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

공학석사 학위논문

저주파 인가 대기압 유전체 격벽 헬륨 플라즈마의 방전 특성 연구

2017년 2월

서울대학교 대학원

에너지시스템공학부

배 병 준

저주파 인가 대기압 유전체 격벽 헬륨 플라즈마의 방전 특성 연구

지도교수 김 곤 호

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2016년 10월

서울대학교 대학원

에너지시스템공학부

배 병 준

배병준의 공학석사 학위논문을 인준함

2016년 12월

위 원 장 황 용 석 (인)

부위원장 김 곤 호 (인)

위 원 정 경 재 (인)

초 록

헬륨 대기압 유전체 격벽 방전은 대표적인 대기압 플라즈마 방전으로서 진공 상태에서 적용될 수 없는 산업 분야에 흔히 사용되는 플라즈마이다. 특히 대면적에 균일하게 형성되는 유전체 격벽 방전은 식물 생산 수율 증가를 위한 파종 전처리 장치로서 각광을 받고 있으나 단순히 방전 조건, 처리 시간으로 분류되고 있어 플라즈마를 블랙 박스로서 활용하는 사례 연구에 머물고 있다. 따라서 처리 응용 시 플라즈마 인자를 제어할 수 있는 플라즈마 장치 개발을 위해 유전체 격벽 방전 특성 이해가 필요하다.

본 연구에서는 저주파 헬륨 대기압 유전체 격벽 방전의 플라즈마 내부 전기장과 처리 대상 표면 입사 전하량을 처리 응용 시의 플라즈마 인자로 정의하고 방전 특성 해석을 통해 두 인자의 제어 가능성을 확인 하였다. 인가 전압 파형에 동기화시킨 ICCD 카메라와 광진단계를 이용해 시간에 따라 방전의 변화 과정을 관찰하고 방전 시 전압, 전류 신호를 이용해 방전 개시 및 유지 특성을 분석하였다.

먼저, 저주파 헬륨 대기압 유전체 격벽 방전은 직류 방전과 유사함을 밝혔다. 직류 방전에서 인가 전력을 높이며 타운젠트 방전에서 글로우 방전으로 모드 전이가 일어나는 현상이 유전체 격벽 방전에 나타남을 확인하였고 유전체 격벽 글로우 방전의 음극 강하 영역에 직류 글로우 방전의 음극 강하 영역 모델을 적용해 음극 강하 영역 크기를 설명할 수 있음을 보였다. 이를 통해 유전체 격벽 방전은 직류 방전 특성을 가져 이온의 음극 유전체 입사가

음극 강하 영역을 형성 및 유지하는 역할을 하고 있음을 알 수 있었다.

그리고 저주파 헬륨 대기압 유전체 격벽 방전은 음극 강하 영역에서 생성되는 이온의 음극 유전체 표면 입사가 글로우 방전을 오랫동안 유지시키는 중요 현상임을 밝혔다. 이는 음극 강하 영역에서 생성된 이온의 음극 표면에 도달하기까지 시간이 존재해 인가 전압 변화와 메모리 전하 전압 변화 간 위상차가 발생하여 음극 강하 영역 내 절연 파괴 전기장이 유지되기 때문에 나타나는 현상이며 이 특성으로부터 플라즈마 처리 응용 시 대상체에 입사하는 전하량을 제어할 수 있다. 종자 파종 전 처리 후 생장 결과로부터 플라즈마는 전하 입사에 의한 표면 처리로서 생장에 기여하며, 글로우 방전 특성 및 유지 시간 제어를 통한 종자 입사 전하량 조절로서 파종 전 플라즈마 처리를 위한 정교한 제어 시스템의 개발 가능성을 확인하였다.

주요어 : 대기압 플라즈마, 유전체 격벽 방전, 타운젠트 방전, 글로우 방전, 충돌성 음극 강하 영역, 파종 전처리 플라즈마

학 번 : 2014-22720

목 차

초 록 i

목 차 iii

그림목차 v

제 1 장. 서 론 1

1.1 대기압 유전체 격벽 방전 1

1.2 유전체 격벽 방전 특성 연구 필요성 및 기존 연구 7

제 2 장. 배경 이론 10

2.1 디퓨즈 방전: 타운젠트 · 글로우 방전 10

2.2 직류 글로우 방전의 충돌성 음극 강하 영역 13

2.3 시변화 조건 충돌성 음극 강하 영역 18

제 3 장. 실험 장치 구성 및 신호 진단법 21

3.1 유전체 격벽 방전 장치 및 진단 시스템 21

3.2 방전 공간 전기장 분포 측정법 24

3.3 방전 공간 전압 산출법 28

제 4 장. 유전체 격벽 글로우 방전 개시 특성 33

제 5 장. 유전체 격벽 음극 강하 영역의 직류 방전 특성 42

5.1 빛 세기 분포를 통한 음극 강하 영역 경계 확인 42

5.2 직류 방전 특성을 이용한 음극 강하 영역 크기 해석 48

제 6 장. 유전체 격벽 글로우 방전 유지 특성 57

6.1 유전체 격벽 글로우 방전 유지 현상 57

6.2 음극 강하 영역 절연 파괴 전기장 유지 메커니즘 60

6.3 방전 특성을 이용한 플라즈마 처리 인자 제어 67

제 7 장. 결 론 77
참고문헌 81
Abstract 88

그림목차

그림 1.1 유전체 격벽 방전의 다양한 형태[10]: 왼쪽 위에서부터 순서대로 평행 판 양면 유전체 방식, 평행 판 한 면 유전체 방식, 원통형 방식, 표면 방전 방식 2
그림 1.2 헬륨의 원자 에너지 준위[13], 준안정 상태: 2S3, 2S1 4
그림 1.3 아르곤의 원자 에너지 준위[14], 준안정 상태: 1S5, 1S3 4
그림 1.4 유전체 격벽 방전의 필라멘트 방전 시 전극 면에서 나타나는 미세 채널들의 모습[15] 6
그림 2.1 직류 전원 인가 시 전류-전압 특성 곡선 10
그림 2.2 직류 글로우 방전 시 음극 강하 영역 개요도 17
그림 2.3 시변화 글로우 방전 시 음극 강하 내 전류 구성 개요도 18
그림 3.1 유전체 격벽 방전 장치 및 진단 장치 시스템 개략도 21
그림 3.2 국소 영역 빛 측정을 위한 렌즈 배열: 렌즈 초점 거리와 핀홀 크기에 의해 초점 거리 위치 해상도 100 um * 400mm / 300mm = 133um 23
그림 3.3 헬륨 원자 여기 천이 빛 492.2 nm 파장에 따른 빛

세기 분포: 측정 신호(점), 허용 천이 빛 피팅(굵은 점선), 금지 천이 빛 피팅(얇은 점선), 허용 천이와 금지 천이 피팅 합산(실선) 26
그림 3.4 빛 세기 비교법과 슈타르크 효과로 측정한 전기장 분포 27
그림 3.5 유전체 격벽 방전 장치의 직렬 회로 표현. 28
그림 3.6 ICCD 카메라를 이용해 측정한 인가 전압 조건 별 방전 면적.....30
그림 3.7 측정한 인가 전압, 직렬 연결 외부 커패시터 전압, 전류 31
그림 3.8 측정값으로부터 산출한 방전 공간 전압.....32
그림 4.1 반주기 동안 전류, 방전 공간 전압 및 ICCD 이미지.....33
그림 4.2 모드 전이 영역의 전류, 방전 공간 전압 및 ICCD 이미지.....34
그림 4.3 그림 4.2의 A 순간에서의 빛 세기(a) 및 전기장 분포(b) 35
그림 4.4 헬륨 준안정종의 시간에 따른 밀도 변화 및 인가 주파수 10 kHz, 1 kHz 에 대한 방전 공간 전압 측정 결과 37
그림 4.5 그림 4.2의 B 순간에서의 빛 세기(a) 및 전기장

분포(b) 38
그림 4.6 그림 4.2의 C 순간에서의 빛 세기(a) 및 전기장 분포(b) 39
그림 4.7 A~C 각 지점의 음극 강하 영역 내 알짜 공간 전하 밀도 41
그림 5.1 글로우 유지 영역 전기장 분포 측정 결과와 빛 세기 분포 측정 결과 (20 kHz, 4.5 kVpeak 인가 시 글로우 유지 전류 피크) 43
그림 5.2 대기압 헬륨 조건의 전자 에너지 완화 길이(실선), 음극 강하 영역 크기(굵은 점선) 그리고 방전 시스템 크기(얇은 점선) 44
그림 5.3 사인(sinusoidal) 파형 20 kHz, 2.0 kVpeak 인가 시 글로우 유지 영역 방전 ICCD 이미지와 음극 강하 영역 경계 위치 45
그림 5.4 사다리꼴(trapezoidal) 파형 20 kHz, 4.5 kVpeak 인가 시 글로우 유지 영역 방전 ICCD 이미지와 음극 강하 영역 경계 위치 46
그림 5.5 방전 공간 간격 4 mm 조건의 사인(sinusoidal) 파형 20 kHz, 2.0 kVpeak 인가 시 음극 강하 영역 경계 위치와 두께 계산 결과 50
그림 5.6 방전 공간 간격 4 mm 조건의 사다리꼴(trapezoidal) 파형 20 kHz, 4.5 kVpeak 인가 시 음극 강하 영역

경계 위치와 두께 계산 결과.....50
그림 5.7 방전 공간 간격 6 mm 조건의 사다리꼴(trapezoidal) 파형 20 kHz, 4.5 kVpeak 인가 시 음극 강하 영역 경계 위치와 두께 계산 결과.....52
그림 5.8 방전 공간 간격 8 mm 조건의 사다리꼴(trapezoidal) 파형 20 kHz, 4.5 kVpeak 인가 시 음극 강하 영역 경계 위치와 두께 계산 결과.....53
그림 5.9 음극 강하 영역 모델 계산을 통한 글로우 유지 영역의 전기장 분포 예측 결과와 그림 5.1의 측정 결과. (a): 사인(sinusoidal) 파형 20 kHz, 2.0 kVpeak 인가, (b): 사다리꼴(trapezoidal) 파형 20 kHz, 4.5 kVpeak 인가 55
그림 6.1 외부 인가 전압 극성 변화에도 글로우 방전 유지.57
그림 6.2 유전체 격벽 방전 시 인가 전압, 메모리 전압, 방전 공간 전압 및 전류. (a): 사인(sinusoidal) 파형 20 kHz, 2.0 kVpeak 인가, (b): 사다리꼴(trapezoidal) 파형 20 kHz, 4.5 kVpeak 인가.....58
그림 6.3 두 개의 다른 인가 전압 조건에서 글로우 유지 영역 한 지점에서의 인가 전압과 메모리 전압 간 위상차(시간차) 61
그림 6.4 파형 별 위상차가 존재하는 두 파동과 그 차이. (a): 사인 파형, (b): 삼각 파형, (c): 임의의 형태

파형 64
그림 6.5 (a) 기존 파형과 위상차가 존재하는 파형 그리고 두 파형 간 차이, (b) 인가 전압과 메모리 전압 그리고 방전 공간 전압.....65
그림 6.6 인가 전압 변화에 따른 글로우 유지 영역 변화.....67
그림 6.7 종자 유무에 따른 방전 시 전압, 전류 파형: 방전 공간에 종자 없는 경우(얇은 실선), 방전 공간에 종자 있는 경우(굵은 점선) 69
그림 6.8 종자 유무에 따른 한 주기 방전 시 ICCD 이미지.69
그림 6.9 입사 전하량이 동일한 조건의 전기장 세기에 따른 종자 생장 결과 (종자 내부 전기장은 일정 비율 감쇠(suppression)된 크기로 예상).....72
그림 6.10 종자 표면 입사 전하량에 따른 오이 종자 생장 결과 73
그림 6.11 헬륨 유전체 격벽 플라즈마(DBD) 처리 전후의 오이 종자 표면 SEM 이미지.....74
그림 6.12 헬륨-공기 대기압 플라즈마 제트(APPJ) 플라즈마 처리 전후의 처리 시간 별 오이 종자 표면 SEM 이미지.....75

제 1 장. 서 론

1.1 대기압 유전체 격벽 방전: 파종 전처리 방전

산업에서 사용되는 플라즈마는 압력에 따라 크게 저압 플라즈마와 대기압 플라즈마로 나눌 수 있다. 진공의 관리와 유지가 필수적인 저압 플라즈마에 비해 대기압 플라즈마는 상대적으로 진공의 관리 및 유지에 덜 민감하다. 따라서 대기압 플라즈마는 진공 상태에서 적용될 수 없는 산업 분야, 예를 들면 의료, 살균, 식품 처리 등에 적용 가능하다는 장점이 있다. 특히 대기압 유전체 격벽 방전(atmospheric pressure dielectric barrier discharge: AP-DBD)은 대기압 조건에서 넓은 면적의 플라즈마 생성이 용이하며 생물학적 살균 등에 필요한 화학적 활성종의 생성이 유리해 표면 활성, 환경 및 바이오 등의 응용 분야에서 많이 활용되고 있다.[1,2] 최근 들어서는 전기장 및 플라즈마 처리를 통해 종자 발아 및 생장이 증가되는 효과가 발견되어[3,4] 식물 생산 수율 증가를 위한 파종 전처리(pre-sowing treatment)로 기존에 사용되고 있던 화학 물질 처리[5,6]나 표면 연마 처리[7]의 친환경적 대체 처리로서 유전체 격벽 방전 처리가 대두되고 있다.[8,9]

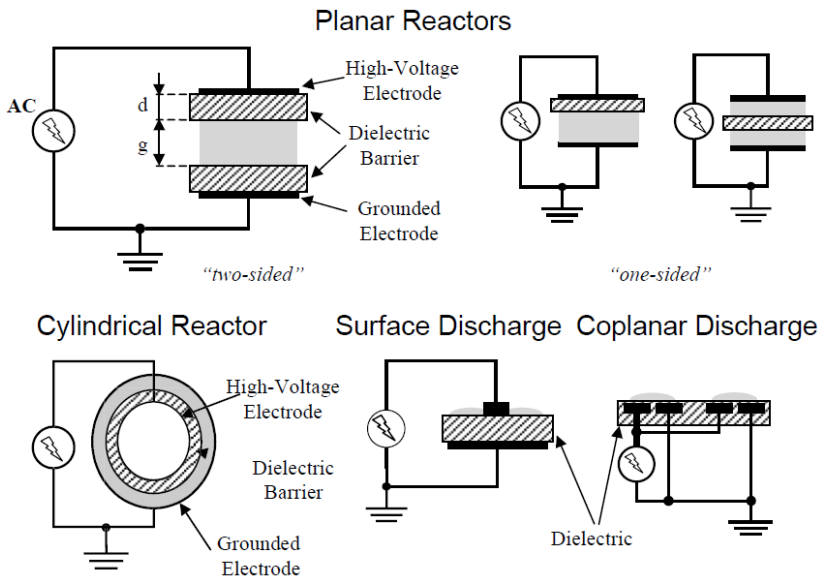

그림 1.1 유전체 격벽 방전의 다양한 형태[10]: 왼쪽 위에서부터 순서대로 평행 판 양면 유전체 방식, 평행 판 한 면 유전체 방식, 원통형 방식, 표면 방전 방식

유전체 격벽 방전은 전극 사이에 하나 이상의 유전체를 두어 방전이 아크로 전이되는 것을 억제함으로써 처리 대상체의 손상을 막는 구조를 가지며[10](그림 1.1) 방전을 위해서 교류(AC) 및 RF 전압을 이용하며 방전 플라즈마는 생성과 소멸을 반복하게 된다.

유전체 격벽 방전은 거시적으로 나타나는 모습에 따라 전극 간 얇은 플라즈마 채널들이 형성되는 필라멘트 방전(filamentary discharge)과 전극 면적 전체로 플라즈마가 넓게 퍼져 방전 공간을 가득 채우고 있는 디퓨즈 방전(diffuse discharge)으로 크게 두 가지 방전으로 나뉜다. 유전체 격벽 방전기를 응용하는 입장에서는 주로 넓은 면적에 균일하게 퍼진 방전 모드인 디퓨즈 방전이

선호되며 두 가지 방전은 방전에 사용된 기체 종류에 따라 크게 좌우된다.[10] 이는 기체 분자 또는 원자가 갖는 준안정종(metastable species)이 디퓨즈 방전에 필수적인 역할을 하기 때문이다. 디퓨즈 방전은 전체 면적에서 전(前)이온화(pre-ionization)가 이루어져야 하고 이를 지배하는 것이 준안정종에 의한 페닝 이온화(Penning ionization)임이 알려져 있다.[10,11,12] 일반적인 여기 상태(excited states)는 불안정하므로 작은 섭동(perturbation)에 의해서도 가진 에너지를 빛으로 방출하며 아래 상태로 천이해 수명(lifetime)이 매우 짧으나 준안정상태(metastable states)는 특별한 여기 상태로서 일반적인 여기종과는 달리 낮은 상태로의 천이 시 양자수(quantum numbers) 변화가 선택 규칙(selection rule)에 위반되어 금지되므로 다른 여기종에 비해 수명이 길고 따라서 밀도가 높게 형성된다. 이러한 준안정종은 여기 상태 에너지로서 내부적으로 높은 에너지를 가지며 상대적으로 높은 밀도로 유지되므로 이온화 등 방전 현상에 큰 영향을 미친다. 특히 준안정종은 전기적으로 중성이므로 전기장 방향인 전극 방향뿐만 아니라 방전 공간에 퍼지는 방향인 반경 방향으로도 이동할 수 있으므로 대기압 조건에서 방전 공간 전체에 플라즈마를 형성 및 유지시키기 위한 필수적인 역할을 한다. 방전에 주로 사용하는 기체인 헬륨과 아르곤 기체의 원자 에너지 준위는 그림 1.2와 그림 1.3에 나타내었다.[13,14]

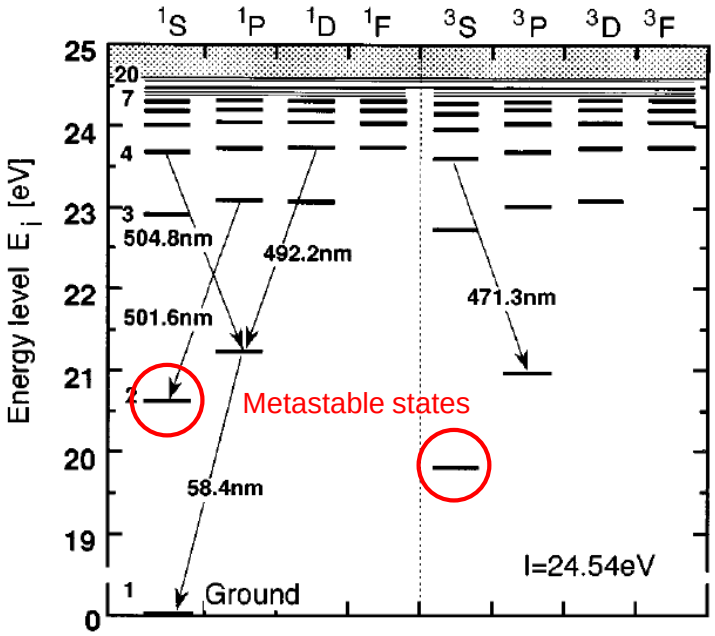

그림 1.2 헬륨의 원자 에너지 준위[13], 준안정 상태: $2S_3$, $2S_1$

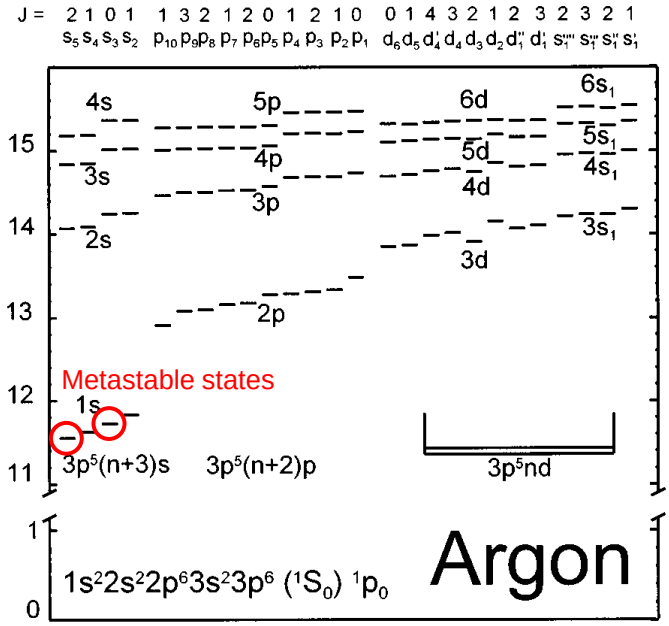

그림 1.3 아르곤의 원자 에너지 준위[14], 준안정 상태: $1S_5$, $1S_3$

헬륨의 경우 준안정종 여기 상태 에너지는 19.8 eV($2S_3$ 상태), 20.6 eV($2S_1$ 상태)이며 이는 질소 분자의 이온화 에너지 15.6 eV 보다 높아 헬륨 방전에 질소가 첨가되는 경우 페닝 이온화로서 플라즈마 생성을 돕게 된다. 또한 헬륨의 기저 상태(ground state) 에너지 0 eV에서 헬륨의 이온화 에너지 24.6 eV를 얻는 것보다 준안정상태에서 에너지를 얻어 이온화되는 것이 보다 낮은 에너지로 가능하므로 단계 이온화(stepwise ionization)로서 플라즈마 생성을 돕는다. 아르곤의 경우도 아르곤 준안정 상태 에너지 11.5 eV($1S_5$ 상태), 11.7 eV($1S_3$ 상태)는 기저 상태 에너지 0 eV에 비해 아르곤 이온화 에너지 15.8 eV에 가까워 단계 이온화로서 플라즈마 생성에 도움을 받으나 질소 분자의 이온화 에너지 15.6 eV보다는 낮아 페닝 이온화는 일어나지 않는다. 디퓨즈 방전은 페닝 이온화의 역할이 중요하므로 따라서 대기압 유전체 격벽 방전에 아르곤 기체를 사용하면 디퓨즈 방전 보다는 필라멘트 방전 형태가 나타나기 쉽고 헬륨 기체를 사용하면 디퓨즈 방전으로 나타나기 쉽다. 필라멘트 방전 시 전극 면에서 나타나는 채널들의 모습은 그림 1.4와 같다.[15] 본 연구에서는 헬륨 기체를 이용해 산업에 주로 이용되는 넓은 면적 균일한 디퓨즈 방전에 중점을 둔다. 디퓨즈 방전은 다시 양극 부근이 밝게 나타나는 타운젠트 방전(Townsend discharge)과 음극 부근이 밝게 나타나는 글로우 방전(glow discharge)으로서 두 가지 방전으로 나뉜다.(2.1절 참고)

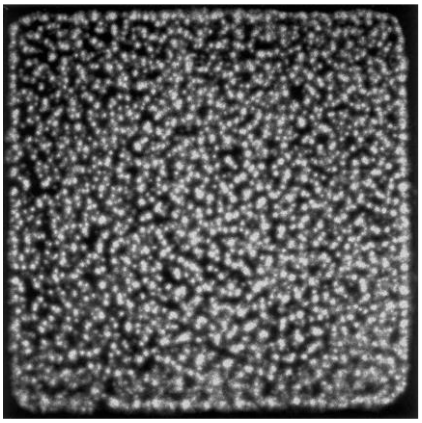

그림 1.4 유전체 격벽 방전의 필라멘트 방전 시 전극 면에서 나타나는 미세 채널들의 모습[15]

1.2 유전체 격벽 방전 특성 연구 필요성 및 기존 연구

유전체 격벽 방전 플라즈마는 기체 분자 및 원자에 에너지를 전달하여 다양한 활성 입자를 만들 수 있으며 처리 시료 표면에 전하와 전기장 및 자외선 빛을 제공하여 대상을 처리하므로 처리 인자의 정량적 제어가 요구된다. 하지만 최근 활발히 진행되고 있는 식물 생산 수율 증가 목적의 플라즈마 종자 전처리 연구는 단순한 방전 장치 종류와 방전 조건(방전 기체, 인가 전압, 전류 등), 처리 시간에 대한 사례 연구(case study)에 머물고 있어 플라즈마를 단순한 블랙 박스(black box)로 이용하고 있다. 따라서 플라즈마 처리 인자를 제어할 수 있는 플라즈마 장치 개발을 위해 방전 특성 이해가 필요하다.

대기압 유전체 격벽 방전기는 1857년 Siemens[16]의 연구를 통해 필라멘트 형태의 방전이 일어나는 오존 발생기로서 최초 소개되었다. 이후 방전 기체, 운전 조건 및 전극 구조에 따라 대기압 유전체 격벽 방전에서도 균일한 디퓨즈 방전이 가능함이 1986년 Kanazawa[17]의 연구로 발견되었으며 이를 통한 응용 분야가 큰 관심을 받았다. 디퓨즈 방전은 타운젠트 방전과 글로우 방전으로 방전 모드가 존재하며 타운젠트 방전은 낮은 전류(~1mA)가 흐르며 양극 부근에서 빛을 발하고 플라즈마 밀도가 낮아 방전 공간의 전기장이 균일하게 분포하는 특징이 있고 글로우 방전은 상대적으로 높은 전류(10~100mA)가 흐르며 음극 부근에 집중된 강한 전기장에 의해 밝은 빛을 발하는 음극 강하 영역이 존재하며 플라즈마 밀도가 높은 특징이 있다고 알려져

있다.[18,19] 플라즈마 응용 시는 플라즈마 밀도가 높아 기능성이 높은 글로우 방전을 선호하며 헬륨 대기압 유전체 격벽 글로우 방전에 관한 선행 연구로 Martens[20]의 연구를 통해 전류가 증가하며 타운젠트 방전에서 글로우 방전으로 전이가 일어날 수 있음을 전산 모사로 보인 결과가 있으며 이들 연구로부터 유전체 격벽 방전의 글로우 방전은 타운젠트 방전으로 개시되어 전이됨으로써 형성됨을 알 수 있다. 그리고 유전체 격벽 글로우 방전은 음극 부근에서 급격하게 전기 포텐셜이 강하하는 음극 강하 영역이 존재하는 특징이 있다. 대기압 유전체 격벽 글로우 방전의 음극 강하 영역에 관한 연구는 꾸준하게 발표되고 있으나 관측된 현상에 대한 사례 연구나 내부 전기장 분포 측정에 관한 내용으로 국한되어 있으며[21,22] 유전체 격벽 방전의 음극 강하 영역을 직류 글로우 방전의 충돌성 음극 강하 전류식을 통해 해석한 연구는 전무하다. 음극 강하 영역은 유전체 격벽 플라즈마 처리 시 처리 대상이 위치하는 영역으로 처리 대상에 대한 전기장을 유추하고 제어하기 위한 방전 특성 연구가 필요하다. 또한 유전체 격벽 글로우 방전은 외부 인가 전압 변화에도 오랜 기간 안정적으로 유지되는 특성이 있으며 이 기간을 통해 처리 대상에 대부분의 전하가 입사하므로 유전체 격벽 플라즈마 응용 시 입사 전하량 제어를 위해 글로우 방전 유지 특성에 관한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 유전체 격벽 방전의 전개와 모드 전이 현상 관찰을 위해 방출 빛 분포의 시변화를 확인할 수 있도록 인가

전압 파형에 동기화시킨 ICCD 카메라를 이용해 방전 변화 과정을 이미지로 관찰하고 국소 영역에 초점을 맞춘 렌즈 배열을 통해 전기장 분포를 측정하여 각 방전 모드와 전이 특성을 확인하고자 하였다. 이는 제4장 방전 개시 특성에서 상세히 설명하도록 한다. 그리고 저주파 유전체 격벽 글로우 방전의 음극 강하 영역이 직류 글로우 방전의 음극 강하 이론으로 해석 가능함을 보였으며 이는 제5장 음극 강하 영역의 직류 글로우 특성에서 설명한다. 또한 음극 강하 영역 내 생성된 이온의 음극 표면 도달이 글로우 방전 유지에 기여하는 메커니즘을 확인하였으며 글로우 방전 특성 및 유지 시간 제어를 통해 파종 전 처리를 위한 플라즈마 처리 시스템의 개발 가능성을 확인하였다. 이 연구 내용은 제6장 글로우 유지 특성에서 상세히 설명하도록 한다. 제2장에서는 유전체 격벽 글로우 방전의 음극 강하 영역에 적용한 직류 글로우 방전의 전류 해석 식과 시변동 조건에 대해 수정된 모델을 소개한다. 제3장을 통해서는 실험에 사용된 유전체 격벽 방전 장치와 방전 이미지 및 전기장 분포를 얻기 위해 사용된 진단법 그리고 공간 전압 계산 과정을 소개한다.

저주파 헬륨 대기압 유전체 격벽 방전을 이용한 본 연구의 방전 특성 해석을 통해 처리 시료에 미치는 플라즈마 인자의 제어 가능성을 보임으로써 처리 시스템의 개발 및 응용에 기여하고자 한다.

제 2 장. 배경 이론

2.1 디퓨즈 방전: 타운젠트 · 글로우 방전

유전체 격벽 방전의 방전 모드 중 플라즈마가 넓은 면적 균일하게 형성되는 디퓨즈 방전은 양극 부근 영역에서 빛을 발하는 타운젠트 방전과 음극 부근 영역에서 빛을 발하는 글로우 방전이 존재하며 각 방전 모드의 특징은 직류 방전의 타운젠트 및 글로우 방전과 유사하다고 알려져 있다.[18,19]

금속 재질 두 전극 판 간 직류 전원 인가 시 인가 전력이 증가함에 따라 나타나는 전류-전압 특성 곡선은 그림 2.1과 같다.

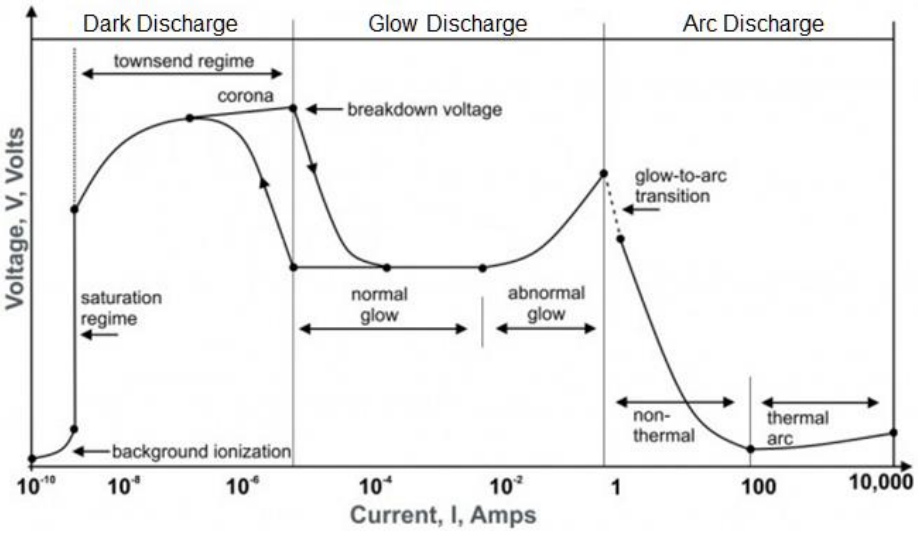

그림 2.1 직류 전원 인가 시 전류-전압 특성 곡선

그림에서 살펴볼 수 있는 대표적 방전 특성은 타운젠트 방전과 글로우 방전 모드의 존재와 전극 간 전압 증가 시 타운젠트에서 글로우 방전으로 방전 모드가 변화하는 절연 파괴(breakdown) 현상이다. 절연 파괴는 타운젠트(J. S. Townsend) 이론에 따라 전자의 전기장 가속 충돌에 의한 전자 사태(avalanche)로 전자가 지수 함수적으로 생성되는 알파(α) 현상과 이온이 음극에 입사하며 2차 전자를 방출시키는 감마(γ) 현상으로 설명할 수 있다.

타운젠트 방전은 두 전극 간 전위차로 형성된 전기장에서 전자가 양극 방향으로 진행하며 이온화 반응을 통한 전자사태를 발생시키므로 전극 간 전압 증가에 따라 전류가 지수 함수적으로 증가하는 특성을 갖고 있다. 이온 충돌에 의해 음극에서 방출되는 2차 전자는 이온 수가 증가함에 따라 증가하며 특정 전압 이상이 되면 초기 전자의 역할을 할 만큼 수가 증가하여 방전기 스스로 전자 공급이 가능하게 되고 이에 따라 이온화를 통한 전자와 이온의 생성이 매우 증가해 자체 유지(self-sustaining) 상태, 즉 플라즈마 상태가 된다. 따라서 글로우 방전은 전극 간 전도성이 높은 플라즈마의 생성으로 인해 타운젠트 방전에 비해 전류는 크게 증가하고 전극 간 인가되는 전압은 크게 감소하는 특성이 있다. 또한 음극 부근에서 음극 포텐셜에 의해 전자들이 밀려나 강한 전기장이 존재하는 음극 강하 영역이 형성된다.

저주파 대기압 유전체 격벽 방전에 사용하는 인가 주파수는 kHz 단위로서 전자나 이온이 방전 공간을 열 운동 또는 이동성

유동으로 움직이는 빈도수(~MHz)나 이온-중성입자간 충돌 빈도(~GHz) 또는 전자-중성입자간 충돌 빈도(~THz)에 비해 매우 느려 순간의 내부 현상은 절연 파괴 전기장이 유지되는 조건에서의 정상 상태(steady state)에 가깝다. 이는 전극 간 인가 전압에 의해 정상 상태로 유지되는 직류 방전과 유사하므로 저주파 대기압 유전체 격벽 방전은 직류 방전의 특징을 갖는다.

2.2 직류 글로우 방전의 충돌성 음극 강하 영역

대기압 플라즈마의 전자·이온은 중성입자와 충돌이 매우 빈번하다. 대기압 헬륨의 경우 이온-중성입자 간 운동량 전달 충돌(momentum transfer collision)은 나노미터(~nm) 크기의 자유 행정 거리(mean free path)를 갖는다. 수 많은 운동량 전달 충돌을 통해 이온 온도가 중성입자 온도와 열 평형을 이루고 있다고 가정하면 헬륨 이온-헬륨 중성입자 간 운동량 전달 충돌 평균 자유 행정 거리 $\lambda_{i,m}$ 는 약 4.35×10^{-8} m 이고 충돌 빈도 $\nu_{i,m}$ 는 약 2.54×10^{10} Hz 이다. 직류 전압 인가로 방전 시스템이 시간에 따라 변하지 않는 정상 상태 조건의 글로우 방전은 음극 부근에서 전극의 포텐셜에 의해 상대적으로 가벼운 전자는 밀려나고 이온은 남아 전극 간 전압의 대부분이 강하하는 음극 강하(cathode fall) 영역이 형성되어 유지된다. 이는 플라즈마와 음극 벽면 사이에 형성되는 쉬스와 비슷한 특징을 가지며 영역 내 충돌이 많은 경우 충돌성 음극 강하(collisional cathode fall)라고 불린다.[23] 대기압 글로우 방전의 충돌성 음극 강하 영역은 밀리미터(~mm) 크기를 가지므로 운동량 전달 충돌 평균 자유 행정 거리가 충돌성 음극 강하 영역보다 대단히 짧다. 따라서 충돌성 음극 강하 영역 내에서 이온의 움직임은 유동성

흐름(mobility flow)를 따른다.

$$u_i(x) = \mu_i E(x) \tag{2.1}$$

$$\mu_i = \frac{e}{M\nu_{i,m}} \tag{2.2}$$

위 식에서 μ_i는 이온의 이동도(mobility), E는 충돌성 음극 강하 영역 내 전기장 세기를 각각 나타낸다.

직류 글로우 방전을 통해 흐르는 전류는 이온 전류와 전자 전류의 합으로 구성된다.

$$J_0 = e\Gamma_i(x) + (-e)\{-\Gamma_e(x)\} \tag{2.3}$$

충돌성 음극 강하 영역 내에서는 여기 및 이온화가 활발하여 위치에 따라 이온 밀도와 전자 밀도가 변화하므로 음극 강하 영역의 공간 내 지점에 대해서는 위 식을 전개하기 어렵다. 따라서 이온 전류와 전자 전류의 관계를 알 수 있는 음극 표면에서의 값을 사용한다.

$$J_0 = e\Gamma_{i,0} - e(-\Gamma_{e,0}) \tag{2.4}$$

위 식에서 아래 첨자 0 은 음극 표면(x=0)을 나타낸다. 음극 표면에서 이온 전류와 전자 전류의 관계는 이온의 입사에 따른 2차 전자 방출 계수 γ_{se}로서 다음의 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} \Gamma_{e,0} &= \gamma_{se}\Gamma_{i,0} \\ n_{e,0}u_{e,0} &= \gamma_{se}n_{i,0}u_{i,0} \end{aligned} \tag{2.5}$$

2차 전자 방출 계수는 Raizer 의 실험식을 통해 구할 수 있다.[24]

$$\gamma_{se} \approx 0.016(\varepsilon_i - 2\varepsilon_\phi) \tag{2.6}$$

위 식에서 ε_i 는 중성입자의 이온화 에너지, ε_ϕ 는 음극 전극의 일함수(work function)를 각각 의미한다.

음극 표면 전자 밀도와 이온 밀도의 비율은 식 (2.5)에 따라 음극 표면 전자 속도와 이온 속도 비율로 표현되며 전자 속도와 이온 속도는 식 (2.1)에 따라 전자와 이온의 이동도로 나타난다. Roth에 따르면[25] 대기압 헬륨의 전자-중성 입자간 운동량 전달 충돌 빈도 $\nu_{e,m}$ 은 약 1.80×10^{12} Hz 이므로 음극 표면에서의 이온 밀도 대 전자 밀도 비를 계산하면 $\lesssim10^{-2}$ 이다. 따라서 가우스 법칙(Gauss' s law)에 따른 음극 표면 전기장의 기울기는 이온 밀도에 대해 다음과 같이 표현된다.

$$\left.\frac{dE}{dx}\right|_{x=0} \simeq \frac{en_{i,0}}{\varepsilon_0} \tag{2.7}$$

식 (2.1), (2.2), (2.4) 그리고 (2.5)에 따라 음극 표면 이온 밀도는 다음과 표현된다.

$$n_{i,0} = \frac{J_0}{e\left(1+\gamma_{se}\right)}\left(\frac{e}{M\nu_{i,m}}E_0\right)^{-1} \tag{2.8}$$

위 식에서 E_0 는 음극 표면에서의 전기장 세기를 나타낸다. 따라서 식 (2.7)는 다음과 같다.

$$\left.\frac{dE}{dx}\right|_{x=0} \simeq \frac{J_0}{\varepsilon_0\left(1+\gamma_{se}\right)}\left(\frac{e}{M\nu_{i,m}}E_0\right)^{-1} \tag{2.9}$$

위 식의 우항은 음극 표면 이온 밀도로서 0이 아니므로 음극 표면

전기장 기울기는 아래 조건을 만족한다.

$$\left.\frac{dE}{dx}\right|_{x=0} \neq 0 \tag{2.10}$$

그리고 충돌성 음극 강하 영역 경계는 전기장이 영(~0)으로 수렴하는 위치로 정의되므로 전기장은 아래의 경계 조건을 만족한다.

$$E\left(x=0\right) \equiv E_0 \tag{2.11}$$

$$E\left(x=s\right) \equiv 0 \tag{2.12}$$

음극 강하 영역 인가 전압 V_0 는 전기 포텐셜의 정의에 따라 전기장과 아래의 관계식을 만족한다.

$$V_0 = -\int_0^s E\left(x\right)dx \tag{2.13}$$

대기압 글로우 방전 충돌성 음극 강하 영역 내 전기장은 선형에 가깝게 나타나므로[22,26] 위 식 (2.10)과 (2.11), (2.12), (2.13)의 조건을 만족하는 선형 전기장을 가정하면 충돌성 음극 강하 영역 내 전기장은 다음과 같다.

$$E\left(x\right) = \frac{2V_0}{s^2}\left(x-s\right) \tag{2.14}$$

식 (2.14)를 통해 음극 표면에서의 전기장 세기와 기울기 수식을 구해 식 (2.9)에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{2V_0}{s^2} \simeq \frac{J_0}{\varepsilon_0\left(1+\gamma_{se}\right)}\left(\frac{e}{M\nu_{i,m}}\frac{2V_0}{s}\right)^{-1} \tag{2.15}$$

위 식을 충돌성 음극 강하 영역 크기 s에 대해 정리하면 다음과

같다.

$$s \simeq \sqrt[3]{4\left(1+\gamma_{se}\right)\varepsilon_0 \frac{e}{M\nu_{i,m}} \frac{V_0^2}{J_0}} \tag{2.16}$$

위 식은 직류 글로우 방전의 충돌성 음극 강하 영역 크기와 음극 강하 영역 인가 전압 그리고 방전기를 통해 흐르는 전류의 관계를 나타낸다. 본 절에서 설명한 직류 글로우 방전의 구조를 그림으로 나타내면 그림 2.2와 같다.

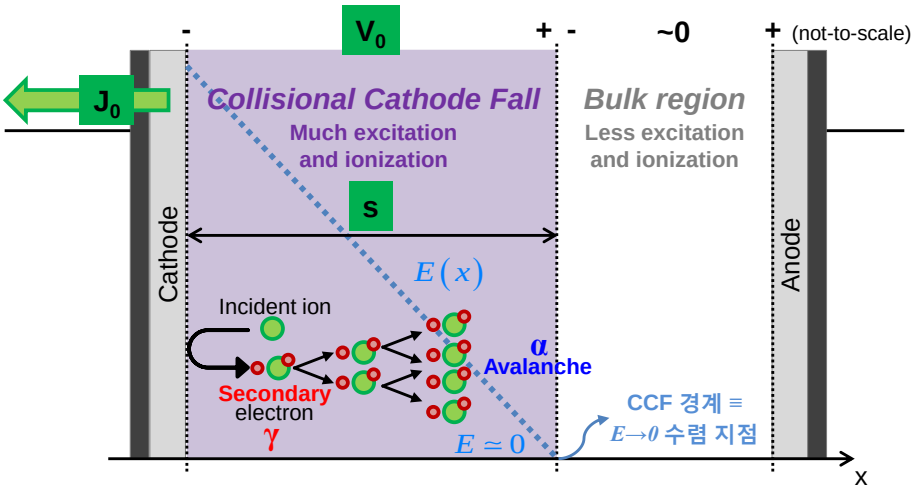

그림 2.2 직류 글로우 방전 시 음극 강하 영역 개요도

2.3 시변화 조건 충돌성 음극 강하 영역

맥스웰 방정식의 암페어 법칙에 따라 전기장의 시변화는 전류와 동일한 역할을 한다. 따라서 충돌성 음극 강하 영역의 인가 전압이 변화하거나 음극 강하 영역 크기가 시간에 따라 변화함으로 발생하는 충돌성 음극 강하 영역 전기장 시변화는 총 전류를 구성하는 하나의 전류로서 나타난다.

$$J_0 = J_c + J_d \tag{2.17}$$

위 식에서 J_0는 시스템을 통해 흐르는 총 전류, J_c는 충돌성 음극 강하 영역 내 이온 및 전자의 이동성 흐름에 의한 전류 그리고 J_d는 전기장 시변화에 따른 전류를 각각 나타낸다. 식 (2.17)의 현상을 시각적으로 나타내면 그림 2.3와 같다.

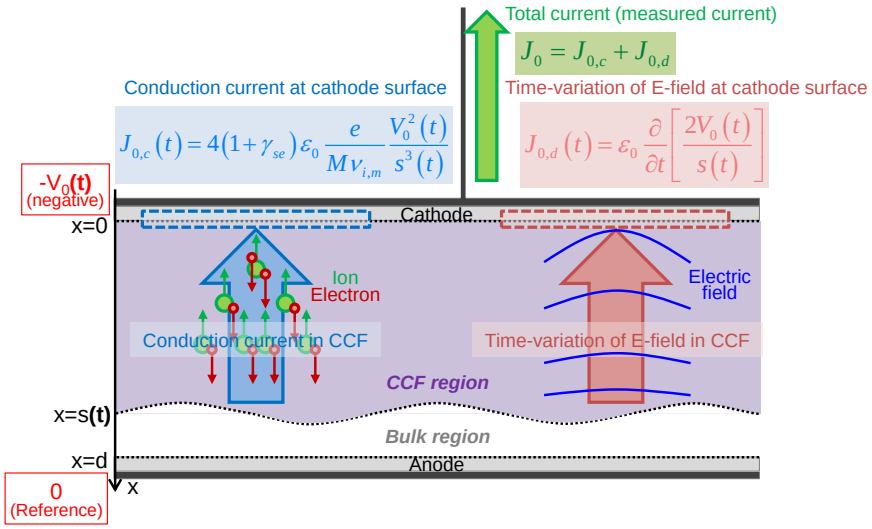

그림 2.3 시변화 글로우 방전 시 음극 강하 내 전류 구성 개요도

그림 2.3는 글로우 방전 시 음극 부근의 충돌성 음극 강하 영역을 확대해 그려 실제 규모를 반영하지는 않는다. 음극 강하 영역을 통해 흐르는 전류는 식 (2.17)에 나타낸 것과 같이 두 가지 형태의 전류로 존재한다. 하나는 그림 2.3의 왼쪽에 표현된 전자와 이온의 실제 이동에 따른 전도 전류(conduction current)이며 다른 하나는 오른쪽에 표현된 전기장의 시간에 따른 변화가 전류로서 나타나는 대체 전류(displacement current)이다. 2.2절에서 소개한 것처럼 충돌성 음극 강하 영역 내에서는 여기 및 이온화가 활발하여 위치에 따라 이온 밀도와 전자 밀도가 변화하므로 이온 전류와 전자 전류의 관계를 알 수 있는 음극 표면에서의 값을 고려한다. 음극 표면(x=0)에서의 전도 전류 J_c 는 식 (2.15)로부터 식 (2.18)과 같이 표현되며 전기장 시변화에 따른 전류 J_d 는 맥스웰 방정식에 따라 식 (2.19)와 같이 표현된다.

$$J_{0,c}(t) = 4(1+\gamma_{se})\varepsilon_0 \frac{e}{M\nu_{i,m}} \frac{V_0^2(t)}{s^3(t)} \tag{2.18}$$

$$J_{0,d}(t) = \varepsilon_0 \frac{d}{dt}\left[\frac{2V_0(t)}{s(t)}\right] \tag{2.19}$$

식 (2.19)의 대괄호 내 수식은 전기장을 나타내는 식 (2.14)에서 음극 표면(x=0)의 전기장 값을 계산한 결과이다. 식 (2.17)에 따라 방전기를 통해 흐르는 총 전류는 다음과 같다.

$$J_0(t) = 4(1+\gamma_{se})\varepsilon_0 \frac{e}{M\nu_{i,m}} \frac{V_0^2(t)}{s^3(t)} + \varepsilon_0 \frac{d}{dt}\left[\frac{2V_0(t)}{s(t)}\right] \tag{2.20}$$

식 (2.20)은 미분 방정식으로서 시변화 조건 글로우 방전의 충돌성

음극 강하 영역 크기와 음극 강하 영역 인가 전압 그리고 방전기를 통해 흐르는 전류의 관계를 나타내며 미분 방정식 풀이를 통해 시간에 따른 음극 강하 영역 인가 전압과 전류로부터 시간에 따른 음극 강하 영역 크기 변화를 알 수 있다.

제 3 장. 실험 장치 구성 및 신호 진단법

3.1 유전체 격벽 방전 장치 및 진단 시스템

그림 3.1은 실험에 사용한 유전체 격벽 방전 장치와 전압·전류 신호 및 광 신호를 측정하기 위한 진단 시스템을 나타낸 개략도이다.

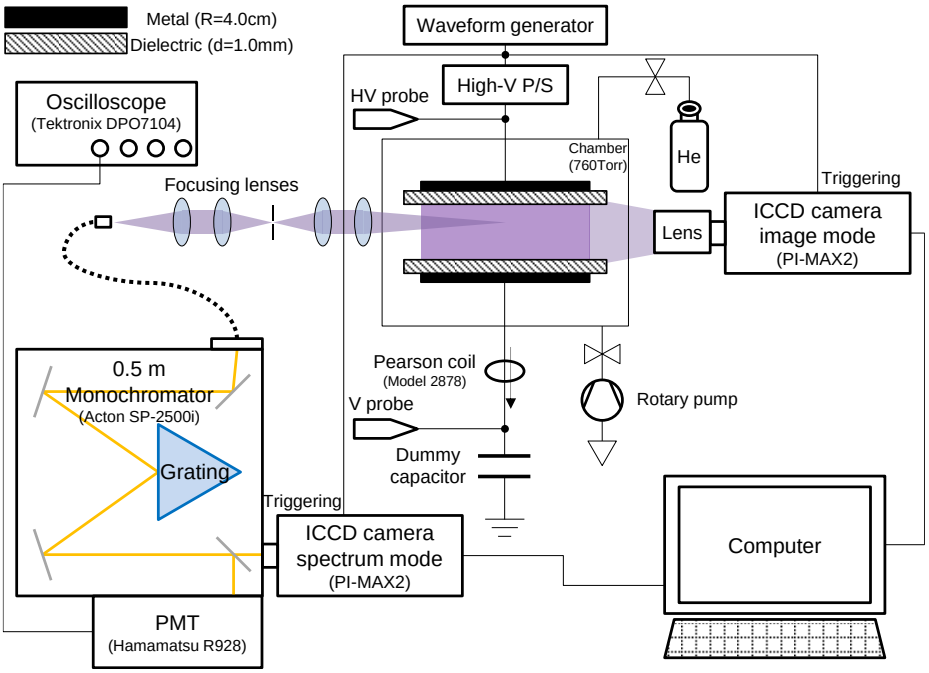

그림 3.1 유전체 격벽 방전 장치 및 진단 장치 시스템 개략도: 방전기를 중심으로 왼쪽 진단계는 전기장 세기 진단 시스템, 오른쪽 진단계는 방전 이미지 측정 시스템

상부와 하부 전극은 반경 4.0 cm의 원판형 구리 전극이며 1.0 mm 두께의 알루미나(Al_2O_3, ε_r=9.8) 유전체로 덮여 있다. 유전체 간 거리, 즉 방전 공간 높이는 선형 가이드에 의해 조절 가능하며 실험에서 사용한 기본 거리는 4 mm 이다. 반응기는 로터리 펌프를 이용해 약 5×10^{-2} Torr의 기저 압력에서 헬륨(N50, 99.999%) 기체로 대기압 760 Torr에 맞추어 운전 압력 조건을 설정한다. 운전 중 방전 가스는 질량유량계(MFC: Mass Flow Controller)를 이용해 0.4 lpm 으로 순환시킨다.

전력은 상부 전극에 인가되며 운전 주파수 20 kHz의 고전압 인가 전원 장치를 사용한다. 2.0 kV_{peak}의 사인 형태 전압 인가 시는 Agilent사의 파형 발생기 33521A의 출력을 TREK사의 전압 증폭기 PZD2000A를 통해 증폭시켜 사용하였고 4.5 kV_{peak}의 사다리꼴 형태 전압 인가 시는 Korea Cottrell사의 NTP 2K를 사용하였다. 하부 전극에는 유전체 표면 전하량 측정을 위해 22 nF의 커패시터를 직렬 연결하였다. 상부 전극에 인가되는 전압은 1000:1 고전압 프로브(Tektronix P6015A), 직렬 커패시터의 전압은 10:1 전압 프로브(Tektronix P2220) 그리고 전류 측정은 피어슨 코일(Pearson No. 2878)을 사용하였고 이들 신호는 모두 오실로스코프 (Tektronix DPO7104)를 통해 계측하였다.

짧은 시간 동안의 이미지와 스펙트럼을 측정하기 위해 인가 전압 신호와 동기화시킨 ICCD 카메라(Princeton Instruments PI-MAX2)와 모노크로메터(Princeton Instruments SP-2500i)를

사용하였으며 카메라의 노출 시간은 0.1 μs로 설정하였다.

방전 공간의 전기장은 플라즈마에서 방출되는 빛 신호를 이용해 측정하였으며(3.2절 참고) 공간 분포 측정을 위해 약 100 μm의 해상도를 갖는 렌즈 배열을 사용하였다. 사용한 렌즈와 배열은 그림 3.2에 나타내었다.

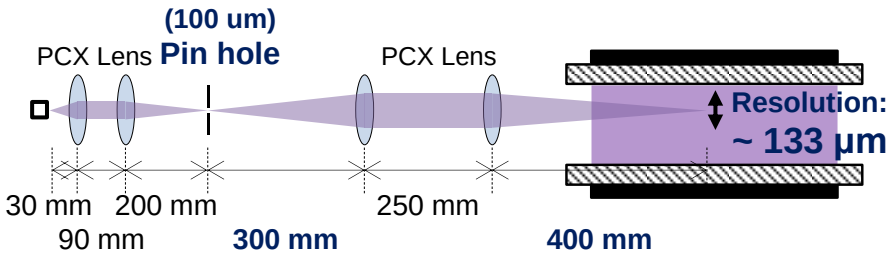

그림 3.2 국소 영역 빛 측정을 위한 렌즈 배열: 렌즈 초점 거리와 핀홀 크기에 의해 초점 거리 위치 해상도 100 um * 400mm / 300mm = 133um

3.2 방전 공간 전기장 분포 측정법

유전체 격벽 방전의 디퓨즈 방전은 타운젠트 방전과 글로우 방전으로 나뉘며 타운젠트 방전은 낮은 공간 전하 밀도로 인한 균일한 전기장 분포의 특징이, 글로우 방전은 음극 강하 영역에 전기장이 집속되는 특징이 있다. 따라서 전기장 분포 측정은 유전체 격벽 방전의 방전 모드 판단에 활용될 수 있다. 또한 음극 강하 영역의 전기장 분포 계산 결과를 실측한 값을 통해 검증함으로써 유전체 격벽 글로우 음극 강하 영역 해석 모델의 적용 가능성을 판단할 수 있다(5.2절 참고).

플라즈마에서 방출되는 빛은 전기장에 의해 가속된 전자 충돌로 인해 여기된 원자 및 분자에서 방출되는 것이므로 측정된 빛 세기는 전기장 세기에 의존하게 된다. 헬륨 대기압 플라즈마의 경우 짧은 충돌 거리로 인해 국소 근사법이 적용 가능하며 두 개의 헬륨 원자 여기 방출 신호 667.8 nm ($3^1D \rightarrow 2^1P$), 728.1 nm ($3^1S \rightarrow 2^1P$) 파장의 빛 세기 비율을 통해 내부 전기장을 계산할 수 있다[27]. 빛 세기의 비율을 사용하는 방법은 전자 밀도에 의한 의존성을 배제할 수 있으며 헬륨의 단일항(singlet) 방출 빛으로서 강한 빛 세기를 가져 약한 신호로부터 전기장을 측정할 수 있다는 장점이 있다. Ivković[27]의 모델을 차용하면 헬륨 대기압의 상온 조건에서 빛 세기 비율에 따른 전기장의 산출 수식은 아래와 같다.

$$E\left(\mathrm{kV/cm}\right) = 2.224 - 20.18R + 45.07R^2 - 19.98R^3 + 3.369R^4 \tag{3.1}$$

위 식에서 E는 전기장, R은 728.1 nm 파장에 대한 667.8 nm

파장의 빛 세기 비율을 각각 의미한다. 참고 논문[27]에 따르면 본 수식을 통한 전기장 산출은 3 kV/cm 이하 값에 대해서는 헬륨 준안정종의 밀도를 알아야만 전기장 세기를 산출할 수 있어 본 연구에서는 약 3 kV/cm 이상의 측정 값만을 사용한다.

빛 세기 비교법을 통한 전기장 측정은 측정기기의 파장 별 측정 민감도를 보정해 주어야 하므로 민감도를 정확히 산출해야만 하며 본 실험 조건에 대해서도 성립하는지 적용 가능성을 확인해 볼 필요가 있다. 따라서 빛 세기 비교법을 이용한 전기장 측정 결과는 일반적인 경우에 대해 성립하며 측정기기의 민감도와 상관 없는 물리적 현상을 이용한 절대적 전기장 측정법 결과와 비교가 필요하며 본 연구에서는 전기장에 따라 원자 에너지 상태가 갈라지는 슈타르크 효과(Stark effect)를 통해 비교 데이터를 산출하였다. 헬륨 원자의 492.2 nm 파장의 빛 신호는 4d ^{1}D 에너지 상태에서 2p ^{1}P^0 에너지 상태로의 허용 천이 빛 신호와 4f ^{1}F 에너지 상태에서 2p ^{1}P^0 에너지 상태로의 일부 금지 천이 빛 신호로 구성된다. 이때 상위 에너지 상태인 4d ^{1}D 와 4f ^{1}F 는 외부 전기장이 존재하면 상호 간 에너지가 변동하며, 492.2 nm 빛 신호의 벌어짐 효과로 나타난다. 헬륨 492.2 nm 방출 신호를 측정한 대표 신호는 그림 3.3과 같다. 그림 3.3의 사각 점들이 ICCD 카메라의 스펙트럼 모드를 통해 측정한 파장 별 빛 세기이고 실선은 오리진 프로그램의 다중 피크 피팅 기능을 통해 얻은 피팅 그래프이다. 굵은 점선은 492.2 nm의 허용 천이(4d ^{1}D → 2p ^{1}P^0) 빛 신호를 나타내고 얇은 점선은 492.2 nm의 금지 천이(4f ^{1}F →

2p $^1P^0$) 빛 신호를 나타내며 두 신호의 합이 실선과 같다.

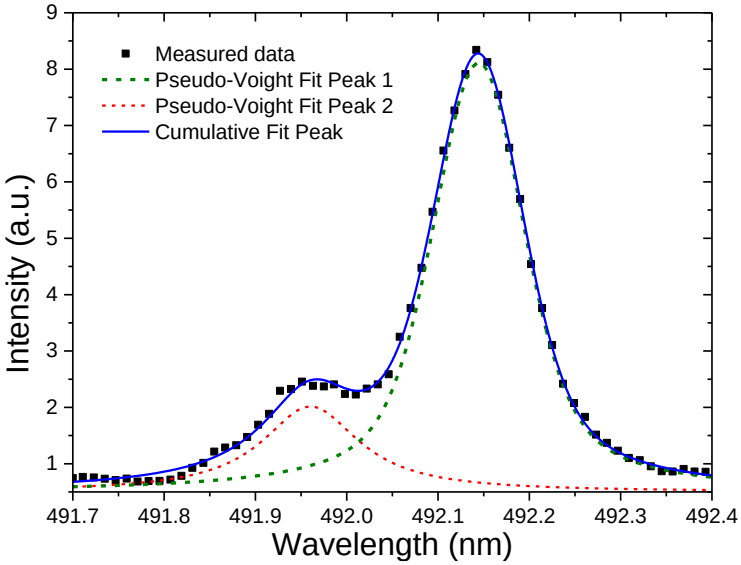

그림 3.3 헬륨 원자 여기 천이 빛 492.2 nm 파장에 따른 빛 세기 분포: 측정 신호(점), 허용 천이 빛 피팅(굵은 점선), 금지 천이 빛 피팅(얇은 점선), 허용 천이와 금지 천이 피팅 합산(실선)

Kuraica[22,28]의 모델에 따르면 전기장과 헬륨의 492.2 nm파장의 벌어짐 정도는 다음의 함수 관계로 나타난다.

$$\Delta\lambda(\mathrm{nm}) = 1.87\times10^{-5}E^3 + 8.8\times10^{-4}E^2 + 1.4\times10^{-3}E + 0.1316 \quad (3.2)$$

위 식에서 E는 kV/cm 단위의 전기장, $\Delta\lambda$ 는 헬륨 492.2 nm 의 허용 천이와 금지 천이 빛 신호 간 파장 차이를 각각 나타낸다. 그림 3.4는 빛 세기 비교법과 슈타르크 진단법으로 전기장 분포를 측정한 결과이다.

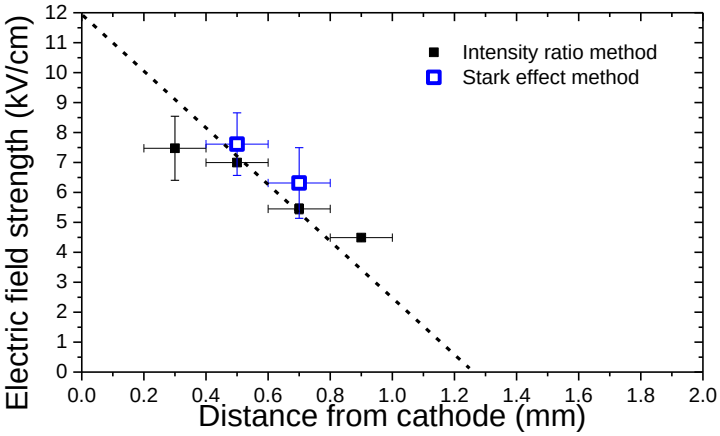

그림 3.4 빛 세기 비교법과 슈타르크 효과로 측정한 전기장 분포

슈타르크 진단법으로 측정한 결과와 빛 세기 비교법으로 측정한 결과를 통해 전기장 분포의 경향과 값의 설명이 가능함을 알 수 있다. 두 가지 진단법의 측정 값은 약 10% 내외의 차이가 나타나므로 빛 세기 비교법을 활용한 실험 결과 해석에 오차율이 약 10% 존재함을 가정한다. 슈타르크 진단법에 사용되는 파장은 빛 세기가 낮아 강한 방전에서만 측정 가능하다는 단점이 있는 반면 빛 세기 비교법을 이용하는 방법은 사용하는 빛의 파장이 헬륨 빛의 주를 이루는 파장들로서 이들의 빛 세기가 높아 약한 방전 신호로부터도 전기장을 측정할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 상대적으로 방출 빛 세기가 낮은 유전체 격벽 타운젠트 방전 및 전이 영역의 전기장 분포 측정에 빛 세기 비교법을 활용할 수 있다.

3.3 방전 공간 전압 산출법

유전체 격벽 방전은 플라즈마의 전자가 유전체 표면에 전자층(electron surface layer)[29]을 구성해 벽면을 하전시켜 공간 전압을 변화시키는 특징이 있다. 방전을 통해 형성된 벽면 알짜 전하(net charge)는 다음 방전까지 유지되어 영향을 미치므로 유전체 격벽 방전을 연구한 여러 논문에서는 이를 메모리 효과(memory effect)로 부르며 메모리 효과에 의한 공간 전압 효과를 메모리 전압으로 호칭한다.[11,30,31] 유전체 표면 하전에 의해 방전 공간의 전압은 인가 전압과 메모리 전압에 의해 결정되므로 메모리 전압을 계산하는 모델이 필요하다.

실험에 사용한 유전체 격벽 방전 시스템(그림 3.1 참고)은 회로 상으로 그림 3.5와 같은 직렬 회로로 구성되어 있다.

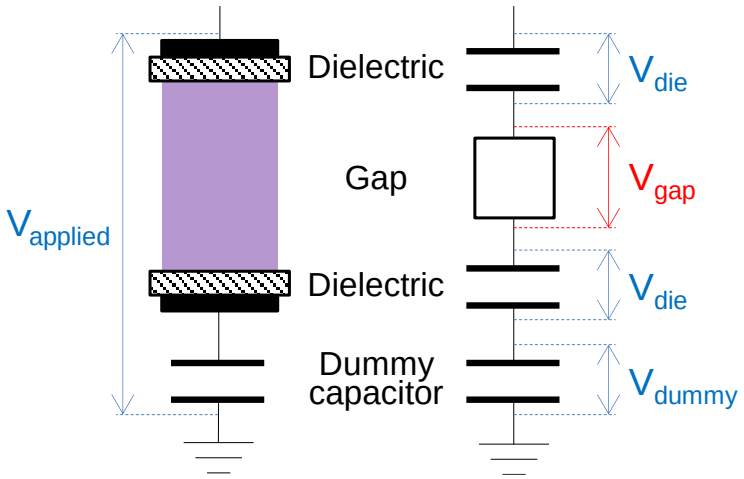

그림 3.5 유전체 격벽 방전 장치의 직렬 회로 표현.

방전 공간 전압은 인가 전압 중 유전체와 직렬 커패시터에 인가되는 전압을 제외함으로써 식 (3.3)과 같이 계산할 수 있다.

$$V_{gap} = V_{applied} - \left(2V_{die} + V_{dummy}\right) \tag{3.3}$$

위 식에서 V_{gap}은 방전 공간 전압, $V_{applied}$는 인가 전압, V_{die}는 유전체에 인가되는 전압 그리고 V_{dummy}는 직렬 커패시터에 인가된 전압을 각각 의미한다. 방전 공간 전압을 결정 짓는 $V_{applied}$와 $2V_{die}+V_{dummy}$가 각각 외부 인가 전압과 메모리 전압이 된다.

방전 시스템은 직렬 회로이므로 방전을 통해 전극 유전체에 축적되는 하전량은 직렬 연결된 외부 커패시터에도 동일하게 축적된다. 직렬 커패시터의 전하량 Q는 정전 용량의 정의에 따라 직렬 커패시터의 정전 용량 C_{dummy}에 커패시터 인가 전압 V_{dummy}를 곱해줌으로서 계산할 수 있으므로 유전체에 인가되는 전압 V_{die}는 유전체를 평행판 축전기로 가정하면 정전 용량의 정의에 따라 아래 식 (3.4)를 통해 계산할 수 있다.

$$V_{die} = \frac{C_{dummy} V_{dummy}}{C_{die}} \tag{3.4}$$

위 식에서 C_{dummy}는 직렬 커패시터의 정전 용량, C_{die}는 평행판 축전기로 가정한 유전체의 정전 용량이다. 유전체의 정전 용량은 평행판 축전기의 정전 용량 계산식을 통해 아래 식 (3.5)로 계산할 수 있다.

$$C_{die} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d_{die}} \tag{3.5}$$

위 식에서 ε_r은 유전체의 상대 유전율, ε_0는 진공에서의 유전율,

A는 방전 면적 그리고 d_{die}는 유전체 두께를 각각 의미한다. 방전 면적은 실험적으로 확인할 수 있으며 실험 조건 별 방전 면적 측정 이미지는 그림 3.6과 같다.

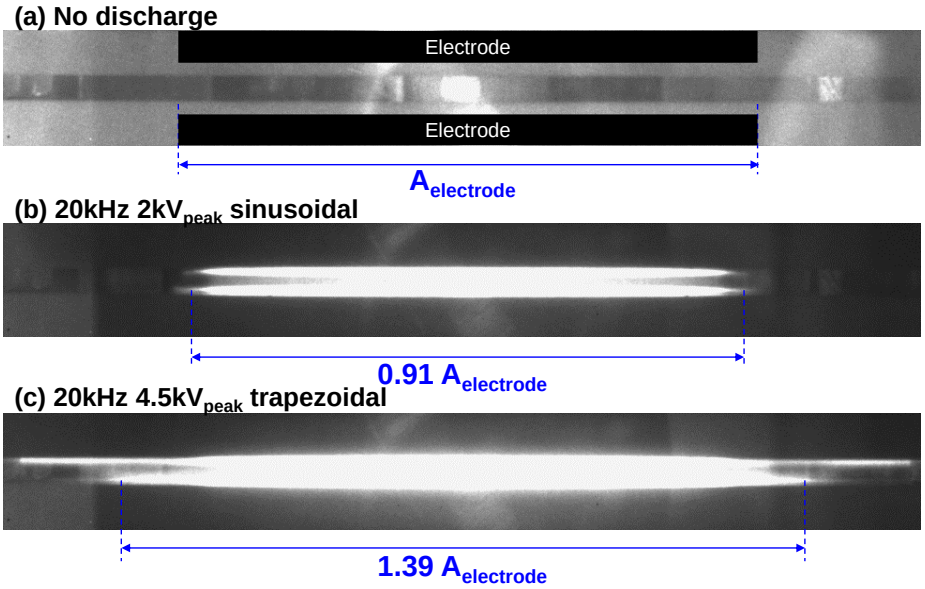

그림 3.6 ICCD 카메라를 이용해 측정한 인가 전압 조건 별 방전 면적: (a) 방전이 없는 경우, (b) 20 kHz, 2.0 kVpeak 사인 파형 조건의 방전 면적, (c) 20 kHz, 4.5 kVpeak 사다리꼴 파형 조건의 방전 면적

방전 면적은 인가 전압 조건에 따라 바뀌며 20 kHz, 2.0 kV_{peak} 사인 파형 조건에서는 전극 면적의 0.91배, 20 kHz, 4.5 kV_{peak} 사다리꼴 파형 조건에서는 전극 면적의 1.39배가 된다.

전압 프로브와 피어슨 코일을 통해 유전체 격벽 방전 시스템(그림 3.1 참고)의 인가 전압, 직렬 커패시터 전압 그리고 전류를 측정한 파형은 그림 3.7과 같다. 그림에 나타난 파형의 인가

전압은 20 kHz, 4.5 kV_{peak} 사다리꼴 파형 조건이다.

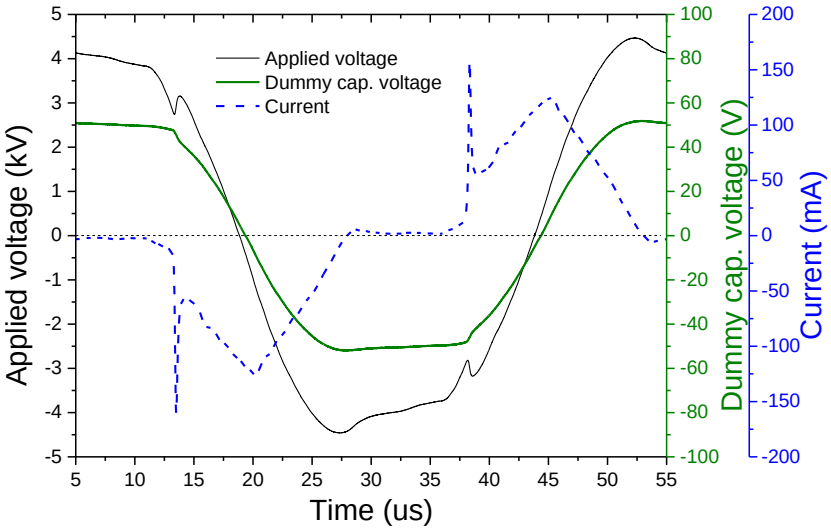

그림 3.7 측정한 인가 전압, 직렬 연결 외부 커패시터 전압, 전류 (20 kHz, 4.5 kV_{peak} 사다리꼴 파형 조건)

위 그림에서 전류의 부호가 양수인 경우는 방전 시스템의 위에서 아래로 전류가 흐르는 경우이며 음수인 경우는 반대 방향이다. 그림 3.7을 통해 전류는 반 주기마다 반대 위상으로 흐르며 이에 따라 직렬 커패시터 전압 또한 변화하고 있음을 확인할 수 있다. 커패시터의 전압은 곧 축전 전하량으로 환산 가능하며 식 (3.4)에 따라 유전체 표면 전하량과 동일하므로 플라즈마가 형성되어 전류가 흐르는 동안 많은 양의 전하가 유전체 표면에 축적되고 전류 위상이 반대가 될 때는 반대편 유전체 표면에 축적되며 이를 반복한다.

그림 3.7의 전압 신호로부터 식 (3.3)을 통해 방전 공간

전압을 계산하면 그림 3.8의 굵은 실선과 같다.

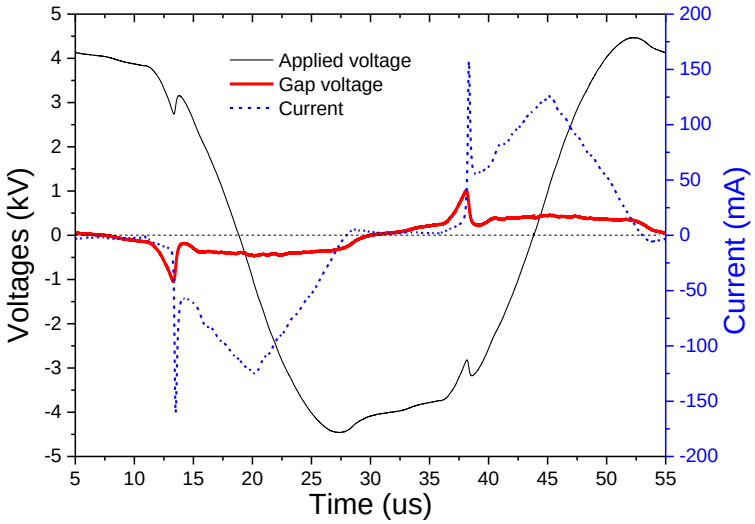

그림 3.8 측정값으로부터 산출한 방전 공간 전압 (20 kHz, 4.5 kV_{peak} 사다리꼴 파형 조건)

방전 공간 전압은 증가하다가 급격히 감소하고 방전 공간 전압 감소와 동시에 전류가 급격하게 증가함을 확인할 수 있다. 이는 직류 글로우 방전에서 나타나는 절연 파괴 현상과 유사하다. 유전체 격벽 방전의 경우 절연 파괴 이후 인가 전압 변화에도 방전 공간 전압은 부호와 크기가 크게 변화하지 않는 현상이 나타나며 이로써 전류의 부호 유지가 설명된다. 이 현상에 대한 상세한 논의는 6장에서 다루도록 한다.

제 4 장. 유전체 격벽 글로우 방전 개시 특성

유전체 격벽 방전은 교류 전원을 인가함에 따라 반 주기마다 극성이 변화하나 대칭적인 방전 형태를 지니므로(그림 3.8 참고) 반 주기 동안의 방전을 살펴봄으로써 전체 주기 방전을 이해할 수 있다. 반 주기 동안의 시간 변화에 따른 유전체 격벽 방전 이미지를 ICCD 카메라를 이용해 측정한 결과와 그 때의 전류 및 방전 공간 전압은 그림 4.1에 나타내었다.

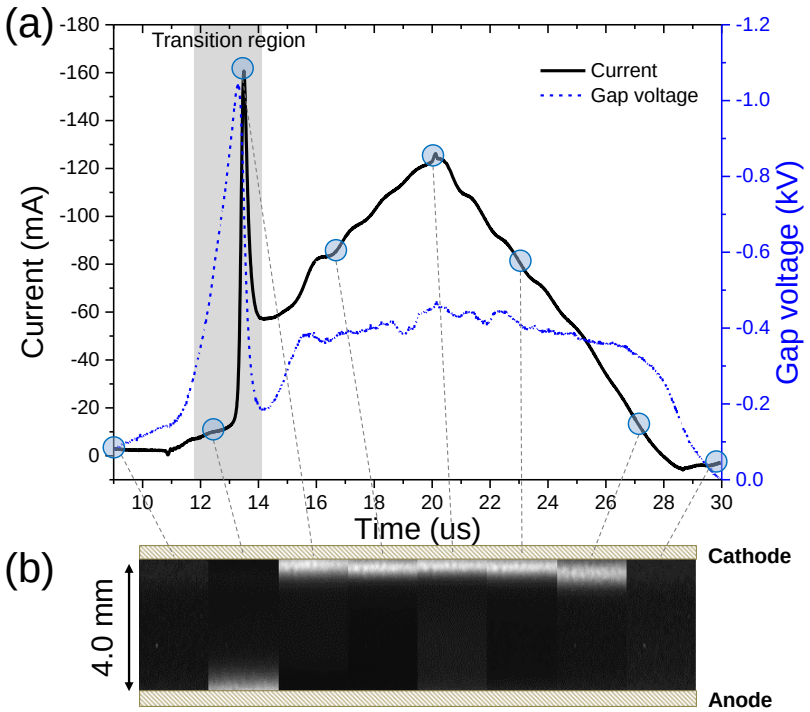

그림 4.1 반주기 동안 전류, 방전 공간 전압 및 ICCD 이미지

측정한 이미지로부터 방전 초기 빛은 양극 부근에서 발하고 전류가 급격히 상승하며 음극 부근에서 밝은 빛이 방출되므로 발광 영역의 이동이 있음을 알 수 있다. 이는 두 순간에서의 방전 특성이 다르며 두 방전 모드 간 변화는 순간적이므로 세밀한 변화 관찰이 필요하다. 그림 4.2는 그림 4.1의 전이 영역(transition region)에 집중하여 ICCD 카메라를 이용해 0.1 μs 시간 간격으로 방전 공간 방출 빛을 측정한 결과와 그 때의 전류 및 방전 공간 전압이다.

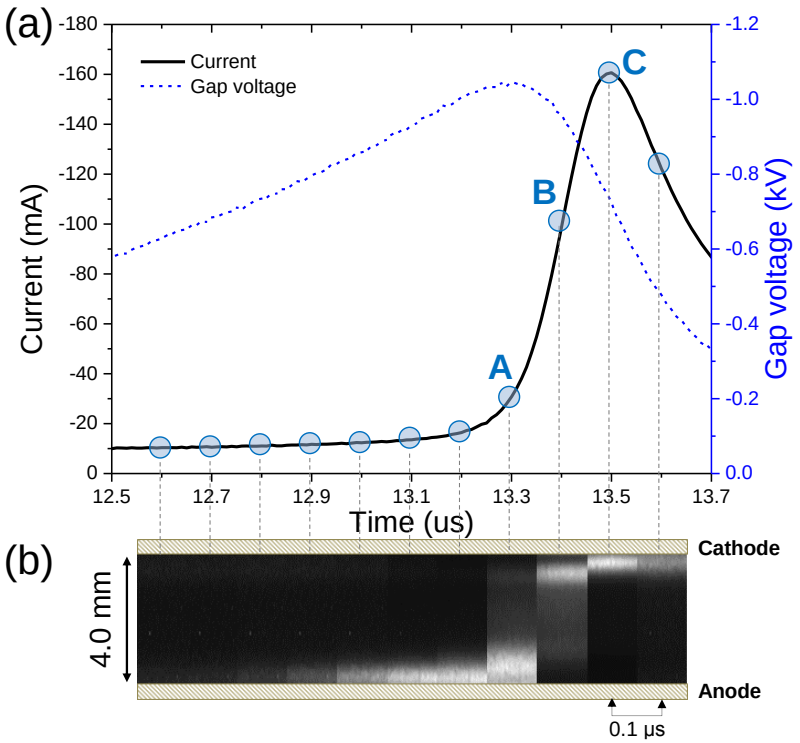

그림 4.2 모드 전이 영역의 전류, 방전 공간 전압 및 ICCD 이미지

초기 A 지점 이전에서 미약하게 상승하는 전류는 방전 공간 전압이 시간에 따라 증가함으로 나타나는 변위 전류와 공간 내

자유 전자의 가속으로 인한 전자 사태가 만드는 전류이다. 이 영역은 방전 공간 전압 증가로 전기장이 강해지는 영역이며 이온화 에너지 이상의 에너지를 얻는 고에너지 전자들이 중성입자를 이온화시키며 진행해 전자 사태가 일어난다. 이때의 방전은 전자 공급원이 없어 스스로 유지(self-sustain)되지 않아 전자 밀도가 낮은 전류로 형성된다. 양극 방향으로 전자 사태가 진행되므로 전자 밀도가 높아진 양극 부근에서 빛 방출 영역이 존재하는 것이 관측된다. A 지점에서의 빛 세기 공간 분포는 그림 4.3(a)에 나타내었다.

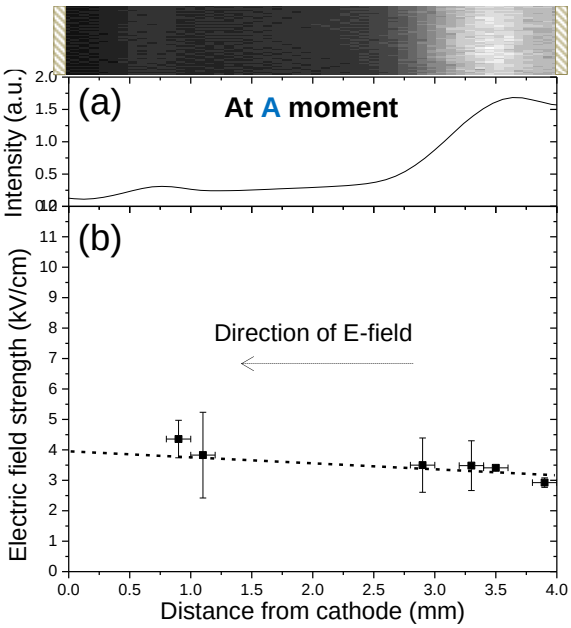

그림 4.3 그림 4.2의 A 순간에서의 빛 세기(a) 및 전기장 분포(b)

음극 부근에 비해 양극 부근에서 밝은 빛이 나타나며 전기장을

측정한 결과는 그림 4.3(b)에 나타내었다. A 지점에서는 양극으로 갈수록 이온화로 인한 전하들로 인해 전기장이 일부 줄어드나 외부 전기장을 왜곡시킬 만큼의 공간 전하 밀도가 형성되지 않은 특징을 보였으며, 크기가 3~4 kV/cm으로 방전 공간에 전기장이 균일하게 분포하고 있음을 보여준다. 방전 공간에 전기장이 균일하므로 양극 부근의 밝은 빛은 전자 밀도가 높아 나타나는 현상이며 이는 유전체 격벽 타운젠트 방전의 특징[32]으로서 A 지점의 플라즈마는 타운젠트 방전 모드임을 알 수 있다.

A 지점에서의 V_{gap}은 약 1.1 kV의 최대값을 가지고 이후 급격히 감소한다. 이 전압을 전극 거리 4 mm 로 나누면 약 3kV/cm의 전기장이 인가된 것으로 예상되고, 이는 그림 4.3(b)에서 보여주는 측정값과 유사하다. 3~4 kV/cm의 전기장 값은 헬륨의 유전 강도(dielectric strength) [33,34]인 약 5 kV/cm 보다 낮게 나타나는데 이는 유전체 표면 전자와 이전 방전을 통해 생성된 헬륨 준안정종이 다음 방전까지 살아남아 단계 이온화 및 페닝 이온화로서 전 이온화(pre-ionization)의 역할을 하기 때문이다. 실험에 사용된 방전 조건에서는 플라즈마가 소멸하고 다음 방전이 일어나기까지 약 9 μs가 소요되는데(그림 3.7) 주로 헬륨의 삼체 충돌(three-body collision: $He^m + He + He \rightarrow He_2^* + He$)에 의해 결정되는 대기압 조건에서의 헬륨 준안정종의 1/e 감소 수명(e-folding lifetime)[35]은 약 5.8 μs 이므로 이전 방전에서 생성된 준안정종 중 약 21%가 다음 주기 방전 개시에 단계 이온화 및 페닝 이온화로서 영향을 주며 이로써 절연 파괴

전압이 낮게 나타난다. 인가 주파수 조건을 변화시켜 방전 소멸 기간을 조절할 수 있으며 10 kHz 와 1 kHz 에 대해서 실험한 결과 절연 파괴 전압이 각각 1.2 kV와 1.4 kV로 나타나고 이는 헬륨 준안정종의 시간에 따른 밀도 변화와 함께 그림 4.4에 나타내었다.

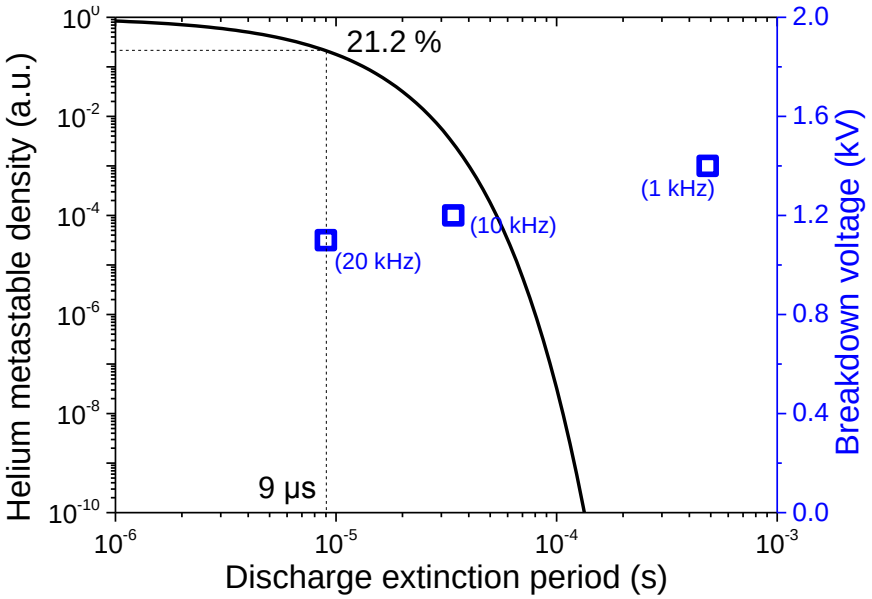

그림 4.4 헬륨 준안정종의 시간에 따른 밀도 변화 및 인가 주파수 10 kHz, 1 kHz 에 대한 방전 공간 전압 측정 결과

위 결과를 통해 방전 소멸 주기가 긴 경우 헬륨 준안정종의 밀도 감소로 전 이온화(pre-ionization) 효과가 줄어 절연 파괴 전압 감소 효과가 낮아짐을 알 수 있다.

방전 공간 전압이 떨어지기 시작하고 전류가 급격히 증가하는 B 지점이 되면 양극에서의 빛은 중심 영역으로 보다 이동하고 음극에서는 양극 쪽에 비해 밝은 빛이 방출되는 영역이 존재하게

된다(그림 4.5(a)).

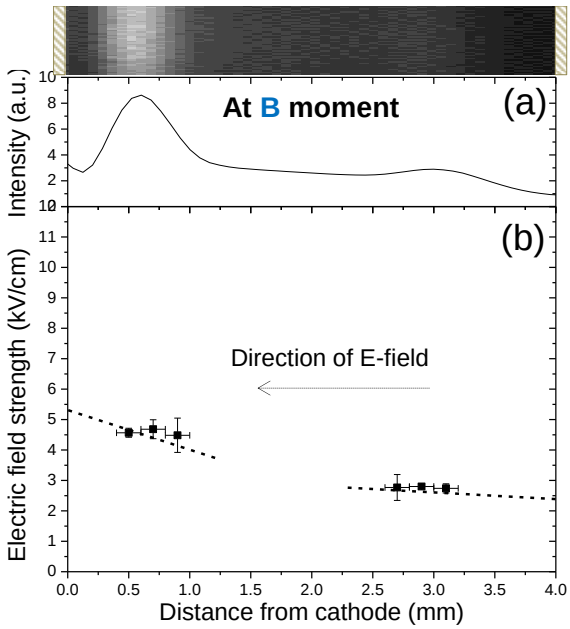

그림 4.5 그림 4.2의 B 순간에서의 빛 세기(a) 및 전기장 분포(b)

이는 모드 전이가 일어나고 있음을 보여 주는 결과로서 타운젠트 방전을 통해 생성된 이온들이 전기장을 따라 음극으로 이동해 음극 충돌로부터 이차 전자가 방출되기 시작하며 음극 쪽에서 플라즈마 형성이 심화되는 과정이다. 이 전이 과정을 통해 음극 쪽 이온 밀도는 점차 심화가 되어 그림 4.5(b)에서 보여 주듯이 음극 근처 전기장이 왜곡되기 시작한다. 이는 음극 부근에서 2차 전자 방출로 이온화가 활발히 진행되고 전자는 확산되어 전기장 형성에 기여하기 때문으로 이 때 방전 모드가 변화하고 있음을 알 수 있다.

이후 C 지점이 되면 양극 부근에서 시작된 빛은 중심 영역까지

고루 분포하게 되고 음극 부근에서 매우 밝은 빛이 방출된다(그림 4.6(a)).

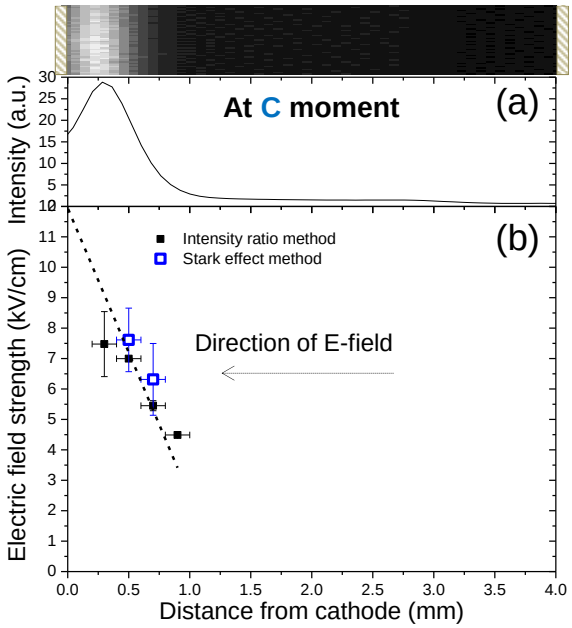

그림 4.6 그림 4.2의 C 순간에서의 빛 세기(a) 및 전기장 분포(b)

이 지점에서의 방전은 타운젠트 방전을 통해 형성된 이온이 음극 유전체 면에 충돌하여 음극에서 전자 사태의 씨앗이 되는 전자들이 제공되므로 전류 밀도가 크게 형성되며 음극 앞에 전위 변화 공간, 즉 음극 전압 강하 영역이 형성된다. 이 공간에서는 유전체 전극 면에서 방출된 이차 전자와 이온화로부터 생성된 전자들이 전기장에 의해 밀려나고 생성된 플라즈마 이온이 남아 높은 양의 공간 전하 밀도를 형성하므로 전기장 세기가 높다(그림 4.6(b)). 이는 유전체 격벽 글로우 방전의 특징으로서 C 지점의 플라즈마는

글로우 방전 모드임을 알 수 있다. 음극 표면에서의 전기장 세기는 약 12 kV/cm이며 음극으로부터 멀어 지며 선형적으로 전기장 세기가 감소함을 알 수 있다. 이는 기존에 발표된 대기압 글로우 방전의 전기장 분포와 매우 유사하다.[22,26] 음극 강하 영역의 크기는 약 1.2 mm로 나타나며 따라서 전기장 분포로부터 산출한 음전극 전압 강하 영역의 전압은 약 700 V가 된다. 이는 C 지점에서의 방전 공간 전압 값 700 V로 설명된다. 즉 외부에서 인가되는 전압의 대부분이 음극 강하 영역에 인가되어 영역 내 강한 전기장에 의해 가속된 전자가 이온화 및 여기 반응을 활발하게 일으키므로 방전이 안정적으로 유지되고 음극 부근에서 밝은 빛이 방출된다. 전기 포텐셜의 변화가 거의 없는 벌크 영역에서는 전자와 이온이 비슷하게 존재하는 준중성상태가 형성되므로 전기장의 세기가 매우 작아 본 측정 방법을 통한 전기장 측정은 어렵다.

측정한 각 지점의 전기장 분포를 통해 가우스 법칙(Gauss' law)으로부터 A~C 각 지점의 음극 강하 영역 내 알짜 공간 전하 밀도를 계산할 수 있다.

$$n_{net} = n_i - \left(n_{e,iz} + n_{e,2nd}\right) = \frac{\varepsilon_0}{e}\vec{\nabla}\cdot\vec{E} \qquad (4.1)$$

위 식의 아래 첨자 iz와 2nd는 공간의 전자 종류를 구분해 표현한 것이다. 식 (4.1)을 이용해 계산한 결과는 그림 4.7과 같다.

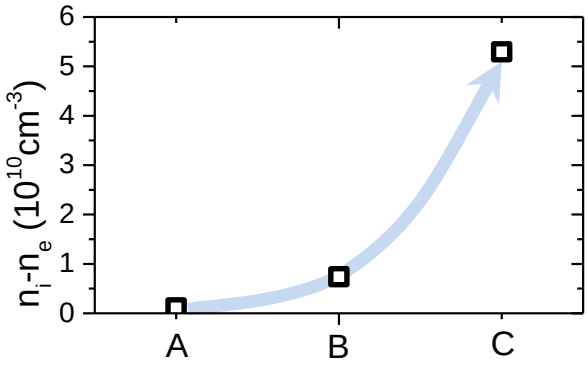

그림 4.7 A~C 각 지점의 음극 강하 영역 내 알짜 공간 전하 밀도

음극 강하 영역 내 전자 밀도는 전기장에 의해 밀려나 이온 밀도에 비해 매우 낮아 알짜 전하 밀도는 이온 밀도로 가정할 수 있으므로 위 결과를 통해 타운젠트 방전(A 지점)에서 글로우 방전(C 지점)으로 전개하며 이온화가 활발해져 음극 강하 영역 내 이온 밀도가 약 1.07×10^{9} cm^{-3}에서 5.30×10^{10} cm^{-3}으로 급격하게 상승함을 알 수 있다.

이로써 유전체 격벽 방전은 타운젠트 방전에서 절연 파괴를 일으켜 글로우 방전으로 전이되므로 직류 방전과 유사하게 형성됨을 알 수 있다. C 지점 이후로의 방전은 유전체 격벽 글로우 방전이 안정적으로 유지되는 영역으로서 음극 부근에서 밝은 빛을 발하는 음극 강하 영역이 유지됨을 알 수 있다(그림 4.1 참고). 이 영역의 글로우 방전은 방전 공간 전압 및 전류가 시간에 따라 큰 변화 없이 안정적으로 유지되므로 정상 상태 직류 글로우 방전의 특징을 가지고 있을 것이라 유추할 수 있으며 이는 다음 장에서 설명하도록 한다.

제 5 장. 유전체 격벽 음극 강하 영역의 직류 방전 특성

5.1 빛 세기 분포를 통한 음극 강하 영역 경계 확인

유전체 격벽 글로우 방전의 음극 강하 영역 경계가 전기장 세기가 0으로 수렴하는 위치로 정의됨에 따라 음극 강하 영역 크기는 전기장 분포로부터 확인할 수 있다. 대기압 방전은 플라즈마-중성입자 간 수 많은 충돌로 인해 플라즈마로부터의 방출 빛이 해당 위치 전기장 값에 의해 결정되는 국소 근사(local approximation)가 적용되는 압력 영역이므로 빛 세기 분포가 전기장 분포를 반영하게 된다. 따라서 빛 세기와 전기장 분포의 비교를 위해 유전체 격벽 방전의 글로우 방전이 유지되는 영역의 한 순간(글로우 유지 영역의 전류 피크)에서의 전기장 분포 측정 결과와 동시간의 빛 세기 분포를 그림 5.1(a),(b)에 나타내었다.

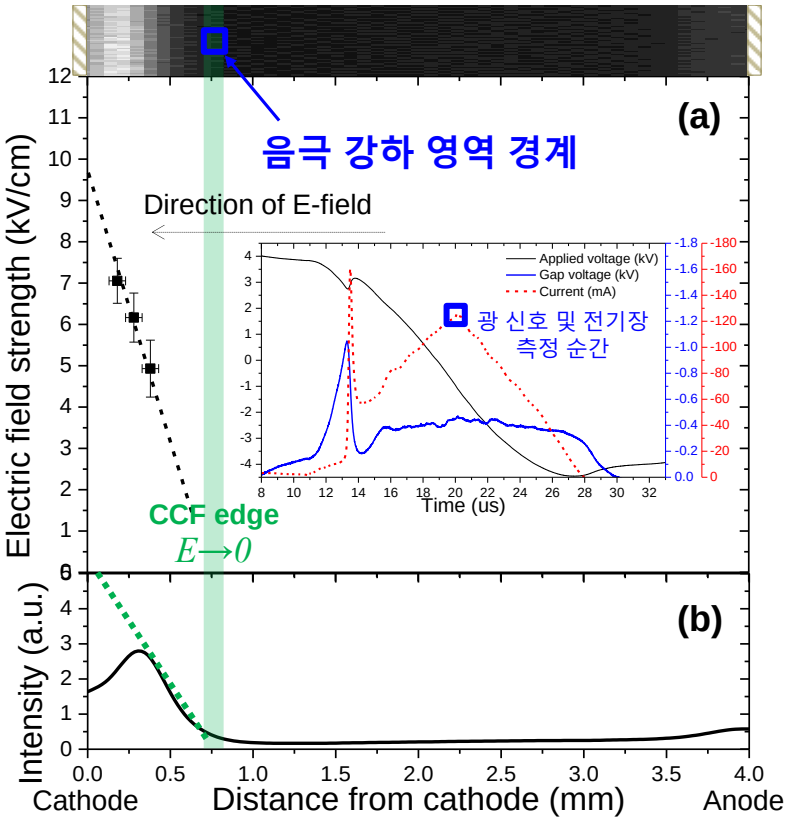

그림 5.1 글로우 유지 영역 전기장 분포 측정 결과와 빛 세기 분포 측정 결과 (20 kHz, 4.5 kV_{peak} 인가 시 글로우 유지 전류 피크)

측정 결과로부터 전기장 분포와 빛 세기 분포는 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 그림 5.2에 나타나듯 대기압 헬륨 조건에서의 전자 에너지 완화 길이가 음극 강하 영역에 비해 매우 짧아 국소 근사가 적용 가능한 조건이기 때문이다.[36]

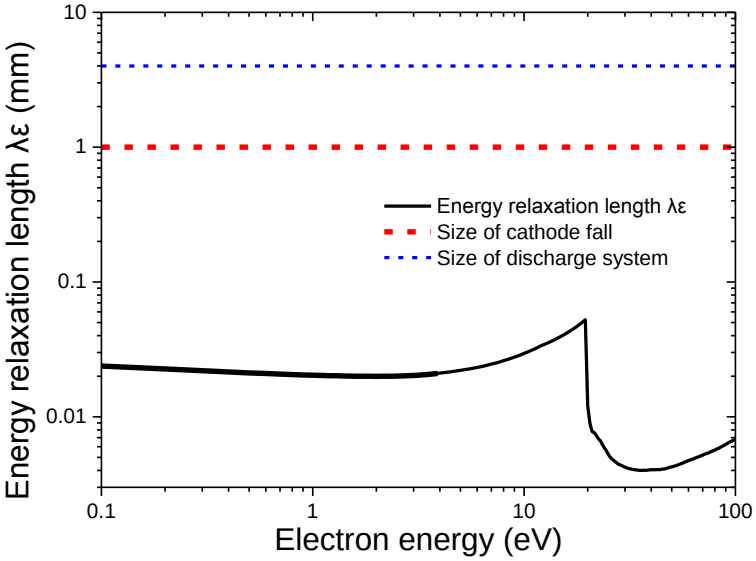

그림 5.2 대기압 헬륨 조건의 전자 에너지 완화 길이(실선), 음극 강하 영역 크기(굵은 점선) 그리고 방전 시스템 크기(얇은 점선)

따라서 빛 세기 분포로부터 음극에서 멀어 지며 빛 세기가 감소하는 영역을 통해 음극 강하 영역의 경계를 확인할 수 있다. 음극에 근접한 영역에서 빛 세기가 약한 이유는 유전체 표면에서 방출된 2차 전자가 이온화를 통한 전자사태 과정에 있으며 음극 포텐셜에 의해 밀려나 밀도가 낮기 때문이다.

방전 공간 전압이 크게 변동하지 않는 글로우 안정적 유지 영역에 대해 2.0 kV의 사인 파형과 4.5 kV의 사다리꼴 파형 인가 전압 조건의 빛 세기 분포로부터 음극 강하 영역 경계를 유추한 결과는 그림 5.3과 그림 5.4에 나타내었다.

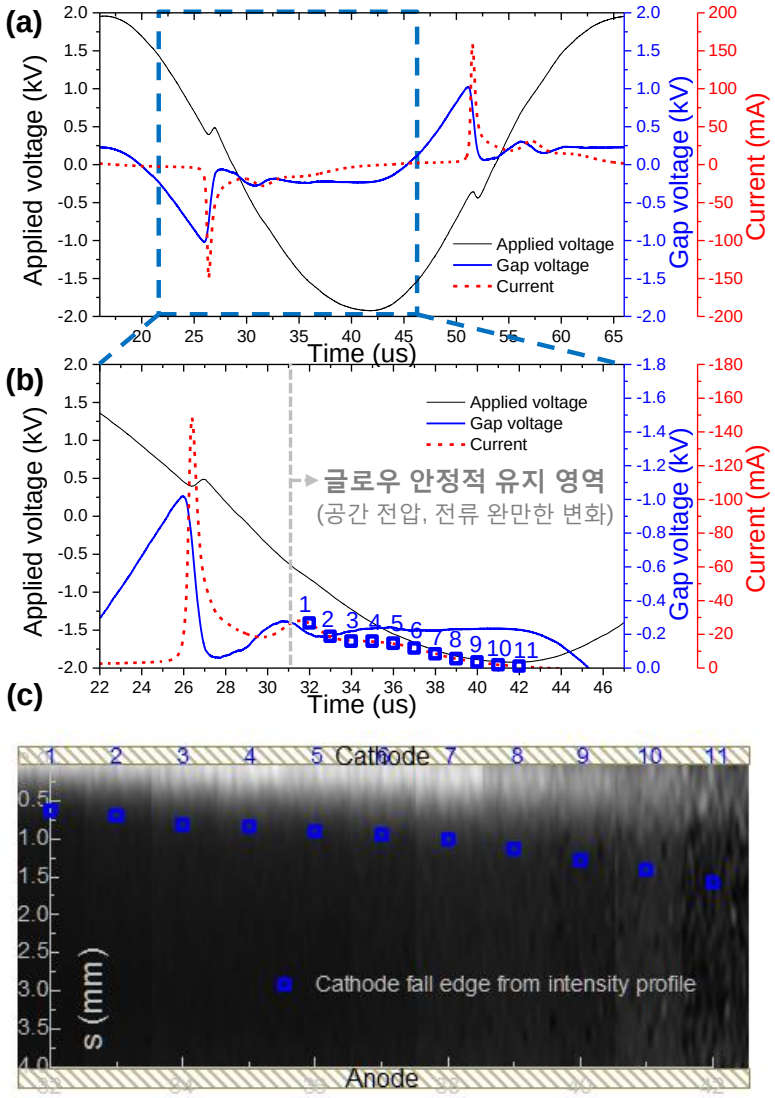

그림 5.3 사인(sinusoidal) 파형 20 kHz, 2.0 kV_{peak} 인가 시 글로우 유지 영역 방전 ICCD 이미지와 음극 강하 영역 경계 위치

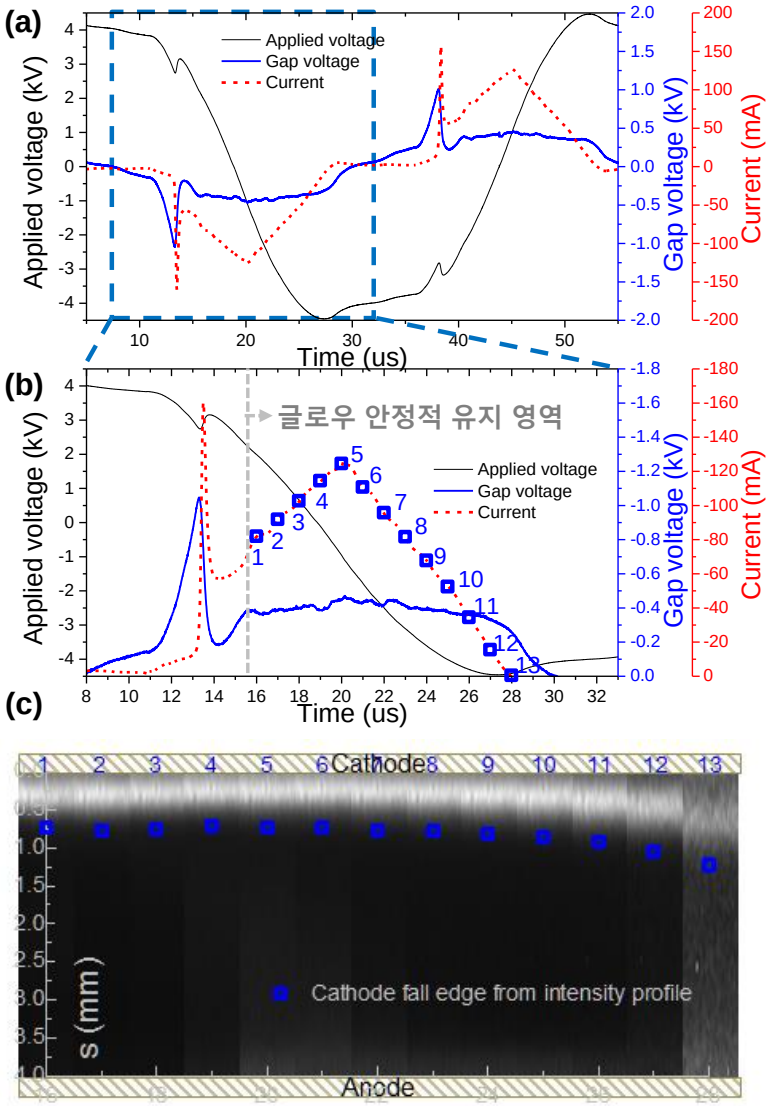

그림 5.4 사다리꼴(trapezoidal) 파형 20 kHz, 4.5 kV_{peak} 인가 시 글로우 유지 영역 방전 ICCD 이미지와 음극 강하 영역 경계 위치

위 결과로부터 음극 강하 영역이 오랜 기간(>10us) 상부 전극(음극) 부근에 유지되며 방전 공간 전압의 부호 및 크기가

유지됨을 알 수 있다. 이는 직류 방전과 유사한 조건으로서 유전체 격벽 방전의 음극 강하 영역에 직류 글로우 방전의 음극 강하 모델을 적용할 수 있다. 측정한 전류 값과 음극 강하 영역 크기로부터 전류가 감소함에 따라 음극 강하 영역 크기는 증가하며 전류가 증가하는 영역에서는 음극 강하 영역 크기가 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 방전 공간 전압과 음극 강하 영역 크기 변화가 음극 강하 영역 전기장 세기를 바꾸어 이온과 전자에 의한 전류 크기가 변화되어 나타나는 것이다.

5.2 직류 방전 특성을 이용한 음극 강하 영역 크기 해석

저주파(~kHz)를 사용하는 대기압 유전체 격벽 방전은 운전 주파수가 이온 및 전자-중성입자 간 충돌 빈도(~G,THz)와 열운동 속도를 시스템 크기로 나누어 구한 전자 및 이온의 특성 주파수(~MHz)에 비해 변화가 매우 느리므로 내부 물리 현상이 일어나는 시간 규모(scale)가 음극 강하 영역 내 절연 파괴 전기장이 유지되는 시간 규모보다 월등히 짧아 순간의 현상은 방전 공간 양단에 전압이 인가된 직류 방전과 유사하다. 또한 반 주기 이전 방전을 통해 음극 유전체 표면에 전자층이 존재하므로 음극으로부터 2차 전자가 유입될 수 있고 음극 강하 영역 내 이온화 충돌이 많이 일어나므로 유전체 격벽 글로우 방전의 음극 강하 영역은 직류 글로우의 충돌성 음극 강하 영역과 유사하다. 따라서 직류 글로우 충돌성 음극 강하 영역에 관한 식을 통해 음극 강하 영역 인가 전압과 방전기를 통해 흐르는 전류 값으로부터 유전체 격벽 글로우 방전의 음극 강하 영역 크기를 계산할 수 있다. 참고 논문[37]의 저주파 대기압 유전체 격벽 방전 전산 모사 결과에 따르면 대기압 유전체 격벽 글로우 방전은 음극 강하 영역에 전기장이 집속 되어 방전 공간 전압의 대부분이 음극 강하 영역에 인가됨을 알 수 있다. 따라서 식 (3.3)을 통해 계산한 방전 공간 전압을 음극 강하 영역 인가 전압으로 가정할 수 있다. 유전체 격벽 글로우 방전을 직류 글로우 방전으로 가정하면 식 (2.16)을 통해 음극 강하 영역 크기를 계산할 수 있다. 식의 적용에 앞서

유전체 격벽 방전의 경우 전극 면이 유전체 면이므로 2차 전자 방출 계수 계산이 일부 변경되어야 한다.

2차 전자 방출 계수 식 (2.6)의 ε_ϕ 는 음극 전극의 일함수를 의미한다. 일함수로 표현되는 것은 음극의 재질이 도체인 경우 전도대(conduction band)와 가전자대(valence band)가 겹쳐진 영역 내에 페르미 에너지(Fermi energy)가 위치하므로 전자를 자유 공간(free space)으로 이동시킬 때 필요한 최소한의 에너지가 일함수이기 때문이다. 음극 재질이 유전체인 격벽 방전의 경우 반주기 이전의 방전을 통해 전도대에 형성된 전자층(electron layer)에서 2차 전자가 방출되므로 유전체의 전자 친화도(electron affinity)가 전자를 자유 공간으로 이동시키기에 필요한 최소한의 에너지가 된다.[29] 따라서 유전체 격벽 방전의 경우 2차 전자 방출 계수 식 (2.6)는 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma_{se} \approx 0.016\left(\varepsilon_i - 2\chi\right) \tag{5.1}$$

위 식에서 χ 는 음극 유전체의 전자 친화도이다. 따라서 알루미나(alumina, Al_2O_3)에 헬륨 이온이 충돌하는 경우 알루미나의 전자 친화도 2.5 eV와 헬륨의 이온화 에너지 24.6 eV를 통해 2차 전자 방출 계수를 계산하면 약 0.313 이다.

따라서 유전체 격벽 글로우 방전의 직류 글로우 가정 시 음극 강하 영역 크기 계산 결과를 5.1절의 음극 강하 영역 경계

측정값과 함께 그리면 그림 5.5, 그림 5.6의 흰색 점선과 같다.

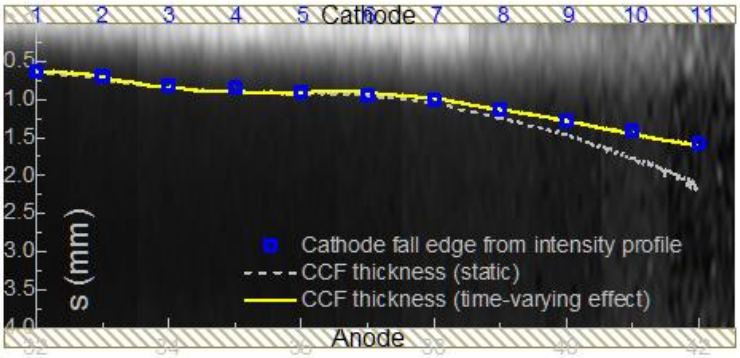

그림 5.5 방전 공간 간격 4 mm 조건의 사인(sinusoidal) 파형 20 kHz, 2.0 kV_{peak} 인가 시 음극 강하 영역 경계 위치와 두께 계산 결과

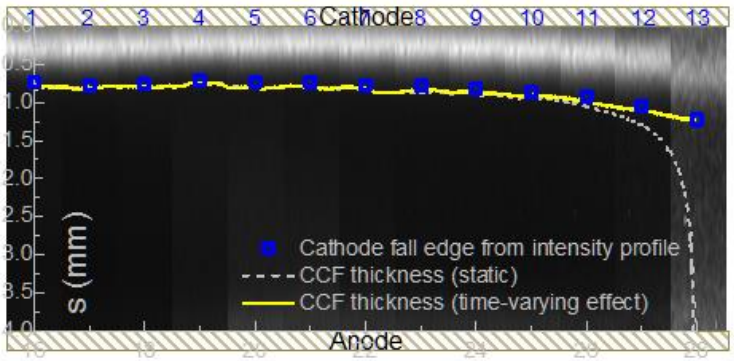

그림 5.6 방전 공간 간격 4 mm 조건의 사다리꼴(trapezoidal) 파형 20 kHz, 4.5 kV_{peak} 인가 시 음극 강하 영역 경계 위치와 두께 계산 결과

이는 매 순간의 방전 공간 전압과 전류 값을 통해 계산한 결과이며 글로우 유지 영역 초·중반에서 측정한 음극 강하 영역 크기와 일치함을 보인다. 따라서 저주파 유전체 격벽 글로우 방전의 음극

강하 영역은 직류 글로우 방전의 충돌성 음극 강하 영역 특징을 가짐을 알 수 있다. 그러나 글로우 유지 영역 후반부에서는 직류 글로우 가정을 통한 계산 결과와 측정 결과가 다소 일치하지 않는데 이는 유전체 격벽 글로우 방전 소멸 단계로서 방전 공간 전압, 전류 및 음극 강하 영역 크기가 시간에 따라 크게 변화하여 음극 강하 영역의 전기장이 시간에 따라 변하며 전류의 역할을 분담하기 때문이다. 따라서 유전체 격벽 방전은 2.3절의 시변화 조건 충돌성 음극 강하 영역 모델을 적용하여야 하며 계산에 사용될 미분 방정식은 식 (2.20)으로부터 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{V_0(t)}{s(t)}\right]+2\left(1+\gamma_{se}\right)\frac{e}{M\nu_{i,m}}\frac{V_0^2(t)}{s^3(t)}=\frac{J_0(t)}{2\varepsilon_0} \tag{5.2}$$

방전 공간 전압 V_0 와 시스템을 통해 흐르는 전류 J_0 는 측정값이므로 미분 방정식 풀이를 통해 전기장 시변화가 고려된 정장 상태 글로우 음극 강하 영역 크기 s 를 계산할 수 있다. 수치 해석법을 통해 계산한 음극 강하 영역 크기 결과를 앞의 직류 글로우 방전을 가정한 결과와 함께 나타낸 것이 그림 5.5, 그림 5.6의 노란 실선이다. 계산에 사용한 미분방정식 풀이 수치 해법은 4차 룽게-쿠타(4th-order Runge-Kutta: RK4) 법이다. 전기장 시변화를 고려한 크기 결과는 글로우 유지 영역 전반에서 측정한 음극 강하 영역 크기와 일치함을 보인다. 또한 방전 공간 간격 6 mm 와 8 mm 조건의 실험 결과(그림 5.7과 그림 5.8)에서도 동일하게 설명 가능하다.

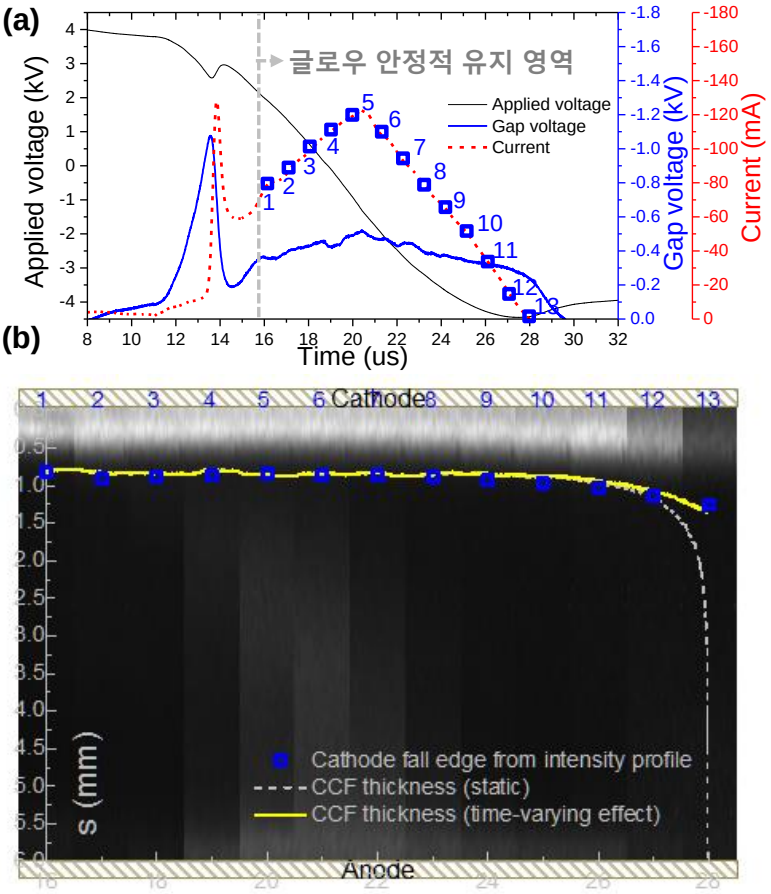

그림 5.7 방전 공간 간격 6 mm 조건의 사다리꼴(trapezoidal) 파형 20 kHz, 4.5 kV_{peak} 인가 시 음극 강하 영역 경계 위치와 두께 계산 결과

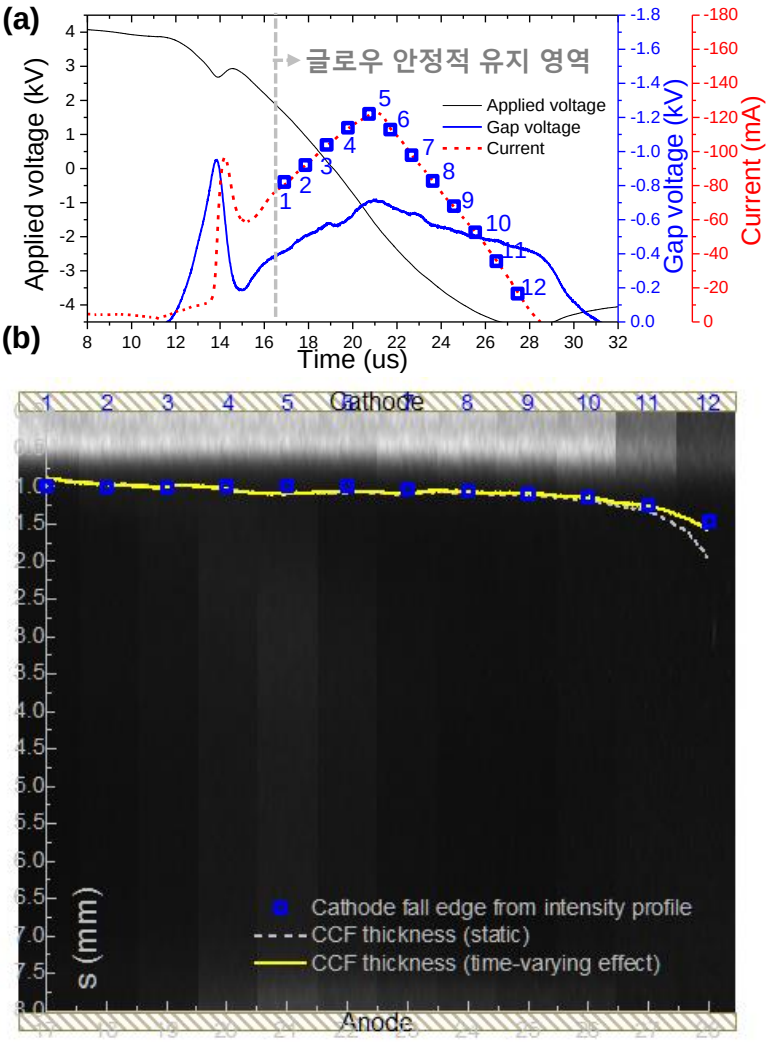

그림 5.8 방전 공간 간격 8 mm 조건의 사다리꼴(trapezoidal) 파형 20 kHz, 4.5 kV_{peak} 인가 시 음극 강하 영역 경계 위치와 두께 계산 결과

방전 공간 6 mm와 8 mm 크기 조건의 방전에서 알 수 있는 유전체 격벽 방전 특징은 방전 공간 크기가 커짐에도 음극 강하 영역 크기는 크게 증가하지 않는다는 것이다. 음극 강하 영역 크기는 음극 강하 영역 인가 전압과 시스템을 통해 흐르는 총 전류로 인해 결정되므로 방전 공간 크기 변화에도 음극 강하 영역 크기 변화가 없다는 것은 방전 공간 전압의 대부분이 음극 강하 영역에 인가되며 유전체 격벽 글로우 방전은 음극 강하 영역에서의 이온화로 유지됨을 의미한다.

다양한 조건의 유전체 격벽 글로우 방전 음극 강하 영역 크기가 직류 글로우 방전의 충돌성 음극 강하 영역 모델로 설명 가능함을 확인함으로써 대기압 유전체 격벽 글로우 방전의 음극 강하 영역은 직류 글로우의 충돌성 음극 강하 특징을 가짐을 알 수 있다. 따라서 충돌성 음극 강하 영역의 식 (2.14)를 통해 유전체 격벽 글로우 방전의 음극 강하 영역 전기장 분포를 예상할 수 있으며 실험에 사용한 조건에 대해 예상 결과를 나타내면 그림 5.9와 같다.

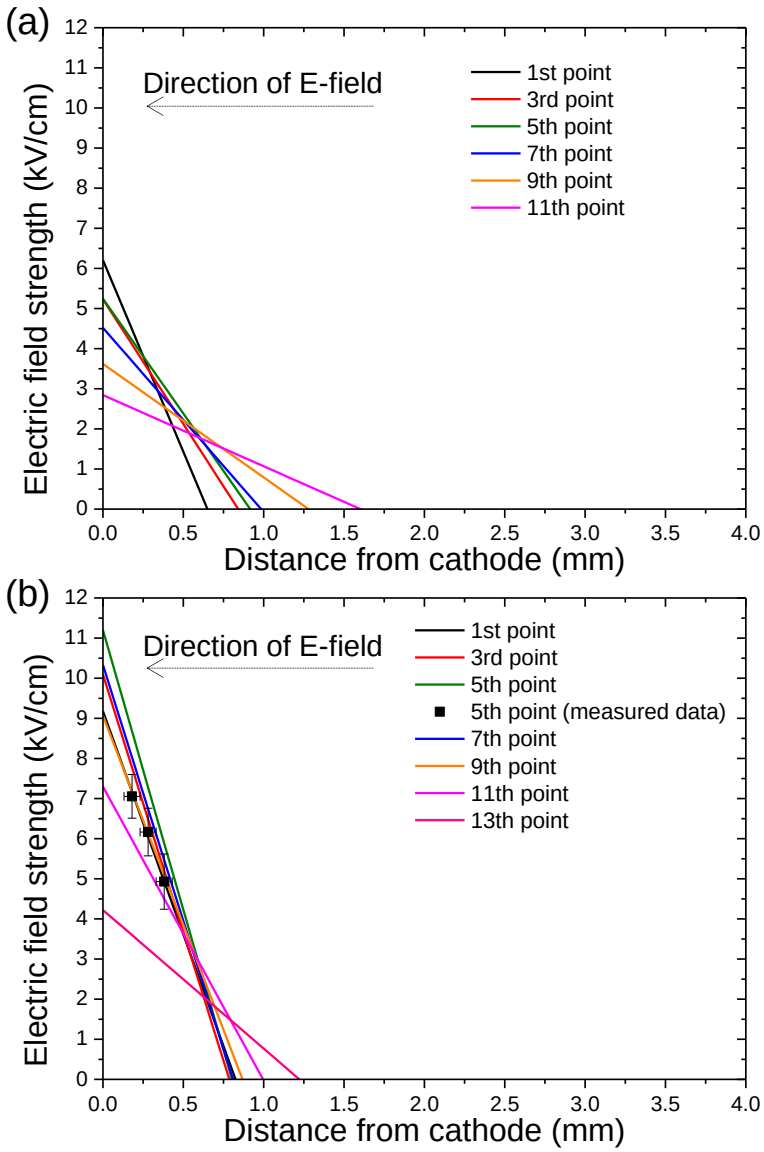

그림 5.9 음극 강하 영역 모델 계산을 통한 글로우 유지 영역의 전기장 분포 예측 결과와 그림 5.1의 측정 결과. (a): 사인(sinusoidal) 파형 20 kHz, 2.0 kV_{peak} 인가, (b): 사다리꼴(trapezoidal) 파형 20 kHz, 4.5 kV_{peak} 인가

글로우 유지 영역의 전류가 증가함에 따라 음극 강하 영역의 크기는 작아지고 전기장의 세기는 강해짐을 알 수 있으며 글로우 방전이 소멸하는 단계로 접어들면 음극 강하 영역이 넓어지고 전기장의 세기는 약해짐을 알 수 있다. 이는 음극 강하 영역 인가 전압 증가 및 음극 강하 영역 두께 감소로 인한 전기장 세기 증가가 이온화 및 유동성 흐름을 증가시켜 전류 증가로 나타나기 때문이다. 또한 측정 값(그림 5.1의 결과)과 유사한 분포로 계산되는 사실을 통해 계산에 사용된 직류 글로우 음극 강하 모델의 가정이 유전체 격벽 방전의 실제 현상에 반영되는 조건임을 알 수 있다. 즉 방전 공간 전압의 대부분이 음극 강하 영역에 인가되며 이온의 음극 유전체 전극 입사에 따른 2차 전자 방출이 저주파 유전체 격벽 글로우 방전의 음극 강하 영역을 형성 및 유지하는 대표 기전임을 알 수 있다. 계산 값과 측정 값은 약 10 % 내외의 오차가 존재하는데 이는 빛 세기 비교법을 이용한 전기장 산출 시 나타나는 오차로 판단된다.

따라서 유전체 격벽 글로우 방전의 음극 강하 영역이 갖는 직류 글로우 충돌성 음극 강하 특징을 통해 복잡한 광진단계의 구성 없이도 간단히 전압 전류 신호로부터 낮은 오차 범위 안에서 전기장 분포를 예측할 수 있다.

제 6 장. 유전체 격벽 글로우 방전 유지 특성

6.1 유전체 격벽 글로우 방전 유지 현상

유전체 격벽 방전은 외부 인가 전압의 극성 변화에도 글로우 방전의 방향은 유지된다(그림 6.1 참고).

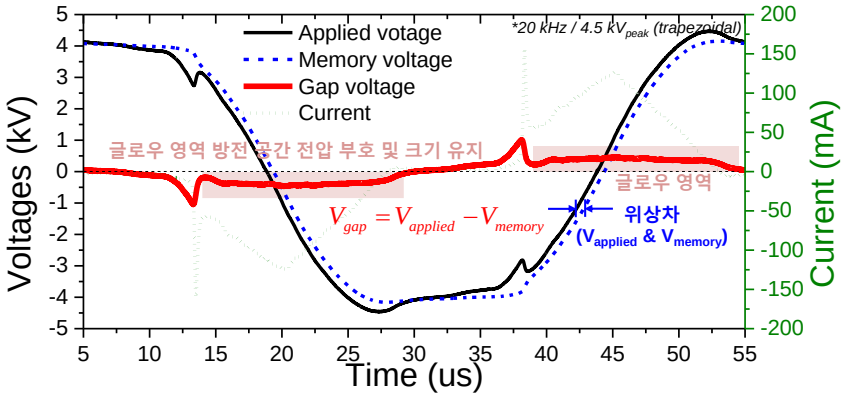

그림 6.1 외부 인가 전압 극성 변화에도 글로우 방전 유지

이는 음극 강하 영역의 절연 파괴 전기장이 유지되기 때문이며 전기장은 음극 강하 영역 인가 전압에 의해 결정되므로 글로우 방전 유지 메커니즘을 이해하기 위해서는 음극 강하 영역 인가 전압인 방전 공간 전압이 유지되는 원동력을 이해해야 한다.

식 (3.3)을 통해 계산한 방전 공간 전압과 인가 전압 및 메모리 전하에 의한 전압을 함께 나타내면 그림 6.2과 같다.

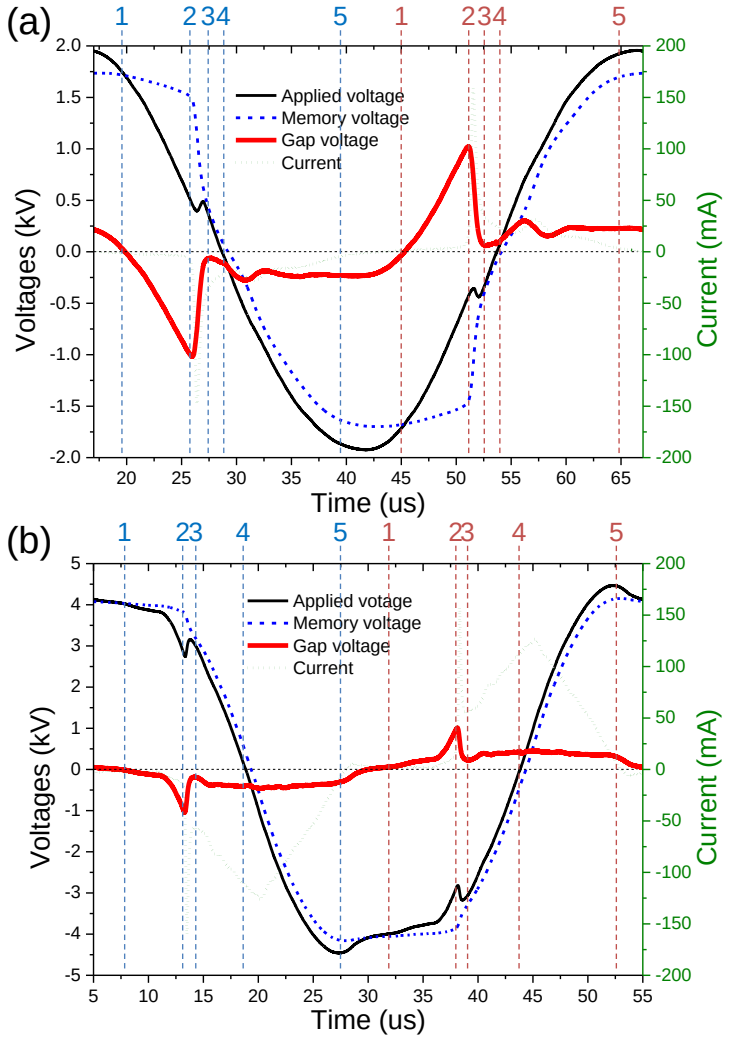

그림 6.2 유전체 격벽 방전 시 인가 전압, 메모리 전압, 방전 공간 전압 및 전류. (a): 사인(sinusoidal) 파형 20 kHz, 2.0 kV_{peak} 인가, (b): 사다리꼴(trapezoidal) 파형 20 kHz, 4.5 kV_{peak} 인가

방전 공간 전압의 변화 양상은 글로우 방전 개시를 기준으로 세 개 영역으로 구분할 수 있다. 글로우 이전 영역인 1~2 영역은 외부 인가 전압은 감소하는데 반해 유전체 표면 알짜 전하는 축적

상태를 유지, 즉 메모리 전압은 유지되어 방전 공간 전압이 증가하는 영역이다. 이는 그림 6.2에서 인가 전압 변화에도 메모리 전압은 유지되므로 방전 공간 전압이 증가하는 신호로서 확인할 수 있다. 방전 공간 전압이 증가하다가 특정 값에서 급격히 떨어지게 되는데 이때 최대값은 약 1.1 kV로서 4장에서 설명한 바와 같이 절연 파괴가 일어나 방전 모드가 변화하는 2~3 영역으로 넘어가게 된다. 이 영역에서는 음극 표면에서의 이온 중성화 및 2차 전자 방출로 인해 음극 표면 전자 하전량이 감소하고 양극으로 이동한 전자가 표면을 하전 시키므로 메모리 전압이 급격히 낮아진다. 메모리 전압이 낮아지면 인가 전압과의 차이가 줄어듦으로 방전 공간 전압이 크게 떨어지게 된다. 이는 직류 글로우 방전 시 절연 파괴 이후 플라즈마의 높은 전도성으로 인해 전극 간 전압이 급격히 감소하는 현상과 유사하다. 이후 글로우 방전이 유지되는 3~5 영역에서는 외부 인가 전압 변화와 함께 음극 유전체 표면 하전량 감소 및 양극 유전체 표면 하전량 증가가 유지되므로 메모리 전압도 함께 변화한다. 3~5 영역의 인가 전압과 메모리 전압의 변화는 시간 변화율이 유사하게 나타나며 위상차(시간차)가 존재해 인가 전압 및 메모리 전압의 부호 변화에도 방전 공간 전압의 부호는 유지되는 특성이 있다. 이에 관한 방전 공간 전압 유지 현상 메커니즘 설명은 다음 절에서 논의하기로 한다.

6.2 음극 강하 영역 절연 파괴 전기장 유지 메커니즘

글로우 방전이 유지되는 영역에서 방전 공간 전압이 부호 변화 없이 유지되는 것은 외부 인가 전압과 메모리 전압 간 시간 변화율이 유사하며 위상차가 존재하기 때문이다. 유전체 격벽 방전은 교류 전원을 인가함에 따라 반 주기마다 극성이 변화하나 대칭적인 방전 형태를 지니므로 반 주기 동안의 방전을 살펴봄으로써 전체 주기 방전을 이해할 수 있다. 반 주기 동안의 외부 인가 전압과 메모리 전압 그리고 방전 공간 전압과 전류를 나타내면 그림 6.3과 같다.

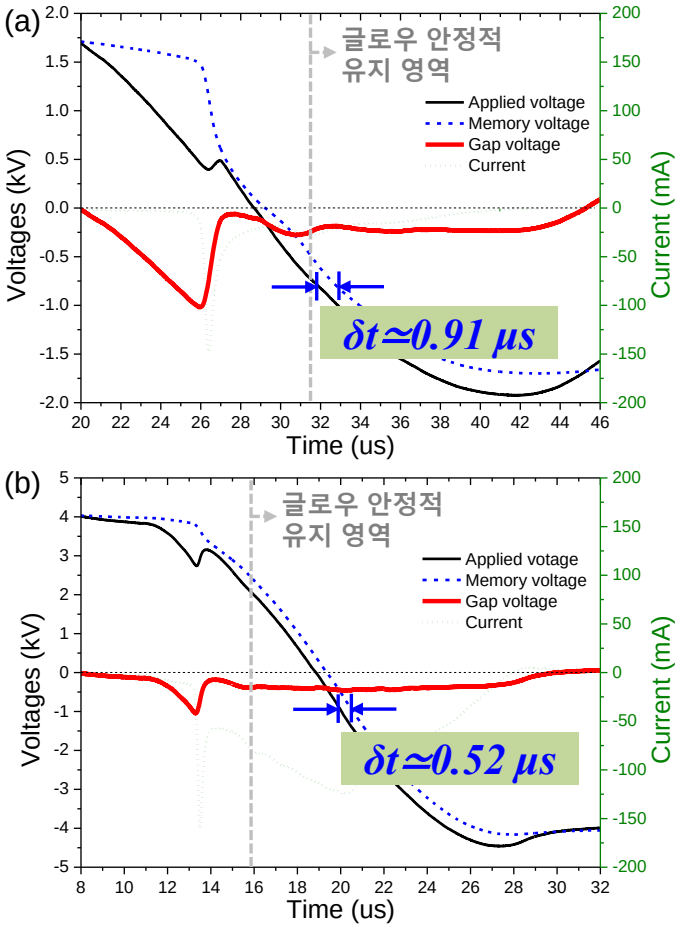

그림 6.3 두 개의 다른 인가 전압 조건에서 글로우 유지 영역 한 지점에서의 인가 전압과 메모리 전압 간 위상차(시간차). (a): 사인(sinusoidal) 파형 20 kHz, 2.0 kV_{peak} 인가, (b): 사다리꼴(trapezoidal) 파형 20 kHz, 4.5 kV_{peak} 인가

글로우 유지 영역 중 한 지점(그래프 상 33 μs과 20 μs 순간)에서의 외부 인가 전압과 메모리 전압 간 시간차는 그림 6.3에 나타낸 것과 같이 각각 약 0.91 μs과 0.52 μs이다.

메모리 전압의 변화는 음극 및 양극 유전체 표면의 전하량

변화에 의한 것이며 음극 유전체 표면 전하량 변화는 입사되는 이온의 중성화와 2차 전자 방출에 의해 이루어지고 양극 유전체 표면 전하량 변화는 2차 전자와 이온화로 인한 전자가 양극에 도달해 표면을 하전 시킴에 따라 이루어지므로 메모리 전압 변화에는 이온의 음극 표면 도달이 필수적이다. 이때 전자의 이동(μ_e=9.77×10^{-2} m^2/V·s)은 높은 이동도에 따라 이온의 이동(μ_i=9.48×10^{-4} m^2/V·s)에 비해 매우 빠르므로 현상이 벌어지는 시간 규모는 이온의 이동 시간으로 결정되며 따라서 인가 전압과 메모리 전압의 시간차는 음극 강하 영역 내 생성된 이온이 음극 유전체 표면에 도달하기까지 걸리는 시간과 관련이 있다. 음극 강하 영역 내 생성된 이온의 유전체 표면 도달 시간 $\delta\tau_i$는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\delta\tau_i = \frac{\bar{l}}{\bar{u}_{i,drift}} = \frac{\bar{l}}{\mu_i \bar{E}} \tag{6.1}$$

위 식에서 $\bar{l}$은 음극 강하 영역 내 평균 이온 위치, $\bar{u}_{i,drift}$는 이온이 음극에 도달하는 동안 평균 유동 속도 그리고 $\bar{E}$는 이온이 음극에 도달하기까지 받는 평균 전기장을 각각 의미한다. 참고 논문[37,38]의 저주파 대기압 유전체 격벽 방전 전산 모사 결과에 따르면 음극 강하 영역 내 이온은 음극 강하 영역 중심에서 높은 밀도로 밀집해 존재하므로 음극 강하 영역 내 평균 이온 위치 $\bar{l}$은 식 (4.4)의 결과로 구한 음극 강하 영역 크기의 중심 값으로 사용할 수 있다. 이온의 초기 위치로부터 음극에 도달하기까지 받는

평균 전기장 $\bar{E}$ 는 식 (2.14)의 전기장 분포로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\bar{E} = \frac{1}{\bar{l}} \int_0^{\bar{l}} E(x)\,dx \tag{6.2}$$

사인 파형 20 kHz, 2.0 kV_{peak} 인가 조건인 그림 6.3(a)의 33 μs 순간에서의 음극 강하 영역 크기는 약 0.7 mm 이고 유전체 표면 전기장 세기는 약 5.3 kV/cm 이므로 식 (4.5)를 통해 이온의 유전체 표면 도달 시간 $\delta\tau_i$를 계산하면 약 0.93 μs이다. 사다리꼴 파형 20 kHz, 4.5 kV_{peak} 인가 조건인 그림 6.3(b)에 대해서도 동일하게 계산하면 20 μs 순간에서의 음극 강하 영역 크기는 약 0.8 mm 이고 유전체 표면 전기장 세기는 약 11.2 kV/cm 이므로 유전체 표면 도달 시간 $\delta\tau_i$는 0.51 μs가 된다. 이는 그림 6.3에서 측정한 외부 인가 전압과 메모리 전압 간 시간차 0.91 μs 및 0.52 μs 와 매우 유사하다. 즉 이온이 음극 유전체 표면으로 이동하는 동안 내부 전기장 변화가 미미(DC-like)하므로 이온의 유전체 표면 도달 지연 시간이 외부 인가 전압과 메모리 전압 간 위상차를 형성해 글로우 방전이 유지되는 것이다.

둘 간의 시간 변화율은 다음의 과정을 통해 평형을 이루게 된다. 외부 인가 전압이 파형 발생기에서 설정한 대로 감소하면 공간 전압이 증가하고 충돌성 음극 강하 특성에 따라 음극 강하 영역의 전류가 증가하여 유전체 표면에 입사하는 이온 선속(flux)이 증가해 메모리 전압의 감소를 유도한다. 메모리 전압의 감소는 공간 전압을 감소시키게 되므로 이는 이온 선속 감소로 이어져 메모리

전압 감소를 억제하므로 이 현상이 평형을 이루는 과정에서 메모리 전압은 인가 전압과 동일한 시간 변화율을 갖게 된다.

이온의 이동 시간에 의해 인가 전압과 메모리 전압 간 위상차가 존재하므로 인가 전압의 시간 변화율이 방전 공간 전압을 결정하는데 크게 작용한다. 이는 위상차가 존재하는 두 파동과 그 차이를 나타낸 그림 6.4를 통해 쉽게 이해할 수 있다.

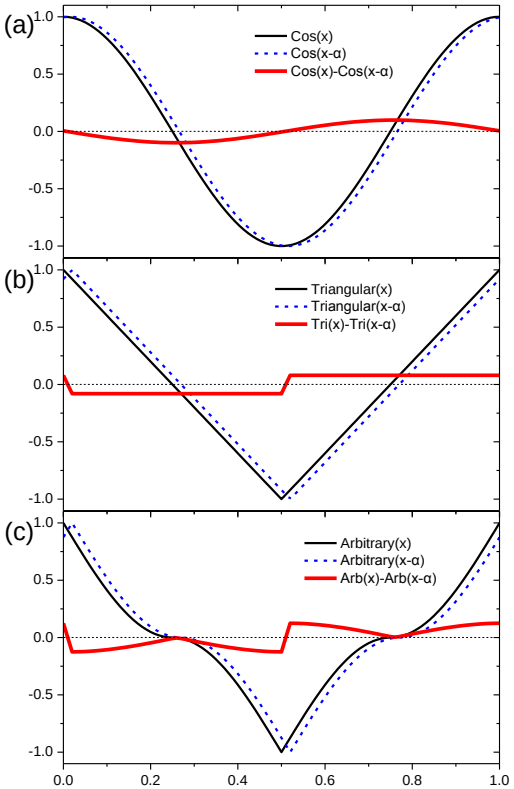

그림 6.4 파형 별 위상차가 존재하는 두 파동과 그 차이. (a): 사인 파형, (b): 삼각 파형, (c): 임의의 형태 파형

그림의 (a)는 사인 파형, (b)는 삼각 파형 그리고 (c)는 임의의

형태 파형이다. 그림 6.4의 그래프를 통해 기존 파형(검정 얇은 실선)의 기울기가 증가하는 경우 두 파형의 차이 값(빨간 굵은 실선)이 증가하고 기존 파형의 기울기가 감소하는 경우 두 파형의 차이 값이 감소함을 알 수 있다. 이 현상은 실험 조건에 대해서도 성립한다. 즉, 인가 전압의 시간 변화율이 증가하는 경우 방전 공간 전압이 증가하고 인가 전압의 시간 변화율이 감소하는 경우 방전 공간 전압은 감소하게 된다(그림 6.5 참고).

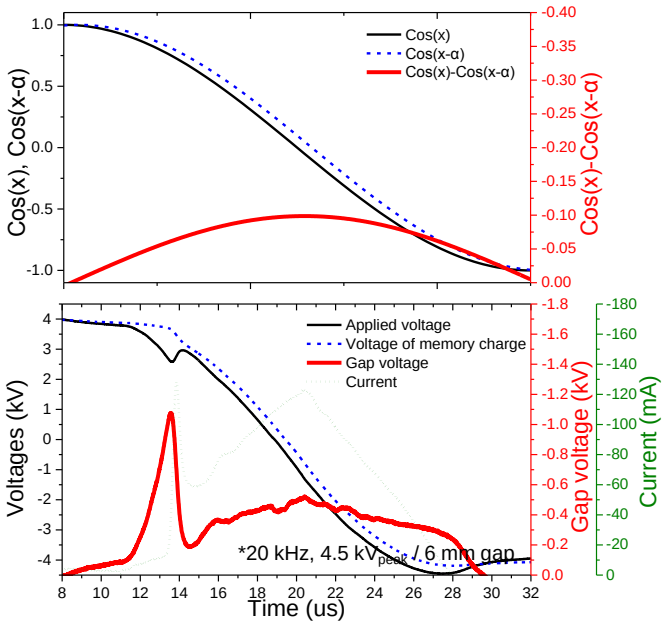

그림 6.5 (a) 기존 파형과 위상차가 존재하는 파형 그리고 두 파형 간 차이, (b) 인가 전압과 메모리 전압 그리고 방전 공간 전압

위 결과를 통해 인가 전압 시간 변화율이 증가하는 영역에서는 방전 공간 전압이 증가하며 인가 전압 시간 변화율이 감소하는 영역에서는 방전 공간 전압이 감소함을 알 수 있다. 따라서 이온의

음극 유전체 표면 도달 시간 존재로 인해 인가 전압과 메모리 전압 간 위상차가 발생하므로 인가 전압의 시간 변화율이 방전 공간 전압 파형을 결정하는데 큰 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 방전의 경우는 메모리 전압이 인가 전압과 상수의 위상차로 고정되어 있지 않고 전압, 전류 및 음극 강하 영역 크기 변화에 따라 위상차가 변화하므로 이에 대한 변화 특성을 고려함으로써 방전 공간 전압 파형을 보다 정확히 설명할 수 있다.

인가 전압이 낮은 그림 6.3(a)의 경우, 메모리 전압도 낮아 방전 공간 전압이 절연 파괴 전압인 1.1 kV를 이루어 방전이 개시되면 곧 인가 전압의 시간 변화율이 감소하므로 방전 공간 전압은 줄어들며 음극 강하 영역 크기가 크게 증가(그림 5.5 참고)하므로 식 (2.20)에 따라 글로우 유지 영역 동안 전류 파형은 감소한다. 인가 전압이 높은 그림 6.3(b)의 경우는 메모리 전압도 높아 방전 공간 전압이 절연 파괴 전압을 이루어 방전이 개시되어도 인가 전압의 시간 변화율이 증가하고 있으므로 방전 공간 전압은 증가하며 음극 강하 영역 크기도 감소(그림 5.6 참고)하므로 글로우 유지 영역 초기 전류 파형은 증가한다. 이후 인가 전압의 시간 변화율이 감소하므로 방전 공간 전압이 감소하며 음극 강하 영역 크기도 증가하므로 글로우 유지 영역 후기 전류 파형은 감소한다.

6.3 방전 특성을 이용한 플라즈마 처리 인자 제어

6.2절의 논의를 통해 인가 전압이 높은 경우 메모리 전압이 높아져 방전 개시 후 인가 전압의 변화 기간이 길게 유지됨을 알 수 있다. 따라서 인가 전압 크기 조절을 통해 글로우 영역의 유지 시간을 조절할 수 있음을 예상할 수 있으며 인가 전압 3.0~4.5 kV_{peak} 에 대해 전류 · 전압 파형을 그린 결과는 그림 6.6과 같다.

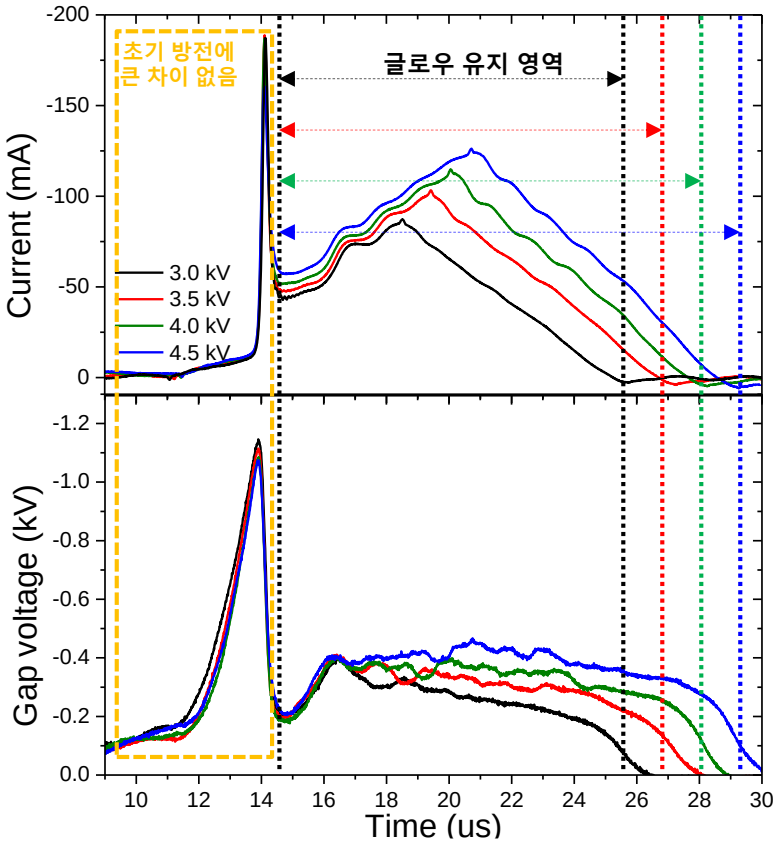

그림 6.6 인가 전압 변화에 따른 글로우 유지 영역 변화

위 결과에서 각 방전 조건의 사용한 파형이 동일하므로 초기 방전에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 반면 인가 전압이 증가함에 따라 글로우 유지 영역의 유지 시간이 길어 지며 전류 세기 및 방전 공간 전압이 크게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 인가 전압이 큰 경우 방전 개시 후 인가 전압 시간 변화율이 감소하기까지의 기간이 증가하며 이에 따라 글로우 영역 유지 시간 및 방전 공간 전압 크기가 증가하기 때문이다. 글로우 영역 유지 시간과 전류가 증가함은 표면 입사 전하량 증가로 나타나고, 방전 공간 전압 크기 증가는 음극 강하 영역 전기장 세기 증가로 나타난다.

따라서 글로우 방전 특성 조절을 통해 플라즈마 처리 응용 시 처리 대상에 영향을 미치는 플라즈마 인자로서 전기장과 입사 전하량을 제어할 수 있으며 본 실험에서는 오이 식물 종자 처리에 적용하였다. 우선, 종자 처리 시 앞선 방전 특성 해석 연구 내용의 적용 가능성을 판단하기 위해 종자 유무에 따른 전압, 전류 파형 및 ICCD 이미지를 비교하였다(그림 6.7, 그림 6.8 참고). 방전 공간에 종자를 두고 방전시킨 경우의 처리 종자 개수는 30개이며 종자 단면적의 총 합(30.3 mm^2×30개)은 전극 면적의 약 18%를 차지한다.

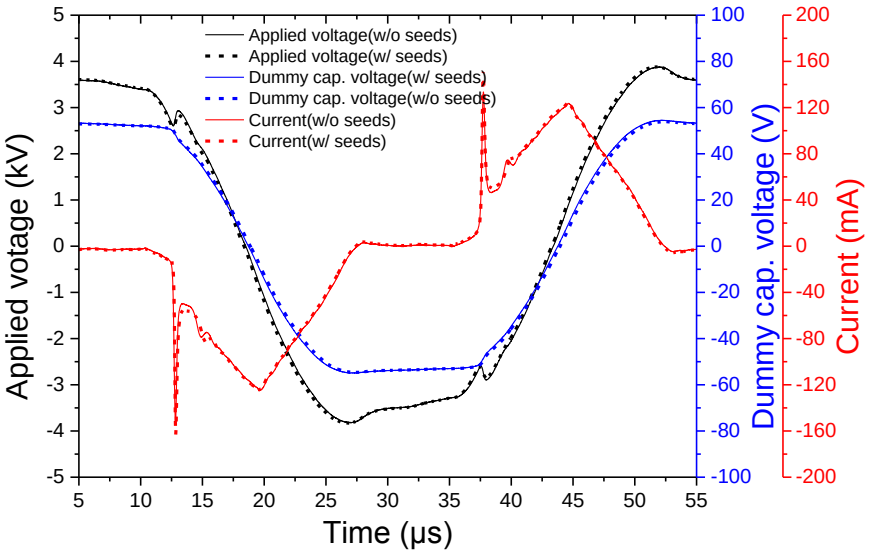

그림 6.7 종자 유무에 따른 방전 시 전압, 전류 파형: 방전 공간에 종자 없는 경우(얇은 실선), 방전 공간에 종자 있는 경우(굵은 점선)

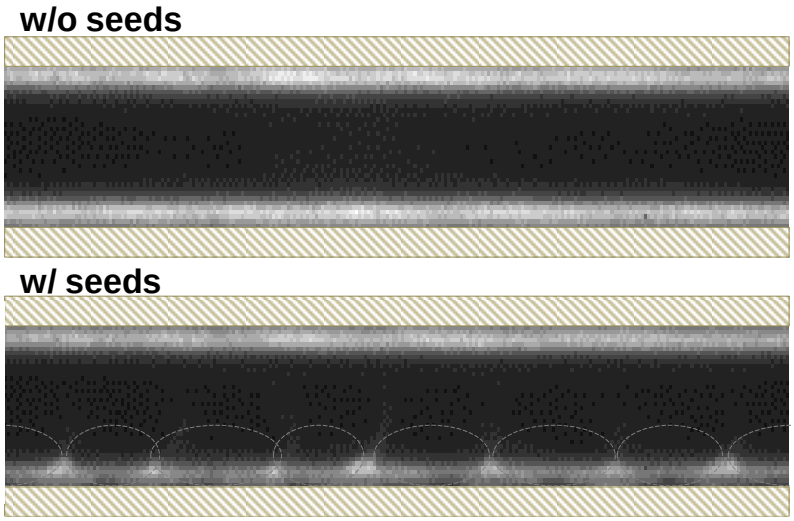

그림 6.8 종자 유무에 따른 한 주기 방전 시 ICCD 이미지

실험 결과 방전 시 음극 강하 영역에 종자가 존재하더라도 음극 강하 영역 및 방전 특성 유지에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 이는 방전 공간 내 이온화가 동일하게 이루어지고 내부 전기장 구조가 유사하다는 것을 의미한다. 특히 종자가 방전 공간에 존재하는 경우에도 종자 표면이 아닌 유전체 표면에 음극 강하 영역이 형성됨을 확인할 수 있는데 이는 이온화에 필요한 전자 에너지 완화 거리(electron energy relaxation length)가 음극 강하 영역 크기보다 매우 짧아 좁은 영역에서도 충분한 이온화로 음극 강하 영역이 유지되므로 음극 강하 영역 내 종자는 이온화 과정에 큰 영향을 미치지 않기 때문이다. 따라서 앞서 논의한 방전 특성 연구 결과를 종자가 존재하는 경우에 대해서도 적용할 수 있다.

플라즈마 처리 시 방전 기체로 헬륨을 사용하므로 강하게 방출되는 빛의 파장은 주로 600~800 nm 이며 활성종 생성에 필요한 분자(질소, 산소 등)의 밀도가 낮아 처리 대상체에 영향을 미치는 플라즈마 인자를 전기장과 전하량으로 한정할 수 있다. 전기장은 저주파 헬륨 대기압 유전체 격벽 방전이 직류 방전과 유사하다는 특징을 이용해 음극 강하 영역 크기 s를 계산함으로써 구할 수 있으며, 입사 전하량은 글로우 유지 특성을 이용해 글로우 유지 시간 t_m과 충돌성 음극 강하 전류 $I(t)$를 조절함으로써 결정할 수 있다. 따라서 종자에 영향을 미치는 전기장으로 글로우 유지 기간의 평균 음극 표면 전기장 $\bar{E}_0$를 대푯값으로서 사용하고,

종자 단면적 입사 전하량 Q_{inc}는 식 (6.4)로서 계산하였다.

$$\bar{E}_0 = \frac{1}{t_m}\int_{t_m} \frac{2V_0(t)}{s(t)}dt \tag{6.3}$$

$$Q_{\mathrm{inc}} = \int_{t_m} I(t)\,dt \times \frac{A_{\mathrm{seed}}}{A} \times t_{\mathrm{ON}} f \tag{6.4}$$

위 식의 V_0는 방전 공간 전압, Q_{inc}은 종자 단면적 입사 전하량, A_{seed}는 종자 한 개의 단면적, A는 방전 면적, t_m은 반 주기 내 방전 유지 시간, t_{ON}는 플라즈마 장치 가동 시간 그리고 f는 인가 주파수를 각각 의미한다. 방전 조건 별 방전 유지 시간 및 전류 크기를 고려해 플라즈마 처리 시간을 조절하면 종자 표면 입사 전하량을 동일하게 설정할 수 있으므로 유전체 격벽 플라즈마 처리 시 음극 강하 영역의 전기장이 종자 생장에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 3.0 kV, 3.5 kV, 4.0 kV 그리고 4.5 kV 인가 전압 조건 시 각각 10.3 초, 7.4 초, 6 초, 5 초 처리를 통한 전기장 세기에 따른 생장 결과는 그림 6.9와 같다.

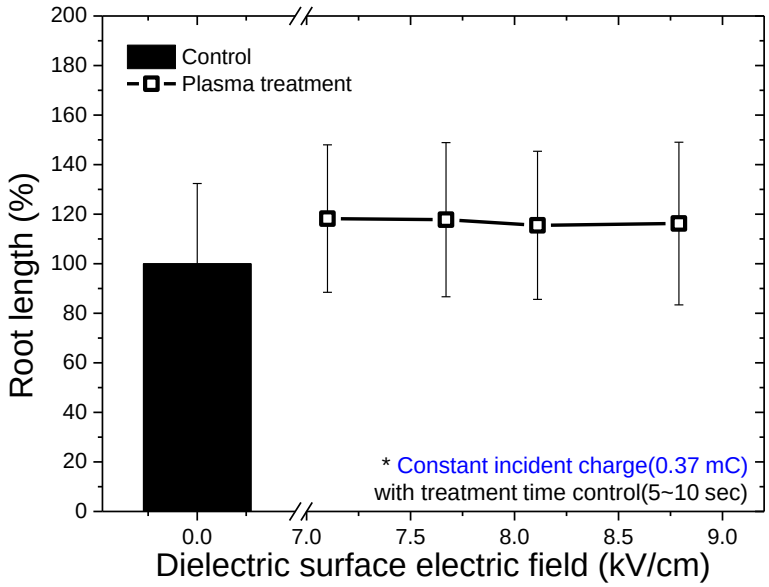

그림 6.9 입사 전하량이 동일한 조건의 전기장 세기에 따른 종자 생장 결과 (종자 내부 전기장은 일정 비율 감쇠(suppression)된 크기로 예상)

위 결과로부터 유전체 격벽 플라즈마 처리 시 전기장 세기에 따른 생장 변화는 크기 않음을 알 수 있다. 공기 중 순수 전기장 처리에 따른 식물 종자 생장 선행 연구[3]에 따르면 종자에 대한 전기장 영향은 종자 내 대사 활동(SOD 활동과 단백질, 당 함류) 변화로 나타나며 이로 인해 종자 생장 길이가 향상될 수 있다. SOD(superoxide dismutase)는 식물의 핵심 산소 대사 물질로서 SOD 활동은 외부 환경(활성종)에 의해 크게 영향 받는다고 알려져 있다.[3] 즉, 전기장의 영향을 확인하기 위해서는 대사 활동 변화에 충분한 처리 시간(~분/시) 및 활성종이 필요하나 헬륨 대기압 유전체 격벽 방전 처리의 경우 낮은 공기(질소, 산소, 수분 등) 밀도로 인해 활성종(RONS) 생성이 제한되며 짧은 시간(~초)

처리하므로 종자 대사 활동 변화가 미미하여 생장에 차이를 나타내지 않은 것으로 보인다. 따라서 대기압 유전체 격벽 방전 처리 시 종자에 대한 전기장의 영향을 보기 위해서는 공기 분위기 방전을 통한 고밀도 활성종 조건 만족 시 종자 내 대사 활동 향상으로서 생장 결과에 변화가 나타날 것으로 보인다.

헬륨 대기압 유전체 격벽 방전 짧은 시간(~초) 처리 시 전기장에 의한 영향이 미미하므로 글로우 유지 시간 및 전류 크기 조절(식 6.4)을 통해 종자 생장에 미치는 종자 표면 입사 전하량의 영향을 확인할 수 있다. 다양한 처리 조건을 통해 종자 표면 입사 전하량에 따른 생장 결과를 나타내면 그림 6.10와 같다.

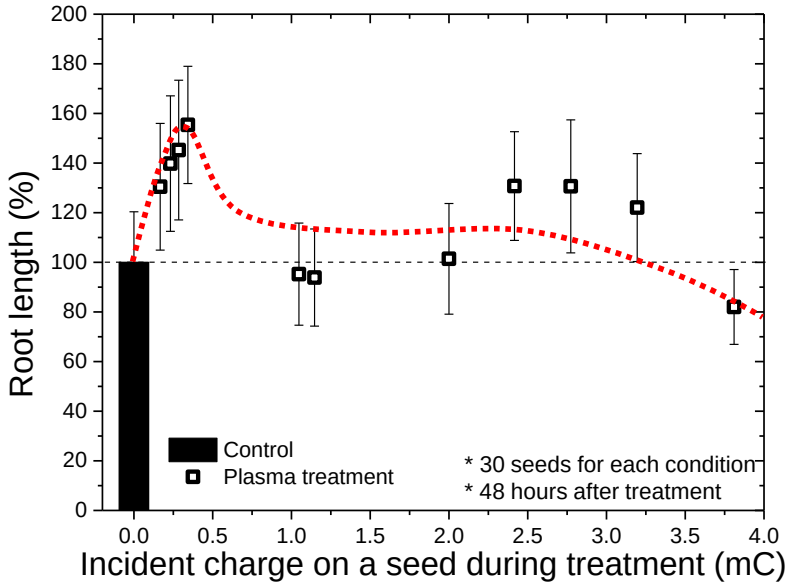

그림 6.10 종자 표면 입사 전하량에 따른 오이 종자 생장 결과

위 결과로부터 종자 표면 입사 전하량이 증가함에 따라 생장

길이가 증가하다가 일정 수준 이상에서 생장 길이가 감소하게 됨을 알 수 있다. 대기압 플라즈마 처리에 따른 종자 또는 고분자 PMMA(polymethyl methacrylate) 표면 특성 변화 선행 연구[4,39]에 따르면 플라즈마 처리 시 대상체의 표면 습윤성(wettability) 증가로 수분 흡수량이 증가한다. 본 실험 조건에 대한 플라즈마 처리 전후의 종자 표면 변화를 살펴보기 위해 SEM 이미지 촬영을 하였으며 그 결과는 그림 6.11와 같다. 실험에 사용한 인가 전압 조건은 사다리꼴 파형 20 kHz, 4.5 kV_{rms} 이며 처리 시간은 1시간이다.

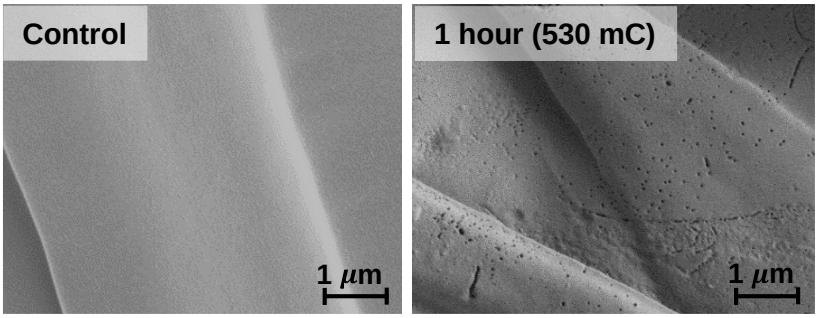

그림 6.11 헬륨 유전체 격벽 플라즈마(DBD) 처리 전후의 오이 종자 표면 SEM 이미지

위 결과 이미지를 통해 플라즈마 처리 시 종자 표면에 식각(etching) 효과가 두드러지게 나타남을 알 수 있다. 종자 표면 식각은 입사 전하에 의한 물리적 식각과 화학적 활성종에 의한 화학적 식각으로서 가능하다. 화학적 활성종의 생성은 공기 분위기의 플라즈마에서 활발히 진행되므로 공기 중으로 플라즈마를

분사시키는 대기압 플라즈마 제트(APPJ) 방전 장치를 이용한 종자 처리 SEM 이미지 결과로부터 화학적 식각 효과를 확인할 수 있다. 대기압 플라즈마 제트 처리 시간에 따른 종자 표면 SEM 이미지는 그림 6.12과 같다.

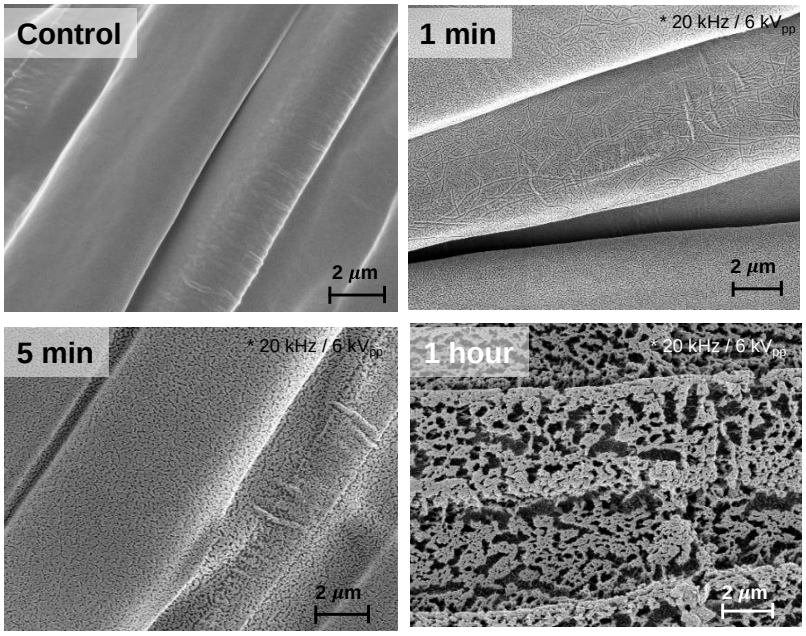

그림 6.12 헬륨-공기 대기압 플라즈마 제트(APPJ) 플라즈마 처리 전후의 처리 시간 별 오이 종자 표면 SEM 이미지

그림 6.12의 결과를 통해 그림 6.11의 헬륨 대기압 유전체 격벽 방전 처리는 활성종 생성이 미약해 화학적 식각 효과 일부와 입사 전하에 의한 물리적 식각 효과가 나타나는 것으로 보인다. 이로써 헬륨 대기압 유전체 격벽 플라즈마 처리 시 종자 표면 식각 효과가 종자 습윤성 및 수분 흡수를 증가시켜 생장이 촉진될 수 있으며

과다 처리의 경우 표면 손상 심화로 인해 생장이 억제됨을 알 수 있다. 따라서 식물 생산 수율 증가를 위한 플라즈마 종자 처리 시스템 개발을 위해 글로우 방전 특성 및 유지 시간 조절을 통한 종자 입사 전하량 제어가 활용될 수 있다.

제 7 장. 결 론

본 연구에서는 유전체 격벽 방전의 방전 특성 해석을 통해 플라즈마 내부 전기장과 처리 대상 표면 입사 전하량을 처리 응용 시의 플라즈마 인자로 정의하고 두 인자의 제어 가능성을 확인함으로써 플라즈마 처리 시스템의 개발 및 효율적 운용에 기여하고자 하였다. 인가 전압 파형에 동기화시킨 ICCD 카메라와 광진단계를 이용해 시간에 따라 저주파 헬륨 대기압 유전체 격벽 방전의 변화 과정을 관찰하고 방전 시 전압, 전류 신호를 이용해 글로우 방전 개시 및 유지 특성을 분석하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 저주파 헬륨 대기압 유전체 격벽 방전은 직류 방전과 유사하다. 이는 저주파(~kHz)를 사용하는 대기압 유전체 격벽 방전은 운전 주파수가 이온 및 전자-중성입자 간 충돌 빈도(~G,THz)와 열운동 속도를 시스템 크기로 나누어 구한 전자 및 이온의 특성 주파수(~MHz)에 비해 변화가 매우 느리므로 내부 물리 현상이 일어나는 시간 규모가 음극 강하 영역 내 절연 파괴 전기장이 유지되는 시간 규모보다 월등히 짧아 순간의 현상은 방전 공간 양단에 전압이 인가된 경우와 유사하기 때문이다. 유전체 격벽 방전은 양극 부근이 밝게 나타나는 타운젠트 방전으로 개시되나 음극 유전체 표면에서 2차 전자가 방출됨에 따라 음극 부근이 밝게 나타나는 글로우 방전으로 전개된다. 특히 글로우 방전은 음극 부근에서 전자가 포텐셜에 의해 밀려나 높은 양 전하 밀도의 음극 강하 영역이 존재하며 4.5 kV 인가 전압 조건에서 최대 12 kV/cm

의 전기장이 형성된다. 이는 직류 방전에서 인가 전력을 높이며 타운젠트 방전에서 글로우 방전으로 절연 파괴되며 모드 전이가 일어나는 현상과 동일하다. 그리고 유전체 격벽 방전은 방전 모드가 전이되는 절연 파괴 전기장이 알려진 헬륨의 유전 강도에 비해 낮은 3~4 kV/cm로 나타났는데 이는 실험에 사용한 20 kHz 인가 주파수의 경우 방전 소멸 유지 기간은 약 9 μs로서 삼체 충돌로 결정되는 헬륨 준안정종의 수명에 따라 준안정종의 약 21%가 다음 방전에 단계 이온화 및 페닝 이온화로서 초기 전자 밀도를 높이기 때문이다.

그리고 대기압 방전은 플라즈마-중성입자 간 수 많은 충돌로 인해 플라즈마 방출 빛이 해당 위치 전기장에 의해 결정되는 국소 근사법 적용 범위의 압력이므로 유전체 격벽 방전의 빛 세기 분포가 전기장 분포와 유사하게 나타나며, 대기압 유전체 격벽 글로우 방전의 음극 강하 영역은 직류 글로우 방전의 충돌성 음극 강하 영역 전류식에 따라 그 크기가 설명됨을 보였다. 이는 대기압 유전체 격벽 글로우 방전의 음극 강하 영역이 직류 글로우 방전의 충돌성 음극 강하 특성을 가짐을 의미하므로 이온의 음극 유전체 입사가 유전체 격벽 글로우 방전의 음극 강하 영역을 형성 및 유지하는 대표 기전이며 내부 전기장을 수식을 통해 예측할 수 있음을 의미한다. 이 특성을 통해 플라즈마 처리 응용 시 대상체에 미치는 전기장 세기를 유추할 수 있다.

둘째, 저주파 헬륨 대기압 유전체 격벽 방전은 음극 강하 영역에서 생성되는 이온의 음극 유전체 표면 입사 현상이 글로우

방전을 오랫동안 유지시킨다. 유전체 격벽 방전은 글로우 방전이 외부 인가 전압의 변화에도 안정적으로 유지되는 특징이 있으며 이는 음극 강하 영역에서 생성된 이온의 음극 표면에 도달하기까지 시간이 존재해 인가 전압 변화와 메모리 전하 전압 변화 간 위상차가 발생하여 음극 강하 영역 내 절연 파괴 전기장이 유지되기 때문에 나타나는 현상이다. 인가 전압이 변화하는 동안 메모리 전압이 위상차를 갖고 따라 변하며 글로우 방전이 유지되므로 선행하는 인가 전압의 크기 및 시간 변화율이 글로우 유지 시간과 방전 공간 전압 및 이에 따른 충돌성 음극 강하 전류를 결정한다.

유전체 격벽 방전은 글로우 방전에서 대부분의 전하가 흐르고 강한 전기장이 존재하는 음극 강하 영역이 있으므로 인가 전압 크기 및 시간 변화율 선택을 통해 처리 응용 시 대상체에 미치는 전기장 세기 및 조사 전하량을 제어할 수 있다. 즉, 절연 파괴가 일어난 이후 인가 전압의 시간 변화율이 감소하면 충돌성 음극 강하 영역에서 이온이 음극 표면에 도달하는 동안 인가 전압의 변화가 줄어 방전 공간 전압을 낮추고 공간 전기장 세기를 제한하게 된다. 그리고 인가 전압 크기를 키워 절연 파괴 이후 인가 전압 변화 기간을 늘림으로써 글로우 유지 시간을 증가시켜 조사 전하량을 증가 시킬 수 있다. 음극 강하 영역 전기장 및 입사 전하량을 제어하며 파종 전 처리 장치로서 유전체 격벽 플라즈마 응용 시, 오이 종자 생장 결과를 통해 종자 표면 입사 전하량이 오이 종자 생장에 영향을 미침을 확인하였고 이는 종자에 대한

전하 입사가 화학적 활성종과 함께 표면을 물리·화학적 식각함으로써 수분 흡수 효과에 영향을 미쳤을 것으로 보인다. 따라서 플라즈마 처리는 표면 처리로서 종자 생장에 기여하므로 전처리로서 가치가 있으며 글로우 방전 특성 및 유지 시간 제어를 통해 종자 입사 전하량 조절 시 파종 전 플라즈마 처리를 위한 정교한 제어 시스템이 개발될 수 있다.

이로써 대기압 유전체 격벽 방전 장치를 이용한 본 연구의 방전 특성 연구 결과는 처리 응용 시 플라즈마가 미치는 인자인 전기장과 전하량을 조절하는 방전 제어 기술로서 대기압 플라즈마를 이용한 처리 시스템 개발 및 효율적 운용에 활용될 수 있어 큰 의의를 갖는다.

종자 생장에 관하여 전기장과 전하량 외에 영향을 미칠 수 있는 플라즈마 인자로 방전 기체에 공기(질소, 산소, 수분 등) 첨가 시 밀도가 높게 형성되는 활성종의 영향이나 질소 여기종에서 방출되는 자외선의 영향 등을 고려할 수 있다. 따라서 보다 기능성이 높은 종자 처리 장치 개발을 위해서 방전 기체에 공기 첨가 시 플라즈마가 종자 생장에 영향을 미치는 추가적인 인자에 대한 후속 연구가 필요하다.

참고문헌

[1] J. R. Roth, J. Rahel, X. Dai, and D. M. Sherman, “The physics and phenomenology of One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma (OAUGDP^{TM}) reactors for surface treatment applications,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 38, no. 4, pp. 555–567, 2005.

[2] H. Yu, Z. L. Xiu, C. S. Ren, J. L. Zhang, D. Z. Wang, Y. N. Wang, and T. C. Ma, “Inactivation of yeast by dielectric barrier discharge (DBD) plasma in helium at atmospheric pressure,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 33, no. 4, pp. 1405–1409, 2005.

[3] L. Yang and H. long Shen, “Effect of electrostatic field on seed germination and seedling growth of Sorbus pohuashanesis,” *J. For. Res.*, vol. 22, no. 1, pp. 27–34, 2011.

[4] D. Dobrin, M. Magureanu, N. B. Mandache, and M.−D. Ionita, “The effect of non−thermal plasma treatment on wheat germination and early growth,” *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 29, pp. 255–260, 2015.

[5] I. A. Eshkab, M. B. Shanta, and H. N. El, “Influence of Pre−sowing Seed Treatments on Germination Properties and Early Seedling Growth of Acacia cyanophylla,” *Int’l J. Adv. Agric. Environ. Engg.*, vol. 1, no. 2, pp. 208–211,

2014.

[6] M. Farooq, S. M. A. Basra, H. Rehman, and M. Hussain, "Seed priming with polyamines improves the germination and early seedling growth in fine rice," *J. New Seeds*, vol. 9, no. 2, pp. 145–155, 2008.

[7] M. J. Tadros, N. H. Samarah, and A. M. Alqudah, "Effect of different pre−sowing seed treatments on the germination of Leucaena leucocephala (Lam.) and Acacia farnesiana (L.)," *New For.*, vol. 42, no. 3, pp. 397–407, 2011.

[8] I. Filatova, V. Azharonok, V. Lushkevich, A. Zhukovsky, G. Gadzhieva, and K. Spasi, "Plasma seeds treatment as a promising technique for seed germination improvement," *31st ICPIG*, pp. 4–7, 2013.

[9] S. H. Ji, K. H. Choi, A. Pengkit, J. S. Im, J. S. Kim, Y. H. Kim, Y. Park, E. J. Hong, S. kyung Jung, E. H. Choi, and G. Park, "Effects of high voltage nanosecond pulsed plasma and micro DBD plasma on seed germination, growth development and physiological activities in spinach," *Arch. Biochem. Biophys.*, vol. 605, pp. 117–128, 2016.

[10] H.−E. Wagner, R. Brandenburg, K. V. Kozlov, a. Sonnenfeld, P. Michel, and J. F. Behnke, "The barrier discharge: basic properties and applications to surface

treatment," *Vacuum*, vol. 71, no. 3, pp. 417–436, 2003.

[11] U. Kogelschatz, "Filamentary , Patterned , and Diffuse Barrier Discharges," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 30, no. 4, pp. 1400–1408, 2002.

[12] F. Massines, A. Rabehi, P. Decomps, and R. Ben Gadri, "Experimental and theoretical study of a glow discharge at atmospheric pressure controlled by dielectric barrier," *J. Appl. Phys.*, vol. 83, no. 6, pp. 2950–2957, 1998.

[13] S. Sasaki, S. Takamura, S. Watanabe, S. Masuzaki, T. Kato, and K. Kadota, "Helium I line intensity ratios in a plasma for the diagnostics of fusion edge plasmas," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 67, no. 10, p. 3521, 1996.

[14] J. E. Chilton and C. C. Lin, "Measurement of electron−impact excitation into the 3 p 5 3 d and 3 p 5 5 s levels of argon using Fourier−transform spectroscopy," *Phys. Rev. A*, vol. 60, no. 5, pp. 3712–3721, 1999.

[15] U. Kogelschatz, "Dielectric−barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications," *Plasma Chem. Plasma Process.*, vol. 23, no. 1, pp. 1–46, 2003.

[16] W. Siemens, "Ueber die elektrostatische Induction und die Verzogerung des Stroms in Flaschendrahten," *Poggendorfs Ann. Phys. Chem.*, vol. 102, pp. 66–122,

1857.

[17] S. Kanazawa, M. Kogoma, T. Moriwaki, and S. Okazaki, “Stable glow plasma at atmospheric pressure,” *J. Phys D Appl. Phys.*, vol. 21, no. 5, pp. 838–840, 1988.

[18] Y. B. Golubovskii, V. a Maiorov, J. Behnke, and J. F. Behnke, “Modelling of the homogeneous barrier discharge in helium at atmospheric pressure,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 36, no. 1, pp. 39–49, 2002.

[19] F. Massines, P. Segur, N. Gherardi, C. Khamphan, and A. Ricard, “Physics and chemistry in a glow dielectric barrier discharge at atmospheric pressure: diagnostics and modelling,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 174–175, pp. 8–14, 2003.

[20] T. Martens, W. J. M. Brok, J. van Dijk, and a Bogaerts, “On the regime transitions during the formation of an atmospheric pressure dielectric barrier glow discharge,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 42, no. 12, p. 122002, 2009.

[21] Y. Hao, B. Zheng, and Y. Liu, “Cathode fall measurement in a dielectric barrier discharge in helium,” *Phys. Plasmas*, vol. 20, no. 11, pp. 1–5, 2013.

[22] B. M. Obradović, S. S. Ivković, and M. M. Kuraica, “Spectroscopic measurement of electric field in dielectric barrier discharge in helium,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 92, p.

191501, 2008.

[23] Y. W. Choi and H. J. Lee, “Analysis of collisional sheath structure in an argon DC discharge,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 31, no. 5 II, pp. 1032–1037, 2003.

[24] Y. P. Raizer, *Gas Discharge Physics*. 1991.

[25] J. R. Roth, *Industrial plasma engineering. Volume 2: Applications to Nonthermal Plasma Processing.*, vol. 2. 2001.

[26] J. J. Shi and M. G. Kong, “Cathode fall characteristics in a dc atmospheric pressure glow discharge,” *J. Appl. Phys.*, vol. 94, no. 9, pp. 5504–5513, 2003.

[27] S. S. Ivković, G. B. Sretenović, B. M. Obradović, N. Cvetanović, and M. M. Kuraica, “On the use of the intensity ratio of He lines for electric field measurements in atmospheric pressure dielectric barrier discharge,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 47, no. 5, p. 55204, 2014.

[28] M. M. Kuraica and N. Konjević, “Electric field measurement in the cathode fall region of a glow discharge in helium,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 70, no. March, p. 1521, 1997.

[29] R. L. Heinisch, F. X. Bronold, and H. Fehske, “Electron surface layer at the interface of a plasma and a dielectric

wall," *Phys. Rev. B*, vol. 85, no. 7, p. 75323, 2012.

[30] X. T. Deng and M. G. Kong, "Frequency range of stable dielectric−barrier discharges in atmospheric He and N2," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 32, no. 4 III, pp. 1709–1715, 2004.

[31] Z. Navrátil, R. Brandenburg, D. Trunec, a Brablec, P. St'ahel, H.−E. Wagner, and Z. Kopecký, "Comparative study of diffuse barrier discharges in neon and helium," *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 15, pp. 8–17, 2005.

[32] F. Massines, N. Gherardi, N. Naudé, and P. Ségur, "Glow and Townsend dielectric barrier discharge in various atmosphere," *Plasma Phys. Control. Fusion*, vol. 47, no. 12B, pp. B577–B588, 2005.

[33] A. K. Vijh, "Electric strength and molecular properties of gaseous dielectrics," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI−12, no. 4, pp. 313–315, 1977.

[34] R. C. Dorf, *The Electrical Engineering Handbook*. CRC Press, 1997.

[35] B. Niermann, A. Kanitz, M. Boke, and J. Winter, "Impurity intrusion in radio−frequency micro−plasma jets operated in ambient air," *J. Phys. D Appl. Phys.*, vol. 44, p. 325201, 2011.

[36] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, *Principles of*

Plasma Discharges and Materials Processing. 2005.

[37] W. Jiang, J. Tang, Y. Wang, W. Zhao, and Y. Duan, "Influence of driving frequency on discharge modes in a dielectric−barrier discharge with multiple current pulses," *Phys. Plasmas*, vol. 20, no. 7, pp. 1–7, 2013.

[38] D. Lee, J. M. Park, S. H. Hong, and Y. Kim, "Numerical Simulation on Mode Transition of Atmospheric Dielectric Barrier Discharge in Helium – Oxygen Mixture," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 33, no. 2, pp. 1–9, 2005.

[39] N. Dumitrascu, I. Topala, and G. Popa, "Dielectric barrier discharge technique in improving the wettability and adhesion properties of polymer surfaces," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 33, no. 5, pp. 1710–1714, 2005.

Abstract

Investigation on Property of Low-Frequency Driven Dielectric Barrier Helium Plasma Discharge at Atmospheric Pressure

Byeongjun Bae
Department of Energy Systems Engineering
The Graduate School
Seoul National University

Helium dielectric barrier discharge is commonly used for typical atmospheric pressure plasma industries which is cannot be applied in a vacuum. In particular, a large area uniform diffuse dielectric barrier discharge is in the spotlight as a pre-sowing treatment plasma but the studies have been simply classified as discharge conditions and processing time. The plasma on the studies was just considered as the black box. Therefore, the

understanding of discharge characteristics is needed for the control of plasma treatment parameters.

In this study, we defined the electric field inside the plasma and the amount of incident charge as the plasma parameters and verified the controllability of the two parameters. The signals from electric probes and an ICCD camera and an optical emission spectroscopy synchronized with the voltage waveform were analyzed for dielectric barrier discharge characteristics.

First, it is revealed that the low-frequency helium dielectric barrier discharge at atmospheric pressure is similar to the DC discharge. The transition from the Townsend discharge which has a bright region in the vicinity of the anode to the glow discharge which has a bright region in the vicinity of the cathode was observed and the phenomenon is the same as that of the DC discharge. Moreover, the fact that the cathode fall region in which the ionization and excitation collisions frequently happens has the characteristics of a collisional cathode fall of a DC glow discharge was identified. From these characteristics, it is revealed that the incident ion to the cathode surface has the important roles for the formation and maintenance of cathode fall.

In addition, because of the existence of time to reach the cathode of ions generated in the cathode fall region, the dielectric barrier glow discharge is maintained long. The phase difference

between the applied voltage and the memory voltage caused by the ion transit time maintains the breakdown electric field in the collisional cathode fall. This means that the amount of the incident charge can be controlled by using the characteristics of discharge maintenance. By the pre-sowing treatment result via the control of the electric field inside the plasma and the amount of the incident charge, it is revealed that incident charge from the plasma contributes to the seed growth by the surface etching and therefore by managing the plasma parameters controllability of development for a precise plasma treatment system is identified.

Keywords : Atmospheric Pressure Plasma, Dielectric Barrier Discharge, Townsend Discharge, Glow Discharge, Collisional Cathode Fall Region, Pre-sowing Plasma Treatment

Student Number : 2014-22720