

Water-cyclone 장치의 미세입자, 기체상 오염 물질 처리 방법 연구 및 실험적 검증

Experimental study and Verification of Fine Particles and Gaseous Pollutants Removal on Water-cyclone System

권성안¹, 이상준²
Sung-An Kwon¹, Sang-Jun Lee²

Recently, cyclone is used to collect fine particles in various industrial processes, but many studies are undergoing because of cyclone's low collection efficiency. Thus, we have developed water-cyclone which minimizes disadvantages of existing conventional cyclone and designed 3 different stages depending on precessing materials. Stage 1 collects particles by using principles of conventional cyclone. Stage 2 processes acid gases by extending contact time with water film through vortex movement. Stage 3 processes uncollected substances in stage 1 and 2. Hence, we evaluate water-cyclone by experimental verification.

Keywords : Cyclone, Particle, Water-film, Collection efficiency, Vortex

1. 서론

최근 다양한 산업공정의 발전으로 인해 많은 미세입자들이 배출되고 있으며, 이 미세입자들은 인체에 아주 유해한 물질들이 포함되어 있어 이를 제거하기 위해 전기집진기, 여과집진기, 세정기 등 다양한 장치들이 사용되고 있다. 이 중 사이클론은 구조 및 디자인이 간단하고 경제적이며 유지보수가 손쉽다는 장점(Xiang, Park, & Lee., 2001)으로 1800년대 후반에 도입된 이래 산업 공정 및 처리공정상 많이 사용되었다. 또한 Stairmnad에 의해 일반사이클론의 효율을 극대화 할 수 있도록 많은 시행착오 끝에 각 부분의 치수를 사이클론의 몸체 반경에 대한 비율로 나타내었으나(Ko & Kim; 2012) 5 μ m 이하의 미세입자 처리가 어려워(Stern, 1986; Masters, 2007) 전처리 장치로 주로 사용되었다.

이러한 단점을 보완하기 위해 지속적으로 사이클론의 크기와 처리용량을 달리하고(Smith, Iozia & Harris, 1983; Dirgo & Leith, 1985; Iozia & Leith, 1989; Kim & Lee, 1990), 배출 배관에 beds를 충전(Jung, Xiang, Kim, Lim & Lee, 2004), 가스유입구 2개를 설치(Zhao, Shen, & Kang, 2004; Yoshida, Inada, Fukui & Yamamoto, 2009), cone의 직경을 변경하여 입자가 재비산(re-entrainment)하는 비율을 낮추려고 시도하는(Xiang, Park, & Lee, 2001; Chuah, Gim bun, & Choong, 2006)등 집진효율을 강화하기 위한 다양한 연구가 이루어지고 있다.

이와 같은 연구들과 더불어 본 연구에서는 5 μ m 이하의 미세입자까지도 처리 가능한 사이클론을 개발하고자 세정기와 사이클론의 원리를

¹정회원, 평택대학교 환경에너지기술융합연구센터 연구원, 工博 ¹Post doctoral fellow, Mie University SVBL, PhD.
²교신저자, 평택대학교 환경융합시스템학과 교수, 工博 ²Corresponding Author, Professor Dept. of Architecture
E-mail : sjlee2026@ptu.ac.kr Daehan College of Science & Technology, Prof., Ph.D

접목시킨 Water-cyclone을 개발하여 미세입자 및 기체상 오염 물질의 제거 성능을 확인하였다.

2. 연구 방법

2.1 Water cyclone의 설계 및 원리

Water-cyclone은 Stage 1-3의 구성으로 되어 있다. Stage 1은 고효율 집진기인 Pencil cyclone을 벤츄리(Venturi) 효과가 나타나도록 변형하였으며, Stage 2는 물을 순환시켜주어 내벽에 수막을 형성하여 입자는 흡착되고, 가스는 수용될 수 있도록 하였다. 마지막으로 Stage 3의 경우는 Stage 2에서 가스의 흐름으로 발생될 수 있는 미세 액적을 처리할 수 있도록 Fig. 1과 같이 설계하였다.

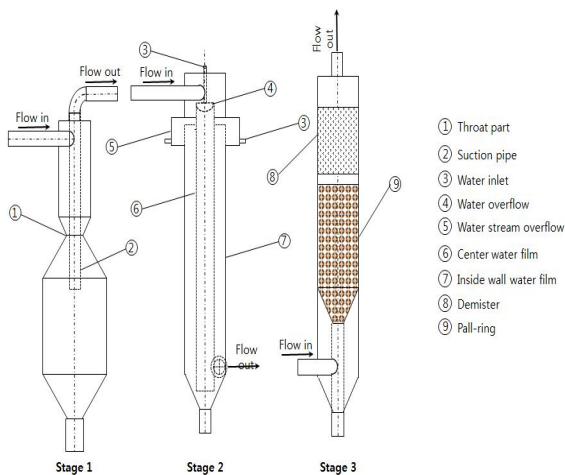


Fig. 1. Design and composition of Water-cyclone.

이와 같이 세정과 같이 살수를 통해 입자와의 접촉면적을 넓혀 제거하는 방식과는 달리 물이 넘쳐흐르게 하여 내벽에 수막을 형성할 수 있도록 하였다. 즉, 원심력에 의해 분리된 입자들은 Side water overflow zone(Fig. 1 ③)에 의해 형성되는 Inside wall water film에 충돌 및 흡착되어 제거되도록 하였으며, 원심력에 의해 분리되기 어려운 선회류 중심부의 미세입자들은 Top water overflow zone(Fig. 1 ②)에 의해 생성된 Center wall water film에 의해 충돌 및 흡착되어 제거될 수 있도록 하였다. 또한 Side water overflow zone에 의해 생성되는 수막은 가스의 흐름과 동일한 방향으로 생성되어 유입되도록 설계하여 가스 선회류 형성에 영향이 없을 수 있도록 하였다.

2.2 미세입자 제거 실험 방법

Water-cyclone은 음압의 조건에서 운전 하였으며, 이는 후단 송풍기를 이용하였다. 입자의 유입은 상용된 Al₂O₃ 입자를 사용하므로 정확한 크기의 입자를 투입하였으며, 투입 방법은 펌프의 유량과 진동에 의해 부유시켜 Water-cyclone 내에 생성되는 음압에 의해 자연스럽게 유입될 수 있도록 Fig. 2와 같이 설치 하였다. 실험에 사용한 Al₂O₃ 입자는 분자량 101.9g/mol, 밀도 3.97g/cm³의 불활성 백색 입자로 1, 5, 10 그리고 20μm의 입자를 Fig. 3과 같이 SEM(scanning electron microscope)으로 입자크기 확인 후 유량 100~1,000L/min으로 실험을 진행 하였다.

입자의 유입량은 MFC(mass flow controller)로 조절하여 전체 유입 유량에 따른 일정 농도의 입자가 유입될 수 있도록 하였으며, Water-cyclone 하부에는 Circulation water tank를 만들어 Water pump를 통해 물을 순환시킬 수 있도록 설치하여 주었으며, 물이 유입되는 각 배관마다 밸브를 설치하여 유입량을 조절하였다.

Water-cyclone으로 유입되는 물은 상수를 사용하였으며, 70L/min급 펌프를 사용하여 순환되도록 하고, 실제 Water-film을 이루는 물 순환량은 총 20, 40L/min으로 하였다. Water-cyclone 전, 후단에는 PT(pressure transmitter) sensor(S-10, WIKA KOREA)를 설치하여 압력손실을 확인 하였으며, 유입되는 입자량은 입자가 충전된 (charged) 병(case)의 전, 후 무게 차이를 측정하고, 배출된 입자량은 배출 배관에 설치된 Filter의 여과 전, 후 무게 차이를 측정하여 집진율을 계산하였다.

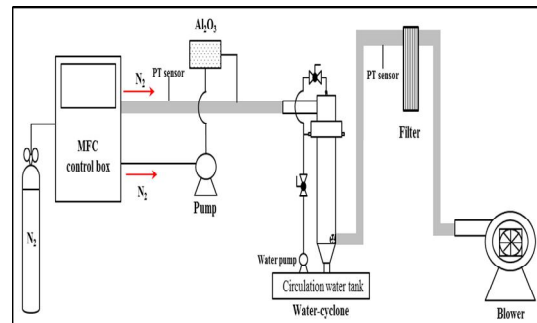


Fig. 2. Water-cyclone particle experimental flow scheme.

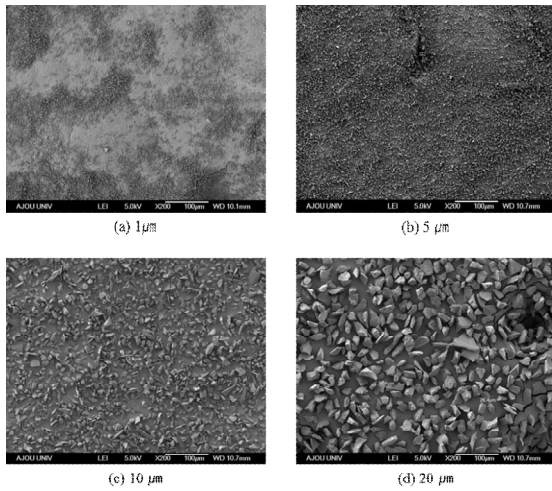


Fig. 3. SEM images of Al₂O₃particles.

2-3. 기체상 오염 물질 제거 실험 방법

기체상 오염 물질인 HCl, SO₂를 제거하기 위한 실험 조건의 경우 미세입자 제거 실험 방법과 동일한 조건이며, 투입 가스 변경과 측정 방법을 변경하였다. 이는 그림 4와 같다. 측정 방법의 경우 FT-IR(Midac社, USA) 10cm-cell을 이용하여 Inlet, Outlet을 실시간 측정하였으며, 측정 전과 후 Calibration을 통해 오차를 최소화하였다.

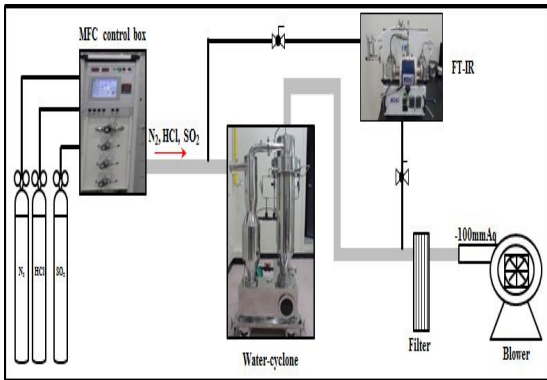


Fig. 4 Water-cyclone gas experimental flow scheme

3. 결과 및 고찰

3-1. 미세입자 제거 실험 결과

Water-cyclone에 물을 유입하지 않아 water film이 없을 때와 물을 순환하여 water film이 있을 때를 비교하기 위해 실험을 진행하였다. 입자의 유입 농도는 10,000mg/m³로 일정하게 유입하였으며, 모든 실험은 오차를 최소화하기

위해 반복하여 평균값을 사용하였다.

그림 5~8은 유량에 따른 입자 크기 별 집진율을 나타내었다. 집진율은 크게 물 공급량이 있을 때와 없을 때의 차이가 명확하게 나타났으며, 1,000L/min일 때 최대 30% 차이가 나는 것을 확인 할 수 있다. 또한 물 공급량이 없을 때는 유량이 증가하면서 제거율이 낮아지는 반면 물 공급량이 있을 때는 유량이 증가하면서 제거율이 올라가게 나타났다. 1µm의 경우 평균 집진율 85%, 5µm 평균 집진율 89%, 10µm 평균 집진율 92%, 20µm 평균 집진율 94%로 나타났다.

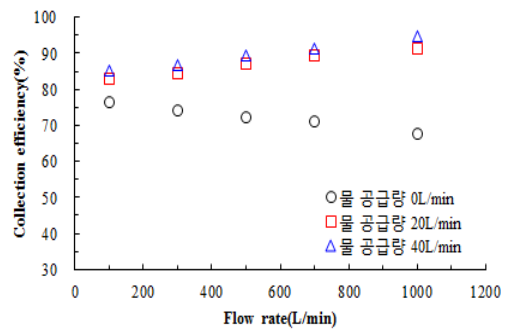


Fig. 5. 1µm particle collection efficiency results.

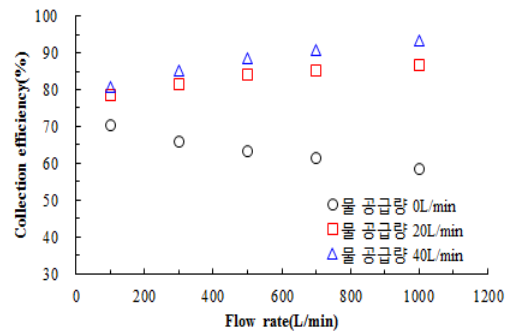


Fig. 6. 5µm particle collection efficiency results.

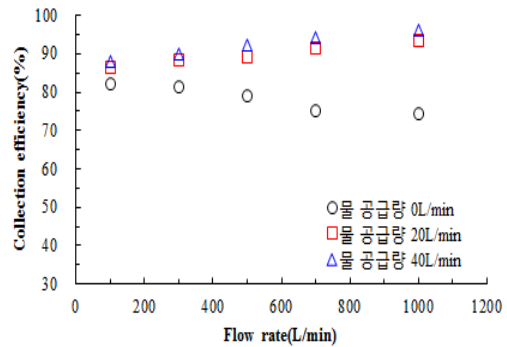


Fig. 7. 10µm particle collection efficiency results.

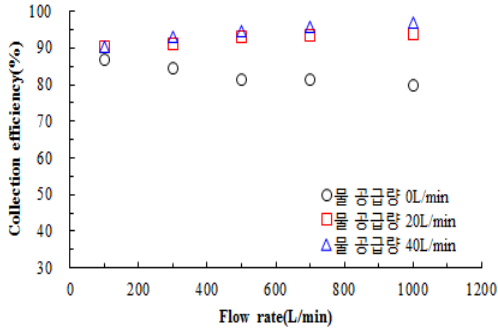


Fig. 8. 20µm particle collection efficiency results.

그림 9는 1, 5, 10, 20µm의 입자를 동일한 비율로 혼합한 혼합입자이며, 평균 집진율 90% 이상 높은 집진율을 나타내고 있다.

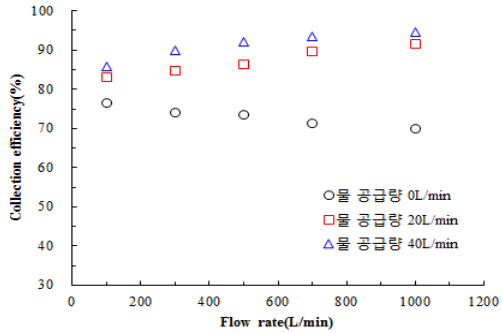


Fig. 9. Mixed particle collection efficiency results.

3-2. 기체상 오염 물질 제거 실험 결과

기체상 오염 물질인 HCl과 SO₂의 용해도는 20°C, 1atm에서 각각 70g/100ml와 10.5g/100ml로 물에 잘 녹는 편이라 할 수 있다. 따라서 유입 농도 500ppm, 1,000ppm일 때 유량에 따른 처리 효율은 확인한 결과 그림 10~13과 같다. HCl이 SO₂ 보다 용해도가 높아 처리 효율의 경우 HCl이 약간 높은 것을 확인하였으며, 미세입자 집진율과 달리 유량이 증가하면서 처리 효율이 낮아지는 것을 확인 할 수 있다.

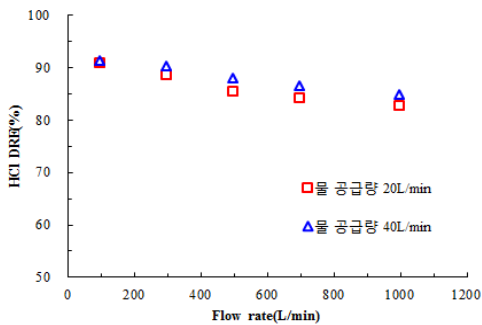


Fig. 10. HCl 500ppm removal efficiency results.

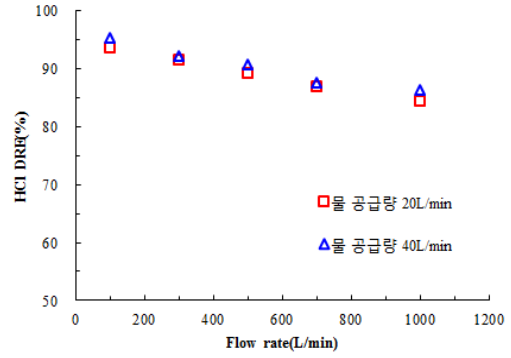


Fig. 11. HCl 1,000ppm removal efficiency results.

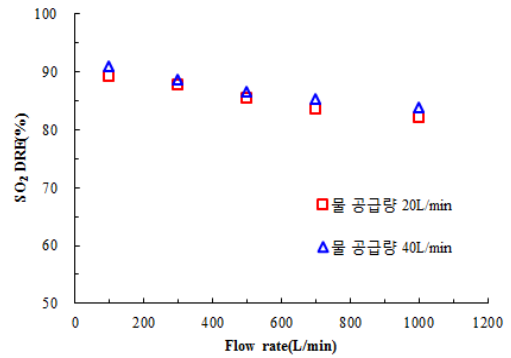


Fig. 12. SO₂ 500ppm removal efficiency results.

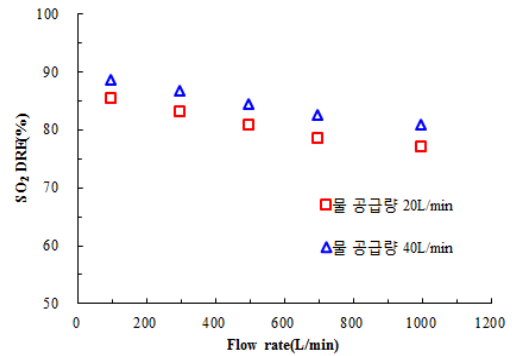


Fig. 13. SO₂ 1,000ppm removal efficiency results.

그림 10과 11의 경우 HCl 500, 1,000ppm의 처리 효율 결과이며 물 공급량 20L/min일 때 각각 평균 86%, 89% 처리 효율을 나타냈으며, 물 공급량 40L/min일 때 각각 평균 88%, 90%의 처리 효율이 나타났다.

그림 12와 13의 경우 SO₂ 500, 1,000ppm의 처리 효율 결과이며 물 공급량 20L/min일 때 각각 평균 81%, 85% 처리 효율을 나타냈으며, 물 공급량 40L/min일 때 각각 평균 84%, 87%의 처리 효율이 나타났다.

4. 결론

본 연구에서 미세입자의 경우 Water film이 있을 때가 없을 때보다 최대 30% 이상 향상된 집진율을 나타냈으며, 물 공급량에 따른 차이는 나타나지 않았다. 또한 Cyclone의 원리를 이용한 system으로 유량이 클 경우 큰 선회류의 작용으로 인해 미세입자 집진율이 더 높은 것으로 나타났다. 기체상 오염 물질인 HCl과 SO₂의 경우는 물 공급량에 따른 처리 효율 차이가 거의 없으며, 유량이 클 경우 미세입자 집진율과 반대로 처리 효율이 떨어지는 것을 확인하였다.

즉 Water film의 경우 유량이 커질수록 미세입자는 선회류에 의해 물과 접촉할 수 있는 면적을 넓혀주었기 때문에 집진율이 높지만 기체의 경우 Water film을 통과해 처리 효율이 낮아지는 것으로 예상되므로 최적의 물 공급량과 적절한 가스처리 유속에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것이라 판단된다.

사사(私事)

본 연구는 환경부 글로벌탑 환경기술개발사업 중 Non-CO₂ 온실가스 저감기술개발 사업의 지원에서 지원받았습니다.

(과제 번호 : 401-111-007)

참고문헌

1) Xiang, R., Park, S. H., Lee, K. W. Effects of cone dimension on cyclone performance. J. of Aerosol science, 32, 549-561.(2001)

2) Kim, C. L., Kwon, S. A., Lee, S. J., & Ko, C. B. Experimental Study on Particle and Soluble Gas Removal Efficiency of Water-cyclone. J. of Korean Society for Atmospheric Environment, 29(2), 163~170.(2013)

3) Stern, A.C. Third Edition, Air Pollution. Volume VII, academic press.(1986)

4) Masters, G.M. Introduction to Environmental Engineering and and

Science. Pearson Education, Second Edition.(2007)

5) Smith, W. B., Iozia, D. L., & Harris, D. B. Performance of small cyclones for aerosol sampling. Journal of Aerosol Science, 14, 402-409.(1983)

6) Iozia, D. L., & Leith, D. Effect of cyclone dimensions on gas flow pattern and collection efficiency. Aerosol Science and Technology, 10, 491-500.(1989)

7) Kim, J. C., & Lee, K. W. Experimental study of particle collection by small cyclones. Aerosol Science and Technology, 12, 1003-1015.(1990)

8) Jung, C. H., Xiang, R. B., Kim, M. C., Lim, K. S., & Lee, K. W. Performance evaluation of a cyclone with granular packed beds. Journal of Aerosol Science, 35, 1483-1496.(2004)

9) Zhao, B., Shen, H., & Kang, Y. Development of a symmetrical spiral inlet to improve cyclone separator performance. Powder technology, 145(1), 47-50.(2004)

10) Yoshida, H., Inada, Y., Fukui, K., & Yamamoto, T. Improvement of gas-cyclone performance by use of local fluid flow control method. Powder technology, 193(1), 6-14.(2009)

11) Chuah, T. G., Gimbun, J., & Choongm T. S. Y. A CFD study of the effect of cone dimensions on sampling aerocyclones performance and hydrodynamics. Powder technology, 162(2), 126-132.(2006)

(접수:2014.01.09, 수정:2014.02.09, 게재 확정:2014.02.21)