

## 반응기촉매 교체작업시 최적 환기조건에 대한 수치해석적 연구

윤장근<sup>1\*</sup> · 임용순<sup>2</sup> · 신미수<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(주)이랩스 안전보건기술원, <sup>2</sup>환경부 낙동강유역환경청, <sup>3</sup>충남대학교 환경공학과

### A numerical Study on Optimum Ventilation Conditions for the Task of Exchange Catalyst

Jang-ken Yoon<sup>1\*</sup> · Yong-Sun Im<sup>2</sup> · Misoo Shin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>E-LABS EHS Tech.,

<sup>2</sup>Nakdong Basin office, Ministry of Environment

<sup>3</sup>Department of Environmental Engineering, Chungnam National University

#### ABSTRACT

**Objectives:** The purpose of this case study is to assess the current airflow and find the ideal ventilation conditions in tank reactors for minimizing the possibility of exposure respiratory dusts(size of 2.5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ ) when workers exchange catalysts in the tank reactors.

**Methods:** A Numerical study was performed to determine ideal ventilation conditions, We considered two sizes of airborne respiratory particles(2.5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ ) at 12points from the bottom of tank reactor. We changed input & output ventilation conditions and analyzed the particle motion in the tank reactor. The star-ccm+, computational fluid dynamics tool was used to predict air & particle flow patterns in the tank reactor and a numerical simulation was achieved by applying the realized  $\kappa$ - $\epsilon$  turbulence model and the Lagrangian particle tracking method.

**Results:** From the results, the increase of recirculation air had a significant impact on removing dusts because they are removed by HEPA filter. To the contrary, Increasing the clean air quantity or changing the input position of clean air is not good for workers because it causes the exit of respiratory dusts through workers' entrance or cause it to remain suspended in the air in the workplace tank.

**Key words:** chemical industry, catalyst dust, ventilation, numerical analysis, cfd

#### I. 서 론


화학공장은 그 특성상 다른 산업분야에 비해 자동화공정이 많으며, 작업자가 단위공정을 직접 운전하기보다 자동제어시스템을 통해 운전하게 된다. 따라서 이상반응이나 누출사고 등에 의하지 않고서는 현장에서 유해화학물질이나 호흡성분진 등에 직접적으로 노출될 가능성은 크지 않다. 하지만 반응공정에서 필수로 사용되고 있는 금속촉매 등의 교체작업은 작


업자가 반응기 내부에 직접 들어가 교체하는 수작업 방식으로 하고 있어 밀폐공간작업으로 인한 질식재해의 우려와 함께 회수과정에서 부서지기 쉬운 촉매분진에 호흡기 등이 노출될 가능성이 크다. 더구나 화학공장에서 사용되는 금속촉매에는 구리비산염 등 인체 유해물질도 함유되는 경우가 있어 더욱 세심한 안전작업이 요구된다. 이러한 작업의 경우 대부분의 화학공장에서는 질식재해 예방을 목적으로 송풍장치와 헤파(High Efficiency Particulate Air, HEPA)필터 등을


\*Corresponding author: Jang-ken Yoon, Tel: 042-823-2219, E-mail: cfd90@naver.com

Gana-parosvill, 309, Eungubi-ro 18, Yusung-gu, Daejeon 34087

Received: May 3, 2018, Revised: May 30, 2018, Accepted: June 8, 2018

 Jang-ken Yoon <https://orcid.org/0000-0002-7107-5136>

 Yong-Sun Im <https://orcid.org/0000-0003-1281-9809>

 Misoo-Shin <https://orcid.org/0000-0002-1946-9154>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이용해 반응기내부 공기를 순환시키는 동시에 밀폐공간작업으로 인한 질식사고 예방효과와 함께 촉매회수를 위해 사용하는 촉매회수건(vacuum pipe gun)으로 인한 음압을 보충하기 위하여 신선한 외부공기를 유입시키는 방법을 채택하고 있다. 촉매회수건을 이용하여 노후된 촉매를 회수하고 있으나, 작업 중 회수 파이프의 마찰이나 공구와 부딪힘, 바닥 또는 벽면 청소작업 시 흩날리는 유해분진비산 및 외부공기의 유입과 순환공기로 인해 반응기 내부에서 순환기류 등으로 작업 중 발생하는 호흡성분진(respiratory dust)이 작업장내부에 비산되게 된다(Ren et al., 2014). 본 연구에서는 D사의 촉매반응기 상부의 반구형 작업장소를 표준으로 해석하였으며 Figure 1에 그 표준도식도를 나타내었다. 일반적으로 화학공장에서 사용하고 있는 환기방법은 여러 가지 방법이 있을 수 있으나 대부분 반응기 상부에서 신선한 공기를 유입시키고, 하단 혹은 측방부에서는 고효율필터를 장착한 공기재순환 장치를 사용하는 경우가 대부분이다. 이러한 밀폐공간 작업에서는 질식재해를 예방도 중요하지만, 유해할 수 있는 호흡성분진으로부터 작업자를 보호하고 또한 비산분진의 외부유출을 막아 외부대기로 배출되는 것을 예방하는 것도 중요하며 안전작업을 위한 표준 환기방법을 제시하는 것이 중요하다. 하지만 반응기 내부 촉매교체작업에 대한 표준 환기방법이나 환기방법의 적정성 평가에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 촉매교체작업자들의 분진노출을 최소화하고, 유해분진의 외부유출을 최소화할 수 있는 방법을 모색하기 위하여 실제 작업장에서 사용하는 환기방법을 적용하여 그에 따른 분진거동 양상을 파악하였다(Jang et al., 1988).

반응기 상부의 수치해석 모델링을 위해서 반응기의 CAD도면을 분석하여 길이, 넓이, 각 개구부의 위치 등을 파악하였고, 현장방문을 통해 설비 출입구 등의 실측, 신선공기 유입구 및 재순환공기 입·출구의 크기를 실측하였다. 또한 실제 작업시 사용하는 송풍기 용량과 및 각 열선풍속계를 이용하여 각 입·출구에서 유속을 측정하여 해석의 경계조건으로 사용하였다. 다만, 촉매회수위치가 되는 촉매갈럼의 개수가 180여개 정도로 각각 모든 위치에서 입자궤적을 파악하는 것은 큰 의미가 없어 위치적 발생원을 대표할 수 있는 바닥면 균등분포 임의 위치 12개소를 정하여 분진의 발생원으로 선정하였다.

## II. 수치해석 연구 방법

본 연구에서는 상용 CFD코드인 STAR-CCM+, V9, USA 를 사용하였고, 해석은 유한체적법(Finite Volume Method, FVM)를 이용하여 해석하였다. 또한 반응기내부 유동 해석시 수렴성 향상을 위해 난류모델을 정상상태에서 해석하여 유동을 충분히 수렴시킨 후 Lagrangian

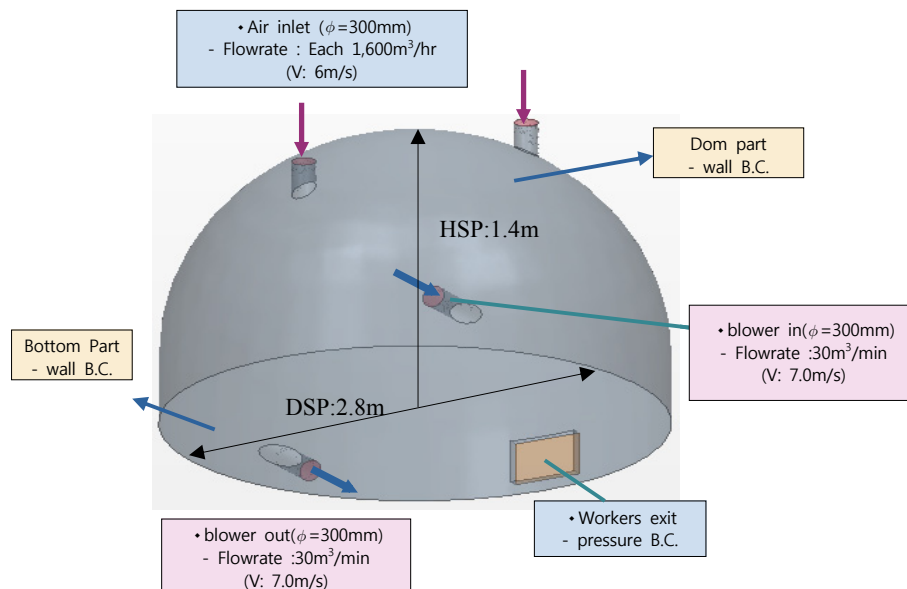


Figure 1. Schematics & Boundary Conditions for Case 1 & Case 3

multiphase(Ren et al., 2014)와 Implicit unsteady로 입자의 궤적을 해석하는 방법을 채택하였으며 운동량방정식에 나타나는 속도와 압력의 연계는 SIMPLE(Semi-Implicit method for pressure-linked equation)알고리즘을 사용하였다. 격자는 Polyhedral mesh를 사용하였으며 전체 계산격자는 약 190,000개로 구성하였다, 수렴판정은 무차원 잔차(Residual)가  $10^{-4}$ 이내이면 수렴한 것으로 가정하였다(Subhashini et al., 2005).

## 1. 일반 지배방정식

본 연구에서는 대표적인 물리량 보존법칙인 질량보존과 운동량 보존 법칙, 에너지 보존방정식의 편미분방정식을 다음과 같이 적용하였다. 그 식은 다음의 (1), (2), (3)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ u_j \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i(\rho_0 - \rho) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\mu}{pr} + \frac{\mu_t}{pr_t} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right] + S_h \quad (3)$$

또한, 난류생성에너지( $k$ )와 난류소산 에너지율( $\epsilon$ )의 관계는 다음과 같은 식(4)와 식(5)로 표현될 수 있다. 순간운동량 방정식의 시간 평균은 잘 알려지지 않은 속도와 상호 영향을 미치는 레이놀즈 응력으로 결정되는데, 일반적인 비압축성 유체를 가정할 때 레이놀즈 응력은 알려지지 않은 유일한 항이다. 대부분의 문제에서는 Bousinessq의 가설을 채택하여 레이놀즈 응력은 물질의 평균 속도구배와 난류 점성항으로 표현할 수 있다고 하였다(Hinze, J.O., 1975). 그러므로 난류점성계수는 알고 있는 값이나 이미 계산된 값으로 표현한다. 난류모델은 RSM보다 정확도면에서는 다소 떨어지는 결과를 보이지만 그 오차가 크지 않고 계산시간도 적게 들고, 수렴성이 좋은 Realizable  $k$ - $\epsilon$  모델을 적용하였다. Prandtl-Kolmogorov는 난류점성계수,  $\mu_t$ 와 관계된 난류에너지 및 소산율을 사용하였다(Patankar, 1980).

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} + G - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} + \frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \epsilon) \quad (5)$$

여기서,

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (6)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

$$G = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (8)$$

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.22$$

## 2. 입자 동역학

분진 입자의 운동은 난류에서 매우 복잡해지는데 이는 유체에서 입자의 운동이 다양한 종류의 힘을 받기 때문이다. 입자가 받을 수 있는 힘은 분진입자의 공기저항, 압력구배에 따른 부력, Virtual mass effect, Basset힘, Magnus 효과, Saffman lift force 등으로 표현될 수 있으며 이러한 힘에 대한 이론적인 분석이 수치해석 모델링 전에 이루어져야 한다(Ren T et al., 2014).

질량  $m$ 인 입자 P가 침강할 때 입자 P가 침강하는 방향과 입자에 작용하는 힘의 방향이 1차원적 관계에 있다고 가정하면 입자에 작용하는 힘을 다음과 같이 식(9)로 나타낼 수 있다(Choi, D.H., 2013).

$$m \frac{dv}{dt} = F_g - F_b - F_d \quad (9)$$

$\frac{dv}{dt}$ : acceleration of particle

$F_g$ : gravity force,  $F_b$ : buoyancy,  $F_d$ : drag force

여기서  $F_g$ ,  $F_b$ ,  $F_d$ 의 힘은 다음 식(10)과 같다.

$$F_g = mg, \quad F_b = \frac{\rho_f}{\rho_p} mg, \quad F_d = \frac{C_d(v_f - v_p)^2 \rho_f A_p}{2} \quad (10)$$

$\rho_f$ : fluid density,  $\rho_p$ : particle density

그러므로 각 분력을 대입하면, 식(11)로 정리된다.

$$m \frac{dv}{dt} = mg - \frac{\rho_f}{\rho_p} mg - \frac{C_d(v_f - v_p)^2 \rho_f A_p}{2} \quad (11)$$

또한, 정상상태( $dv/dt = 0$ )를 가정하고, 구형입자

를 가정하면 식(12)과 같이 정리된다.

$$(v_f - v_p)^2 = \frac{2\pi D_p^3 g (\rho_p - \rho_f)}{C_d \rho_f \frac{\pi}{4} D_p^2} \quad (12)$$

저항계수( $C_d$ )는 레이놀즈수의 영향을 받는 계수로 구형의 물체에 대해서는 대략적으로 레이놀즈수가 작을 때는  $C_d = 24/Re$ , 레이놀즈수가  $10 < Re < 10^3$ 의 범위에서는 대체로 0.4 정도의 일정한 값을 가지는 것으로 알려져 있다(Cengel, 2007).

### 3. 경계조건(B.Condition) 및 초기조건(I.Condition)

경계조건 및 초기조건은 설치된 반응기의 크기 및 운전조건에 따라 다를 수 있다. 반응기의 크기가 커지면 외부공기 및 순환공기량이 커지게 되고, 상대적으로 작은 반응기의 경우는 그 조건에 따라 공급량이 적어지기도 한다. 본 연구에서는 모델링의 대상이 된 D사의 C반응기에 대하여 연구를 수행하였으며 먼지 입자의 크기는 호흡성먼지( $10 \mu m$ )이하의 크기 중 호흡기로 유입가능성이 높은  $2.5 \mu m$ ,  $10 \mu m$  크기를 가정하여 비교 모사 하였다.

#### 1) 계산조건 및 모델

##### (1) 송풍기 흡입을 공기재순환 조건(Blower out & in)

- ① 유량 :  $30 \text{ m}^3/\text{min}$ (유속기준  $7 \text{ m/s}$ )
- ② 관경  $\phi 300 \text{ mm}$  blower In & out : 헤파필터를 통한 공기재순환

##### (2) Air inlet : 상부의 2개의 입구( $\phi 300 \text{ mm}$ )를 통해 외부유입

- ① 총 유입량 :  $3,200 \text{ m}^3/\text{hr}$  (1개당  $1,600 \text{ m}^3/\text{hr}$ 로 유입)

##### (3) 출입구(Pressure B.C.)

- ① 작업자들의 출입구(촉매 교체작업 시 개방조건)을 위해 작업자들이 드나드는 곳

##### (4) 난류모델 : Realizable $k-\epsilon$ model

##### (5) 입자모델(Lagrangian multi phase가정)(Lee et al., 2013)

- ① 입자 형상 : 구형가정
- ② 입자 크기 :  $2.5 \mu m$ ,  $10 \mu m$
- ③ 입자 밀도(ash로 가정하여  $3,190 \text{ kg/m}^3$  가정, constant density)
- ④ 바닥면 12곳(seeding point)에서 분진이 발생한다고 가정하여 입자 궤적 추적

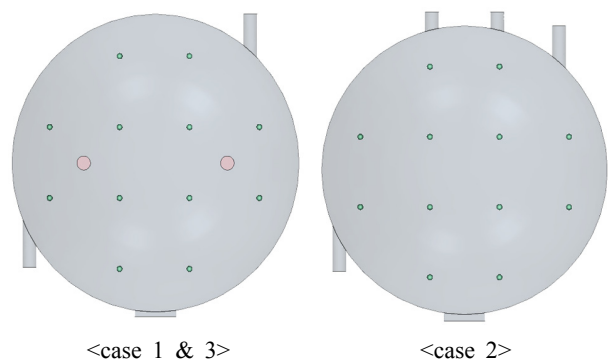


Figure 2. Schematics of particle source positions depending on cases(12points)

#### 2) 경계조건(boundary condition)

##### (1) 벽(wall) 조건

###### ① 속 도

- No slip condition ( $u, v, w = 0$ )
- 벽과 수평한 속도성분 :  $\Gamma_\phi = \Gamma_{eff}$
- 벽과 수직한 속도성분 :  $\Gamma_\phi = 0$

###### ② 온 도

- 벽면 온도 실내온도와 동일한  $25^\circ\text{C}$ 로 현열손실로 가정

##### (2) pressure B.C

- 내부의 유동 변화에 의한 압력 계산에 의해 유입과 유출이 결정됨

#### 3) 수치해석변수

Table 1. Boundary conditions

	Recirculation Air, Flow rate	Clean air, Position	Clean air, Flow rate	Note
Case 1	$30 \text{ m}^3/\text{min}$	Upper 2places	$1,600 \text{ m}^3/\text{hr}(2ea)$	Current condition
Case 2	$30 \text{ m}^3/\text{min}$	Rear 2places	$1,600 \text{ m}^3/\text{hr}(2ea)$	Change clean air position
Case 3	$50 \text{ m}^3/\text{min}$	Upper 2places	$1,600 \text{ m}^3/\text{hr}(2ea)$	Increasing the recirculation air in case1

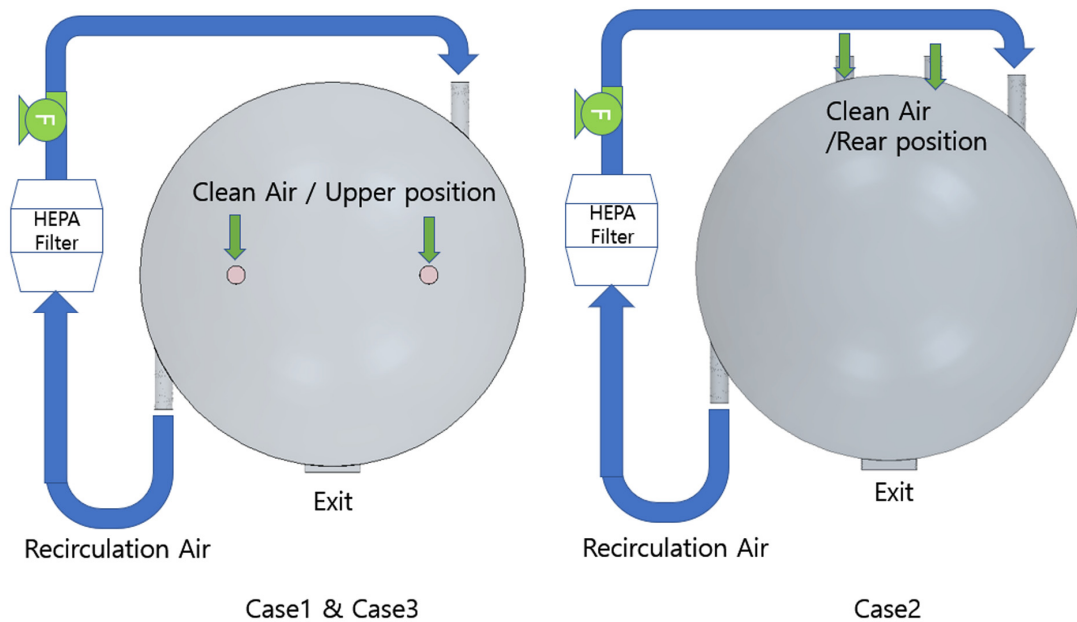


Figure 3. Schematics of the air recirculation HEPA unit & clean air supplies

### III. 결과 및 고찰

촉매 반응기의 상부 부분의 송풍기의 유출과 유입 및 신선공기유입에 따른 유동해석을 하였고 분진의 발생원은 바닥에 임의 위치 12곳에서 호흡성분진( $2.5 \mu\text{m}$ ,  $10 \mu\text{m}$ )이 발생한다고 가정하였다.

Figure 4는 case에 따른 반응기 작업내부의 속도벡터장을 나타내며 Figure 5은 속도크기의 분포를 보여준다. 현재 운전조건으로 수행한 case 1의 경우 내부 유동특성을 살펴보면 재순환 송풍기(blower)에 의해 유입과 유출이 있는 원주방향(x-y 단면 결과)으로 벽을 따라 주 흐름이 형성되는 것을 볼 수 있다. 그리고 반응기의 중심 부분에는 속도가 작은 재순환 영역이 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 내부 유동은 송풍기 배출(blower out)쪽으로 이루어지는 것이 실내 작업장의 오염을 방지할 수 있기 때문에 유리한데 이는 HEPA필터를 통해 호흡성분진이 상당부분 제거될 수 있기 때문이다. 분진의 일부는 작업자 출입구로 유출되는 것을 볼 수 있으나 이는 상부유입 공기량의 조절을 통해서 어느 정도 조절이 가능할 것으로 사료된다. 이런 맥락으로 살펴보면 출입구로 분진유출이 작을수록 외부 공기질 관리 측면에서는 유리한 것인데 case 1의 경우 출입구(exit)로 빠져나가는 평균 유속을 살펴보면  $2.47 \text{ m/s}$ 로 나타났다. 상부의 공기유입구가 위치하는 x-z 단면의 유동을 살펴보면 하향흐름이 강하

게 형성되는 것을 볼 수 있다. Case 2는 상부공기유입에 따른 분진의 외부유출을 최소화하기 위해 신선한 공기 유입구를 반응기 뒤쪽 재순환공기의 유입이 있는 쪽으로 이동시키고 동일한 공기량을 주입한 경우에 대한 해석을 수행한 것이다. 유동 결과를 살펴보면 송풍기에 의한 재순환공기의 흐름주변으로 벽을 따라 형성되는 원주방향 주 흐름이 더욱 강화된 것을 볼 수 있다. 출입구(exit)로 빠져나가는 평균 유속을 살펴보면  $2.67 \text{ m/s}$ 로 나타났다. 즉 후면 유입으로 신선공기가 들어올 경우, 외부유출공기량이 많아져 반응기 밖의 외부작업자에게도 분진이 노출될 수 있어 좋지 않은 결과를 가져올 수 있는 것으로 해석되었다. Case 3는 case 1과 동일한 조건에서 송풍기 재순환 공기량을  $30 \text{ m}^3/\text{min}$ 에서  $50 \text{ m}^3/\text{min}$ 으로 증가시킨 경우에 대한 수치 해석을 수행한 것이다. 수치해석 결과를 살펴보면 송풍기 재순환 공기량 증가에 따라 전반적으로 속도는 증가한 것으로 나타났고 출입구로 빠져나가는 공기량의 평균유속은 case 1의  $2.47 \text{ m/s}$ 보다 약 60% 증가한  $3.96 \text{ m/s}$ 로 나타났다. 또한 유동흐름과 별도로 촉매공정에서 호흡성분진이 발생하는 경우에 대한 해석으로 반응기 내부바닥면에 고르게 분포한 12개의 위치에서 호흡성분진이 발생한다고 가정했을 때 입자의 궤적을 Figure 6 ~ Figure 8과 같이 계산하였다. 사람의 호흡기에 치명적으로 영향을 주는 호흡성 분진의



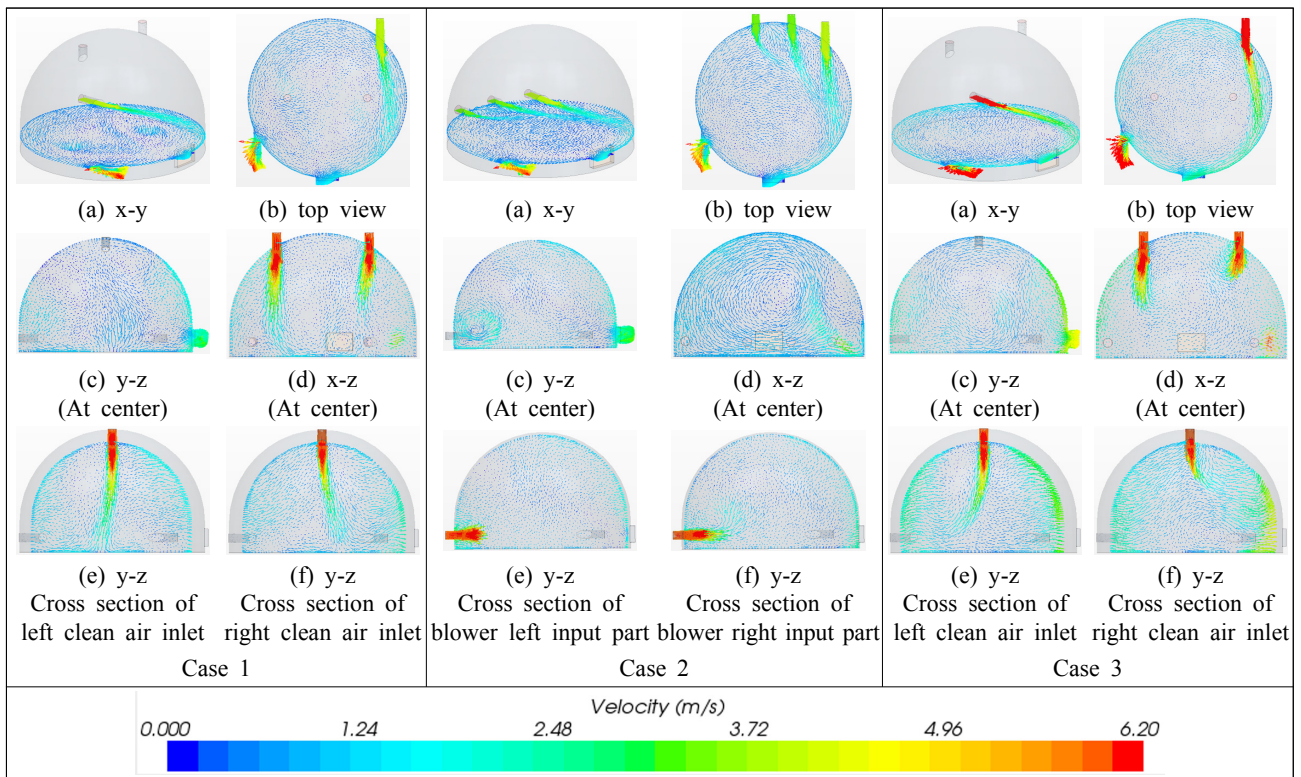


Figure 4. Velocity vectors for the various cases

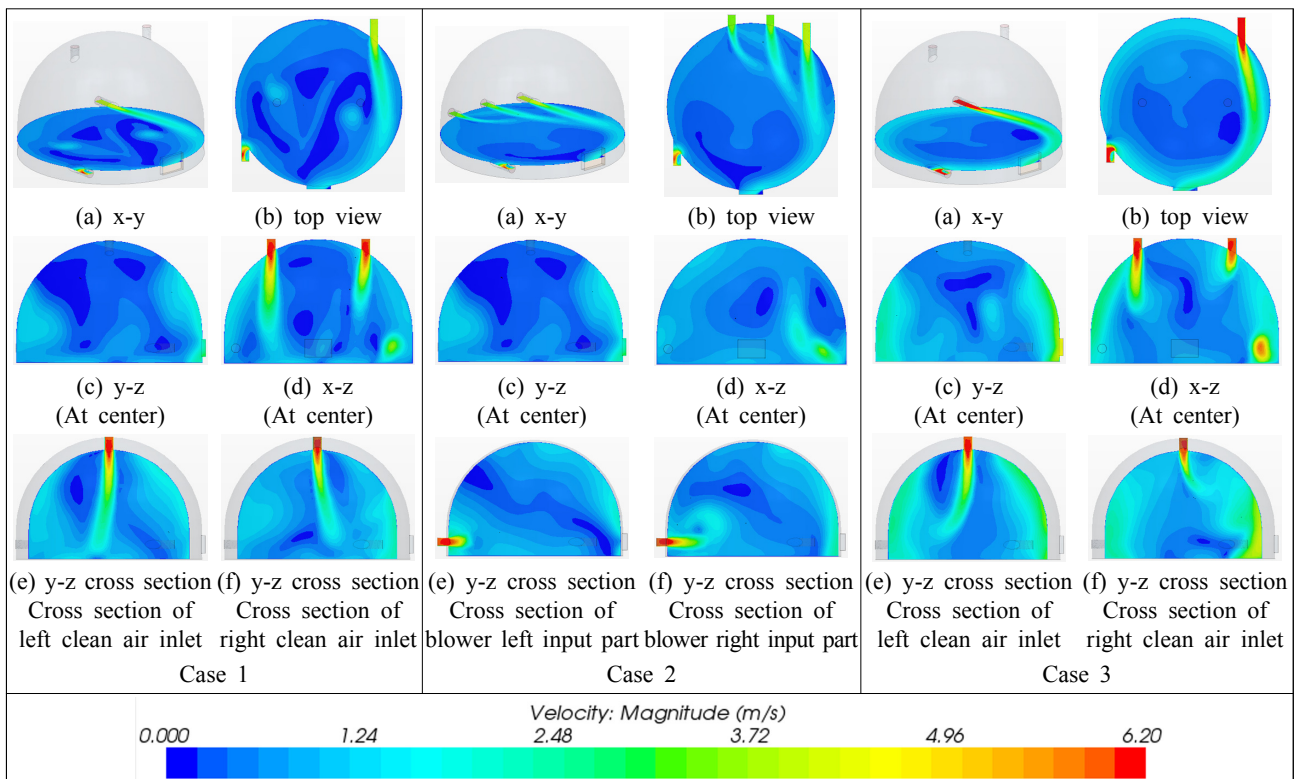
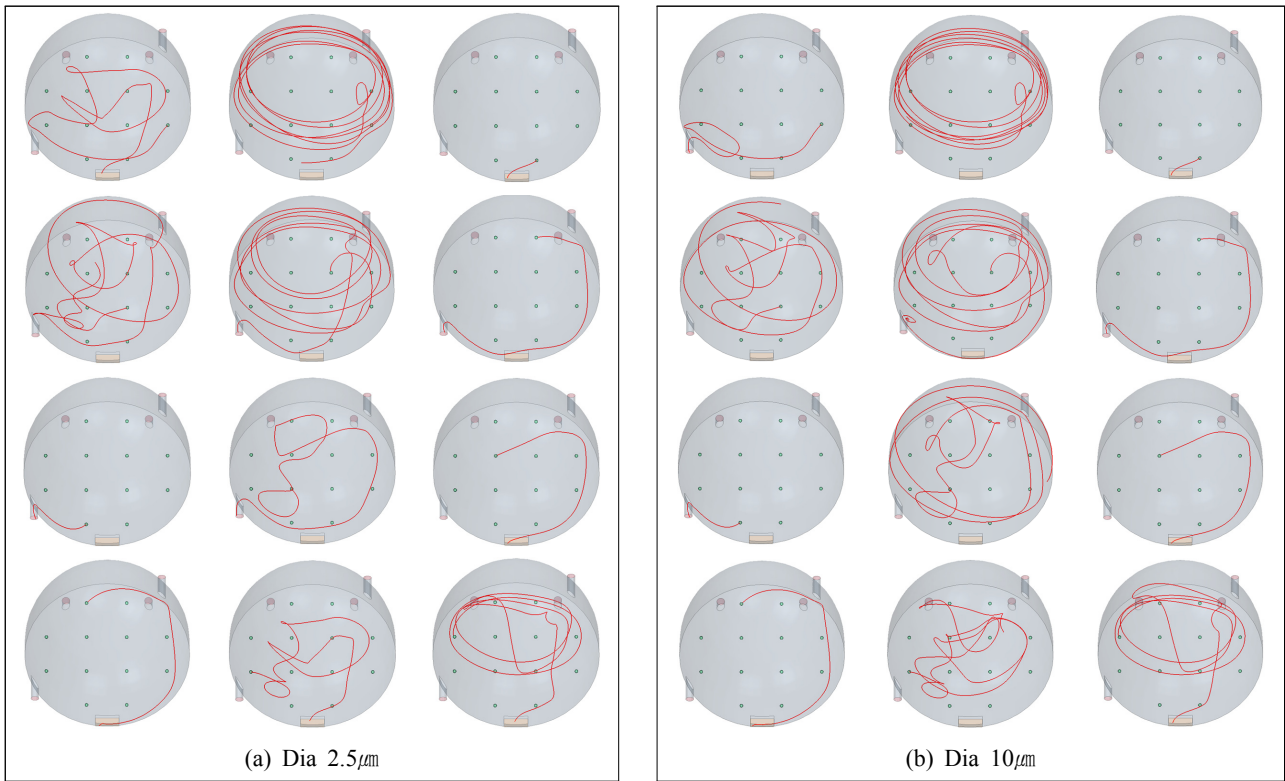
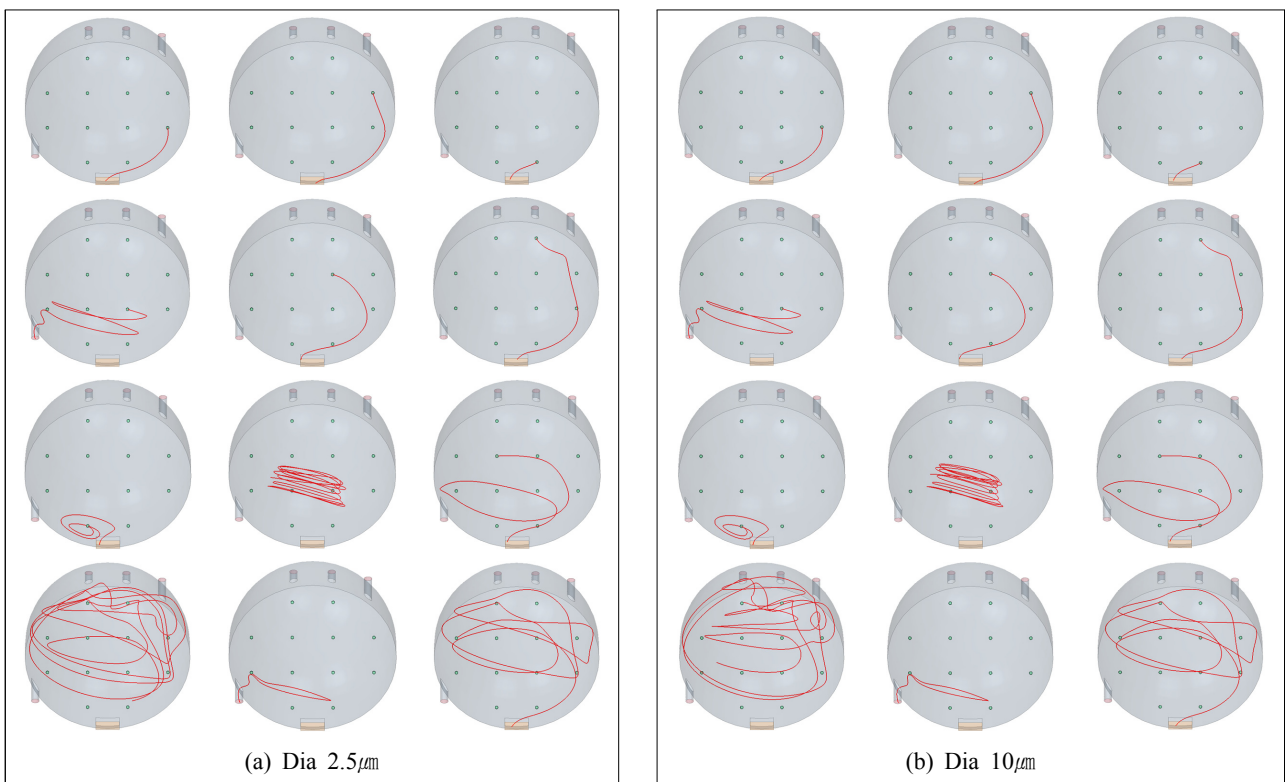


Figure 5. Velocity magnitudes for the various cases



**Figure 6.** Particle trajectory from the scattered bottom positions in case 1



**Figure 7.** Particle trajectory from the scattered bottom positions in case 2

크기가 보통  $10\ \mu\text{m}$  이하의 영역이기 때문에 한 그룹은  $2.5\ \mu\text{m}$ 로 가정하였고, 다른 한 그룹은  $10\ \mu\text{m}$ 를 가정하여 각각의 위치에서 발생한다고 가정한 후 입자의 궤적을 거동을 해석하여 Case 별로 각각 송풍기 유출구와 출입구로 빠져나가는 입자의 개수를 산정하였다. 먼저 입자들의 유동패턴을 살펴보면  $2.5\ \mu\text{m}$ 와  $10\ \mu\text{m}$  모두  $\text{PM}_{10}$  이하의 호흡성분진에 속하기 때문에 위치에 따라 약간의 차이는 있었으나 전체적인 유동패턴은 case 별로 유사하게 나타났다. Case 별로 재순환 송풍기 흡입구(blower in)와 작업자 출입구(exit)로 빠져나가는 입자의 개수를 살펴보면 Figure 6의 Case 1의 경우 입경  $2.5\ \mu\text{m}$ 의 입자는 송풍기 흡입구로 4개, 작업자 출입구로 6개가 빠져나가는 것으로 나타났고 나머지 2개는 중앙의 재순환영역에 진입하면서 계속 부유(floating)하는 것으로 나타났다. Case 1의 입경  $10\ \mu\text{m}$ 의 입자는 송풍기 흡입구로 4개, 출입구로 4개 빠져나가는 것으로 나타났고 나머지 4개는 중앙의 유동기류에서 부유하는 것으로 나타났다. Figure 7은 신선공기 유량은 case1과 같고 유입구만 뒷면으로 변화시켜 본 것이다. Case 2의 경우 입경  $2.5\ \mu\text{m}$ 의 입자는 송풍기 흡입구로 2개, 출입구로 8개 빠져나가는 것으로

나타났고 나머지 2개는 중앙에서 계속 부유하는 것으로 나타나며, case 1에 비해 출입구로 빠져나가는 입자가 오히려 증가한 것으로 나타났다. Case 2의 입경  $10\ \mu\text{m}$ 의 입자는 송풍기 흡입구로 2개, 출입구로 8개 빠져나가는 것으로 나타났고 나머지 2개는 계속 중앙에서 부유하는 것으로 나타나며 입경  $2.5\ \mu\text{m}$ 와 마찬가지로 case 1에 비해 출입구로 빠져나가는 입자가 오히려 증가한 것으로 나타났다. 이는 미세분진이 측매반응기의 바깥쪽으로 유출될 수 있음을 나타낸다. 즉 유량유출의 측면뿐 아니라 입자거동 측면에서도 Case2의 운전조건은 좋지 않은 것으로 판단되었다.

Figure 8에 나타난 Case 3의 경우 입경  $2.5\ \mu\text{m}$ 의 입자는 송풍기 흡입구로 8개, 출입구로 4개 빠져나갔는데 이는 case 1과 case 2에 비해 송풍기 흡입구로 들어가는 입자가 증가된 것을 볼 수 있다. 송풍기 흡입구로 유입된 분진은 헤파필터에 의해 제거될 수 있기 때문에 작업자보호 측면에서는 유리한 것이다. Case 3의 입경  $10\ \mu\text{m}$ 의 입자는 송풍기 흡입구로 7개, 출입구로 4개, 나머지 1개는 중앙의 재순환영역을 부유하는 것으로 나타났으며 이는 입경  $2.5\ \mu\text{m}$ 와 마찬가지로 case 1과 case 2에 비해 송풍기

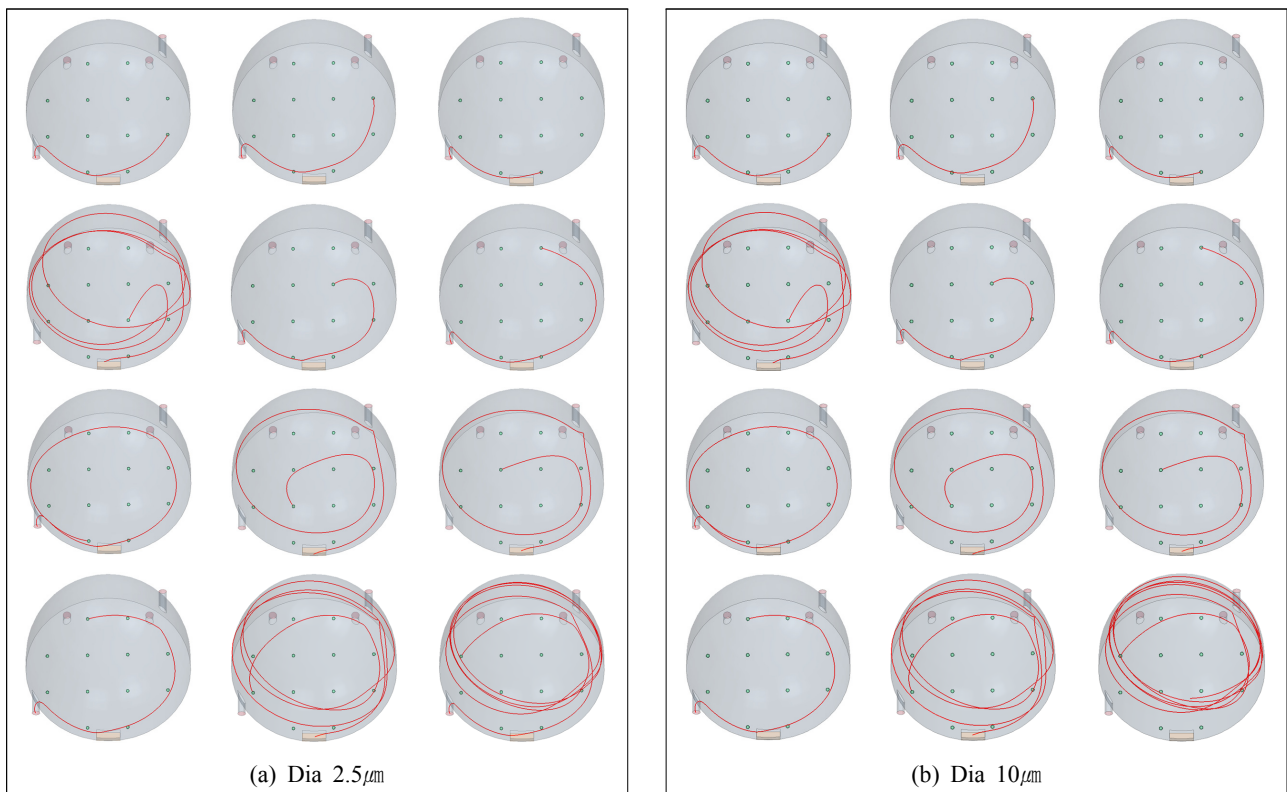


Figure 8. Particle trajectory from the scattered bottom positions in case 3



흡입구로 들어가는 입자의 수가 증가되어 바람직한 결과로 나타났다.

#### IV. 결 론

축매 반응기 내부에서 축매 교체 작업시 미세분진에 작업자가 노출될 우려가 있다. 본 연구에서는 내부 공기질 관리를 위해 사용하는 재순환송풍기의 공기순환량 및 상부 혹은 후면에서 신선공기 유입조건에 따른 유동해석 및 분진거동을 분석하여 최적의 환기조건을 파악하였다. 축매교체 작업 반응기 바닥 위치를

임의로 12개소를 선정하였으며 그 위치에서 미세분진(호흡성분진  $2.5 \mu\text{m}$ ,  $10 \mu\text{m}$ )이 발생한다는 가정하에 입자 궤적 계산을 수행하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

수치해석 결과를 종합해 볼 때 기존의 신선공기 주입구를 상부에서 후단면으로 하는 것이나 신선공기 주입량의 무분별한 증가는 내부작업자 보호나 외부작업자 보호를 위한 측면에서 바람직하지 않은 것으로 판단되며, 필터로 유입시키는 재순환송풍기의 유량을 증가시키는 방안이 작업장소내 공기질 관리에 유리한 것으로 해석되었다. 작업장 내부의 부유분진과 외부

Table 2. Calculation results depending on cases & particle size

	Particle size(diameter)	Floating particle #	Filtered particle #	Exit particle #
Case 1	$2.5 \mu\text{m}$	2	4	6
	$10 \mu\text{m}$	4	4	4
	case1 total	6	8	10
Case 2	$2.5 \mu\text{m}$	2	2	8
	$10 \mu\text{m}$	2	2	8
	case2 total	4	4	16
Case 3	$2.5 \mu\text{m}$	0	8	4
	$10 \mu\text{m}$	1	7	4
	case3 total	1	15	8

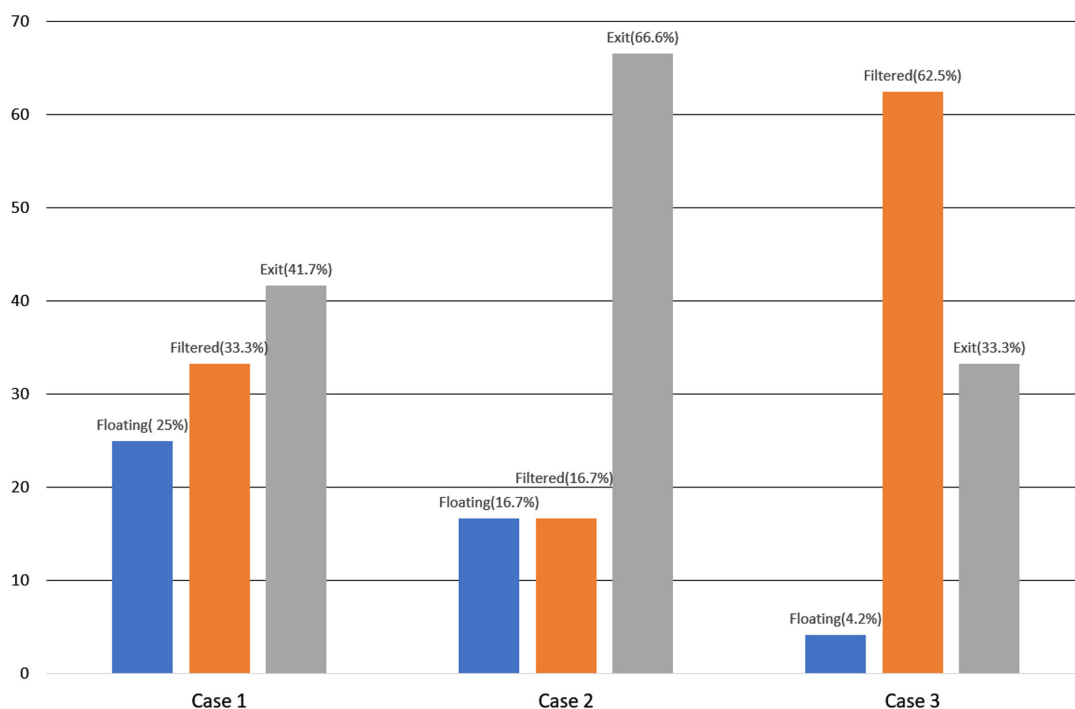


Figure 9. Particle trajectory(Floating, Filtered, Exit %) depending on cases

로 유출될 수 있는 미세분진을 최소화하는 것과 동시에 발생 분진을 필터로 유도하여 제거하는 것이 목적이 되어야하기 때문이다. 반응기내부의 촉매회수 및 교체작업은 밀폐된 공간내부작업이라는 특성으로, 질식사고의 위험, 쪼그림 작업과 수공구사용으로 인한 근골격계질환과 비산되는 촉매분진에 작업자의 호흡영역이 노출될 수 있는 유해인자를 지니고 있다. 이러한 유해인자로부터 작업자를 보호하기 위해서는 ①반응기내부로 신선공기를 유입하는 것은 질식재해 예방과 함께 촉매회수작 사용으로 인해 형성될 수 있는 내부 음압해결에도 도움이 되므로 반드시 설치해야 하며 다만, 송풍기 등 작업조건에 따른 급배기 밸런스를 고려하여 공급공기량을 결정하는 것이 필요하다. ②근골격계질환예방을 위하여 긴장된 근육의 이완 등을 위하여 정기적 휴식제공 및 소형 좌식의자 등의 지급 등이 필요하며, ③내부작업시 작업자는 반드시 특급방진마스크 등 호흡용보호구 착용을 하는 것이 필요하며, ④촉매분진 등 외부유출을 차단하기 위하여 반응기 출입 통로 입구측에 작업복 갱의실과 샤워실 및 탈의실 등 위생설비를 연결하여 사용하는 것도 고려되어야 할 것이다. 향후 연구과제로 바닥분진의 재비산을 최소화하기 위한 방법으로 공기유입구의 개수를 늘리거나 유입면적을 늘려 유입속도 결정 등 추가 변수 연구와 함께 진공흡입 방식 촉매회수작의 사용에 따른 급배기밸런스 설계 및 파쇄분진 최소화 회수방법 등에 관한 연구가 필요하다.

## References

- Cengel YA. Introduction to thermodynamics and heat transfer; McGraw-Hill College, 2007:551
- Choi DH, Kang DH. Experimental and computational fluid dynamics (CFD) Methods to analyze particle resuspension and dispersion in buildings. Journal of the architectural institute of Korea planning & design 2013;29(10):275-282
- Hinze JO. Turbulence; McGraw-Hill company,;1975.
- Jang DS, Acharya, S.; Calculation of particle dispersion due to turbulence in elliptic flows, AIChE Journal, 1988; 34(3):514-518
- Lee SJ, Kim CL, Lee WJ. CFD explanation and verification of multi Inner Stage cyclone for the Particle Removal. Journal of the Korea Society of Computer and Information 2013;18(1):149-156
- Patankar SV. Numerical heat transfer and fluid flow; McGraw-Hill company,;1980.
- Ren T, Wang Z, Cooper G. CFD modelling of ventilation and dust flow behaviour above an underground bin and the design of an innovative dust mitigation system. Tunnelling and underground space technology 2014;41: 241-254
- Subhashini G, Nigam KD. CFD modeling flow profiles and interfacial phenomena in two-phase flow in pipes, Chemical Engineering and Processing 2005;1:56-65