

미세입자 제거를 위한 Multi Inner Stage Cyclone의 CFD 해석 및 검증

이상준*, 김춘이*, 이원주**

CFD Explanation and Verification of Multi Inner Stage Cyclone for The Particle Removal

Sang Jun Lee*, Chun-Lee Kim*, Won Joo Lee**

요약

본 논문에서는 미세먼지를 제거하기 위하여 설계된 Multi Inner Stage(MIS) 사이클론을 대상으로 입자 제거 효율에 대한 모의실험을 수행하고, 실제 입자에 대한 제거 효율을 확인하고자 하였다. 배출부는 -1,000Pa의 음압 조건으로 설정하고, 전산유체해석 프로그램인 STAR-CCM+의 난류 모델과 lagrangian method를 이용하여 5 μ m 와 10 μ m 입자에 대해 해석을 실시한 결과, 각각 55.7%와 64.1%의 집진효율을 보였다. 해석 결과와 MIS 사이클론 장비의 실제 입자에 대한 제거 효율의 비교를 위하여 열반응기(heat reactor)를 이용해 SiO₂ 입자를 생성시켜 실험을 수행하였다. 실제 생성된 SiO₂ 입자의 제거 효율 실험에서는 유량에 따라 63~76% 집진효율을 나타냈다. 전자 주사현미경(SEM: scanning electron microscope)과 광대역 미세먼지입자 측정기(WAPS: wide range aerosol particle spectrometer)를 이용하여 실제 생성된 SiO₂ 입자의 크기는 15~30nm인 것으로 검증하였다. 이에 일반 상용 알루미늄 입자(5 μ m, 10 μ m, 그리고 20 μ m)를 대상으로 MIS 사이클론의 입자 제거효율 실험을 재차 수행한 결과, 76~95% 정도의 제거효율을 보임으로써 유동 해석보다 실제 실험이 더 높은 제거효율을 보인다는 것을 검증하였다.

▶ Keywords : 싸이클론, SiO₂, 입자, 입자 제거 효율, 전산유체해석

Abstract

In this paper, Commercial program, STAR-CCM+, was used for computer simulation. And also

• 제1저자 : 이상준 교신저자 : 이원주

• 투고일 : 2012. 12. 26, 심사일 : 2013. 01. 10, 게재확정일 : 2013. 01. 23.

*평택대학교 환경에너지기술융합연구센터(Environment & Energy Convergence Tech. R&D, Pyeongtaek University)

**인하공업전문대학 컴퓨터정보과 부교수(Dept. of Computer Science, Inha Technical College)

※본 연구는 환경부에서 시행하는 차세대 에코이노베이션 기술개발사업(과제고유번호: 401-111-007)의 지원으로 수행되었습니다.

Multi Inner Stage(MIS) cyclone which especially designed for the real experiments of particle removal efficiency. Under negative pressure condition of outlet, computer simulation was performed to predict the removal efficiency for $5\mu\text{m}$ and $10\mu\text{m}$ particles by using a turbulence model and lagrangian method. The simulation results are 55.7% and 64.1% for $5\mu\text{m}$ and $10\mu\text{m}$ particles, respectively. To compare the simulation results with the actual test of MIS cyclone, we generated the SiO_2 particles by heat reactor. Although removal efficiency of actual tests is 63~76% at different flow rate, the size of SiO_2 particles which confirmed by SEM(scanning electron microscope) and WAPS(wide range aerosol particle spectrometer) is too small(15~30nm) to compare each results. And so the alternative experiments were performed by using commercial alumina particles ($5\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$ and $20\mu\text{m}$). It was shown that the actual removal efficiency, 76~95%, from MIS cyclone is higher than simulated one.

▶ Keywords : cyclone, SiO_2 , particle, particle removal efficiency, CFD simulation

I. 서 론

각종 산업공정으로부터 배출되는 먼지는 배출원에 따라 그 특성이 크게 다르며 입자크기 범위가 $0.1\sim 10\mu\text{m}$ 인 비산(飛散) 먼지가 대부분을 차지한다. 대기의 비산먼지 중에서 입자크기가 $8\mu\text{m}$ 이하는 호흡기로 유입되는 입자크기로서, $6.0\mu\text{m}$ 이하인 것은 약 10% 정도가 인간의 폐로 유입되며, $4.0\mu\text{m}$ 이하인 것은 30%, $2.0\mu\text{m}$ 이하인 것은 약 80%, $1.0\mu\text{m}$ 이하인 것은 약 99%가 폐에 유입되어 침착된다[1]. 비산먼지는 바닥 먼지에 비해 중금속을 포함한 각종 유해성분들을 포함할 가능성이 높기 때문에 지정폐기물로 분류하여 처분하고 있으며, 공정에 따라 물리·화학적 특성 뿐 아니라 환경과 인체에 대한 유해성도 다르므로 주의해야한다[2].

이러한 비산 먼지 즉, 미세(微細) 먼지를 배출하는 산업공정 중 반도체 공정은 환경과 인체뿐만 아니라 경제적인 면에도 영향을 미친다. 반도체 공정에서 웨이퍼가 투입되어 완제품이 생산되기까지 많은 생산 공정 중 발생한 미세 먼지에 의해 반도체 칩의 성능과 수율에 변수가 생기게 되며, 이는 시장과 가격 경쟁력에 영향을 미친다[3].

많은 산업현장에서는 인체와 환경, 경제에 영향을 미치는 입자상 물질인 미세먼지를 제거하기 위해 전기집진기, 여과집진기, 세정기(scrubber), 사이클론(cyclone) 등을 사용하고 있으며, 제거 효율 향상을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.

이러한 연구 중 사이클론에 관한 연구로는 일반 사이클론 내부에 실린더를 장착하거나[4], 사이클론 내부에 다른 사이

클론을 추가하여 2중 구조를 형성하는 등 사이클론 내부 구조를 변형한 것[5]과 접선 유입식 사이클론의 유입부 형태 변경[2], 2개의 가스 유입부 설치[6]와 같이 외부 형태를 바꾸는 방식으로 수행되고 있으며 이 외에도 입자의 포집효율을 향상시키기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 $0.1\sim 10\mu\text{m}$ 의 미세먼지에 대해 기존의 사이클론을 변형한 MIS(Multi Inner Stage) 사이클론을 설계하여 전산유체해석(CFD: Computational Fluid Dynamics) 프로그램을 통해 제거 성능을 예측하고, 실제 입자를 이용한 미세먼지 제거 성능 실험 결과와 비교하여 제작된 사이클론의 성능을 평가한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장 연구방법에서는 전산유체해석 프로그램을 이용한 조건 설정과 실증 실험 시 성능 측정 방법을 설명하고, 3장에서는 전산유체해석과 실증 실험의 결과를 설명한다. 그리고 4장에서는 전산유체해석 결과와 실증 실험의 결과를 비교하여 결론을 맺는다.

II. 연구 방법

1. CFD 프로그래밍

사이클론 내 정상상태, 비압축성 유체의 3차원 난류 유동을 지배하는 보전형 방정식은 연속 및 레이놀즈 평균 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을 사용하며, 복잡한 난류 유동해석을 예측하기 위해 k- ϵ 모델, 대수영력 모델(ASM: Algebraic slip model), Reynolds 응

력모델(RSM; Reynolds stress model)을 주로 사용하고 있다.[7-10]

STAR-CCM+(CD-adapco Inc.)는 유한체적법(FVM: Finite Volume Method)을 이용하여 유체 흐름을 해석하는 전산유체해석 프로그램으로 본 연구에서는 사이클론의 유동 해석 시 수렴성을 높이기 위해 k-ε모델로 정상상태에서 해석을 수행하여 내부의 유동을 일부 수렴시킨 후 lgrangian multiphase와 Implicit unsteady로 입자의 유동을 해석하였다.

유입부의 유입속도는 1.0m/s, 유출부는 -1,000Pa의 음압조건으로 설정하여 입자의 집진효율을 해석하였다.

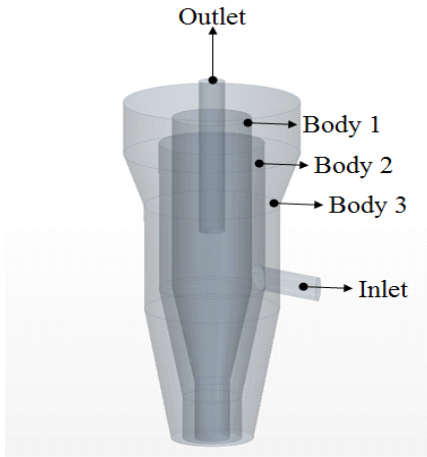


그림 1. MIS cyclone 형태
Fig. 1. MIS cyclone design

대상 입자는 반도체 공정 중 발생하는 SiO₂로 선정하고, 유입되는 미세입자의 밀도는 2.2g/cm³, 크기는 5μm와 10μm로 설정하여 해석을 수행하였다.

2. 집진 효율 측정 방법

1) SiO₂ 입자에 대한 집진 효율 측정

MIS 사이클론의 실제 미세입자 제거를 실험 평가를 위해 유량 공급 장치와 압력센서를 결합한 제어시스템과 SiO₂ 입자 생성을 위한 열반응기(heat reactor)를 설치하였다.

제어시스템은 PLC를 이용하여 압력을 확인하고, 공급 유량은 MFC로 정량 공급할 수 있도록 하였으며, power supply & readout unit을 통해 안정된 전원 공급을 하였다. 또한 후단에 설치된 감압식 송풍기(blower)를 이용하여 MIS 사이클론에 음압을 형성시켰다.

제거 효율 산출을 위한 SiO₂ 입자는 heat reactor에 SiH₄, N₂, 공기를 유입시켜 300℃의 조건 하에서 SiH₄ 산화 반응에 의해 생성될 수 있도록 하였으며, 그 반응식은 다음과 같다.



위 반응을 통해 생성된 SiO₂ 입자 크기 및 입경별 분포도를 확인하기 위해 유입부와 유출부에서 포집한 입자에 대해 전자주사현미경(SEM; Scanning Electron Microscope)과 광대역 미세먼지입자 측정기(WAPS; Wide range Aerosol Particle Spectrometer)로 분석을 수행하였다.

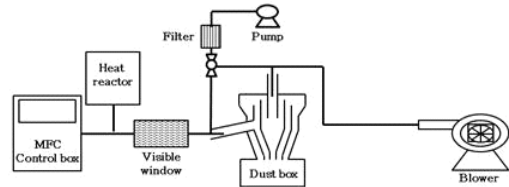


그림 2. MIS cyclone의 SiO₂ 입자 제거효율 실험 개략도
Fig. 2. MIS cyclone experimental schematic for SiO₂ particle

생성된 SiO₂ 입자에 대한 제거 효율 실험 장치는 그림 2와 같이 구성하였으며, 설치모식도에서 확인할 수 있듯이 SiO₂의 생성물을 확인하기 위해 MIS 사이클론 전단에 가시창(Visible Window)을 설치하고, 유입부와 배출부 배관에 압력센서를 설치하여 압력손실(ΔP)을 확인할 수 있도록 하였다.

유입된 SiO₂ 입자는 원심력에 의해 MIS 사이클론 하부에 집진되며, 집진효율(collection efficiency)은 유입부와 유출부 배관에 연결된 by-pass line을 통해 일부 유량을 채취하여 필터에 여과 후 실험 전후 무게 차이로 계산하였다.

2) Al₂O₃ 입자에 대한 집진 효율 측정

입자의 크기별 집진효율을 확인하기 위해 5μm, 10μm, 그리고 20μm의 상용 Al₂O₃ 입자를 사용하였으며, 그림 3과 같이 펌프를 통해 유입된 공기에 의해 powder bottle에 담긴 입자가 MIS 사이클론 내부로 유입될 수 있도록 하였다. 집진효율은 실험 전후 병의 무게 차이를 통해 유입 입자의 양과 배출부에 장착한 필터에 의해 걸러진 유출 입자의 양에 의해 산출하였다. 이러한 입자 유입 및 입자의 배출량 측정 방법의 변경으로 압력손실이 크게 발생하여 실험 유량은 100 ~ 700LPM으로 하여 집진효율을 측정하였다.

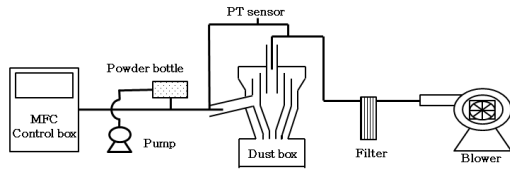


그림 3. MIS 사이클론의 Al₂O₃ 입자 제거효율 실험 개략도
Fig. 3. MIS cyclone experimental schematic for Al₂O₃ particle

III. 실험 및 결과 분석

1. CFD 시뮬레이션 결과

CFD 프로그램을 통해 유동 해석을 실시한 결과 MIS 사이클론 장치 내의 흐름에 대한 속도분포는 그림 4와 같이 나타났으며, body1, body2, 그리고 body3에서 전반적으로 순회류가 잘 형성됨을 알 수 있었다.

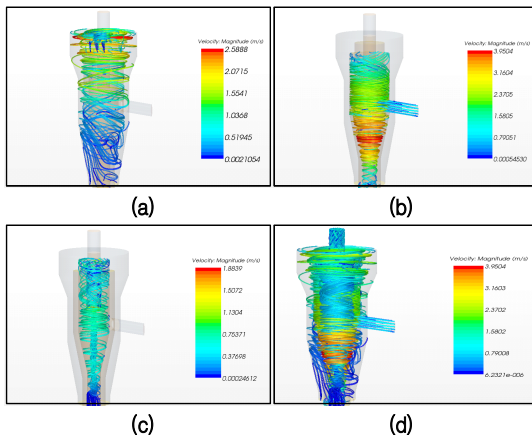
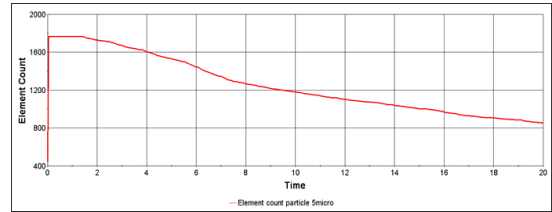


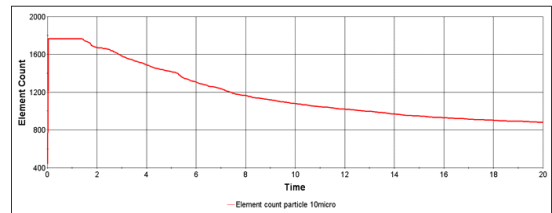
그림 4. MIS 사이클론내 유속 분포 : (a) body3내의 유속 분포, (b) body2내의 유속 분포, (c) body1내의 유속 분포, (d) MIS 사이클론내의 전체 유속 분포

Fig. 4. Velocity distribution in MIS cyclone : (a) velocity in body3, (b) velocity in body2, (c) velocity in body1, (d) velocity in MIS cyclone

복잡한 난류유동 해석의 수렴성을 높이기 위해 k-ε모델로 정상상태에서 해석하여 내부의 유동을 일부 수렴시킨 후 순회류 생성을 그림 4와 같이 확인하였다. 순회류를 확인한 후 입자의 유입속도를 1.0m/s로 하고, 배출압력을 -1,000Pa로 설정하여 미세입자의 집진효율 해석한 결과 5 μ m와 10 μ m에 대하여 각각 55.7%와 64.1%의 성능 향상 결과를 나타내었으며, 이는 그림 5와 같다.



(a)



(b)

그림 5. 유량 500LPM일 때 MIS 사이클론내 입자 개수의 변화 : (a) 5 μ m, (b) 10 μ m

Fig. 5. Variation of Particle count in MIS cyclone at 500LPM : (a) 5 μ m, (b) 10 μ m.

2. 집진 효율 실험 결과

1) SiO₂ 입자를 이용한 실험 결과

유동해석 결과를 토대로 MIS 사이클론을 설치한 후, SiH₄를 heat reactor에 1.0LPM으로 유입시켜 생성된 SiO₂로 MIS 사이클론의 입자 제거 성능을 평가하였다. 그 결과 배출압력이 -1,000Pa일 때, 유량에 따른 SiO₂ 입자의 집진효율은 그림 6과 같이 유량이 500LPM, 1,000LPM, 1,500LPM일 때, 각각 63%, 70%, 76%인 것으로 나타났다.

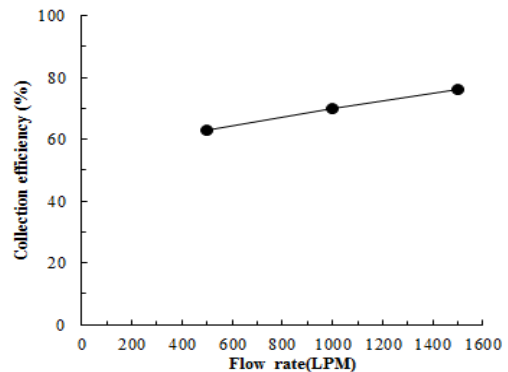


그림 6. MIS 사이클론의 SiO₂ 입자 제거 효율
Fig. 6. SiO₂ particle collection efficiency of MIS cyclone

이는 시뮬레이션 결과와 유사한 집진효율이었으며, 이때의 입자 크기를 확인하고자 SEM으로 측정해 보았다. 측정 결과 MIS 사이클론으로 유입되는 SiO₂ 입자와 유출되는 입자의 크기는 전반적으로 30~40nm의 원형에 가까운 미세입자임을 확인할 수 있는 결과는 그림 7과 같다.

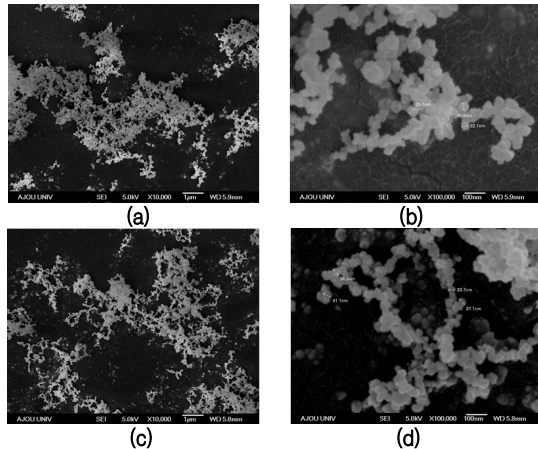


그림 7. SiO₂ 입자의 SEM 이미지 : (a) 유입부 ×10,000, (b) 유입부 ×100,000, (c) 배출부 ×10,000, (d) 배출부 ×100,000
 Fig. 7. SEM images of SiO₂ particle : (a) inlet ×10,000, (b) inlet ×100,000, (c) outlet ×10,000, (d) outlet ×100,000

표 1. MIS 사이클론내 유량에 따른 SiO₂ 입자의 개수 및 크기 분포
 Table 1. Generated SiO₂ particle counts and size distribution by flow rates of MIS cyclone

입경 범위 (nm)	500LPM Inlet		500LPM Outlet		1,000LPM Outlet		1,500LPM Outlet	
	입자수 (count)	분포도 (%)	입자수 (count)	분포도 (%)	입자수 (count)	분포도 (%)	입자수 (count)	분포도 (%)
0~15	404,711	8.04	18,492	4.24	13,128	3.8	22,020	5.9
15~20	3,558,511	70.70	170,603	39.14	114,932	33.7	104,114	27.9
20~30	647,114	12.86	100,598	23.08	74,134	21.7	77,246	20.7
30~40	87,900	1.75	48,569	11.14	49,805	14.6	53,379	14.3
40~50	109,726	2.18	26,596	6.10	23,969	7.0	26,742	7.2
50~60	95,290	1.89	20,017	4.59	16,384	4.8	26,404	7.1
60~70	54,828	1.09	10,952	2.51	12,439	3.6	15,849	4.3
70~80	35,419	0.70	16,554	3.80	14,913	4.4	31,225	8.4
80~90	22,788	0.45	12,480	2.86	10,739	3.1	10,510	2.8
90~100	17,086	0.34	10,980	2.52	10,811	3.2	5,411	1.5
합계	5,033,373	100	435,841	100	341,254	100	372,900	100

또한, 유입 및 유출되는 입자의 크기별 분포를 알아보고자 WAPS로 측정하여 표 1과 같은 결과를 얻었으며, 그림 8과 같이 유량별 입자 크기 분포도로 표현하였다. 입자 크기 분포는 유량에 따라 유사한 양상을 나타내었으며, 이번 실험에서 생성된 SiO₂ 입자는 15~30nm 크기의 분포율이 가장 높게 나타났으며 유입부에서는 70% 이상, 유출부에서는 28~40%를 차지하였다.

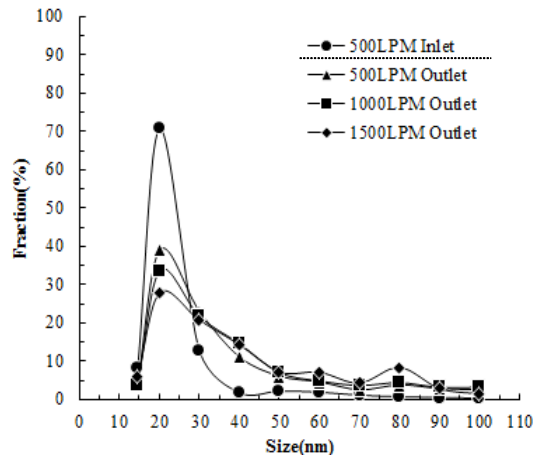


그림 8. MIS 사이클론내 유량에 따른 SiO₂ 입자의 크기 분포
 Fig. 8. Generated SiO₂ particle size distribution by flow rates of MIS cyclone

그림 8에 나타난 유입부(Inlet)와 유출부(Outlet)에서의 입자 크기 분포를 비교해보면 유출부에서 입자 크기가 커지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 브라운 운동을 하는 미세 입자들이 사이클론 내에서 충돌하며 상호 응집되는 현상에 의한 것으로 판단된다.

2) Al₂O₃ 입자를 이용한 크기별 실험 결과

실제 생성된 SiO₂ 입자의 크기에 대한 분석 결과, 앞서 시뮬레이션에 적용한 입자에 비해 극히 미세한 입자로 확인되었다. 또한, 이는 집진효율 측정을 위해 실험 장치에 설치한 필터 여과 범위보다 작은 크기의 입자로 제거 효율에 대한 비교가 불가능할 것으로 판단되어, 산업공정에서 배출되는 입자 크기와 유사한 입자를 대상으로 추가 실험을 진행하였다.

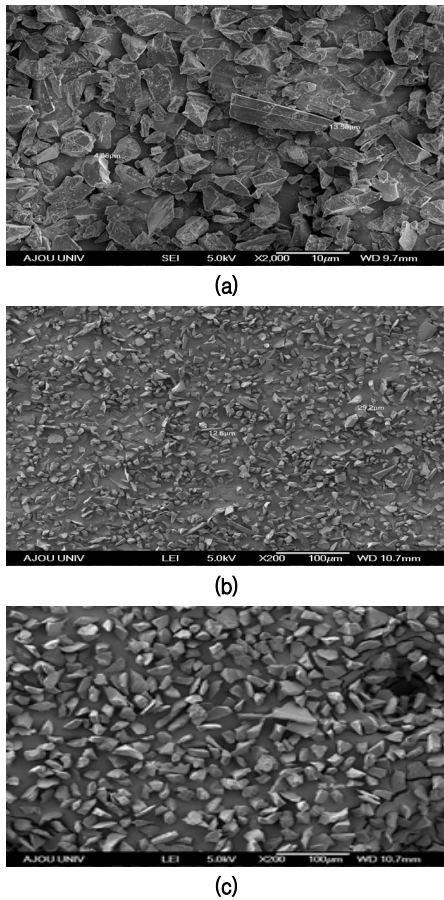


그림 9. Al₂O₃ 입자의 SEM 이미지: (a) 5µm ×2,000, (b) 10µm ×200, (c) 20µm ×200
 Fig. 9. SEM images of Al₂O₃ particle : (a) 5µm ×2,000, (b) 10µm ×200, (c) 20µm ×200

추가 실험을 위해 구매한 상용 Al₂O₃ 입자는 5µm, 10µm, 그리고 20µm크기로, 실험 전 실제 입자의 크기 분포를 그림 9와 같이 SEM을 통해 확인하였다. 그 결과 입자들 간의 편차는 다소 있었으나 대체로 균일한 분포를 나타내는 것으로 판단되었다.

유량을 일부 초과하여 측정된 SiO₂ 입자 제거 실험과는 달리 전체 유량을 초과하여 실험한 Al₂O₃ 입자 제거 실험은 필터에 의한 압력손실이 발생하여 송풍기의 한계유량 때문에 유량을 100~700LPM으로 하여 실험하였으며, 그 외의 조건은 모두 동일하게 유지하였다. 그림 10에 나타난 집진효율 결과를 보면, 입자 크기별 유량에 따른 제거율은 큰 차이가 없이 유사한 제거율을 나타내고, 입자 크기에 따른 제거율에는 차이가 있음을 알 수 있으며, 이는 그림 10(d)에서 확인할 수 있다.

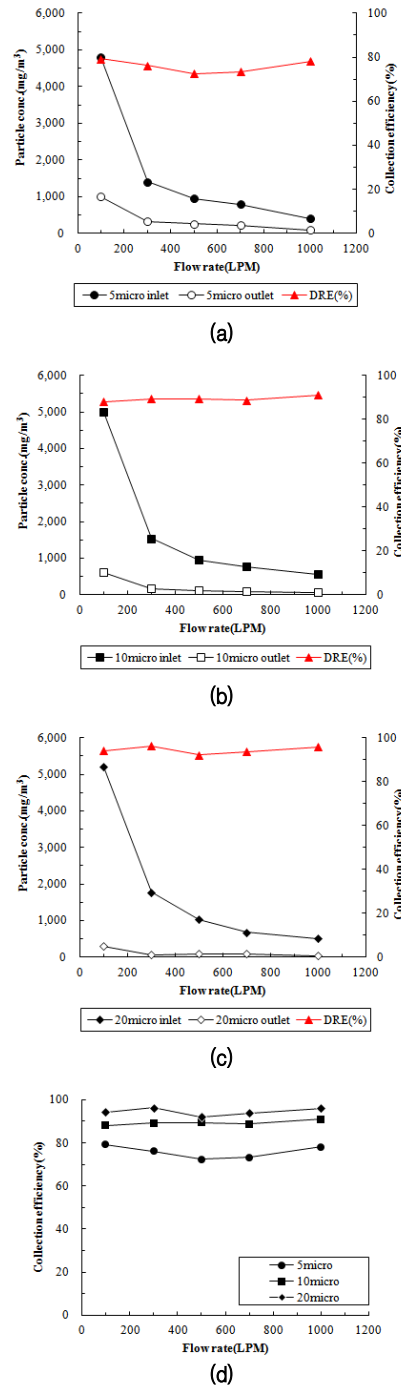


그림 10. 유량에 따른 유입부와 배출부에서의 입자 농도 및 집진 효율 변화 : (a) 5µm, (b) 10µm, (c) 20µm, (d) 유량에 따른 집진 효율
 Fig. 10. Variations of particle concentration at inlet/outlet and collection efficiency by flow rates: (a) 5µm, (b) 10µm, (c) 20µm, (d) collection efficiency by flow rate

입자의 크기별 평균 제거율은 $5\mu\text{m}$ 입자의 경우 약 76%, $10\mu\text{m}$ 입자는 약 89%, $20\mu\text{m}$ 입자는 약 95%의 제거율을 보이는 것으로 나타났다.

IV. 결론

본 논문에서는 산업공정 중 발생하는 $0.1\sim 10\mu\text{m}$ 의 입자를 제거하기 위한 MIS 사이클론에 대해 유동해석을 실시하고, 실제 입자에 대한 집진 효율을 평가하였다. $5\mu\text{m}$ 와 $10\mu\text{m}$ 입자에 대해 유동 해석한 결과 각각 55.7%와 64.1%의 집진효율을 나타내었고, Al_2O_3 입자($5\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$)에 집진 효율 실험을 실시한 결과 처리유량 변화에 따른 제거율에는 큰 변화가 없었으며, 입자의 크기에 따라 $5\mu\text{m}$ 입자는 약 76%, $10\mu\text{m}$ 입자는 약 89%, $20\mu\text{m}$ 입자는 약 95%의 평균 집진효율을 나타내었다. 500LPM일 때 $5\mu\text{m}$ 입자의 제거율은 72%로 시뮬레이션 상에서 동일 유량과 동일 입자 크기에 대한 제거율 55.7%보다 높은 결과를 보였다. 이는 실제 실험에서는 MIS 사이클론 하부 함진박스(dust box)에 물을 채워 집진된 입자가 재 비산되는 것을 방지했기 때문에 실제 실험의 입자 집진 효율이 높게 나온 것으로 판단된다.

일반적으로 원심력에 의해 입자를 제거하는 사이클론은 입자의 밀도가 높고, 중량이 늘어날수록 원심력이 증가하여 집진효율이 높아지므로 본 연구에서도 유량이 높아질수록 집진효율이 증가할 것을 예상하였으나 유량에 따른 입자 제거율의 변화가 거의 없었다. 이는 낮은 100LPM에서도 1,000LPM과 같이 선회류가 잘 생성되어 입자를 제거하는 것으로 판단되며, 100LPM의 낮은 유량에서도 약 5,000ppm의 Al_2O_3 입자를 1,000LPM일 때 100ppm 미만의 Al_2O_3 의 제거율과 유사한 집진 성능을 갖는 것으로 보아 MIS 사이클론은 집진 능력이 뛰어난 장치라 판단되나, 장시간 실험으로 인한 집진 능력을 검증할 필요성이 요구된다.

더불어 컴퓨터 시뮬레이션의 경우, 해석 결과의 정확도를 높이기 위해서는 입자간의 상호반응 연관성, 벽면 및 유체 흐름과의 물리적 특성, 즉 입자간의 충돌로 인한 응집현상, 깨지는 현상 등에 대한 해석 연구도 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] J.H. Hong, "Industrial facilities in the fine dust control technology," Air cleaning technology, pp. 54-66, Mar. 2002.
- [2] J.W. Chung, Y.H. Lee, H.D. Lee, J.H. Park, G.I. Jun, and M.H. Cho, "Characteristics of Fly Ashes Emitted from Large Scale Industrial Process," Journal of Korea Society of Waste Management, Vol. 20, No. 2, pp. 179-185, Mar. 2003.
- [3] D.H. Baek and J.G. Nam, "Data mining using semiconductor yield improvement system," Proceedings of the Joint Conference of the Korean Institute of Industrial Engineers and The Korean Operations Research and Management Science Society, pp. 293-300, Daejeon, Korea, May 2002.
- [4] W. Wang, P. Zhang, L. Wang, G. Chen, L. Li, and X. Li, "Structure and performance of the circumfluent cyclone," Powder technology, Vol. 200, No. 3, pp. 158-163, June 2010.
- [5] S.W. Park, I.Y. Lee, and I.K. Chung, "Performance improvement of the dual cyclone air separator," Proceeding of the summer meeting of the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, pp. 617-622, Yongpyong, Korea, July 1998.
- [6] H. Yoshida, Y. Inada, K. Fukui, and T. Yamamoto, "Improvement of gas-cyclone performance by use of local fluid flow control method," Powder technology, Vol. 193, No. 1, pp. 6-14, July 2009.
- [7] J.H. Lee, H.J. Lim, S.T. Sim and K.W. Park, "Gas flow field of high-efficiency cyclone with CFD," Proceeding of the autumn meeting of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 10, No. 11, pp. 3060-3070, Nov. 2010.
- [8] J.K. Yong, C.N. Kim and Y.M. Jo, "A Numerical Analysis on the Flow Characteristics and the Collection Efficiency of Fine Particles in a

- cyclone,” Vol. 20, No. 2, pp. 144-153, Feb. 2008.
- [9] Francisco José de Souza, Ricardo de Vasconcelos Salvo and Doego Alves de Moro Martins, “Large Eddy simulation of the gas-particle flow in cyclone separators,” Separation and Purification Technology, Vol. 94, pp. 61-70, June 2012.
- [10] Rainier Hreiz, Caroline Gentric and Noël Midoux, “Numerical investigation of swirling flow in cylindrical cyclones,” Chemical Engineering Research and Design, Vol. 89, No. 12, Dec. 2011.

저 자 소개



이 상 준
 1989 : 한양대학교 전자계산학과
 공학사.
 1995 : Univ. of Utah Mechanical
 Eng. 공학석사.
 2003 : Arizona State Univ.
 Mechanical & Aerospace
 Eng. 공학박사
 현 재: 평택대학교
 환경융합시스템학과 조교수
 관심분야: 환경 IT 융합, 시뮬레이션
 RFID/USN, 성능분석
 Email: sjlee2026@ptu.ac.kr



김 춘 이
 2002: 명지대학교 환경생물공학과
 공학사.
 2007: 주식회사 엑센 연구개발부
 2012 현재: 평택대학교 환경에너지
 기술융합연구센터
 관심분야: 시뮬레이션, 성능분석
 Email: nachun2@ptu.ac.kr



이 원 주
 1989: 한양대학교 전자계산학과
 공학사.
 1991: 한양대학교 컴퓨터공학과
 공학석사.
 2004: 한양대학교 컴퓨터공학과
 공학박사.
 현 재: 인하공업전문대학
 컴퓨터정보과 부교수.
 관심분야: 병렬처리시스템, 시뮬레이션,
 모바일컴퓨팅, 클라우드컴퓨팅,
 Email: wonjoo2@inhac.ac.kr