

보텍스 사이클론을 이용한 VOCs 제거효율에 관한 연구

임 계 규[†]

호서대학교 화학기술개발연구소 · 환경안전공학부
(2004년 7월 5일 접수, 2005년 2월 2일 채택)

A Study on Removal Efficiency of VOCs using Vortex Cyclones

Gye-Gyu Lim[†]

Hoseo Chemical and Industrial Technology R&D Center, Division of Environmental and Safe Engineering, Hoseo University
29-1 Sechulli, Baebang Myeon, Asan City, Chungnam 336-795, Korea
(Received July 5, 2004; accepted February 2, 2005)

본 연구에서는 배연가스속에 함유되어 있는 휘발성 유기화합물과 입자물질 등의 오염물질을 보텍스 사이클론의 원리를 이용하여 동시에 제거하는 메커니즘을 규명하고 나아가 효율을 높이기 위한 영향인자들을 분석 하였다. 보텍스 사이클론 속에 접선방향으로 압축된 공기를 주입함으로써 Joule-Thomson 팽창에 의하여 형성된 저온부분에서 페놀, 탄산가스 및 수분이 활성탄소 입자표면에 응집, 응축 및 흡착이 일어나도록 하였다. 활성탄소와 같은 입자물질은 쉽게 응축될 수 있는 물질들이 저절로 응집이나 응축이 일어날 수 있는 핵의 역할을 함으로 흡착과 응축 등의 표면현상을 증폭시키게 된다. 이러한 형태의 응집이나 응축은 입자물질의 입경이 증가함에 따라 속도는 급속도로 빨라져서 제거효율이 상승된다. 본 연구실험에서 탄산가스와 페놀의 제거효율은 각각 87.3%와 93.8%로 얻어졌다. 그리고 페놀 제거효율은 톨루엔과는 달리 상대습도의 증가에 따라 함께 증가되었고, 활성탄의 주입으로 제거효율도 증폭되었다. Joule-Thomson 계수는 상대습도 10%~50% 범위에서는 도입되는 압력이 높아짐에 따라 같이 상승하였다. 실험의 결과로는 도입되는 압력과 수분이 보텍스 사이클론의 처리효율에 미치는 영향은 공기 속에 함유되어 있는 대상물질의 물리화학적 특성과 입자물질의 특성에 따라 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있고, 따라서 휘발성 유기화합물의 제거효율은 수분의 양과 입자물질의 물리화학적 특성을 조절함으로써 제어할 수 있다고 판단된다.

The principle of vortex cyclone was applied to enhance the treatment efficiency of waste air streams containing particulate matters, phenol, and others. Adsorption, condensation, and/or coagulation could be induced at low temperature zone formed by Joule-Thomson expansion as the pressurized air and pulverized activated carbon were introduced at the tangential direction into the cyclone system applied with the coaxial funnel tube of vortex cyclone. Easily condensable vapors were adsorbed and/or condensed forcibly on coagulated or condensed materials which were formed as cores for coagulation or condensation by themselves or on pulverized activated carbons. These types of coagulation or condensation rates were rapidly promoted by increase in their diameter. The maximum removal efficiency obtained from this experiment for the removal of carbon dioxide and phenol was about 87.3 and 93.8 percent, respectively. Phenol removal efficiency was increased with the relative humidities and enhanced by pulverized activated carbon added. The Joule-Thomson coefficients were increased with the pressure of air injected in the range of the relative humidities between 10% and 50%. It is believed that the moisture, particulate matters, and the pressure of the process air introduced could control the removal efficiency of VOCs.

Keywords: vortex cyclone, Joule-Thomson, adsorption, condensation, phenol

1. 서 론

보텍스 사이클론(vortex cyclone)을 이용하여 입자물질과 가스상 물질을 동시에 제거하는 기술은 아직도 극히 제한된 물질에 한정되어 개발되고 있다. 기본적인 원리는 보텍스 튜브(vortex tube)를 응용한 것이다. 보텍스 사이클론에 부착되어 있는 노즐을 통하여 접선방향으로 유체를 유입하면 빠른 접선속도로 인하여 원주방향으로 회전하면

서 보텍스(vortex)가 생성되며 바깥쪽으로는 각속도(angular velocity)가 떨어지는 반면에 중심으로는 높아지는 자유 보텍스(free vortex)를 형성하게 된다[1]. 온도는 고압과 저압부분으로 나누어 각각 고온과 저온이 형성되는 것으로 알려져 있다[2]. 이러한 보텍스 튜브는 내부의 에너지 분리와 물질분리에 사용가능하며[5], 이러한 분리효과는 저온공기 유량비와 보텍스 튜브의 지름 비에 의존하는 것으로 알려져 있다[3]. 보텍스 튜브의 이론을 디젤엔진의 배기가스 중 미세입자 분리[4]에 응용되었고, 최근에는 실험실 상태에서 Toluene, CO₂ 및 입자

[†] 주 저자(e-mail: kklim@office.hoseo.ac.kr)

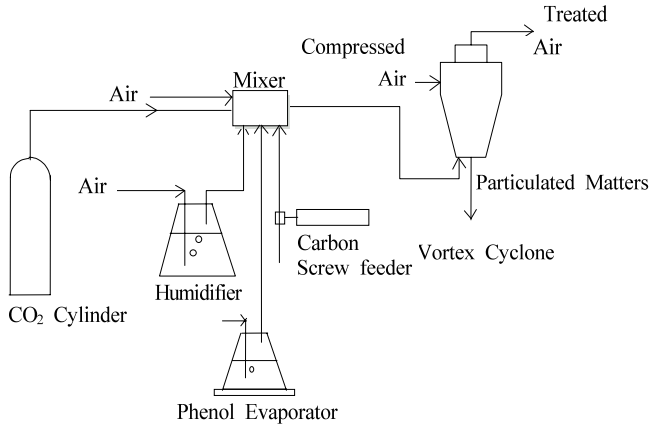
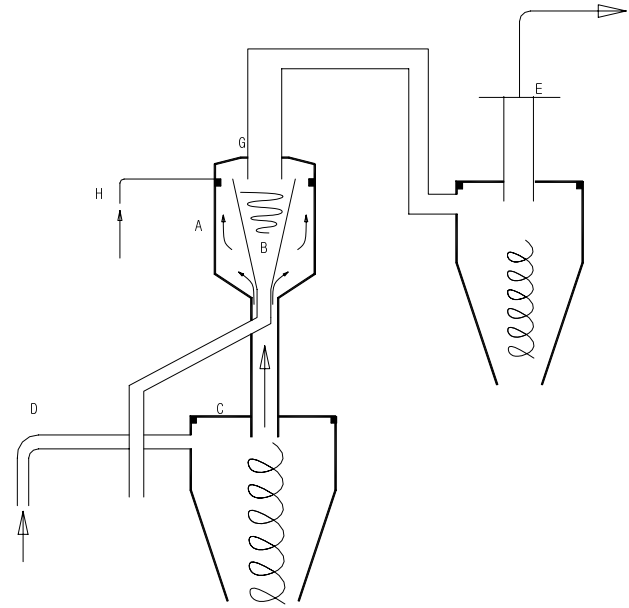


Figure 1. Schematic of lab scale vortex cyclone.

Table 1. Dimensions of the Vortex Cyclone

Dimensions	Values
body diameter, D(m)	0.25
vortex finder diameter, D _v (m)	0.125
body length, L _b (m)	0.35
cyclone length L _c (m)	0.50
vortex finder length, S(m)	0.20
cylinder tube length, L _t (m)	0.30
cylinder tube diameter, D _t (m)	0.125

물질을 함께 분리하는 응용기술로까지 발전하게 되었다[6,7]. 그러나 일반적인 사이클론은 처리과정 중에 마찰손실과 유체의 유선(stream lines)에서 에디(eddies)의 혼란에 의하여 충분한 보텍스 튜브의 효과와 원심력을 얻지 못하므로 미세 입자의 제거나 온도강하의 정도가 효율적이지 못하여 조대입자상 물질의 분리용으로만 주로 사용되어 오고 있다. 본 연구에서는 이러한 부분의 개선과 메카니즘 규명을 위하여 실험실연구와 시간당 100 kg 정도의 고체소각이나 액체 증발의 장치를 갖춘 보텍스 사이클론 파이롯트(vortex cyclone pilot) 시설을 제작 설치하여 입자물질과 특정유해가스 물질의 동시제거를 위하여 연구를 하였다. 연구를 하게 된 배경으로는 연소 시에는 반드시 탄소 성분과 회분성분 등의 입자상물질과 수증기가 함께 발생하며, 그 밖의 유해가스가 이산화탄소와 함께 발생함으로 이들을 응축, 흡착, 응결 등의 분리 메카니즘에 적용할 수 있는 적절한 조건을 갖추고 있기 때문이었다. 노즐을 통해 주입되는 압축가스는 보텍스 사이클론의 주요 분리 메카니즘의 환경조성에 도움을 주는 고온유체영역과 저온유체영역을 촉진시키는 역할을 하며, 저온유체영역에서는 고비점 성분의 물질이 미립자 표면에 응축이 일어나 입경 성장의 핵이나 촉진제가 되어 처리효율을 증대시킨다. 입자물질들이 미연탄소성분의 미립자인 경우는 높은 비표면적으로 인하여 유해가스의 흡착효과도 함께 증대 된다. 또한 압축가스의 적절한 분사는 입구부분의 난류에 의한 에디(eddies)생성도 현저히 줄여주어 응축가스와 입자상 물질을 쉽게 분리제거 할 수 있는 역할도 하게 된다. 대상물질로 phenol을 선택한 이유는 phenol의 용해도(8.2 in 100 parts of water at 15 °C)가 toluene의 용해도(0.05 in 100 parts of water)에 비해 훨씬 높기 때문에 공기 속에 함유되어 있는 수분이 phenol과 같은 용해도가 아주 높은 다른 VOCs(예로 CH₃OH 등)에 대한 처리 메카니즘을 설정하는데도 좋은 지표가 될 것으로 판단되었기 때문이다.



A: External cylinder B: Internal corn C: Cyclone
D: Gas inlet E: Outlet G: Vortex outlet H: Compressed air inlet

Figure 2. Schematic of pilot vortex cyclone.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1. 실험장치

실험실장치는 Figure 1에서와 같이 보텍스 사이클론에 유입될 혼합 가스를 만드는데 필요한 실린더 탄산가스와 분말활성탄(pulverized activated carbon) 공급기, phenol 증발장치, 그리고 습도를 적절히 조절하는데 필요한 가습장치와 유량제어용 Flow meter (KOFLOC, HFC) 로 구성되어 있다. 분석 장비로는 GC (Shimadzu GC-14B, FID, TCD with Data Processor), Stack Gas Analyzer (Bacharach, CA300), 습도계, 입자물질 측정기 등의 장비가 사용되었으며 일부의 분석은 국내 G사와 C사가 대행하였다. 실험실장치는 파이롯트 장치[7]의 A, B, H 및 G 부분에 해당한다. 이 장치는 외부로부터 압축공기를 사이클론 속에 불어넣어 보텍스 튜브의 효과와 사이클론 집진효과를 동시에 얻을 수 있는 장치(Table 1)로 고안되었다. 이 장치의 특징은 보텍스 파인더의 끝에서 측정된 자연보텍스의 길이가 시린드 튜브내(cylinder tube)에 위치하도록 설계되어 입자물질의 막힘 현상이 일어나지 않도록 설계되었다. 노즐을 통한 압축공기의 팽창식[9]은 다음과 같이 정의된다.

$$\mu \equiv \left(\frac{dT}{dp} \right)_h$$

여기서 μ 는 Joule-Thomson 팽창계수로 노즐을 통과하는 기체가 일정한 엔탈피(enthalpy)를 유지한다고 가정할 때 적용되는 식으로 수소, 헬륨, 네온 등의 몇몇 기체를 제외한 대부분의 기체에 대해서 양의 값 [9]을 나타내므로 압력이 떨어지면 온도가 내려감을 의미한다.

Figure 2에 있어서 소각로의 배연가스나 증발기의 증기는 D로 도입되어 외부 실린더 A와 B 사이의 공간 안으로 상승되어 콘 B 내부로 반전되어 들어간다. 콘 B의 도입구에 외부로부터 압축된 공기 파이프 라인 H에 의해 공급되는 압축공기에 의해 보텍스(vortex)가 생기고, 콘 B의 중심부에서 저온이 생긴다. 여기서 응축, 응결 혹은 흡착이 발

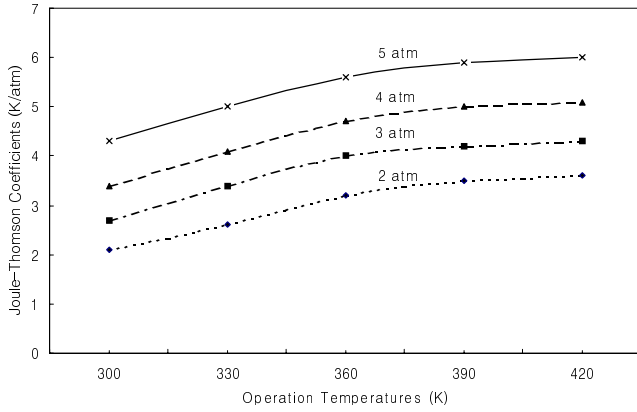


Figure 3. Joule-Thomson coefficients at a relative humidity of 50%.

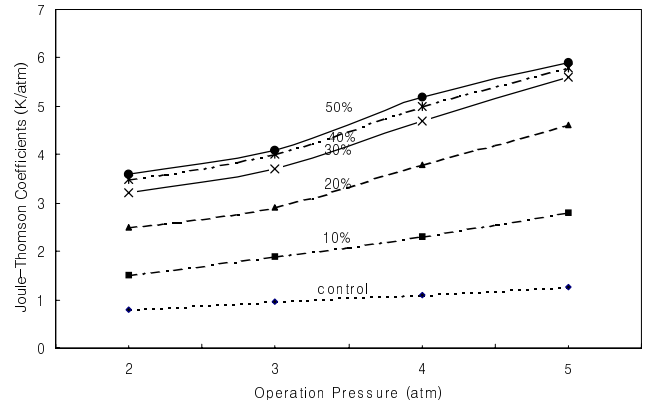


Figure 5. Joule-Thomson coefficients with pressure and relative humidity at 360 K.

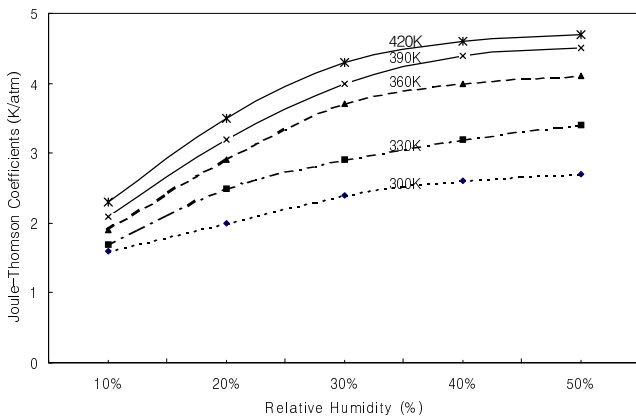


Figure 4. Joule-Thomson coefficients with relative humidity at 3 atm.

생하여 먼지와 함께 원심력을 받아 벽 측면으로 돌아 밀 부분으로 하락하거나 반전된 흐름에 따라 다음단계의 고효율 사이클론에 유입되어 포집된다. B부의 내부 콘은 사이클론으로 되어 있기 때문에 비교적 큰 입자는 원심력에 의해 벽 측면에 모이고 작은 입자는 표면적이 크므로 흡착제나 응결에 필요한 핵으로 작용한다. 압축공기는 보텍스 튜브의 효과를 얻는 것이 주목적이지만, 압축공기 중에 수분이나 흡착제를 유입할 수 있는 매체로도 사용하게 된다.

2.2. 실험방법

실험실 배연가스는 앞선 연구[7]에서 사용한 것과 같은 분말활성탄(입경 75 μm, 200 mesh 체잔분 10% 이하), 이산화탄소를 사용하였으며, 이를 phenol과 습윤공기와 함께 배연가스 혼합조에 통과시켜 일정한 농도로 제조하였다. 배연가스 조성물은 일반적인 도시 폐기물 소각로의 가스성분에 근접한 조성으로 Table 1과 같이 유지하도록 하였다. 발표된 자료[10]에 의하면 일반 도시폐기물 소각로부터 발생하는 가스성분 중 탄산가스는 4.0~6.0 vol%, 수분은 16.0~40.0 mg/Nm³, 산소는 13.0~16.0 vol%, 입자상 물질은 0.4~4.0 g/Nm³의 근사 범위 내에 있다. 또한 입자물질의 입경분포는 10 μm 이하가 23 wt%, 250 μm 이하는 70 wt%이며, 이 중 20~30 μm 사이의 입경은 이 범위 내에 어느 정도 골고루 분포되어 있으며 16.5 wt%를 차지하고 있는 것으로 보고 되었다. 압축공기는 압축하기 전에 건조제를 통과시켜 습기를 제거하였으며 보텍스 사이클론에 들어가기 직전의 인조 배연가스의 조성은 CO₂와 수분을 기준으로 하여 측정하였다. phenol의 유입

농도는 일정량의 공기를 phenol 용기에 통과시켜 일정시간에 동반 증발된 양으로 산출하였으며, 입자물질 배출구에서는 공기 유량, CO₂, phenol 및 수분의 농도, 입자물질의 양을 측정하였으며 처리가스의 배출구에서도 같은 인자들을 측정하여 Table 1에서와 같이 물질수지를 검증하였다. 이론적 phenol 농도를 계산하는데 필요한 물질중 증기압은 0.2 mmHg(at 20 °C), 융점은 41 °C를 사용하였다. 실험에서는 실제 연소과정이 없기 때문에 산소의 농도는 공기 중의 산소 농도가 적용되었다. 수분의 농도범위는 일반소각로에서 발생되는 근사수치 0.002 wt%(30 mg/Sm³)와 대기온도 27 °C(80 °F)에서의 상대습도 50%인 1.09 wt%(14.1 g/Sm³) 범위 내에서 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

일반적인 쓰레기 연소 시 발생하는 배연가스 조성에 가깝게 인위적으로 만든 실험용 조성가스로부터 얻은 실험결과는 Table 1의 출구조성(out)과 Figure 3~11에서와 같다. 그리고 처리효율의 결과는 선택한 제어변수(control parameters)로 분석을 하였다. 상태변수(state variables)의 범위는 앞선 실험[7]에서 적용한 같은 값들을 사용하여 상호 비교분석할 수 있도록 하였다.

3.1. 온도, 습도 및 압력이 Joule-Thomson계수에 미치는 영향

Figure 3에서는 실험한 압력의 범위 내에서 온도가 높아짐에 따라 Joule-Thomson (J-T)계수가 상승을 하나 상승률은 둔화되는 곡선으로 나타나고 있으며, Figure 4에서는 습도의 변화에 따른 J-T 계수의 변화를 보여주고 있는데 실험범위 내에서 상승곡선이 다소 둔화되는 모양을 갖고 있으나 상승률이 습도의 변화에 선형변화를 하고 있다. Figure 3과 4에서 온도가 높을수록, 그리고 압축공기의 압력이 높게 주입 될수록 J-T 계수는 실험한 상대습도의 범위 10% ~50% 내에서는 높아지는 것으로 측정되었으며, Figure 3에서 각각의 압력마다 최적치가 나타날 가능성을 보여주고 있다. Figure 5에서는 Figure 3에서와 같이 주어진 온도에서 압력의 상승에 따라 J-T 계수가 상승하고 있음을 보여주고 있다. 이는 압력, 온도 및 습도와 분말활성탄간의 상호 영향에서 증폭의 효과가 있음을 나타낸다. 활성탄과 수분을 함유하지 않은 콘트롤 실험 결과는 압력의 증가에 선형으로 변화하는 J-T 계수와 비교함으로써 앞에서 지적한 증폭의 상호영향을 뒷받침 해주고 있다. 그러나 대상 VOCs의 특성에 따라 처리효율에서 증폭의 효과가 달라질 수 있다고 판단된다. 즉, 수분과 유기화합물의 상호 용해도 특

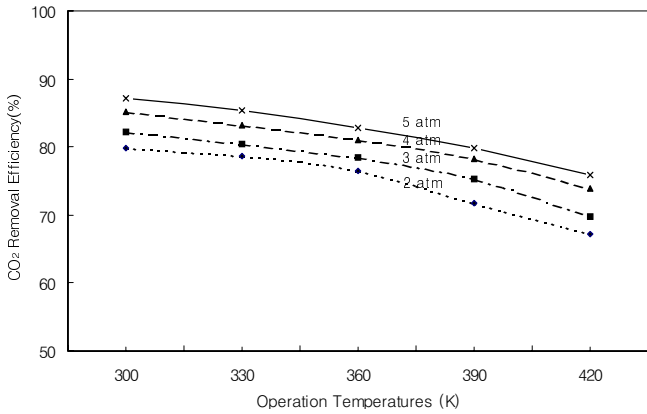


Figure 6. CO₂ removal efficiency at a relative humidity of 50%.

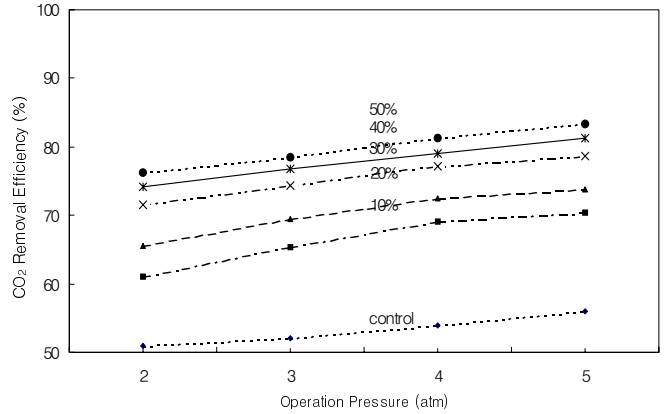


Figure 8. CO₂ removal efficiency with pressure and relative humidity at 360 K.

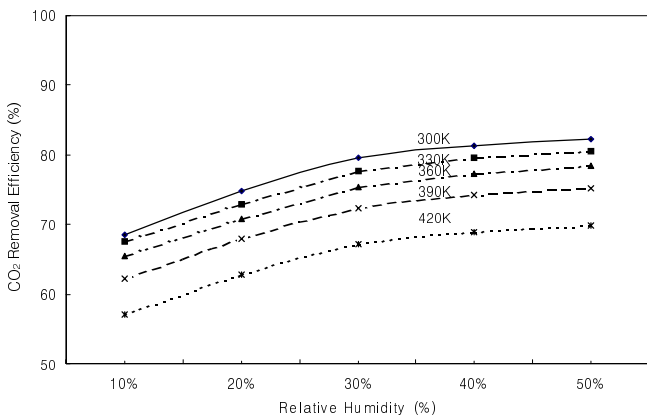


Figure 7. CO₂ removal efficiency with relative humidity at 3 atm.

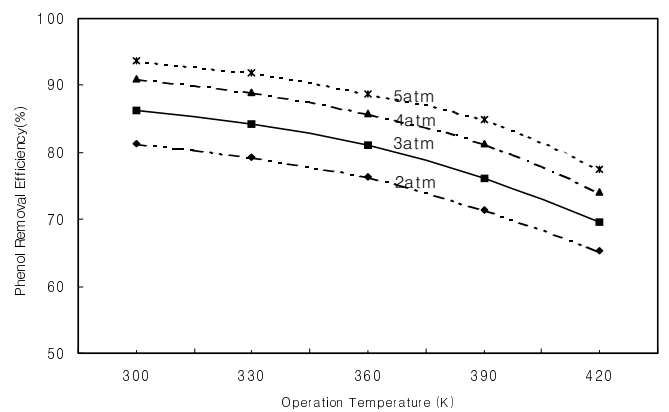


Figure 9. Phenol removal efficiency at a relative humidity of 50%.

성에 따라 증폭의 효과가 달라질 수 있기 때문이다.

3.2. 온도, 습도 및 압력이 처리효율에 미치는 영향

등엔탈피에서 J-T 계수의 변화는 단지 압력변화에 대한 온도의 변화를 나타내지만 처리 대상물질의 처리효율은 운전조건의 상태변화에 따른 물리화학적 특성에 미치는 영향에 의해 변화한다. 따라서 처리효율은 대상물질의 비점, 용해도 및 극성 등의 물리화학적 특성에 따라 온도나 습도의 영향을 받게 된다. 앞선 연구[7]의 toluene 처리효율은 습도가 증가함에 따라 CO₂와는 달리 효율이 떨어졌지만 다음의 결과에서와 같이 이번 연구대상물질인 phenol은 CO₂와 유사하게 영향을 미치는 결과로 나타났다.

3.2.1. CO₂의 처리효율

Figure 6에서와 같이 같은 압력과 수분에서 온도가 증가 할수록 CO₂ 처리효율은 감소하는 반면에, Figure 7에서는 같은 압력과 온도에서 수분이 증가함에 따라 처리효율은 증가하고 Figure 8에서는 같은 수분과 압력에서 압력이 증가함에 따라 처리효율은 증가함을 보여주고 있다. 이는 수분의 함량이 실험한 범위 내에서는 수분이 많을수록 CO₂의 직접적인 응축에 의한 효과보다 기체흡착 메카니즘의 흡착후 응축되는 간접적인 응축의 효과에 기인하는 것으로 판단된다. 이는 결과적으로 실험한 상대습도 범위인 10~50 %에서는 수분응축이 온도상승에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다. 이러한 수분의 흡

착이 주도되는 메카니즘에서는 피흡착물질이 친수성인지 혹은 소수성인지에 따라 제거 효율이 달라짐을 보여준다. 또한 비록 주입압력의 상승에 따라 J-T 계수가 증가하지만 반드시 제거효율이 증가되지는 않는 것으로 나타났다. CO₂ 제거효율이 Figure 8에서는 같은 온도에서 주입압력이 높을수록 높아지고, Figure 6에서는 온도가 높아지면 점차 감소하는 것으로 측정되었다. 그러나 Figure 8에서는 CO₂ 제거효율의 상승률은 주입압력의 상승률에 비해 현저히 낮고, 또한 상승률이 둔화되고 있는 것은 Figure 5의 주입압력의 증가에 따라 J-T 계수의 증가에도 불구하고 압력의 어느 한계를 넘게 되면 보텍스 사이클론 내에 유체의 흐름을 흐뜨리는 경향을 나타내기 때문인 것으로 판단된다.

결과적으로 CO₂ 특유의 화학적 특성으로 실험 범위 내에서는 수분의 함량이 증가할수록 제거효율은 증가함을 보여주며, 이는 용해도가 낮은 toluene과는 반대의 경향을 나타내고 있는 것으로도 해석된다. 즉, CO₂는 무극성인 탄소나 약한 극성을 나타내는 회분의 표면에서 일어나는 표면현상에 의한 수분의 응축과 흡착으로 CO₂의 제거효율을 증대시켜준다. 수분과 활성탄이 포함되지 않은 콘트롤 실험에서는 탄산가스의 제거효율이 압력의 증가에 따라 거의 선형에 가깝게 증가하고 있고, 수분 10%의 증가에 의해 제거 효율의 변화가 훨씬 더 높게 나오는 것은 명백하게 활성탄의 흡착에 기인한 것으로 판단된다. 온도는 J-T 계수 상승에 미치는 영향과는 반대로 흡착 메카니즘에 역으로 작용하여 탄산가스의 제거효율을 감소시키고 있다. 탄산가스의

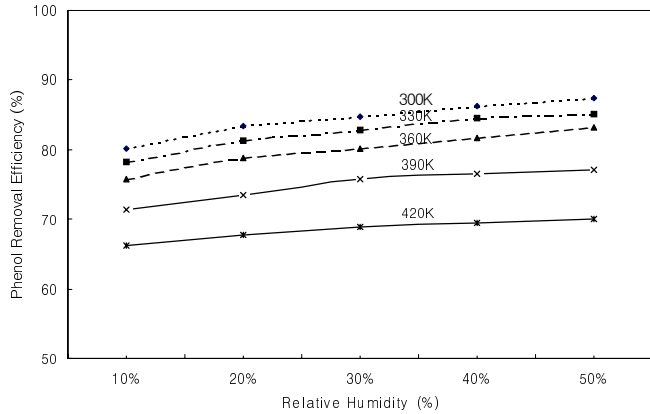


Figure 10. Phenol removal efficiency with relative humidity at 3 atm.

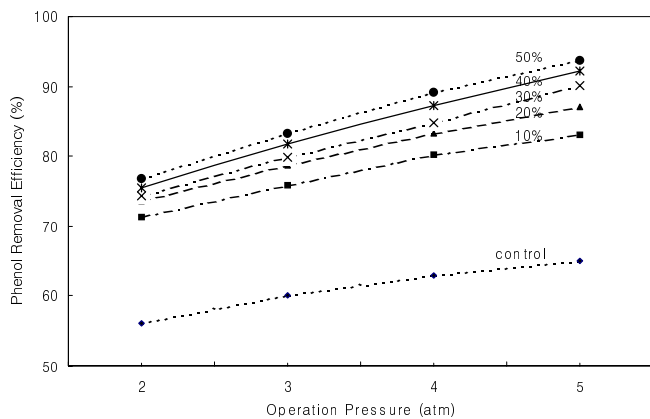


Figure 11. Phenol removal efficiency with pressure and relative humidity at 360 K.

높은 제거효율을 얻을 수 있는 운전조건은 일반적인 연소장치의 배출 가스 조건에서는 낮은 온도에서 높은 수분함량을 유지하면서 보텍스 사이클론의 안정된 유체흐름을 유지할 수 있는 최대의 압력으로 운전 함으로 얻을 수 있다.

3.2.2. Phenol 처리효율

Phenol의 비점이 대기압에서 455.15 K이고, 압력이 올라가면 비점이 상승한다. 15 °C, 1 atm에서 용해도는 82 g/L로 벤젠고리에 붙어있는 OH기의 극성과도 관계있는 것으로 널리 알려져 있다. Figure 9에서 상대습도 50%와 주어진 압력에서 온도의 상승에 따라 탄산가스에서와 같이 처리효율은 감소하고 있다. 또한 Figure 10에서는 주입압력 3 atm과 각각의 온도에서 습도의 증가에 따라 phenol의 처리효율은 증가하고 있음을 보여주고 있다. 습도의 증가에 따라 처리효율이 감소하는 toluene의 경우[7]와는 대조적이다. 습도가 상승하고 압력이 올라감으로 비점이 상승하여 용해도가 높아짐과 동시에 J-T 팽창에 의한 온도 강하로 응축, 응결, 흡착 등의 상호 증대효과에 기인하여 제거효율은 증폭된다. 흡착에 이용되는 활성탄의 흡착력도 압력과 용해도 서로간의 상호영향력에서 증폭현상이 나타남을 말해준다. Figure 9에서의 온도상승으로 인한 처리효율 저하는 일반적인 흡착효과에 미치는 영향으로 phenol의 기상상태에서 활성도가 높아져서 압력이 낮을수록, 그리고 비점이 가까워질수록 처리효율의 곡선은 급강하 할 것으로 예상된다. 따라서 주어진 압력범위내에서는 비점이하의 온도에서 처리하여야 높은 효율을 유지할 수 있을 것이다. Figure 3 ~5에서

Table 2. Parameters Measured for the Lab-scale Experiment

Parameters	In	Out	
		Treated Air Line	Hopper Line
Temperature (°C)	50~150	20~102	24~109
Pressure (atm)	2.0~5.0	1.2~3.4	1.2~1.5
CO ₂ (g/Sm ³)	85.5~95.0	9.1~10.8	65.9~83.5
H ₂ O (mg/Sm ³)	3,235~9,550	280~5,420	24.0~3,980
Phenol (mg/Sm ³)	347~450	14~107	284~403
Carbon mg/Sm ³)	365~408	38~157	262~378
Flow rate (Sm ³ /h)	37.5~38.5	32.0~33.4	4.73~6.83

Table 3. Maximum Removal Efficiency of Each Component

Parameters	In (kg/h)	Out (kg/h)	Removal Efficiency (%)
Carbon	0.0140	0.0019	86.1
H ₂ O	0.116~0.581	0.012~0.054	90.7
CO ₂	3.39	0.43	87.3
phenol	0.0145	0.0014	93.8

는 온도의 상승에 따라 J-T 계수가 상승함으로 phenol의 제거효율이 상승할 것으로 예측할 수 있으나 실제적으로는 감소되었고 이러한 현상은 탄산가스의 제거효율에서도 같은 경향을 나타내었다. 그리고 Figure 11에서 페놀의 제거효율이 압력의 증가에 따라 실험한 압력의 범위내에서는 꾸준히 증가하고 있음을 보여 주는 데 흡착의 메커니즘이 압력증가로 인하여 아주 강하게 작용하고 있음[11]을 나타낸다고 판단되는 부분이다. 수분과 활성탄을 전혀 포함하고 있지 않은 콘트를 실험의 결과보다 훨씬 높은 제거 효율에서도 쉽게 인지할 수 있을 것 같다.

이러한 결과는 실험범위 내에서 J-T 계수의 변화에 의한 영향보다 흡착이나 응축의 효과에 미치는 가스성분의 활동도가 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다[12]. 습도가 phenol의 제거효율에 미치는 영향은 toluene과는 반대로 상대습도가 높아질수록 효율은 높아졌다. 이러한 결과는 앞에서 설명되었듯이 수분이 강한 극성을 갖고 있어 극성이 거의 없는 toluene과는 반대현상으로 나타나는 것으로 볼 수 있다.

따라서 phenol이나 methanol과 같이 용해도가 높은 휘발성 유기화합물(VOCs)은 수분의 함량을 본 실험의 습도 범위 내에서는 높게, 온도는 낮게 유지하면서 유입압력을 적절한 흐름선을 유지할 수 있는 범위 내에서 높게 유지하면 높은 제거효율을 얻을 수가 있다고 판단 된다.

3.2.3. 입자물질 처리효율

Table 2에서는 측정된 각 성분의 최대 처리효율을 나타내었으며 이 중 분말활성탄의 제거 효율은 유입속도가 일반적인 설계기준속도(7~15 m/s)보다 낮게 5 m/s로 설정되었고, 입자물질처리리는 본 연구의 주요 목적 밖에 있었기 때문에 실험 조건에서는 86%로 낮게 나타났다. 입자상 물질의 제거효율은 제2차 처리장치인 고효율 사이클론에서 증가시킬 수 있으므로 유체의 흐름선을 유지하도록 앞선 실험[7]에서 보다 더 낮은 유속을 유지하였다. 공기 중의 산소와 질소는 다른 조성 성분에 비해 상대적으로 매우 높고 또한 연소과정이 없으므로 농도 변화를 무시하였다.

4. 결 론

본 연구의 결과로 보텍스 사이클론을 이용한 phenol 등과 같은 휘발성 유기화합물(VOCs)과 입자물질 동시제거는 phenol과 탄산가스 처리 효율의 연구결과로 기술적 가능성을 검증하였으나 toluene[7]의 처리효율과 비교해 볼 때 VOCs의 화학적, 물리적 특성에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 이에 따른 적절한 처리조건을 고려한 장치 설계에는 각 휘발성 물질의 화학적 특성을 고려하여 적용하여야 할 것으로 판단된다. 특히 본 연구의 phenol과 탄산가스 처리효율의 결과에서 나타났듯이 VOCs와 같이 발생하는 물질 중 친수성도나 친유성도의 정도에 따라 운전조건을 달리하여야 할 것으로 나타났으므로 VOCs의 처리효율도 일률적인 고려보다는 VOCs 각각의 물리적, 화학적인 특성에 따라야 할 것 같다. 또한 소각시설로부터 발생하는 배연가스가 회분과 수분을 많이 함유할 경우 상호간에 미치는 영향이 달리 나타날 것으로 판단된다. 즉, 회분이 많고 수분의 함량이 적을 경우 회분에 의한 흡착 메커니즘이 증대되어 VOCs의 제거 효율이 높아질 것이며, 반대의 경우 toluene과 같은 VOCs의 처리효율은 떨어질 것으로 믿어진다. 미연탄소[13] 표면은 단순한 먼지 같은 입자물질보다 일반적으로 비표면적이 높아 흡착 방해성 메커니즘의 영향이 줄어들 것으로 보이며, 탄산가스와 같은 산성가스의 흡수력[14]이 증가되어 처리효율이 증대될 것으로 나타났다. 그리고 탄소나 회분표면에서 일어나는 수분의 응축이나 흡착[14]은 toluene의 응축이나 흡착 메커니즘에 방해할 하는 일반적인 표면현상에 기인한 것으로 판단되므로 본 연구에서 수행한 상대습도 10~50% 범위의 수분함량에서는 J-T 계수에 미치는 영향은 다소 있으나 일반적인 소각시설의 수증기 발생량 범위에서는 수증기 응축에 의한 응축열은 압력강하에 의한 온도강하에 비해 영향이 약하므로 효율에 미치는 영향은 무시하여도 설계에서 오차는 많지 않을 것으로 보인다.

압축가스의 유입압력의 정도에 따라 온도강하도가 높아지나 과도한 압력은 오히려 사이클론 내부의 유체흐름에 방해할 주는 에디(eddies)의 생성으로 인해 흐름이 흐트러지므로 적절한 범위 내에서 가동되어야 할 것으로 나타났다.

따라서 phenol과 같이 높은 극성[15]을 갖고 용해도 내에서는 낮은 온도와 높은 수분함량을 유지하고, toluene과 같은 휘발성 유기화합물은 수분의 함량과 온도를 낮게 유지하면서 보텍스 사이클론의 안정된 유체흐름을 유지 할 수 있는 최대의 압력으로 운전함으로써 높은 처리 효율을 얻을 수가 있다고 판단된다. 그리고 활성탄소가 페놀이나 탄산가스 제거효율에 미치는 영향은 보텍스 사이클론의 자체에 의한 제거 효율만큼이나 높은 영향을 미치는 것으로 나타나 여기에 대해서는

좀더 심도 있게 체계적으로 별도의 연구가 필요하다고 판단된다.

본 연구실험에서 얻어진 결과는 주어진 보텍스 사이클론의 구조에서 얻어진 결과이므로 노즐과 사이클론의 형상에 따라 사전에 주어진 설계에 따른 처리효율 점검이 이루어져야 할 것이다.

사 사

본 연구는 (주)한그린텍과 호서대학교의 연구비에 의해 수행되었으며, 그동안 많은 연구지원에 대해서 감사로 드린다.

참 고 문 헌

1. R. Kassner and E. Knoernschild, Friction Laws and Energy Transfer in Circular Flow, USAF Air Material Command, Wright-Patterson AFB, Proj. No. LP-259, Tech. Rept. No. F-TR-2198-ND, GS-USAF, AF Base No.78 (1948).
2. H. Marshall, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **20**, 227 (1977).
3. C. U. Linderstorm-Lang, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **7**, 1195 (1964).
4. W. Sibbertsen, German Patent DE 3917888 Al Dec.12 (1990).
5. H. Takahama and Yokosawa, *J. Heat Transfer*, 103, May (1981).
6. 임계규, Vortex tube cyclone과 Joule-Thomson expansion 집합이론, (주)한그린텍, 11 (2001).
7. 임계규, 한국대기 환경학회지, **20**, 493 (2004).
8. Yang, W. S. and Sanko Industry Corporation, United States Patent 5,281,245 (1992).
9. Perry, Robert H., Don W. Green, and James O. Maloney, Perry's Chemical Engineers' Handbook, 2nd Edn., p. 133~135, McGraw-Hill, New York (1997).
10. 환경관리공단, 환경관리공단 자료집 7, 폐기물소각처리실무, 331 (1993).
11. J. Daz-Term, D. M. Nevskaja, A. J. Lopez-peinado, and A. Jerez, Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 187-188, 167 (2001).
12. E. N. and L. A. Carroll, *Chem. Eng. Progress*, **89**, 29 (1993).
13. 한국자원연구소, 석탄회중 미연탄소분 제거기술 개발연구, 53, (1997)
14. 오광중, 이상섭, 우광재, 문길호, 대한환경공학회지, **25**, 11 (2003)
15. H. Hart, Organic Chemistry, 6th Ed., Houghton Mifflin Company, Boston, 171 (2000).