

클린룸에서 광촉매 기술을 이용한 공기정화장치 연구사례

정 주 영 | 한국건설기술연구원 건축연구부
연구원

E-Mail : jyjeong001@hotmail.com

1. 머리말

최근 반도체와 액정산업 등의 분야에서는 대용량화, 고속화와 함께 제품의 고집적화, 고품질화가 급속히 진행되고 있다. 이에 따라 제품의 제조 프로세스 및 보존 과정 중에서 오염물질의 엄격한 제어, 즉 Si 웨이퍼(wafer) 등의 기판표면과 계면에서 초미립자, 클러스터(입자상 물질) 및 원자·분자 수준의 오염물질(가스상 물질)의 제거가 매우 중요해졌다. 따라서 클린룸내에서 미립자뿐만 아니라 클린룸으로의 도입 공기 및 클린룸 구성재, 장치 등에서 발생하는 극미량의 가스상 오염물질 조차 엄격히 제어되어야 한다.

클린룸에서 문제시되는 가스상 오염물질로는 세정장치에서 이용하는 약품에서 기인되는 HCl, 외기에서 유입되는 SO₂, NO, NO₂, 세정장치와 작업자의 호흡 및 피부표면 등에서 기인하는 NH₃가 대표적인 무기오염물질로 알려져 있다. 유기물로는 실록산(siloxane), 후탈산 에스테르(phthalic acid ester), 톨루엔, 벤젠, 자일렌 등이 있는데, 실록산은 실링재나 코킹재로부터 휘발되는 저분자 실록산 화합물이고, 후탈산 에스테르류는 염화비닐제에 가역재로 포함되어 있는 DOP(di-octyl phthalate), DBP(di-butyl phthalate) 등이 대표적인 예이다. 톨루엔, 벤젠, 자일렌은 내장재 시공시 사용된 접착

제뿐만 아니라 외기로부터도 상당량 유입되는 것으로 알려져 있다. 기타 HEPA 필터와 내장재 등에서 발생하는 붕소(B)와 인(P)도 클린룸 화학오염물질로 알려져 있다. 일반적으로 클린룸에서는 톨루엔, 자일렌 및 탄화수소 등의 농도가 가장 높지만, 실제로 실리콘 웨이퍼의 기관에 흡착되는 오염물질은 환경호르몬으로도 지정되어 있는 DBP, DOP와 저분자 실록산류이고, 주로 -CO-, -COO- 결합을 가지는 물질인 것으로 보고되고 있다. 그러나 톨루엔과 자일렌 등의 가스도 상대적으로 농도가 매우 높기 때문에 케미컬 필터에 다량 흡착됨으로써 필터의 수명을 단축시키는 원인으로 작용할 수 있다.

클린룸에서 가스상 오염물질의 제거기술로는 현재 흡착법과 습식법 등이 주류를 이루고 있다. 그림 1은 일반적으로 클린룸에 적용되어 있는 공기정화설비의 개략도를 나타낸 것이다. 흡착법은 가스 제거 방식중 가장 일반적인 기술로서 흡착제와 활성탄 섬유 등을 재료로 하는 케미컬 필터를 이용하는 것이다. 이때 외기와 클린룸 내에 존재하는 성분은 매우 다양하기 때문에 대상물질에 따라 필터의 종류를 선정하는 것이 중요하다. 케미컬 필터에 의해 산과 염기 및 유기성분을 모두 제거하고자 할 경우 일반적으로 3종류의 필터를 각각 설치할 필요가 있고, 또한 최근에는 이러한 성분을 동시에 제거할 수 있는 케미컬 필터도 판매되고 있다. 그러나 케미컬

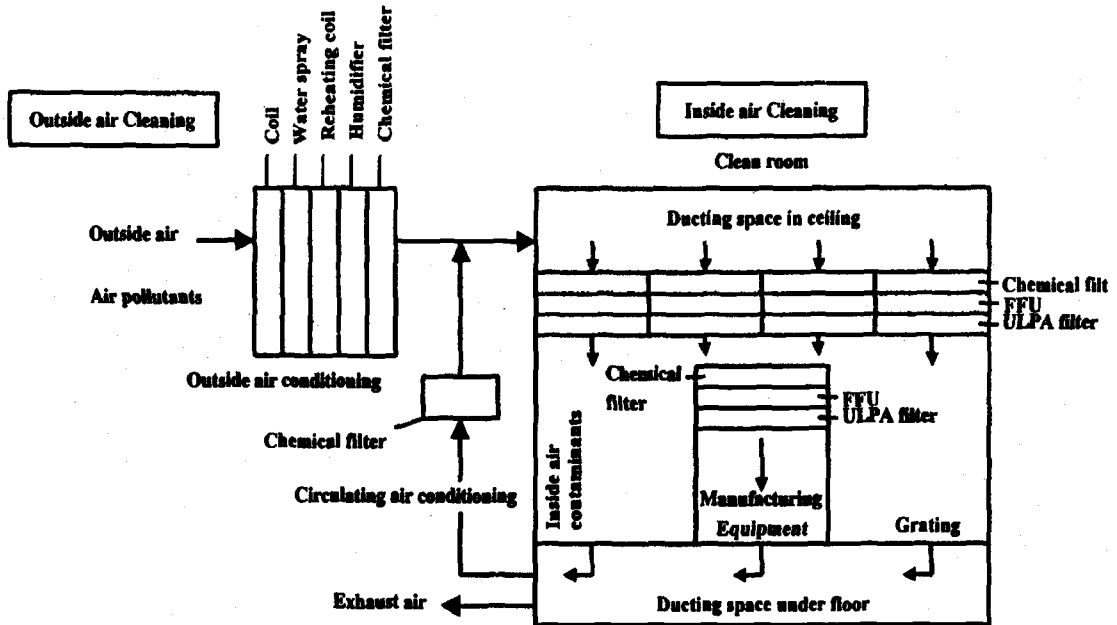


그림 1. 클린룸의 공기정화 시스템 개략도

필터는 수명이 비교적 짧고, 불명확하며, 흡착포화에 달하기 때문에 고가의 필터를 정기적으로 교체할 필요가 있다. 게다가 흡착포화에 달하면 흡착성분이 탈착하여 새로운 오염원으로 작용하는 등의 결점이 지적되고 있다.

습식법으로서는 에어워셔(air washer)가 있다. 종래에는 주로 클린룸내 가습장치로서 활용되어 왔지만, 최근에는 외기에 포함된 분자상 물질을 제거하기 위한 수단으로 이용되고 있다. 에어워셔에 의한 제거대상 물질은 주로 NH₃와 SO₂와 같은 수용성 무기성분이지만, 클린룸 순환공기중의 일부 유기물의 제거에도 활용되는 것으로 보고되고 있다. 본 장치에 의해 SO₂와 NH₃는 각각 80% 이상 제거되고, 일부 수용성 유기물의 경우에도 70% 이상의 제거효과를 나타내는 것으로 알려져 있으나, 톨루

엔과 같은 난수용성 물질의 제거율은 불과 5% 미만으로 적용의 한계가 있다.

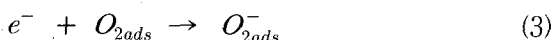
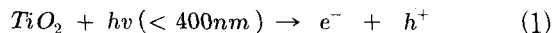
한편 최근에는 고가의 케미컬 필터를 대체할 수 있는 기술의 개발이 일본을 중심으로 활발히 진행 중이다. 대표적인 예가 비평형플라즈마법, 자외광(UV)/광전자와 광촉매, 광화학반응에 의한 가스의 미립자화 연구 등의 건식법이다. 이러한 기술들은 단독으로 이용할 수 있을 뿐만 아니라 케미컬 필터나 에어워셔와 조합하는 것도 검토되고 있으며, 클린룸 내부와 웨이퍼 보관 상자에도 적용되고 있다.

본 고에서는 건식법중에서 최근 주목을 받고 있는 자외광과 광촉매를 이용하는 클린룸의 가스상 오염물질의 저감기술 연구 개발 사례에 대해 소개하고자 한다.

2. UV/광촉매의 원리

대표적 광촉매인 이산화티탄(TiO₂)은 자외광($\lambda < 400\text{nm}$)을 흡수하면 강력한 산화작용을 가지는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 광흡수에 의해 일어나는 촉매반응을 광촉매 반응으로 부른다. 이산화티탄의 광촉매 반응은 다음과 같은 원리에 의해 발생한다.

- ① 반도체에 밴드갭 이상의 에너지를 가진 광이 조사되면 여기하여 전자와 정공이 발생한다.
- ② 생성된 전자(e^-)와 정공(h^+)이 반응의 장인 반도체 표면으로 이동한다.
- ③ 표면으로 이동한 전자와 정공은 반도체 표면에 흡착한 물질과 반응하여 산화환원반응이 진행된다. 이러한 과정을 식으로 나타내면 식(1)~(3)과 같이 된다.



촉매표면의 흡착수(OH_{ads}^-)가 식(2)에 의해 산화되어 산화력이 높은 히드록시라디칼($\text{OH}_{\text{ads}}^{\cdot}$)이 생성되고, 흡착산소($\text{O}_{2\text{ads}}^-$)는 환원 식(3)에 의해 $\text{O}_{2\text{ads}}^-$ 이 생성된다. 이때 오염물질은 정공에 의한 산화와 상기한 활성종과의 반응에 의해 산화환원 분해반응이 일어난다. TiO₂의 특징은 여기전자가 환원력보다도 정공이 가진 산화력이 매우 강하다는 것이다.

3. 클린룸에서 UV/광촉매 기술을 이용한 가스상 오염물질 제거 연구 사례

3.1 UV/광전자 및 광촉매법에 의한 제거

UV/광전자법과 광촉매를 이용한 미립자와 가스상 오염물질의 동시제거 원리를 그림 2에 나타낸다.

자외광 램프는 광전자 방출재인 Au와 광촉매인 TiO₂상에 조사되는데, 이때 광전자 방출재는 자외광을 받으면 광전자를 방출시킨다. 비교적 약한 전기장을 광전자 방출재와 전극간에 형성시키면 광전자/음이온들은 양전극으로 이동하다가 공기 중의 미립자에 부착하여 미립자를 음으로 하전시키고, 하전된 미립자는 양전극상에 부착한다. 피청정공간(cleaning space)중의 미립자는 순차적으로 하전되어 포집되게 된다. 또한 가스상 오염물질은 식(1~3)의 원리에 의해 광촉매 표면에 생성된 정공 및 여기전자에 의해 산화·분해되는 과정을 거친다.

반도체 제조 라인에서는 프로세스 대기기간 중 웨이퍼를 전용 스토커에 보관한다. 이때 대부분의 보관 박스의 재질이 플라스틱이므로 박스 내벽에서 유기가스가 발생할 가능성이 있다. 이러한 유기가스는 MOS 디바이스 신뢰성을 저하시키기 때문에 보관 스토커에서도 이러한 탈가스를 제어할 필요가

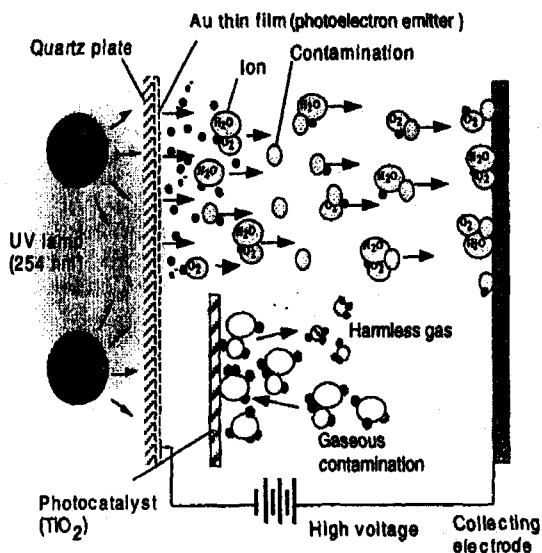


그림 2. UV/광전자 및 광촉매법의 오염물질 제거 원리

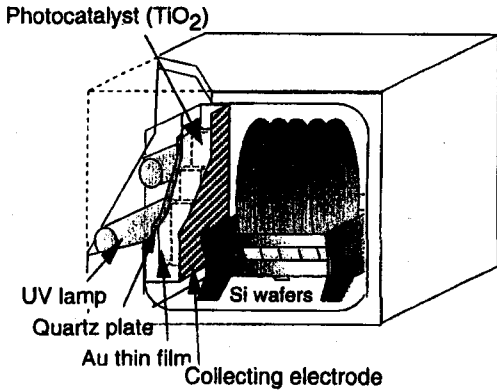


그림 3. 광촉매 기술이 적용된 웨이퍼 저장 스토커 모식도

있다. 그림 3은 UV/광전자와 광촉매 청정장치를 설치한 웨이퍼 저장 스토커를 나타낸다. 본 장치는 피청정 공간에 도입된 가스상 오염물질을 포함한 오염공기가 하측의 공간을 통해 처리공간부에 유입되어 처리되는 구조로 이루어져 있다. 이때 공기의 유동은 UV광 조사시 발생하는 처리공간부 상하의 온도차에 따른 대류에 의해 이루어진다.

광촉매에 의한 가스상 오염물질의 제거성능은 광촉매의 설치면적, 자외광 조사강도 등의 영향에 의존한다. 그림 4는 실제 가스상 오염물질의 제거 성능을 보여주는 실험결과로서 일반 클린룸 공기와 본 장치 내부의 공기중 가스상 오염물질의 TIC를 비교한 것이다(광촉매 도포면적: 600cm^2 , 자외광 조사강도: 13Wm^{-2}). 그림으로부터 확인할 수 있는 바와 같이 클린룸 공기중에는 Si 웨이퍼 등의 기판에 쉽게 부착하여 영향을 미치는 후탈산 에스테르류(DOP, DBP)와 같은 가스상 오염물질이 다수 검출되었지만, 본 장치내에서는 가스상 오염물질의 검출이 현저히 줄어들어 오염물질이 효과적으로 제거되고 있음을 확인할 수 있다.

UV/광전자 및 광촉매법을 이용한 제거 기술의

클린룸에서의 적용분야로서는 ① 웨이퍼 반송용 박스, ② 웨이퍼 보관용 박스, ③ 디바이스 스토커, ④ 반송라인, ⑤ 적재장치의 인터페이스, ⑥ Loadlock 실, ⑦ 반응장치 등이 있다.

일반적으로 반도체 제조과정에서 웨이퍼가 프로세스 장치내에서 처리되는 시간은 전 공정의 20~30% 정도에 불과하고, 대부분의 시간(70~80%)은 장치 간에 반송과 보관 과정이기 때문에 재료의 반송, 보관, 처리의 흐름 중에 클린터널이나 스토커, 각종 상압·감압실이 있는 장치 등과 같이 시스템의 주요한 위치에 유니트화된 이러한 공기청정장치를 설치하면 저비용의 청정화가 가능할 것으로 생각된다.

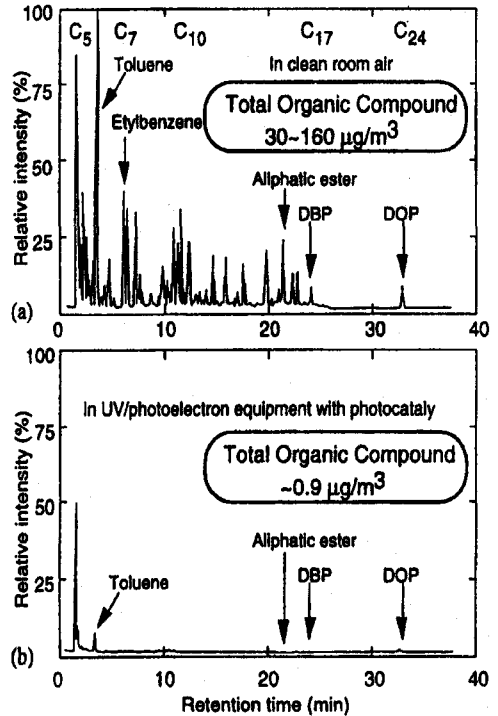


그림 4. 클린룸과 청정장치내의 가스상 오염물질의 TIC 비교

3.2 LED/광촉매를 적용한 웨이퍼 저장 스토커 (Stocker)

웨이퍼 저장 스토커의 공기청정 유니트로는 앞에서 소개했던 UV/광전자법과 광촉매의 제거 원리를 적용한 기술이 주로 연구되어 왔다. 이 장치의 성능은 앞서 제시한 바와 같이 웨이퍼 저장 스토커 내 가스상 오염물질을 효과적으로 분해제거할 수 있는 것으로 밝혀져 향후 클린룸에서 실용화가 가능한 기술로서 기대되고 있다.

한편 박스의 운송과 가공장치의 반입을 고려하면, 보관상자의 크기는 가능하면 작은 것이 바람직하다. 그러나 UV 램프를 사용할 경우는 공기청정 유니트의 소형화가 곤란하다. 또한 UV 램프는 수명이 약 10,000시간 정도로 비교적 짧고, 사용 중에 보수 작업이 필요한 것도 문제 중 하나이다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 최근에는 발광다이오드(LED)를 광원으로 사용한 광촉매 공기청정 유니트가 소개되고 있다. LED 램프의 장점은 ① UV 램프에 비해 작고, ② 좁은 장소에 설치가 가능하며, ③ 전력효율이 좋고, ④ 수명이 긴 장점을 가지고 있다. 그림 5는 LED/광촉매 공기청정 장치가 설치

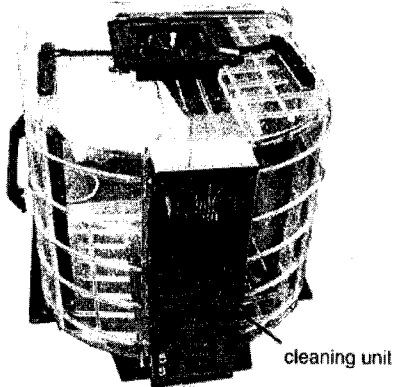


그림 5. LED/광촉매 장치를 적용한 웨이퍼 보관 스토커

된 웨이퍼 저장 스토커의 모습을 나타낸다. LED를 장착한 공기청정 유니트의 적용 유무에 따른 웨이퍼 표면의 SiO₂의 접촉각 변화를 조사해본 결과, 공기청정 장치가 적용되었을 때 접촉각이 작아지는 것으로 확인되었다(그림 6 참조).

이 결과는 웨이퍼 표면에 유기물의 흡착이 저감되었음을 시사하고 있다. 다만 LED에서 발생하는 자외광의 주파장이 380nm이므로 보다 단파장의 자외광을 (< 360nm) 발생시킬 수 있는 UV 램프보다는 제거효율이 다소 저하될 수 있다. 그러나 최근 일본의 한 회사에서 BLB 램프와 유사한 파장을 가지는 LED를 개발한 사례도 보고되고 있어, 웨이퍼 저장 스토커내의 오염물질 제거 성능의 향상뿐만 아니라 기타 광촉매 기술이 적용되는 공기청정기 분야에서도 그 사용이 크게 확대될 것으로 기대된다.

3.3 실린더형 광촉매 반응기의 이용

클린룸내 또는 외기에서 도입되는 가스를 연속적으로 처리하기 위해 실린더형 광촉매 반응기를 이용한 클린룸 오염가스 처리 연구가 진행되었다.

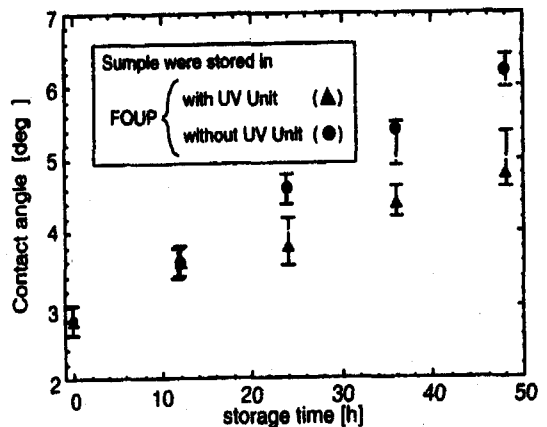


그림 6. 공기청정 장치 유무에 따른 웨이퍼 표면의 SiO₂ 접촉각 변화

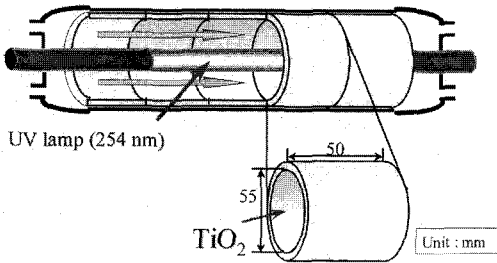


그림 7. 실린더형 광촉매 반응기

실험방법은 가스발생장치에 의해 생성된 DEP가스를 그림 7에 나타낸 반응기에 0.5, 1L/min의 유량으로 도입한 후 반응기 중심에 설치된 UV 램프를 켜서 광촉매 분해 성능을 조사하였다. DEP 가스는 반응기의 내벽에 코팅된 광촉매에 충돌하면서 연속적으로 산화분해된다.

실험결과는 1.0L/min에서 84%의 제거율이 얻어졌고, 체류시간을 증가시킨 유량 0.5L/min에서는 반응기 출구에서 확인된 DEP 농도가 검출한계 이하였다. 비록 조사한 유량 범위에서 DEP의 분해에 의해 포름알데히드(HCHO)가 검출되었으나, 그 발생량은 상대적으로 적어 분해된 DEP의 1% 미만이었다. DEP 분해의 최종 생성물인 CO₂의 발생 비율은 유량 1.0L/min에서 84%, 0.5L/min에서 89%로 각각 조사되어 제거된 DEP의 대부분은 CO₂로 완전 산화되는 것으로 확인되었다. 한편 본 장치는 자외광 램프로써 살균 램프(주파장 : 254nm)를 사용하고 있는데 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- ① BLB(black light blue) 램프(주파장 : 365nm)에 비해 오염물질의 분해에 효과적이다.
- ② 오염물질의 분해와 동시에 공기의 살균효과를 기대할 수 있다.
- ③ 연속흐름식이므로 압력손실이 적다.
- ④ 오존이 발생하지 않는다.

실린더형 반응기를 이용하여 가스상 오염물질을 처리할 경우 각각의 오염물질에 대한 제거율을 대략적으로 추정할 수 있다. 이 실린더형 반응기에 의한 제거율은 오염물질의 농도보다 운전조건(유량, 촉매량 등)에 더 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 즉 가스상 오염물질의 촉매 표면으로의 이동 및 촉매 표면에서의 반응비율에 영향을 받는다. 이중 관구조를 가지는 실린더형 광촉매 반응기는 annular denuder형이기 때문에 일반적으로 denuder 연구분야에서 이용되고 있는 추정식을 적용할 수 있다. 다음 식은 annular denuder의 제거율 추정식을 나타낸다.

$$C/C_0 = A_1 \exp(-B_1 z^*) + A_2 \exp(-B_2 z^*) + \dots \quad (4)$$

$$z^* = z \frac{\pi D}{2F} \quad (5)$$

여기서 C/C₀는 투과율(1-제거율), z는 반응기 수평방향의 TiO₂ 고정길이, D는 확산계수, F는 유량을 각각 나타낸다. 식(4)의 제1항이 제2항 이하와 비교하여 충분히 큰 경우 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$C/C_0 = A \exp(-Bz^*) \quad (6)$$

여기서 A, B는 반응기의 구조 및 가스 벽면에서의 접촉확률에 의해 결정되는 계수이지만, 실험가스가 저농도이고 반응이 충분히 진행된다고 가정하면 A는 1로서 간략화 할 수 있다.

실제 톨루엔과 벤젠 가스를 대상으로 제거실험을 통해 얻어진 z*값 변화(유량변화)에 따른 투과율과 상기한 추정식에 의한 투과율 데이터를 비교한 결과, 그림 8에 나타낸 바와 같이 실측치와 추정치가 거의 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 상기

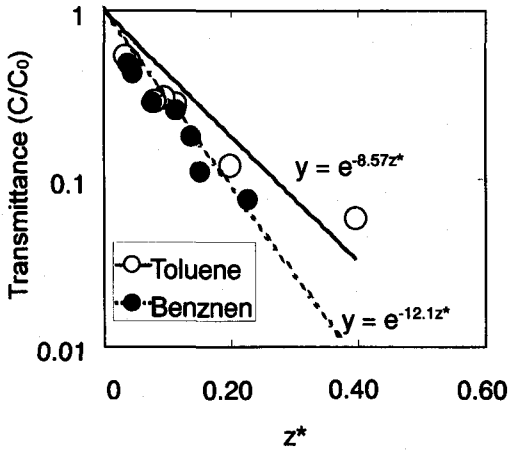


그림 8. 오염물질 제거실험에서 실측치와 이론치의 투과율 비교

추정식을 이용하면 실내공간으로 이 실린더형 광촉매 장치를 적용하는 경우에 필요로 하는 제거율을 얻기 위한 운전조건을 대략적으로 추정할 수 있다.

3.4 FFU 탑재용 공기청정장치

클린룸에서 광촉매 적용 제거장치를 FFU(Fan Filter Unit)에 탑재한 공기정화 시스템을 그림 9에 나타냈다. 이 장치는 TiO₂ 광촉매를 유리 섬유에 코팅시켜 사용하고, 광촉매 필터의 중심에 자외선 램프를 설치한 구조를 가지고 있다. 본 장치의 성능을 조사하기 위해 FFU의 일반적 사용 풍속인 0.5m/s로 설정한 후 DBP의 제거성능을 장시간 조사한 결과 약 75% 이상의 제거율이 300일 이상 지속적으로 얻어지는 것으로 보고되고 있다.

3.5 단파장 UV/광촉매 기술을 이용한 제거

단파장 UV광 조사에 의한 유기물의 분해반응을 클린룸 가스상 오염물질의 제거기술로서 이용하는 연구가 주목을 받아왔다. 이 단파장 UV광은 주파

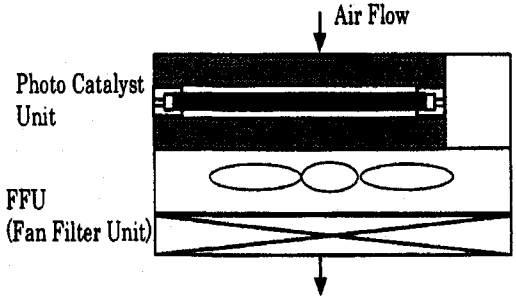
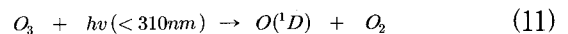
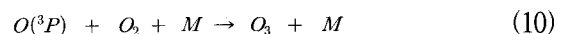
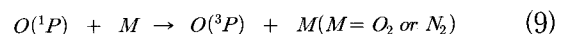
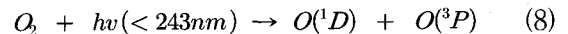
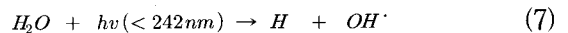


그림 9. FFU에 탑재된 광촉매 공기청정 시스템 모식도

장인 254nm와 일부 185nm의 자외광을 발생시키는 특징을 가지고 있고, 오존 램프라 불리기도 한다. 185nm 파장의 자외광은 공기중에서 물을 광분해시켜 강력한 산화제인 OH 라디칼을 생성시키고, 또한 산소를 광분해하여 오존을 생성하는 과정에서 광화학 반응에 의해 다량의 OH 라디칼을 생성하기 때문에 공기중에서 오염물질을 광산화적으로 제거시킬 수 있다. 단파장 자외광의 공기중 조사에 의한 O₃과 OH 라디칼의 생성 메커니즘은 다음과 같다.



클린룸 외기 처리용 공조기내에 단파장 UV광을 설치하여 유기물의 제거성능을 조사한 결과 처리속도 0.5m/s에서 외기에서 도입되는 총유기물의 70% 이상의 제거 성능을 나타내는 것으로 보고되었다. 게다가 톨루엔과 자일렌 등의 난수용성 유기 가스의 광분해에 의해 발생하는 중간생성물은 알데히드

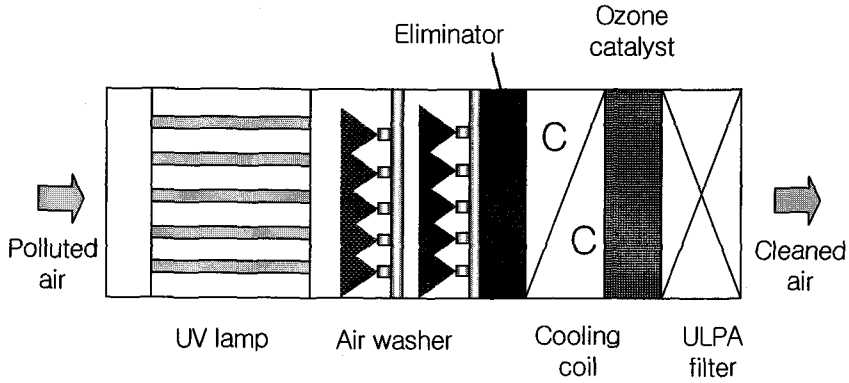
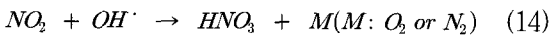
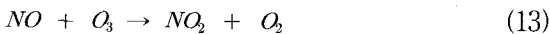


그림 10. 단파장 UV광을 적용한 클린룸 공기청정 시스템 개요

류나 유기산 등으로 극성기를 가져서 상대적으로 수용성이 높은 물질로 이루어져 있다는 연구결과도 보고되고 있다. 따라서 그림 10에 나타낸 바와 같이 클린룸에서 이 광산화 분해 반응기와 에어워셔를 병용할 경우 유기오염물질의 광산화 반응에 의해 생성된 수용성 중간생성물을 에어워셔에 의해 포집 제거하는 것이 가능하다. 게다가 단파장 UV광을 조사하면 공기중 NO_x가 아래 반응식에 의해 수용성이 높은 HNO₃로 광산화 되기 때문에 광산화 반응기와 에어워셔를 병용할 경우 톨루엔 등의 유기물과 NO_x의 동시제거가 가능한 공기정화 시스템으로 활용이 가능할 것으로 평가된다.



한편 상기한 광산화 분해장치의 성능을 향상시키기 위해 단파장 UV광을 광촉매의 광원으로 이용할 수 있다. 그림 11은 단파장 UV/광촉매 시스템에 의한 유기물의 광산화 및 광촉매 분해 원리를 도식한 것이다. 반응기내에 도입된 오염물질은 1차적으로 공기 중에서 광산화 반응을 거치고, 잔류한 오염

물질과 중간생성물은 촉매 표면으로 이동하여 광촉매 반응에 의해 최종적으로 CO₂로 전환되는 과정을 나타내고 있다. 또한 공기 중에서 광화학 반응에 의해 생성된 오존 및 유기에어로졸 등도 광촉매 반응에 의해 효과적으로 분해가능하다. 본 기술을 적용한 연구결과에 의하면 단파장 UV광 단독에 비해 광촉매를 병용할 경우 유기물의 제거 성능이 크게 향상되었고, 또한 그림 12에 나타낸 바와 같이 유기물의 분해과정에서 생성되는 중간생성물의 발생이 상당히 저감되는 것이 관측되었다.

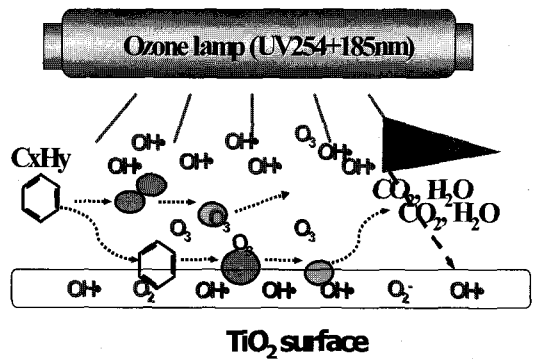


그림 11. 단파장 UV광/광촉매법의 오염물질 분해 기구

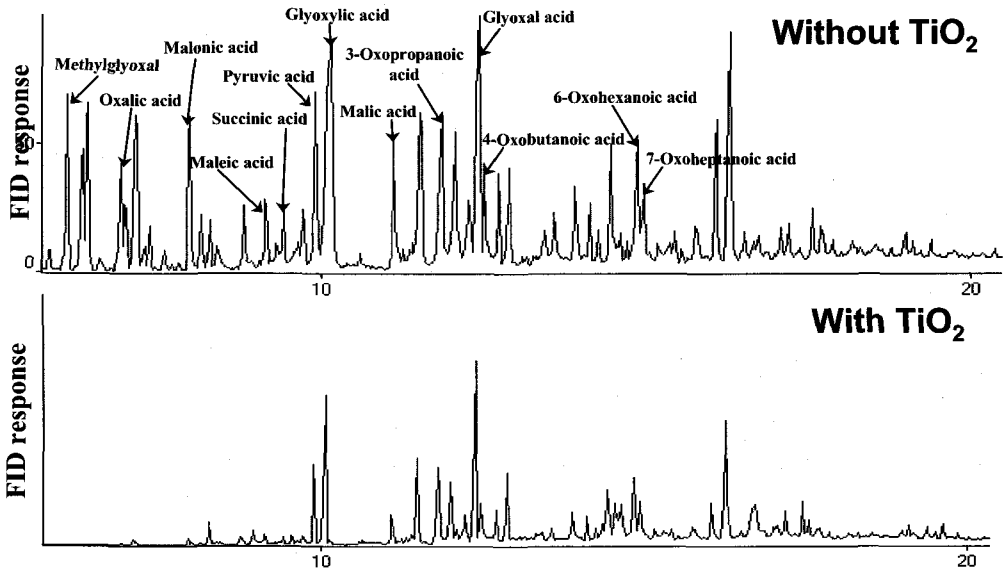


그림 12. 삼불화붕소(BF₃) 유도체화 기술을 이용한 톨루엔의 광분해 중간생성물의 동정 결과(GC/MS 분석)

4. 맺음말

본 고에서는 클린룸의 공기중 화학오염의 저감 대책으로 최근 주목을 받고 있는 광촉매 활용 제거 기술의 연구 동향에 대해 기술하였다. 그러나 본 고에서 소개한 UV/광촉매 기술이 클린룸의 환경에 실제 적용된 사례는 아직 보고되지 않고 있다. 그 이유로서는 광촉매 기술이 가지는 적용 한계를 들 수 있다. 즉, 체류시간의 의존성, 제거대상 오염물질의 반응활성종(OH 라디칼)과의 반응성, 유해 중간생성물의 발생 가능성, NO_x 등의 무기물질의 공존 영향 등이 본 기술의 실용화에 방해 요소로 알려지고 있다.

현재 일본에서는 상기한 광촉매 기술의 문제점들을 해결하고, 실용화를 위한 노력을 지속하여 매년 새로운 제거 기술들이 발표되고 있으나, 불행히

도 국내에서는 아직 이러한 노력들이 아직 미흡한 실정이다. 따라서 메모리 반도체 세계 1위 생산국이자 이를 통해 막대한 국부를 창출하고 있는 우리나라에서도 클린룸 공기청정 기술 개발 분야의 중요성을 인식하고, 광촉매 활용 기술뿐만 아니라 다른 클린룸 화학오염 제거 신기술 개발에도 적극 투자하여 국내에서도 독자적인 기술을 확보해야 할 것이다.

- 참고문헌 -

1. J. Jeong, et al., 2005, "Photodegradation of Gaseous Volatile Organic Compounds (VOCs) using TiO₂ Photoirradiated by an Ozone-Producing UV Lamp: Decomposition Characteristics, Identification of By-Products and Water-Soluble Organic Intermediates", J. of Photochem. and Photobiol. A: Chem.,

- 169, pp. 277-285.
2. Li Bao 等, 2003, "FFU搭載光触媒空氣清淨裝置による高沸點有機ガスの除去効果", 第21回 空氣清淨とコンタミネーションコントロール研究大會, pp. 164-165.
3. 鈴木昌人 等, 2003, "LED光触媒を用いたウェハクリーニングボックスのMOSデバイスによる性能評価", 第21回 空氣清淨とコンタミネーションコントロール研究大會, pp. 166-168.
4. K. Sakamoto, et al., 1999, "Destruction of indoor air pollutants in TiO₂-wall coated cylindrical flow reactor under 254nm UV irradiation", J. Adv. Oxid. Technol., Vol. 4, pp. 35-39.
5. 坂本和彦 等, 2001, "光触媒による有機物の完全酸化", クリーンテクノロジー, pp. 37-41.
6. 藤井 敏昭 等, 1999, "光触媒によるクリーンルーム空氣中化學汚染の除去", クリーンテクノロジー, pp. 46-50.
7. 김용진, 1999, "UV 광촉매에 의한 가스상 오염 물질 제어기술", 공기청정기술, 제12권, 제2호, pp. 15-25.
8. 유경훈, 1999, "UV/광전자법을 이용한 클린룸 미세입자 제어기술", 공기청정기술, 제12권, 제2호, pp. 58-78.
9. 井上實 等, 1998, "紫外線を用いた空氣清淨化裝置の開発", 第16回 空氣清淨とコンタミネーションコントロール研究大會, pp. 13-16.
10. 阪田總一郎 等, 1998, "空氣中の化學汚染の低減對策", 第36卷 第2号, pp. 19-27.
11. D.M. Murphy, et al., 1987, "Mathematical treatment of the wall loss of a trace species in denuder and catalytic converter tubes, Anal. Chem., Vol. 59, pp. 2753-2759.
12. M. Possanzini, et al., 1983, "New design of a high-performance denuder for the sampling of atmospheric pollutants, Atmos. Environ., Vol. 17, pp. 2605-2610.