

건식세정기에서의 오염물 동시제거를 위한 고온3계평형 모델의 적용과 예비설계에의 응용

Application of High-temperature 3-phase Equilibrium Distribution to Dry Scrubber for the Simultaneous Removal of SO₂ and Vinyl Chloride

구자공 · 백경렬

한국과학기술원 토목공학과 환경시스템연구소
(원고접수 : 1990. 3. 2)

Ja-Kong Koo, Kyung-Ryul Baek

Environmental Systems Research Laboratory, Department of Civil Engineering
Korea Advanced Institute of Science and Technology
(Received 2 March 1990)

Abstract

Simultaneous removal efficiencies of hydrophilic and hydrophobic gaseous pollutants are experimentally determined, and the macroscopic removal mechanism of pollutants in a dry scrubber is analyzed using the extended model of three phase equilibrium distribution of pollutant at high temperatures that can describe the different morphological conditions of adsorbent and water at varying relative humidities.

For the simplicity, the inside of spray dryer is divided into three regions of ; (1) absorption, (2) three-phase equilibrium, and (3) adsorption, and the removal efficiencies of each pollutants at three regions are observed at different experimental conditions to estimate the effects of important parameters of dry scrubber.

The laboratory experiments simulate the three regions of spray dryer with the temperature control and thus evaporation rate of water from the slurry particle. SO₂ as a hydrophilic gaseous pollutant and vinyl chloride as a hydrophobic toxic gas are selected for the future field application to solid waste incineration, and the two types of slurry are made of the two sorbents ; 10 wt.% Ca(OH)₂, and 10 wt.% NaOH.

Result of temperature effect shows the height of absorption plus three-phase region is decreased as the operation temperature is increased, which results in the lower removal efficiency of SO₂ but higher removal for vinyl chloride in the adsorption region of dry scrubber.

The removal efficiency of SO₂ is higher by NaOH slurry than by Ca(OH)₂ slurry due to the hygroscopic nature of NaOH, while the removal of vinyl chloride is

higher in $\text{Ca}(\text{OH})_2$ case.

From the analysis of results using three-phase equilibrium distribution model, the effective two-phase partition coefficients can be obtained, and the possible extension in the application of the three-phase equilibrium model in a dry scrubber design has been demonstrated.

1. 서 론

화력발전소나 폐기물 소각로 등에서 사용되는 대기오염 방지장치 중 습식세정기(wet scrubber)는 입자상 물질과 가스상 물질 모두를 제거하는 효과가 있어서, 많은 경우 이 장치를 이용하고 있다. 그러나 이 장치는 발생된 세정액을 처리해야 하고, 산성 가스가 용해된 세정액에 의한 장치 부식의 문제가 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 건식세정기가 개발되었다.

건식 세정기는 배가스가 통과하는 파이프 내에 반응 물질을 분말 상태로 뿌려주는 건식 주입법과 소각로 내에 반응 물질을 넣어서 함께 연소시키는 방법, 그리고 분무 건조기를 이용한 방법 등으로 구분되는데, 본 연구는 분무 건조기를 이용하여 오염물질을 제거하는 방법에 대한 것이다.

분무건조기는 식품, 제약, 화학 공업 등에서 오래전 부터 많이 사용되어 왔으며, 오염물질 제거에 본격적으로 사용된 것은 1970년대부터이다. 분무입자와 가스와의 접촉에서 생기는 유체역학적 현상이나 열전달과 물질전달에 대한 연구^{1,2,3)}는 이미 많이 이루어졌으나, 이 분무건조기를 이용하여 오염물질을 제거하는 분야의 연구는 최근에 시작되어 아직 미약한 연구분야가 상당히 많다.

외국의 경우, 주로 화력발전소의 배가스 탈황(flue gas desulfurization) 시스템에서 많이 사용되고 있는데, 미국의 1987년도 배가스 탈황시설 중 약 5.7%가 분무건조기를 이용하고 있으며, 이의 이용이 점점 증가하는 추세에 있다⁴⁾. 최근 들어서는 일반 도시폐기물이나 유해 폐기물의 소각시에 발생하는 염화수소(HCl)나 SO_x 등의 산성가스와 유기성 가스인 dioxins, dibenzofurans, 그리고 중금속의 제거에 건식세

정기가 상당히 효과가 있는 것으로 밝혀졌다^{4,5)}.

이에 반해, 국내의 경우는 현재 분무건조기를 오염물질 제거에 사용하는 예는 거의 없으며, 이에 대한 연구도 아주 미비한 실정이다.

분무건조기를 이용한 건식세정기에 관한 연구에 있어서, 오염물질 제거기작 중 흡수와 흡착에 의한 산성 및 유기성 가스 동시제거와 그의 영향인자, 그리고 이러한 제거 현상을 해석하는 방법에 대해서는 아직 미흡한 단계이다.

본 연구에서는 산성 및 유기성 가스의 동시 제거 효율과 이의 영향 인자를 고찰하고, 이러한 현상을 3계 평형분포 모델을 이용하여 해석하고, 최종적으로 실제의 분무건조기를 이용한 건식세정기의 예비설계인자 도출을 목적으로 한다.

2. 이론적 고찰

본 장에서는 분무건조기에 대한 일반적 내용을 알아보고, 분무건조기의 내부를 분무입자의 모양에 따라 세영역으로 나누어 고찰하였다. 그리고, 각 영역에서의 오염물질 제거 기작인 흡수, 흡착, 그리고 이들의 중간 상태인 3계 평형과, 오염물 제거효율에 미치는 영향인자에 관해서도 고찰하였다.

2.1 분무건조기의 일반 이론

일반적으로 분무건조기를 이용한 건식세정기의 전체시스템은 그림 1에 나타난 것과 같다. 분무기에 의해 뿌려진 슬러리 상태의 분무입자는 고온의 배가스와 접촉함에 따라 함유한 수분이 증발하게 되고, 최종적으로 건조상태의 입자가 되어 입자-가스 분리장치에 의해 분리 제거된다.

슬러리의 분무는 주로 회전식 분무기(rotary atomizer)나 압력식 노즐(pressure nozzle)에 의해 이루어지며, 분무건조기의 전체 성능에

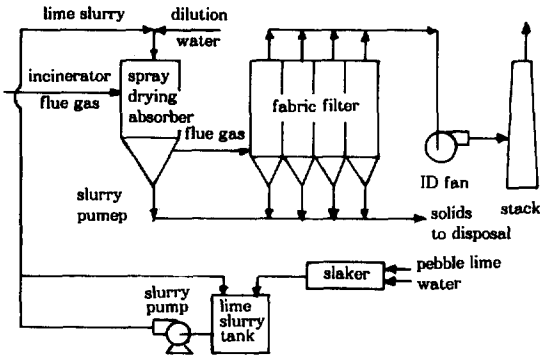


Fig. 1. Dry Scrubbing Process with Spray Dryer.

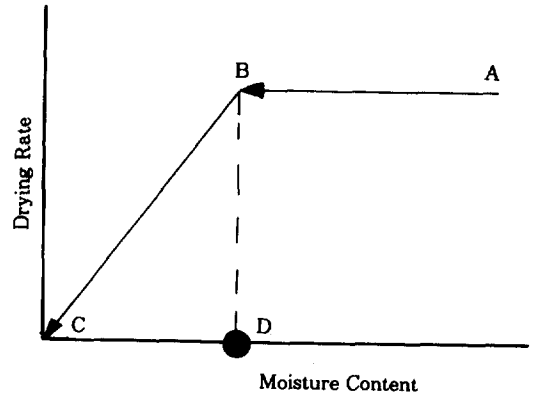


Fig. 2. Drying rate curve.

큰 영향을 미친다. 이 이유는 분무된 입자 크기의 분포는 분무기에 크게 의존하며, 입자 크기의 분포는 수분증발의 표면적을 결정하기 때문이다. 분무 입자의 크기가 작을수록 입자와 가스의 접촉면적이 증가하여 효율은 높아지겠지만, 반면에 최종 형성되는 분말 입자의 크기가 작아져 증력침강되는 부분이 적게 되어, 결국 입자-공기 분리장치의 용량이 커지는 단점이다.

분무 입자와 배가스의 흐름방향은 건조기 내의 유체역학적 현상과 분무입자 건조의 추진력(drawing force)에 영향을 미친다.

분무 입자와 배가스가 접촉하면, 입자 속의 수분은 증발하게 되며, 이때 분무입자의 수분함량에 따른 증발율의 변화는 그림 2와 같이 간단히 나타낼 수 있다. A-B 구간을 일정한 증발율구간(constant rate period), B-C 구간을 감소증발율구간(falling rate period)이라 하며, D를 임계수분 함량점(critical moisture content)이라고 하고, 이점 이후부터 증발율은 감소하게 된다.

또한, 건조한 입자는 1-20 μ m 정도이기 때문에 사이클론이나 증력침강으로는 충분한 분리가 어렵고 전기집진기나 여과포 장치가 효과적이다.

2.2 건식세정기 내의 오염물질 제거기작

분무건조기 내에서의 반응을 수분의 증발과 이에 의한 입자의 모양 및 반응의 형태에 따라 흡수, 3계 평형, 흡착의 세 영역으로 구분하여 고찰하였으며, 각 영역에서의 입자모양과 입자크기의 변화 및 주된 오염물제거기작을 그림 3에 나타내었다.

흡수영역에서는 산성가스의 흡수와 화학반응이, 흡착영역에서는 유기성 가스의 흡착과 화학반응이, 그리고 3계 영역에서는 분무입자의 수분함량에 따라 두가지의 현상이 모두 일어난다고 가정하였다.

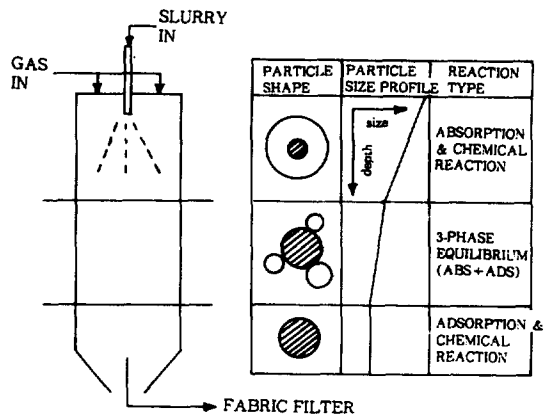


Fig. 3. Variation of particle shape, particle size and reaction type in three regions.

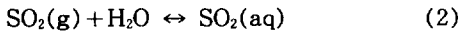
1) 흡 수

입자가 분무된 초기상태 에서는 단순한 물방울로 가정할 수 있으며, 이 때에는 배가스 중 에서 물에 대한 용해도가 큰 산성가스가 흡수 되면서 화학반응을 일으키게 된다. 이 과정에서 오염물질의 가스와 물속에서의 평형분포는 식 (1)에 표현된 Henry의 법칙으로 설명된다⁶⁾.

$$P_a = (H)(X_a) \quad (1)$$

이때, P_a 는 오염물질(예 : SO_2)의 가스상에서의 부분압(atm)이고, X_a 는 용액에서의 물분율이다. H 는 Henry 상수이며, SO_2 의 경우 $20^\circ C$ 에서 29.6으로 알려져 있다.

SO_2 가 물에 용해할 경우의 반응은 식 (2)와 같고, 이때 평형상수 K 는 식(3)과 같이 구할 수 있다.



$$K = \frac{\{SO_2(aq)\}}{\{SO_2(g)\}\{H_2O\}} \quad (3)$$

이때, 물의 활동도(activity), $\{H_2O\}$ 가 1이므로, K 는 가스상에서의 농도와 액상에서의 농도 비로 나타나며, 이것은 H 의 역수이다. 이에 대한 온도의 영향은 Van't Hoff 법칙으로 설명된다⁷⁾. 식(4)에 나타난 것처럼 흡열반응($\Delta H^\circ > 0$)에서는 온도의 증가에 따라 평형상수가 증가하고, 결국 Henry 상수는 감소한다.

$$\ln(K) = \text{constant} - \frac{\Delta H^\circ}{(R)(T)} \quad (4)$$

여기서, K =평형상수

R =이상기체 상수

T =절대온도($^\circ K$)

ΔH° =표준 엔탈피 변화율

이때, 흡수된 가스는 물속에 있는 석회성분과 화학반응을 일으키는데, SO_2 의 경우는 반응을 통하여 $CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$ 나 $CaSO_3 \cdot 1/2H_2O$ 가 형성된다⁸⁾.

2) 흡 착

흡수된 가스와 석회성분과의 화학반응을 통하여 최종적으로 생성되는 $CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$ 나 $CaSO_3 \cdot 1/2H_2O$, 그리고 반응하지 않고 남은 $Ca(OH)_2$ 는 고체입자로 남아서 건조된 후에는 다

공성의 입자가 되며, 친유성(hydrophobic)의 유기성 가스나 수은과 같은 중금속 등의 흡착이 일어난다⁴⁾.

고체상태의 석회석이나 dolomitic limestone 등을 고온에서 소성화(calcination)시키는 경우와 같은 고체의 열분해(thermal decomposition)시, 형성입자의 표면적은 입자의 파괴 정도와 소성시간이 클수록 증가하며, 소성 온도는 약 $700-1000^\circ C$ 에서 최대인 것으로 나타났다⁹⁾. 그러므로 $150-350^\circ C$ 정도인 배가스의 온도가 상승할수록 형성입자 표면적이 커져서 흡착용량은 커지지만, 반면 고온에서의 흡착은 저온에 비해서 잘 이루어지지 않거나 탈착의 효과가 있어서, 오염물질 제거 효율을 감소시키는 상반관계가 있다.

3) 3계 평형

흡수와 흡착영역의 중간과정으로서, 배가스, 물, 그리고 분무입자의 3계 사이에 오염물 분포의 평형이 이루어진다면, 각 계 사이의 분포 계수(partition coefficient)를 이용하여 유효분포 계수(effective partition coefficient)를 구할 수 있고, 결국 오염 물질의 3계 분포를 알 수 있다. 그림 4는 분포화된 분무 입자를 보여주고 있으며, 이때의 오염물질의 유효분포 계수는 식 (5)으로부터 구할 수 있다¹⁰⁾.

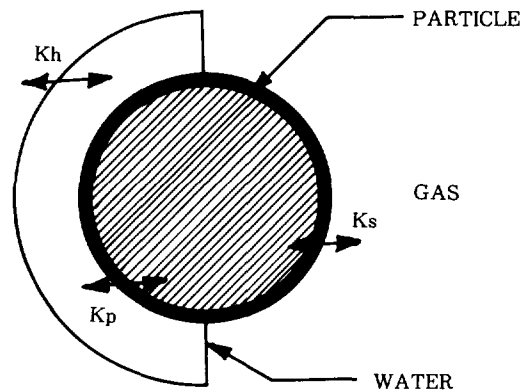


Fig. 4. Simplified schematic diagram of equilibrium distribution of pollutant among three phases in unsaturated particle.

$$K_{eff, 3-p} = \frac{1}{(1+\phi-n)} [Kh + (1-n) \{(X)(Ks) + (Y)(Kp)(Kh)\}] \quad (5)$$

여기서, $K_{eff, 3-p}$ = 3계영역에서 실험적으로 구한 오염물의 유효분포 계수 ((mole/m³ of wet particle)/(mole/m³ of gas))

Kh = 가스-물 분포계수 ((mole/m³ of water)/(mole/m³ of gas))

Kp = 물-입자 분포계수 ((mole/m³ of particle)/(mole/m³ of water))

Ks = 가스-입자 분포계수 ((mole/m³ of particle)/(mole/m³ pf gas))

Y = 입자의 전체 표면적 중 물에 의하여 둘러싸인 비율

$X = 1 - Y$

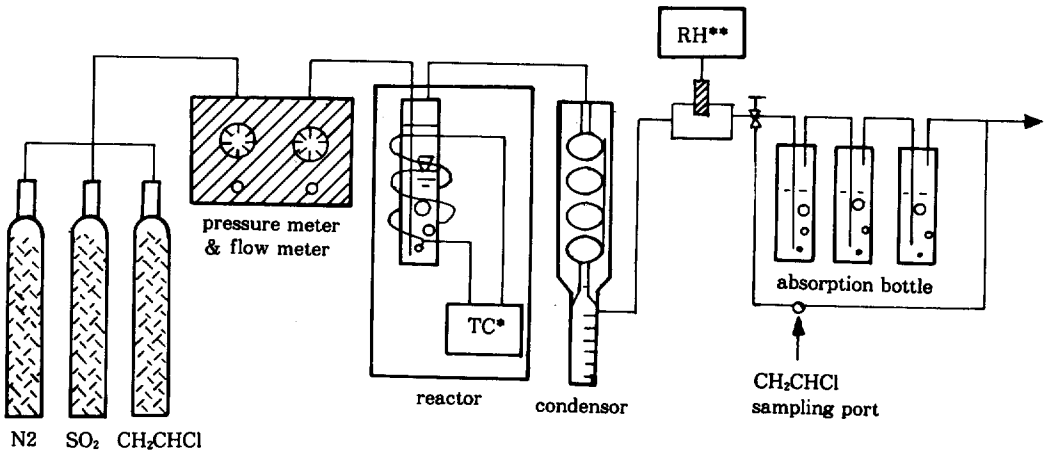
n = 공극율

ϕ = 수분함량

3. 실험 장치 및 방법

본 연구는 분무건조기를 이용한 건식세정기에서의 오염물질 제거에 관한 기초적인 연구로서 분무건조기 내의 조건을 세 영역으로 만들어서 각 영역의 크기와 그에 따른 각 오염물질의 제거효율을 고찰하였고, 분무입자의 크기나 유체역학적 고려는 하지 않았다.

실험에 사용된 장치는 그림 5에 나타낸 바와 같고, 각 장비의 규격은 표 1에 나타내었다. 실험에 사용한 가스는 산성가스로서 SO₂, 유기성 가스로서 염화비닐(CH₂CHCl)을 사용하였고, 모두 질소를 바탕가스로 하였다. 압력이 5기압, 유량이 96mL/min으로 조절된 가스는 슬러리 10mL를 채운 반응기를 통과하도록 하였는데, 이때 슬러리는 10 wt.% Ca(OH)₂와 10 wt.% NaOH를 사용하였으며, 반응기의 온도를 200, 250 및 300°C로 조절하였다.



*Temperature Controller
**Relative Humidity Meter

Fig. 5. Experimental apparatus.

Table 1. Specifications of experimental equipments.

Equipment	Specification
Gas : SO ₂	990ppm (N ₂ base)
CH ₂ CHCl	103ppm (N ₂ base)
Reactor	pyrex (ϕ 20mm × 190mm height)
Temperature controller	0 - 400°C
Relative Humidity Meter	Hygrotest 6250(testo term)
Absorption Bottle	pyrex (ϕ 25mm × 190mm height)

반응기에서 증발된 수분은 응축기를 통과하면서 응축되도록 하여 그 양을 측정하였고, 연속적으로 상대습도를 측정하였다. SO₂는 과산화수소수(1+9)를 채운 3개의 흡수병에 채워되었고, 염화비닐은 가스관에 T-유니온을 설치하여 septum으로 채취점을 만들어 직접 syringe로 채취하였다. 그리고 전체 관시스템은 1/8 인치의 스테인레스관과 연결부를 사용하였다.

그리고 SO₂와 염화비닐, 그리고 수분증발율의 분석은 표 2에 나타낸 바와 같이 수행하였다.

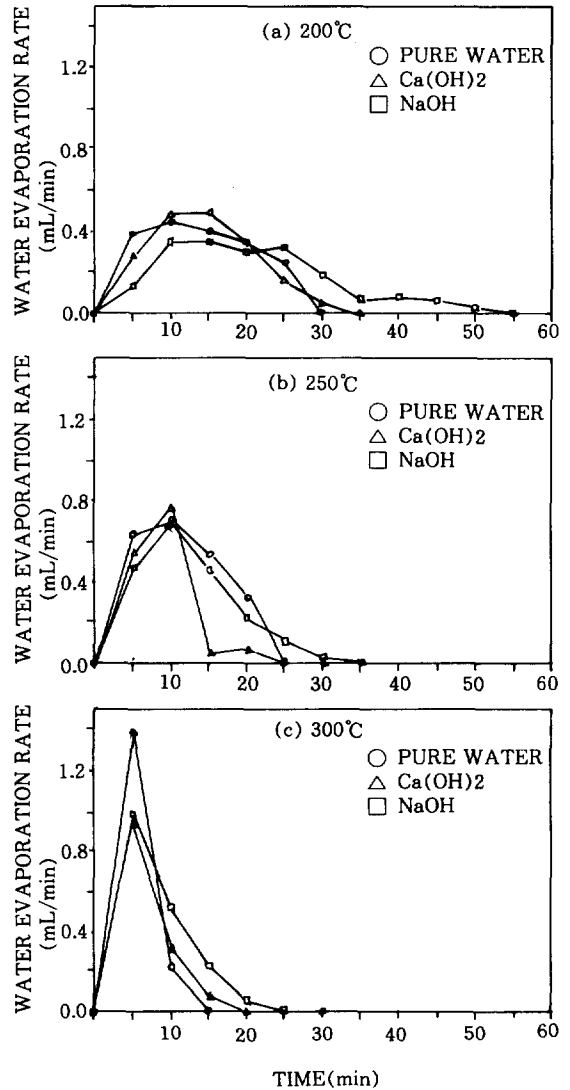
Table 2. Methods of analysis.

classification	analysis method
SO ₂	pH of Absorption solution
CH ₂ CHCl	GC-FID (Varian 3300) (column : SP1000)
evaporation rate	amount of condensed water

4. 결과 및 고찰

4.1 수분 증발율

그림 6에서 보듯이 온도를 증가시키에 따라 증발율은 증가하였고, 따라서 흡수영역은 작아

**Fig. 6.** Absorbents and temperature effect on evaporation rate.

졌다. 그리고, 상대습도가 100%인 점을 임계 수분함량점(critical moisture content)이라고 하면, 이때의 입자들은 전체가 수분에 둘러싸여 있다고 가정할 수 있으며, 이에 해당하는 증발율 0.077mL/min 이하가 되는 부분이 3계 영역이라고 할 수 있다. 이러한 가정으로부터, 온도가 증가할수록 흡수영역과 3계 영역이 작아지는 것을 볼 수 있다.

흡수제에 따른 증발율의 변화는 NaOH를 사용하였을 경우, Ca(OH)₂ 보다 증발율이 작았고, 물만 사용하였을 경우가 가장 큰 것으로 나타났다. 즉, NaOH를 사용하면 흡수영역과 3계 영역이 커지므로 산성 가스의 제거율은 높아질 것이지만, Ca(OH)₂보다 비용이 많이 든다는 단점이 있다.

4.2 SO₂ 제거

SO₂ 제거에 대한 온도의 영향은 그림 7에서 볼 수 있듯이 Ca(OH)₂나 NaOH 슬러리에 상관없이 온도가 상승함에 따라 SO₂의 제거 효율은 감소하는 것을 알 수 있다. Ca(OH)₂의 경우, 200°C에서 300°C로 증가함에 따라 흡수 영역에서의 제거효율이 75%에서 65%로 감소하였다. 이는 온도가 높을수록 SO₂의 물에 대한 용해도가 감소하기 때문인 것으로 여겨지며, Chu 등¹¹⁾이 보고한 내용과 일치한다.

또한, 온도에 관계없이 NaOH를 사용한 경우가 Ca(OH)₂보다 효율이 5-10% 더 좋은 것으로 나타났다. 이 이유는 NaOH가 물에 녹아 Ca(OH)₂보다 강한 알칼리를 띄기 때문이다.

그리고, 전체적으로, 흡수영역에서의 제거 효율이 70% 정도이던 것이 흡착영역에서는 30-40% 정도로 감소하였다. 즉, SO₂는 친수성 가스이므로 흡착보다도 물에 흡수되어 제거되는 양이 많음을 알 수 있다.

4.3 염화비닐 제거

염화비닐 제거에 대한 온도의 영향은 Ca(OH)₂를 사용하였을 경우, 200°C와 250°C에서는 같은 영역에서의 제거효율이 비슷한 것을 그림 8로부터 알 수 있다. 흡수영역에서의 효

율은 거의 0에 가깝고 흡착영역에서는 40% 정도로 증가하였다. 그러나 300°C의 경우, 시간이 지남에 따라 제거효율이 40%에서 20%로 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 제거된 염화비닐이 고온으로 인해 탈착되는 것으로 사료된다. 그러므로 250°C 정도까지는 염화비닐 제거에 대한 온도의 영향이 적으나 그 이상의 온도에서는 영향이 많을 것으로 여겨진다.

그러나, NaOH를 사용하였을 경우에는 온도에 관계없이 거의 25-30%로 일정한 것을 보여주고 있다. 이는 유기성 가스인 염화비닐이 흡착할 수 있는 표면적이 Ca(OH)₂보다 적고, 물과의 결합이 강하여 오래동안 물을 함유하고 있기 때문인 것으로 사료된다. 이로부터 온도의 변화가 심한 배가스의 경우에 사용하면 유리할 것이라는 것을 알 수 있다.

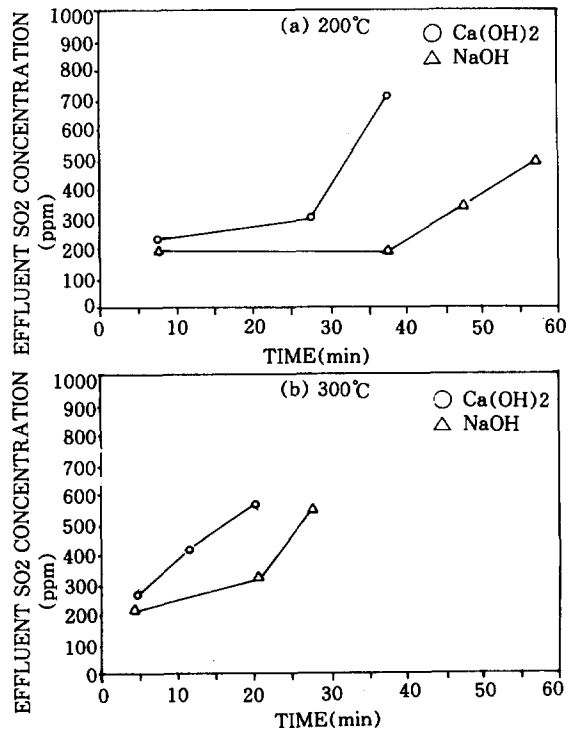


Fig. 7. Absorbents and temperature effect on SO₂ removal. (a) 200°C (b) 300°C

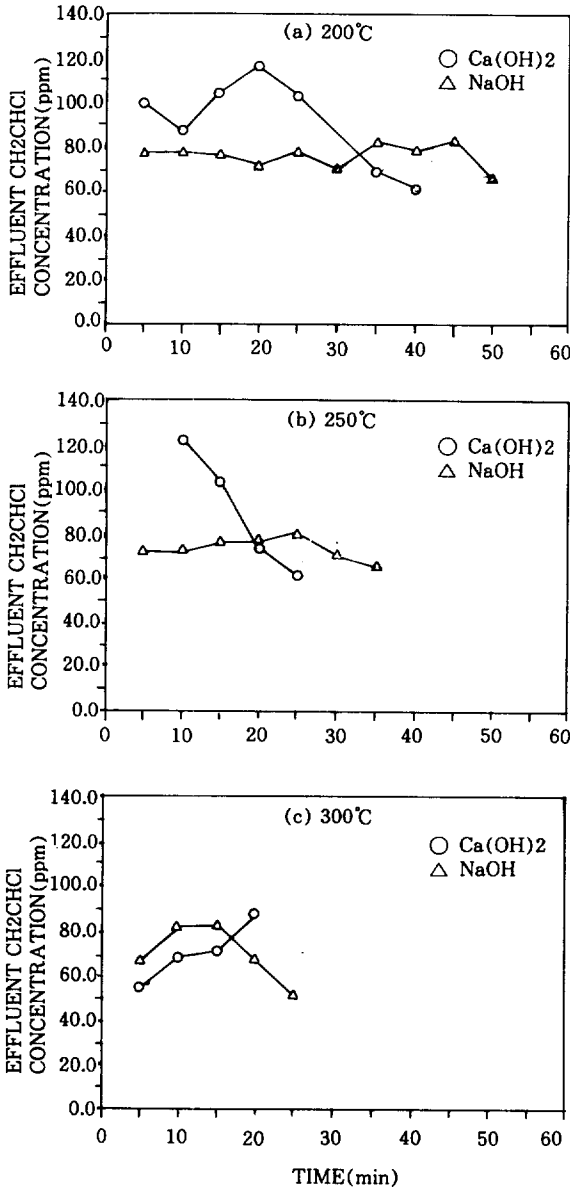


Fig. 8. Absorbents and temperature effect on vinyl chloride removal
(a) 200°C (b) 250°C (c) 300°C

5. 분무건조기에 대한 3계 평형분포 모델의 적용과 예비설계에의 응용

5.1 3계 평형분포 모델의 적용

각 영역에서의 유효분포계수와 수분함량, 그리고 공극율을 결정하여, 2계 분포계수를 계산한 후, 이것으로부터 오염물의 3계 평형분포를 유추하였다. 그리고, 실제 분무건조기의 예비설계를 위한 인자들을 도출하였다.

1) 각 영역에서의 유효분포계수

분무건조기 내의 입자 수분함량에 따라 구분한 세 영역에서 각각의 유효분포계수는 표 3과 같이 표현된다¹⁰⁾. 여기서 수분함량(ϕ)과 공극율(n)은 각 영역에서의 평균값이다.

Table 3. Effective Partition Coefficients of Pollutant in Each Region

absorption region	$Y=1, X=0$
$K_{eff, abs} = \frac{Kh}{(1+\phi-n)} (\phi + (1-n)K_p)$ (6)	
3-phase equilibrium region	
$K_{eff, 3-p} = \frac{1}{(1+\phi-n)} [Kh + (1-n) \{(X)(K_s) + (Y)(K_p)(K_h)\}]$ (7)	
adsorption region	$Y=0, X=1, \phi=0, K_h=0$
$K_{eff, ads} = K_s$ (8)	

2) 수분함량(ϕ)과 공극율(n)의 결정

수분함량과 공극율의 높이에 따른 변화는 그림 9 (a)와 같을 것이며, 이것을 각 영역에 따라 간략히 나타내면 그림 9 (b)와 같이 된다고 가정할 수 있다. 그리고 각 영역에서의 초기값이 표 4에 나타나 있다.

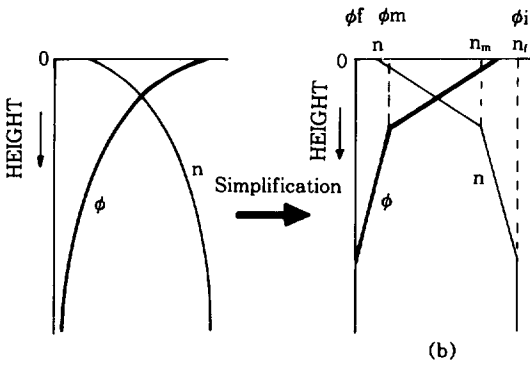


Fig. 9. Variations of Water Content and Porosity with height of Spray Dryer

Table 4. Water content and porosity in the initial point of each region.

	absorption	3-phase equil	adsorption
water content	$\phi_i = \frac{Q_w}{Q_g + Q_w}$	$\phi_m = \frac{Q_{wr}}{Q_g + Q_w}$	$\phi_f = 0$
porosity	$n_i = \frac{Q_g}{Q_g + Q_{sl}}$	$n_m = \frac{Q_g}{Q_g + Q_{sr}}$	$n_f = \frac{Q_g}{Q_g + Q_s}$

Where, Q_w = water flowrate
 Q_g = gas flowrate
 $Q_{wr} = Q_w - Q_c$
 Q_c = condensed water flowrate
 Q_{sl} = slurry flowrate
 Q_{sr} = slurry remaining in reactor
 $= Q_{sl} - Q_c$
 Q_s = solid flowrate

3). 2계 분포계수의 결정

반응기를 통과한 배가스의 농도로부터 K_{eff} 를 구하고, 표 4의 식들로부터 수분함량과 공극율을 결정하여, 표 3의 식에서의 2계 평형분포계수를 구할 수 있다.

이때, 2계 분포계수를 결정하는 과정은 다음과 같은 몇가지 가정하에서 이루어졌으며, SO_2 와 염화비닐에 대한 계산 결과가 각각 표 5와 6에 나타나 있다.

(1) 임계수분함량점은 상대습도가 100%인 점이다.

(2) X와 Y는 직선적으로 변화한다.

(3) 수분함량과 공극율은 각 영역에서 직선적으로 변화한다.

(4) 흡수제의 물에 대한 용해도는 0이다.

Table 5. Estimated values of K_p , K_s , and K_h for SO_2 in 10wt.% $Ca(OH)_2$ and NaOH slurry at different temperatures.

partition coefficients	$Ca(OH)_2$		NaOH	
	200°C	300°C	200°C	300°C
K_p	37.0145	41.4234	67.3168	39.2572
K_s	57.8647	86.8820	127.0785	95.4978
K_h	0.6839	0.3508	0.5868	0.6456

4) 오염물질의 3계 평형 분포

SO_2 와 염화비닐의 온도별, 흡수제별 분포는 그림 10에 잘 나타나 있다. SO_2 의 경우, 흡수 영역에서의 분포를 보면 흡수된 SO_2 는 물에 흡수됨과 동시에 입자와 반응하므로, 실제 물속에 분포하는 양은 아주 적게 나타났다. 그리고, 온도가 증가할수록 가스 속의 분포는 많아짐을 알 수 있다.

또한, 그림의 (a)와 (b)를 비교하면 건조 후 흡착된 양보다, 수분이 존재할 때 입자에 분포하는 양이 많음을 알 수 있다. 이는 흡착 영역에서 직접 입자에 흡착되는 SO_2 의 양이 적은 반면, 흡수영역의 경우, 물에 흡수된 SO_2 양이 아주 많고, 이것의 대부분이 입자에 흡착되었기 때문으로 사료된다.

염화비닐의 경우, 흡착영역에서 $Ca(OH)_2$ 의 경우, 온도가 증가할수록 가스상의 분포가 많았고, NaOH는 그 반대였다.

5.2 예비설계예의 응용

1) 각 영역에서의 효율

분무건조기를 그림 11과 같이 완전혼합반응기가 3개 연속적으로 연결되어 있다고 가정하면, 각 영역에서의 오염물질별 효율은 식 (9)과 같이 나타낼 수 있다. 단, 이때 실제 배가스의 온도가 300°C라면 흡수영역에서는 300°C, 3계 평형영역에서는 200°C, 그리고 흡착영역에서는 100°C의 효율과 2계 평형분포계수를 사용하여 예측하여야 한다. 실제에서는 각 영역의 체류시간(크기)도 중요한 인자가 되지만,

여기서는 평형으로 해석하였기 때문에 고려하지 않았다.

Table 6. Estimated values of K_p , K_s , and K_h for vinyl chloride in 10wt.% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and NaOH slurry at different temperatures.

partition coefficients	$\text{Ca}(\text{OH})_2$			NaOH		
	200°C	250°C	300°C	200°C	250°C	300°C
K_p	2.1677	0.0059	398.3104	81.8988	68.9062	33.4878
K_s	79.2532	61.4702	20.9737	47.5107	71.8475	125.0463
K_h	0.2179	0.3545	0.0137	0.0408	0.0494	0.1036

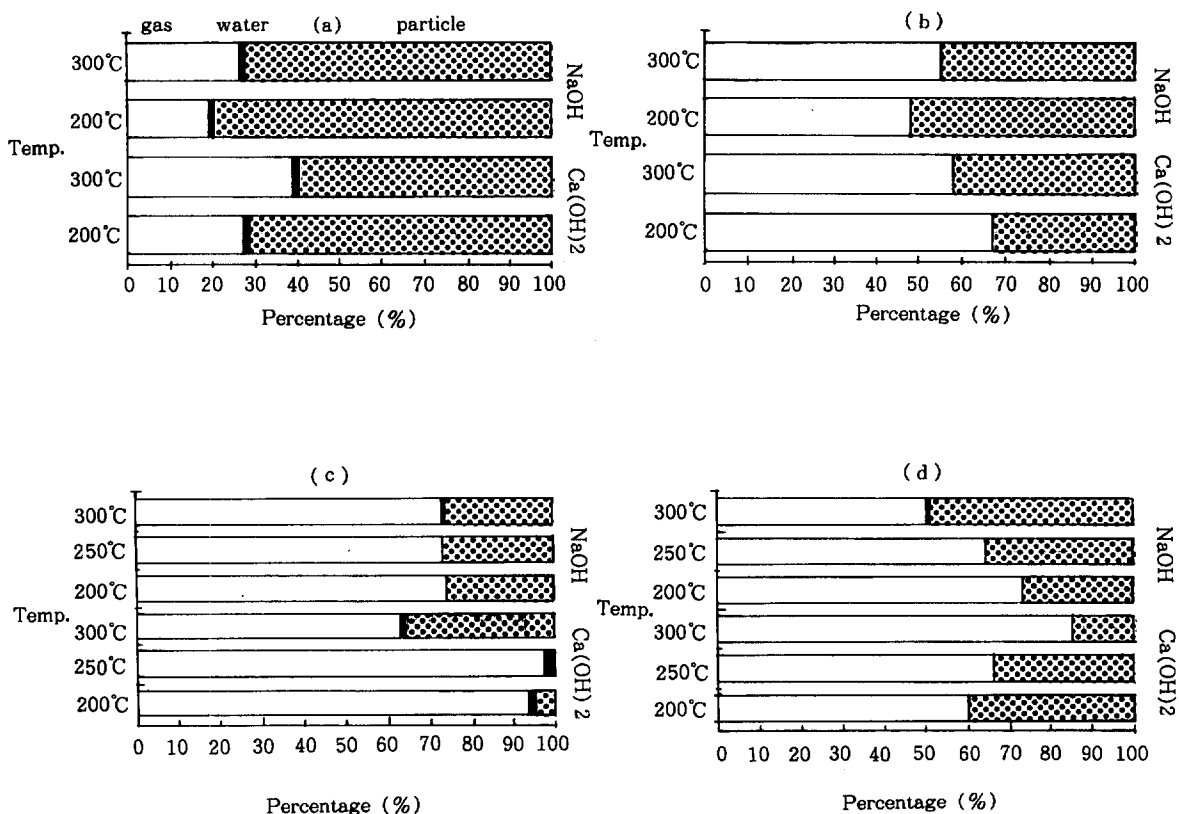


Fig. 10. Three phase equilibrium distribution.

- (a) SO_2 in absorption region (b) SO_2 in adsorption region
 (c) CH_2CHCl in absorption region (d) CH_2CHCl in adsorption region

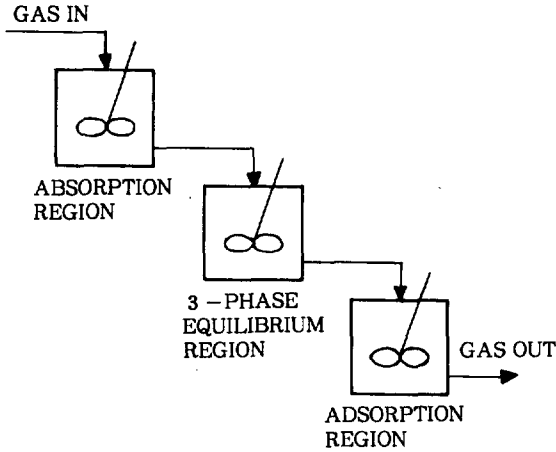


Fig. 11. Idealized spray dryer with three CSTRs

$$\begin{aligned} \eta_{abs} &= f(Kh, Kp, \phi, n, L) \\ \eta_{3-p} &= f(Kh, Kp, Ks, \phi, n, L) \\ \eta_{ads} &= f(Ks, \phi, n, L) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $\eta_{abs}=300^\circ\text{C}$, 흡수영역에서의 제거효율
 $\eta_{3-p}=200^\circ\text{C}$, 3계 평형영역에서의 제거효율
 $\eta_{ads}=100^\circ\text{C}$, 흡착영역에서의 제거효율
 L =각 영역의 길이

2) 분무건조기의 전체 제거효율

이러한 각 영역에서의 제거효율로써, 분무건조기 전체의 제거효율을 식 (10)와 같이 구할 수 있다.

$$\eta_t = 1 - (1 - \eta_{abs})(1 - \eta_{3-p})(1 - \eta_{ads}) \quad (10)$$

표 7은 본 연구의 결과를 식 (9)에 대입하여 계산한 분무건조기의 전체 제거효율을 나타낸 것이다. SO_2 의 경우, 흡수영역에서는 300°C , 3계 영역과 흡착영역에서는 200°C 의 효율을 사용하였고, 염화비닐의 경우, 각 영역마다 $300, 250$ 및 200°C 의 제거효율을 사용하였다.

3) 최대효율을 위한 예비설계에의 응용

각 영역에서의 효율은 2계 평형분포계수, 수분함량, 그리고 공극율 등의 함수이므로, 이러

한 변수의 변화에 따른 제거효율을 유추하여 최대효율 조건을 구할 수 있다.

Table 7. Total removal efficiencies of pollutants assuming the practical spray dryer consists of three CSTRs.

pollutants	Ca(OH) ₂ slurry	NaOH slurry
SO ₂	0.875	0.958
CH ₂ CHCl	0.750	0.651

먼저, 2계 평형분포계수는 식 (4)로부터 다른 여러 온도에서의 값이 계산될 수 있다. 그리고, 각 온도에서의 수분함량과 공극율이 실험에 의하여 측정되면, 이것으로부터 3계 유효분포계수를 계산할 수 있고, 결국 그 조건에서의 효율을 계산할 수 있다.

본 연구에서는 SO_2 의 경우, 온도가 낮을수록, 그리고 NaOH를 사용한 경우 최대효율을 얻을 수 있고, 염화비닐의 경우, 온도는 200°C 나 250°C 에서 Ca(OH)_2 를 사용할 경우 최대효율을 얻을 수 있었다.

6. 결 론

분무건조기를 이용한 건식세정기에 의한 오염물 제거효율과 그의 인자에 관한 기초적 연구를 수행한 결과 다음과 같은 몇가지 결론을 유도할 수 있었다.

1. 가스의 온도가 고온일수록 증발율은 증가하여 흡수영역과 3계 영역의 크기가 작아져 SO_2 의 제거에는 불리하였고, 염화비닐의 제거에는 유리하였다. 그러나 고온(300°C)에 의한 염화비닐의 탈착 효과도 있었다.
2. Ca(OH)_2 와 NaOH 모두 흡수영역에서는 SO_2 , 흡착영역에서는 염화비닐의 제거효율이 높았는데, 특히 Ca(OH)_2 는 흡착영역에서 염화비닐 제거효율이 더욱 컸다.
3. 흡수제의 영향은 NaOH 슬러리가 Ca(OH)_2 슬러리보다 증발율이 감소하여 흡수영역이 길어졌으며, 또한, SO_2 의 제거효율도 증가하였다.
4. 3계 평형 분포에 대한 이론을 이 분무건조

기를 이용한 건식세정기에 적용시켜 해석한 결과, 고온 상태의 2계 분포계수들을 구할 수 있었으며, 이로부터 오염물질의 고온 3계 평형분포를 유추할 수 있었다. 그 결과 흡수된 오염물은 대부분 입자에 존재하고 물속에 존재하는 양은 아주 적었다.

5. 분무건조기의 최대효율을 위한 운전조건은 SO_2 의 경우에는 저온에서 NaOH 슬러리를 사용하였을 때이고, 염화비닐의 경우에는 200°C 나 250°C 에서 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 사용하였을 때이다.

참 고 문 헌

1. Masters, K., (1979), Spray Drying Handbook, John Wiley & Sons.
2. Dlouhy, J. and Gauvin, W.H., (1960), Heat and Mass Transfer in Spray Drying, AIChE, vol. 6, pp.29-34.
3. Parti, M. and Palancz, B., (1974), Mathematical Model for Spray Drying, Chem. Eng. Sci., vol. 29, pp.355-362.
4. Adu, M. A., (1989) Control of Residuals and Emissions from Hazardous Waste Incineration, Proceedings : The Application of US Pollution Control Technology in Korea.
5. Schmal, D., et al., (1989), Some Physico-Chemical Aspects of Dry Sorbent Injection for HCl and HF from Wastes Incinerator Flue Gases, JAPCA, vol. 39, p.55.
6. Geankopolis, C. J., (1983) Transport Processes and Unit Operations, Allyn and Bacon, Inc.
7. Snoeyink, V. L. and Jenkins, D., (1980), Water Chemistry, John Wiley & Sons.
8. Getler, J. L., et al., (1979), Modeling the Spray Absorption Process for SO_2 Removal, JAPCA, vol. 29, p. 1270.
9. Keener, T. C. and Jiang, X., (1989), Surface Area Formation in Dry FGD Sorbents, Chem. Eng. Comm., vol. 77, pp. 1-22.
10. 김동하, (1988), 토양내 유기독성물질의 평형분포에 미치는 토양 수분과 온도의 영향, KAIST 토목공학과 석사학위논문.
11. Chu, P. and Rochelle, G. T., (1989) Removal of SO_2 and NO_x from Stack Gas by Reaction with Calcium Hydroxide Solids, JAPCA, vol. 39, pp. 175-179.