

CFD 해석을 이용한 Multi Inner Stage Cyclone 내부의 미세입자제거 효율 예측 및 실험적 검증

김혜민^o, 권성안^{*}, 이상준^{*}

^o*평택대학교 환경에너지기술융합연구센터

e-mail:khm@ptu.ac.kr, ksa@ptu.ac.kr, sjlee2026@ptu.ac.kr

Efficiency Prediction of the Particle Removal Efficiency of Multi Inner Stage(MIS) Cyclone by Computational Fluid Dynamics(CFD) Analysis and Experimental Verification

Hye-Min Kim^o, Sung-An Kwon^{*}, Sang-Jun Lee^{*}

^o*Environment & Energy Convergence Tech. R&D, Pyeongtaek University

● 요약 ●

A new multi inner stage(MIS) cyclone was designed to remove the acidic gas and minute particles of harmful materials produced from electronic industry. To characterize gas flow in MIS cyclone, pressure and velocity distribution were calculated by means of computational fluid dynamics(CFD) commercial program. Also, the flow locus of particles and particle removal efficiency were analyzed by Lagrangian method. When outlet pressure condition was -1,000 Pa, the efficiency was the best in this study. Based on the CFD simulation result, the pressure loss and destruction removal efficiency was measured through MIS cyclone experiment.

키워드: cyclone, SiO₂, particle, particle removal efficiency, CFD simulation

I. 서론

최근 급속한 현대 전자산업의 발전과 더불어 대기환경오염문제가 심각하게 대두되면서 공정 중 발생하는 각종 유해 오염물질을 줄이기 위한 많은 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 특히 반도체 소자가 초고집적화 됨에 따라 제조 공정 수는 증가함에 따라 공정 중 다른 불순물에 의해 오염될 가능성이 높아지게 되고, 각 공정 후 많은 잔류물 또는 오염물이 표면에 남게 되어 이를 제거하는 세정공정의 중요성이 더욱 부각되고 있는 추세다. 반도체 소자 제조 공정 중 발생하는 오염물은 구조적 형상의 왜곡과 전기적 특성을 저하시킴으로써 그 소자의 성능, 신뢰성 및 수율 등에 큰 영향을 미치기 때문에 반드시 제거되어야 한다.

현재 전자산업의 제조공정에서 실리콘 기판 위에 생성되는 주 오염물질은 미세입자, 유기오염물, 자연산화 막, 금속불순물 등이 다[2]. 미세입자는 주로 처리가스와 함께 배출되거나 공정상 사용되는 SiH₄가스가 완벽히 처리 되지 않고 배출될 경우 공기 중에서 화학반응을 일으켜 생성되기도 한다[3]. 이러한 공정을 통하여 인위적으로 발생하는 미세입자들은 대체적으로 0.1~10 μ m로 유해한 성분들을 많이 포함하고 있다.

이러한 유해성 물질들의 제거를 위해 일반적으로 공정 최종단에 cyclone, 습식스크러버, 건식스크러버 등을 설치하여 사용하고

있지만 미세입자의 입경, 오염 입자의 크기가 작아짐 등에 따라 효율상의 한계로 인해 상당량의 유해물질이 대기 중에 노출 되고 있다. 또한 오염관리 수준도 높아지면서 미세입자를 보다 효율적으로 제거할 수 있는 시스템이 요구되는 상황이다[4].

따라서 본 연구에서는 크기가 0.1~10 μ m인 미세입자를 제거할 수 있는 새로운 Multi Inner Stage Cyclone을 설계하였으며, 제거 성능에 미치는 영향을 CFD 프로그램을 통해 3차원적으로 cyclone 내에서의 거동 및 처리효율을 확인하고자한다. 또한, 실질적인 실험을 통해 결과를 비교하였다[5].

II. 관련 연구

1. CFD(Computational Fluid Dynamics) programing

1.1 STAR-CCM+

CFD 상용프로그램인 CD-adapco사에서 개발한 STAR-CCM+를 사용하여 기존 cyclone의 미세입자 제거효율의 향상조건을 바탕으로 1,000 lpm 급 MIS cyclone을 설계하였다. Mesh는 polyhedral mesher 방법과 reference value의 base size를 0.02m로 하여 형성하였다. 기체의 흐름 특성을 파악하기 위하여

cyclone의 inlet 조건은 압력 배출구로 설정하였고, outlet 압력은 -1,000 Pa로 설정하여 해석하였다. 미세입자의 흐름 현상 분석은 입자 운동 방정식과 Lagrangian 방법을 활용하였다. 가스의 흐름이 불안정한 상태로 간주되어 항력, 중력 그리고 미세입자의 체류 시간과 같은 요소도 설정하였고, 미세입자는 SiO₂로 설정하였고, 밀도는 2,200kg/m³, 미세입자의 크기는 3µm, 10µm로 시뮬레이션 하였다.

1.2 Turbulence Model

Turbulence는 레이놀즈상수(Reynolds number, Re)가 클 때, 고속에서 매우 불규칙적이고, 3차원 적인 비정상적인 유동에서 발생한다.

Turbulence 모델을 사용할 때 Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식을 기초로 다양한 Turbulence 모델을 해석할 수 있으며, 그 방법들은 다음과 같다.

- k-Epsilon Turbulence
- k-Omega Turbulence
- Reynolds Stress Turbulence
- Spalart-Allmaras Turbulence

본 연구에서는 k-Epsilon Turbulence를 설정하여 계산하였다. k-Epsilon Turbulence는 k(난류 운동 에너지, turbulent kinetic energy)와 ε(난류손실율, turbulent dissipation rate)를 설정한다.

1.3 Lagrangian Method

입자운동을 해석할 시에는 중력, 원심력, 공기저항력, 항력(Drag Force)을 고려하여야 하며, 입자운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dr_p}{dt} = v_p - v_g \tag{1}$$

위의 식은 Lagrangian method의 기본 식으로 시간에 따른 속도벡터 v_p(t)와 위치벡터 r_p(t)에 따라 물체의 궤적을 추적하는 방법이다. 이 식은 CFD 상용프로그램인 CD-adapco사의 STAR-CCM+에서 속도는 입자의 절대속도에 영향을 받는 반면, 입자의 위치는 reference 값에 의해 나타내어진다.

입자가 무게를 갖는 경우, 일반적으로 다음과 같은 식을 통해 해석할 수 있다.

$$mp \frac{dv_p}{dt} = F_s + F_b \tag{2}$$

이 때, F_s는 입자의 표면에 작용하는 힘을 나타내며, F_b는 입자 body에 작용하는 힘이며, 아래와 같이 구할 수 있다.

$$F_s = F_d + F_p + F_{vm} \tag{3}$$

$$F_b = F_g + F_u \tag{4}$$

여기서,

F_d : Drag force

F_p : Pressure force

F_{vm} : Virtual mass force

F_g : Gravity force

F_u : User-defined body force 를 뜻한다.

이 중 항력은 크게 Schiller-Nauman식, Di Felice식, Gidaspow식, Haider an Levenspiel식으로 나뉘며, 다음과 같이 분류한다.

- Schiller-Naumann : spherical solid particle, liquid droplet, small (spherical) diameter bubbles
- Di Felice : dense particulate material flow (two-way coupling only)
- Gidaspow : low and high loaded particulate flows (spherical, two-way coupling only)
- Haider and Levenspiel : non-spherical particle (two-way coupling only)

본 연구에서는 입자가 작고 구형이라는 가정 하에 Schiller-Naumann 식으로 설정하여 해석하였다.

2. 실험 방법

Fig. 1은 cyclone 성능 평가를 위한 실험 장치 모식도이고, 전체적인 운전 시스템은 후단에 설치된 blower에 의해 감압되고 동시에 전단에서 미세입자 또는 가스를 공급하여 실험을 하였다. 중간부에는 미세입자와 수분 제거 효율을 높이기 위하여 wet tank, cyclone, 그리고 수분필터를 설치하였다. 이러한 처리시스템을 운전하기 위해서는 정량, 정확한 운전이 중요하므로 N₂, SiH₄, Air, 그리고 수분의 공급량을 조절하는 제어시스템(Control box)을 설치하였다. Control box는 PLC(Programmable Logic Controller; LS Industrial system Co., LTD)를 이용하여 구동하였다. Control box 내에 설치된 MFC(Mass Flow Controller)의 power supply & readout unit(KNS-INT社, Model KRO-4000)은 안정된 전원을 공급하고 설정 값과 유량 값을 display하여 정확하게 제어한다. 공급하고 있는 전원은 ±15 VDC(50W-4channel)이고, 각각의 channel이 독립된 전원으로 운영된다. 이것은 서로 다른 용량의 MFC가 연동 될 때 발생하는 전압 불균형 현상을 감소시키고 외부전원의 간섭을 최소화한다.

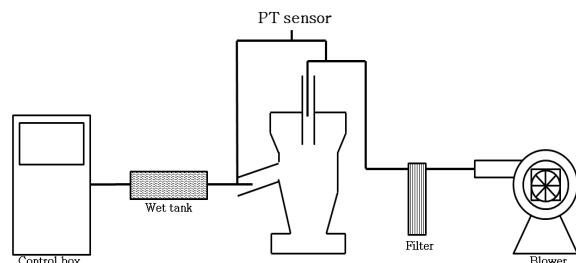
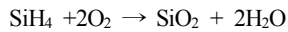


Fig. 1 Scheme of the system diagram

MIS cyclone의 압력손실은 inlet과 outlet의 압력을 압력센서 (Pressure Transmitter, S-10)로 측정하여 차이를 구하는 방법으로 실험하였다.

미세입자 DRE(Destruction Removal Efficiency)를 측정하기 위하여 SiH₄ 가스를 300℃ 반응기에 air와 반응시켜 발생된 SiO₂를 cyclone에 공급하였고 반응식은 다음과 같다.



발생된 SiO₂는 유동을 따라 이동하여 cyclone 내에서 원심력에 의해 집진되며, 이는 control box를 통해 조절된다. 미세입자에 대한 DRE 측정을 위해 2 lpm의 SiH₄을 반응시켜 발생된 SiO₂를 cyclone inlet 부분에서 Avogadro's Law에 의하여 무게를 측정하여 계산하였으며, 수분의 DRE는 오차범위가 ±0.001g인 전자정밀저울로 실험 전후의 필터 무게를 측정하여 차를 비교하였다.

본 연구에서는 inlet의 유속을 1.06~3.18m/s로 하여 압력차 (ΔP), 미세입자 그리고 수분에 대한 DRE를 측정하였다.

III. 결과

STAR-CCM+프로그램을 통한 시뮬레이션 결과에서 inlet과 outlet의 압력차는 약 70Pa로 계산되었고, fig. 2, 3은 MIS cyclone의 압력분포도와 속도분포도를 나타낸 그림이다.

미세입자의 DRE는 3μm, 10μm 각각에 대하여 66%, 100%의 효율을 나타내었고, 상용되고 있는 cyclone과 비교하면 약 30~50%의 상승효과를 나타냈다.

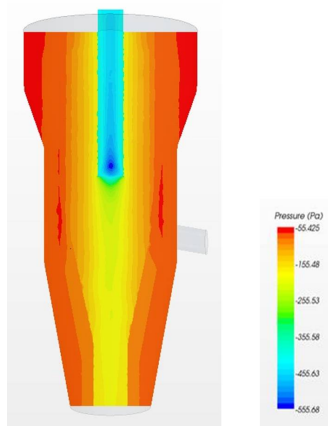


Fig. 2 Pressure distribution of MIS cyclone

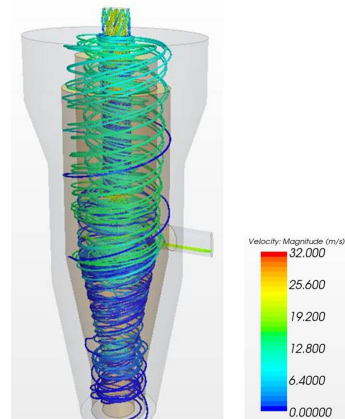


Fig. 3 Velocity distribution of MIS cyclone

시뮬레이션 결과 값을 토대로 실제 장비에 적용하는 실험을 진행하였으며 결과는 다음과 같다.

Fig.4, 5, 6은 각 유속 값에 따른 압력차, 미세입자 DRE, 그리고 수분 DRE 측정 결과이다. 유속이 증가함에 따라 압력차는 80Pa에서 120Pa으로 상승하였고, 미세입자 DRE는 63~76%까지 증가됨을 확인할 수 있었다.

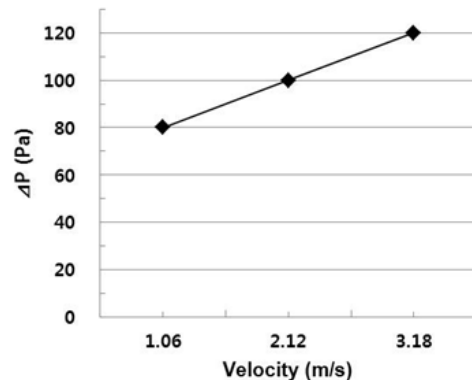


Fig. 4 Pressure loss of MIS cyclone

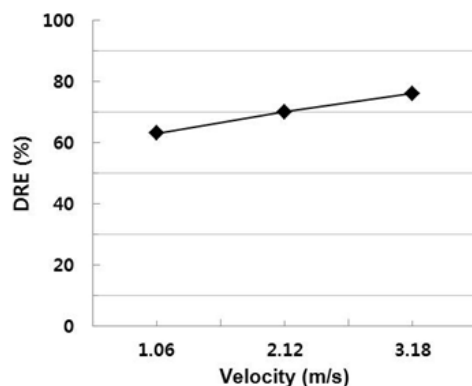


Fig. 5 Particle destruction removal efficiency of MIS cyclone

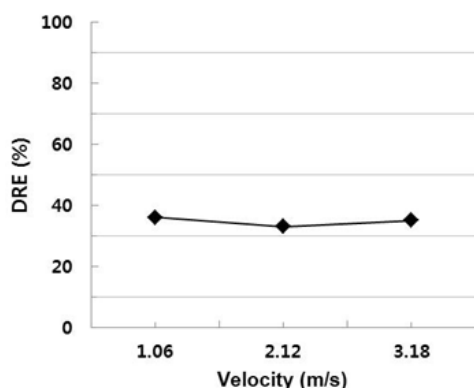


Fig. 6 H₂O destruction removal efficiency of MIS cyclone

IV. 결론

본 연구를 통해 반도체 공정상에서 발생하는 인체유해성 물질인 산성가스 및 미세입자를 제거하는 시스템을 구축하고자 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 실제 실험상의 데이터와 비교하였고, 그 결과 MIS cyclone에서의 효율 증가를 확인하였다. 3 μ m 미세입자 제거 효율은 실험 데이터와 유사한 값을 나타냈으나, 10 μ m 크기에서는 실험 데이터와 다소 다른 결과 값이 도출되었다. 이는 실험상에서 모사한 SiO₂의 입자크기가 컴퓨터 입력 값과 동일하게 만들 수 없으며, 실제로 형성되는 SiO₂의 입자 크기가 3 μ m이하로 형성되기 때문인 것으로 사료된다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션 상에서 1 μ m 이하의 입자를 시뮬레이션 함에 있어서 중앙처리장치시간(CPU time)이 약 200시간 이상 요구되어, 이를 수행하는데 어려움이 있다. 추후 CPU time을 줄여주는 여러 매개변수를 고려하여 효율적

인 추가 시뮬레이션을 실험과 병행하여 진행 할 예정이다.

사사

본 연구는 환경부 “차세대 에코노베이션 기술 개발 사업”에 의해 지원 받은 과제이다.(과제고유번호: 401-111-007)

참고문헌

- [1] B. W. Han, H. J. Kim and K. S. Han, “Removal Characteristics of Gaseous Contaminants by a Wet Scrubber with Different Packing Materials”, *J. Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 23, No.6, pp 744-751, 2007
- [2] P. Biswas and C. Y. Wu, “Nanoparticles and the environment”, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, Vol. 55, No. 6, pp. 708-746, June. 2005
- [3] J. N. Hsu, C. J. Tsai, C. China and S. N. Li, “Silane Removal at Ambient Temperature by Using Alumina-Supported Metal Oxide Adsorbents”, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, Vol. 57, pp. 204-210, Feb. 2007
- [4] W. Wang, P. Zhang, L. Wang, G. Chen, J. Li and X. Li, “Structure and performance of the circumfluent cyclone”, *Powder Technology*, Vol. 200, pp. 158-163m 2010
- [5] K. W. Park, T. H. Lee, J. K. Ahn and K. S. Kim, “Numerical Study of Prediction of Performance for Cyclone Separator”, *The Korea Society of Mechanical Engineers*, pp. 1-3149, Nov. 2009