

# 대기오염 제어기술

문길주  
KIST 환경연구센터



● 1951년생.  
● 디젤 입자 충전기구와 대기오염의 분진에 대하여 전공하였으며, 서울의 스모그현상과 디젤 입자처리에 대하여 연구 중에 있다.

## 1. 머리말

과학기술이 발전하면 인간의 생활이 편리하여지고 풍요로운 삶을 즐길 수 있게 되리라 믿었으므로, 점점 기술개발에 박차를 가하여 매우 빠른 속도로 세계의 모든 곳이 과학기술의 혜택을 누리게 되었다. 국내의 경우만 하더라도 1950년대에는 전쟁 후의 폐허 속에서 오직 살아남기 위한 식량증산에 힘을 기울였으며 1960년대에 들어서서 의류업종으로 전환되었으며 1970년에는 화학공업, 정유공업 등에 역점을 두고 과학기술만이 살아남는 길이라 생각되었다. 이렇게 힘들게 이룬 과학기술이, 정작 문명의 이기를 누리지도 못하고, 풍요로운 삶을 즐기기도 전에 1990년대에는 환경문제라는 커다란 과제를 안게 되었다. '60년, '70년, '80년대에 거쳐 노력한 과학기술종사자에게 영광이 돌아오리라 기대를 걸었던 것이 모든 환경오염의 주범을 "과학기술의 부족"과 "과학기술자의 잘못"으로 돌리게 되었다. 다시 말하여 오늘날 과학기술이 산업발전과 현대문명을 위해 크게 기여하고 있지만, 경제적인 사회적인 측면에서 본다면 반드시 이익만이 있지 않음을 보여주었다. 특히 생물집단(인간)에 필요한 자원개발을 위해 그 동안 기술의 발달이 추구되어 왔지만, 그 결과가 환경에 주는 영향을 생각한다면 많은 문제점이 있다. 지금이라도 과

학자가 반성의 기회를 갖으면서 다시 환경과학에 재도전할 좋은 기회가 되었다고 생각된다. 환경과학이란 서양격언에 있는 "할 수 있겠는가?" "할 수 있다고해서 꼭 해야만 하는가?" 라는 말을 되새기며 모든 과학기술을 연구 발전시켰다면, 환경에 최소한의 영향을 미치는 방법으로 연구개발되었을 것이다. 좋은 예로 1970년대에 산업화를 시작하면 "할 수 있겠는가? 할 수 있다고 꼭 해야만 하는가?"를 생각하면서 시행하였다면 지금 같은 최악의 환경 조건은 되지 않았으리라 생각된다. 끝으로 지금부터 개발되는 모든 공정개발이라든가 신제품 개발은 지금의 기준에 맞추기 이전에 10년 이후의 환경기준을 목표로 삼고 개발되어야만 빠르게 바뀌는 환경시대에 과학기술에 종사하는 자부심을 느낄 수 있을 것이다.

## 2. 환경오염의 종류

폐기물이란 아직까지 사용하는 방법이 개발되지 못한 모든 자원이라고 말할 수 있으며, 또한 인간의 손을 거쳐 제조되고, 제조되는 도중에 발생하는 모든 것들을 환경오염이라고도 할 수 있다. 더욱이 에너지를 생산하는 과정에 발생하는 모든 것이(가스, 입체물질) 이 사회에서 가장 큰 공해의 주범이다. 대기오염은 에너지를 사용하는 양과 정비례 내지 그 이상으로 공해를 만든다. 에너지를 다루고 개발하는

기계공학도의 책임과 환경에 대한 기여는 매우 중요하다고 생각된다. 환경오염의 종류는 매우 광대하여 여기서 다루려는 것은 에너지와 연관되는 일부분의 예다.

2.1 가 스

화석연료가 대기오염의 주범이며, 더욱이 화석연료가 연소되면서 발생하는 가스중에서 아황산가스(SO<sub>2</sub>), 질소가스(NOx), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 탄소화물(HC) 등을

들을 수 있으며, 2차오염 가스로는 오존(O<sub>3</sub>)과 스모그(smog) 같은 것을 들 수 있다. 이런 가스들은 인간의 직접적인 건강 및 보전에 영향을 줄 뿐만 아니라, 자연파괴와 농작물에도 직접적인 피해를 준다. 대기중의 오염물질이 공기의 질을 악화시키는 스모그현상 등으로 나타날 뿐 아니라, 비와 섞여 산성비의 현상을 만들고, 호수, 강을 산화시켜 심지어는 물속에서 사는 어류들에게까지도 피해를 준다. 대기환경오염의 주범은 화석연료를 사용하는 공장 및 자동차가 됨을 알 수 있다. 각 나라와 지역의 특색에 따라 차이는 있다 하겠지만 표 1에서 보여주듯이 거의 모든 대기오염의 주원인이 되는 가스 등은 화석연료를 사용하는 자동차와 발전소가 오염원이 된다 하겠다.

표 1 1차 오염의 원인이 되는 오염물의 분포도<sup>(1)</sup>

오염원 (Sources)*	대기오염 가스종류				Total (%)
	CO	NOx	HC	SOx	
Transportation	75.4	51.5	56.2	2.9	60.0
Fuel Combustion (Stationary Sources)	0.5	44.1	1.7	78.2	15.9
Industry Process	7.7	0.9	15.9	17.7	9.7
Solid Water Disposal	4.9	1.8	5.8	0.3	4.1
Miscellaneous	11.4	1.8	20.5	0.9	10.3

\*1970년도 U.S. EPA자료를 토대로 산출되었음

표 2 에너지 및 비에너지 분야의 온실가스 배출<sup>(2)</sup>

구 분	기여도	가스의 주요 배출원
이산화탄소	66%	화석연료 76%
		나무연료 3%
		토지개간 19%
		시멘트생산 2%
메 탄	17%	화석연료 20%
		생물성연료 3%
		농 업 47%
		토지개간 15%
		매 립 15%
염화불화탄소	12%	냉매, 발포제, 용매, 분사제
이산화질소	5%	화석연료 12%
		생물성연료 4%
		농 업 64%
		토지개간 15%

1970년의 미국자료를 이용한 이유는, 미국의 대기정화법이 제정되기 이전의 자료를 통계로 하였을 뿐만 아니라, 자동차들도 촉매변환장치(catalytic converter)와 무연(unlead)을 사용하기 이전의 자료들이기 때문에 지금 국내의 오염배출치와 매우 흡사하리라는 기대에서 사용하였다. 표 1에서 다루지 않은 중요한 지구환경을 해치는 가스로 새로이 등장하기 시작한 것은, 지구온난화를 일으키는 CO<sub>2</sub> 가스를 들 수 있다. 정확히 온실가스의 종류로는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 메탄(CH<sub>4</sub>), 염화불화탄소(CFC)와 이산화질소(NO<sub>2</sub>)이다. 표 2가 온실가스의 배출기여도와 배출원을 나타낸다.

2.2 분 진

일반적으로 먼지(particulates, aerosol)하면 자연적으로 발생한다는 관념 때문에 오염물질이라 생각되지 않았었다. 이들 먼지중에서도 가장 큰 문제가 되고 있는 것이 바로 작은(sub-micron) 분진들이다. 직접적인 오염으로 스모그(smog는 smoke와 fog가 합쳐진 단어)현상이라든가 광산에서 종사하는 사람들에게서 발견되었던 폐진염 등을 들 수 있다. 이런 단순한 것을 떠나 지금은 연소의 잔유물로 나오는 작은 분진들은 인간의 폐 기능의 가장 깊숙

한 곳까지 침입하여 폐염과 기관지염을 발병시키며, 더욱이 유해물질의 작은 분진들은 눈병이라든가 농작물에 직접적인 피해를 주며, 시계를 흐리게도 한다.

분진들의 오염원은 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 연소시 발생하는 1차 오염과, 유해가스들이 공기중에서 화학반응을 일으켜 이루어지는 2차 오염이 있으며, 다음은 자연의 현상으로 발생하는 분진(소금, 화산, 사막) 등을 들 수 있다. 이들 분진들의 성분이라든가 분포도는 매우 다양하며 양(weight)으로 따진다면 자연적으로 발생하는 분진들이 대부분이다. (자연적으로 발생하는 분진량이 약 88%이며 인위적으로 발생하는 것이 약 12%) 그러나 과학기술이 발달됨으로써 발생하는 분진들은 대체적으로 작은 것들이며 그 성분 또한 자연적인 것에 비하여 유해한 것들이 대부분이다.

### 3. 대기오염 방지기술

제2절에서 다룬 가스, 분진들의 오염물질의 배출을 저감시킬 수 있는 오염방지 기술은 새로운 것이라기보다는 개발되어 있는 기술의 응용(art of science)이라 표현하는 것이 적절하겠다. 새로운 과학기술로는 예전에는 문제가 되지 않은 작은 먼지와 유해가스 등을 근본적으로 배출되지 않는 무공해(clean technology) 공정과정이 개발되어야 하며, 이것이 개발되지 않는다면 대기로 배출되기 전에 오염물질 처리 기술(end of the pipe technology)이 개발되어야 한다. 여기서는 지금까지 개발되어 있는 원리들중 몇 가지를 설명하여 응용분야에 적용하는데 도움을 주고자 한다. 더욱이 온실가스의 주범이 되는 CO<sub>2</sub>는 사용하는 에너지와 정비례함으로 에너지 절약형의 새로운 기술이 모든 분야에서 개발되어야만 한다. 온실가스의 배출을 줄이기 위하여 새로운 환경기술개발이 매우 시급하다. 표 3의 우리나라의 부분별 이산화탄소의 배출 현황 및 전망을 참조하여 저감대책을 개발하는 우선순위가 정해져야 하겠다.

표 3 부분별 CO<sub>2</sub> 배출현황 및 전망<sup>(3)</sup>

구 분	1980	1990	2000	2010	2030
최중소비부분	84.1	84.3	76.7	76.6	70.4
산업부분	34.1	35.8	34.4	35.8	37.6
수송부분	15.0	17.4	23.5	24.0	19.8
가정·상업	32.2	28.2	16.6	14.6	10.9
공공·기타	2.8	2.9	2.2	2.2	2.1
에너지전환부분	15.9	15.7	23.3	23.4	29.6
발전부분	15.9	15.6	22.8	22.6	28.3
지역난방	0.0	0.1	0.6	0.8	1.3

(단위 : %)

분진의 오염물질을 제거하려면 우선 분진의 화학적인 성질과 물리적인 성질을 이해하여야 한다. 특수한 분진을 제외하고는 모든 제거방법으로 물리적인 성질을 이용한 것들이다. 하지만 분진의 입자 분포도가 0.01um부터 100um까지 매우 폭넓게 되어있어 어떤 한 가지의 이론을 이용한 방법으로는 제거하기가 힘들다. 현재까지 알려져 있는 물리적·화학적 성질을 이용하여 연구된 방법중 다음 몇 가지를 다루려 한다.

- 가 : 침전조(settling chambers)
  - 나 : 관성장치(inertial devices)
  - 다 : 전기집진기(electrostatic precipitators)
  - 라 : 입자스크러버(particulate scrubbers)
- 위의 방법 이외에 가장 많이 사용되는 필터(filter)와 가스 스크러버(gas scrubber)는 다음 기회에 다루기로 하겠다.

#### 3.1 침전조

가장 원시적이고 기초적인 물리의 성질을 이용하여 분진이 공기의 흐름에서 떨어져서 침강하도록 하는 것으로 커다란 분진들에 주로 이용된다. 그림 1에서 보여주는 것과 같이 종류와 크기에 따라 다양하게 설계될 수 있다.

유체의 흐름의 형태(층류, 난류)와 유속에 따라 분진의 침강속도는 결정되고, 침전조의

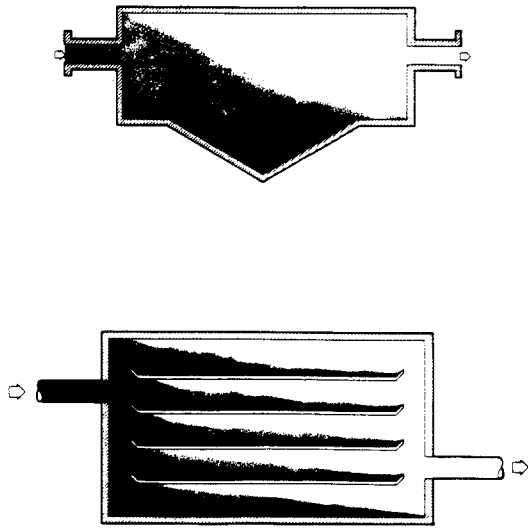


그림 1 여러 종류의 침전조(settling chamber)

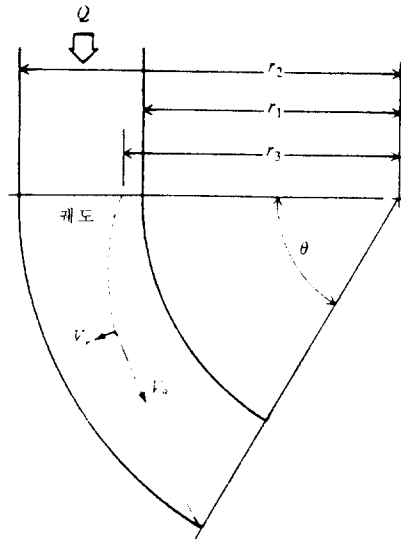


그림 2 사이클론 흐름속의 입자궤적

수집효율은 여러 변수에 따라 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

예) 층류의 경우( $Re < 2300$ ) 수집효율은 다음과 같다.

$$n = \frac{y}{\Delta H} = \frac{LVt}{V\Delta H} \quad (1)$$

여기서

$$L = \frac{Q}{nWVt} \quad (2)$$

여기서,  $n$ 은 tray개수,  $W$ 는 침전조 폭,  $Q$ 는 유량,  $Vt$ 는 최종침전속도를 나타낸다.

여기서,  $Vt$ (최종침전속도)는 다음과 같다.

$$Vt = \frac{CD^2\rho p.g}{18u} \quad (3)$$

여기서,  $C$ 는 보정계수,  $Dp$ 는 입자직경,  $\rho p$ 는 입자밀도,  $g$ 는 중력,  $u$ 는 점도를 나타낸다.

### 3.2 관성장치

위에서 보여주었듯이 분진(particle)을 유형(flow stream)으로부터 하강(gravity force)의 힘을 이용하여 분리시키는(separate) 방법을 이용하였지만, 원심력(centrifugal force)을 이

용하면 보다 높은 분리의 효율을 증강시켜, 흐름으로부터 입자를 효과적으로 분리시키는 장치를 "사이클론집진"이라고 부른다.

그림 2에서 보여주듯, 사이클론을 이용하여 입자를 분류하게 되는데, 이것 또한 유형의 형태와 속도에 따른 변도수가 되겠지만 층류의 경우에는 수집화율을 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{1 - \sqrt{1 - p\rho Qd^2\theta/\mu r_2^2 W(\ln r_2/r_1)}}{1 - r_1/r_2} \quad (4)$$

여기서,  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $\theta$ ,  $Q$ 는 그림 2에서 나타냈으며,  $p$ 는 입자 밀도,  $d$ 는 입자직경,  $W$ 는 단위 폭당유량( $m^3/s/m$ ),  $U$ 는 점도를 나타낸다.

식 (4)에서 보여주듯이 분진의 크기, 직경에 의하여 분류의 효율이 좌우되며, 작은 것은 분리하기가 힘들다는 것을 보여준다. 또한 유속이 느리게 되면 효율이 떨어짐을 나타낸다.

단순한 사이클론의 유속으로는 효율의 한계가 있음을 보여주며 더욱이 작은 분진은 효과적으로 여과를 할 수 없으므로 "역류사이클론"을 이용하게 되었다. 그림 3에서 보여주듯 유형을 여러번(3~4) 사이클론 내에서 회전시킴

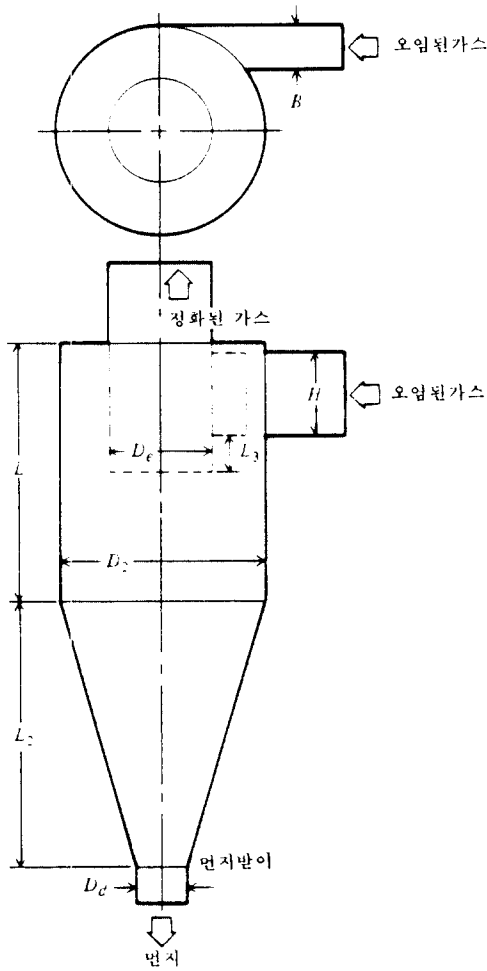


그림 3 역류사이클론 수집지의 개략도

으로써 효율을 향상시키기 위한 설계이다. 깨끗한 가스만 위로 빼어내는 식으로 설계하여 커다란 것과 작은 분진을 중력과 원심력의 물리적관성을 동시에 사용하였다. 이 방법과 원리가 산업체에서 가장 많이 사용되고 있다. 그림 4를 참고하기 바란다. 사이클론의 장단점은 사용하기 편하고 공기의 저항이 적으며 무엇보다도 유지비가 매우 적게 든다는 것이다. 하지만 효율면에서 뒤떨어지고 작은 분진일수록 효율이 떨어져서 대기정화법이 강화된 현재의 기준치에 맞추기가 힘들다.

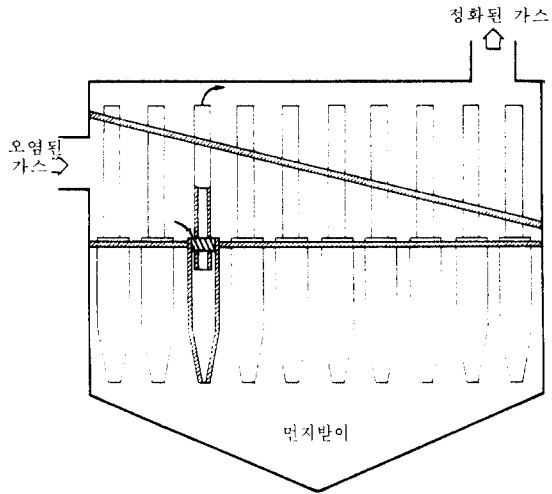


그림 4 복수역류사이클론 수집기

### 3.3 전기집진기

위에 이용한 중력과 원심력의 힘으로 제거하기 힘든 분진들을 보다 효율적으로 제어하기 위하여 정전기의 힘을 이용한 것이 바로 전기 집진기라 하겠다. 작은 분진에 충전을 띄우게 하고 표집판에 반대의 극을 띄우게 하여 정전기의 힘으로 작은 분진을 제거한다는 매우 기초적인 물리적 성질을 이용한 것이다. 여기서 가장 주안점이 되는 것은 어떻게 분진(air borne particle)에 효과적으로 충전을 시킬 수 있느냐 하는 것과 얼마나 커다란 정전기의 힘을 이용하여 집진하느냐 하는 것이다. 그림 5에서 보여주는 것이 “평형판 이단 집진기”라고 불리는 보편적으로 가장 많이 사용되는 전기집진기의 기본구조이다. 분진이 충전되려면 공기중에는 있는 이온의 농도와 충전에 필요로 하는 시간이다. 코로나를 방전시켜 많은 이온을 발생하게 하고 여기를 통과하는 분진이 확산충전될 수 있는 조건을 만들어 주는 것이 중요하다. 분진이 큰 것일수록 많이 충전될 수 있다는 물리적인 기초이론과 또한 많이 충전되어야만 정전기의 힘을 이용하여 효율을 높일 수 있다는 기본원리를 이용하여 제작되는 것이 전기 집진기이다. 아무리 많은 이온과 충전을 시킬

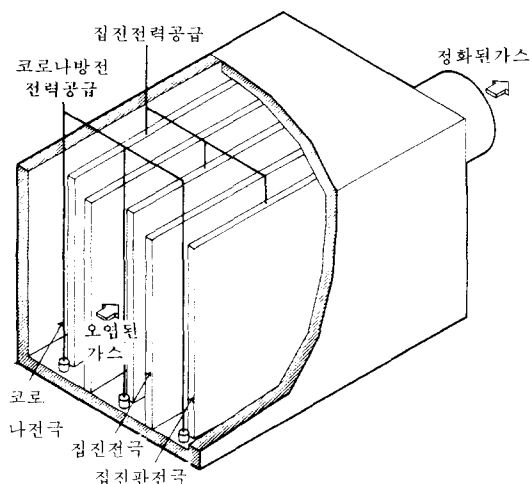


그림 5 평형판 이단 집진기

수 있는 시간이 있다 하여도 분진이 크기에 따라 충전될 수 있는 한계량이 정하여 진다는 기본적인 물리의 원칙으로 이것 또한 유형의 흐름으로부터 입자를 집진하는 데는 한계를 느끼게 된다. 작은 입자는 충전될 수 있는 양이 적기 때문에 작은 분진을 제어하기 힘든 점이 있다.

전기집진기는 시설비가 많이 든다는 단점에 비하여 유지비가 적게 들고 화재의 위험이 적다는 이유로 대형의 산업체에서 많이 이용하고 있다.

### 3.4 입자스크러버

스크러버는 분진과 가스를 제거할 수 있는 두 종류가 있는데 여기서 분진을 제거하는 스크러버의 원리에 대하여만 이야기하려 한다. 스크러버는 유해가스의 오염물질을 제거하는데 많이 쓰여진다. 스크러버의 종류 또한 여러 가지인데 일반적으로 가장 많이 쓰이고 있는 것으로는 분사조(spray chamber), 분사타워(spray tower), 원심력(centrifugal) 사이클론 오리피스(orifice type)라든가 팩베드(packed-bed) 스크러버 등이 있다. 위에서 말한 여러 종류의 스크러버가 있지만 분진을 제어하는 중

요원칙은 다음의 세 가지들이다.

- 충돌(interception)
- 관성에 의한 포착(inertial impaction)
- 확산(diffusion)

위의 세 가지 방법 모두 분진을 제어하는데 쓰여진 기본원리이지만, 이런 기본 원리를 효율적으로 작동하게 하여 수집효율을 높여주는 장치의 하나가 스크러버라 하겠다. 작은 분진을 손쉽게 제어하기 위하여 물 같은 물질을 분사하여 작은 입자를 크게 만든 다음 관성(impaction)을 이용하여 제어한다든가, 작은 분진과 분사하는 과정에서 발생한 작은 물방울이 확산에 의하여 커다란 입자로 변하게 하여 제거하기 용이하게 하여준다든가 끝으로 입자와 물의 분사로 만든 입자와 부딪쳐서 떨어지게 하는 것 같은 충돌방식(interception)이라 할 수 있다. 그림 6은 '분사조' 형의 스크러버라 하겠다. 입자스크러버는 작은 분진들을 효과적으로 제어할 수 있고, 시설비 또한 많이 투자되지 않는 장점이 있다. 그러나 제어되는 분진이 슬

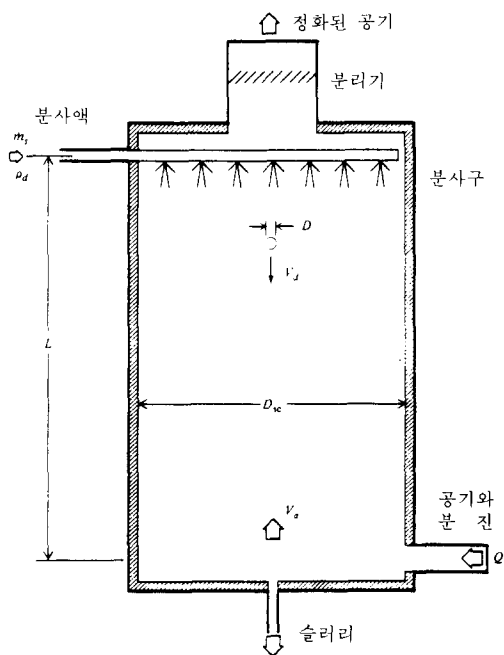


그림 6 분사조의 개략도

러리(slurry) 형태로 나오기 때문에 슬러리를 처리하는 문제가 단점중의 하나이다. 그러나 스크러버를 이용하여 유해가스라든가 아주 작아서 제어하기 힘든 분진을 물리반응과 화학반응을 동시에 이용하여 제어할 수 있는 가장 좋은 제어장치로 화학 공장의 대기오염물질 제거에 많이 사용되고 있다.

#### 4. 맺음말

1972년 스웨덴(Sweden)에서 시작한 환경보호의 중요성이 20년 후인 1992년에는 리우의 환경개발회의(UNCED)를 통하여 누구나 피부에 와닿는 현실이 되었다. 우리나라의 경우에는, 1970년부터 섬유, 화학, 정유 등의 경·중공업이 환경과학 내지 환경기술이 무시된 채 건설되기 시작하였으며 더욱이 1980년대에 도입하기 시작한 발전소, 자동차, 난방용 유류조차도 환경의 영향을 무시한 채 "경제발전"이란 미명아래 "할 수 있다고 해서 꼭 해야만 하는가"라는 기본 환경철학이 무시된 채 시행되었다. 1990년대에 와서도 자의가 아닌, 타국의 환경정책 때문에 기초연구가 무시된 채 급히 환경기술을 개발하려고 한다. 모든 과학이 그렇듯이, 기초과학의 축적과 노하우(know how) 없이 이루어지기는 매우 힘들며, 더욱이 나라의 경제 및 공업단지의 규모가 광대하기 때문에 이것을 시정을 하려고 하면 최소한 10

년 이상의 기간을 필요로 할 것이다. 국가와 국민이 힘들여 경제를 발전시켰지만, 행정가나, 과학을 다루는 모든 사람들의 무관심 내지 환경교육이 전혀 없었다는 것이 가장 큰 실책이라 하겠다. 환경기술은 다른 새로운 분야가 아니며, 기존의 과학기술과 환경에 적게 피해를 주는 방법을 늘 생각하고 교육하면서 실천에 옮기는 것이 가장 뛰어난 환경기술이다. 나아가 새로운 공정방법을 늘 생각하며 무공해와 저공해 방법의(clean technology) 개발에 학교교육의 우선순위를 두어야 한다. 한 명의 공학도로서 너무나 무시된 환경공학에 의한 교육으로 이렇게까지 악화된 환경에 책임을 동감할 뿐이다. 하지만 지금이라도 우리 공학도가 모든 공정과정(end of the pipe technology)과 무공해(clean technology)에 신경을 쓰면 우리가 1980년대에 이룬 경제성장 못지 않게 환경을 개선할 수 있다고 생각된다. 지금까지 기술한 분진, 가스 제어기술은 하나의 예로 늘 환경공학에 이용될 수 있는 기본 원리를 이야기한 것이며 이것이 바로 환경공학, 환경기술의 기초라고 생각된다. 끝으로 당부하고 싶은 것은 환경학과를 창설하는 것이 공해를 해결하는 것이 아니라 환경을 교육하여 누구에게나 환경철학 내지 환경의지를 가르키는 것이 21세기의 환경관세(green round)에 대처하는 가장 현명한 정책이라 생각된다. 