

악취처리를 위한 건식 중공 흡착탑에 대한 유동해석

조은만*, 정원훈**, 김봉환***,#

* (주)리엔텍엔지니어링, ** 경상국립대학교 일반대학원 자동차공학과, *** 경상국립대학교 자동차공학과

Flow Analysis of Dry-Type Hollowed Adsorption Tower for Treatment of Deodorization

En-man Cho*, Won-hoon Jeong**, Bong-hwan Kim***,#

*Reentec engineering Ltd., **Department of Automotive Engineering, Graduate School of Gyeongsang National University, ***Department of Automotive Engineering, Gyeongsang National University

(Received 06 June 2022; received in revised form 15 June 2022; accepted 20 June 2022)

ABSTRACT

The aim of this study is to improve the purification efficiency of odor gas by increasing the contact area between an odor gas and adsorbent. To analyze the flow in the adsorption tower, the flow characteristics in the hollow activated carbon-adsorption tower are identified by applying the loss model, which is a porous flow analysis model. The flow characteristics are investigated for pressure loss, velocity distribution, turbulent kinetic energy, and residence time distribution. The results show that the hollow adsorption tower performs better than the solid adsorption tower in terms of pressure loss and performance. The inner diameter of the hollow region inside the adsorption tower is 0.64 m ($D_i/D_o = 0.37$). Furthermore, the adsorbent performance is unaffected even when adsorbent stages are installed to replace the adsorbent.

Keywords : Activated Carbon(활성탄), Adsorption Tower(흡착탑), Hollow Type(중공형), Odor Gas(악취 가스), Porous Media(다공성 매질), Residence Time(체류 시간)

1. 서론

국내 하·폐수처리장, 음식물 처리장, 슬러지 자원화 등의 환경기초시설에서 공정 특성상 유발되는 다량의 고농도 악취에 대응하기 위한 탈취 설비로 약액 세정식 스크러버(Wet scrubber)가 주를 이루고 있다. 이러한 약액 세정식 스크러버의 탈취효율을 증가시키기 위한 노력으로 다단의 약액

세정탑의 사용, 약액 세정식과 미생물 탈취 필터(Bio-filter)를 복합형으로 사용하는 시스템 등을 사용하고 있다. 또한, 흡착제를 충전한 건식 흡착탑과 약액 세정식 탈취탑을 함께 적용한 건·습식 혼합형 탈취시스템을 사용하여 단일형 시스템보다 우수한 탈취성능을 확보하기도 한다¹⁻²⁾. 기존 흡착제를 이용한 건식 흡착시스템은 탱크 내부에 흡착제를 충전하여 오염 공기를 정화하는 방식이며, 흡착제의 입경, 다공도(Porosity) 등이 상이하다.

상대적으로 접촉면적이 크게 되면 오염 공기가 스크러버 내부의 흡착제를 거쳐 통과하지 못하게

Corresponding Author : bhwkim@gnu.ac.kr
Tel: +82-55-772-3645, Fax: +82-55-772-3649

되어 흡착률이 떨어지게 된다. 따라서, 탱크의 크기가 커질 수밖에 없다. 통상적인 흡착탑은 구조상 단일형 시스템으로 상향류의 가스 흐름에 의하여 하부 층진층부터 파괴되어 기능상실, 내구수명의 단축이 일어나, 흡착제의 교체주기가 4개월 미만으로 빠른 문제점이 있었다^[3,4]. 따라서, 이러한 단점을 극복하기 위하여 건식 흡착탑의 탈취와 흡착성능의 균일성과 내용 수명을 높이는 기술개발이 절실히 요구되고 있다.

본 연구는 불규칙 각형 활성탄(Activated carbon)을 이용한 건식 흡착탑에 있어서 악취 원인 오염공기와 층진된 흡착제 간의 접촉면적을 150% 이상 증대시키고 오염공기의 정화효율을 더욱 향상시키고, 압력손실을 줄이기 위해 중공(Hollow) 형태의 건식 흡착탑을 설계하였다. 또한, 불규칙한 형상의 활성탄 흡착제의 다공체 유동특성^[8]을 적용한 다공체(Porous media) 유동해석을 수행하였다. 중공 흡착탑 내에서의 압력손실, 속도분포, 난류운동에너지(Turbulence kinetic energy), 체류시간(Residence time) 분포에 대해서 분석하여 평가하였으며, 최적의 건식 흡착탑의 설계조건을 제시하였다.

2. 유동해석 방법 및 조건

2.1 지배방정식

중공 흡착탑 내부 유동해석을 수행하기 위하여 ANSYS사의 Workbench V14.5를 사용하였다. 3차원 정상상태, 연속방정식과 운동량방정식을 사용하였으며, Standard k-ε 난류 모델을 적용하였다. 연속방정식과 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식은 다음과 같다^[5-6].

- 질량 보존 방정식

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

- 운동량 보존 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \\ - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] \\ + \rho g_i + \vec{F}_i \end{aligned} \quad (2)$$

난류운동에너지, k와 난류 소산율, ε 방정식은 식 (3)과 같다.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] \\ + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3 \quad (6)$$

식 (4)~(5)에서, G_k 는 평균속도 구배로 인한 난류에너지 생성을 나타내며, G_b 는 부력으로 인한 난류에너지 생성을 나타낸다. $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, $C_{3\epsilon}$ 는 각각 난류상수이며, σ_k 와 σ_ϵ 는 k와 ε에 대한 난류 Prandtl 수를 나타낸다. 또한, 난류점성계수, μ_t 는 k와 ε으로부터 계산된다. 그 외의 모델 상수는 식 (6)과 같다.

2.2 중공 흡착탑 형상 모델링

유동해석에 필요한 흡착탑의 3D 모델링을 위해 CATIA V5를 이용하여 Fig. 1(a)와 같이 모델링 하였다. 흡착탑 중앙에 유로가 형성되어 있으며, 흡착탑 내부의 유로의 끝단을 막아 유체가 출구로

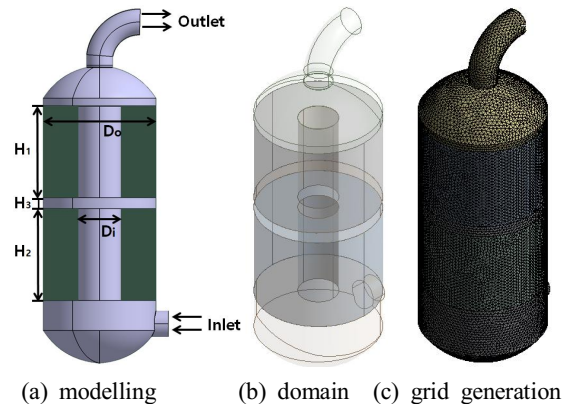


Fig. 1 Analysis model of hollow adsorption tower

Table 1 Mesh information

Description	Number
Nodes	258,303
Elements	905,746

바로 배출되지 않고, 흡착제를 거쳐 배출되도록 모델링 하였다. 흡착제는 초기모델로 2단으로 구성하였으며, 흡착탑의 외경(Do)은 1.728m, 내경(Di) 0.54m, 총 높이는 2.73m으로 흡착제의 총용량은 5.749m³이다.

2.3 격자생성

격자 생성을 위해 ANSYS CFX V14.5를 사용하였다. Fig. 1(b)는 유동해석 영역을 나타내며, 격자생성은 Fig. 1(c)와 같이 비정렬 사면체(Tetra) 격자로 구성하였다. 해석의 정확도를 높이기 위해 흡착탑 벽면에 격자를 조밀하게 구성하였으며, 계산 격자에 대한 요소의 정보를 Table 1에 나타내었다.

2.4 경계조건 및 해석방법

흡착탑 유동해석에 사용된 경계조건(Boundary condition)은 Table 2와 같으며, 입구조건으로 유량 100m³/min, 출구는 대기압 상태로 적용하였다. 작동유체는 혼합가스를 사용하였으며, 자중을 고려하였다. 또한, 흡착제는 다공체 해석을 위한 Loss model을 적용하여 Porous domain으로 설정하였다.^[7]

해석에 사용된 활성탄 흡착제의 다공도는 0.58, 2차 저항계수(Quadratic resistance coefficient, C_{R2}) 값은 983kg/m⁴을 적용하였다. Table 3은 활성탄 흡착제의 물성치와 형상을 나타낸다^[8].

중공 흡착탑 내 유동에 대해서 다공체 유동해석 모델인 Loss Model을 적용하여 흡착탑 내에서의 압력손실, 속도분포, 난류운동에너지분포, 체류시간

Table 2 Informations of boundary conditions

Boundary Conditions	
Inlet	100 m ³ /min
Outlet	Atmospheric pressure
Mixed Gas	CH ₄ =0.6, CO ₂ =0.35, NH ₃ =0.025, H ₂ S=0.025

Table 3 Properties of activated carbon adsorbents

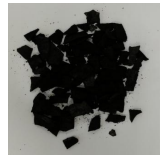
Properties	Value
Mesh Size [mm]	2-4
Apparent Density [kg/m ³]	500
Porosity	0.58
Pressure Loss Coefficient per unit length: K _L [1/m]	1,659
Quadratic Resistance Coefficient: C _{R2} [kg/m ⁴]	983
Shape : irregular square	

Table 4 Analysis variables range

Analysis variables	Values
Inner Diameter Di [m]	0.34, 0.44, 0.54, 0.64, 0.74
Di/Do	0.197, 0.255, 0.314, 0.370, 0.428
No of Stage	2, 3, 4, 5

에 대해 분석하여 흡착탑의 성능을 평가하였다^[9]. 흡착탑의 설계조건을 정립하기 위하여 Table 4와 같이 탑의 내부 직경비(Di/Do), 흡착탑 내부의 분리 단(Stage) 수를 변수로 하여 유동해석을 진행하였다.

3. 유동해석 결과 및 고찰

본 연구에서는 흡착탑 내 활성탄 흡착제에 의한 압력손실 등 유동특성을 파악하기 위하여 3가지 경우에 대해서 유동해석을 수행하였다. 첫째, 2단의 중공 흡착탑에 대한 유동해석을 수행하여 기존의 중실(Solid) 흡착탑과의 유동특성을 비교분석하였으며, 둘째, 중공 흡착탑의 내경의 영향을 알아보기 위해 내경을 기존 0.54m에서 0.34m, 0.44m, 0.64m, 0.74m로 변경하여 유로의 내경 변화에 대한 유동특성 변화를 파악하였다. 셋째, 앞선 2단 중공 흡착탑 내부의 흡착제의 용량을 고정하고, 단수를 2단, 3단, 4단, 5단으로 변경하여 단수 변화에 따른 유동특성 변화를 검토하였다.

3.1 2단 중공 흡착탑에 대한 유동해석

흡착탑의 초기형상 2단 모델에 대한 유동해석을 수행한 결과를 Table 5에 정리해서 나타내었으며, Fig. 2는 결과정리에 사용된 Plane의 위치를 나타낸다. Fig. 3과 4는 중실과 중공 흡착탑 내에서의 속도분포, 난류운동에너지 그리고 체류시간 분포를 나타낸다. 흡착탑의 입구 측 유속은 18.28m/s이며, 출구 측의 유속은 19.06m/s이다. 그리고 흡착탑 내부의 유동 평균 체류시간은 약 3.22초였으며, 난류운동에너지는 약 12.1J/kg이다. 또한, 입·출구에서의 압력손실은 90.5mmAq인 것으로 나타났다. 흡착탑 내부가 흡착제로 가득 채워진 중실 흡착탑에 비하여 압력손실이 약 100mmAq 작게 나타났는데, 이는 중공 흡착탑 내부 통로로 인하여 가스가 잘 배출되기 때문이다. 특히 중공 흡착탑 내부에서의 높은 난류운동에너지와 체류시간(Residence time)의 증가는 악취성분의 흡착성능을 향상시킬 것으로 예상된다^[9-10]. 따라서 압력손실 측면과 반응과 관계되는 난류운동에너지와 체류시간 측면에서 중공 흡착탑이 중실 흡착탑에 비해 매우 유리할 것으로 판단된다.

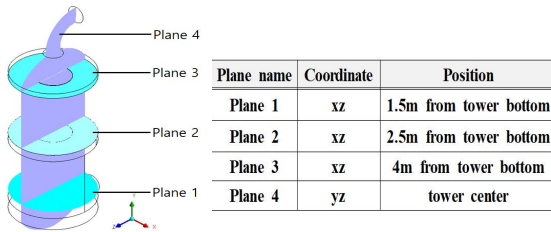
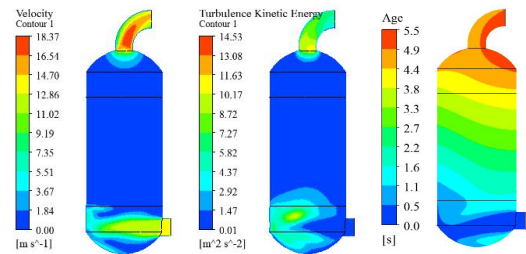


Fig. 2 Plane position of adsorption tower

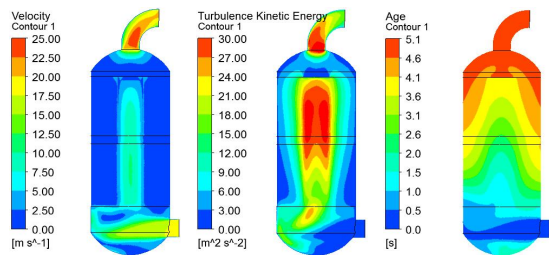
Table 5 Flow analysis results of hollow type model

Flow Characteristics	Position	Values
Pressure [mmAq]	Inlet	90.6
	Outlet	0.1
	ΔP	90.5
Velocity [m/s]	Inlet	18.3
	Outlet	19.1
	Plane 1	4.9
	Plane 2	1.2
	Plane 3	1.9
Turbulence kinetic energy [J/kg]	Avg. Plane 4	12.1
	Max. Plane 4	35.7
Residence time [s]	Avg. All domain	3.22
	Max. All domain	5.11



(a) Velocity contour (b)T.K.E contour (c) Residence time

Fig. 3 Analysis results of solid adsorption tower



(a) Velocity contour (b)T.K.E contour (c) Residence time

Fig. 4 Analysis results of hollow adsorption tower

3.2 흡착탑 내경 변화에 대한 유동해석

흡착탑의 압력손실을 최소화하기 위하여 중공 흡착탑의 내경을 변경하여 유동해석을 수행하였다. 이때 흡착탑의 외경은 1.728m로 모두 동일하다. 기존 내경 0.54m에서 0.34m, 0.44m, 0.64m, 0.74m로 0.1m로 변경하였으며, 모든 모델의 흡착제 총용량은 동일하다. 또한, 흡착제 사이의 간격(H₃)은 0.17m으로 동일하다. 각 모델에 대한 흡착제의 외경과 내경의 비(D_i/D_o)와 총 높이(H_T=H₁+H₂) 등 형상은 Table 6에 나타내었다. 유동해석 결과를 살펴보면, Fig. 5와 같이 중공 흡착탑의 내경이 증가할수록 입·출구의 압력손실이 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 혼합가스가 흡착탑 내부를 통과할 때 흡착제로 인한 저항이 감소하여 이러한 결과를 나타내는 것으로 판단된다. 흡착제의 내경이 0.64m(D_i/D_o=0.37)일 경우의 입·출구 압력손실은 80.04mmAq이며 이는 흡착탑 설계의 요구조건인 80mmAq와 유사함을 보여준다. 또한, Fig. 6과 같이 흡착탑의 내경이 증가할수록 혼합가스의 체류시간이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

흡착제의 내경이 0.74m($D_i/D_o=0.428$)일 경우에는 입·출구에서의 압력손실은 감소하지만, 흡착탑의 높이가 증가하여 설계에 적용하기 힘들 것으로 판단된다. 압력손실과 실제 적용 가능성을 고려하여 흡착탑의 내경을 0.64m($D_i/D_o=0.37$)으로 결정하였으며, 이때, 입구 측의 유속은 18.3m/s이며, 출구 측의 유속은 19.1m/s이다. 그리고 흡착탑 내부의 평균 체류시간은 약 3.28초였으며, 난류운동에너지는 약 10.8J/kg이다. Fig. 7은 속도분포와 난류운동에너지 분포 그리고 체류시간 분포를 나타내며, 결과에서 흡착탑 중공 부에서 높은 속도와 난류운동에너지 분포를 나타냄을 알 수 있으며, 흡착성능에 유리한 영향을 미칠 것으로 보인다^[9-10].

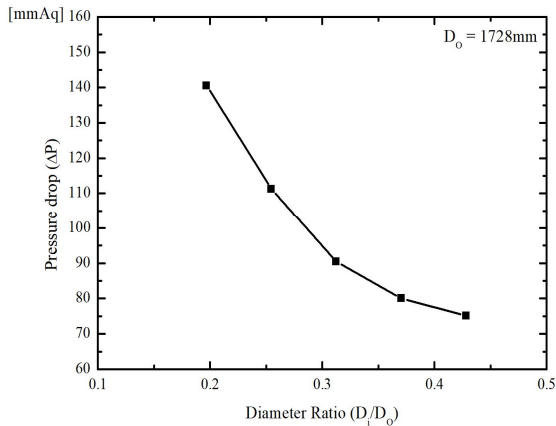


Fig. 5 Pressure drop for diameter ratio

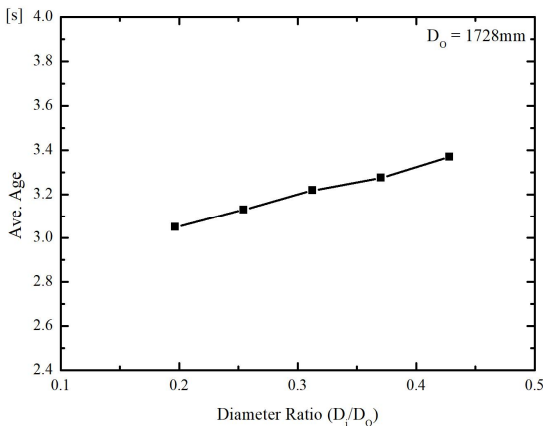
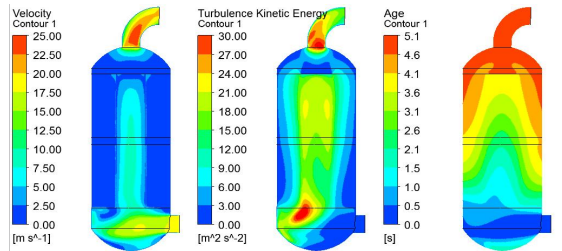


Fig. 6 Average residence time for diameter ratio

Table 6 Dimension of 5 diameter ratio models

Dimension of 5 models					
D_o [m]	1.728				
D_i [m]	0.34	0.44	0.54	0.64	0.74
D_i/D_o	0.197	0.255	0.314	0.370	0.428
H_i [m]	2.56	2.63	2.73	2.86	3.02



(a) Velocity contour (b) T.K.E contour (c) Residence time
Fig. 7 Analysis results for diameter ratio 0.37

3.3 흡착탑 단수 변화에 대한 유동해석

흡착제는 소모성이며, 수명이 다할 경우 흡착탑 성능에 영향을 미친다. 따라서, 흡착제를 주기적으로 교체하여야 하며 1단으로 구성되어 있을 경우, 교체가 불편하며 많은 시간이 소요된다. 따라서, 흡착제의 단수를 나누게 된다면 흡착제 교환이 용이하고 교체 시간을 줄일 수 있는 장점이 있다.

따라서 흡착탑 단수의 영향을 알아보기 위해 흡착탑 내경 0.64m($D_i/D_o=0.37$)의 모델에 대해 단수를 변경하여 유동해석을 수행하였다. 기존의 2단에서 3단, 4단, 5단으로 변경하였으며, 흡착제의 총용량은 5.749m³로 동일하다. 흡착탑 단 사이의 간격(H_s)은 2단을 기준으로 0.17m이며, 단수가 많아질수록 간격이 감소한다.

Table 7은 각 모델에 대한 단(Stage) 사이의 간격과 형상을 나타낸다. 해석결과를 살펴보면, Fig. 8과 같이 2단~5단에서의 입·출구의 압력손실은 각각 80.04mmAq, 80.9mmAq, 81.1mmAq, 81.2mmAq으로 유사하게 나타났다. 즉, 단수를 변경해도 흡착탑의 입·출구의 압력손실에는 거의 영향이 없는

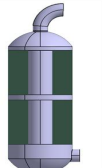
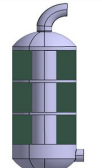
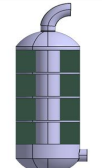
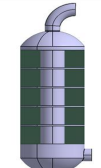
것을 알 수 있다. 또한, Fig. 9의 단수 변경에 따른 입·출구의 난류운동에너지도 큰 차이를 보이지 않는다. 따라서 흡착제 교체의 편리성을 고려하여 단수를 많이 나누어도 흡착탑의 성능에는 영향이 없는 것으로 판단된다. Fig. 10은 5단일 경우의 속도분포, 난류운동에너지 분포 그리고 체류시간 분포를 보여준다.

5. 결론

악취처리를 위한 건식 중공 흡착탑에 대한 유동해석을 통하여 다음과 같은 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 중공 흡착탑을 적용할 경우 내부가 흡착제로 가득 채워진 중실 흡착탑에 비하여 압력손실이 훨씬 작게 나타났으며, 중공 흡착탑 내부에서의 높은 난류운동에너지와 체류시간의 증가는 악취 성분의 흡착 성능을 향상시킬 것으로 예상된다. 따라서 압력손실 측면과 반응과 관계되는 난류운동에너지와 체류시간 측면에서 중공 흡착탑이 중실 흡착탑에 비해 매우 유리할 것으로 판단된다.

Table 7 Dimension of 4 stage models

Dimension of 4 models				
Stage No.	2	3	4	5
H ₃ [m]	0.17	0.085	0.057	0.0425
Model				

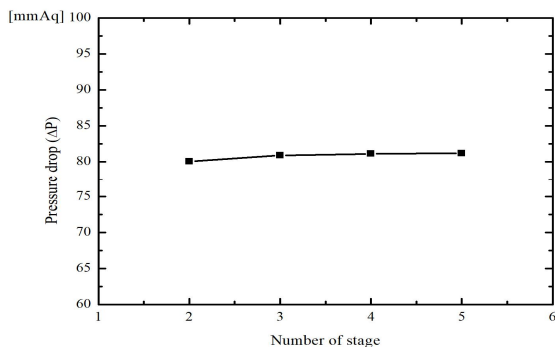


Fig. 8 Pressure drop for number of stage

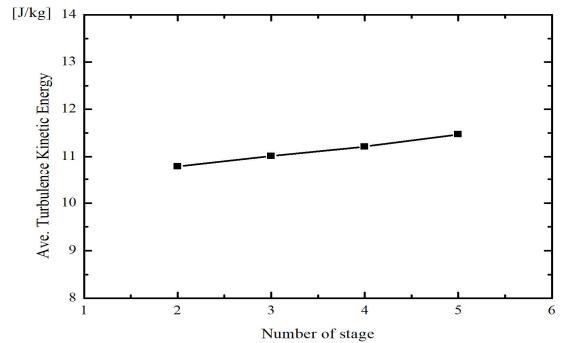
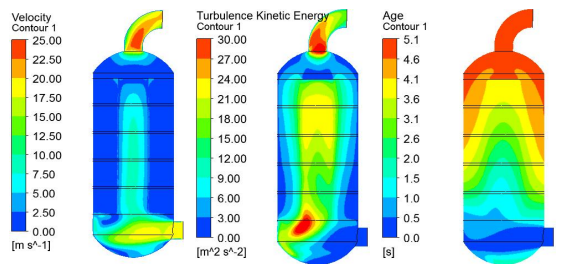


Fig. 9 Average T.K.E for number of stage



(a) Velocity contour (b)T.K.E contour (c) Residence time

Fig. 10 Analysis results for 5 stages model

2. 중공 흡착탑의 내부 직경이 증가할수록 압력손실이 작아지며, 난류운동에너지는 큰 차이가 없었다. 가스의 평균 체류시간은 조금씩 증가하는 것을 알 수 있으며, 흡착탑의 높이와 압력손실 특성을 고려하여 흡착탑의 내경을 0.64m(Di/Do=0.37)으로 설계하는 것이 적절하다고 판단된다.
3. 내경 0.64m인 중공 타입 흡착탑에 대하여 단수 변화에 따른 유동해석을 수행한 결과, 단수가 변화하여도 압력손실과 난류운동에너지에는 영향이 거의 없었다. 또한, 흡착제의 교체 작업이 용이하도록 단수를 나누어 설계하여도 성능 변화는 크게 없는 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Chang, T. S., Park, J. H., Kang, T. J., Roh, J. S., Hur, Y. J. and Park, S. K., "Adsorption Performance of Odorant over Adsorbents from Water Treatment Sludge", Journal of Energy &

- Climate Change, Vol. 12, No. 2, pp. 144-153, 2017.
2. Lee, B. K., Lee, S. H. Yak, S. J. and Lee, B. K., "The Study on the Removal of Odor Emitting Environmental Fundamental Facility", Journal of Climate Change Research, Vol. 8, No. 1, pp. 51-56, 2017.
 3. Xu, R. B., Kim, T. H., Ha, H. C. and Piao, C. X. "Odor Removal with Powdered Adsorbent using Bag-filter System", Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene, Vol. 27, No. 4, pp. 291-301, 2017.
 4. Choi, S. Y., Han, D. H. and Kim, S. S., "A Study on the Optimization of Activated Carbon Adsorbent Preparation Condition and Evaluation of Application Supporting of K-Fe-Li Ternary Metal Ions for Improving Adsorption Capacity of Hydrogen Sulfide (H₂S)", Journal of the Korean Society of Clean Technology, Vol. 25, No. 3, pp. 189-197, 2019.
 5. Choi, C. R. and Koo, Y. S., "Numerical Analysis on Flow Characteristics in the Reactor of an Integrated Adsorption/Catalysis Process with Bag Filters", Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol. 23, No. 2, pp. 203-213, 2007.
 6. Kim, J. U., Jung, Y. J. Yoo, J. K. and Shon, B. H., "A Study on Numerical Calculations of Hybrid Air Pollution Control System Coupled with SDR and Bag Filter(II)-Structural Improvement", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 12, No. 2, pp. 985-992, 2011.
 7. Kim, N. Y. and Kim, B. H., "CFD Analysis of Porous Foamed Aluminium for Flow Silencer", Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 22, No. 5, pp. 845-851, 2020.
 8. Jang, Y. H., Kim, B. H. and Kim, S. S., "Investigation of Optimum Condition of Heat Treatment and Flow to Improve H₂S Adsorption Capacity for Practical Use of an Activated Carbon Tower", Appl. Chem. Eng., Vol. 32, No. 1, pp. 91-96, 2021.
 9. Lee, C. Y., Kim, B. H. and Jo, E. M., "A Study on the Characteristics of the Gas Flow in Wet Scrubber System for Deodorization", Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 19, No. 5, pp. 614-619, 2017.
 10. Choi, C. R., "Flow Characteristics and Residence Time of Activated Carbon in the Cyclone for Optimized Design of an Adsorption/Catalysis Reactor", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-B, Vol. 31, No. 5, pp. 416-424, 2007.