FFT.

그림 4-22. 진공영역 ①에서의 실험 전경 및 진공도.

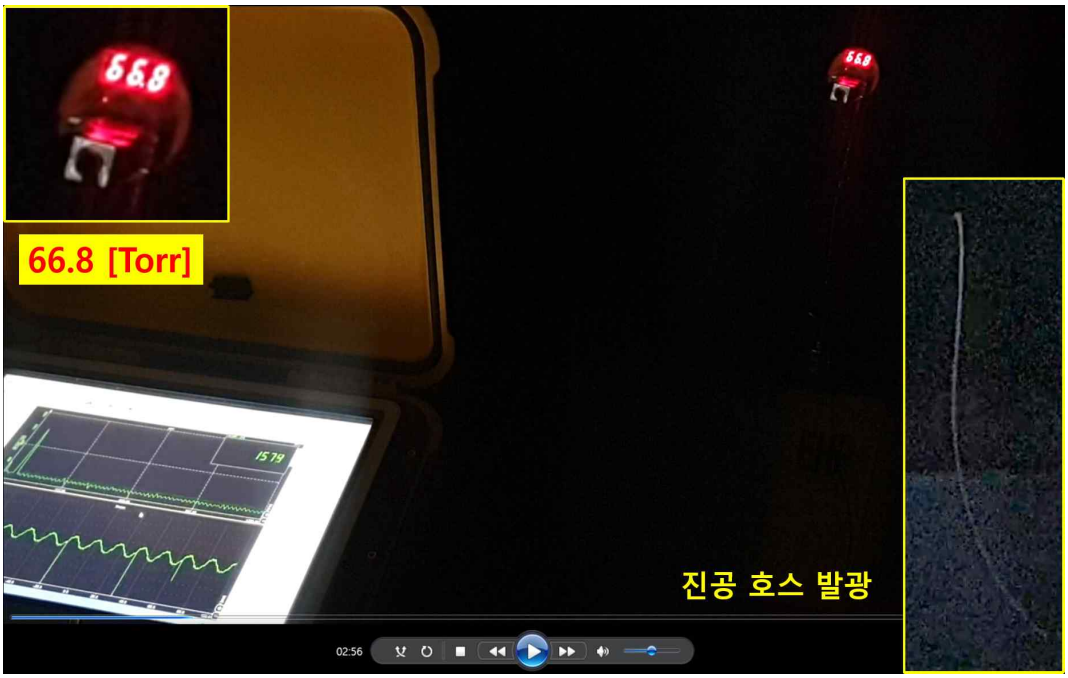


그림 4-23. 진공영역 ②에서의 발광 현상 및 진공도.

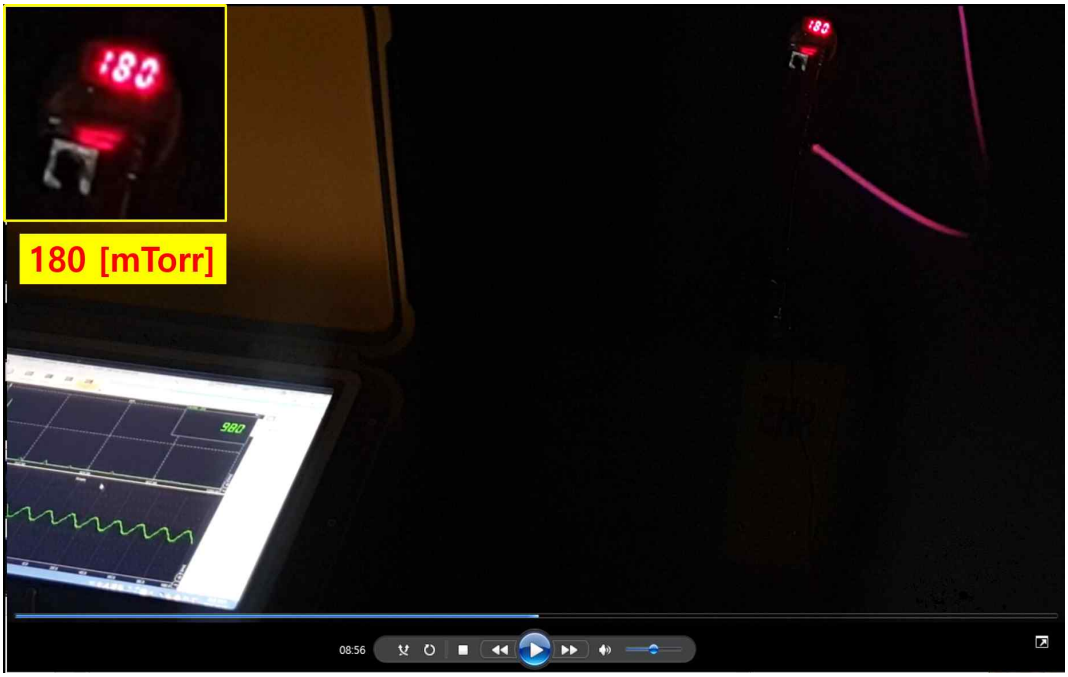


그림 4-24. 진공영역 ③에서의 발광 현상 및 진공도.

그림 4-25. 진공영역 ④에서의 발광 현상 및 진공도.

제 5 장 결 론

본 연구에서는 배전급 개폐기에 사용되는 진공인터럽터 내부 진공의 절연상태를 판단하기 위하여 진공도에 따른 아크쉴드 전압을 전력품질분석기(DEWE-57x)를 통해 측정하고 아래와 같이 그 특성 및 아크쉴드 전압 형성의 물리적 이해를 아래와 같이 정리하였다.

1. 진공인터럽터 아크쉴드 전압 특성

1.1 인가전압에 따른 아크쉴드 전압 특성

- 일정한 진공상태에서 진공인터럽터 전극에 인가되는 전압의 크기에 따라 아크쉴드 전압은 비례하는 선형특성을 보인다.
- 진공인터럽터의 진공도에 따라 인가전압과 아크쉴드 전압의 비례율(기울기)은 달라지며, 대기압의 경우 정상 진공상태(5×10^{-5}[Torr]) 보다 아크쉴드 전압의 증가 폭은 감소하는 경향을 보인다.

1.2 아크쉴드 외부 절연처리에 따른 아크쉴드 전압 특성

- 아크쉴드의 직접 접속을 통한 전압 계측의 경우 내부 진공도가 대기압인 상태 중 배전선로 상용 공칭전압 AC RMS 13.2[kV] 이하에서 절연파괴되었으며, 절연파괴 이후 인가전압 이상의 기본파 전압(약 2~3배)이 발생함을 확인하였다.
- 진공인터럽터 외부로 노출된 아크쉴드의 절연확보 후 아크쉴드 전압을 측정한 결과 직접 접속의 경우 대비 전압 크기는 다소 증가했으며, 인가전압 AC RMS 13.2[kV]까지 안정적인 절연상태를 유지하였

다. 따라서, 아크쉴드와 계측 센서 사이 절연체의 종류에 따른 유전율과 두께 등을 조절하여 안정적인 아크쉴드 전압 계측이 가능하다.

1.3 진공도의 구간별 아크쉴드 부유전압 특성

■ **진공영역 ① : 280[Torr] ~ 850[Torr]**

- 인가전압 AC RMS 6.6[kV] 기준 진공인터럽터 내부 진공이 대기압 ~ 280[Torr]일 때 안정적인 절연상태를 유지하며, 아크쉴드에 형성되는 전압 크기는 인가전압의 약 1/10 수준이다. 또한, 이 구간에서는 방전이 개시되지 않으며, 과전압 및 고조파가 발생하지 않았다.

■ **진공영역 ② : 10[Torr] ~ 280[Torr]**

- 진공인터럽터 내부 첫 방전이 개시되는 280[Torr] 이하 구간에서는 기본파 성분의 전압 크기는 급격히 상승하며, glow 방전 형태의 약한 백색 발광 현상이 관측되었다. 이 구간에서는 서지성 과전압이 지속적으로 발생한다.

■ **진공영역 ③ : 100[mTorr] ~ 10[Torr]**

- 이후, 아크쉴드 전압은 초기값(대기압) 대비 약 2배 수준의 크기로 포화되었으며, THD 10[%] 내외의 안정적인 전압형태를 보였다. 또한, 이 구간에서는 glow 방전이 안정적으로 지속되었으나 100[mTorr]구간에 이르러 붉은 계열의 발광 현상이 간헐적으로 발생하였다.

■ **진공영역 ④ : 20[mTorr] ~ 100[mTorr]**

- 다량의 고조파 성분을 포함한 지속적인 서지성 과전압이 지속적으로 발생했으며, 강전리 현상에 의한 매우 밝은 백색광이 지속되었다. 방전 시 이온화된 기체분자의 강한 전리 때문에 진공도가 급격히 상승하였으며, 다시 100[mTorr] 이하 진입 시 방전 및 진공도

기본파 성분의 전압은 일정한 크기를 유지하였다. 또한, 20[mTorr] 이하의 구간에서는 초기 대기압 및 정상 진공상태와 같은 안정적인 절연상태를 유지됨을 보였다.

■ **진공영역 ⑤ : 5[mTorr] ~ 20[mTorr]**

- 진공인터럽터 정상 진공영역(5×10^{-5}[Torr])과 비슷한 수준의 아크쉴드 전압 크기가 계측되었으며, 방전은 개시되지 않아 진공 절연이 양호한 구간으로 판단한다.

2. 진공인터럽터 아크쉴드 전압 특성의 물리적 이해

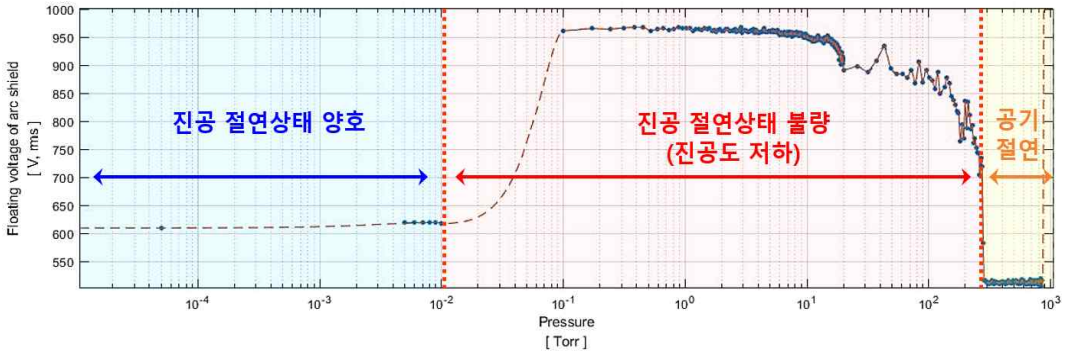


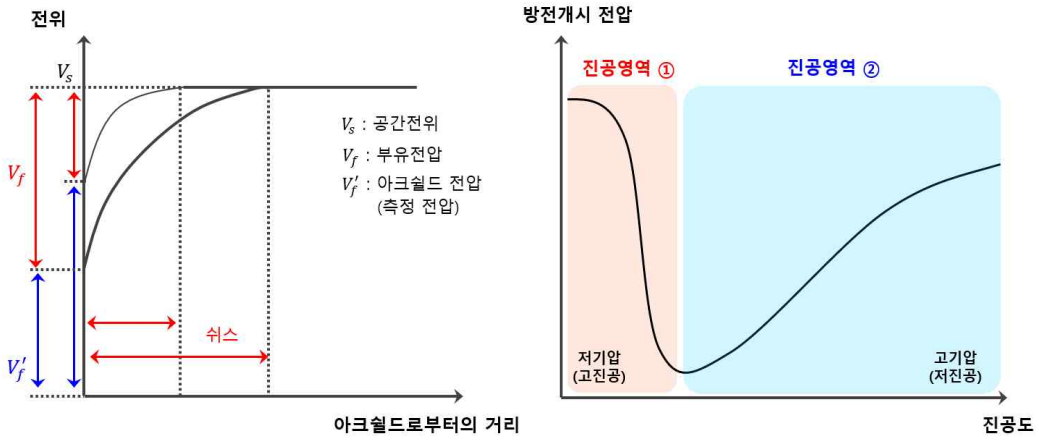
그림 5-1. 아크쉴드 전압에 따른 진공 구간 및 절연상태 판단.

진공도에 따른 아크쉴드 전압 기본파 실효치 크기의 변화는 진공 영역 추정 및 절연상태 판단기준으로 활용할 수 있을 것으로 예상한다. 이러한 아크쉴드 전압의 변화는 2.2절에 기술한 플라즈마 쉬스의 개념과 기체 방전의 중요한 특성인 파센 곡선으로 해석할 수 있다.

즉, 그림 (5-2)의 파센곡선 중 진공 영역 ② 구간에서는 진공도가 감소함에 따라 하전입자 밀도는 감소하게 되며, 아크쉴드에 형성되는 전자 수의 감소에 따른 쉬스 감소로 전극과 아크쉴드 간 전압인 부유전압(V_f)이

감소하여 최종적으로 아크쉴드 측정전압(V_f')의 값은 증가하게 된다. 또한, 이 구간에서는 진공도가 감소함에 따라 전자의 평균자유행로 증가 및 전계에 의한 가속으로 하전입자 간 충돌에너지가 증가하여 방전 개시전압이 낮아진다(절연내력 감소).

반면, 진공 영역 ① 구간에서는 진공도가 감소함에 따라 하전입자 밀도 감소와 전자의 평균자유행정 증가는 동일하지만, 하전입자의 수가 극히 적어져 하전입자 간 충돌 확률이 극히 낮아져 방전 개시전압은 증가하게 된다. 한편, 아크쉴드에 형성되는 쉬스는 먼저 도착한 전자들에 의한 반발력이 존재하지만, 전계에 의해 충분히 가속된 높은 에너지를 가진 전자의 유입이 활발해져 쉬스는 증가하여 부유전압(V_f)은 증가하게 되며, 아크쉴드 측정전압(V_f')은 낮아지게 된다.



(1) 플라즈마 쉬스 개념　　(2) 파센 곡선

그림 5-2. 진공도에 따른 아크쉴드 전압 크기 변화의 물리적 이해.

참 고 문 헌

[1] 정부 관계부처 합동. (2020). 제3차 국가 기후변화 대응정책(2021~2025). 대한민국. 기상청. http://www.climate.go.kr/home/03_policy/policy02_02.php

[2] 국립환경과학원. (2008). 환경부문 온실가스 배출량 inventory 작성 및 배출계수 개발. 대한민국. 환경부.

[3] 한국전력공사. (2021). e-영업통계시스템.

[4] Yoon, Jae-Hun, & Lim, K.J. (2010). 진공인터럽터 내부 End Shield 형상과 갭거리에 따른 연면방전거동. 한국전기전자재료학회논문지, 23(2), 169 - 173. https://doi.org/10.4313/JKEM.2010.23.2.169

[5] LG산전주식회사. (2000). 12kV, 50kV차단용 축자계형 진공 인터럽터 개발. 대한민국 산업자원부. http://www.itfind.or.kr/Report02/201008/KEIT/KEIT-3027/KEIT-3027.pdf

[6] Paul G. Slade. (2020). The Vacuum Interrupter : Theory, Design, and Application(2nd ed.). CRC Press

[7] 김종일, 전병훈, & 이석준. (2017). 고전압플라즈마공학. 진샘미디어

[8] Alfred Grill. (2003). 공정 플라즈마 기초와 응용(정진욱 역). 서울: 청문각. (원서출판 1994)

[9] 배석희, 인상렬, 정광화, 이영백, & 신용현. (2000). 진공공학. 서울:한국경제신문 한경BP

[10] 김현후, 황용운, 박대희, & 임기조. (2007). 기초진공공학. 서울: 내하출판사

[11] 김영도. (2014). 공정 개선을 위한 유도결합플라즈마 방전특성분석 및 진단법에 관한 연구(박사학위). 한양대학교 대학원, 서울.

[12] Conrads, H., & Schmidt, M. (2000). Plasma generation and plasma sources. Plasma Sources Science and Technology, 9(4), 441 - 454. doi:10.1088/0963-0252/9/4/301

[13] 정광화. (1993). 기체의 성질. 한국진공학회지, 2(2), 261-266.

[14] Schellekens, H. (2014). Continuous vacuum monitoring in vacuum circuit breakers. 2014 International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). doi:10.1109/deiv.2014.6961720

[15] R. Renz et al, “Vacuum Interrupters - Sealed for Life”, 19th CIRED, paper0159,May 2007

[16] Kageyama, K. (1983). Magnetically confined low pressure gas discharge generated in a vacuum switch. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 1(3), 1522 - 1528. doi:10.1116/1.572179

[17] Godechot, X., Nicolle, C., Hairour, M., Olive, S., & Picot, P. (2012). Investigation and optimization of magnetron discharge in a vacuum switch. 2012 25th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). doi:10.1109/deiv.2012.6412556

[18] Acharya, V., Kulkarni, S., Paulzagade, D., & Raihans, R. (2018). Uses of Magnetron Discharge to Assess the Vacuum Level of Vacuum Interrupter. 2018 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). doi:10.1109/deiv.2018.8536992

[19] S.Tanigaki, T.Yasuda & M. Sakaki, (1989). Vacuum monitor device and method for vacuum interrupter(U.S. Patent No. 4,547,769). U.S. Patent and Trademark Office. https://patents.google.com/patent/US4547769A/en

[20] Kamarol, M., Ohtsuka, S., Hikita, M., Saitou, H., & Sakaki, M.

(2007). Determination of gas pressure in vacuum interrupter based on partial discharge. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 14(3), 593 - 599. doi:10.1109/tdei.2007.369518

[21] Kamarol, M., Ohtsuka, S., Saitoh, H., Sakaki, M., & Hikita, M. (2005). Discharge phenomena in low vacuum region of glass tube vacuum interrupter under AC applied voltage. Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2005. (ISEIM 2005). doi:10.1109/iseim.2005.193315

Abstract

A Study on Internal Vacuum Insulation State Judgment Using Distribution-Class Vacuum Interrupter (VI) Arc Shield Floating Voltage

Jaekyung, Sung

Department of Engineering Practice

Graduate School of Engineering Practice

Seoul National University

Recently, global environmental regulations for reducing greenhouse gas emissions due to climate change are being strengthened, and accordingly, SF_6 gas, which is used as a representative insulation medium, is being replaced by eco-friendly insulation materials.

In the case of distribution switches currently in use in Korea, the existing SF_6 gas insulated switchgear is being replaced by an

eco-friendly switchgear with a built-in vacuum interrupter, and about 90,000 vacuum insulated switchgears are currently in operation.

Vacuum has excellent insulation performance as well as acr extinguishing ability. However, if vacuum leaks, the insulation state deteriorates and there is a risk of insulation breakdown.

Therefore, the diagnosis and measurement of the vacuum state in a vacuum interrupter is very important. But, there is currently no way to check the vacuum state after vacuum interrupter is shipped from the manufacturer.

The traditionally used penning discharge method and magnetron measurement technology are representative studies for measuring the vacuum state, but they cannot be applied in the field of the power system due to various constraints. The vacuum measurement method using PD, which has been studied so far, is not yet reliable enough to be applied in practice.

In this research report, a method to overcome the problems of known vacuum measurement technology was considered, and the insulation state of the vacuum inside the vacuum interrupter was confirmed by deriving the characteristics of the floating voltage formed in the arc shield inside the vacuum interrupter.

It is expected that floating voltage characteristics according to vacuum state of vacuum interrupter arc shield will be helpful in the development of vacuum state diagnostic sensors inside the vacuum interrupter.

keywords : Vacuum interrupter, Vacuum insulation,
Floating voltage, Ionization, Plasma discharge
Student Number : 2020-23262