

21세기 유망 환경기술의 개발동향과 전망<1>

● 기준학/ 이학박사 · 현대환경연구원 수석연구원 ●

목 차

- 1. 서론
- 2. VOCs 제거기술
- 3. NOx 제거기술
- 4. 이산화탄소 재감기술
- 5. 다이옥신 제거기술
- 6. 가스 용해기술
- 7. 기타 유망기술
- 8. 결론

1. 서론

지구환경 보존이라고 하는 화두는 더 이상 명제에 머물지 않고 우리와 자손들을 위해 당장 실행에 옮길 수밖에 없는 당위적인 사명으로 자리잡아 가고 있다. 이는 또한 산업의 글로벌화와 환경위해의 광역화 현상에 따라 특정 지역에만 국한되는 일이 아니고 모든 인류가 추구해야 하는 「인류의 公同善」이라는 인식도 확산되어 가고 있다. 그래서 우리와 20,000km나 떨어져 있는 먼 나면 곳임에도 불구하고 아마존 지역의 열대우림이 파괴되고 있다는 뉴스를 접할 때 예사롭게 생각되지 않는다. 이렇듯 지구환경을 보존해야 한다는 공감대는 이미 전 지구적으로 형성되고 있는데 우리의 환경이 상당히 어려운 지경에 이르렀다는 것을 반증하는 것이기도 하다. 따라서 대부분의 국가는 환경보존과 경제발전을 동시에 달성하기 위한 「지속 가능한 개발」을 국가의 발전전략으로 채택하고 있으며 다자간 국제환경협약이라는 틀을 통해 범지구적인 차원의 동참을 유도하고 있다.

이러한 배경에 힘입어 19세기에 공중위생과 폐기물처리에서 출발한 환경산업은 선진국가를 중심으로 환경보호를 위한 규제기준이 1970년대에 들어 본격적으로 적용되면서 발전하기 시작하였다. 1990년대에는 전세계적인 산업발전과 환경라운드인 다자간 국제협약들이 발효되면서 환경산업의 성장을 가속시켜 1992년도에 2,950억 달러에

이르렀던 세계 환경시장 규모가 1997년도에는 4,730억 달러로 성장해 불과 5년만에 60%에 이르는 고속성장을 구가하게 되었다(EBI, 1999). 최근에는 환경에 유해한 제품뿐만이 아니라 생산에서 폐기에 이르는 전과정에서 환경친화적이지 못한 제품도 무역 상에 제한을 두어야 한다는 주장이 제기되는 등 환경보호 대상이 되는 산업활동의 범위가 보다 확대되고 있는 추세이다. 이에 따라 미국 스탠포드연구소, 일본 미쯔비시종합연구소 및 우리 나라 산업연구원 같은 세계 전문연구기관들은 21세기에도 환경산업이 여전히 성장을 거듭할 것으로 공통적으로 예측하고 5대 유망산업군에 포함시키고 있다.

〈표 1〉 우리 나라의 산업별 성장 전망(2001~2010년 연평균)

분야	예상 성장률
생물공학	23.4%
소프트웨어	21.3%
문화	13.7%
환경	13.4%
컴퓨터	10.7%
반도체	5.5%
자동차	2.4%

자료 : 산업연구원, 1999

환경산업은 크게 서비스, 설비, 자원분야로 나누어지는데 규모로 보면 서비스분야가 약 50%, 설비분야가 약 30%의 비중을 보이고 있으나 설비분야의 1997-1998 성장률은 4.4%로서 서비스분야의 0.2%에 비해 훨씬 높은

것으로 알려지고 있다(EBI, 1999). 따라서 수출주도형 산업구조를 갖고 있는 우리 나라도 환경설비시장에서의 점유율을 높이기 위한 법정부적인 노력을 기울이고 있다.

환경분야의 국제적인 조류를 볼 때 환경산업 시장의 성장에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 관련 분야에 대한 규제 시행여부라고 해도 과언은 아니다. 그런데 최근에는 선진국가뿐만이 아니라 개발도상국들 내에서도 환경인식이 급격히 고양됨에 따라 국가간에 유사한 환경법규를 채택하는 경우가 늘면서 바야흐로 환경규범의 전지구적인 표준화가 진행되고 있다. 따라서 환경산업의 발전 양상도 실현시기에서 차이가 날뿐 대개는 선진국가와 비슷한 형태를 띠게 된다. 그러므로 환경산업의 발전단계에서 상위에 속한 국가들의 환경산업기술의 동향을 살펴보면 우리 환경산업의 발전방향을 기능해 볼 수 있다. 이러한 과정을 거쳐 적용성이나 기술면에서 다양한 특성을 보이는 환경산업분야 중 성장 가능성이 있는 부문을 도출해 낼 수 있다. 선진국가의 환경기술 개발동향 및 시장추세에 기초하여 VOCs, NOx, CO₂, SOx, 다이옥신 제거기술 및 가스화용해, 풍력발전, 초순수제조기술 등을 주목되는 기술로 분류할 수 있었으며 본 고에서는 이들의 개발동향과 전망을 요약해 보고자 하였다.

2. VOCs 제거기술

WHO의 비등점에 기초한 분류에 의하면 VOCs (Volatile Organic Compounds; 휘발성유기화합물)란 비등점이 50~240℃까지인 유기화합물을 가리키는 용어이다. 대표적인 VOCs로는 포름알데히드, 벤젠, 톨루엔, 자일렌, 트리클로로에틸렌, 디클로로에탄, 이소프로필알코올, 메틸에틸케톤 등이 있다. 이들은 자체적으로 유해성을 띄기도 하며 지표권에서 질소산화물과 함께 오존, PAN(Peroxyacetyl nitrate: 과산화아세틸질산염) 등을 생성시켜 대기환경 내에서 광화학오염을 야기하는 하이테크 오염물질로 알려져 있다.

유럽, 북미, 우리 나라에서는 이미 대기환경의 오존농도

를 높이는 요인으로 VOCs와 NOx의 광화학반응을 지목하고 VOCs의 배출량에 대한 규제를 시행하고 있다. 최근 들어서 EU나 미국 EPA는 대도시를 중심으로 계속 증가하고 있는 광화학오염을 줄이기 위해 VOCs의 배출규제를 강화하는 추세이다. 1999년 12월 1일에는 유럽 및 북미 35개 국가의 각료들이 스웨덴의 고텐부르그에 모여 VOCs를 비롯한 장거리 월경성 대기오염물질 규제에 관한 의정서를 채택함으로써 2010년까지 VOCs 배출량을 1990년 기준으로 40%를 줄이기로 하는 등 향후에도 더욱 규제가 강화될 전망이다. 따라서 석유, 유기용제, 도료 등을 이용하는 자동차 도장시설, 드라이클리닝 시설, 목재제품 도장시설이나 화석연료를 연료로 하고 있는 사업장, 자동차 등으로부터의 VOCs 발생을 저감하는 효과적인 기술의 필요성이 증대되고 있다.

〈표 2〉 VOCs의 주요 발생원

발생원	발생시설	발생원인
석유저장, 출하, 급유시설	콘루프 탱크, 부상지붕형 탱크, 유조선, 탱크화차, 탱크로리, 가솔린 스택드, 가정용 등유	유입손실, 환기손실, 불특정 손실, 적입시 손실, 지하탱크 손실, 운반·급유시 손실
도료, 용제 사용 시설	제조공장, 사업장, 서비스 공장	도장, 인쇄, 금속의 탈지 접착제 도포에 의한 증발 및 드라이클리닝 같은 세탁공정
유기화학제품 제조시설	폴리에틸렌 제조시설, 도료 제조시설	플라스틱, 합성고무, 석유화학계 기초제품의 제조공정, 도료 인쇄 잉크의 제조공정
도장공사	건설공사, 가정	건축물 도장, 가정에서의 도료 이용
매연발생시설	공장, 사업장, 가정, 군소 발생원	오니소각로 등의 소각로, 코크스로, 소결로, 스톱, 가스 곤로, 보일러, 흡수식냉온수기, 가스엔진 히트펌프 등으로부터 발생

(1) 기술개발 동향

VOCs 처리기술은 고농도 배기가스를 정화하기 위한 직접연소설비, 촉매산화설비, 용제회수설비 등을 중심으로 개발이 진행, 보급되어 왔다. 그런데 광화학 옥시던트의

발생을 줄이기 위해 시행되고 있는 최근의 VOCs 규제는 절대량의 감축을 요구하고 있기 때문에 도장이나 인쇄시설 같이 저농도이면서 유량이 큰 배기가스를 배출하는 업종이 주요한 규제대상이 되고 있다. 저농도이며 큰 유량의 배기가스를 처리할 때 종래의 연소법이나 회수법으로 직접 처리하는 경우 설비비 및 운전비가 높아 비경제적이다. 이러한 배경으로 중·저농도 배기가스 처리시장이 규제에 의해서 확대되고 있으며 기술개발도 이에 맞추어 진행되고 있다.

가. 연소법

산소를 공급하며 연료를 태움으로써 버너에 화염을 발생시켜 650~800 °C 범위의 비교적 고온에서 VOCs를 연소시켜 제거하는 연소로에서는 배기가스에 포함되는 VOCs 성분에 관계없이 유기성 오염물질을 90% 이상의 고효율로 처리할 수 있는 장점이 있지만, NOx가 발생하는 것과 중·저농도에서는 연료비가 많이 소요되는 단점이 있다. 연료비 절감을 위해 Smith, Reeco, Adtec사 등은 열회수를 하면서 연소시키는 축열식 직접연소로(Regenerative Thermal Oxidizer)를 개발하여 보급함으로써 유럽과 미국 등지에서 시장 점유율을 높이고 있다. NOx의 생성이 적고 염가의 메탄을 이용할 수 있는 축열식 직접연소로는 대용량의 배기가스 처리에도 적용되고 있다.

그리고 촉매를 사용하여 VOCs의 소각온도를 약 300 °C로 낮추는 촉매산화 장치가 개발되어 추가 연소를 위한 연료 사용량을 대폭 절감할 수 있게 되었다. <표 3>에서 보이는 바와 같이 일반적인 VOCs의 연소온도가 300~700 °C 사이인데 비해 촉매산화온도는 130~330 °C 범위를 보인다. 따라서 낮은 온도에서 VOCs의 산화가 이루어지므로 이러한 촉매산화설비(Catalytic Oxidizer)는 에너지 사용량이 직접연소설비에 비해 적게 소요되는 장점을 갖는다. 이것 외에도 촉매산화법을 적용한 설비는 크기의 소형화가 가능하고 비교적 염가인 특성을 보이고 있어 점유율이 전체 VOCs 제거기술의 약 25%를 차지하고 있다.

촉매산화법은 일본에서 개발된 처리기술이지만, 1990

년대 들어 AirProtekt, ICI Katalco, Johnson Matthey사와 같은 유럽과 미국 기업들도 기술개발 및 개량사업을 추진하고 있다. 이 기술의 단점으로는 황산화물이나 먼지로 인해 촉매가 쉽게 손상되거나 촉매 교환비용이 비싼 점 등이 지적되어 왔지만, Johnson Matthey사가 전세계에 납품한 약 500대의 실적에 의하면, 10년 이상 촉매를 교환하지 않고 계속 운전하고 있는 예도 나타나고 있으며, 선두 기업들에 의해 기술이 계속 개발되고 있다.

또한, 축열연소설비에 촉매를 결합시킨 축열촉매산화설비를 적용하여 저농도, 대용량의 배기가스도 처리가 가능하게 되었다. 이를 이용해 VOCs 농도 1 ppm, 배기가스량 100,000 m³/hr의 조건에서도 VOCs에 대한 적정처리가 가능하다.

<표 3> VOCs 물질의 연소온도와 촉매산화 온도

자료 : "유기용제 규제의 동향과 처리기술" (出典正矩, 「表面」Vol. 30 No. 10)

물질	직접연소	촉매산화	
	연소온도(°C)	산화개시온도(°C)	완전산화온도(°C)
톨루엔	552	160	240
자일렌	482	160	270
페놀	700	180	330
메탄올	464	20	150
부탄올	343	150	250
포름알린	-	40	130
아세톤	650	130	250
MEK	516	145	300
MEK	-	170	320
초산	427	217	300
암모니아	651	210	240

나. 농축 시스템

동일한 발생량의 VOCs를 처리하는 경우 농도가 낮을수록 배기가스 유량이 증대되기 때문에 산화분해설비나 응제회수설비의 경제성이 떨어진다. 따라서, 저농도이면서 고유량의 특성을 보이는 배기가스로부터 VOCs를 분리하여 적은 유량으로 농축해 소형의 산화분해설비나 회수설비를 통과시켜 경제적으로 처리하는 방법이 개발되고 있다. 대표적으로는 활성탄이나 제오라이트 같은 흡착제를 벌집모양으로 원통에 성형하여 만든 로터를 사용해 연속

적으로 배기가스로부터 VOCs를 분리함으로써 적은 유량으로 농축하는 별집식 농축장치가 많이 활용되고 있다.

다. 플라즈마 방전처리

미국 EPA에서는 강한 전해질을 충전한 충전탑 내에서 플라즈마를 이용해 VOCs를 방전처리하는 기술이 유망하다는 평가결과를 발표하고 있다. 그 원리는 방전된 플라즈마에 의해 생성된 고에너지의 전자를 배기가스에 조사함으로써 대기압 하에서 VOCs 성분의 화학결합을 강제로 끊어주어 O₂, H₂O, CO₂ 같은 무해한 물질로 변환하는 것이다. 플라즈마에 의한 처리법은 플라즈마의 에너지가 보통 20 eV 이하로 낮기 때문에 방전하는 전극 근처에서만 높은 제거효율을 보이므로 대용량의 배기가스를 처리하는 데에는 어려움이 따른다. 하지만 시설비가 저렴하고 전기만을 에너지원으로 이용하므로 운영비용이 적게 소요되며 저농도 및 고농도의 VOCs도 효과적으로 제어할 수 있는 특장으로 인해 주목받고 있다.

(2) 향후 전망

현재 진행되고 있는 VOCs 규제경향은 유럽과 미주를 거쳐 중남미나 아시아로 확대될 것으로 전망되므로 VOCs 처리기술 시장은 지속적으로 성장할 것으로 예상된다. 이러한 규제는 광화학오염이 주로 발생하는 대도시를 중심으로 소규모 인쇄시설이나 드라이클리닝시설, 자동차 정비사업장을 대상으로 시행되고 있는 추세이므로 앞으로 관련 기술은 설비를 소형화하는데 초점을 맞추어 진행될 것이다. 소용량 시설에 요구되는 처리 성능자체는 이미 기술적으로 확립되고 있지만, 설치비 및 운영비를 더욱 줄일 수 있는 방향으로 컴팩트화가 요구된다. 그리고 선진 기업의 경우에는 이미 기초적인 기술력을 갖추고 있으나 VOCs 분해 산물인 CO₂, NO_x의 발생, 폐수처리 및 폐활성탄처리 등 2차 환경오염을 방지하기 위한 분야는 아직 미진하다. 따라서 환경보전형의 total 시스템으로서 환경에 안전하게 VOCs를 처리하는 기술의 개발이 필요하다고 판단된다. 주요 VOCs 제거설비 산업체로는 Reeco, Salem, Smith, Monsanto Enviro Chem, Envirotec,

Lensi, LTG 등이 있다.

또한, 한편으로 도로 메이커는 VOCs를 포함하지 않는 도료를 개발·판매하기 시작하면서, end-of-pipe 처리뿐이 아니라, VOCs 함유 물질의 사용을 억제하여 원천적으로 VOCs의 발생을 줄이는 사전예방을 통해 대처하는 경향도 나타나고 있다. 이러한 경향은 접착제나 용제에 대해서도 적용되어 VOCs를 포함하지 않거나 혹은 휘발성이 낮은 제품의 개발로 연결될 것으로 보인다. 따라서 VOCs 설비기술의 개발에는 청정도료나 용제의 개발 동향을 반드시 고려해야 한다.

현재 VOCs 제거설비의 주요 수요 분야는 표면도장, 화학, 목공, 전자산업 분야 등으로서 VOCs 규제가 강하게 이루어지고 있는 미국, 유럽국가를 중심으로 시장이 형성되고 있다. 우리나라의 경우, 1997년부터 특별대책지역인 여천, 울산, 온산 지역을 중심으로 VOCs 규제정책이 시행되었으며 현재 대기환경규제지역으로 규제정책이 확대 시행되면서 수요가 커지고 있다. 울산 지역에만 약 1,000억 원의 투자가 이루어진 것으로 조사되었다(울산상공회의소, 1998). 유럽에서는 독일과 영국이 가장 큰 VOCs 제거설비 시장이지만 새로이 마련된 장거리 월경성 대기오염물질 규제로 인해 수요는 유럽 전역으로 확대될 것이다.

VOCs 제거설비의 시장은 1995년에 전세계에서 10억 달러의 규모를 이루었었고 1998년에는 18억6,000만 달러를 기록하였다. 2001년까지 연평균 15%를 상회하는 성장을 지속해 24억1,000만 달러에 이르는 규모로 성장할 것으로 전망된다(표 5).

〈표5〉 세계 VOCs 제거설비 시장규모 전망

연도	1995	1998	2001	연평균성장률(%)
시장규모 (백만달러)	1,000	1,860	2,410	15.8