

보텍스 사이클론을 이용한 Toluene과 CO₂ 처리효율에 관한 연구

A Study on Treatment Efficiency of Toluene and CO₂ using Vortex Cyclones

임 계 규

호서대학교 화학기술개발연구소 · 호서대학교 환경안전공학부
336-795 충남 아산시 배방면 세출리 산29-1
(2004년 1월 9일 접수, 2004년 7월 29일 채택)

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, Korea 336-795*

(Received 9 January 2004, accepted 29 July 2004)

Abstract

The principle of vortex tube and cyclone was introduced to enhance the treatment efficiency of waste air streams containing particulate matters, toluene, and others developed by Hangreen Tech, Ltd. and Hoseo Chemical and Industrial Technology R & D Center. Adsorption, condensation, and/or coagulation could be induced at low temperature zone formed by vortex tube and Joule-Thomson expansion. The pressurized air was introduced at the tangential direction into the cyclone system applied with the coaxial funnel tube. Easily condensable vapors such as toluene, carbon dioxide, and water vapor were adsorbed enforcedly on coagulated or condensed materials which were formed as cores for coagulation or condensation by themselves. These types of coagulation or condensation rates were rapidly promoted as the diameter being growing up. The maximum removal efficiency for carbon dioxide and toluene was achieved to about 87 and 90 percent, respectively. The Joule-Thomson coefficients were increased with the pressure of air injected in the range of the relative humidities between 10% and 30%. An optimum value was observed within the range of the tested temperatures at a fixed pressure. In conclusion, it could be identified that the treatment efficiency would be depended on the pressure of the process air introduced and physical and chemical characteristics of waste air streams containing target materials for a designed system. The final design parameters should be decided depending upon the given system and target materials.

Key words : Vortex tube, Cyclone, Joule-Thomson expansion, Adsorption, Toluene, VOCs

* Corresponding author
Tel : +82- (0)41-540-5751, E-mail : kklim@office.hoseo.ac.kr

1. 서 론

보텍스 튜브(vortex tube)의 이론을 입증한 여러 분야의 적용 실험 중에서 가장 일반적으로 통용된 것은 접선방향으로 부착된 원통실린더를 이용한 것이다. 이러한 실험에서는 노즐을 통하여 접선방향으로 유체를 유입하면 빠른 접선속도로 인하여 원주방향으로 회전하면서 보텍스(vortex)가 생성되며 바깥 쪽으로는 각속도(angular velocity)가 낮아지는 반면에 중심으로는 높아지는 자유 보텍스(free vortex)를 형성하게 된다(Kassner and Knoernschild, 1948). 그리고 고압부분에서는 고온이, 저압부분에서는 저온이 형성되며, 온도차이는 일반적으로 30~70°C 정도의 범위에 달하는 것으로 알려져 있다(Marshall, 1977). 이러한 보텍스 튜브는 내부의 에너지 분리와 물질분리에 사용가능하며(Takahama and Ykosawa, 1981), 이러한 분리효과는 저온공기 유량비와 보텍스 튜브의 지름 비에 의존하는 것으로 알려져 있다(Lindstorm-Lang, 1964). 유속에 대한 의존성은 무차원 분석에 따라 최적분리효과를 얻을 수 있는 레이놀즈수(reynolds number)로도 표현되었다(Marshall, 1997). 또한 보텍스 튜브의 이론을 디젤엔진의 배기가스 중 미세입자 분리에도 시도 하였다(Sibbertsen, 1990). 이러한 보텍스 튜브의 원리를 이용하여 보텍스 사이클론이 개발되었고, 나아가 입자물질 뿐만 아니라 기상의 오염물질도 함께 분리하는 응용기술로 까지 발전하게 되었다(임계규, 2001). 그러나 일반적인 사이클론은 처리공정 중에 마찰손실과 유체의 유선(stream lines)에서 에디(eddies)의 혼란에 의하여 충분한 보텍스 튜브의 효과와 원심력을 얻지 못하므로 미세입자의 제거나 온도강하의 정도가 효율적이지 못하여 조대입자상 물질의 처리용으로만 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 위한 연구를 하였다. 연구를 하게 된 배경으로는 연소 시에는 반드시 탄소성분과 회분성분(한국자원연구소, 1997)이 함께 함유된 분진과 수증기의 입자상 물질이 발생하며, 그 밖의 유해가스가 이산화

탄소와 함께 발생함으로 이들을 응축, 흡착, 응결 등의 분리 메카니즘에 적용할 수 있는 적절한 조건(Carrol and Carroll, 1993)을 갖추고 있기 때문이었다. 노즐을 통해 주입되는 압축가스는 보텍스 사이클론의 주요 분리 메카니즘에 도움을 주는 고온 유체영역과 저온 유체영역의 환경을 촉진시키는 역할을 하며, 저온유체영역에서는 고비점 성분의 물질이 미립자 표면에 응축이 일어나 입경 성장의 핵이나 촉진제가 되어 처리효율을 증대시킨다. 미연탄소성분의 미립자인 경우는 유해가스의 흡착(Nevskaia and Daz-Term, 2001)도 함께 일어나게 된다. 또한 압축가스의 적절한 분사는 입구부분의 난류에 의한 에디(eddies)생성도 현저히 줄여주어 응축가스와 입자상 물질을 쉽게 분리제거 할 수 있는 역할도 하게 된다.

2. 실험 및 방법

2.1 실험장치

실험실 장치는 그림 1에서와 같이 보텍스 사이클론에 유입될 혼합가스를 만드는데 필요한 실린더 탄산가스와 탄소 공급기, Toluene 증발장치, 그리고 습도를 적절히 조절하는데 필요한 가슴장치로 구성되어 있다. 분석 장비로는 GC (Shimadzu GC-14B, FID), Stack Gas Analyzer (Bacharach, CA300), 습도계, 입자상물질 측정기의 비교적 간단한 장비가 사용되었으며 일부의 분석은 국내 G사와 C사가 대행하였다. 실험실장치는 그림 2 파이롯트 장치의 A, B, H 및 G 부분에 해당하고, 파이롯트 장치는 그림 2의 전체 부분으로 구성되어 있다. 이 장치는 외부로부터 압축공기를 사이클론 속에 넣어넣어 보텍스 튜브의 효과와 사이클론 집진효과를 동시에 얻을 수 있는 장치로 고안되었다. 이 장치는 기본적으로 이미 연구개발된 장치(Yang and Sanko' Industry Co. 1992)의 유사장치이나 본 연구를 위한 보텍스 싸이클론의 압축된 공기분사를 위한 노즐과 내부의 보텍스 형성을 위한 콘부분을 새롭게 설계하였다. 노즐을 통한 압축공기의 팽창은 다음과 같은 Joule-Thomson (J-T) 팽창식에 의한다.

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

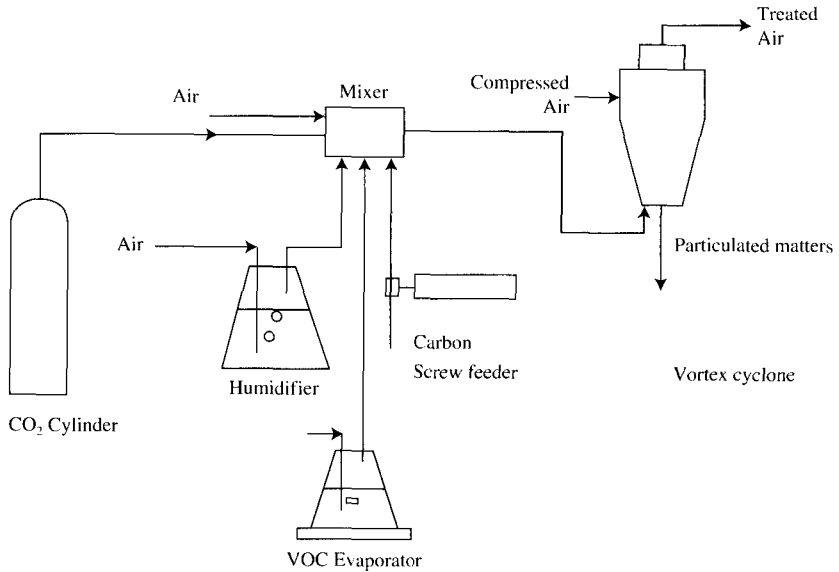


Fig. 1. Schematic of lab scale vortex cyclone.

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 (Perry's Chemical Engineers' Handbook, 1997)을 나타내므로 압력이 떨어지면 온도가 내려감을 의미한다.

그림 2에 있어서 소각로의 배연가스나 증발기의 증기는 D로 도입되어 외부 실린더 A와 B사이의 공간 안으로 상승되어 큰 B 내부로 반전되어 들어간다. 큰 B의 도입구에 외부로부터 압축된 공정공기 파이프 라인 H에 의해 공급되는 압축공기에 의해 보텍스(vortex)가 생기고, 큰 B의 중심부에서 저온이 생긴다.

여기서 응축이나 응결이 발생하여 먼지와 함께 원심력을 받아 벽 측면으로 돌아 밑 부분으로 하락하거나 반전된 흐름에 따라 다음단계의 고효율 사이클론에 유입되어 포집된다.

B부의 내부 콘(cone)은 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

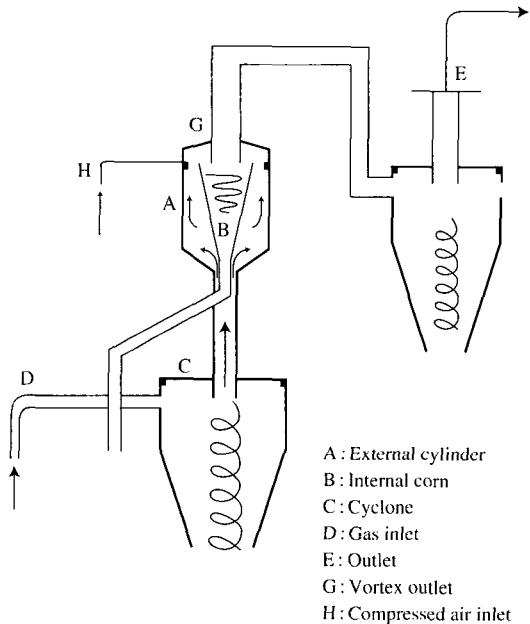


Fig. 2. Schematic of pilot vortex cyclone.

수분이나 흡착제를 유입할 수 있는 매체로도 사용하게 된다.

2. 2 실험방법

실험실 배연가스는 분말활성탄(입경 75 μm, 200 mesh 체잔분 10% 이하), 탄산가스, Toluene 및 습윤 공기를 배연가스 혼합조에 통과시켜 일정한 농도로 제조하였다. 이 혼합조는 투명한 아크릴재질로 만들어 내부의 상태를 눈으로 확인 할 수 있도록 하였다. 배연가스 조성율은 일반적인 도시 폐기물 소각로의 가스성분에 근접한 조성으로 표 1과 같이 유지하도록 하였다.

발표된 자료(환경관리공단, 1993)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. Toluene의 유입농도는 일정량의 공기를 액체 Toluene용기에 통과시켜 일정시간에 소모된 양으로 산출하였다. 입자물질 배출구에서는 공기 유량, CO₂, Toluene 및 수분의 농도, 입자물질의 양을 측정하였으며 처리가스의 배출구에서도 같은 인자들을 측정하여 표 1에서와 같이 물질수지(Material Balances)를 검증하였다. 실험에서는 실제 연소과정이 없기 때문에 산소의 농도는 공기 중의 산소 농도가 적용되었다. 수분의 농도 범위는 일반소각로에서 발생하는 근사수치 0.002 wt% (30 mg/Sm³)와 대기온도 27°C (80°F)에서의 상대습도 30%인 0.64 wt% (9.6 g/Sm³) 범위 내에서 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

일반적인 쓰레기 연소 시 발생하는 배연가스 조성에 가깝게 인위적으로 만든 실험용 조성가스로부터 얻은 실험결과는 표 1의 출구조성(Out)과 그림 3~17에서와 같다. 그리고 처리효율의 결과는 비록 실험설계(Experimental design)에서 선택한 제어변수들

Table 1. Parameters measured for the lab-scale experiment.

Parameters	In	Out	
		Treated air line	Hopper line
Temperature (°C)	50~150	23~110	25~120
Pressure (atm)	2.0~5.0	1.2~3.9	1.2~1.6
CO ₂ (g/Sm ³)	85.2~95.3	9.5~12.4	73.7~79.1
H ₂ O (mg/Sm ³)	3200~9600	310~5760	20.0~3840
Toluene (mg/Sm ³)	380~440	41~198	242~339
Carbon (mg/Sm ³)	362~402	54~181	221~308
Flow rate (Sm ³ /hr)	36.4~38.6	30.6~32.7	4.75~7.45

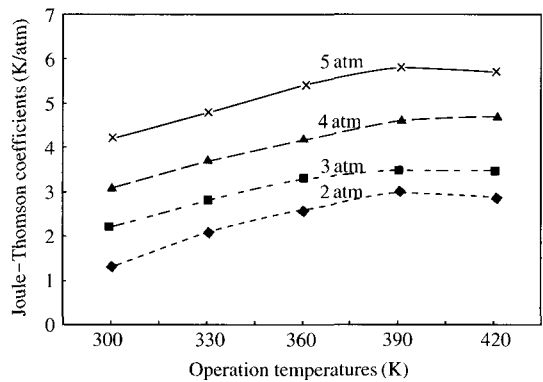


Fig. 3. Joule-Thomson coefficients with pressure and temperature at a relative humidity of 20%.

(Control variables) 간의 상호영향(Mutual effects)을 없도록 선택하여 제어변수(Control parameters)로 실험을 하였으나 다음의 결과에서와 같이 상호영향은 피할 수 없는 것으로 나타났다.

3. 1 압력, 온도 및 습도가 처리효율에 미치는 영향

그림 3~7에서 압축공기의 압력이 높게 주입 될수록 Joule-Thomson 계수는 실험한 상대습도의 범위 10~30% 내에서는 높아지는 것으로 측정되었으며, 그림 3에서는 실험한 압력의 범위 내에서는 온도가 높아짐에 따라 다소 상승을 하다가 감소하는 곡선으로 나타나 각각의 압력마다 최적치가 있을 수 있음을 의미하고 있다. 이는 압력, 온도 및 습도간의 상호 영향에서 어느 변수가 제어 변수인가에 따라 영향은 달리 나타난다.

습도의 영향력은 그림 4, 5에서와 같이 같은 압력

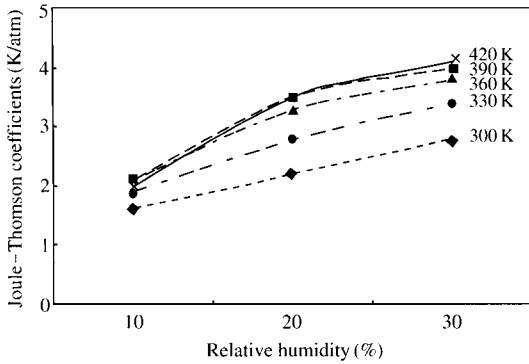


Fig. 4. Joule-Thomson coefficients with relative humidity at 3 atm.

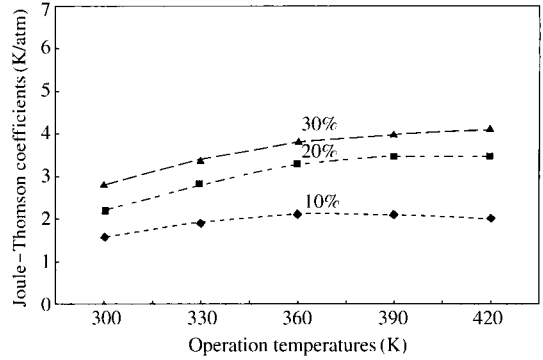


Fig. 6. Joule-Thomson coefficients with temperature at 3 atm.

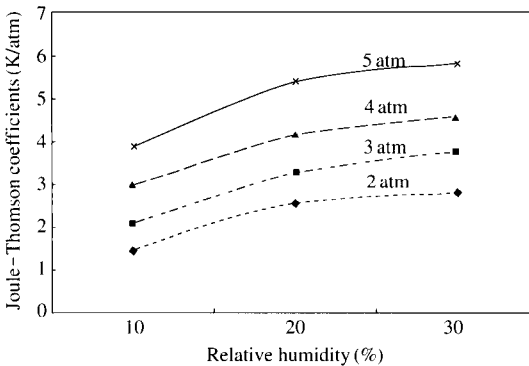


Fig. 5. Joule-Thomson coefficients with relative humidity at 360 K.

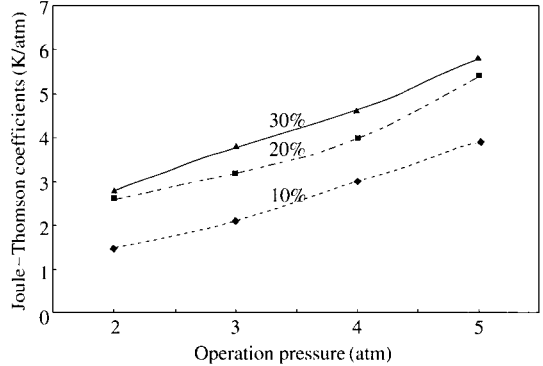


Fig. 7. Joule-Thomson coefficients with pressure and humidity at 360 K.

에서 습도가 증가 할수록 J-T계수가 상승하고 있고, 최적치의 온도도 점차 높아지고 있음을 알 수 있다. 이는 수분의 함량이 실험한 범위 내에서는 수분이 많을수록 직접적인 응축에 의한 효과보다 간접적인 응축의 효과를 나타내는 흡착의 메카니즘에 기인하는 것으로 판단된다. 결과적으로 실험한 상대습도 범위인 10~30%에서는 수분응축이 온도상승에 미치는 영향은 미미하였다. 온도와 습도가 J-T 계수에 미치는 영향은 그림 6과 7에서도 이 두변수의 증가에 따른 상승폭은 감소하는 반면 압력의 증가에 따른 상승폭은 증폭되는 것으로 나타나고 있다. 이러한 수분의 흡착이 주도되는 메카니즘에서는 피흡착물질이 친수성인지 혹은 소수성(Hart, 2000)인지에 따라 제거 효율이 달라진다. 또한 비록 주입압력의 상승에

따라 J-T 계수가 증가하지만 반드시 제거효율이 증가되지는 않는 것으로 나타났다. 과도하게 높은 압력은 보텍스 사이클론 내부에서 유체흐름선을 흐트러뜨리게 되기 때문이다.

3. 2 CO₂의 제거효율

그림 8과 12에서는 같은 온도에서 CO₂ 제거효율이 주입압력이 높을수록 높아지고, 온도가 높아지면 점차 감소하는 것으로 나타나고 있다. 그러나 그림 8, 10 및 12에서는 CO₂ 제거효율의 상승률은 주입압력의 상승률에 비해 현저히 낮고, 또한 상승률이 둔화되고 있는 것은 주입압력의 증가에 따라 J-T 계수의 증가에도 불구하고 압력의 어느 한계를 넘게 되면 보텍스 싸이클론 내에 유체의 흐름을 흐트러트리

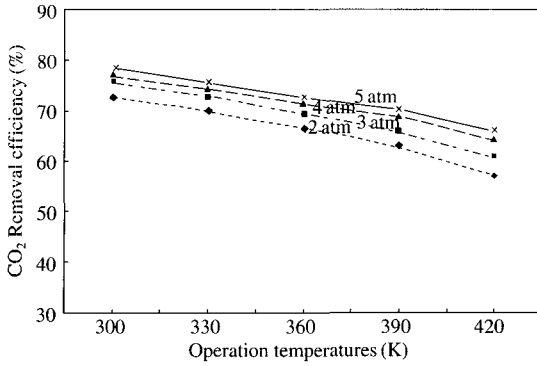


Fig. 8. CO₂ removal efficiency at a relative humidity of 20%.

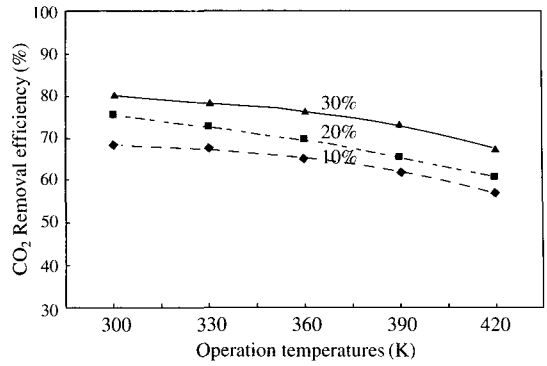


Fig. 11. CO₂ removal efficiency with temperature at 3 atm.

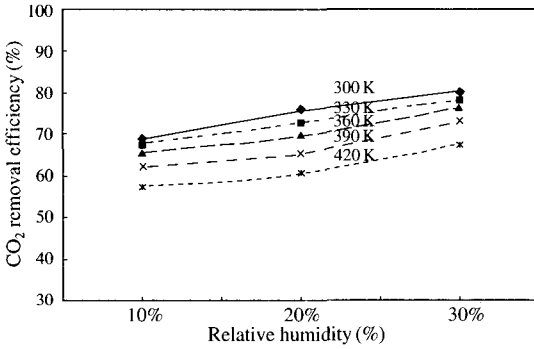


Fig. 9. CO₂ removal efficiency with relative humidity at 3 atm.

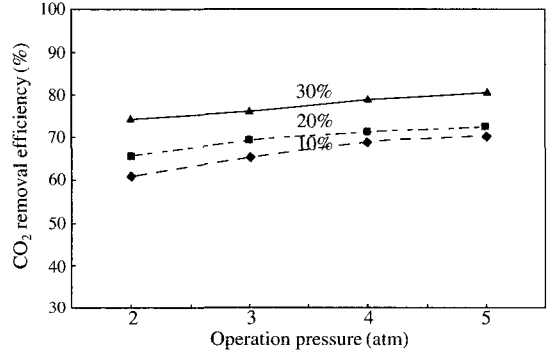


Fig. 12. CO₂ removal efficiency at 360 K.

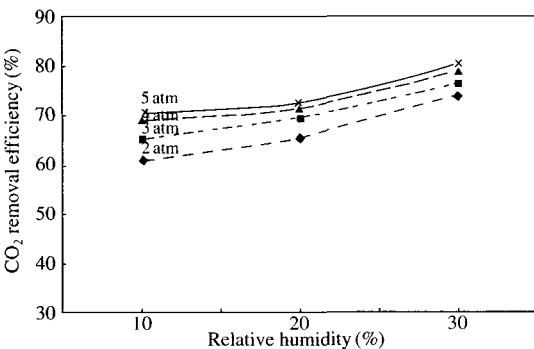


Fig. 10. CO₂ removal efficiency with humidity at 360 K.

는 경향을 나타내기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 그림 9, 10 및 12에서는 CO₂ 특유의 화학적 특성으로

실험 범위 내에서는 수분의 함량이 증가 할수록 제거효율은 증가함을 보여주며, 이는 소수성인 Toluene 과는 반대의 경향을 나타내고 있다. 즉, CO₂는 무극성인 탄소나 약한 극성을 나타내는 희분의 표면에서 일어나는 표면현상에 의한 수분의 직접적인 응축이나 흡착(오광중 등, 2003)으로 CO₂의 제거효율을 증대시켜준다. 온도는 J-T 계수 상승에 미치는 영향과는 반대로 흡착 메카니즘에 역으로 작용하여 탄산가스의 제거효율을 감소시키고 있으며 이러한 현상은 그림 11에서 잘 보여주고 있다. 탄산가스의 높은 제거효율을 얻을 수 있는 운전조건은 일반적인 연소장치에의 배출가스 조건에서는 낮은 온도에서 높은 수분 함량을 유지하면서 보텍스 사이클론의 안정된 유체 흐름을 유지 할 수 있는 최대의 압력으로 운전함으로써 얻을 수 있을 것 같다.

Table 2. Maximum removal efficiency of each component.

Parameters	In (kg/hr)	Out (kg/hr)	Removal efficiency (%)	Remarks
Carbon	0.014	0.0015	89.1	Maximum
H ₂ O	0.116~0.349	0.012~0.033	89.7	Maximum
CO ₂	3.39	0.43	87.3	Maximum
Toluene	0.0145	0.0014	90.3	Maximum

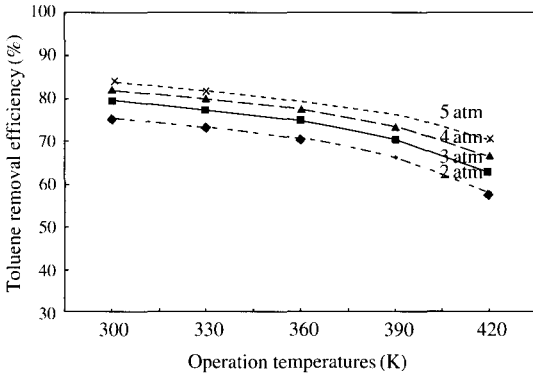


Fig. 13. Toluene removal efficiency at a relative humidity of 20%.

표 2에는 측정된 각 성분의 최대 처리효율을 나타내었으며 이중 분말활성탄의 제거 효율은 유입속도가 일반적인 설계 기준속도(7~15 m/s)보다 낮게 5 m/s로 설정되었고, 입자물질 처리는 본 연구의 주요 목적 밖에 있기 때문이었으며, 실험 조건에서는 예측한 바와 같이 89%로 낮게 나타났다. 입자상 물질의 제거효율은 제2차 처리장치인 고효율 사이클론에서 증가시킬 수 있으므로 유체의 흐름선을 유지하도록 다소 낮은 유속을 유지 하였다. 공기 중의 산소와 질소는 다른 조성 성분에 비해 상대적으로 매우 높은 농도이므로 변화를 무시하였다.

3. 3 Toluene 제거효율

그림 3, 4 및 6에서는 온도의 상승에 따라 J-T 계수가 상승함으로 Toluene의 제거효율이 상승할 것으로 예측할 수 있다. 그러나 실제적으로는 Toluene의 제거 효율은 그림 13, 14 및 16에서 관찰되듯이 같은 주입압력에서 온도가 높아짐에 따라 감소되었고 이러한 현상은 탄산가스의 제거효율에서도 같은 경향을 나타내었다. 이러한 결과는 실험범위 내에서 J-T

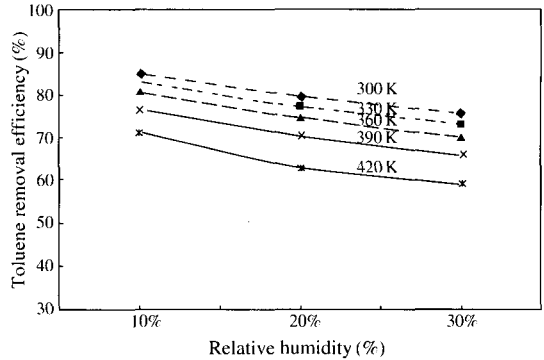


Fig. 14. Toluene removal efficiency with relative humidity at 3 atm.

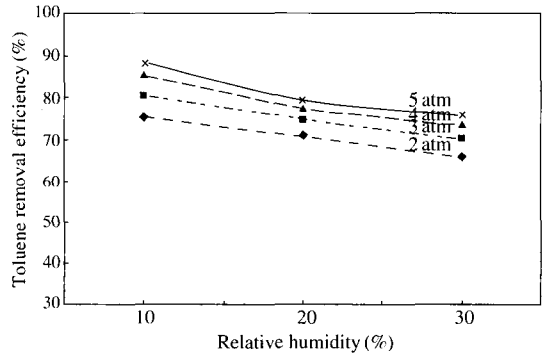


Fig. 15. Toluene removal efficiency with relative humidity at 360 K.

계수의 변화에 의한 영향보다 흡착이나 응축의 효과에 미치는 가스성분의 활동도가 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 습도가 Toluene의 제거효율에 미치는 영향은 그림 14~16에서와 같이 탄산가스와는 반대로 상대습도가 높아질수록 효율은 낮아졌다. 이러한 결과는 앞에서 설명되었듯이 수분이 강한 극성을 갖고 있어 극성이 거의 없는 Toluene의 수분에 대한 역현상으로 나타나는 것으로 볼 수 있다. 주입압력의 상승에 따른 영향은 탄산가스에서와 같이 제거효율을 상승시키는 결과가 그림 17에서와 같이 관찰되었다.

따라서 Toluene과 같은 휘발성 유기화합물은 수분의 함량과 온도를 낮게 유지하면서 유입압력을 적절한 흐름선을 유지할 수 있는 범위 내에서 최대의 효

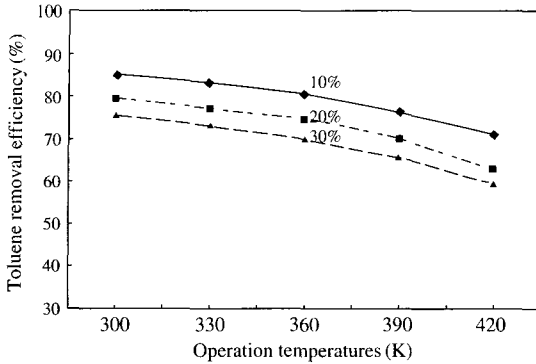


Fig. 16. Toluene Removal efficiency with temperature at 3 atm.

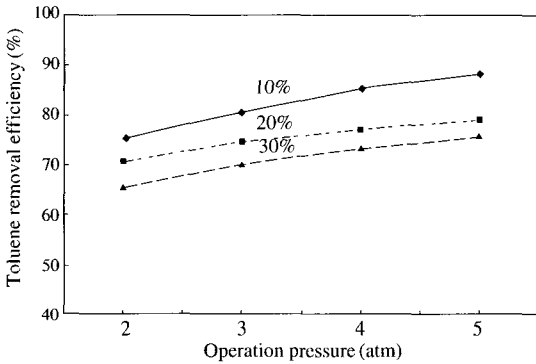


Fig. 17. Toluene Removal efficiency at 360 K.

율을 얻을 수가 있다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구의 결과로 보텍스 사이클론을 이용한 휘발성 유기화합물질 (VOCs)과 입자물질 동시제거는 Toluene과 탄산가스 처리 효율의 연구결과로 기술적 가능성을 검증하였으나 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 Toluene과 탄산가스 처리효율의 결과에서 나타났듯이 VOCs와 같이 발생하는 물질 중 친수성도나 친유성도의 정도

에 따라 운전조건을 달리하여야 할 것으로 나타났다.

미연탄소 표면은 일반적으로 비표면적이 높아 흡착 방해성 메카니즘의 영향이 줄어들 것으로 보이며, 탄산가스와 같은 산성가스의 흡수력이 증가되어 처리효율이 증대될 것으로 나타났다. 그리고 수분이 탄소나 회분표면에서 일어나는 응축이나 흡착은 Toluene의 응축이나 흡착 메카니즘에 방해를 하는 일반적인 표면현상에 기인한 것으로 판단되므로 본 연구에서 수행한 상대습도 10~30% 범위의 수분함량에서는 Joule-Thomson 계수에 미치는 영향은 다소 있었다. 그러나 일반적인 소각시설의 수증기 발생량 범위에서는 수증기 응축에 의한 응축열은 압력강하에 의한 온도강하에 비해 영향이 약하였다.

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

따라서 탄산가스와 같이 흡수성이 강한 물질은 낮은 온도에서 높은 수분함량을 유지하고, Toluene과 같은 휘발성 유기화합물은 수분의 함량과 온도를 낮게 유지하면서 보텍스 사이클론의 안정된 유체흐름을 유지할 수 있는 최대의 압력으로 운전함으로써 높은 처리효율을 얻을 수가 있다고 판단된다. 물론 이외의 최적 운전 요건도 유지하여야 한다.

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

감사의 글

본 연구는 (주)한그린텍과 호서대학교의 교내 연구 지원금에 의해 수행되었으며, 그동안 많은 연구지원에 대해서 감사를 드린다.

참 고 문 헌

오광중, 이상섭, 우광제, 문진호 (2003) 유동층 공정에서 Dry Sorbent의 마모 및 CO₂ 흡착특성, 대한환경공학

- 회지, 25 (11), 1375-1381.
- 임계규 (2001) Vortex tube cyclone과 Joule-Thomson expansion 집합이론, 한그린테크주식회사, 11-12.
- 한국자원연구소 (1997) 석탄회중 미연탄소분 제거기술 개발 연구, 53-55.
- 환경관리공단 (1993) 환경관리공단 자료집 7, 폐기물소각처리실무, 331-333.
- Carroll, E.N. and L.A. Carroll (1993) Select the best VOC control strategy, Chemical Engineering Progress, 89, 29.
- Hart, A. (2000) Organic Chemistry, 6th Ed. Houghton Mifflin Company, Boston, 171.
- Kassner, R. and E. Knoernschild (1948) 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.
- Linderstorm-Lang, C.U. (1964) Gas separation in the Ranque-Hilsch vortex tube, Int. J. Heat Mass Transfer, 7, 1195-1206.
- Marshall, H. (1977) Effect of operating conditions, physical size and fluid characteristics on the gas separation performance of Linderstorm-Lang vortex tube, Int. J. Heat Mass Transfer, 20, 227-231.
- Nevskaia, D.M., J. Daz-Term, A.J. Lpez-Peinado, and A. Jerez (2001) Porosity and adsorption properties of an activated charcoal, Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 187-188, 167.
- Pery, Robert H., Don W. Green, and James O. Maloney (1997) Perry's Chemical Engineers' Handbook, McGraw-Hill, New York, NY. 2-133 - 135.
- Sibbertsen, W. (1990) vorrichtung zum Entfernen oxidierbarer bzw verrennbarer Partikel aus Abgasen, German patent office, patent DE 3917888 Al Dec. 12.
- Takahama, H. and H. Ykosawa (1981) Energy Separation in Vortex Tube with a Divergent Chamber, J. Heat Transfer, 103, May.
- Yang, W.S. and Sanko Industry Corpoation (1992) Flue gas treatment apparatus and flue gas treatment system, United States Patent 5, 281, 245.