

반도체 공정장비의 Emission 제어 기술

정종국 | (주)글로벌스탠다드테크놀로지
 미래전략개발부 부장
 E-mail : jkchung@gst-in.com

1. 서론

최근 온실효과에 따른 전 지구적 기후 변화는 인류 생활의 다양한 분야에 걸쳐 지대한 영향을 미치고 있다. 온난화 유발가스로는 일반적으로 알려진 이산화탄소(CO₂)와 비 이산화탄소(Non-CO₂)로 구분할 수 있으며, 비 이산화탄소류에는 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화합물(PFCs), 육불화황(SF₆)을 들 수 있다.

2012년 기준으로 국내 온실가스 배출은 세계 7위, 1990년부터 2000년까지의 10년간 누적 배출량은 세계 11위, 1인당 배출량은 13.8톤으로 OECD 5위를 차지하고 있다.

표 1에 나타난 분야별 온실가스 배출량을 보면 에너지 분야에서 87.2%의 가장 많은 배출량을 보이며, 산업 공정 7.4%, 농업 3.2%, 폐기물 2.2%의 배출량을 보이고 있다.

표 1. 분야별 온실가스 배출량

| 분야 | 에너지 | 산업 공정 | 농업 | 폐기물 | 총 배출량 |
|---------------------------|-------|----------|------|------|----------|
| 배출량(백만톤 CO ₂) | 600.3 | 51.3 | 22.0 | 14.8 | 688.3 |
| 배출 비중(%) | 87.2 | 7.4 | 3.2 | 2.2 | 100 |
| 전년 대비 증감률(%) | 0.4 | -0.8 | 0.6 | 1.6 | 0.4 |

온실가스 종류별 배출량을 나타낸 표 2를 보면, 이산화탄소 90.9%, 메탄 4.3%, 아산화질소 2.1%, 수소불화탄소 1.3%, 과불화합물 0.3%, 육불화황 1.1%를 차지한다.

배출량 측면에서 이산화탄소가 대부분의 비중을 차지 하지만, 본 논고에서 논의하고 있는 반도체 공정에서 배출되는 배기가스인 과불화합물과 육불화황 또한 1.4%의 배출 비중을 차지하며, 배출의 대부분이 반도체, 디스플레이 및 중전기 산업과 같이 특정 산업에서 배출되는 특성이 있다. 이들 물질

표 2. 배출가스별 온실가스 배출량

| 온실가스 | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | HFCs | PFCs | SF ₆ | 총배출량 |
|---------------------------|-----------------|-----------------|------------------|------|------|-----------------|-------|
| 배출량(백만톤 CO ₂) | 625.7 | 29.8 | 14.2 | 8.7 | 2.3 | 7.6 | 688.3 |
| 배출 비중(%) | 90.9 | 4.3 | 2.1 | 1.3 | 0.3 | 1.1 | 100 |

은 표 3과 같이 이산화탄소가 지구온난화에 미치는 영향을 기준으로 다른 온실가스가 지구온난화에 기여하는 정도를 나타내는 지구온난화지수(global warming potential, GWP) 비교시 수천에서 수만 배 높은 값을 나타냄을 알 수 있으며, 특히, 과불화합물의 경우 다른 가스에 비해 그 값이 아주 높음으로써 저감시 온난화 방지에 큰 역할을 기대 할 수 있다.

표 3. 주요 온난화 물질 및 과불화합물의 지구온난화 지수(GWP)

| 온실가스 | 지구 온난화 지수 | 과불화합물 | 지구 온난화 지수 |
|------------------|-------------|-------------------------------|-----------|
| CO ₂ | 1 | NF ₃ | 8,000 |
| CH ₄ | 21 | CF ₄ | 6,500 |
| N ₂ O | 310 | C ₂ F ₆ | 9,200 |
| HFCs | 140~11,700 | C ₃ F ₈ | 7,000 |
| PFCs | 6,500~9,200 | CHF ₃ | 11,700 |
| SF ₆ | 23,900 | | |

제 21차 유엔기후변화협약 당사국 총회(COP21)에서 기후 변화에 대응한 파리협정이 채택됨으로 인해 2020년 이후의 신 기후체제가 출범하게 되었다. 우리나라에서도 2030년까지 배출 전망치(BAU) 대비 온실가스를 37% 감축한다는 목표를 제시하였으며, 이의 달성을 위해 온실가스 다량 발생 분야에서는 자체적 저감 계획에 맞춰 다양한 노력이 진행 중이다.

반도체 산업에서 배출되는 주요 과불화합물에는 CF₄, C₂F₆, C₃F₈, C₄F₁₀, CHF₃, SF₆, NF₃ 등이 있으며, 제조공정 중 광범위하게 사용되고 있다. 과불화합물의 대체 또는 저감을 위한 전 세계적인 많은 연구에도 불구하고 현재까지 과불화합물을 완전 대체할 만한 대체 물질은 없으며, 따라서 발생하는 과불화합물의 저감을 위해 공정 최적화, 분리/회수를 통한 재활용 및 제거할 수 있는 다양한 기술들에 대한 연구가 진행 중이다. 다양한 방법 중 새로운

대체 물질의 개발이나 폐가스의 분리 및 회수와 같은 방식은 온실화의 원인 물질의 대체 또는 자원의 재활용 측면에서의 유리한 장점이 있으나, 현 공정의 변경 또는 품질 저하와 같은 문제점의 발생 가능성이 있기 때문에 산업 현장에서는 과불화합물을 직접 분해, 제거하는 방식을 선호하고 있다.

과불화합물의 분해/제거에는 스크러버(scrubber)라는 설비가 사용되며, 주요 분해 처리 기술로는 연소, 열분해, 플라즈마, 촉매 기술 등이 사용되고 있다. 그러나 과불화합물의 주요 물질들은 화학적으로 매우 안정한 난분해성 가스로서 표 4에 보인 대표적 과불화합물의 제거를 위한 온도 조건에서처럼 물질의 분해에는 과도한 에너지의 사용이 요구되며, 에너지 사용량 대비 낮은 처리 효율로 인해 점점 미세화, 고집적화 및 대형화되고 있는 공정에 맞는 새로운 기술이 적용된 기술 및 제품의 개발이 절실히 요구된다. 본 논문에서는 반도체 공정 장비에서 배출되는 배기가스를 스크러버를 사용하여 직접 분해 및 제어하는 기술에 대해 전반적으로 소개하고, 향후 요구되고 있는 기술 및 적용 가능성을 검토 하고자 한다.

표 4. 대표적인 과불화합물 제거를 위한 온도 조건

| 화학종 | 온도(°C) |
|-------------------------------|-------------|
| NF ₃ | 750 ~ 850 |
| C ₂ F ₆ | 900 ~ 1000 |
| CF ₄ | 1400 ~ 1600 |
| SF ₆ | 1200 ~ 1400 |

2. 과불화합물 배출 및 스크러버 형태

2.1 반도체 공정 가스 및 과불화합물 배출

반도체 공정에 사용되는 가스는 앞서 설명한 과불화합물 외에도 SiH₄, NH₃, PH₃, WF₆, BCl₃, HBr, SiCl₄, SiH₂Cl₂, Ar, N₂, CO₂, He 등의 다양한 가스

를 사용하며, 표 5에 주요 공정에서 사용되는 가스의 종류를 나타내었으며, 이 가스는 종류에 따라 난분해성, 독성, 폭발성, 부식성, 질식성, 지연성 등의 특성을 가진다.

표 5. 공정별 사용 가스 분류

| 공정 | 가스 |
|------------------------|---|
| 확산(diffusion) | HCl, H ₂ , O ₂ , N ₂ , PoCl ₃ |
| 김압 화학 기상 증착(LP CVD) | SiH ₄ , SiH ₂ Cl ₂ , NH ₃ , N ₂ O ₂ , N ₂ |
| 화학 기상 증착(CVD) | SiH ₄ , B ₂ H ₆ , PH ₃ , WF ₆ , SiH ₂ Cl ₂ , O ₂ , N ₂ , C ₂ , F ₂ , HF, NF ₃ |
| 건식 식각(dry etch) | He, NF ₃ , BCl ₃ , HBr, Cl ₂ , CH ₂ Cl, CHF ₃ , C ₂ F ₆ , CF ₄ , HCl, SF ₆ , SiCl ₄ |
| 이온주입(ion Implantation) | AsH ₃ , PH ₃ , BF ₃ |

과불화합물은 표 5의 여러 공정 중 식각(etch)과 화학기상증착(chemical vapor deposition, CVD) 공정에서 소자의 식각 또는 챔버 세정(cleaning) 등에 활용된다. 그림 1에 반도체 공정에서 과불화합물이 공급되어 배출될 때까지의 흐름을 간단하게 나타내었으며, 가스 공급 장치에서 공급된 가스는 공정 챔버에서 사용되고 미사용 가스 또는 반응 부산물은 진공펌프에 의해 후단의 스크러버로 보내진 후, 분해 과정을 거친 후 외부로 배출된다.

2.2 스크러버 분류

스크러버는 반도체/디스플레이 산업의 제조공정에서 발생하는 각종 유해 물질을 정제, 배출하는 장비를 의미하며, 유해 물질로는 표 4에서 제시하였던 다양한 물질들 및 이들의 반응에 의한 생성 및 분해된 부산물들이다. 스크러버는 설치되는 장소

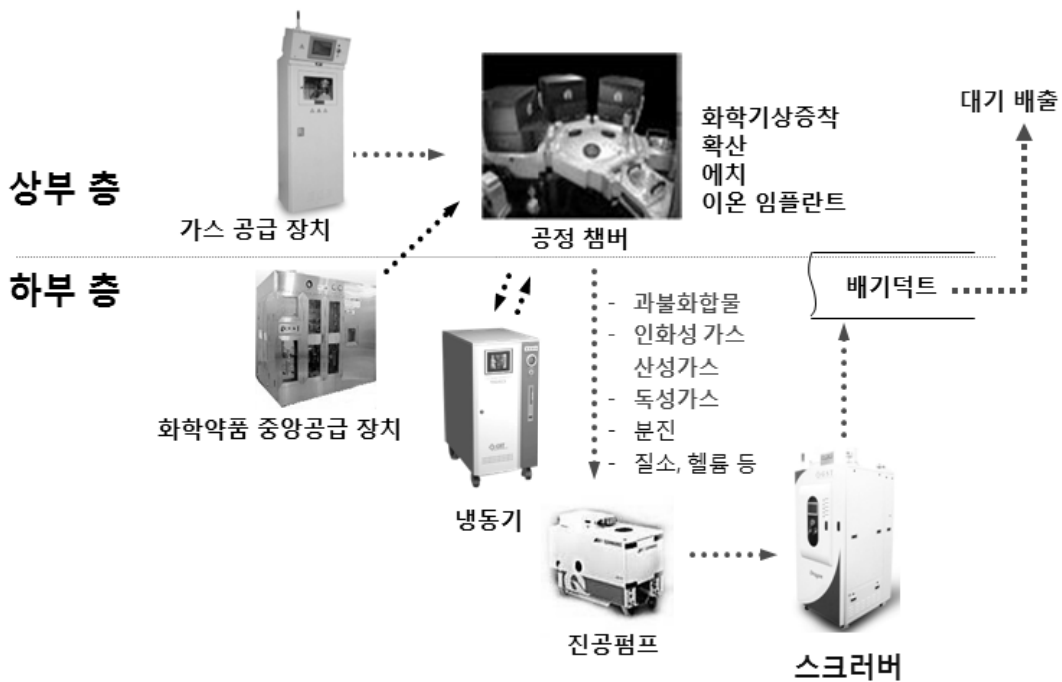


그림 1. 과불화합물 공급과 배출 흐름도

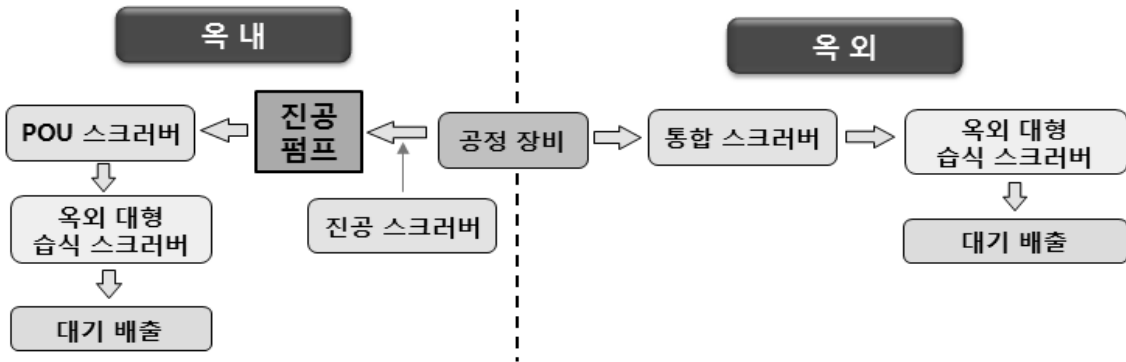


그림 2. 스크러버 위치별 형태 구분.

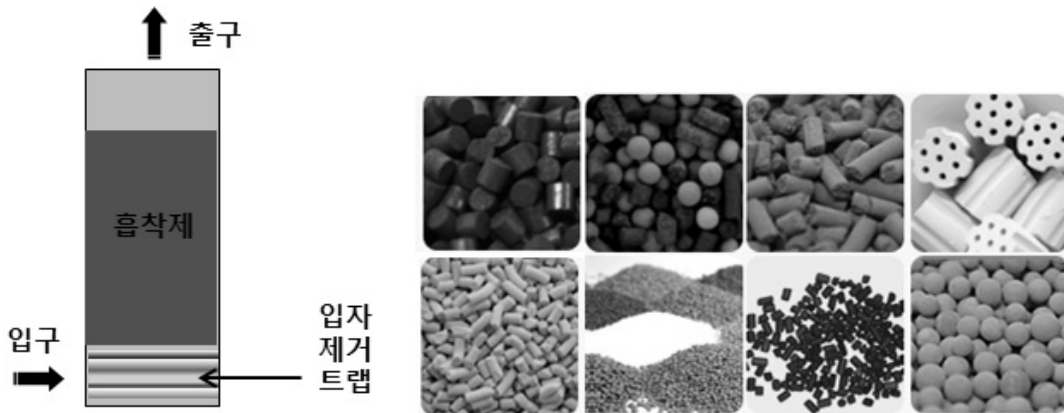


그림 3. 건식 스크러버 및 흡착제 형상.

및 위치에 따라 그림 2에 나타난 것처럼 옥내 설비와 옥외 설비로 구분되며, 진공펌프 전단과 후단 중 어디에 위치하느냐에 따라 진공펌프 전단은 진공 스크러버(foreline scrubber), 진공펌프 후단은 POU 스크러버(point of use)로 구분한다. 현장에 설치되어 운영 중인 대부분의 설비는 옥내 생산 설비의 진공펌프 후단에 설치되는 형태의 POU 설비이며, 그림 1에 나타난 것처럼 생산 설비가 놓인 층의 하부 층에 위치하게 된다. 최근 건식 식각 공정에서 옥외 대형 설비를 두고 배출되는 가스를 일괄적으로 처리하는 설비가 일부 운영되고 있다.

스크러버는 유해물질을 처리하는 방식에 따라 건

식 스크러버, 열분해 스크러버, 연소 스크러버, 플라즈마 스크러버, 촉매 스크러버 등으로 구분되며, 타입에 따라 처리할 수 있는 가스의 종류, 설비 형상 등이 다양함으로 유해물질 처리에 사용하고자 공정과 배출 가스의 분석을 통해 최적 효율을 나타내는 설비를 활용하는 것이 무엇보다 중요하다.

3. 타입에 따른 스크러버 세부 기술

3.1 건식 스크러버

비휘발성 다공성 고형물 형태의 흡착제를 이용

한 유해물질 제거 방법이 적용된 스크러버로서 흡착제의 물리/화학적 흡착 특성을 이용하여 목적하는 유해가스를 제거하고 주로 산성가스 또는 독성가스의 제거에 응용되며, 흡착능 저하에 따라 주기적으로 흡착제를 교체하여 사용한다. 일반적인 구성과 흡착제의 형상은 그림 3과 유사하게 구성되며, 충전된 흡착제의 상부 또는 하부로 유해가스가 유입되어 흡착되어 제거되는 구조로서, 일부 유입되는 미세입자의 흡착제 고착을 방지하기 위한 집진 구조 및 충전층 내에서의 편류가 없는 균일한 기류 분포가 무엇보다 중요하다.

또한, 미세 입자의 집진이 안 될 경우 입자는 흡착제의 표면을 에워싸서 흡착제의 성능저하를 유발하고 또한 편류 발생 시 가스와 접촉이 없는 부분의 흡착제는 미사용으로 인해 예정된 사용 수명을 채우지 못하고 교체함으로써 경제적 손실을 유발할 수 있다.

3.2 습식 스크러버

유해물질 중 부유 미립자 또는 물에 녹는 수용성

물질을 액을 사용하여 포집, 중화 및 흡수 시 사용하며, 단독 설비로의 사용보다는 연소법, 열분해법, 플라즈마법 등과 같은 방법으로 유해가스를 분해하는 설비의 후단에 결합된 형태로 사용된다. 그림 4의 일반적인 형상을 보면 유해가스의 입구와 출구가 있으며, 물을 공급하기 위한 순환펌프, 물이 차 있는 수조, 수용성 가스와 물의 접촉 확대를 통한 처리효율 상승 유도를 위한 충전물, 배출 기류 중에 포함된 액적을 제거하기 위한 데미스터(demister)로 구성된다. 기체와 액체의 접촉은 일반적으로 향류로 이루어지며, 충전물은 되도록이면 표면적이 넓어 위에서 떨어지는 액과 가스가 만나는 시간이 긴 특성을 가진 형상을 사용하고, 차압이 발생하지 않는 두께로 충전하여 사용한다.

3.3 전기 열분해 스크러버

전기 히터를 열원으로 한 간접산화 방식을 사용하여 700 ~ 800℃의 고온에서 인화성 가스, 발화성 가스 및 과불화합물 일부를 분해하는 설비로서,

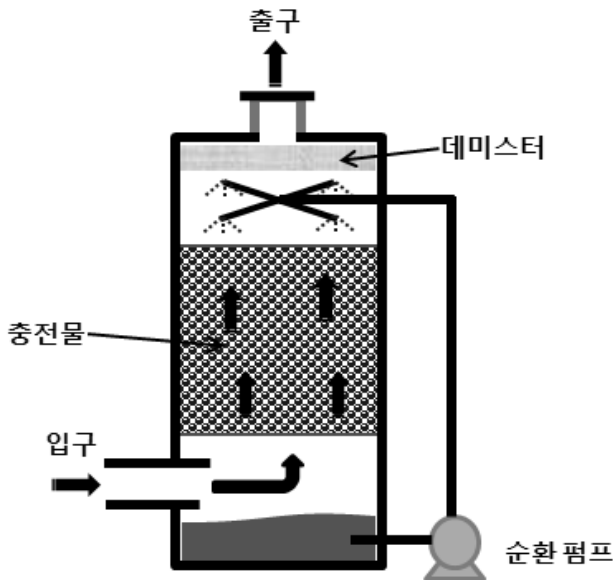


그림 4. 습식 스크러버 및 충전물 형상.

1990년대 반도체 공정 배기가스 저감에 많이 사용되었으나, 처리가스의 고온 가열을 위하여 과도한 에너지의 사용, 전기 히터와 유해가스 사이의 충분한 열 교환 어려움 등으로 인한 낮은 처리효율로 인해 사용률이 줄어들고 있다. 주요 처리 물질의 제거 메커니즘을 보면 산소에 의한 산화반응으로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

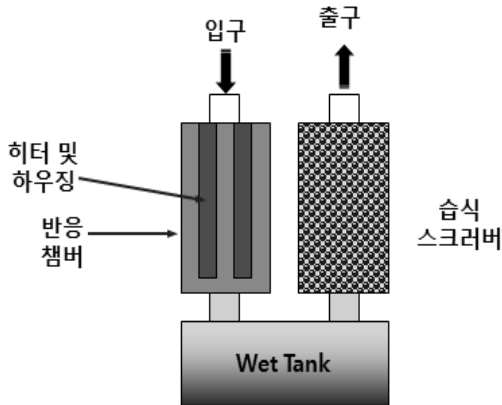
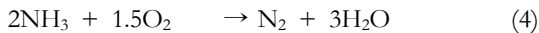
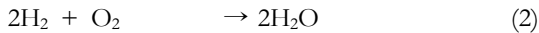


그림 5. 전기 열분해 스크러버 및 형상

그림 5에 나타낸 구성을 보면, 히터 및 히터하우징, 반응 챔버, 냉각부, 수용성 가스 제거를 위한 습식 스크러버로 구분 할 수 있다. 고온용 히터로는 칸탈(1,200℃), 탄화규소(1,350℃), 슈퍼칸탈(1,600℃) 등이 일반적으로 사용되며, 세라믹 계열의 히터 등은 열 충격에 취약하여 가열과 냉각시 주의가 요구된다. 열에 의한 분해 반응이므로 연소나 플라즈마와 같은 반응에서 반응 부산물로 배출 될 수 있는 일산화탄소(CO)나 탄화수소(hydrocarbon)의 배출이 없다는 장점 및 단순 구조로 인해 미세입자의

유입이 많거나 반응 후 미세입자가 많이 발생하는 공정에서의 활용성이 높다.

3.4 연소 소각식 스크러버

현재 반도체/디스플레이 산업에서 유해물질 처리를 위하여 가장 일반적으로 사용되고 있는 방법은 연소 소각법으로서 연료(주로 LNG)와 산화제(산소 또는 공기)에 의해 형성된 고온의 화염 또는 고온의 열로 유입되는 과불화합물, 인화성 가스, 발화성 가스 등을 가열 및 분해하는 방법이다. 과불화합물의 대표종인 CF₄를 분해하기 위해서는 1600℃ 이상의 고온이 필요하며, 산소를 산화제로 사용하는 순산소 연소 방법이 일반적으로 사용되며, 연소 반응을 통해 과불화합물의 분해 및 생성되는 부산물의 반응식을 보면 아래와 같이 표현 할 수 있다. 분해 후 생성되는 물질로는 불화수소, 이산화탄소, 물이 있으며, 불화수소는 습식 스크러버에서 흡수 제거된다.

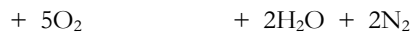


그림 6에 연소 소각식 스크러버의 일반적인 형상과 버너 점화 형상을 보였으며, 대부분의 버너는 다수의 노즐에 의해 형성된 제트 화염과 별도로 유입되는 유해가스 간의 열/물질 교환을 통해 분해되는 구조로서 연소 열 에너지가 유해물질에 비효율적으로 전달됨으로 인한 낮은 열효율과 함께 표 6에 나타낸 화염 소화 또는 화염 부상, 화염 날림 등의 화염 불안정성 등이 처리 효율을 저감하는 원인이 된다.

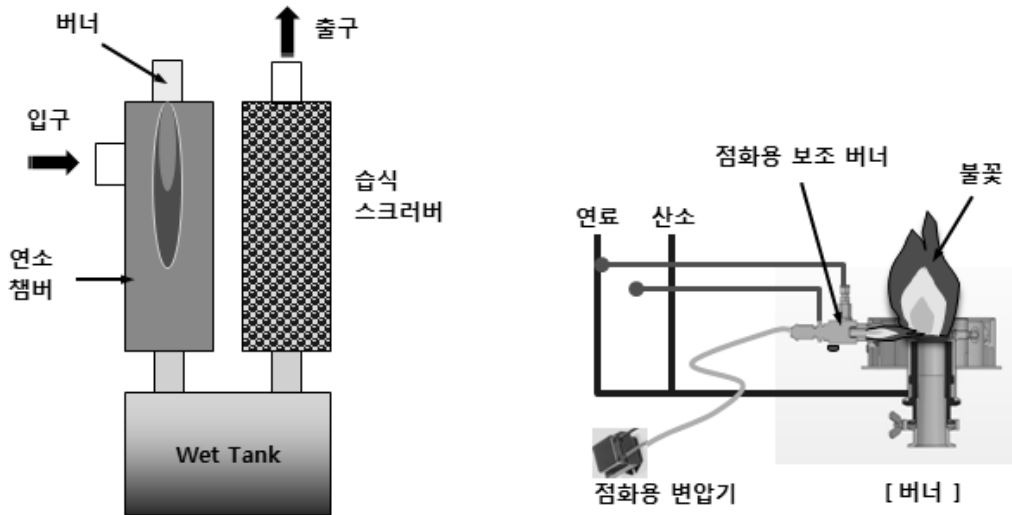


그림 6. 연소 소각식 스크러버 및 버너 점화 형상

표 6. 스크러버 사용 연소 버너에서의 화염 형상 및 특성

| | 연소 방식 | |
|-------|--|-----------------------------|
| | 혼합 증진 방식 | 교차 흐름 방식 |
| 화염 형상 | <p>연료 + 산소</p> <p>과불화합물</p> | <p>과불화합물</p> <p>연료 + 산소</p> |
| 특 성 | <ul style="list-style-type: none"> - 화염으로부터의 간접 열전달로 인해 처리효율 낮음 - 노즐로부터 부상된 고온의 순산소 화염을 사용하므로 처리가스 유량 변화에 따른 화염 불안정성 증대 - 저감 및 제거 효율 증대를 위한 과다 에너지 사용 | |

3.5 열 플라즈마 스크러버

열 플라즈마 기술은 직류 아크(DC Arc) 방전에

의해 발생시킨 전자, 이온, 중성입자로 구성된 기체로서 고온의 고속 젯트(jet) 불꽃 형태를 가진다. 열 플라즈마 기술을 이용한 반도체 유해가스 제거는

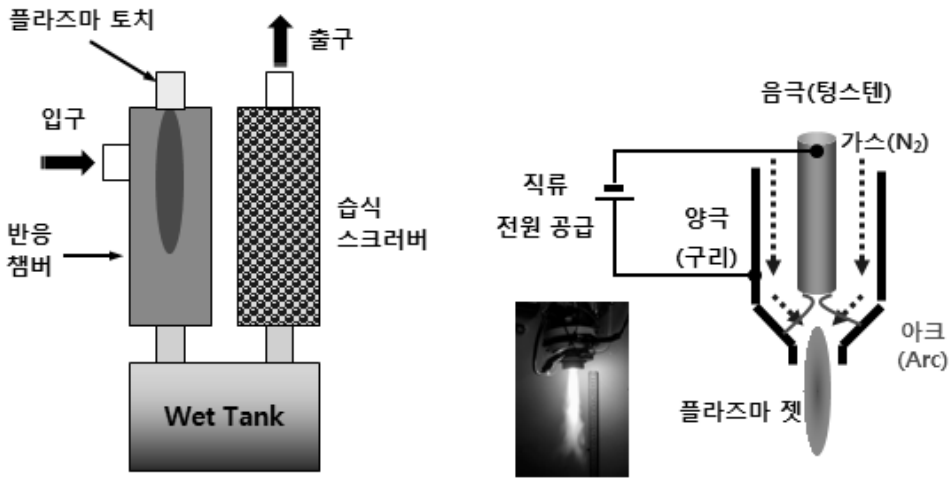


그림 7. 열 플라즈마 스크러버의 구조 및 플라즈마 토치 형상

2000년대 초반 연구가 시작되어 최근 가장 관심이 집중되고 있다. 직류 아크 이외에도 마이크로웨이브를 이용한 플라즈마, 진공단계에서 사용하는 진공 스크러버가 있으나, 일반적으로는 직류 아크 방식을 적용한 상압용 설비가 현장에서 사용 중이다.

열 플라즈마 스크러버의 일반적인 구조 및 플라즈마 토치 형상을 그림7에 나타내었으며, 열 플라즈마는 5,000 ~ 수만°C 이상의 고온을 얻을 수 있어 난분해성 물질 분해에 많은 이점을 가지고 있으나, 에너지의 소비량이 크고 처리 설비 용량이 증가할수록 전력 사용량 또한 크게 증가한다는 단점, 처리가스의 대부분인 질소가 플라즈마에서 산화되어 반응에 참여함으로써 반응 부산물인 질소산화물의 발생이 많은 단점, 방전극의 소모 및 부식이 빨라 잦은 교체 등의 단점이 문제시 되고 있다. 최근 이러한 문제점의 개선을 통한 저에너지 활용 고효율의 과불화합물 저감 설비에 대한 연구가 활발히 진행 중이며, 현장에서의 활용도 증가 되고 있다.

3.6 촉매 스크러버

촉매를 이용한 유해가스 처리 설비는 식각 공정

에서 일부 사용되고 있으며, 소용량의 옥내용 POU 급 보다는 옥외에 설치되어 공정에서 나오는 가스를 통합하여 처리하는 플랜트급(처리 풍량 50 m³/min 이상)의 중앙처리장치 형태로 이용되고 있다.

그림 8에 플랜트급의 중앙처리 장치 형태와 CF₄의 촉매를 이용한 분해 메커니즘을 나타내었으며, 반응설비 형태는 촉열식 촉매 산화반응 시스템(regenerated catalytic oxidation, RCO) 장치로서 촉열식 연소 설비와 같은 열 회수 원리를 갖지만 촉매를 사용함으로써 반응에 필요한 에너지를 절감 할 수 있는 큰 장점을 가진다.

촉매는 반응 시 활성화 에너지(activation energy, E_a)를 낮춰 저온에서 유해 가스의 분해를 이끄는 장점이 있으며, CF₄의 일반적 연소분해 온도는 1,600°C 이상의 고온이 필요하나, 촉매 이용 시 700°C 내외에서 분해가 가능함으로써 많은 양의 에너지 절감효과를 거둘 수 있다. 또한, 낮은 온도에서 운전되므로 질소산화물의 배출이 극히 적으며, 대유량/저농도 가스의 처리에 적합하다.

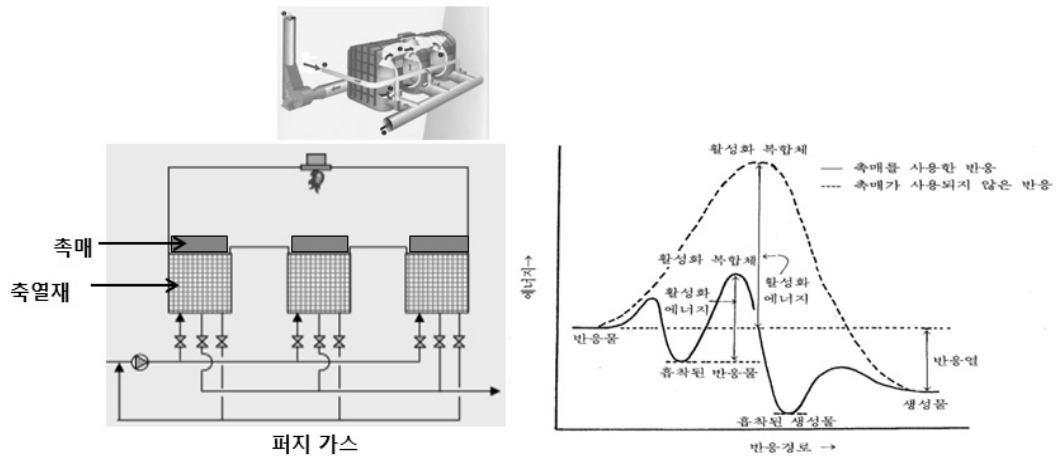


그림 8. 촉열식 촉매 연소로 형상 및 촉매 분해 활성화 에너지 비교

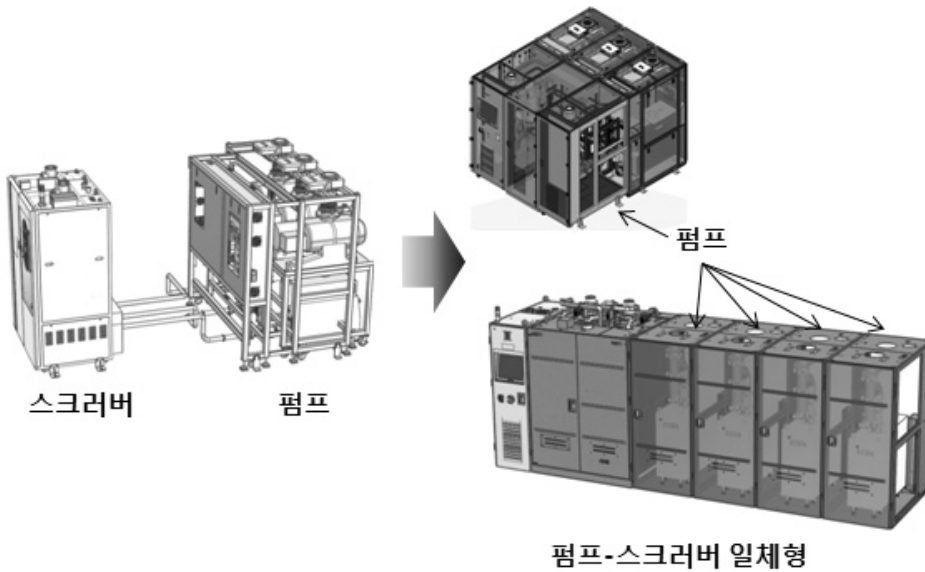


그림 9. 펌프-스크러버 일체형 설비의 형상

3.7 기타 스크러버

최근 에너지 절감 및 운영상의 편의를 위하여 진공펌프와 스크러버가 결합된 새로운 형태의 펌프-스크러버 일체형 설비의 개발 및 현장에서의 운영

이 이루어지고 있다. 그림 9에 펌프-스크러버 일체형 설비의 형상을 나타내었으며, 기존 각각의 설비가 배관으로 연결되어 개별적으로 운영되던 방식이 진공펌프와 스크러버가 하나의 설비 형태로 내부 배관으로 연결됨으로 인하여 장비 운영 중 발생할 수 있는 가스 및 물의 누출 문제, 유틸리티 및

배관 설치비용, 유지보수 어려움, 설비 설치 공간 부족 등의 다양한 문제를 해결한 설비이다. 이 설비는 설비간의 기구적 연결 기술, 전기적 결합 기술, 소프트웨어 인터페이스 기술, 콤팩트 설계 기술 등의 시스템 엔지니어링 기술이 복합적으로 반영됨으로서 앞서 논의한 문제점들을 대부분 개선 할 수 있다.

4. 미래 스크러버 요구 기술

앞서 반도체 공정 장비의 배기가스 제어를 위한 다양한 스크러버들에 적용된 기술을 살펴보았으며, 사용자 관점에서 요구되고 있는 기술 개발 내용에 대해 논의하고자 한다.
반도체/디스플레이 산업의 경우 미세화, 대구경화에 따른 가스 사용량 증가는 대용량 설비의 사용

을 증가시키고 이에 따라 에너지의 사용량 증가와 함께 부식, 부산물, 폐수 등의 배출량 또한 증가 또는 심화가 예상된다. 그림 10에 향후 개발, 개선 또는 고객이 요구하는 다양한 내용들을 나타내었으며, 무엇보다도 운영편의성, 운영비 절감, 설비 융합, 에너지 절감, 안전 사항 강화 등이 요구된다.

5. 결론

이상에서 반도체 공정 장비의 배기가스 제어에 관한 다양한 기술들 중 온실효과 유발 정도가 높은 과불화합물의 저감 기술에 대하여 세부적으로 알아보았다. 과불화합물은 특정 산업분야에서 배출되는 특성으로 인하여 저감 기술의 활용이 타 산업분야에 비해 상대적으로 쉽고 저감 시 높은 효과를



그림 10. 스크러버 개선 요구 사항.

가져 올 수 있다는 장점이 있어 기후변화에 관한 파리협정 비준에 따른 우리나라의 온실가스 저감 이행에 큰 기여를 할 것으로 판단된다. 현재 다양한 기술들 중 연소와 플라즈마 기술이 널리 쓰이고 있으나, 연료 사용량의 과다, 낮은 효율, 잦은 부품 교체, 장치 부식, 대용량화, 콤팩트, 내구성 강화 등과 같은 개선 요구 사항이 있으며, 안전과 관련한 부분에서의 장비 운영성, 안정성이 강조되고 있다. 특히, 반도체/디스플레이 산업은 국가 주력 산업으로서 온실가스는 새로운 무역 장벽으로 대두 되고 있는 상황으로 기존 기술이 가진 한계를 극복하기 위한 다양한 기술 개발과 응용 확대가 실현 되어야 할 것이며, 기술 측면에서 여러 기술들 중 에너지 효율성이 높은 플라즈마 기술이 향후 장기적 관점에서 표준으로 채택될 가능성이 높다 생각된다. 전 세계적으로 많은 기업들이 스크러버 장치분야에서 치열한 기술 경쟁을 벌이고 있으며, 국내기술 수준은 국외 기술과 비교시에도 동등 이상의 높은 기술 수준을 가진 것으로 판단된다. 세계 최고의 정보 기술과 반도체 세계시장 수위 확보를 위한 정부와 기업의 합심된 노력을 기원하고, 이러한 스크러버 기술이 든든한 버팀목이 될 것임을 확신하며 논고를 마치고자 한다.

- 참고 문헌 -

1. 김상만, 2016, “신기후 체제 파리협정(paris agreement)의 역사적 의의와 한계에 대한 고찰”, 아주법학, 제 9권, 제 4호, 아주대학교 법학연구소, pp. 225-249.
2. 김경식, 2005, “온실가스 감축을 위한 환경분야 대책”, 환경보전, 제 27권, 제 359호, pp. 14-16.
3. 박찬영, 2014, “기후변화 대응을 위한 Non-CO2 온실가스 감축 노력”, 환경정보, 제 411호, pp. 20-22.
4. 온실가스종합정보센터, 2014, “국가 온실가스 인벤토리 보고서”, 환경부.
5. 손희중, 유수진, 노재순, 2009, “과불화 화합물(PFCs)-새로운 도전과 과제”, 대한환경공학회지, 제 31권, 제 2호, pp. 1151-1160.
6. 박현우, 최수석, 박동화, 2013, “아크 플라즈마를 이용한 과불화합물 처리공정에서 반응 가스에 의한 효과”, 청정기술, 제 19권, 제 2호, pp. 113-120.
7. 이도희, 홍웅기, 이진구, 장원철, 김두성, 2006, “축매상에서 PFCs 가수분해 반응에 관한 연구”, 대한환경공학회 춘계학술발표논문집, pp. 750-752.
8. 이영춘, 전종기, 2012, “PFC 배출 저감을 위한 파일럿 규모 축매 공정 연구, 청정기술, 제 18권, 제 2호, pp. 216-220.
9. 정종국, 이기용, “난분해성 유해가스의 소각처리를 위한 배가스 전처리 장치 및 그 전처리 장치를 이용한 배가스 전처리 방법”, 출원인 주식회사 글로벌스탠다드테크놀로지, 대한민국 특허 등록번호 10-1657468.