

# 배연가스 정화기술동향



김 용 진

(KIMM 열유체시스템연구부)

- '79~'83 부산대학교 기계공학과(학사)
- '84~'86 한국과학기술원 기계공학과(석사)
- '86~'91 한국과학기술원 기계공학과(박사)
- '91~'93 한국기계연구원 기계부품연구부 공조기기실  
선임연구원
- '94~현재 한국기계연구원 선임연구원



염 한 길

(KIMM 열유체시스템연구부)

- '86~'90 인하대학교 항공공학과(학사)
- '90~'92 인하대학교 항공공학과(석사)
- '92~'93 한국기계연구원 기계부품연구부 공조기기실  
연구원
- '94~현재 한국기계연구원 연구원

## 1. 서 론

일반적으로 대기오염이라함은 대기중에 매연, 먼지, 기체상 물질, 악취 등의 오염물질이 인간의 건강과 재산, 동식물과 생활환경에 피해를 줄 정도로 단위용적당 다량 존재하는 상태를 말한다. 그러나 대기오염의 정의는 국가, 단체 또는 학자 간의 견해에 따라 약간의 차이가 있으며 미국보건성에서는 “인위적 또는 자연적으로 발생한 물질이 개인의 쾌락과 안전 또는 건강을 손상하거나 재산을 만족하게 사용하는 것을 방해하기에 충분한 농도로 존재하는 것을 말한다.”라고 정의하고 있다. 대기오염의 대부분은 석탄이나 석유 등의 연소과정에서 발생하여 대기중에 확산하면서 1차 오염을 일으키고, 1차오염물질들이 화학반응을 통해 2차오염물질을 생성, 오염을 가중시킨다. 따라서 각종 산업체의 크고 작은 버어너, 자동차 엔진 등에서 발생하는 배연가스를 어떻게 정화하느냐가 쾌적하고 깨끗한 대기환경보전을 위한 관건이 된다. 이에 여러 가지 배연가스 정화기술을 소개함으로써 최신 기술동향을 파악하고 과제도출의 계기를 마련하고자 한다.

## 2. 배연가스에 의한 오염물질의 성상

배연가스로 인한 대기오염물질은 크게 입자상 물질과 기체상 물질로 구별할 수 있다.

### 2.1 입자상 물질

- 1) 매연(smoke) : 불완전 연소시 생성된 검은 탄소입자(0.01~1.0 $\mu$ m)

- 2) 혼연(fume) : 기체상태로부터 응축된 고체입자
- 3) 미스트(mist) : 비교적 큰 물방울 입자가 묽은 상태로 분산되어 있는 액체입자
- 4) 안개(fog) : 미세한 물방울이 공기중에 떠 있는 현상(습도 70~100%)
- 5) 연무(haze) : 아주작은 다수의 건조 입자가 대기중에 떠 있는 현상(습도 70%이하)
- 6) 검댕(soot) : 불완전 연소로 생성된 타르에 젖은 탄소덩어리
- 7) 먼지(dust) : 1 $\mu$ m 이상의 고체입자로 정전기력에 의하지 않고는 응집하려는 경향이 없다.
- 8) 분진(particulate) : 액체 또는 고체의 작은 알갱이로 강하분진, 부유분진 등이 있다.
- 9) Aerosol : 기체 매질속에 매우 작은 크기의 고체 혹은 액체 입자가 분산되어 있는 상태
- 10) 비산재(fly ash) : 연소로 발생된 배기가스 속에 들어 있는 미세 분말로 된 재

### 3. 배연가스에 대한 대기오염 발생 및 제어

대기오염을 일으키는 가스의 종류는 다양하나 대부분의 경우 대기내에 존재하는 양이 적고, 대기중으로 확산, 소멸되므로 문제가 되지 않으나 몇몇 종류의 물질, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO, 미연탄화수소(unburned hydrocarbon)과 분진 등이다. 발전용 열기관으로부터는 주로 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO, 분진 등이 자동차 엔진에서는 NO<sub>x</sub>, CO, 미연탄화수소, 분진 등이 발생한다. 대부분의 SO<sub>x</sub>는 열기관에서 사용되는 황성분이 포함된 저급의 연료(석탄등)가 연소과정을 통해 SO<sub>x</sub>로 변환되어 대기로 배출된다. NO<sub>x</sub>는 대기중의 연소과정에서 질소와 산소가 결합하여 배출되는 thermal NO<sub>x</sub>와 연료자체에 포함된 질소화합물이 대기중의 산소와 반응하여 배출되는 fuel NO<sub>x</sub>로 구분되는데 이는 열기관의 형태에 관계없이 배출되고 있다. 자동차의 배연가스중에는 발전용 열기관에 비해 CO나 미연탄화수소가 많은데 이는 구조상으로 내연기관의

### 2.2 기체상 물질

성분	공기속함량	오염발생원	오염형태	인체영향	위험 및 치사량
SO <sub>2</sub>	0-1 ppm	석탄석의 연소 제련공장	태양광선 영향으로 SO <sub>3</sub> 로 산화되어 수분과 결합 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 로 변합	호흡기질환 환경부식	50-400ppm
NO <sub>2</sub>	0-0.2 ppm	자동차 가속과 고온연소	탄화수소와 반응하여 광화학 smog 현상 유발	시정감소	40-500 ppm
CO <sub>2</sub>	330 ppm	연료의 연소	연소과정의 최종물질	온실효과등 이상기온	
O <sub>3</sub>	0.01-0.04 ppm	NO <sub>2</sub> 와 유기물이 태양광선에 의해 O <sub>3</sub> 생성 (광화학반응)	매연 및 탄화수소와 반응하여 Pan이라는 자극성 물질 생성	기관지천식 고무부식	0.8-9 ppm
HC		자동차 감속 가스나 휘발유 유출	질소산화물과 반응하여 광화학 smog 현상유발	시정감소 불쾌감	
CO		주택난방 자동차배기	혈액속의 산소운반 능력 박탈 연소가스의 중독	두통, 호흡 곤란, 질식	100-2000 ppm
H <sub>2</sub> S		석유정제공장 고무공장	연소과정에서는 배출되지 않는다.	악취, 물건 변색	

연소효율이 상대적으로 좋지않기 때문이다. 발전소에서 배출되는 분진은 무기물등의 불연소재들이 주성분이 되고 자동차의 경우는 불완전연소에 의한 soot가 주성분이 된다. 이와같이 발생된 오염원은 곧바로 대기중으로 확산되는 과정에서 일부 자연적으로 제거되기도 하고 반대로 대기중에서 물리화학적으로 변형을 일으켜 2차오염물질을 발생시키기도 한다. 광학적 스모그(photochemical smog)는 이런 2차오염물질의 대표적인 예로 대기중에 배출된 탄화수소가 대기중의 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>와 결합하여 2차오염물질을 생성시키는 것으로 여기에는 태양에너지가 반응을 활성화시킨다.

### 3.1 유해가스 제어기술

#### 3.1.1 NO<sub>x</sub> 제어

NO<sub>x</sub>는 연소과정을 통해 대기로 배출되는 대표적인 유해가스로 반응과정을 해석함으로써 제어 방법을 설정하고자 한다. 연소과정을 통해서는 NO와 NO<sub>2</sub>가 발생되는데 연소과정 자체에서는 대부분 NO의 형태로 배출되고 대기중에서 산소와 결합하여 화학적으로 더 안정된 NO<sub>2</sub>로 변환되며 이러한 일련의 과정을 거쳐 생성된 질산화물을 thermal NO<sub>x</sub>라 한다. Thermal NO<sub>x</sub>의 그 발생이 온도의 지배적인 영향을 받고 있기 때문에 연소기의 적절한 설계나 운전을 통해 배출되는 thermal NO<sub>x</sub>의 양을 대폭 줄일 수 있다. Fuel NO<sub>x</sub>는 연료중에 유기체 형태로 존재하는 질소가 연소과정에서 산소와 결합하여 생성된 질산화물로 주로 석탄이 연소할 경우 많이 발생된다. Fuel NO<sub>x</sub>는 thermal NO<sub>x</sub>와는 달리 온도 영향보다는 연소당량비(combustion stoichiometry)에 영향을 받는다. NO<sub>x</sub>를 제거하는데 가장 널리 사용되는 방법은 연소기의 적절한 변형을 통해 연소조건을 조절하는 방법으로 다음과 같은 방법이 있다.

- 1) 저과잉공기연소(low excess air)
- 2) 다단연소(staged combustion)
- 3) 배연가스 순환(flue gas recirculation)
- 4) Low NO<sub>x</sub> burner 사용

이와같은 방법은 연소가 일어나는 시점에서 산소의 농도가 부족한 분위기를 만들어 질소와 산

소의 접촉기회를 적게 함과 동시에 온도를 저감 시킴으로써 NO<sub>x</sub>의 발생을 줄이는 방법들이다. 즉 thermal NO<sub>x</sub>의 생성은 온도에 지배적인 영향을 받고 fuel NO<sub>x</sub>는 반응시 연소당량에 지배적으로 영향을 받기 때문에 열기관의 연소온도를 낮춤과 동시에 적절한 반응비에서 연소가 일어나도록 설계하면 NO<sub>x</sub>의 배출을 줄일 수 있게되는 것이다. 그림 1은 미분탄(pulverized coal)을 연료로 사용하는 low NO<sub>x</sub> burner의 개략도로 주 연소영역에서 fuel-rich 상태를 유지시켜 연료속에 있는 질소화합물을 산소와 반응 후 2차연소를 시키는 것으로 fuel NO<sub>x</sub>와 thermal NO<sub>x</sub>의 발생을 동시에 억제할 수 있다.

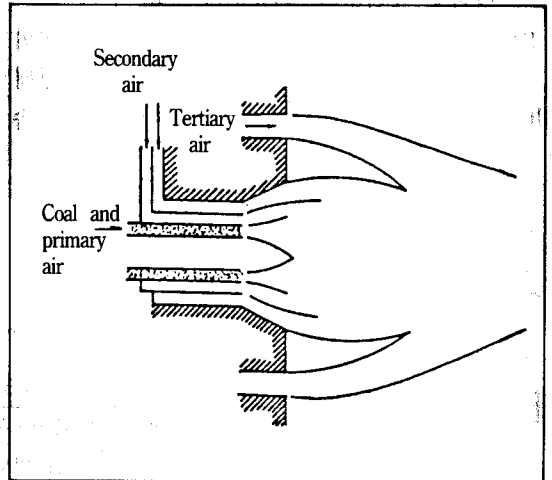


그림 1. Low NO<sub>x</sub> Burner의 개략도

또한 미국의 Exxon사에서 개발된 SNR(Selective Noncatalytic Reduction)법은 배연가스를 처리하기 위해 암모니아를 주입하는 방법이다. 이는 질소가 산소에 비해 암모니아와 더 쉽게 결합하는 성질을 이용하여 NO<sub>x</sub> 발생을 억제하는 것으로 효율은 매우 좋으나 암모니아에 의한 2차오염 등의 문제가 있어 응용에 제한이 되고 있다.

#### 3.1.2 SO<sub>x</sub> 제어

대기중의 SO<sub>x</sub>는 연료에 포함되어 있던 황이 연소과정을 통해 대기로 배출되는 것과 황을 사용하는 화학공정에서 배출된 것으로 크게 나누어진다. 석탄이나 중유 등에는 화합물의 형태로

흔히 존재하는데 연소과정을 통해 대부분 SO<sub>2</sub>로 변환되어 대기로 배출된다. SO<sub>2</sub>의 일부는 SO<sub>3</sub>로 변환되어 응축되면 물과 결합하여 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)을 만들므로 산성비나 열기관 부식 등의 심각한 문제를 발생시킨다. 화력발전소와 같은 대형 열기관에서 발생하는 SO<sub>x</sub>는 조업여건에 따라 다양한 형태의 제어장치를 통해 제거된다. 처리시점을 기준으로 전처리방식과 후처리방식으로 나눌 수 있는데 전처리방식은 연료에 직접 황화합물을 제거할 수 있는 반응제를 혼합하여 연소 후 발생하는 재와 함께 황을 제거하여 배연가스에 포함될 수 있는 SO<sub>x</sub>를 제어하는 방법이다. 후처리 방식은 대규모 열기관에서 효율적으로 SO<sub>x</sub>를 제거하는 방법으로 가성소다(NaOH)와 같은 알칼리성 화합물로 중화처리 하거나 석회석(lime)과 같은 고형 화합물에 흡수시켜 처리하는 것으로 다음과 같은 반응을 거쳐 CaSO<sub>3</sub>, CaSO<sub>4</sub>와 같은 침전물을 생성시킨다.

- SO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O ↔ H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> ..... absorption
- CaCO<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> → CaSO<sub>3</sub> + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O ... neutralization
- CaSO<sub>3</sub> + 1/2O<sub>2</sub> → CaSO<sub>4</sub> ..... oxidation
- CaSO<sub>3</sub> + 1/2H<sub>2</sub>O → CaSO<sub>3</sub>(1/2H<sub>2</sub>O) ..... crystallization
- CaSO<sub>4</sub> + 2H<sub>2</sub>O → CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O ..... crystallization
- CaSO<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> → Ca(HSO<sub>3</sub>) ..... ph control

석회석을 이용한 탈황시설의 핵심은 scrubbing tower로 탑내에서 배연가스와 화합물의 접촉면적을 최대로 할 수 있는 설계기술과 황과의 반응제 선정이 탈황성능의 관건이 된다. 이러한 탈황시설에는 다음과 같은 것이 있다.

- 1) Lime flow gas desulfurization(FGD) process  
 석회가루를 slurry로 제조한 뒤 scrubbing tower내에서 분사시켜 배연가스 내의 SO<sub>x</sub>와 반응하게 하는 방법으로 90% 이상의 제거 효율을 나타낸다. SO<sub>x</sub>와 반응한 sludge는 여과탈수하여 2차오염방지 시설이 완비된

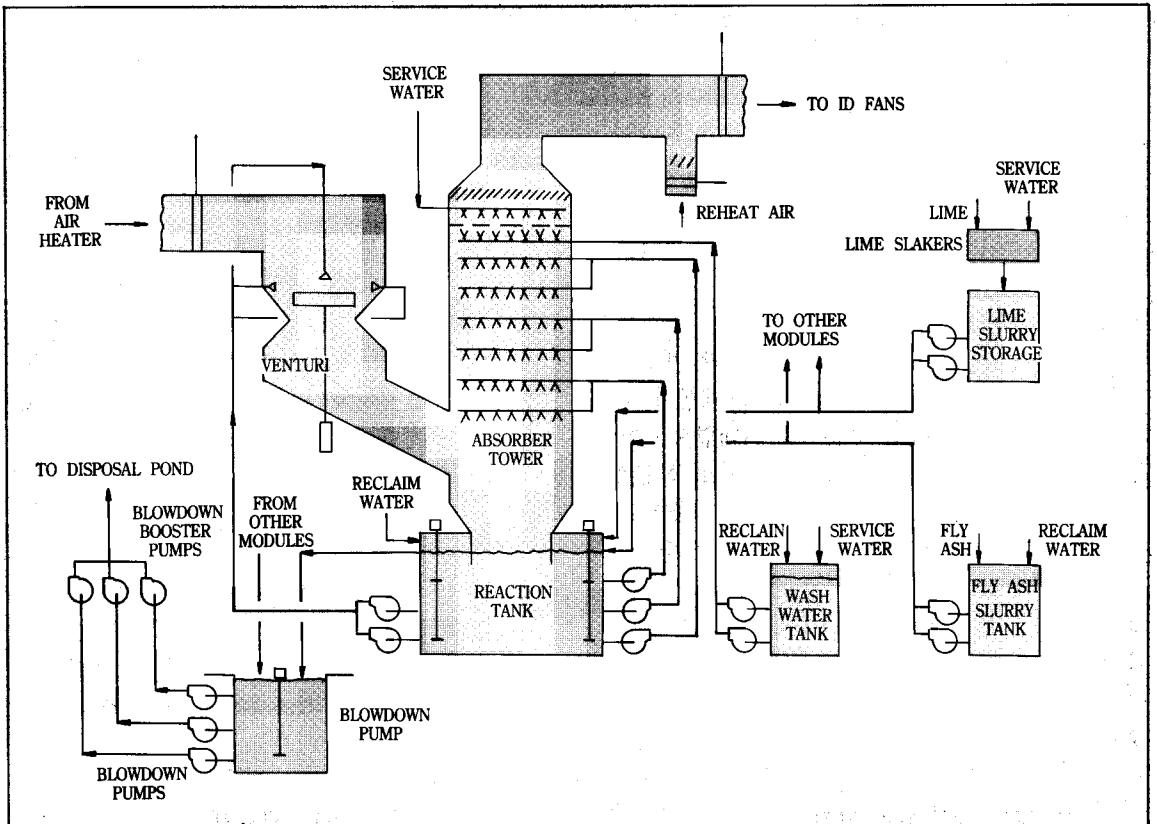


그림 2. Lime/Limestone FGD system

장소에 매립, 처리한다.

2) Limestone FGD process

Lime FGD process와 원리 및 운전방법이 유사하다. 석회분(lime powder)대신 석회석을 사용하므로 별도의 분해장치가 추가로 설치된다. 제거효율은 lime FGD process와 같은 90% 이상이다.

3) Dual alkali process

SO<sub>x</sub>를 직접 lime과 반응시키는 대신 가성소다(NaOH)용액을 세정탑 내에서 분사시켜 SO<sub>x</sub>와 반응하게 한뒤 SO<sub>x</sub>와 반응한 가성소다 용액을 별도의 장소에서 lime과 반응시켜 SO<sub>x</sub>를 흡수한 뒤 흡수한 lime을 폐기하는 방법으로 slurry 전달장치가 필요없고, NaOH 수용액은 재생하여 다시 사용할 수 있다. SO<sub>x</sub> 제거효율은 80~95% 정도이다.

4) Dry removal process

세정탑에서 건조된 처리물이 나오는 장치의 통칭으로 습식에 비해 몇가지 장점을 지닌다. 첫째, sludge등을 처리하는 장치가 필요없고, 부식등에 의한 장치의 손실이 상대적으로 적다. 둘째로, SO<sub>x</sub> 처리 후 발생하는 오염 폐기물의 양이 적어 후처리 비용이 줄어든다. 또한 에너지 소비율이 습식의 25~50% 정도에 지나지 않는다. SO<sub>x</sub> 제거효율은 1000~2000ppm의 SO<sub>2</sub>에 대해 60~90% 정도이다.

5) Fluidized bed FGD process

Lime을 유동층으로 만들어 SO<sub>x</sub>의 반응을 촉진시키는 장치로 사용영역에 제한이 많으나 lime과 SO<sub>x</sub>의 접촉면을 최대한으로 할 수 있는 장치이다. 아직 초기단계로 산업적 응용을 위해 광범위한 연구가 진행중이다.

이밖에 화학적으로 SO<sub>x</sub>를 효율적으로 흡수시킬 수 있는 화합물질들이 다양하게 개발되고 있는데 최근에는 산화구리(CuO)를 기본물질로 하는 흡수제를 사용하여 SO<sub>x</sub>나 NO<sub>x</sub>를 동시에 제거하는 기술이 보고되고 있다. 이와같은 화학적 흡수법과는 별도로 기체의 분자나 원자가 고체에 달라 붙는 성질을 이용하여 오염된 가스를 처리하는 흡착법이 있다. 흡착법은 악취제거나 오염가스가 회수가치가 있는 경우에 주로 이용되는데 흡착

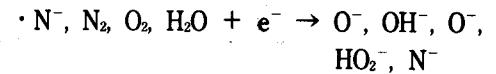
제로는 활성탄, 실리카겔, 활성알루미나, 합성제올라이트 등이 있다. 흡착법의 특징은 오염물의 농도가 극히 낮더라도 일정한 흡착제를 사용하면 선택적으로 오염물질을 제거할 수 있다.

3.1.3 플라즈마 SO<sub>x</sub>/NO<sub>x</sub> 동시제어

플라즈마 반응로에서 일어나는 SO<sub>x</sub>/NO<sub>x</sub> 제거 반응은 약 1~2초 사이에 160여개의 반응이 연쇄적으로 일어난다. 매우 짧은 시간에 많은 라디칼들이 생성, 반응, 소멸되므로 해석에 많은 어려움이 있어 정확한 반응경로는 아직 밝혀지지 않고 있다. 일반적으로 SO<sub>x</sub>는 thermal reaction과 irradiation의 두 경로를 통해 제거되며 NO<sub>x</sub>는 irradiation에 의해서만 제거된다고 알려져 있다. Thermal reaction은 SO<sub>x</sub>와 중화제간의 반응이며, irradiation은 플라즈마 생성에 의해 일어나는 반응이다. SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>가 irradiation에 의해 제거되는 반응경로는 간단히 다음과 같이 나타낼 수 있다.

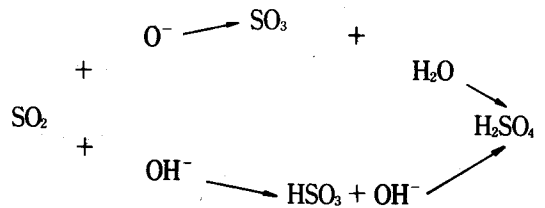
1) Radical의 생성경로

배연가스 성분중 질소, 산소, 수분 등은 전자와 충돌, 활성화되어 OH<sup>-</sup>, O<sup>-</sup>, HO<sub>2</sub><sup>-</sup> 등의 라디칼을 생성한다.



2) SO<sub>2</sub>의 생성 및 황산의 생성

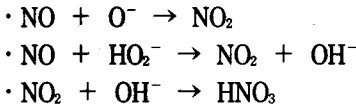
SO<sub>2</sub>는 두 경로의 산화반응을 통해 황산을 생성한다. 즉, O<sup>-</sup> 라디칼과 반응하여 SO<sub>3</sub>를 생성한 후 수분과 반응을 통해 황산을 생성하는 경로와 OH<sup>-</sup> 라디칼과 반응하여 HSO<sub>3</sub>를 생성한 후 OH<sup>-</sup> 라디칼과 반응하여 황산을 생성하는 경로이다.



3) NO<sub>x</sub>의 산화 및 질산생성

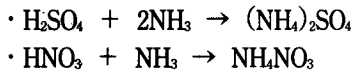
NO는 OH<sup>-</sup>, HO<sub>2</sub><sup>-</sup> 라디칼과의 반응을 통해 NO<sub>2</sub>를 생성한다. 이어서 NO<sub>2</sub>와 OH<sup>-</sup>가 반

용하여  $\text{HNO}_3$ 를 생성한다. 여기서  $\text{OH}^-$  및  $\text{HO}_2^-$  라디칼은 수분으로부터 생성되는 것이므로 수분의 함량을 최적으로 유지하는 것이 매우 중요하다.



4) 부산물 생성반응

$\text{SO}_2$ 와  $\text{NO}$ 는 각각 황산과 질산으로 변환된 후 중화제인 암모니아와 중화반응을 통해 부산물인  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 를 생성한다. 황산암모늄, 질산암모늄은 크기가 수십  $\mu\text{m}$ 인 고체 미립자 상태로 생성된다. 부산물은 중화반응과 균일기상화학반응(homogeneous chemical vapor deposition)의 두 반응을 통해 생성된다. 즉, 부산물은 먼저 기체상태의 중화반응을 통해 생성되고 부산물의 농도가 높아짐에 따라 과포화도도 증가한다. 포화도가 일정치를 초과하면 핵생성과정을 통해 고체입자로 생성된다.



5) 부산물 포집

반응부산물로 생성되는 고체상태 미립자는 baghouse를 이용하여 포집한다. 전기집진기를 사용하여 포집하는 경우도 있으나, baghouse의 경우 bagfilter가 미반응 물질들의 반응표면적을 제공하여  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  제거효율을 향상시키므로 주로 이용되고 있다. 포집된 미립자는 granulator를 이용하여 비료입자로 전환시켜 제품으로 제조된다. 이렇게 제조된 비료는 사용가능한 품질을 나타내는 것으로 보고되어지고 있다.

3.1.4 CO 및 탄화수소의 제어

CO는 불완전한 연소에 의해 배출되는데, fuel-rich 상태의 연소조건이 지속되거나 연소진행 단계에서 냉각이 이루어질 경우 배출량이 많아진다. 내연기관에서 배출되는 CO는 연소가 단시간에 이루어져 산소와 접촉할 충분한 시간을 갖지 못하기 때문이다. 내연기관 연소에서 CO는 탄화수소

계통의 연료와 산소가 결합하여  $\text{CO}_2$ 와  $\text{H}_2\text{O}$ 를 생성하는 화학반응의 중간생성물로 산소와의 반응시간이 부족할 경우 그대로 대기중에 배출된다. 이런 현상은 엔진의 고부하시 두드러지게 나타난다. 실린더 내에서 빠르게 진행되는 화염은 실린더 벽 근처에서는 벽면에 의한 냉각효과로 더 이상 연소가 진행되지 못하는 미연소 영역 즉, quench layer를 발생시켜 CO의 배출 상승과 미연탄화수소의 배출 원인이 된다.(그림3) CO와 미연탄화수소 배출의 저감 대책은 에너지절감의 문제와 직접적으로 연결이 되는데 연소가스 재순환등의 기법을 사용하여 해결이 가능하다. 결론적으로 탄화수소계통의 연료를 사용하는 열기관에서 CO의 배출과 미연탄화수소의 배출은 연소조건을 개선함으로써 억제할 수 있다.

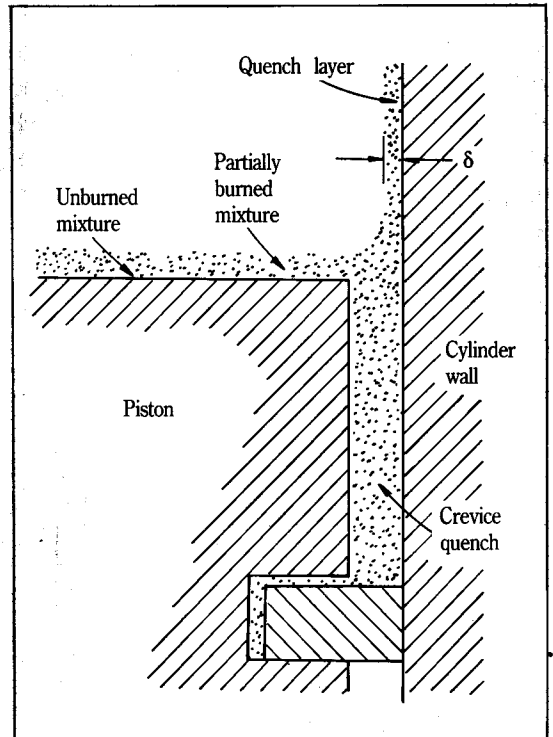


그림 3. 실린더 내에서의 Quench Layer

대기중에 배출되는 탄화수소계통의 기체는 광학적 smog의 원인이며, 중독성 냄새를 발생시킨다. 휘발성 용제를 사용하는 산업시설로부터 대기중에 배출되는 탄화수소는 주로 소각을 통해 제어한다.

이밖에 탄화수소계통의 기체를 제어하는 방법으로 활성탄과 같은 흡착제를 사용하는 흡착법이 사용되기도 한다.

### 3.2 분진제어기술

대기중에 존재하는 분진은 연소과정이나 기계 가공 등을 통해 발생하는 것과 대기중에 존재하는 오염 가스들로부터 2차변환이 이루어져 발생하는 분진이 있다. 분진의 제어를 위한 기술적용은 분진입자의 크기에 따라 달라진다.  $0.1\mu\text{m}$  이하의 입자는 확산운동에 절대적인 영향을 받고  $1.0\mu\text{m}$  이상의 입자들은 관성의 영향이 지배적이다. 이러한 현상은 그림 4에 보는 바와 같이 실린더형 통로에 여러 크기의 입자를 공기에 실어보내면 확산운동 및 관성의 영향으로 입자크기별로 벽면에 부착율이 달라진다. 이러한 결과로 대기중의 부유분진의 평균적인 입자분포를 예측할 수 있다. 즉, 그림 4에 포집효율이 낮은 크기의 입자들의 대기중 농도가 높게 나타나는 것이다.  $0.1\mu\text{m}$  보다 작거나  $1.0\mu\text{m}$  보다 큰 입자의 분진은 섬유필터를 이용해 효율적으로 제거할 수 있고, 보다 큰 입자들은 원심분리법을 이용하는 사이클론을 이용하여 제거할 수 있다. 그러나 이러한 방법으로는  $0.1\mu\text{m}$ 에서  $1.0\mu\text{m}$  사이의 분진은 제거되기 힘들다.

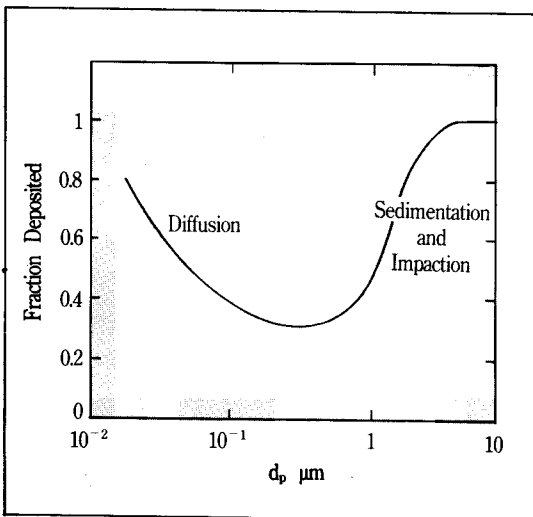


그림 4. 실린더형 통로를 지나는 입자의 흡착효율

따라서 이런 중간크기의 입자를 제거하기 위해서는 전기집진기(electrostatic precipitator)를 이용한다. 전기집진기는 1차로 제어대상 분진에 임의의 일방향성의 전하를 부가시키고 2차적으로 이 전하를 띤 분진입자를 전기장이 설정된 영역안으로 보내 전기장이 걸린 집진판에 부착시켜 분진을 제거한다.

#### 3.2.1 침강집진기(중력집진기)

침강집진기의 중력을 이용하여 처리가스내의 분진을 제거하는 것으로 원리와 구조가 간단하고 설치가동비가 저렴하여 압력손실도 적은 편이다.

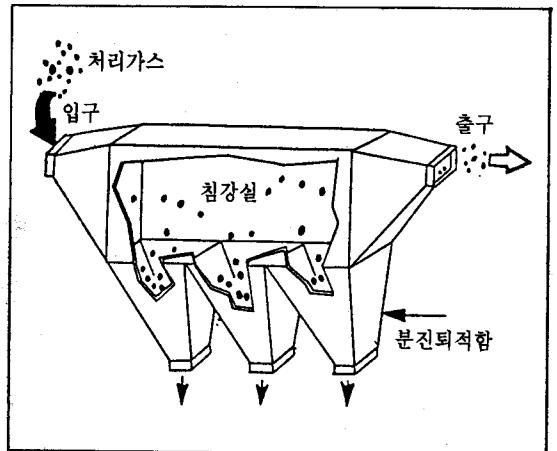


그림 5. 침강집진기의 개략도

모양과 구조에 따라 다음의 3가지로 분류할 수 있다.

- 1) 단순팽창식 침강집진기  
입구로 유입된 가스가 확장부(팽창실)에 들어오면 유속이 감소되어 처리가스내의 분진은 중력에 의해 아래로 포물선운동을 하면서 침강, 분진퇴적함으로 집진된다.
- 2) 하워드 침강집진기  
단순팽창식의 팽창실내에 몇 개의 평판을 처리가스 이동방향과 수평으로 장치, 팽창실을 구획화하여 침강에 필요한 수직거리를 감소시켜 집진효율을 높인 것이다.
- 3) 층돌 침강집진기  
중력뿐만아니라 관성력과 층돌을 동시에 작용시켜 집진한다. 층돌효과를 이용하기

위한 배플(baffle)의 사용으로 압력손실이 다른 침강집진기에 비해 다소 커지지만 보통 10~20 $\mu\text{m}$  입자의 집진이 가능하다.

### 3.2.2 원심력집진기(cyclone)

적은 비용으로 효과적인 집진이 가능하며 대기오염방지기로 널리 사용된다. 처리가스를 사이클론의 입구로 유입시켜 선회류를 형성시키면 가스내의 크고 작은 분진이 원심력에 의해 집진기 본체 내벽에 충돌하여 중력에 비해 아래로 침강, 집진된다. 이와같이 사이클론은 원심력과 중력의 동시 이용과, 가동부(moving part)가 없는 것이 특징이다. 치수비가 작아질수록 집진효율은 증가하나 압력손실은 커지고 처리가스량이 제한된다. 따라서 사이클론을 직렬 또는 병렬연결함으로써 효과적으로 집진효율을 높일 수 있다.

#### 1) 원심력집진기의 직렬연결

몇 개의 사이클론을 차례로 놓고 전단사이클론의 출구를 후단사이클론의 입구에 연결시킨 것으로 후단으로 갈수록 미세 입자가 제거된다. 시멘트, 철강, 아스팔트 제조업소에서 입경 20 $\mu\text{m}$  이상의 분진제

거에 많이 사용된다.

#### 2) 멀티클론(원심력집진기의 병렬연결)

병렬연결에서는 연결되는 단위원심력집진기의 입구에 처리가스를 균일한 분포로 공급하는 것이 중요하다. 이를 위해 공통프레넘(common inlet plenum)을 설치하여 작은 압력손실로 다량의 가스를 처리한다. 멀티클론을 구성하고 있는 단위원심력집진기의 압력손실이 각각 다르면 처리가스 유입시 채널(channel)현상이 발생하여 성능이 저하되므로 주의해야 한다. 또 다른 방법으로 접선충돌형 입구를 가진 개별원심력집진기를 병렬연결하는 것이 있는데, 압력손실은 작아지고 효율은 증대된다.

#### 3) 로타리스트림집진기(rotary stream dust separator)

원심력과 세정원리를 이용한 집진장치로 처리가스는 유입구와 도바스(dabbas)를 통해 몸통내로 유입된다. 유입된 가스내의 분진은 内外선회류사이에서 농축되어 가스유입구와 몸통사이의 環狀공간인 립(lip)으로 침강하여 분진퇴적함에 퇴적한다.

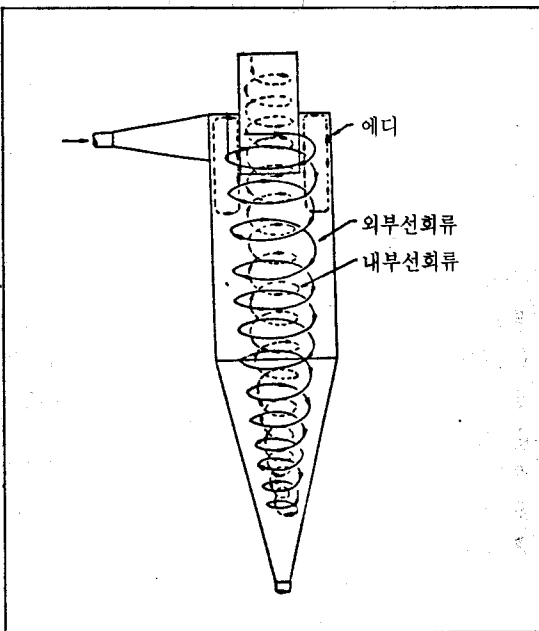


그림 6. 원심력집진기의 선회류 및 에디

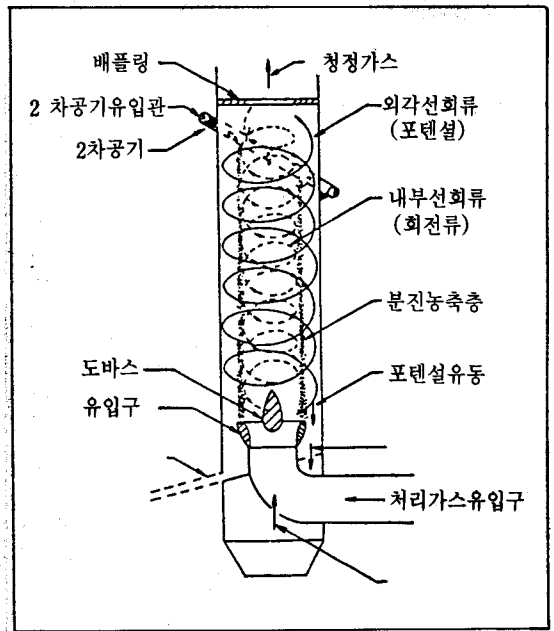


그림 7. Rotary Stream Dust Separator



### 3.2.3 전기집진기

전기집진기는 정전력(靜電力)을 사용하여 입자를 집진하는 장치로 방전극(discharge electrode), 집진극(collection electrode), 타봉(rapper), 호퍼(hopper)로 이루어진다. 방전극은 가는 선(wire)으로 코로나방전을 일으켜 처리가스를 이온화하여 분진을 음극으로 충전(充電)시키는 한편 전장(electric field)를 만든다. 집진극은 원통 또는 판상으로 양극으로 충전되며 방전극에서 충전된 입자를 집진한다. 타봉은 전극에 충격 또는 진동을 주어 집진극 위에 부착된 분진을 털어내는 장치이다. 호퍼는 전기집진기하단에 설치되어 분진을 퇴적, 저장시킨다. 집진극과 방전극 사이의 전계강도를 조절하는 고압장치(high voltage equipment)는 전기집진기의 가장 중요한 부분으로 출력전압은 15~130kV, 전류는 60~95kA 정도이다. 전기집진기는 1.0 $\mu$ m 이하의 분진제거효율이 99%나 되며 다른 집진기에 비하여 압력손실이 적고 특히 동력손실이 상대적으로 작아 널리 사용되고 있다. 또한 처리가스량이 많고 고온(175~700 $^{\circ}$ C)에서도 성능에 전혀 영향을 받지 않아 350 $^{\circ}$ C이상의 고온가스를 배출하는 시멘트 소성로, 제철의 염기성 산성로(basic oxygen furnace) 등에 사용이 확대되고 있다.

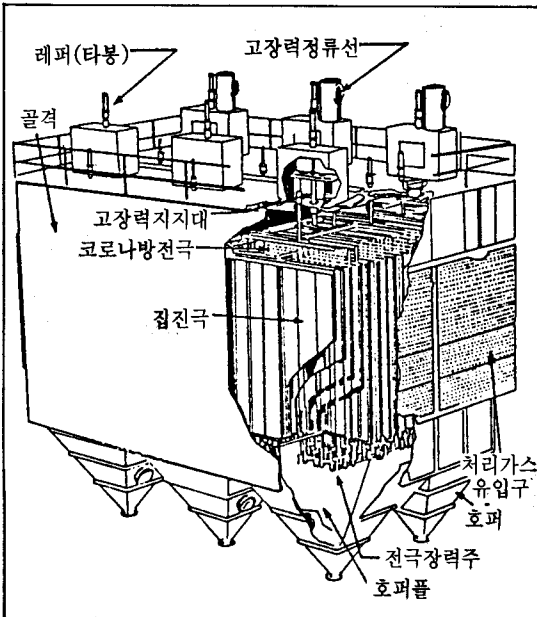


그림 8. 전기집진기의 구조

현재 사용되고 있는 집진기는 크게 고전압 단단전기집진기와 저전압 2단전기집진기로 구분할 수 있다.

#### 1) 고전압 단단전기집진기

집진극의 형태에 따라 원통, 판상전기집진기로 분류된다. 원통형은 집진극인 원통의 중앙에 방전극을 두며, 처리가스를 원통내부로 유입시킨다. 제거될 분진은 음전기로 대전되어 접지된 양집진극으로 이동, 포집된다. 판상형은 두 집진극 사이에 방전극을 설치하여 처리가스가 방전극을 통과할 때 음전기로 대전되어 집진된다. 고전압 단단전기집진기는 구조가 간단하고 성능이 우수하여 산업용 방지기계로서 시멘트 소성로, 크라프트 펄프의 흑액(黑液)연소, 제련 및 조각로의 분진제거에 많이 사용되고 있다.

#### 2) 저전압 2단전기집진기

공기조화용 공기정화기로 개발된 것으로 미세액적의 제거에 주로 사용된다. 접지봉과 방전극으로 구성된 이온화단(ionizing stage)에서 입자의 충전이 이루어지고 평판을 5cm 정도의 간격으로 평행하게 설치한 충전실이 있는 집진실(2nd stage)에서 액적을 집진하도록 되어있다. 저전압 2단전기집진기는 주로 혼연실(smoke house), 파이프 코팅, 아스팔트처리, 공기제조 및 고속연마기 등에서 발생하는 액상입자의 집진에 사용하고 있다.

### 3.2.4 여과집진기

여과집진기는 처리가스내의 분진이 여과섬유를 통과할 때 여재를 구성하는 섬유와 분진의 입경(질량), 운동량에 따라 관성충돌, 직접차단, 확산, 중력 및 정전기력에 의해 부착되어 가교형성(bridge) 및 일차층(一次層)을 형성하여 집진이 이루어진다. 입경 1.0 $\mu$ m 이상의 분진은 99% 이상이 관성충돌과 직접차단에 의해 0.1 $\mu$ m 이하 분진은 확산에 의해 포집된다.

여과집진기의 핵심요소인 여과재는 제조방법에 따라 엮음여과재(woven filter)와 모전여과재(felted filter)로 구분된다.

1) 엮음여과재

섬유와 섬유사이에 구멍이 있으며 섬유간 격은 25~50 $\mu$ m 정도이다. 천을 짜는 방식에 따라 체크무늬 형태로 섬유를 위 아래로 한번씩 교대로 엮는 평직(plain)과 두번은 위로, 한번은 아래로 엮는 twill, 한번 위로 네번 아래로 엮는 sateen이 있다. 이 중 sateen이 가장 견고하고 치밀하여 미세입자의 포집에 효과가 크나 압력손실이 큰 단점이 있다.

2) 모전여과재

스크림(scrim)이라는 기초천 위에 바늘모양 섬유(담배필터)를 붙여 만든 것으로 엮음 여과재보다 2~3배 두껍다. 각 섬유는 가스

내의 분진과 직접 접촉할 수 있도록 배치하여 판성충돌 및 직접차단을 통해 포집한다.

3.2.5 세정집진기(scrubber)

세정집진기는 미세한 분진을 비교적 큰 직경(50~500 $\mu$ m)의 액적에 접촉, 충돌 흡수시킨 후 이들 액적을 중력집진기 및 원심력집진기로 제거하는 집진기이다.

세정이 필요한 에너지의 공급방법에 따라 다음과 같은 분류를 할 수 있다.

1) 기상상접촉세정기(gas phase contacting scrubber)

처리가스 접촉에 필요한 동력이 가스 자체에서 공급되는 것으로 처리가스를 세정액 표면이나 단면에 작용시켜 세정액을 액적으로 응축시켜 원심력에 의해 분리, 집진한다. 이와같은 세정기에서는 액적을 만드는 응력이 가장 중요한 요소로 응력을 만드는 방법에 따라 판상세정기, 오리피스세정기, 벤츄리세정기 등으로 구분한다.

2) 액상접촉세정기(liquid phase contacting scrubber)

특수설계된 노즐을 사용하여 고압의 액체를 분사, 액적을 생성시킨 후 송풍기를 이용 집진실로 보내 가스를 처리한다. 액적의 형성방법에 따라 직접 액적을 형성하는 살수탑(spray tower), 이젝터벤츄리(ejector ventury) 등과 오리피스나 노즐을 사용하여 흡진액을 충전재표면 또는 판에 분사하여 액적을 만드는 것으로 구분할 수 있다.

3) 액상기상접촉세정기(liquid phase/gas phase contacting scrubber)

현재 사용되는 세정기의 대부분을 차지하는 것으로 처리가스와 세정액으로부터 에너지를 얻어 가동한다. 구조에 따라 원심력살수세정기(cyclone spray scrubber), 이동상세정기(moving bed scrubber), 배폴살수세정기(baffle spray scrubber) 등으로 나눌 수 있다.

4) 콤비네이션세정기(combination device)

위에서 언급한 각종 세정기의 장점을 취합한 새로운 형태의 세정집진기

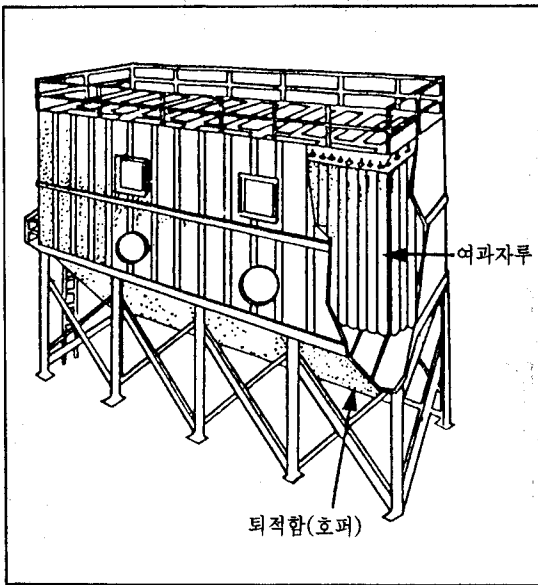


그림 9. 여과집진기의 구조

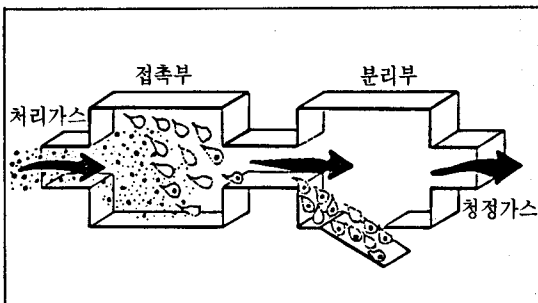


그림 10. 세정집진기의 가동원리

#### 4. 결 론

현재 사용중이고 개발중인 배연가스 정화기술의 원리 및 응용에 대해 대략적으로 살펴보았다. 기존의 오염제어기기들은 입자상 물질과 가스상 물질을 개별적으로 제어해 왔으나 최근에는 이들을 통합적으로 제어함으로써 장치의 효율을 극대화하고, 2차오염을 극소화하는 방향으로 개발 및 연구가 진행되고 있다. 오늘날의 환경문제는 국내적으로나 국제적으로나 시급하게 대처하지 않으면 안될 매우 중요한 과제로 대두되었다. 따라서 최근 전세계적으로 첨예화된 환경오염 문제를 해결하기 위하여 각국들은 이에 대한 기술 개발과 투자를 가속화시키고 있다. 환경문제의 해결은 특히, 우리나라와 같은 산업화를 급진적으로 이룬 국가들인 경우 국민보건 증진이라는 문제 뿐만아니라, 선진국들의 환경보호 정책을 앞세운 심각한 무역장벽을 탈피하기 위하여 중요하다. 따라서 향후 환경산업 및 시장의 규모는 21세기의 국제경제를 주도할 핵심 산업중의 한 분야가 될 것이다. 이 가운데 특히, 대기오염은 에너지 사용의 증가와 각종 산업활동으로 인해 문제가 매우 심각하며, 이에 대처하기 위하여 국내적으로는 대기오염 배출기준을 3단계 (1단계 : ~'94, 2단계 : '95~'98, 3단계 : '99~)에 걸쳐 매우 엄격하게 강화할 예정이 있으며, 이에 따른 고체 입자상 및 가스상의 환경오염물질을 제거, 처리하는 오염제어기기의 개발이 한층 가속화 될 것이다. 그리고 기존의 입자상의 분진을 제어하는 집진설비로 부터 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> 및 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 등의 기체상의 오염물의 배출을 처리할 수 있는

오염방지 시스템의 개발은 최근 동향으로 볼 때 매우 중요하며 시급히 이루어져야 할 과제이다. 현재 우리나라에서 외국과의 기술제휴에 의하여 도입되어 적용되고 있는 이러한 유해가스를 제거하는 습식 세정(scrubber) 시스템은 처리후 폐수/폐기물등의 2차오염물을 생성시키는 결정적인 부수문제를 유발하기 때문에 이를 다시처리 할 수 있는 대규모의 수처리 설비 시설로 인한 공간점유 및 설치원가의 상승 등의 문제를 수반한다. 따라서 폐수문제를 유발시키지 않고 장치를 간단화 할 수 있는 건식(dry) 시스템 및 시스템의 고효율화에 대한 연구가 본격적으로 시작되어야 할 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Clavert, S., and Englund, H. M., "Handbook of Air Pollution Technology", Wiley, New York, 1984.
- [2] Christopher Dickenson, FBIM, "Filters and Filtration Handbook.", Elsevier Advanced Technology, 1992.
- [3] 김종석, 조병향 공저 대기오염방지기술, 도서출판 동화기술, 1991.
- [4] Richard C. Flagan and John H. Seinfeld, "Fundamentals of Air Pollutio Engineering", Prentice Hall, Inc., 1988.
- [5] Arthur C. Stern, Richard W. Boubel, D. Bruce Turner, and Donald L. Fox, "Fundamentals of Air Pollution", Academic Press, Inc., 1984.