

GT
GLOBAL TECH KOREA Industrial Technology & Market Review
글로벌 산업기술·시장동향

**공정대체가스 공정 및
배출제어 적용 플라즈마 기술**





▶ CONTENTS

I. 서론

II. 본론

1. 반도체 분야 과불화화합물 사용 현황 및 감축 전략
2. 대체가스공정 적용 플라즈마 기술
3. 배출제어 적용 플라즈마 기술

III. 결론 및 제언

I 서론

2020년 교토 의정서를 대체하는 파리 협정이 발효됨에 따라 전 세계 반도체 산업에서도 온실가스 배출량 감소에 대한 요구가 커지고 있다. 우리나라는 지구 평균 온도 상승을 최대 2 °C로 제한하기 위해 2030년 온실가스 배출 전망치(BAU) 대비 37 % 감축안을 발표하고 온실가스 감축을 위해 꾸준히 노력하고 있다. 비록 반도체 생산과 같은 산업공정 부문이 지구 온난화에 기여하는 양은 7.9 % 정도로 에너지 부문에 비해 매우 작지만, 지구온난화 지수(global warming potential, GWP)가 높은 불화가스를 집중적으로 사용하고 있어 지구 온난화에 상당한 영향을 미치는 것으로 파악되고 있다. 특히 과불화화합물(Perfluorinated Compounds, PFCs) 가스는 반도체 공정에서 식각이나 플라즈마 화학기상증착(PECVD) 후 반응기 내부에 남아있는 규산화물(SiO₂), 탄소 함유 산화규소, 질화규소(Si₃N₄) 등을 제거하는데 주로 사용되는데, PFC 가스는 GWP가 CO₂(GWP: 1)에 비해 월등히 높고(NF₃ GWP: 8,000) 자연 분해되는 기간도 길어(CF₄: 50,000 년) 큰 문제로 대두되고 있다.

따라서 현재 우리나라에서는 반도체 공정에서 PFC 가스 배출량을 줄이기 위한 노력 및 연구가 다방면에서 진행되고 있다. 먼저, 높은 배출량을 가진 노후된 장비 및 시설을 상대적으로 배출량이 적고 효율이 좋은 새로운 장비 및 시설로 꾸준히 대체하고 있다. 동시에 반도체 장비 및 가스공급업체의 공동 참여로 GWP가 높은 PFC 가스(예: NF₃, CF₄, C₂F₆)를 GWP가 낮은 가스(예: F₂ GWP: 0)로 대체하여 온난화 가스 발생을 최소화 하려는 시도도 있다. 하지만, 새로운 가스를 도입하는 경우 화학반응 측면에서 기존 공정과 비교해 많이 다르므로 다양한 공정조건에 대한 매개변수적 연구를 통해 최적화하는 과정이 선행되어야 한다. 무엇보다도 PFC 가스 배출을 크게 저감하는데

기여하리라 예상되는 조치는 사용 후 가스를 공정 말단에서 회수 및 분해하여 감축할 수 있는 POU(point-of-use) 시스템 적용이다. 만약 GWP가 낮은 가스를 사용하는 공정이 성공적으로 개발되고 동시에 PFC 가스 저감설비와 결합된 경우, 매우 높은 변환 효율을 얻을 수 있어 PFC 방출 총량을 최소화할 수 있으리라 기대된다.

PFC 가스를 사용하는 대부분의 반도체 공정은 PFC 가스로부터 반응성이 높은 불소 활성종(F 원자 또는 이온)을 가능한 낮은 에너지 입력에서 다량으로 생성하는 것을 목표로 하고 있는데, 이를 위해 많은 부문에서 플라즈마 기술이 활용되고 있다. 저온 플라즈마 기술을 이용하는 경우 강한 전기장에 의해 가속된 전자가 PFC 가스의 견고한 화학결합을 비교적 낮은 전력량으로 끊을 수 있어 효율적인 불소 활성종 생성이 가능하다. PFC 가스 분해를 통한 저감기술에도 다양한 플라즈마 기술이 적용되고 있다. 특히 고온 플라즈마를 적용하는 경우 난분해성인 PFC 가스를 다른 화학종으로 높은 효율로 신속하게 변환할 수 있다.

플라즈마를 이용하여 새로운 대체가스공정 또는 저감기술 개발 시 안정적인 플라즈마 발생과 이후 화학종 생성 과정을 자세히 이해하는 것이 공정 개발 및 최적화의 첫 단계라고 말할 수 있겠다. 이에 본 보고서에서는 대체가스공정 및 배출제어에 적용되고 있는 플라즈마 기술에 대해 살펴보고, 당면해 있는 기술적 과제를 해결하기 위해 진행 중인 연구개발 기법에 대해 의논하고자 한다. 특히 고효율 고이온화율 플라즈마 발생제어기술, 실공정 적용을 위한 플라즈마 측정 및 모델링 연구에 초점을 맞추어 살펴보았다.

먼저 2장에서는 반도체 산업에서 PFC 가스 사용 현황과 현재 추진 중인 감축 전략에 대해 간단히 알아보고 있다. 제 3장에서는 대체가스공정 개발 현황을 현재 온실가스 사용량이 가장 많은 반도체 세정 공정에 대해서 다루고 있으며, 제 4장에서는 반도체 공정에서 배출된 잔류 PFC 가스 또는 공정 부산물을 열 플라즈마 기술을 이용하여 저감하는 공정 개발에 대해 살펴보았다. 마지막 5장에서는 몇 가지 기술적 제언으로 보고서를 마무리하고 있다.

1. 반도체 분야 과불화화합물 사용 현황 및 감축 전략

□ 반도체 산업에서 과불화화합물 용도 및 그 중요성

현재 반도체 산업에 주로 사용되는 주요 PFC 물질은 NF_3 , CHF_3 , CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8 , SF_6 등이 있으며, 다양한 제조공정에서 광범위하게 사용되고 있다. 주로 사용되는 대표 공정은 아래와 같다

- 먼저 PFC는 플라즈마 식각 공정의 식각 가스로 주로 사용되고 있다. 식각 공정은 웨이퍼 기판 등 표면에서 불필요한 부분을 선택적으로 제거하여 패턴을 만드는 공정이다. 플라즈마에 의해 생성된 불소 활성종은 집적 회로의 금속 및 유전체층을 깎아내어 서브 마이크론 정도의 정밀도를 갖는 패턴을 만들 수 있다.
- PFC 가스는 화학기상증착(CVD) 반응기의 신속한 화학적 세척을 위해서도 사용되고 있다. CVD 기법을 이용하여 규소 및 규소 기반 유전체층(예: SiO_2)을 기판에 증착할 때, 유사한 층이 CVD 반응기 내부벽에도 증착되게 된다. 웨이퍼가 이후 하부 공정에서 이러한 이물질에 의해 오염되지 않도록 하기 위해서는 반응기 내부를 정기적으로 세척해야하며, 이 공정을 증착 후 반응기 세정 공정이라고 한다. 잦은 기계적 세척을 피하기 위해 반도체 공정에서는 PFC 가스를 사용한 플라즈마 세정(plasma cleaning) 방식을 주로 사용하고 있는데, 이는 크게 반응기 내부에서 플라즈마를 발생하여 증착물을 제거하는 in-situ 플라즈마 세정(in-situ plasma cleaning)과 플라즈마를 반응기 외부에서 독립적으로 발생하여 활성종을 반응기 내부로 주입하는 원격플라즈마 세정(remote plasma cleaning) 방식으로 나뉜다.

- SF₆ 가스는 웨이퍼 테스트 공정 단계에서 전력 소자 테스트를 위한 절연 가스로 사용되고 있다. SF₆ 가스는 안정도가 높은 불활성 기체로 절연내력이 공기에 비해 2.5~3.5 배 높아 사용 빈도가 높다.

PFC 가스는 식각 시 독특하고 효과적인 공정 성능을 제공하고, 더불어 CVD 반응기를 세척하는데 필요한 불소를 안전하게 공급할 수 있어 반도체 제조 공장에서 널리 사용되고 있다. 과거 공정별 불화가스 배출 비율은 세정 공정이 대략 80%, 식각 공정이 20% 정도였으나, 최신 반도체 생산설비의 경우 (예: 300mm 웨이퍼 생산설비) 식각 공정에서 공정 단계수가 늘어나고, 반면 세정 공정에서는 분해 효율이 높은 NF₃ 원격플라즈마 세정법을 도입함에 따라 세정 공정에서 배출량(45%)이 많이 줄어들어 대신 식각 공정에서 배출량(55%)이 증가하는 추세이다^[1]

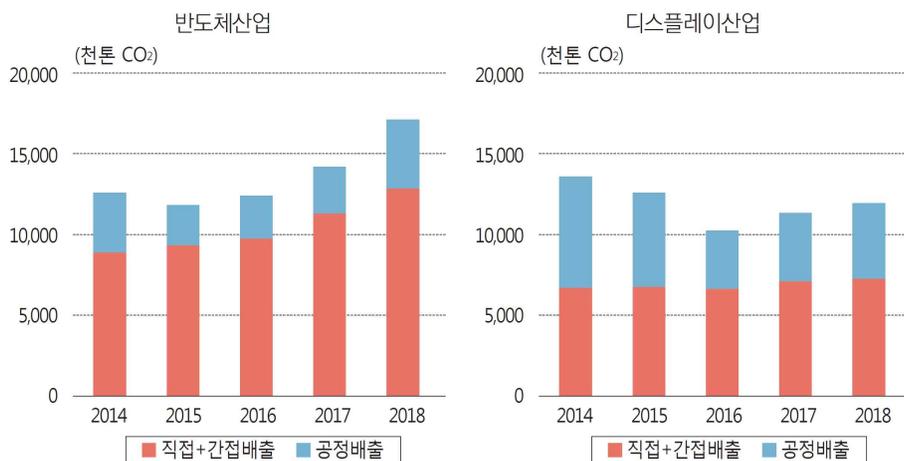


그림 1. 반도체 및 디스플레이 산업의 온실가스 배출 추이^[2]

현재 PFC 가스를 상기 공정에서 당장 대체할 수 있는 효과적인 물질이 없기 때문에 반도체 산업에서 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 하지만 높은 GWP 값을 갖고, 지구상에 잔존하는 시간이 길기 때문에 지구 온난화 방지를 위해서는 이들의 저감 또는 처리기술 개발이 반드시 필요한 상황이다 (표 1).

표 1. 주요 PFC 가스의 대기 잔류 시간 및 GWP100 값^[3]

Greenhouse gases	Atmospheric lifetime (year)	GWP100
CO ₂	50-200	1
CF ₄	50000	6500
C ₂ F ₆	10000	9200
SF ₆	3200	23900
C ₃ F ₈	2600-7000	7000
CHF ₃	250-390	11700
C ₄ F ₈	3200	8700
CH ₄	12	21
N ₂ O	120	310
NF ₃	50-740	8000

□ PFC 가스 배출 저감 전략

현재 반도체 산업에서는 PFC 가스 배출을 저감하기 위해 공정 최적화, 대체화학물질 사용, 개선된 저감 시스템 도입 등 다양한 조치를 취하고 있다. 더불어 반응하지 않고 제조장비의 반응기를 빠져나가 대기 중으로 방출되는 PFC 가스를 분리/회수를 통한 재활용 할 수 있는 기술에 대한 연구도 진행되고 있다.

○ 공정 최적화

공정 최적화는 주로 CVD 반응기 세정 공정을 대상으로 이루어져왔다. CVD 반응기 세정 공정은 반도체 공정 중 가장 큰 PFC 가스 배출원이며, 동시에 웨이퍼를 고려하지 않고 공정을 최적화 할 수 있어 제품 수율에 부정적인 영향을 미치지 않는 이점이 있다. 반도체 공정에 사용되는 PFC 가스의 50% 정도가 분해되지 않고 대기 중으로 배출되므로, 분해 효율을 높이는 방향으로 연구가 진행되었으며, 이를 위해 NO 또는 O₂를 사용하여 분해 효율을 높이는 방법이 현재 사용되고 있다. 더불어 종말점 감지(endpoint detection) 기법을 활용하여 세정 시간을 최소화함으로써, 불화가스 사용량을 줄일 수 있는

연구도 진행되고 있다. 기존 연구에 의하면 공정 최적화는 최적화되지 않은 공정과 비교하여 약 10-50 %의 배출 감소를 가져올 수 있어, 잠재적인 저비용 배출 감소 옵션이 될 수 있다. 하지만 대규모 공정 최적화 시 시간이 많이 걸리고, 계속 변화하는 생산 환경에 신속하게 대응할 수 있는 유연성을 지원하지는 않는 단점이 있다

○ 대체가스공정 개발

PFC 가스 대체물질을 사용하여 기존 공정을 새로운 저방출 공정으로 교체하는 것은 PFC 가스 배출을 저감할 수 있는 가장 근원적인 방법이며, 지난 몇 년 동안 상당한 발전을 겪은 기술 분야이다. 대체가스공정 개발은 GWP가 높은 가스를 GWP가 낮거나 GWP가 0인 가스로 교체하는 것이 일반적으로 바람직하지만, 대부분의 플라즈마 식각 공정에서는 실현 가능하지 않는 것으로 알려져 있다. 높은 종횡비 등 플라즈마 식각공정에 대한 요구 사항은 계속 더 엄격해져가고 있으며, 특히 이방성(anisotropic) 식각을 보장하기 위해서는 정확한 탄소 대 불소 비율이 필요한데, 이를 만족하는 대체물질 개발에 어려움이 있다. 최근 요오도플루오로카본(idofluorocarbons), 수소불화탄소(hydrofluorocarbons) 및 불포화 불화탄소과 같은 대체식각가스에 대해 상당한 연구가 수행되었지만 이러한 화학 물질 중 다수는 과도한 중합, 식각 선택성 부족, 가스 주입의 어려움으로 인해 실제 제조 환경에서 가능한 대체화학물질은 아니라고 알려져 있다.

따라서 현재 대부분의 대체가스공정개발은 세정 공정에 대해 초점이 맞추어져 있다. 과거 CVD 반응기 세정에 사용되는 주요 PFC 가스는 C₂F₆ 가스였으나, 2000년대 초반 이후 NF₃ 가스가 C₂F₆ 가스를 빠르게 대체하고 있는 추세이다. 특히 NF₃ 가스를 원격플라즈마원을 이용하여 불소이온 또는 원자로 분리하고 이를 공정 반응기에 주입하는 경우, NF₃ 가스가 95-99% 활용 효율로 전환됨을 보였다^[4]. 또한 NF₃는 C₂F₆에 비해 낮은 GWP(NF₃: 8,000, C₂F₆: 9,200)를 가지고 제품 양산에 미치는 영향도 크지 않으며, 현재배출권 규제에도 포함되고 있지 않다. 따라서 현재 반도체 회사는 첨단 200

mm 및 300 mm CVD 장비 라인 전반에 걸쳐 반응기 세정을 위해 원격플라즈마 기술을 채택하고 세정용 공정가스를 NF₃로 대체하였다. 하지만, 배출량 및 감축 효율에 대해 측정을 하지 않고 있어 정확한 가스대체 효과는 알려져 있지 않고, 앞으로 배출권 규제에 포함될 가능성도 있어 다른 대안 물질에 대한 연구도 지속적으로 필요하다. 가령 ClF₃는 일본 반도체 산업에서 제안되고 적용되고 있으며^[5], F₂ 또한 잠재적인 대안으로 떠오르고 있다^[6].

○ 포집·회수

공정 중에 사용되지 않고 배출된 불화가스를 효율적으로 포집하고, 분리/농축/정제 과정을 거쳐 고순도 불화가스로 재활용하는 경우, 큰 저감효과를 가져올 수 있다. 대표적인 포집·회수기술에는 액체질소와 같은 초저온 증류탑을 이용하는 초저온 회수기술, 분리막을 이용하는 막분리 기술, 활성탄 또는 제올라이트와 같은 흡착제를 이용하는 흡착분리 기술 등이 있다^[7]. 여러 반도체 제조업체와 가스 공급업체에서 불화가스 포집·회수기술에 대해 평가를 수행했으나, 성공적인 불화가스 재사용은 아직까지 없으며, 이는 고순도 가스를 요구하는 반도체 산업의 특성에 기인한다. 더욱이 이 모든 시스템(분리, 농축, 정제)을 구현하기에 많은 비용이 드는 것으로 알려져 있다. 따라서 현재까지 중앙 집중식 포집·회수기술을 구현한 반도체 시설은 없으며, 그럼에도 불구하고 소규모 포집·회수 시스템은 단일 불화가스 공정에 적합한 것으로 여겨진다.

○ 분해처리

공정 중에 사용되지 않고 배출된 불화가스를 분해하여 온실가스 효과가 없는 화학종으로 변환하는 기술로 크게 연소, 열분해, 플라즈마 분해, 촉매 분해 기술 등이 사용되고 있다. 신기술 개발과 해당 시스템의 상용화로 말미암아 불화가스 배출저감 분야에 상당한 기여를 하고 있다고 평가되는 기술이다. 대부분의 기술은 식각 및 증착 공정 모두에 적용될 수 있으며, 업계에서는 중앙집중식(end-of-pipe, EOP)보다는 공정말단에서 배출가스를 처리하는 방식(point-of-use, POU)을 선호해 왔다.

주요 불화가스들은 화학적 결합이 강한 난분해성 가스로서 분해를 위해서는 높은 온도조건(750~1,400 °C)과 많은 열량 소모가 요구된다. 연소법은 배출된 불화가스를 수소 또는 천연가스 등의 연료와 혼합하여 고온(1,200 °C)에서 산화하는 방식으로 80~90% 정도의 분해 효율을 보여 현재 상용화에 가장 근접한 기술이나, CO₂와 같은 새로운 온실가스를 생성하고 유지비용이 높은 단점이 있다. 촉매 방식은 불소 화합물을 촉매를 이용하여 저온(500~900 °C)에서 산화하고, 산화 시 생성되는 불산(HF)은 금속 산화물계의 고형 흡착제를 사용하여 분해하는 기술이다. 대량 처리가 가능하고 POU 방식이 불가능한 설비의 경우 외부에 설치하여 적용할 수 있는 유연성이 큰 장점이다. 하지만 불소 화합물 제거 효율이 낮으며, 유지보수를 위해 상당 기간 운영이 불가능한 단점도 있다. 고가의 촉매 비용도 상업화에 있어 큰 걸림돌이 되고 있다. 플라즈마 방식은 불화가스를 플라즈마에 주입하여 플라즈마 기체의 고온 또는 강력한 전자 에너지를 이용하여 불화 화합물을 분해하는 기술이다[8]. 열플라즈마를 사용하는 경우 플라즈마 중심부 온도가 10,000 °C 정도에 이르러 1,000~3,000 °C 정도의 고온 열분해 영역을 효율적으로 발생할 수 있다. 특히 CF₄와 같이 매우 높은 분해 온도(3,000 °C 이상)를 요구하는 불소 화합물을 효과적으로 제거가 할 수 있는 장점이 있다. 더불어 연소법과 달리 산소 없이 열분해 처리가 가능해 CO₂와 같은 이차 온실가스 발생을 줄일 수 있는 이점도 있다. 하지만, 연소법에 비해 대량 처리가 어려워 다수의 저감장치 설치가 필요하고, 방전전극 부식이 빨라 잦은 교체를 필요로 하는 단점이 있다. 그리고 국내에서 상대적으로 고가 에너지원인 전력을 사용하는 문제가 있어 상용화 단계에 이른 설비는 아직 보고되지 않고 있으나, 문제점 개선을 통해 현장에서 사용하려는 노력은 지속적으로 진행되고 있다.

이러한 다양한 PFC 가스 배출 저감을 위한 노력 중, 대체가스공정 개발과 분해 처리를 통한 저감기술 개발에 대한 노력이 가장 활발하며, 그 핵심 기술로서 플라즈마 기술 사용이 점차 확대되고 있다. 효율적인 플라즈마 공정 개발을 위해서는 고효율/고이온화율 플라즈마 발생제어 기술, 실공정 적용을 위한 플라즈마 진단 기술, 모델링 연구 등이 필수적이다. 이에 본 보고서는 각각의 공정에 대하여 연구개발 동향을 파악하였다

2. 대체가스공정 적용 플라즈마 기술

□ 대체가스공정 개발 동향

불소 화합물을 대체할 수 있는 화학물질 개발을 위해 수많은 연구가 수행되어 왔음에도 불구하고, 불소 화합물은 반도체 제조 공정에서 대체하기 어려운 독특한 화학적 특성을 가지고 있다. 또한 불화가스를 식각에 사용하는 경우, 화학물질이 웨이퍼와 실제로 접촉하기 때문에 CVD 세정 공정에 비해 물질 특성에 훨씬 더 민감하게 되어 대안 물질을 찾고 공정을 최적화하는 과정에 추가적인 어려움도 있다. 따라서 현재 대부분의 노력은 세정 공정에서 사용되는 PFC 가스를 기후 변화와 환경에 영향이 적은 가스로 대체하는데 주로 초점이 맞추어지고 있다.

일본 반도체 산업에서는 ClF_3 와 요오도플루오로카본을 사용할 것을 제안하였으나^[5], 이들은 HF 또는 HCl과 같이 바람직하지 않은 부산물을 생성하고, ClF_3 는 높은 반응성 및 안전성 문제로 인해 업계에서 받아들여지지 않았다. C_2F_6 을 대체하기 위해 CF_3I 를 환경 친화적인 유전체 식각 물질로 사용할 가능성도 제시되었다^[9]. 요오도플루오로카본의 약한 C-I 결합으로 인해 이들 화합물로부터 화학적 활성종들이 쉽게 만들어지고, 결과적으로는 이러한 화합물은 대기 중에 쉽게 분해되어 PFC에 비해 수명이 매우 짧고 GWP가 상대적으로 낮다. 하지만, CF_3I 는 햇빛이 있는 곳에서 빠르게 광분해되는 것으로 알려져 있으며, 광분해 과정의 부산물에는 COF_2 및 HF가 포함되어 있다. COF_2 는 매우 유독한 물질로 알려져 있다. CVD 반응기 세정 공정에서 C_2F_6 를 줄이기 위해 NF_3 기반 세정 기술이 연구되었다^[10]. NF_3 는 현재 온실가스로 분류되지 않으며 활용 효율은 C_2F_6 보다 훨씬 높은 이점이 있다. 특히 원격플라즈마와 함께 세정 공정에 사용되는 경우, NF_3 는 98% 이상의 변환 효율로 활용된다고 보고되었다^[4]. C_3F_8 또한 CVD 반응기 세정에서 더 높은 활용 효율과 더 빠른 식각 속도로 C_2F_6 의 잠재적인 대체가스로 연구되어 왔다^[11].

이러한 다양한 시도 중 NF_3 원격플라즈마 세정은 높은 변환 효율로 지구 온난화 영향을 최소화할 뿐만 아니라, 세정 속도 향상 및 반응기 내부 부식 최소화에도 효과적인 것으로 밝혀졌다. 이에 현재 대부분 반도체 업계는

C₂F₆ 대신 NF₃ 화학을 기반으로 하는 상용 CVD 반응기 세정 공정을 도입하고 있다. 하지만, 환경 친화성 및 높은 세정 효율에도 불구하고 NF₃ 원격플라즈마 세정은 NF₃ 가스 생산 비용이 높기 때문에 운전 비용이 많이 드는 단점이 있다. 더불어 최근 정부가 반도체 공정에서 사용되는 NF₃를 온실가스로 추가하기 위한 작업을 진행 중이어서, 당장 NF₃를 대체할 수 있는 물질 개발이 시급한 상황이다.

NF₃ 가스에 대한 한 가지 잠재적인 대안은 불소(F₂)가스로, 가령 F₂/N₂/Ar와 같은 불소 가스 혼합물을 사용하는 경우 GWP 값이 0이 된다^[12]. 또한 불소가스는 열 또는 플라즈마에 분해되어 효과적으로 불소 활성종을 생성할 수 있으며, 이는 빠른 세정 속도를 제공해 SiO₂ 및 Si₃N₄ 박막 세정에 매우 효과적이라 알려져 있다. 하지만 불소가스 세정 공정을 생산 라인에 적용할 때 잠재적인 문제는 높은 독성과 반응성이다. 따라서 생성/전달/처리하는 동안의 안전 조치는 불화가스 세정 기술을 성공적으로 적용하는데 매우 중요하다. C₄F₈O 및 C₃F₆O와 같은 산소 함유 탄화불소 가스 또한 NF₃를 대체할 수 있는 후보물질로 제시되었다. C₃F₆O는 대기 중에 수명이 1년 이내로 매우 짧고, GWP값도 100으로 매우 낮아 대기 중에서 쉽게 분해되어 환경에 대한 영향이 C₂F₆나 C₄F₈에 비해 상대적으로 적다. 최근 연구에 따르면 C₃F₆O/O₂ 혼합 가스는 SF₆ 또는 NF₃ 대신 CVD 반응기에 증착된 Si₃N₄ 및 SiO₂를 효율적으로 제거하는 데 사용할 수 있음이 밝혀졌다^[13].

이러한 대체물질의 개발은 공정조건 변경이 요구되므로, 적합성을 결정하기 위해서는 새로운 플라즈마원 개발 또는 공정 모델링과 진단을 통한 공정 최적화 과정이 병행되어야 한다.

□ 플라즈마원 개발

플라즈마는 보통 전자 밀도와 전자 온도에 따라 분류되며, 크게 저온 플라즈마와 같은 비평형 플라즈마(non-equilibrium plasma) 그리고 열플라즈마와 같은 평형 플라즈마(equilibrium plasma)로 나뉜다^[14]. 현재 반도체 산업에서 주로 사용되는 플라즈마는 비평형 플라즈마의 일종인 저온 플라즈마이며, 1980년 대 중반 이후 반도체 산업의 필수 기술이 되었다. 저온 플라즈마에 대한 엄격한 기준은 없으나, 반도체 공정 응용 분야의 경우 전자 온도가

수 십 eV 정도인 비평형, 약 이온화된 플라즈마라 정의할 수 있다. 전자 밀도는 $10^8 \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 에 이르고, 운전 압력은 수 mTorr에서 대기압까지 가능하다.

플라즈마를 발생하고 유지하려면 중성 입자를 이온화하고 여기시킬 수 있는 전력 공급이 필요하다. 반도체 산업에서 널리 사용되는 저온 플라즈마원은 전력 공급 방식에 따라 크게 나선형 코일에 의해 전력이 공급되는 유도 결합 플라즈마(inductively coupled plasma, ICP)와 두 개의 병렬 전극 사이에서 플라즈마가 발생하는 축전 결합 플라즈마(capacitively coupled plasma, CCP)로 나뉜다^[15].

- 유도 결합 플라즈마원 (Inductively coupled plasma, ICP)

반도체 산업에서 널리 사용되고 있는 ICP는 유전체 창 상단에 위치한 나선형 평면 코일을 통해 플라즈마에 고주파 전력을 공급하는 방법이다. 평면 코일에 인가된 고주파 전력은 반응기 내에 시간에 따라 변하는 전자기장을 생성하고, 전자는 방위각 방향으로 진동하는 전기장에 의해 앞뒤로 가속된다. 결국 가속된 전자는 중성 입자와 충돌하여 이온화 함으로써 플라즈마를 유지하게 된다. 전자 가속도 방향이 반응기 벽과 평행하기 때문에 벽면으로의 전자 손실은 적어 CCP보다 더 높은 플라즈마 밀도를 효율적으로 생성할 수 있는 장점이 있다. 반도체 산업에 사용되는 고주파 주파수는 일반적으로 13.56MHz 이고 압력은 수 십 mTorr 정도이다. 플라즈마로의 전력 전달을 반사 없이 최대화하기 위해 임피던스 매칭 네트워크(Impedance matching network)가 전원과 코일 사이에 사용되어 효율을 높이고 있다.

ICP에서 펄스 전력을 사용하는 경우, 주어진 평균전력 대비 더 높은 플라즈마 밀도를 발생시킬 수 있음이 보고되었다^[16]. 펄스 반복 주파수(pulse repetition frequency, PRF)는 보통 1-20kHz 정도이고, duty 사이클은 10% 정도이다. 펄스 전력을 사용하는 경우, 전력 입력이 없는 동안 전자는 재결합 및 부착 반응을 통해 반응기 벽으로 빠르게 손실되므로, 이후에 인가된 전력은 보다 적은 수의 전자에 분산되어 전자를 효율적으로 가열함으로써 순간적으로 높은 전자 온도를 얻을 수 있다. 상승한 전자 온도는 이온화율을 높여, 고밀도 플라즈마를 발생시킬 뿐만 아니라, PFC 가스와 같은 반응가스 분해

에도 효율적일 수 있다. 하지만, ICP 플라즈마는 전자 밀도가 낮을 때에는 축전 결합이 우세한 E-모드에서 운전되고, 전자 밀도가 높은 경우에는 유도 결합이 우세한 H-모드에서 운전되므로, 전력이 상승하는 구간에서 E-H 모드 전환이 일어날 수 있다. 이는 이온화 불안정성과 전자 밀도 변조의 요인이 되므로, E-H 모드 전환을 효율적으로 방지할 수 있는 기술이 필요하게 된다^[17].

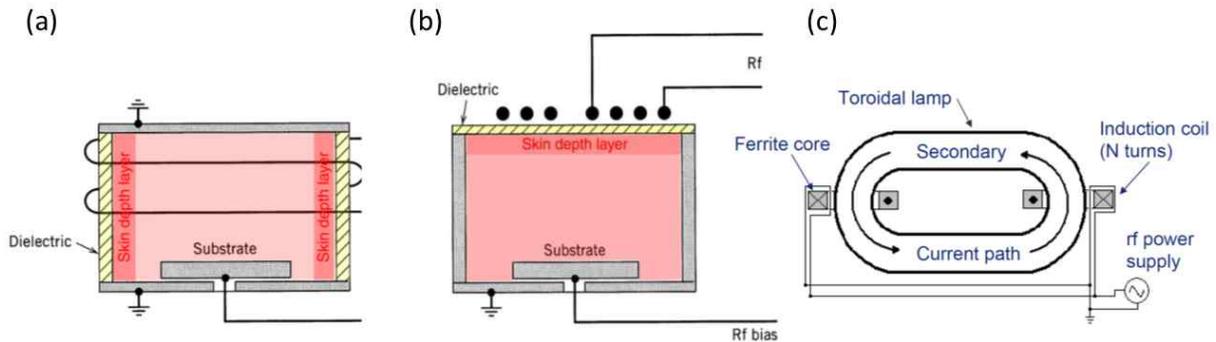


그림 2. 유도 결합 플라즈마원(Inductively coupled plasma, ICP) 종류: (a) 솔레노이드 형; 나선형; (c) 페라이트 코어(ferrite core) 형^[18]

○ 축전 결합 플라즈마 (Capacitively coupled plasma, CCP)

CCP는 일정한 간격을 두고 평행한 두 전극 사이에서 고주파 전력을 인가하여 플라즈마 방전이 발생하는 방식으로, 현재 반도체 공정에서 가장 널리 사용되고 있는 플라즈마원이다. 상대적으로 가벼운 전자만 전극에 수직으로 발생된 진동 전기장에 의해 앞뒤로 가속되어 중성입자를 이온화시키면서 플라즈마 발생에 기여하게 된다. 반면 상대적으로 무거운 이온은 전기장으로부터 얻는 에너지가 거의 없으며, 대신 플라즈마와 전극 표면에 사이에 형성된 전압에 의해 가속되어 플라즈마를 빠져나간다. CCP는 두 전극 사이에 균일한 전기장을 발생시킬 수 있어 넓은 영역에 걸쳐 균일하게 발생된 플라즈마를 제공하는 장점이 있다. 현재 이온 및 중성 활성종의 유량 그리고 웨이퍼에 입사되는 이온 에너지 및 각도 분포의 독립적인 제어를 제공하기 위해 다중 주파수 축전 결합 플라즈마(Multi-frequency capacitively coupled plasma, MF-CCP)가 개발되어 사용되고 있다^[19].

전극으로 가속되어 빠져나온 이온이 전극 또는 웨이퍼 표면에 충돌할 때, 에너지가 충분한 경우 전극 표면에서 2차 전자 방출을 유도하여 CCP 이온화에 크게 기여할 수 있다. 이와 같이 CCP가 주로 2차 전자 방출을 통해 유지되는 경우, 즉 2차 전자가 대부분의 이온화 및 들뜸 반응을 일으킬 때 CCP는 γ -모드로 운전되는 것으로 간주되며, 고밀도 플라즈마를 얻을 수 있다. 2차 전자 방출은 입사되는 이온 유속 및 에너지에 비례한다. CCP가 γ -모드에서 작동하게 되면 플라즈마 밀도가 증가하게 되지만, 증착과 같은 공정에서 높은 이온 유속과 에너지로 웨이퍼나 기판에 손상을 주는 문제가 있다. 이온 유속 및 에너지를 제어하기 위해 저주파 전원을 추가로 사용하는 경우, 2차 전자 방출 효율 또한 바뀌게 되어 전자 밀도에 영향을 미치게 된다. 따라서 두 가지 조건을 모두 만족시킬 수 있는 기술 개발이 더 많은 옵션을 갖는 다중 주파수 전원 개발을 통해 필요하다.

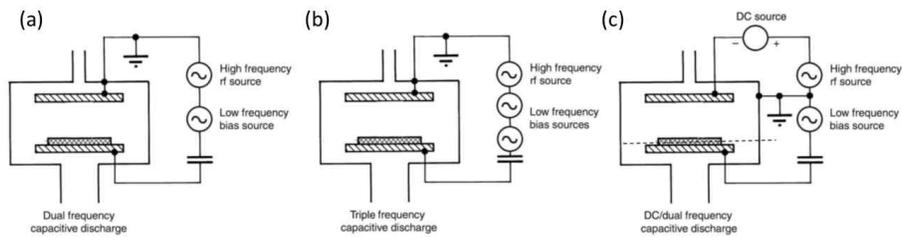


그림 3. 다중 주파수 축전 결합 플라즈마(Multi-frequency capacitively coupled plasma, MF-CCP) 종류: (a) 이중 주파수 CCP; (b) 삼중 주파수 CCP; (c) DC 바이어스 이중 주파수 CCP^[18]

○ 원격플라즈마원 (Remote plasma source, RPS)

원격플라즈마는 플라즈마원이 시편 처리부 또는 반응기와 분리되어 있는 장비에서 발생하는 플라즈마를 일컬으며, 반도체 공정에서 주로 세정과 같은 등방성 식각 및 박막 증착을 위해 개발되었다^[20]. RPS는 플라즈마 발생원이 시편으로부터 격리되어 있으므로, 하전입자 재결합에 따른 하전입자의 유속이 줄어들고, 대부분 중성입자만 공급되게 된다. 따라서, 식각 및 표면 처리에 필요한 화학적 활성종을 풍부하게 제공하지만, 대전(charging), 이온 충돌(ion bombardment) 및 UV/VUV 선에 의해 발생할 수 있는 손상을 최소화할 수 있는 장점이 있다^[21].

현재 대부분의 CVD 반응기 세정 기술은 진공 상태에서 RPS를 이용하여 다량의 불소 활성종을 공급하여 식각하는 방식을 채택하고 있다. RPS 세정 방식은 플라즈마 발생장치가 반응기와 분리되어 간접적으로 플라즈마를 발생 시키므로 반응기 손상없이 신속하게 세정할 수 있으며, 동시에 세정용 소스 가스(예: NF_3) 활용율(~99 %) 또한 높은 것으로 알려져 있다. 따라서 기존 in-situ 세정에 비해 PFC 가스 배출을 상당히 감소시키는 대표적인 환경친화형 공정으로 여겨지고 있다.

RPS의 경우 세정 대상이 플라즈마에 직접 노출되는 시스템이 아니므로, 플라즈마원 개발에 대한 제약이 적어 관련 연구도 활발한 편이다. 주요 요구 사항은 대용량 가스를 처리할 수 있고, 높은 해리 효율을 갖으며, 다양한 불화 가스 소스를 활용할 수 있는 플라즈마원 개발이다. 더불어 CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8 와 같은 PFC 가스 사용하는 경우, 산소를 함께 사용하면 식각 효율이 높다고 알려 있으므로, 산소를 주입하여 방전할 수 있는 플라즈마원 개발도 중요하다. 초기 RPS 개발은 주로 마이크로웨이브 방전에 기반하여 200mm CVD 반응기 세정에 성공적으로 구현되었으나, 처리할 수 있는 가스 양에 제한 있고 시스템 자체가 복잡 및 방대한 단점이 있다. 300 mm CVD 시스템을 위해서는 보다 작은 설치 공간이 필요하고, 반면 많은 기체 유량을 사용할 수 있는 RPS 개발이 필요하다. 널리 사용되고 있는 최신 RSP 기술은 변압기 결합 토로이달 플라즈마(transformer coupled toroidal plasma, TCTP)이다. 고출력 고효율 고주파 전원장치(400 kHz)와 페라이트 코어를 사용함으로써 기존대비 100~1000배 향상된 고밀도 플라즈마를 발생시킬 수 있는 기술이다^[22]. 플라즈마를 가두는 도넛 모양의 반응기가 있고, 고주파 전력은 변압기 회로에 의해 플라즈마로 전달되어 전력은 항상 H-모드로 결합된다. TCTP 플라즈마의 전력 밀도는 아르곤의 경우 $4.8\text{W}/\text{cm}^3$, C_2F_6 의 경우 $15\text{W}/\text{cm}^3$ 에 도달할 수 있다. 그림 1은 반도체 산업에서 가장 널리 사용되는 TCTP 소스의 개략도이다.

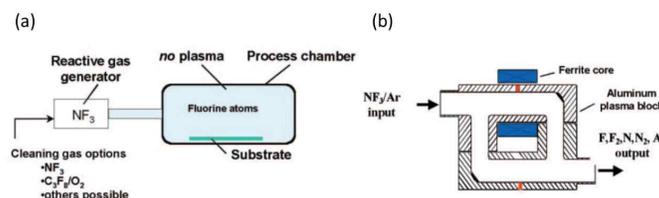


그림 4. 원격플라즈마원 (Remote plasma source, RPS): (a) 원격플라즈마원 개념도; (b) 변압기 결합 토로이달 플라즈마원(transformer coupled toroidal plasma, TCTP)^[22]

□ 공정 모델링 기법

플라즈마 모델링은 플라즈마 발생 및 이후 물질과의 반응을 예측하는데 사용될 수 있어 실험에 비해 비용 측면에서 훨씬 효율적이며, 더 광범위한 매개변수적 연구를 수행할 수 있다. 특히 모델링은 일반적으로 실험에서 측정하기 어려운 플라즈마 기본 변수에 대한 정보를 제공하여 공정 전반에 대한 이해를 도울 수 있으므로, 반응기 설계 또는 공정 최적화 과정에서 널리 사용되고 있다. 최근 반도체 공정에서 플라즈마 기술이 고도화되고 새로운 설비가 지속적으로 도입되면서, 업계에서는 보다 정확하고 실용적인 모델 개발에 대한 요구가 과거 어느 때보다 크다.

플라즈마 공정은 중성기체의 이온화, 생성된 하전입자와 전기장 간 상호작용, 빠른 열 및 물질 전달, 화학반응, 난류 등 매우 복잡한 물리화학적 현상을 포함하고 있다. 게다가 공정 자체는 본질적으로 원자 또는 분자들 사이에 일어나는 현상이라 정확한 계산을 위해서는 원자 수준(atomistic)의 접근 방식이 반드시 필요하지만, 이들 대부분 현상은 압력, 온도, 전기장과 같은 거시적 변수의 영향을 받기 때문에 연속체(continuum)적 접근 방식도 필요하다. 따라서 두 가지 접근법을 동시에 고려할 수 있는 모델 개발이 중요해지고 있다. 더불어 시간 스케일의 불일치도 플라즈마 공정 모델링에서 해결해야 할 중요한 문제이다. 가령, 원자 또는 분자가 고에너지 전자에 의해 들뜨게(exciting)되는 과정은 ns 정도로 매우 짧은 프로세스이지만, 화학종 확산과 같은 현상은 수 초 정도 걸리는 비교적 긴 프로세스이다. 전혀 없는 컴퓨터 성능 개선에도 불구하고 플라즈마 공정의 모든 측면을 하나의 모델에 통합하여 계산하는 것은 아직 매우 어렵다.

식각 또는 세정과 같은 반도체 공정에서 주로 저온 플라즈마 기술이 사용되고 있고, 반면 열분해를 통한 배출저감 기술에는 열플라즈마와 같은 고온 플라즈마 기술이 선호되고 있다. 이 두 플라즈마는 여러 가지 측면에서 성질이 매우 달라 모델링을 위해 각자 다른 접근 방법이 개발되었으며, 이 장에서는 주로 저온 플라즈마 공정 모델링에 대해 논의하고, 열플라즈마 공정에 대한 논의는 다음 장으로 미루기로 한다. 모델링 측면에서 저온 플라즈마가 가지는 주요 특징은 먼저 각 종마다 가지는 평균 온도가 같지 않아 플라즈마를 단일 유체로 생각할 수 없다는 것이다. 대부분 저온 플라즈마가 저압에서 발생되기 때

문에 입자 간 충돌이 빈번하지 않아 전자, 이온, 중성종이 단 한 가지 온도로 기술될 수 있는 열적 평형에 이루지 못하게 된다. 더불어 이들 입자들의 에너지 분포가 Maxwell 분포를 갖지 않는 특징이 있다. 특히 전자는 플라즈마 공정에서 활성종 발생에 아주 중요한 역할을 하는데, 이때 화학반응속도 (reaction rate)는 전자 에너지 분포함수(electron energy distribution function, EEDF)에 의해 주로 결정된다. 따라서 EEDF에 대한 정확한 정보가 필요하지만, 대부분 저온 플라즈마의 경우 non-Maxwell 분포를 갖는 경우가 많다.

현재 저온 플라즈마 공정 모델링에는 유체 모델(fluid model), 운동 모델(kinetic model), 그리고 하이브리드 모델(hybrid model)이 주로 사용되고 있다. 이러한 모델은 고전적인 기체운동학 및 유체 역학 이론을 하전입자를 포함하는 플라즈마 상태로 확장하여 얻은 모델들이다. 이 중 탁월하게 우월한 모델은 없으며, 해석하려는 공정의 물리화학적 현상의 시공간적 스케일에 의해 주로 결정된다. 일반적으로 유체 모델은 계산 시간이 가장 적게 소요되는 반면, 운동 모델은 가장 높은 정확도와 신뢰도를 제공하는 것으로 알려져 있다. 각 모델에 대한 간단한 소개는 아래와 같다.

- 유체 모델 (Fluid model)

유체 모델은 플라즈마를 구성하고 있는 입자의 밀도, 평균 속도, 그리고 평균 에너지를 기반으로 플라즈마를 설명한다. 이러한 거시적 물리량은 플라즈마 내 각 종에 대한 연속 방정식 그리고 운동량 및 에너지 보존 방정식을 풀어 얻는다. 반면 플라즈마 발생 및 하전입자 계산에 필요한 전자기장 정보는 Maxwell 또는 Poisson 방정식을 유체 방정식과 결합하여 계산함으로써 일관 (self-consistent)되게 연계 된다. 유체 모델에서 계산되는 변수(밀도, 에너지 및 속도)의 수는 모델에 포함된 화학종의 수에 따라 달라지며, 보통 50개 이상의 종이 고려되고 있다. 유체 모델의 주요 장점은 계산 시간이 짧아 보다 많은 화학종을 포함할 수 있다는 점이다. 이 경우 광범위한 매개변수적 연구를 수행 가능하여, 반응로 설계 및 공정조건이 방전 특성 및 공정 결과에 미치는 영향을 신속하게 확인할 수 있다. 그러나 EEDF와 같은 정보가 유체 모델에서는 누락되어 결과가 부정확할 수 있다는 단점이 있다. 분포함수 대신 변수의

평균값만을 계산하는 유체 모델은 각 화학종의 에너지 또는 속도 분포함수를 Maxwell 분포로 가정하고 있으나, 이는 실제 플라즈마 상황과 많이 다르다.

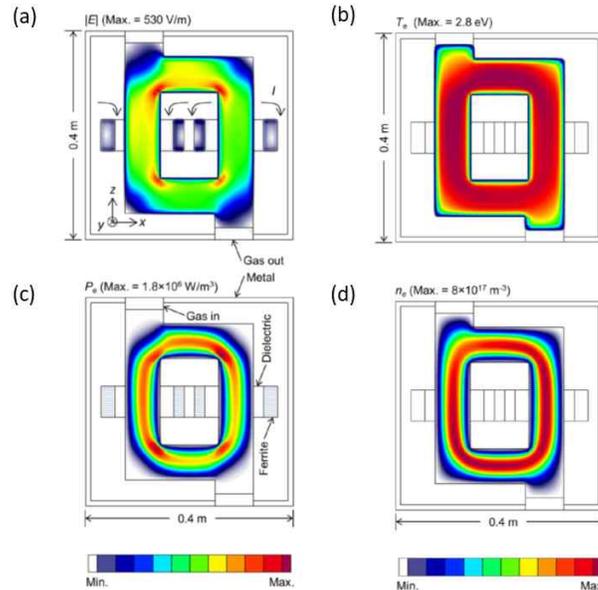


그림 5. 유체 모델링을 사용한 변압기 결합 토로이달 플라즈마원(transformer coupled toroidal plasma, TCTP) 전산 해석: (a) 전기장 세기; (b) 전자 온도; (c) 전자에게 전달된 전력; (d) 전자 밀도^[23]

○ 운동 모델 (Kinetic model)

운동 모델 또는 입자 모델은 실제 공정 보다는 감소된 수의 유사 입자 (pseudo-particle)를 도입하여 계산을 수행함으로써, 플라즈마 내 입자의 집합적 거동(collective behavior)을 이해하는데 사용되는 모델링 기법이다. 운동 모델에서 유사 입자는 플라즈마 내 다양한 종의 입자그룹(유사 입자 당 실제 입자 수: $10^5 - 10^7$)을 대표하는데 사용되는 계산 단위이다. 운동 모델은 분포함수에 대한 가정 없이 Newton-Lorentz 및 Maxwell 방정식과 같은 제 1 원리(first-principle) 방정식을 기반으로 하기 때문에, 일반적으로 매우 정확하고 신뢰도가 높은 결과를 제공한다고 알려져 있다. 하지만, 많은 유사 입자를 직접 따라가면서 계산해야 하므로, 운동 모델은 계산 시간과 비용이 많이 드는 단점이 있다. 그래서 실제 계산에서는 계산 시간을 줄이기 위해 전자와 이온은 일반적으로 유사 입자로 추적(tracking)되는 반면, 배후 중성 입자는

공간에 균일하게 분포되어 있다고 가정하여 계산하는 경우가 많다. 계산되는 입자의 수가 유사 입자를 사용함으로써 많이 감소했음에도 불구하고, 이 모델링 기술은 플라즈마 공정을 잘 기술할 수 있음이 연구를 통해 밝혀졌다. 특히 non-Maxwell 분포를 갖는 플라즈마를 연구할 때 운동 모델을 사용하면 EEDF와 같은 통계적 속성을 계산 결과로부터 얻을 수 있는 큰 장점이 있다. 계산 시간은 추적하는 유사 입자의 수에 비례하므로, 계산 시간과 입자의 충분한 통계적 의미 사이의 균형을 맞출 수 있는 유사 입자의 수를 신중하게 선택하는 것이 중요하다. 또 다른 방법은 모델링을 위해 GPU(그래픽 처리 장치)와 같은 고속 계산 장치를 적용하는 것이다.

- 하이브리드 모델 (Hybrid model)

하이브리드 모델은 유체 및 운동 모델을 조합한 모델링 기법이다. 유체 접근법과 같이 거시적 규모의 플라즈마 특성을 기술하는 모듈과 운동 모델에서와 같이 유사 입자를 사용하여 플라즈마 특성을 추적하는 모듈을 결합하게 된다. 하이브리드 모델은 유체 모델의 빠른 속도와 운동 모델의 정확성을 결합함으로써, 입자 모델보다 빠르게 실행될 수 있으며 유체 모델보다 더 정확하게 설명할 수 있다. 공정에서 계산해야 할 핵심 물리량에 따라 다른 종류의 하이브리드 모델들이 만들어질 수 있다. 가령 전자 에너지 분포에 대한 정보가 중요한 경우, 전자는 입자로 취급되고 이온은 유체로 간주될 수 있다. 반면, 반도체 공정에서 웨이퍼 표면에 영향을 미치는 이온 에너지 또는 각도 분포를 연구하기 위해서는 이온은 입자로 취급하고, 전자는 유체 모델링 기법을 사용하여 기술될 수 있다. 하이브리드 모델에서는 거시적 및 미시적 물리현상이 모두 추적되기 때문에 적절한 시간 스케일을 선택하는데 어려움이 있다. 시간 스케일에 대한 요구 사항은 해석하려고 하는 공정의 규모에 따라 다를 수 있다. 고주파 영역에서 전자기장 진동과 같은 물리현상은 1 ns보다 짧은 시간 스케일에서 발생하나, 반응로 내부에서 기체 흐름과 같은 현상은 완료되는데 몇 초 이상이 필요하게 된다. 이런 시간 스케일에서의 차이로 파생되는 문제는 종종 계산을 다른 모듈로 나누어 해결하게 된다. 각 모듈에서는 각 입자의 거동 해석에 적합한 시간 스케일로 계산이 수행되며 되며, 이후 매개변수가 업데이트되고 시간 분할 방식으로 모듈 간에 전송된다. 계산은 수렴될 때까지 모듈 간에 계층적 방식으로 계속 반복된다.

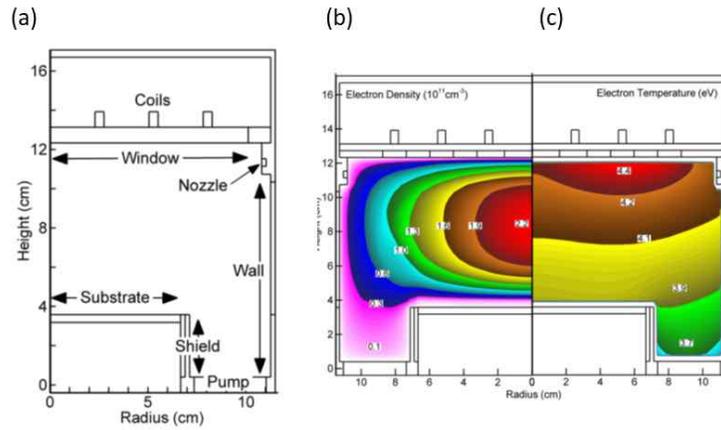


그림 6. 하이브리드 모델링을 통한 유도 결합 플라즈마원(Inductively coupled plasma, ICP) 전산 해석: (a) 계산 영역; (b) 전자 밀도; (c) 전자 온도

□ 공정 진단 기법

반도체 공정을 최적화하는 과정은 공정 조건을 끊임없이 바꾸어가면서 방전 특성 및 공정 결과가 어떻게 영향을 받는지 지속적으로 모니터링 하는 과정이다. 기존 PFC 가스를 대체할 새로운 공정을 개발하는 경우, 플라즈마 발생 기체가 바뀌게 되어 플라즈마 물성에 많은 영향을 미치게 되므로, 효율인 최적화 방향 제시를 위해서는 공정 중 플라즈마 물성에 대한 심도 있는 이해가 필요하다. 일반적으로 업계에서는 플라즈마 반응기를 black box화하여 실험계획법에 기반한 시행착오법(trial-and-error method)을 통해 최적화하는 경우가 많다. 하지만 플라즈마 공정이 고도화되고 있고 요구되는 정밀도도 높아지고 있어, 플라즈마 공정 내부에 대한 깊은 이해와 통찰력 없이는 최적화하는데 한계가 있다. 따라서 공정에 대한 이해를 높일 수 있는 진단 기법에 대한 요구 또한 점차 커지고 있는 실정이다. 더불어 식각과 세정의 경우 공정이 완료되는 시점(end-point-detection, EPD)을 모니터링을 통해 정확하고 신속하게 결정하는 경우, 사용되는 PFC 가스량을 줄일 수 있는 장점이 있다. 때문에 공정 결과에 영향을 미치지 않으면서 in-situ로 모니터링 할 수 있는 진단 기술 또한 요구되고 있다. 반도체 공정에서 공정을 지배하고 공정 결과에 영향을 주는 핵심 플라즈마 변수에는 전자 밀도, 온도, 전자 에너지 분포, 활성종 밀도 및 조성, 이온 에너지 분포 등이 있다. 이들 변수를 한 번에 모두 측정할 수 있는 진단 기법은 없으며, 관심에 변수 따라 다른 기법이 적용되고

있다. 현재까지 개발된 주요 진단 기술에는 랑뮤어 탐침법(Langmuir probe), 광 방출 분석법(optical emission spectroscopy; OES), 사중극자 질량 분석법(quadrupole mass spectrometer; QMS), 푸리에 변환 적외선 분광법(Fourier-transform infrared spectroscopy, FT-IR) 등이 있다.

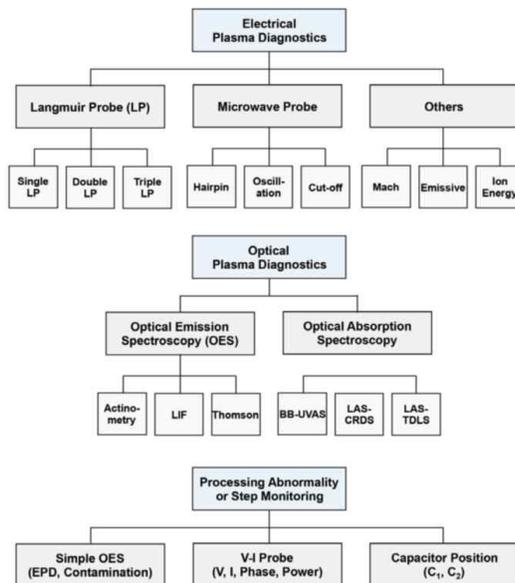


그림 7. 반도체 공 정에서 사용되는 플라즈마 진단 및 공정 모니터링 기법[25]

○ 랑뮤어 탐침법 (Langmuir probe)

플라즈마 반응기내 전자 밀도, 전자 온도, 전자 에너지 분포함수, 이온 밀도, 이온 포화전류 등을 측정할수 있는 방법이며, 플라즈마 물성을 이해하는데 큰 도움을 주는 진단 기법이다. 랑뮤어 탐침은 금속 탐침, 탐침에 가변 전압을 걸 수 있는 전원, 그리고 탐침을 통해 흐르는 전류를 측정할 수 있는 전류계로 구성되어 있다. 측정 시 탐침이 플라즈마 내부로 삽입되며, 이후 전압을 걸어 발생하는 전자 및 이온 전류를 측정하고, 이로부터 구체적인 플라즈마 물성에 대한 정보를 얻게 된다. 가령, 전자 전류와 전자 포화 전류 곡선은 전자 온도에 대한 정보를 제공하며, 전자 밀도는 전자 포화 전류 또는 이온 포화 전류를 통해 얻을 수 있고, 전자 에너지 분포는 V-I 곡선의 1차, 2차 미분한 값을 통해 도출된다. 랑뮤어 탐침법은 특히 전자 에너지 분포를 측정할 수 있는 거의 유일한 방법으로 알려져 있어, 플라즈마 발생 메커니즘을 이해하는 많은 도움을 줄 뿐만 아니라, 플라즈마 모델링에서 얻은 전자 에너지 분포함수

(EEDF)와 비교를 통해 모델 검증에도 유용하게 쓰이는 기법이다. 두 개의 탐침을 사용하는 경우(double Langmuir probe), 전자 온도, 이온 밀도, 그리고 이온 포화전류도 측정 가능하지만, 플라즈마 내에 형성되는 하전 입자의 질량 및 이온 에너지 분포 등은 측정이 불가능하다. 진단 시 탐침의 전류 수집 유효 면적(effective current-collecting area)은 탐침의 실제 표면적이 아니라 탐침 주위에 형성된 쉬스(sheath)의 표면적이기 때문에 전자 밀도와 이온 밀도가 다르게 측정되는 등 오차가 발생한다. 또한 플라즈마 내에 위치한 탐침이 고에너지 하전 입자 및 광자 충돌하여 2차 전자를 방출하여 오차의 원인이 되기도 한다. 이외에 탐침이 플라즈마에 직접 노출됨으로써, 이물질이 탐침 표면에 부착되거나 부식될 우려가 있으므로 이러한 문제점을 최소화할 수 있는 기술의 개발이 필요하다. 가장 큰 문제점은 탐침이 반응로 내로 삽입됨으로써 플라즈마 자체에 영향을 미칠 수 있다는 것이다. 따라서 랑뮤어 탐침법은 양산 공정 감시보다는 공정 개발 단계에서 많이 쓰이는 진단 기법이다.

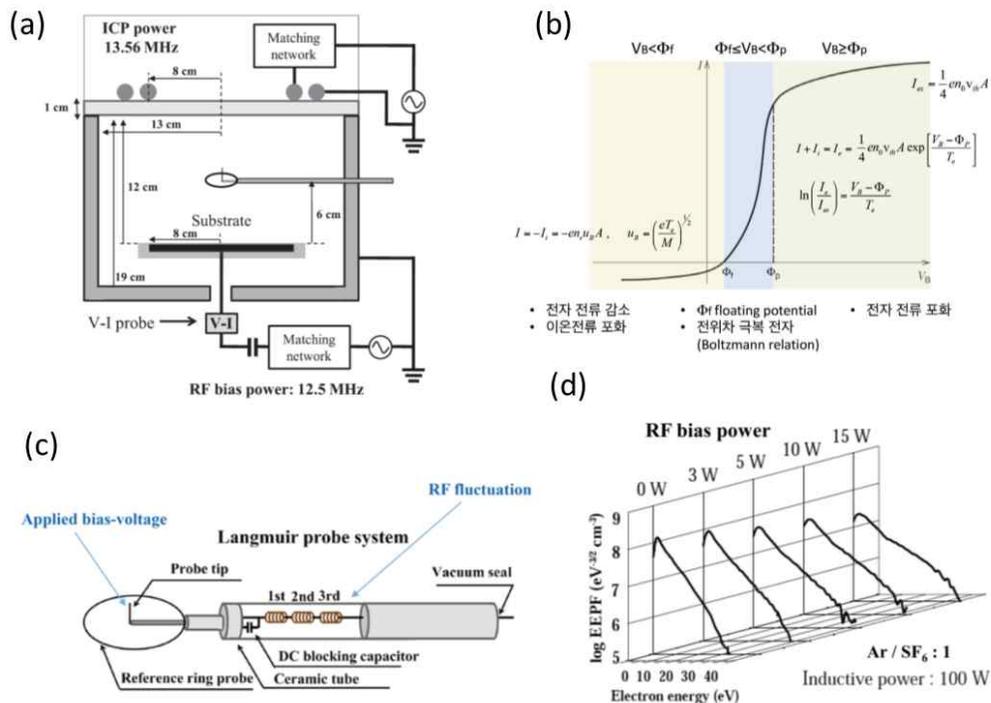


그림 8. 랑뮤어 탐침법(Langmuir probe)을 이용한 ICP 플라즈마에서 전자 에너지 분포함수(EEDF) 측정: (a) 랑뮤어 탐침법 측정 실험 개략도; (b) 랑뮤어 탐침법을 통해 측정된 V-I 곡선; (c) 랑뮤어 탐침 구조; (d) 다양한 입력 전력에 대해 측정된 전자 에너지 분포함수(EEDF)^[25,26]

○ 광 방출 분석법 (Optical emission spectroscopy, OES)

공정에 영향을 미치지 않고 간접적으로 실시간 모니터링 할 수 있는 방법 중, 가장 광범위하게 사용되는 진단 기법은 광 방출 분석기법(OES; optical emission spectroscopy)이다. 플라즈마에서 생성된 고에너지 전자가 원자에 충돌 할 경우, 원자 내에 속박된 전자의 에너지 준위가 상승했다가 다시 낮은 에너지 상태로 천이하면서 빛이 나오게 된다. 하전 입자에 의해 분자가 해리(dissociation)되거나 이후 생성된 화학적 활성종이 재결합(recombination)하는 경우에도 들뜬(excited) 원자 또는 분자들이 만들어지며, 이들 또한 빛을 방출하여 안정한 상태로 천이된다. 이때 방출되는 빛의 파장은 원자 또는 분자의 종류에 따라 서로 다른 값을 갖게 되므로, 플라즈마에서 방출된 빛의 파장을 분석함으로써 플라즈마 내에 어떠한 원자 또는 분자가 존재하는지 신속하고 정확하게 알아낼 수 있다. 따라서 OES 기법은 주로 식각 또는 세정 공정의 공정 종료 시점을 결정하는데 널리 사용되고 있다. 식각이나 세정이 이루어지는 경우 박막 또는 반응기 오염 물질이 부산물로 플라즈마 내에 존재하여 OES 기법으로 감지 가능하며, 공정이 마무리되어 갈수록 부산물로부터 나오는 빛의 세기가 줄어들게 된다. 따라서 OES 기법을 활용하면 빛의 세기가 급격히 감소하는 시점을 찾아내어 공정 종료 시점으로 사용할 수 있다. 더불어 농도를 알고 있는 원자(예: 반응기 기본 배경 가스로 사용되는 아르곤)로부터 방출되는 빛의 세기와 특정 원자에서 방출되는 빛의 세기를 비교하면 그 원자의 농도에 대한 정량적 해석도 가능하다 (Actinometry). 가령, PFC 가스(예: NF_3) 분해로부터 생성되는 불소 원자의 방출선(예: 703.8 nm) 세기를 아르곤 방출선(예: 750.4 nm) 세기와 비교하여, 특정 공정 조건에서 PFC 가스 분해 효율을 측정할 수 있다.

전자 온도, 전자 밀도, 이온화율과 같은 플라즈마 물성에 대한 정보도 OES 기법을 통해 획득 가능하다. 열플라즈마와 같이 플라즈마가 국부적 열역학적 평형 상태(local thermal equilibrium, LTE)에 있는 경우, 관측된 방출선 절대 세기는 들뜬 상태(excited-state) 수밀도(number density)에 대한 정보를 제공하며, 수밀도는 Boltzmann 분포를 따르게 된다. 이 경우 서로 다른 두 개의 방출선 세기를 비교한 양은 Boltzmann 분포를 따르며 전자 온도만의

함수가 된다. 만약 몇 개의 방출선 세기를 측정하였다면, 선형 근사(linear fitting)를 통해 전자 온도를 구할 수 있다. 하지만, 저온 플라즈마와 같이 플라즈마가 LTE 조건을 만족하지 못하는 경우, 수밀도 함수는 Boltzmann 분포를 따르지 않게 되며, 방출선 세기 비교값도 전자 온도 뿐만 아니라 전자 밀도의 함수가 된다. 이 경우 이론적 접근법(예: collisional-radiative model)을 사용하여 들뜸 상태(excited-state) 수밀도를 구하고, 이를 측정값과 비교하여 전자 온도와 전자 밀도를 구하게 된다.

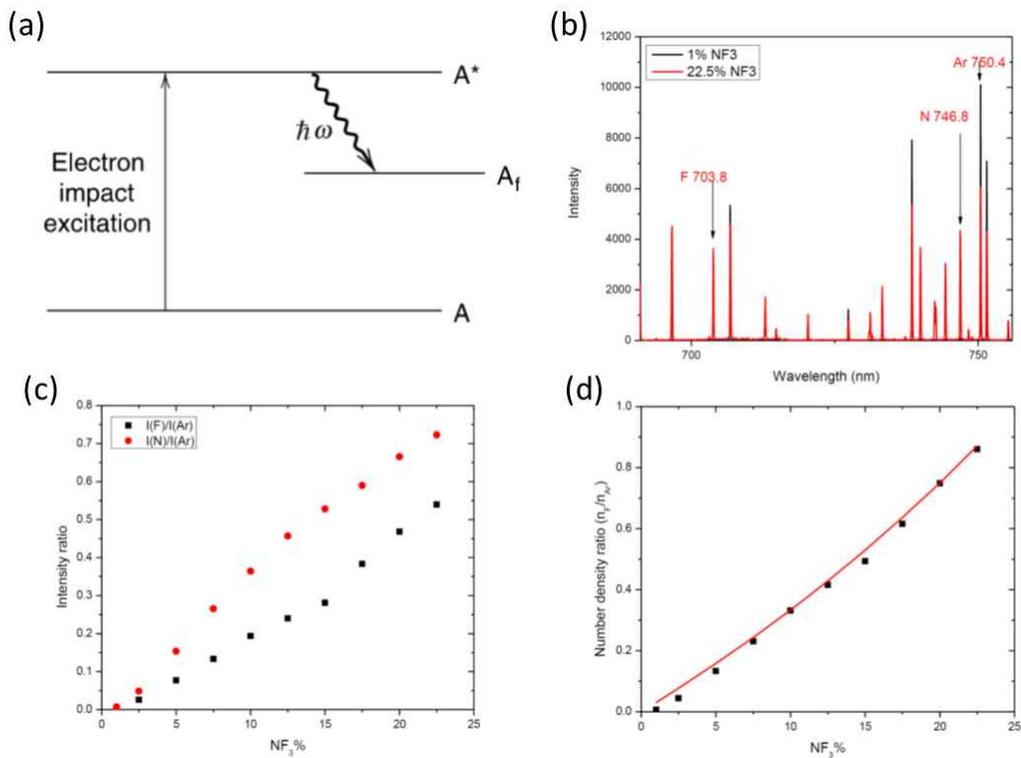


그림 9. 광 방출 분석법(Optical emission spectroscopy, OES)을 이용한 원격플라즈마에서 NF₃ 가스 분해 효율 분석 (Argon Actinometry): (a) 광 방출 원리; (b) 두 가지 NF₃ 농도 (1%, 22.5%)에 대해서 측정된 광 방출 스펙트럼; (c) NF₃ 농도에 따른 방출선 세기 비; (d) 방출선 세기 비교로부터 계산된 불소 원자 대 아르곤 원자 수밀도 비^[27]

○ 푸리에 변환 적외선 분광법 (Fourier-transform infrared spectroscopy, FT-IR)

플라즈마 공정에서 반응으로 생성되는 화학종의 정량적 해석에 많이 사용되고 있는 기법이다. 플라즈마 반응기 또는 공정 가스 배출구에서 채취된 기체 시료에 적외선을 가하면 극성을 갖는 분자들 간에 진동과 회전 들뜸에 맞

는 에너지 흡수가 일어난다. 이때 흡수 또는 투과되는 정도를 적외선 파수(wavenumber)의 함수로 측정함으로써 특정 분자의 작용기 존재 여부를 알 수 있는데, 이런 현상을 활용한 것이 푸리에 변환 적외선 분광법(FT-IR)이다. 보정된 FT-IR 기법을 사용하는 경우 화학종의 체적 농도(volumetric concentration)를 측정할 수 있어, 공정에서 배출된 PFC 가스의 총량으로부터 탄소 배출량(million metric ton carbon equivalent, MMTCE)을 계산하는데 주로 사용되고 있다. 더불어 공정 종료 시점 감시에도 사용되고 있다. 특히 CVD 반응기 세정 시 PFC 양을 줄이기 위해 원격플라즈마원을 사용하는 경우 중요한 문제 하나는 공정 종료 시점 감지이다. 원격플라즈마는 일반적으로 세정하려고 하는 CVD 반응기 전단에 위치하기 때문에 CVD 반응기 내에는 화학종을 들뜬 상태로 만들 수 있는 고에너지 이온이나 전자가 존재하지 않는다. 즉 CVD 반응기에서 빛이 방출되지 않아 종점 검출에 OES 기법을 활용할 수 없게 되며, 이 경우 FT-IR 기법이 주로 활용되고 있다. 하지만, 시료를 채취하는 과정에서 활성종들이 재결합을 이룰 수 있기 때문에 반응기 내에 일어나는 화학반응에 대한 직접적인 정보를 얻는데 한계가 있다.

○ 사중극자 질량분석기(Quadruple Mass Spectroscopy, QMS)

사중극자 질량분석기는 필라멘트를 가열하여 방출된 열전자를 가속시킨 후 중성 입자와 충돌시켜 이온을 만들고, 사중 극자로 이루어진 질량 필터에 직류 및 교류 전압을 인가하여 특정 질량/전하 비를 갖는 입자만 선택적으로 통과시켜 중성 입자 및 이온의 질량을 측정한다. 측정된 질량을 바탕으로 플라즈마 반응기내에 존재하는 화학종을 예측하는 진단 기법이다. 저온 플라즈마에서의 가스 질량 스펙트럼은 상대적으로 간단하기 때문에 플라즈마 공정 연구나 생산 공정 제어에서 FT-IR 기법과 함께 플라즈마 반응종의 정량적 해석에 많이 사용되고 있다. 특히 불소 원소과 같은 단일 원소의 경우 FT-IR 기법으로는 측정이 불가능하므로, 반응종의 정량 해석을 위해 두 가지 기법을 병행하는 경우가 많다. 더불어 충돌로 해리된 이온이나, 활성종의 밀도, 질량 및 에너지 분포를 측정하여 플라즈마 내에서 전자와 활성종 생성에 대한 메커니즘을 밝히는데도 사용되고 있다.

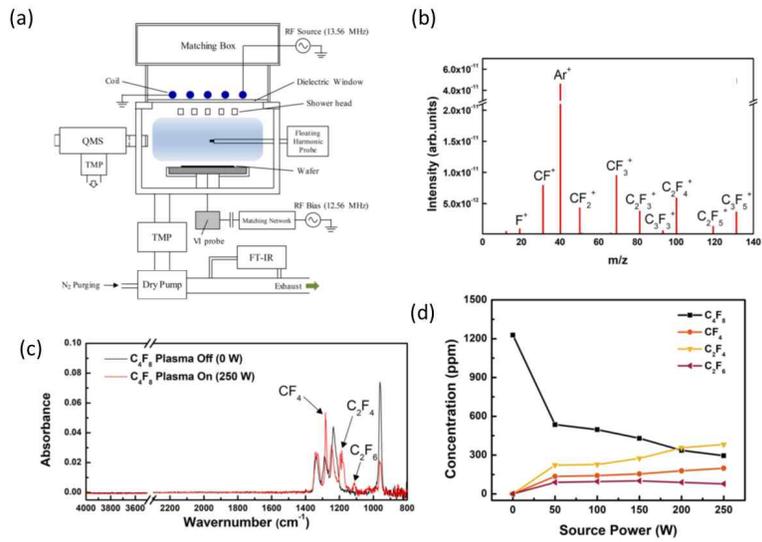


그림 10. 푸리에 변환 적외선 분광법(Fourier-transform infrared spectroscopy, FT-IR)과 사중극자 질량분석기(Quadruple Mass Spectroscopy, QMS)를 이용한 PFC 가스 분해 효율 측정 실험: (a) 실험 개략도; (b) QMS를 통해 측정된 질량 스펙트럼; (c) FT-IR을 통해 얻은 IR 스펙트럼; (d) FT-IR 분석을 통해 계산된 입력 전력에 따른 PFC 가스 분해 효율^[28]

3. 배출제어 적용 플라즈마 기술

□ 플라즈마를 이용한 배출제어 기술 동향

반도체 공정에서 배출된 PFC 가스를 분해하여 저감하는 분야에도 플라즈마가 핵심 기술로서 확대되고 있다. PFC 가스 분해는 높은 온도와 열량을 필요로 하여 재래식 기술로 처리하는 경우 분해 효율 측면에서 한계가 있으므로, 새로운 대체 기술 개발이 시급한 실정이다. 이러한 다양한 노력 중 열플라즈마 기술에 대해 관심이 현재 가장 집중되고 있다. 열플라즈마는 연소와 같이 화학적 반응으로 발생시킨 열유체에서는 얻을 수 없는 초고온, 고열용량, 다량의 활성입자를 제공하며, 빠른 열 및 물질 전달 능력을 가지고 있다^[14]. 따라서 PFC 가스의 신속하고 효율적인 분해를 가능케 하여 공정처리 단계 및 시간을 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 온도 제어 및 출력 조절 또한 용이하고 다양한 기체들이 열유체로 쉽게 전환될 수 있어서 열분해 공정에 많은 유연성을 제공하기도 한다. 더불어, 열플라즈마는 전기를 주요 에너지원으로 사용하여 발생되므로, 전력이 재생에너지를 통해 공급되는 경우 탄소중립도에 기여할 수 있는 친환경적인 열원이다. 현재 열플라즈마를 이용한 PFC 열분해 공정은 대부분 POU 방식으로 그 구성은 플라즈마 발생 시스템 (플라즈마 토치 및 전원 공급장치), PFC 가스 주입부, 열분해 반응기, 가스 냉각부, 수조, 습식 스크러버로 이루어진다. 공정 개발에 있어 주요 관심사는 전원의 종류, 출력 규모, 발생기 구조, 사용기체 종류, 적용 환경 등에 따라 효율이 높고 오랜 수명을 가지며 안정적 운전이 가능한 열플라즈마 발생기 설계 제작 기술, 그리고 폐가스의 효과적인 혼합 및 부산물 제거 기술을 갖는 처리 장치 개발이다^[8]. 이를 위해 다양한 실험, 진단, 모델링 기법 등이 개발되고 있다.

90년대 초반부터 비평형 저온 플라즈마 기술 또한 PFC 가스 분해 연구에 적용되어 왔다. 현재 PFC 가스 분해에 사용되고 있는 주요 비평형 저온 플라즈마에는 저압 마이크로웨이브 플라즈마, 저압 유도 결합 플라즈마, 그리고 유전체 장벽 방전(dielectric barrier discharge, DBD) 플라즈마를 포함하는 다양한 상압 비평형 플라즈마 등이 있다. 이들은 열플라즈마에 비해 높은 전자 에너지를 얻을 수 있어 빠른 반응 속도를 제공할 수 있으며, 낮은 전력

소비로 운전 가능한 장점이 있지만, 대유량 PFC 가스 처리에는 한계가 있어 소규모 연구 위주로 사용되고 있다. 따라서 본 보고서는 열플라즈마 공정을 중심으로 논의하고자 한다.

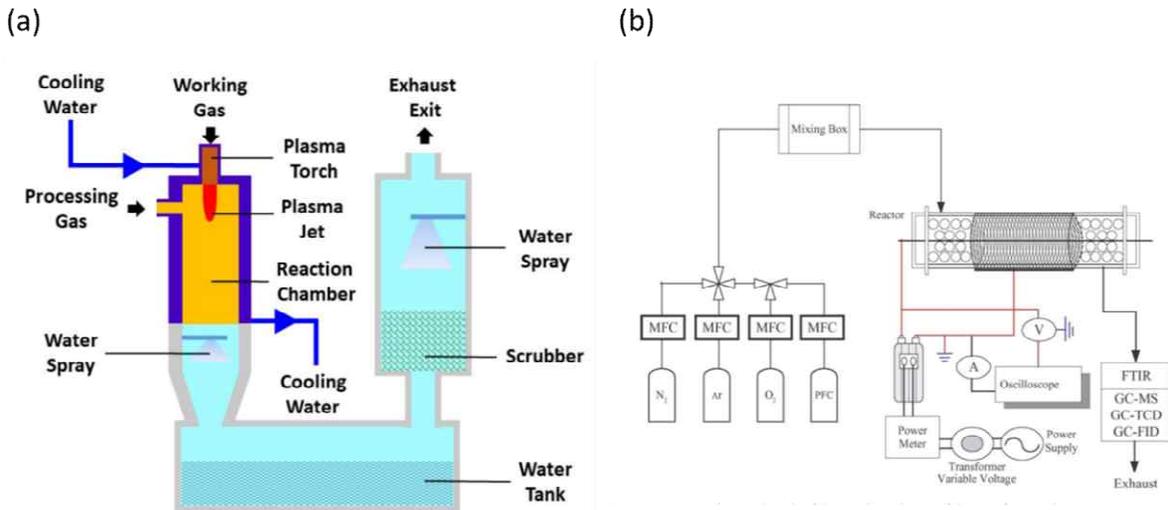


그림 11. 플라즈마 기반 PFC 배출저감 기술: (a) 열플라즈마를 이용한 PFC 가스 분해 공정^[29]; (b) 축매와 상압 비평형 플라즈마(유전체 장벽 방전, dielectric barrier discharge, DBD)를 이용한 PFC 가스 분해 공정^[30]

□ 열플라즈마 발생 기술

직류 또는 고주파 방전을 통해 생성된 아크에 가스를 주입하면 가스가 빠르게 가열되어 팽창하고, 이를 노즐을 통해 반응기 쪽으로 방출시키면 고온 고속의 열플라즈마 제트를 얻을 수 있다. 열 플라즈마 제트의 온도는 최대 10,000 °C 까지 도달할 수 있고, 속도 범위는 노즐 설계에 따라 수 m/s에서 초음속까지 이를 수 있다. 식각 또는 세정 공정에 주로 사용되는 저온 플라즈마와 달리 대부분 열플라즈마는 대기압 상태에서 발생되어 입자간 충돌이 잦으므로, 전자 온도와 중성 입자의 온도가 수천도 정도에서 동일하게 되는 열적 평형 상태에 있다. 따라서 열플라즈마는 높은 에너지 및 열속은 물론 전자를 포함한 다양한 화학적 활성종을 풍부하게 제공한다. 이에 1960년대 중반 초기 개발부터 열플라즈마는 금속 정련, 세라믹 스프레이 코팅, 절단, 용접, 폐기물 처리 등의 다양한 분야에서 열원으로 광범위하게 사용되어 왔다. 현재 PFC 가스 열분해 공정에 사용되는 열플라즈마 발생기는 크게 직류 플라즈마 토치, 고주파 플라즈마 토치, 마이크로웨이브 플라즈마 토치가 있다.

○ 직류 플라즈마 토치 (Direct-current plasma torch)

직류 플라즈마 토치는 일반적으로 음극과 양극으로 구성되고, 전극 형태에 따라 막대형(rod-type)과 공동형(hollow-type), 그리고 운전방식에 따라 이송식(transfer-type)과 비이송식(nontransfer-type)으로 크게 분류할 수 있다. 막대형의 경우, 음극은 일반적으로 2 % thoriated 텅스텐으로 제작되며 원뿔 형태를 갖는다. 음극에서 전자는 열전자방출(thermionic emission) 현상에 의해 생성된다. PFC 가스 열분해 시 일반적으로 산소를 첨가제로 사용하게 되는데, 텅스텐 음극의 경우 음극에 형성된 산화물 층은 낮은 온도(~1700 °C)에서도 쉽게 증발하여 심각한 침식을 유발하게 된다. 따라서 텅스텐 음극의 경우 산소 함유 가스를 사용할 수 없는 단점이 있다. 반면 하프늄 또는 지르코늄과 같은 고온 재료를 전극으로 사용하는 경우, 산화물이 보다 더 높은 녹는점 또는 끓는점을 갖게 되어 침식이 심각하지 않으므로 산소를 포함하는 가스와 함께 사용할 수 있다.

공동형 음극은 속이 빈 원통형으로 일반적으로 고순도 무산소동(oxygen-free copper)으로 만들어지며, 냉각수에 의해 냉각이 이루어진다. 이 때문에 전자 방출은 열전자방출 보다는 이온 충돌(ion bombardment)에 따른 전자 방출 효과가 더 크다. 따라서 막대형 토치와 달리 공기 및 수증기를 포함한 모든 종류의 가스를 플라즈마 가스로 사용할 수 있고, 상대적으로 긴 아크 기둥을 형성함으로써 넓은 영역의 플라즈마 제트를 제공하는 장점이 있다. 따라서 막대형 토치에 비해 대용량 공정 개발에 유리한 측면이 있다. 하지만 음극 침식율이 막대형 토치보다 높아 잦은 전극 교체가 공정 시 중요한 문제이며, 이를 해결하기 위해 음극 주위에 솔레노이드를 설치하여 축 방향 자기장을 형성하고 아크를 회전시킴으로써 침식율을 낮추는 방법도 사용되고 있다.

비이송식으로 운전되는 경우, 아크는 플라즈마 토치 내부에서만 존재하며 토치 외부에 형성된 플라즈마 제트에 PFC와 같은 처리대상 가스를 분사함으로써 열분해하는 방식이다. 토치 내부로 주입하는 경우, 고온 아크의 높은 열전달율로 PFC 가스 분해 효율을 높일 수는 있지만, 부식성 가스 발생으로 인한 전극 손상이 문제가 되어 이를 해결하는 방안 마련이 시급하다. 이송식 운전은 파일럿 전극을 사용하여 플라즈마 토치 내부에서 아크를 형성한 후, 이

를 토치 외부 전극까지 이송시켜 운전하는 방식으로 금속 정련 및 용접/절단에 많이 사용되고 있으나 폐 가스처리 용도로는 사용되지 않고 있다.

직류 플라즈마 토치는 PFC 가스 열분해에 있어서 몇 가지 장점이 있다. 먼저 상대적으로 작은 토치 직경은 수축된 플라즈마 제트를 발생시켜, 토치 축에서 온도 및 속도를 증가시켜준다. 높은 온도는 난분해성 PFC 가스의 열분해를 촉진시키며, 빠른 플라즈마 제트 속도는 반응기 내 난류를 발생시켜 플라즈마 제트와 처리대상 가스의 혼합을 증진시킨다. 토치 효율도 70% 이상으로 70 % 미만의 효율을 갖는 고주파 플라즈마 토치보다 월등히 높다. 하지만, 전극 오염 및 침식에 따른 빈번한 전극 교체는 공정 효율을 심각하게 낮추는 단점이며 전극 수명 연장을 위한 토치 최적설계 연구가 필요하다.

- 고주파 플라즈마 토치 (Radio-frequency plasma torch)

고주파 플라즈마 토치는 일반적으로 플라즈마를 가두는 세라믹 튜브와 고주파 전력을 공급하는 코일로 구성되며, 더 나은 열유체 제어를 위해 플라즈마 토치 끝에 노즐을 부착하는 경우도 있다. 고주파 플라즈마 토치에서 플라즈마는 ICP 저온 플라즈마와 유사한 유도 가열 방식에 의해 발생 및 유지된다. 반면 저온 플라즈마의 경우 평면형 코일이 주로 사용되나, 고주파 토치의 경우에는 플라즈마 제트 발생이 용이한 솔레노이드 형 코일이 주로 사용되고 있다. PFC 가스 열분해에 있어 고주파 토치는 직류 토치에 비해 몇 가지 장점이 있다. 먼저 전극이 따로 존재하지 않아 거의 모든 종류의 기체를 플라즈마 가스로 사용할 수 있고, 동시에 반응물을 플라즈마 내부로 주입 가능하여 더 나은 열분해 효율을 얻을 수 있다. 더불어 고주파 토치는 직류 토치에 비해 더 넓은 고온 영역을 제공하고, 제트 속도도 낮아 반응물의 플라즈마 내 체류 시간을 증가시켜 분해 효율을 높일 수 있다. 하지만 상대적으로 낮은 플라즈마 온도 및 토치 효율 (<70%), 그리고 저비용 대용량 고주파 전원 개발은 여전히 해결해야할 과제로 남아 있다.

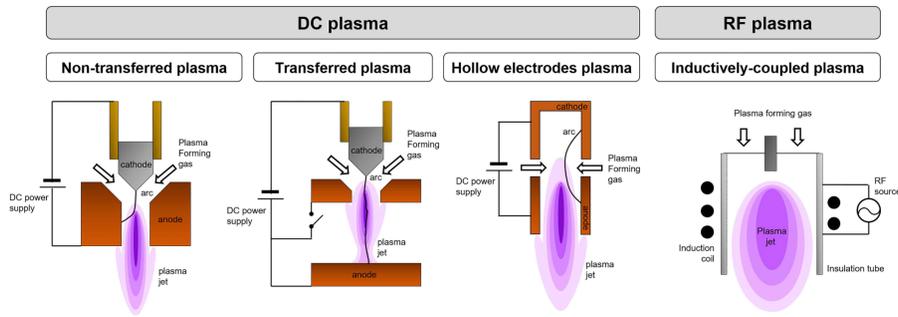


그림 12. 열플라즈마 발생기 종류: 비이송식 막대형 토치 (non-transferred rod-type plasma torch), 이송식 막대형 토치 (transferred rod-type plasma torch), 비이송식 공동형 토치 (non-transferred hollow electrode plasma torch), 고주파 토치(inductively coupled plasma torch)^[31]

o 마이크로웨이브 플라즈마 토치 (Microwave plasma torch)

무전극 형태로 운전되는 고주파 플라즈마 토치는 직류 토치에 비해 다양한 장점이 있지만, 고출력(>100 kW)에서 운전되는 경우 에너지 결합 효율이 40 % 미만으로 급격히 저하되는 단점이 있다. 이에 무전극 운전의 장점을 살리면서 고효율에서 운전하기 위해 마이크로웨이브 플라즈마 토치가 개발되어 PFC 가스 열분해에 적용되고 있다. 마이크로웨이브 토치에서 플라즈마는 마그네트론(magnetron, 2.45 GHz)에서 방출되는 전자기 표면파(electromagnetic surface wave)에 의해 발생 유지되며, 100 %에 가까운 전력 전달 효율을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다. 하지만 대형화 시 상응하는 전원공급 장치 개발이 어려운 기술적 한계가 있다.

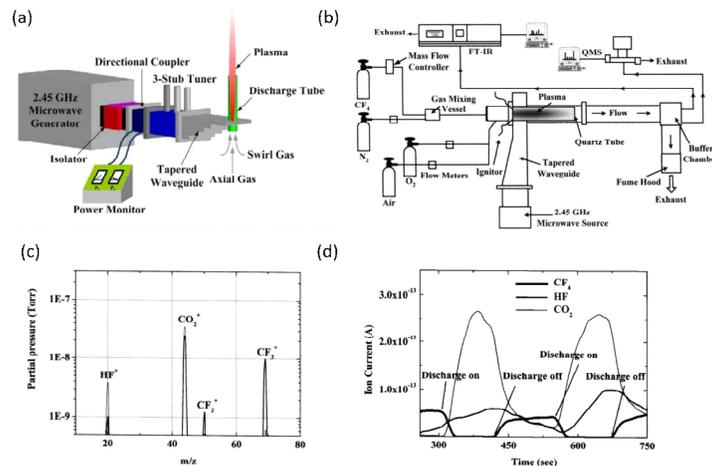


그림 13. 마이크로웨이브 플라즈마 토치를 이용한 CF₄ 분해: (a) 마이크로웨이브 플라즈마 토치 개략도; (b) 마이크로웨이브 플라즈마 토치를 이용한 PFC 분해 시스템 개략도; (c) 사중 극자 질량분석기 분석 결과 (화학종 분압); (d) 사중 극자 질량분석기 분석 결과 (이온 전류)^[32,33]

□ 열플라즈마 공정 모델링 기법

열플라즈마 공정은 기체 이온화에 의한 플라즈마 생성, 플라즈마와 주입 물질 간 빠른 열 및 물질 전달, 난류, 그리고 고온에서 화학반응을 포함하는 아주 복잡한 프로세스이다. 더불어 수 천도가 넘는 공정 온도와 반응기 축 및 반경 방향으로 형성된 급격한 온도/속도 구배(gradient)로 인해 공정을 실시간으로 모니터링 할 수 있는 적당한 진단 기법 조차도 많지 않다. 이러한 이유로 공정 이해를 통한 최적화 기법에는 모델링이 많이 사용되고 있다. PFC 열 분해 공정에 사용되고 있는 주요 모델링 기법은 크게 화학 평형 조성 계산, 화학 반응 모델링, 열유체 모델링 등이 있다.

○ 화학 평형 조성 계산 (Chemical equilibrium composition calculation)

화학 평형 조성 계산은 플라즈마와 주입된 폐가스가 완벽히 섞여 특정 혼합 온도(mixing temperature)에 이르고, 이후 화학 반응이 완전이 마무리 되어 화학적 평형에 도달했다고 가정했을 때 화학적 조성을 계산하는 기법이다. 일반적으로 깁스 에너지 최소화(Gibbs energy minimization) 알고리즘을 기반으로 계산되며, 주어진 폐 가스 주입량에 대해 분해 수준 및 효율을 예측 하는데 유용한 계산 기법이다. 더불어 난분해성 PFC 가스 분해에 적합한 공정 온도 또는 혼합 온도 도출에도 사용되고 있다. 가령 화학적으로 매우 안정적인 CF_4 분해는 3000 °C 이상의 고온이 필요한 것으로 화학 평형 조성 계산을 통해 알려져 있다. 하지만, 실제 공정에서 반응기 내부 온도는 한 가지 온도로 정의되지 않으며 반응물의 체류시간도 짧아 화학적 평형 상태에 있다고 가정하기 힘들다. 특히 반응물이 열플라즈마를 통해 분해 된 후 반응기 하부로 이동하면서 온도가 낮아지고 발생된 활성종들이 재결합하는 현상을 적절하게 설명할 수 없는 단점이 있다.

○ 화학 반응 모델링 (Chemical kinetic modeling)

상기 화학 평형 조성 계산의 단점을 보완하기 위해 화학 반응 모델링 기법이 사용되고 있다. 일반적으로 화학 반응 모델링은 시간의 함수로 1차원 적으로 계산되며, 존재 가능한 화학종, 그리고 이들의 생성 및 소멸과 관련된 화학 반응식을 모두 포함하여 계산하게 된다. 반응속도상수(reaction rate

constant)는 주로 온도에 의존하며, 계산에 사용되는 반응기 온도는 반응물이 반응기 하부로 내려가면서 점차 겪는 온도 변화를 고려하기 위해 시간에 따라 변하는 값으로 주어지게 된다. 초기 온도는 혼합 온도(mixing temperature) 계산을 통해 얻어지고, 이후 온도 변화는 반응기 벽으로 손실되는 열과 반응물의 체류 시간을 열량계와 연속 방정식(continuity equation)을 이용하여 각각 계산한 후 추정하게 된다. 반응기 내에서 시간에 따른 화학종의 생성 및 소멸에 대한 정보를 어느정도 정확성을 갖고 신속하게 얻을 수 있는 장점이 있으나, 화학종의 확산 및 난류 형성에 따른 재순환 등을 고려하지 않아 정확한 화학종 농도 계산에는 한계가 있다.

○ 열유체 모델링 (Thermo-fluid modeling)

반응기 내부에서 일어나는 화학 반응에 대해 보다 정확하고 완벽한 정보를 얻기 위해 2차원적 열유체 모델도 개발되었다. 이 모델은 기존 플라즈마 토치 모델에 개별 화학종의 화학 반응식을 추가한 모델이며, 주로 2차원 계산 영역에 대해 고려한다. 열플라즈마 내 입자들(전자, 이온, 중성입자)은 잦은 충돌에 의해 국부적 열평형을 이루고 있으며, 이 때 플라즈마 온도는 한 가지 온도로 정의될 수 있어 단일 열유체로 생각할 수 있다. 따라서 기존 열유체 모델 기법을 적용할 수 있으나, 플라즈마 발생 및 유지를 모사하기 위해서는 기존 유체 방정식을 전자기식과 함께 풀어야한다.

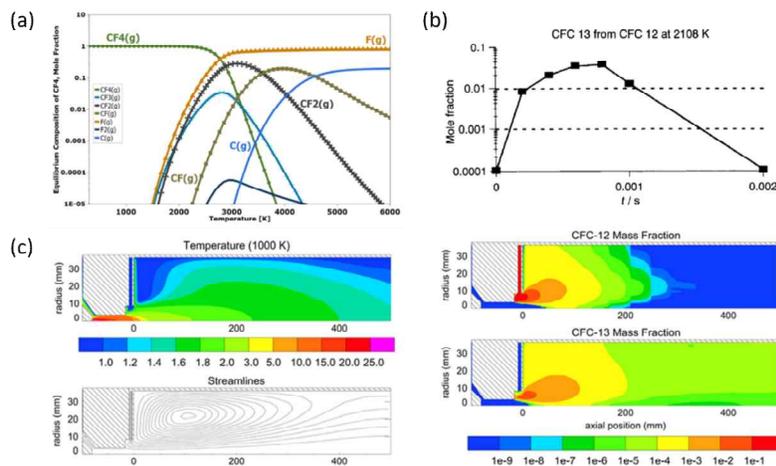


그림 14. 열플라즈마를 이용한 PFC 가스 열분해 공정 모델링 예: (a) CF₄ 열분해 공정에 대한 화학 평형 조성(chemical equilibrium composition) 모델링; (b) CCl₂F₂ 열분해 공정에 대한 1차원 화학 반응(chemical kinetic) 모델링; (c) CCl₂F₂ 열분해 공정에 대한 2차원 열유체(thermo-fluid) 모델링^[34]

전형적인 열유체 모델의 경우, 질량 연속식, 운동량 보존식, 에너지 보존식, 화학종 질량 보존식, 전하 연속식 그리고 난류 모델을 포함하고 있으며, 결합된 편미분 방정식을 수치적(예: 유한체적기법, finite-volume method)으로 풀어 유동 및 화학장에 대한 정보를 얻게 된다. 고온에서 화학반응은 매우 빨라(stiff) 수치적으로 발산하기 쉬우므로 계산은 보통 두 개의 개별 단계로 이루어진다. 첫 단계에서는 유체 역학 및 전자기 방정식만을 풀어 온도 및 유동장 정보를 제공하며, 이 때 초기 화학종 농도는 화학 평형 조성 계산이나 1차원 화학 반응 계산을 통해 주어진다. 두 번째 단계에서는 계산된 온도 및 유동장에 대해 화학 반응식을 계산하여 고려된 모든 화학종에 대한 농도장 정보를 얻는다. 이 때 화학 반응에 따른 엔탈피 생성 및 소멸이 일어나 온도장에 영향을 미칠 수 있지만, 보통은 온도가 재계산되지 않아 오차가 발생할 수도 있다. 좀 더 정확하고 일관성(self-consistent) 있는 결과를 얻기 위해 유동장과 화학장을 결합하여 동시에 계산할 수는 있으나, 수렴 안정성이 낮아 이를 해결할 수 있는 수치 기법 개발이 필요하다. 또 다른 문제는 다양한 화학종에 대한 수송(예: 확산 계수, 점성 계수, 열전달 계수) 및 열역학적(예: 밀도, 열용량) 계수에 대한 정보가 넓은 온도 영역(300 °C K ~ 10,000 °C)에 대해 존재하지 않는다는 것이다. 이러한 정보는 기본 플라즈마 기체(아르곤, 산소, 질소, 수소)에 대해서는 측정 및 통계역학적 계산을 통해 잘 알려져 있지만, PFC 가스 그리고 이들 부산물에 대해서는 잘 알려져 있지 않으므로 정확한 모델링을 위해서는 이들 데이터 확보가 시급한 상황이다.

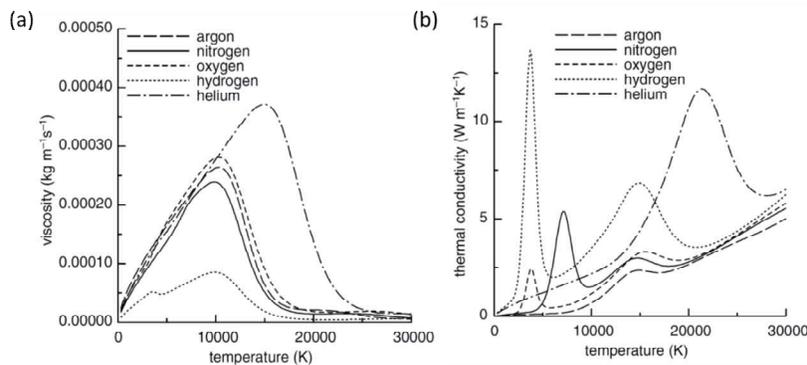


그림 15. 온도에 따른 다양한 기체 물성: (a) 점성 계수; (b) 열전달 계수. 일반적으로 기본 플라즈마 기체(아르곤, 산소, 질소, 수소, 헬륨)에 대해서는 측정 및 통계역학적 계산을 통해 잘 알려져 있지만, PFC 가스 그리고 이들 부산물에 대해서는 잘 알려져 있지 않다^[35]

□ 열플라즈마 공정 진단 기법

높은 열플라즈마 온도, 그리고 반응기 내에 형성된 급격한 온도, 속도, 화학장 구배(gradient) 인해 열플라즈마 공정을 in-situ 방식으로 진단하는데 많은 제약이 따르지만, 효율적인 공정 설계/최적화와 개발된 모델 검증을 위해서는 상응하는 진단 기술 개발이 반드시 필요하다. PFC 가스 열분해 공정에서 열플라즈마는 주로 열원으로 사용되므로, 공정 이해에 필요한 핵심 변수에는 플라즈마 밀도, 온도, 유속, 열함유량, 열분해 생성물 농도 등이 있다. 저온 플라즈마와 마찬가지로 이러한 변수를 한번에 측정할 수 있는 열플라즈마 진단법은 없으며, 관심 대상에 따라 사용되는 진단 기법이 달라진다. 현재 열플라즈마 진단에 사용되는 주요 기법에는 광 방출 분석법(OES), 엔탈피 탐침법(enthalpy probe), 레이저 유도 형광법(laser induced fluorescence, LIF), 푸리에 변환 적외선 분광법(Fourier-transform infrared spectroscopy, FT-IR) 등이 있다.

○ 광 방출 분석법 (Optical emission spectroscopy, OES)

저온 플라즈마 공정과 유사하게 바닥상태에서 들뜬 입자가 다시 바닥상태로 천이하면서 방출하는 빛을 분석하여 플라즈마 온도, 밀도 등을 측정할 수 있는 진단 기법이다. 하지만, 저온 플라즈마와는 달리 열플라즈마는 국부적 열역학적 평형 상태(LTE)에 있다고 가정할 수 있어, 들뜬 상태(excited-state) 수밀도(number density)는 Boltzmann 분포를 따르게 된다. 이 경우 서로 다른 두 개의 방출선 세기를 비교한 양은 전자 온도만의 함수가 되고, 몇 개의 방출선 세기를 측정하여 선형 근사를 통해 전자 온도를 구할 수 있다(볼츠만 기울기 법, Boltzmann plot method). LTE 조건에서는 플라즈마를 구성하는 모든 입자가 같은 온도를 갖는다고 가정할 수 있어, 도출된 전자 온도는 이온 또는 중성입자의 온도로 사용될 수 있다.

OES기법을 통해 측정된 빛의 세기는 측정된 방출선이 지나 온 시선(line of sight)을 따라 방출도를 적분한 양이 된다. 상대적으로 균일한 분포를 갖는 저온 플라즈마 경우 큰 문제가 없으나, 플라즈마 분포가 균일하지 않는 경우에는 반드시 국부적인 지역에서 방출된 빛의 세기만을 측정해야한다. PFC

가스 열분해 공정이 정상상태로 운전되는 경우, 플라즈마 물성 또는 부산물 농도는 시간에 따라 크게 변하지는 않지만 공간적으로 구배가 큰 비균질 분포를 갖는다. 따라서 정확한 진단을 위해서는 Abel 변환(Abel inversion)과 같은 수학적 기법을 사용하여 국부적인 빛의 세기에 대한 정보를 얻는 것이 매우 중요하다.

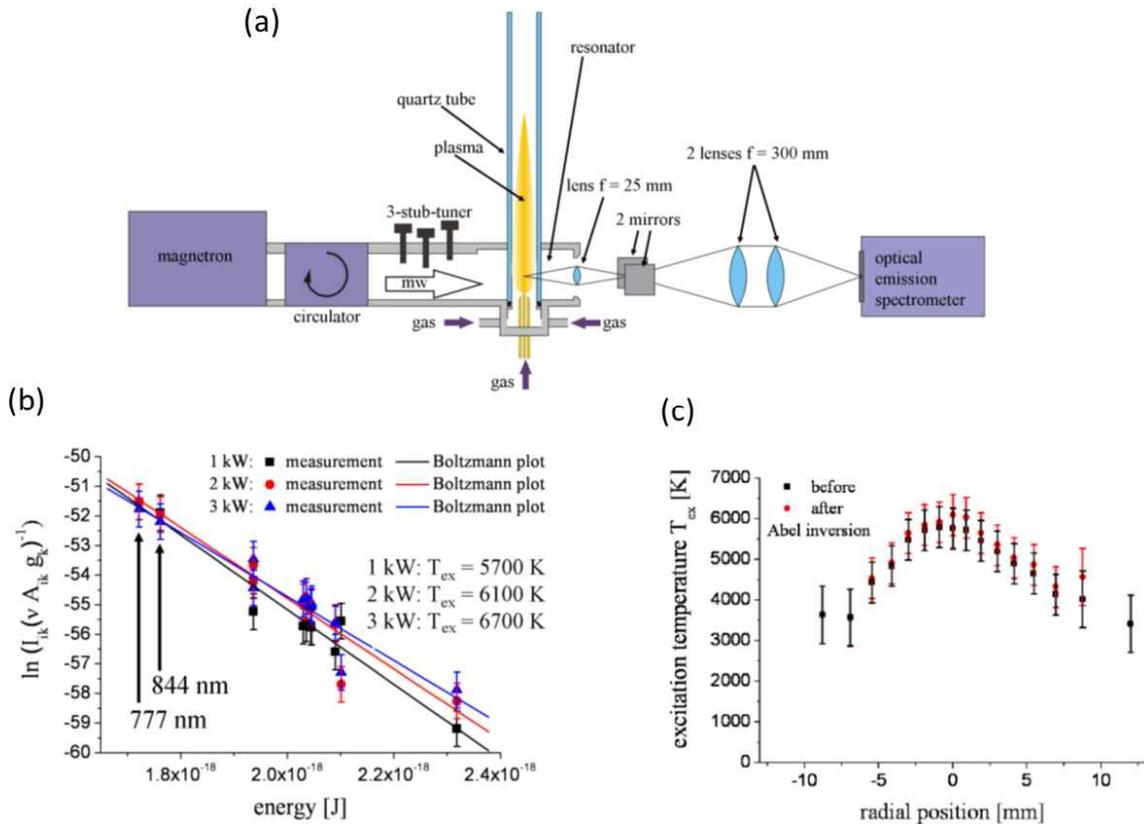


그림 16. 광 방출 분석법(Optical emission spectroscopy, OES)을 이용한 마이크로웨이브 플라즈마 제트 진단: (a) OES를 이용한 마이크로웨이브 플라즈마 제트 실험 개략도; (b) 볼츠만 기울기 법(Boltzmann plot method)을 이용해 계산된 플라즈마 온도; (c) OES를 이용한 플라즈마 제트 진단 시 Abel 변환(Abel inversion)의 영향^[36]

○ 엔탈피 탐침법 (Enthalpy probe method)

엔탈피 탐침법은 냉각수가 순환되는 탐침을 플라즈마에 직접 삽입하고, 플라즈마 가스의 추출 전과 후의 냉각수 온도 변화를 분석하여 플라즈마가 가지고 있는 열함유량과 온도를 측정할 수 있는 기법이다. 반면, 탐침이 가스 비추출 모드로 동작하게 되면, 탐침 침두에 작용하는 플라즈마 정지압을 측정할

수 있어 피토관(Pitot tube)과 동일하게 작동하게 된다. 이 경우 베르누이(Bernoulli) 공식으로부터 플라즈마 속도를 계산할 수 있게 된다. 더불어 QMS 또는 FT-IR 장비가 추가로 장착된 경우 추출된 기체의 분석을 통해 기체 구성비 또한 측정 가능한 진단 기법이다. 따라서 엔탈피 탐침법은 플라즈마 온도, 속도, 그리고 플라즈마 기체 성분 비 등을 동시에 직접 측정 가능한 장점이 있지만, 탐침을 삽입함으로써 플라즈마에 섭동을 줄 수 있는 단점이 있다.

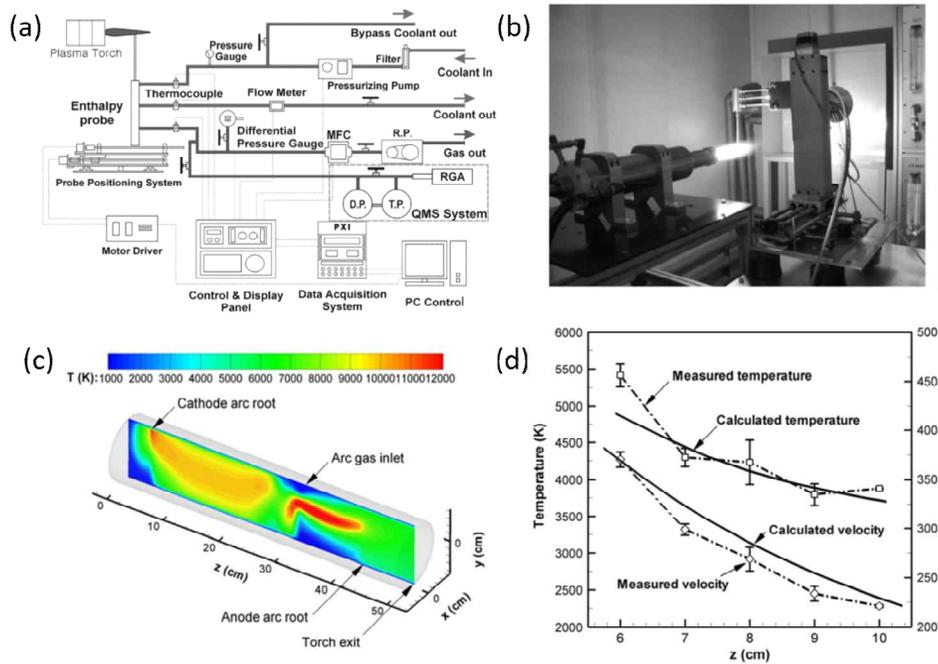


그림 17. 엔탈피 탐침(enthalpy probe)을 이용한 공동형 열플라즈마 제트 진단: (a) 엔탈피 탐침 시스템 개략도; (b) 엔탈피 탐침(enthalpy probe)을 이용한 공동형 열플라즈마 제트 진단 실험 사진; (c) 공동형 열플라즈마 토치 내부 3차원 모델링; (d) 공동형 열플라즈마 제트 축 방향 온도 및 속도 비교^[37]

○ 레이저 유도 형광법 (laser induced fluorescence, LIF)

반응기 하부와 같이 플라즈마 온도가 높지 않아 들뜬 입자 수가 충분하지 않은 경우, OES 기법을 적용하기가 어렵다. 이 경우 레이저를 이용하여 바닥상태 입자를 들뜨게 만든 후 들뜬 입자로부터 발생하는 방출선을 측정하여 공정 상태를 해석하는 방법으로 화학적 활성종 또는 이온 밀도를 측정하는데 사용되는 진단 기법이다.

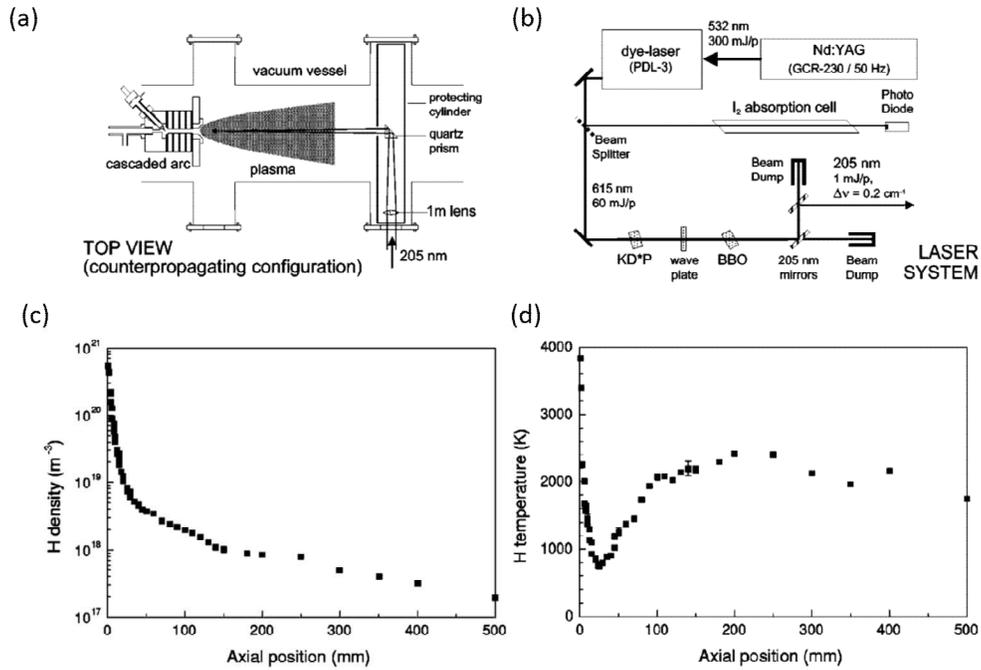


그림 18. 레이저 유도 형광법(laser induced fluorescence, LIF)을 이용한 열플라즈마 제트 진단: (a) LIF를 이용한 열플라즈마 제트 진단 실험 개략도; (b) LIF 시스템 개략도; (c) LIF를 사용하여 측정된 화학종 수밀도; (d) LIF를 사용하여 측정된 화학종 온도^[38]

○ 푸리에 변환 적외선 분광법 (Fourier-transform infrared spectroscopy, FT-IR) 저온 플라즈마 공정과 마찬가지로 열플라즈마 공정에서도 반응으로 생성되는 화학종의 정량적 해석에 많이 사용되고 있는 기법이다.

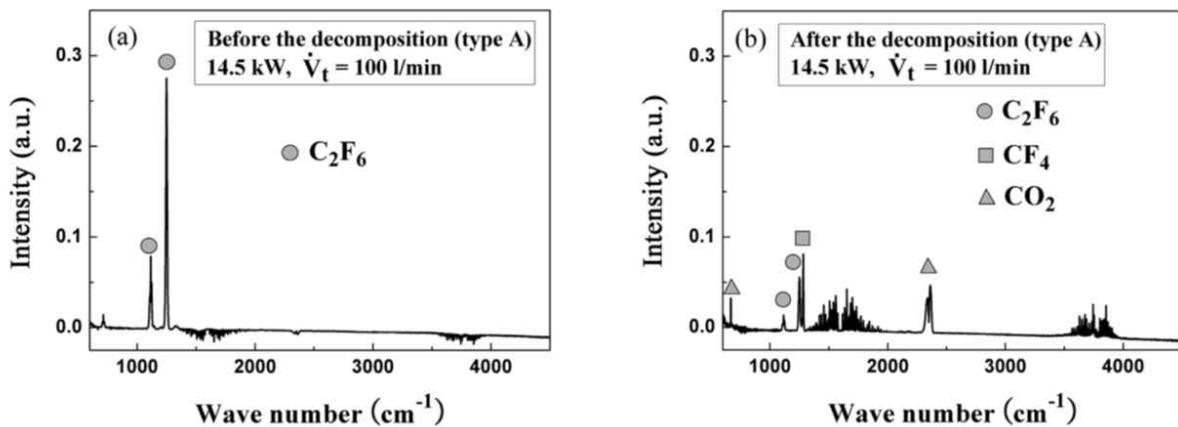


그림 19. 푸리에 변환 적외선 분광법(Fourier-transform infrared spectroscopy, FT-IR)을 이용한 PFC 가스 분해 공정 진단: (a) 열플라즈마 처리 전과 (b) 열플라즈마 처리 후 반응기 내부 화학종 변화^[3]



III 결론 및 제언

반도체/디스플레이 산업에서 PFC 가스와 같은 온실가스 발생은 새로운 무역 장벽으로 등장하고 있어, 배출저감을 위한 기술 개발과 이들의 적용 확대가 빠른 시일 내에 실현 되어야 한다. 지금까지 개발된 여러 가지 기술 중, 환경 친화적이며 효율성이 높은 플라즈마 기술이 장기적 관점에서 핵심 표준 기술로 채택될 가능성이 높아 보인다. 안정적이고 효율이 높은 플라즈마 공정을 신속하게 개발하기 위해서는 입력 에너지의 효과적인 사용을 통한 고밀도 플라즈마 생성 그리고 원치 않는 반응 부산물의 생성을 최소화는 처리 기술 등이 필요하다. 이 경우 실 공정 테스트와 더불어 플라즈마 및 화학종 발생을 기술할 수 있는 전산해석, 그리고 실시간 모니터링을 통해 공정을 감시할 수 있는 진단 기술이 매우 중요해지고 있어 관련 분야의 지속적인 연구 개발이 필요하다.

현재 플라즈마를 이용한 대체가스공정 개발은 식각 및 증착보다는 웨이퍼 또는 기판손상의 우려가 없는 세정 공정 개발에 초점이 맞추어져 있으며, PFC 가스 분해 효율 99 %가 가능한 원격플라즈마원을 사용한 대체공정 개발이 주를 이루고 있다. 고효율 대전력 원격플라즈마원 개발을 위해 저주파에서 구동되고 분산된 페라이트 코어를 갖는 ICP 플라즈마원 개발이 진행되고 있다[39]. 현재 대부분의 원격플라즈마원은 고주파 또는 마이크로웨이브 전력을 사용하는 방식으로, 효율적인 전력 전달을 위해서는 전원과 플라즈마 사이 정합(matiching) 기술이 요구되는 등 부하 변동에 취약하며, 높은 압력에서 구동이 어려운 단점이 있다. 고밀도 플라즈마 발생을 위해서는 높은 압력에서 운전이 유리하다. 더불어 관련 전원기술의 한계로 대용량 처리에도 한계가 있다. 특별한 정합 기술이 요구되는 않고 유전체 면적을 대형화하여 대용량 처리로 쉽게 확장 가능한 대기압 축전 결합식 원격플라즈마는 좋은 대안이 될 수도 있다.

현재 한계를 뛰어넘어 초고온 고밀도 에너지와 물리화학적 활성을 갖는 열플라즈마를 생성하기 위해서는 MW급 이상의 대출력화와 산화성 기체 사용이 요구되나, 이 경우 전극수명 단축과 플라즈마 발생 자체의 안정성이 문제가 되고 있다. 따라서 대출력에서도 오랜 전극 수명과 많은 활성종을 제공하는 열플라즈마 토치 개발이 필요하다. 처리 효율을 높임과 동시에 필요한 전력을 낮추는 방안으로 PFC 가스 주입기 전단에 저압 비평형 플라즈마를 이용하여 전처리를 해주는 혼합형(hybrid) 공정도 연구되고 있다. 대용량 가스 처리 시 많은 전력 사용이 예상되므로, 열플라즈마 발생에 사용되는 전기 에너지를 태양광 또는 지열 발전과 같은 재생에너지로 대체하는 것도 탄소 중립 측면에서 매우 중요해질 것이다.

진단 및 모델링의 경우 다방면 지식 및 기술이 필요하므로 다학제 및 학제간 협력이 산학연 공동연구를 통해 필요하다. 저온 플라즈마 모델링에서 하이브리드 기법은 상대적으로 짧은 시간에 높은 정확도를 가지고 플라즈마 및 화학반응을 기술할 수 있는 기법이며, 계산 시간은 주로 추적하는 유사 입자의 수에 비례하므로, 계산 시간과 입자의 충분한 통계적 의미 사이의 균형을 맞출 수 있는 유사 입자의 수를 선택하는 것이 중요하다. 열플라즈마 토치 모델은 상대적으로 잘 개발되었으나, 고온에서 PFC 가스 열분해에 관한 모델링 연구는 비교적 적은 편이다. 고온에서 화학 반응이 매우 빨라 수렴 안정성이 낮을 뿐만 아니라, 넓은 온도 영역에서 다양한 화학종에 대한 수송 및 열역학적 물성을 얻기가 어려워 신뢰성 있는 계산을 수행하는데 어려움이 있다. 다양한 화학종을 대상으로 고온 물성에 대한 정보를 담고 있는 데이터베이스 확립이 시급하며, 이를 최근 급속히 발전한 인공지능 기술을 통해 추출 및 예측 가능케 하는 연구도 필요할 것이다. 모델 검증 및 공정 감시를 위해 진단 기술 개발에 대한 요구도 급증하고 있다. 이를 위해 고도화된 진단 기술이 필요하며 특히 여러 가지 진단 기술이 통합된 콤팩트 형 진단 장비 개발이 중요하다고 할 수 있다.

[참고자료]

1. 유동현, “산업공정부문 Non-CO₂ 가스의 감축 전략 연구“, 에너지경제연구원, 2017
2. 남상욱, “반도체·디스플레이 산업의 온실가스 배출 현황과 중장기 과제, KEIT 산업경제, 2020
3. Han, Sung-Han, Hyun-Woo Park, Tae-Hee Kim, and Dong-Wha Park. “Large scale treatment of perfluorocompounds using a thermal plasma scrubber.” *Clean Technology* 17, no. 3 (2011): 250-258.
4. 문동민 외, “전기가열방식 스크러버의 NF₃ 제거 효율“, *분석과학* 19, no. 6 (2006): 535-543
5. Ibuka, S. Japan’s use of ClF₃. In *a Partnership for PFC Emissions Reduction; Semicon Southwest: Austin, TX, 1998*
6. Oh, C. H., S. J. Ko, D. K. Shin, and Y. Y. Jeong. “Improving eco-efficiency via elimination of greenhouse gases from semiconductor dry cleaning processes.” In *2012 SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*, pp. 257-260. IEEE, 2012.
7. 남승은, 박아름이, 박유인, “불화 온실 가스 저감 및 분리회수 기술의 연구개발 동향“, *멤브레인* 23, no. 3 (2013): 189-203
8. Park, Hyun-Woo, Woo Byoung Cha, and Sunghyun Uhm. “Highly efficient thermal plasma scrubber technology for the treatment of perfluorocompounds (PFCs).” *Applied Chemistry for Engineering* 29, no. 1 (2018): 10-17.
9. Levy, R. A., V. B. Zaitsev, K. Aryusook, C. Ravindranath, V. Sigal, A. Misra, S. Kesari, D. Rufin, J. Sees, and L. Hall. “Investigation of CF₃I as an environmentally benign dielectric etchant.” *Journal of materials research* 13, no. 9 (1998): 2643-2648.
10. Mendicino, L.; Filipiak, S.; Beoeck, B.; Chan, J.; Tiemessen, M.; Atherton, A.; Langan, J.; Pearce, R.; Johnson, A.; Ridgeway, R.; Maroulis, P. Evaluation of various NF₃ clean solutions for applied materials dielectric CVD equipment. In *A Partnership for PFC Emissions Reductions; Semicon Southwest: Austin, TX, 1998*
11. Sun, S-P., and D. Bennett. “Reducing PFC emissions using C₃F₈-based PECVD clean.” *Semiconductor international* 21, no. 2 (1998): 85-88.
12. Kang, S. C., J. Y. Hwang, N-E. Lee, K. S. Joo, and G. H. Bae. “Evaluation of silicon oxide cleaning using F₂/Ar remote plasma processing.” *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 23, no. 4 (2005): 911-916.
13. Yang, Kyung-Chae, Sung-Woo Park, and Geun-Young Yeom. “Low global warming potential alternative gases for plasma chamber cleaning.” *Science of Advanced Materials* 8, no. 12 (2016): 2253-2259.
14. Boulos, Maher I. “Thermal plasma processing.” *IEEE transactions on Plasma Science* 19, no. 6 (1991): 1078-1089.
15. 정진욱, 이용관, 장홍영, “반도체 공정용 플라즈마원“ *The journal of the Korean Institute of Power Electronics* 7, no.1 , (2002): 21 - 25
16. Despiau-Pujo, Emilie, Melisa Brihoum, Paul Bodart, M. Darnon, and Gilles Cunge. “Pulsed

- Cl₂/Ar inductively coupled plasma processing: 0D model versus experiments." *Journal of Physics D: Applied Physics* 47, no. 45 (2014): 455201.
17. List, Tyler, Tianyu Ma, Priyanka Arora, Vincent M. Donnelly, and Steven Shannon. "Complex transients in power modulated inductively-coupled chlorine plasmas." *Plasma Sources Science and Technology* 28, no. 2 (2019): 025005.
 18. Valery Godyak, "Low Pressure RF Plasma Sources for Industrial Applications (ICP versus CCP)." Workshop on Radio Frequency Discharges, Dublin City University, August 26–27, 2011, Dublin, Ireland
 19. Kim, H. C., and J. K. Lee. "Dual radio-frequency discharges: Effective frequency concept and effective frequency transition." *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 23, no. 4 (2005): 651–657.
 20. Posseme, N., V. Ah-Leung, O. Pollet, C. Arvet, and M. Garcia-Barros. "Thin layer etching of silicon nitride: A comprehensive study of selective removal using NH₃/NF₃ remote plasma." *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 34, no. 6 (2016): 061301.
 21. Donnelly, Vincent M., and Avinoam Kornblit. "Plasma etching: Yesterday, today, and tomorrow." *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 31, no. 5 (2013): 050825.
 22. Chen, Xing, William Holber, Paul Loomis, Evelio Sevillano, and Shou-Qian Shao. "Advances in remote plasma sources for cleaning 300 mm and flat panel cvd systems." *Semiconductor Magazine* 4 (2003).
 23. Rauf, Shahid, Ajit Balakrishna, Zhigang Chen, and Ken Collins. "Model for a transformer-coupled toroidal plasma source." *Journal of Applied Physics* 111, no. 2 (2012): 023306.
 24. Kushner, Mark J. "Hybrid modelling of low temperature plasmas for fundamental investigations and equipment design." *Journal of Physics D: Applied Physics* 42, no. 19 (2009): 194013.
 25. 이호창, "반도체 및 디스플레이 산업 플라즈마 측정 진단 기술", *진단기술과 첨단과학* 5, no. 4 (2019): 19–27
 26. Lee, Hyo-Chang, Chin-Wook Chung, J. H. Kim, and D. J. Seong. "Electron energy distribution modification by RF bias in Ar/SF₆ inductively coupled plasmas." *Applied Physics Letters* 115, no. 6 (2019): 064102.
 27. Li, Hanyang. "N₂, O₂, and NF₃ Dissociation in a Low Frequency, High Density Plasma Source." PhD diss., 2017.
 28. Cha, Taehwan, Yongjae Kim, Sangin Lee, Yegeun Cho, and Heeyeop Chae. "Low-global warming potential fluoroether compounds for plasma etching of SiO₂ and Si₃N₄ layers." *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 37, no. 5 (2019): 051302.
 29. Chau, Shiu-Wu, Yung-Tien Lin, and Shiao-Huei Chen. "Decomposition modeling of carbon tetrafluoride with nitrogen thermal plasma." *IEEE Transactions on Plasma Science* 47, no. 2 (2018): 1185–1195.
 30. Chang, Moo Been, and How Ming Lee. "Abatement of perfluorocarbons with combined

- plasma catalysis in atmospheric-pressure environment." *Catalysis Today* 89, no. 1–2 (2004): 109–115.
31. Kim, K. S., and T. H. Kim. "Nanofabrication by thermal plasma jets: From nanoparticles to low-dimensional nanomaterials." *Journal of Applied Physics* 125, no. 7 (2019): 070901.
 32. Uhm, Han S., Yong C. Hong, and Dong H. Shin. "A microwave plasma torch and its applications." *Plasma Sources Science and Technology* 15, no. 2 (2006): S26.
 33. Hong, Yong C., and Han S. Uhm. "Abatement of CF₄ by atmospheric-pressure microwave plasma torch." *Physics of Plasmas* 10, no. 8 (2003): 3410–3414.
 34. Heberlein, Joachim, and Anthony B. Murphy. "Thermal plasma waste treatment." *Journal of Physics D: Applied Physics* 41, no. 5 (2008): 053001.
 35. Murphy, A. B. "Thermal plasmas in gas mixtures." *Journal of Physics D: Applied Physics* 34, no. 20 (2001): R151.
 36. Leins, M., M. Walker, A. Schulz, U. Schumacher, and U. Stroth. "Spectroscopic Investigation of a Microwave Generated Atmospheric Pressure Plasma Torch." *Contributions to Plasma Physics* 52, no. 7 (2012): 615–628.
 37. Kim, Keun Su, Jin Myung Park, Sooseok Choi, Jongin Kim, and Sang Hee Hong. "Enthalpy probe measurements and three-dimensional modelling on air plasma jets generated by a non-transferred plasma torch with hollow electrodes." *Journal of Physics D: Applied Physics* 41, no. 6 (2008): 065201.
 38. Boogaarts, M. G. H., S. Mazouffre, G. J. Brinkman, H. W. P. Van Der Heijden, P. Vankan, J. A. M. Van Der Mullen, D. C. Schram, and H. F. Döbele. "Quantitative two-photon laser-induced fluorescence measurements of atomic hydrogen densities, temperatures, and velocities in an expanding thermal plasma." *Review of scientific instruments* 73, no. 1 (2002): 73–86.
 39. Godyak, V. A. "Electrical and plasma parameters of ICP with high coupling efficiency." *Plasma Sources Science and Technology* 20, no. 2 (2011): 025004.

글로벌 산업기술·시장동향

무선충전도로 추진 동향

발행일 | 2022년 5월

작성자 | 미국 실리콘밸리 거점 박성환 소장 (parkorea@keit.re.kr)

문의처 | KIAT 국제협력기획팀 (jskim11@kiat.or.kr)

※ 본 자료에 수록된 내용은 한국산업기술진흥원의 공식적인 견해가 아님을 밝힙니다.

※ 본 내용은 무단 전재할 수 없으며, 인용할 경우, 반드시 원문출처를 명시하여야 합니다.

※ 본 자료는 GT온라인 홈페이지(www.gtonline.or.kr)를 통해서도 보실 수 있습니다.


GT Industrial Technology & Market Review
 GLOBAL TECH KOREA
글로벌 산업기술·시장동향



KIAT(한국산업기술진흥원)
 미국 워싱턴 D.C. 거점
 김은정 소장



KIAT
 유럽 벨기에 거점
 강주석 소장



KIAT
 베트남 하노이 거점
 임병혁 소장



KEIT(한국산업기술평가관리원)
 미국 실리콘밸리 거점
 박성환 소장



KEIT
 유럽 독일 거점
 박효준 소장



KORIL(한국이스라엘산업연구개발재단)
 유럽 이스라엘 거점
 최정인 소장