

미니 하이드로 사이클론 분리기의 이중배열을 통한 성능특성 평가

권제영*, 김승경**, 홍준규**, 이형욱*, 강명창**,#
*홍성정공(주), **부산대학교 융합학부

Evaluation of Performance Characteristics by Dual Arrangement of Mini-hydrocyclone Separators

Je-Young Kwon*, Seung-Kyung Kim**, Jun-Gyu Hong**, Hyung-Wook Yi*, Myungchang Kang**,#
*Hongsung Precision Co., Ltd.

**Graduate school of convergence science, Pusan National University, Busan 46241,
Republic of Korea

(Received 31 August 2021; received in revised form 28 September 2021; accepted 08 October 2021)

ABSTRACT

A cyclone is a dust-separating mechanism that works on the principle of centrifugal force. The performance of a cyclone is evaluated using pressure loss and collection efficiency. A multi-cyclone arrangement is used to improve the collection efficiency within a limited area. In this study, experiments and numerical analyses were conducted on a dual arrangement of mini-hydrocyclone separators, which was fabricated using 3D printing. The experiment was performed at an inlet flow rate of 0.7 m/s, and alumina powder with a particle size of 0.5, 15, and 50 μm . ANSYS FLUENT, was used for the numerical analysis. The reliability of the numerical analysis was verified through a comparison with the experimental results. The errors in the experiment and numerical analysis were confirmed to be 2% at the outlet flow rate.

Keywords: Mini Hydro Cyclone Separator(소형 하이드로 사이클론 집진기), Dual Arrangement of Cyclone (사이클론의 이중배열), 3D Printing(3D프린팅), Separation Efficiency(분리효율), Flow Rate(유량)

1. 서 론

하이드로 사이클론 분리기(Hydro Cyclone Separator)는 원심력을 사용하여 물과 입자를 분리하는 장치이다. 하이드로 사이클론은 입구를 통하여 물과 입자가 섞인 혼합물이 주입되고 와류 발생기에 의해

발생하는 원심력으로 물과 입자가 분리되어 크고 무거운 입자는 하부 출구로, 물과 작고 가벼운 입자는 상부 출구로 빠져나가게 된다.^[2-3]

사이클론의 크기와 형태에 대한 선택은 혼합물의 밀도와 속도, 입자 크기와 회수에 기초하고 있으며, 입구에서의 압력 강하가 분리효율에 밀접한 영향이 있다.^[4] 압력 강하는 입구 속도와 사이클론 직경의 함수로써 소형 사이클론이 대형 사이클론보다 더 효율적이다. 그러나 소형 사이클론은 체적 유량의 제한이 있어, 이러한 단점을 일부 극복하기 위해

Corresponding Author : kangmc@pusan.ac.kr
Tel: +82-51-510-2361, Fax: +82-51-518-3360

사이클론 분리기를 직렬 또는 병렬로 배열하여 낮은 유량에도 분리효율을 높이는 방법이 있다.^[5-8]

현재 발전플랜트를 비롯한 산업 현장에서 공정수의 수질 관리를 위해 SWAS(Steam and Water Analysis System)설비를 활용하여 오염 정도를 실시간으로 측정하여 분석하고 있다. 기존에는 스트레이너(Strainer) 타입의 필터를 사용하여 배관 내 이물질을 제거하고 있는데, 수질 분석기에서 요구되는 $50\mu\text{m}$ 이하의 이물질 크기에서 90% 이상의 분리효율 성능을 제대로 발휘하지 못하고 있어 설비 파손으로 인한 부품 교체나 잦은 정비 등 문제를 일으키고 있다.^[1] 현재의 필터에서 요구되어지는 필터 크기와 배관 내 이물질을 90% 이상 분리하기 위해 소형 사이클론으로 대체할 수 있으며, 제작비용과 시간의 절감을 위해 3D 프린터를 활용하여 형상을 제작할 수 있다.

본 연구에서는 미니 사이클론을 3D 프린터로 제작하고, 수질분석기 배관 내 존재하는 다양한 크기의 미세입자에서 분리효율 성능을 높이기 위하여 사이클론의 이중배열 모델을 제시하여 분리효율 평가를 수행하였다. 또한 이중배열 사이클론 분리기의 제작에 앞서 이러한 형태가 유량, 속도, 입자 크기 등 성능 매개변수에 미치는 영향을 CFD 해석을 통해 조사하였다.

2. 사이클론 분리기의 이중배열 디자인 및 해석조건

2.1 이중배열 사이클론의 구조

본 연구에서는 미니 하이드로 사이클론 분리기를 이중배열하여 해석모델로 사용하였으며, 각각의 분리기는 원통부와 원추부로 이루어진다. Fig 1과 같이 첫 번째 사이클론 분리기의 Over flow와 두 번째 사이클론 분리기의 Inlet은 서로 접합면을 가지며 상호 연결되는 구조이다. 유체는 첫 번째 사이클론의 Under flow를 통해 1차로 분리되며, 상부 접합면을 지나 두 번째 사이클론의 Under flow에서 2차 분리가 발생하여 최종적으로 Over flow를 통해 분리되지 못한 입자와 물이 배출된다. 이중배열로 설계된 사이클론의 규격은 Table 1에 정리하였다.

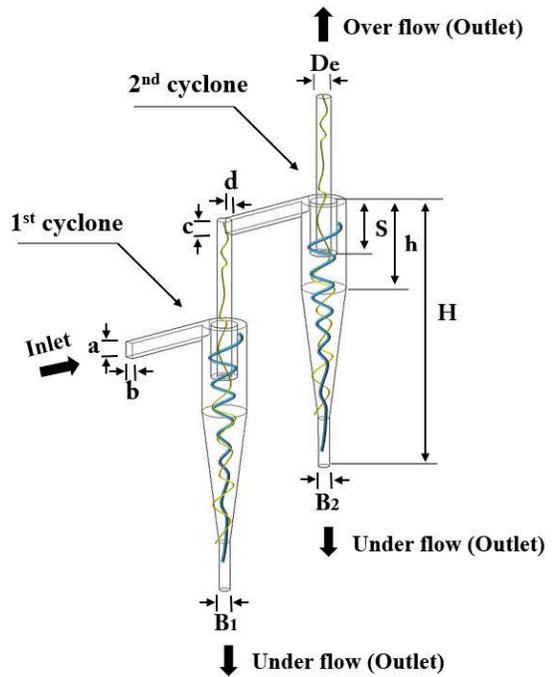


Fig. 1 Schematic of the modeled dual-cyclone separator

Table 1 Parameters of model

(Unit : mm)

a	b	B1	c	d	De	B2	s	h	H
2	3.5	2.5	2	3.5	3	2.5	12	20	65.5

2.2 이중배열 사이클론 해석조건

해석모델은 발전플랜트의 공정수 처리를 고려하여 이중 필터의 형태로 설계되었으며, 물을 작동 유체로 선정하고 금속 입자의 거동을 살펴보기 위하여 상용프로그램인 ANSYS FLUENT를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 사이클론 분리기의 난류 모델은 swirl 속도장을 예측할 수 있는 Reynolds Stress Model(RSM)을 사용하였고, 해석 조건은 Table 2에 나타내었다. 사용된 액체는 물이며, 분당 물 1L 와 $0.5\mu\text{m}$ - $50\mu\text{m}$ 크기의 알루미나 입자 25g을 투입하는 것으로 해석 조건을 설정하였다. 물성치에 대한 입력값은 프로그램의 상수값을 적용하였다.

사이클론 입구 주입속도는 0.7m/s 이며, 내부 온도변화는 고려하지 않았고, 유동에 작용하는 중력은 정상 상태로 가정하였다.

ANSYS MESHING을 통해 Fig. 2와 같이 지오메트리 검사와 적합한 격자를 생성하였으며, 약 125,000개의 격자 생성을 통해 품질에 대한 효율성과 정확성을 확보하였다.

Table 2 Boundary conditions

Specification	Condition
Time	Steady state
Viscous	RSM turbulence model
Liquid	Water
Input Quantity	Water 1L
	Alumina Powder 25g
Particle Density	3950 kg/m ³
Particle Size	0.5 ~ 50 μm
Input Flow Rate	0.7 m/s
Outlet	Overflow : pressure-outlet
	Underflow1 : pressure-outlet
	Underflow2 : pressure-outlet
Wall	No-slip condition (smooth walls)

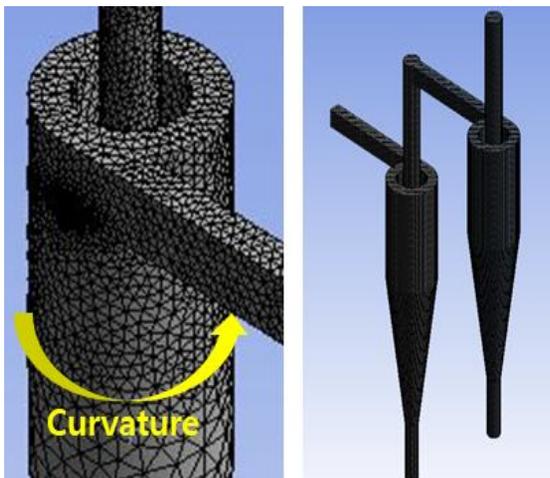


Fig. 2 Grid Systems

3. 실험장치 및 방법

3.1 3D 프린팅을 활용한 사이클론 제작

미니 하이드로 사이클론 분리기는 Stairmand (1951)의 고효율 사이클론을 설계에 참조하여 유량과 압력 조건을 충족할 수 있도록 Inlet과 Outlet의 크기를 결정하였다. 미니 구조를 가공함에 있어 본 연구에서 제작된 사이클론은 3D 프린팅 기술을 활용하였고, PC Like 소재(투명)를 사용하여 내부 유동장을 관찰할 수 있게 제작하였다. 첫 번째 사이클론과 두 번째 사이클론은 일체형으로 연결되는 직렬 구조이며, 입구와 출구 측은 플랜지(flange) 형태로 피팅(pitting)을 체결하여 배관의 연결이 용이하게 설계 하였다. 제작된 사이클론은 Fig. 3에 나타내었다.

3.2 사이클론 실험장치 및 방법

본 연구에서는 수질분석 설비의 배관 내 이물질인 적철석과 자철석을 분리하는 과정을 가정하였으며, 적철석, 자철석과 유사한 밀도의 알루미늄 입자로 대체하여 사용하였다. 입자의 물성 데이터는 Table 3과 같다. Fig. 4는 사이클론 분리기의 실험 장치의 구성도이며, 실험 과정은 Fig. 5에서 나타나고 있다. 먼저 비커에 물 2,000ml와 알루미늄 분말 50g을 준비하여 교반기를 통해 혼합하였으며, 혼합물은 정유량 펌프에 의해 450rpm의 일정한 유량으로 사이클론 분리기에 공급될 수 있도록 구성하였다.

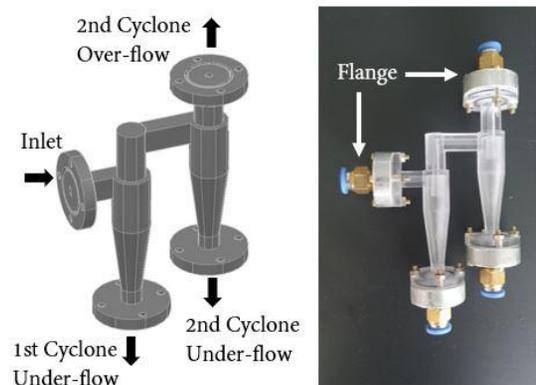


Fig. 3 3D model and Hydro cyclone photo

유량 센서에서 설정된 유량값은 1,800ml/min이며, 입구 압력은 약 1.5bar이다. 입자 크기에 대한 성능 평가를 위해 알루미나 입자 0.5 μ m, 15 μ m, 50 μ m 3가지에 대해 각각 실험을 진행하였다.

실험 장치에서 분리된 입자의 양을 측정하기 위하여 첫 번째 사이클론의 Under flow에서 배출된 혼합물과 두 번째 사이클론의 Under flow, Over flow에서 수집된 혼합물은 별도의 비커에 수집하였다. 실험의 평가는 3개의 비커를 건조하여 건조된 분말을 중량측정법으로 계산하였다. 중량측정법을 통해 분리효율을 산정한 계산식은 식(1)과 같다.

$$Se (\%) = \frac{1st UF + 2nd UF}{1st UF + 2nd UF + 2nd OF} \times 100 \quad (1)$$

여기서 Se(%)는 Separation efficiency, 1st UF는 1st cyclone under flow weight, 2nd UF는 2nd cyclone under flow weight, 2nd OF는 2nd cyclone over flow weight 이다.

Table 3 Property data of Alumina

Maker	D50	Al ₂ O ₃ [%]	Specific gravity[g/cm ³]	Color
Sumitomo	0.5	99.9	3.9	White
	15	99.9	3.9	White
	50	99.9	3.9	White

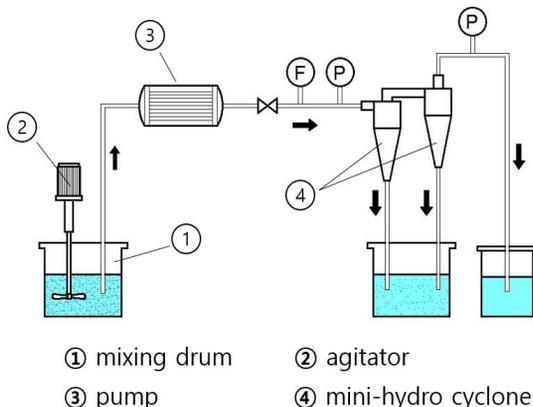


Fig. 4 Experimental schematic

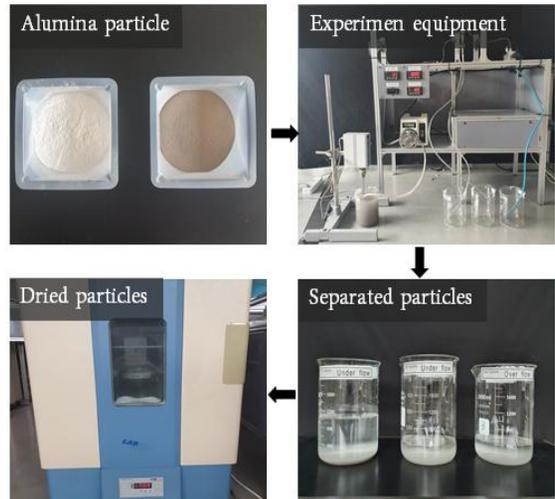


Fig. 5 Test circuit

4. 결과 및 고찰

4.1 이중배열 사이클론의 해석결과

미니 하이드로 사이클론 이중배열 모델에서 배출되는 유동비율을 관찰하기 위해 0.7m/s 속도에서 물 1L당 Min 0.5 μ m ~ Max 50 μ m 크기의 알루미나 입자를 총 25g 혼합조건으로 투입하여 수치해석을 실행하였다. 입자 크기에 따른 수치해석 결과는 Table 4에 나타내었다. 유동비율에서 나타나는 총 입자의 개수는 48,471,451개로 1차 Under flow, 2차 Under flow, 2차 Over flow에서 5.9:1.9:2.2인 것을 알 수 있었다.

1, 2차로 진입하는 사이클론의 형성과 변화는 Fig. 6에 나타내었다. 첫 번째 사이클론 분리기의 입구로부터 선회운동을 하여 하강하는 1차 와류를 형성시키며, 하강할수록 좁아지는 내벽에 의해 상승하는 2차 와류가 발생하여 두 번째 사이클론 분리의 접합면을 통해 진입하게 된다. 두 번째 사이클론 분리기에서는 첫 번째 사이클론과 같은 원리로 1, 2차 와류가 다시 발생하게 되며, 두 번째 사이클론 분리의 2차 와류는 Over flow를 통해 배출된다.

속도에 따른 내부 유동장의 변화는 Fig. 7에 나타내었다. 첫 번째 사이클론 분리의 원통하부에서

상승하는 2차 와류의 선회 속도가 급격하게 증가하여 두 번째 사이클론 분리기의 접합면을 통해 흘러가는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 첫 번째 사이클론의 입구에서 내벽을 통해 선회하는 구간과 두 번째 사이클론 내벽을 선회하는 구간에서 상대적으로 속도 값이 떨어지는 것으로 확인되며, 이는 1차 사이클론 와류가 생성되는 지점이다. Y축을 기준으로 사이클론의 속도와 내부 압력이 가장 높은 구간은 첫 번째 사이클론과 두 번째 사이클론 모두 2차 와류가 형성되어 빠져나가는 Over flow 쪽에서 나타났으며, 1차 와류가 소실되는 Under flow 구간이 가장 낮았다.

Table 4 Results of flow rate simulation

Total flow rate	1st Under flow rate	2nd Under flow rate	2nd Over flow rate
48,471,451 ea (100%)	28,629,531 ea (59%)	9,161,781 ea (19%)	10,724,818 ea (22%)

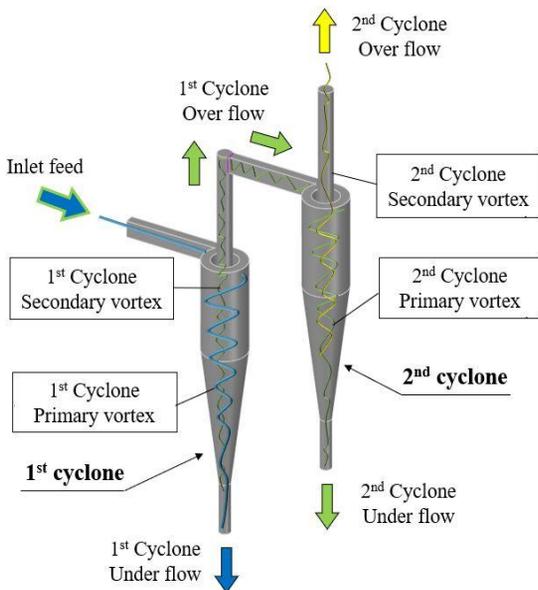


Fig. 6 Schematic diagram of the secondary vortex

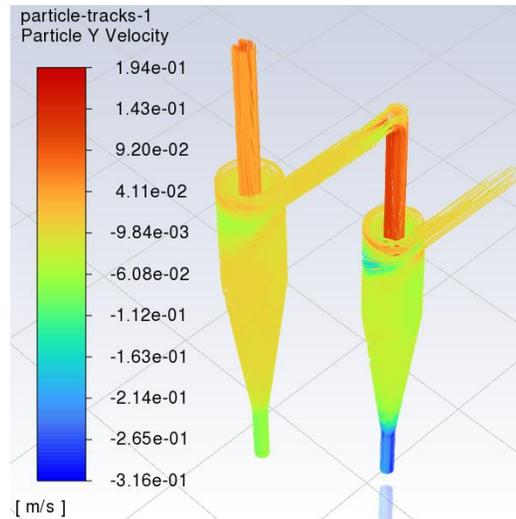


Fig. 7 Flow trajectory of flow simulation

4.2 이중배열 사이클론의 성능평가

성능평가에서는 Fig. 8과 같이 이중배열 하이드로 사이클론 분리기의 1차 Under flow와 2차 Under flow, 2차 Over flow로 배출되는 물과 알루미나 입자 혼합물의 양을 측정하고 건조 후 중량측정법으로 입자의 분리효율을 평가하였다. 각 출구로 배출되는 혼합물의 양은 Table 5와 같다. 1차 사이클론 분리기의 Under flow에서 전체량의 51%가 배출되었으며, 2차 사이클론 분리기의 Under flow와 Over flow에서 각각 25%, 24% 씩 비교적 균일하게 배출됨을 확인할 수 있었다. 성능 평가를 위한 실험은 총 3회 반복수행하여 평균값으로 환산하였으며, 오차범위는 $\pm 0.4\%$ 이다.

이중배열 사이클론 분리기에서 수집된 슬러지의 양은 Table 6, Table 7, Table 8에 각각 나타내었으며, $0.5\mu\text{m}$ 에서 $50\mu\text{m}$ 입자로 사이즈가 커질수록 전체 분리효율이 점차 우수해지는 결과를 보였다. 특히 $0.5\mu\text{m}$ 입자에서는 1차 사이클론의 분리효율이 87.7%로 2차 사이클론을 거치지 않고서는 SWAS 설비에서 요구하는 분리효율 90% 이상을 달성할 수 없었다.

대부분의 슬러지는 1차 사이클론 구간에서 걸러짐을 알 수 있으며, 제작된 사이클론 분리기에서는 이중배열을 통해 2차 사이클론에서 3%~6.6%까지

분리효율을 더 확보할 수 있게 되었다. 입자 크기가 작아질수록 2차 사이클론의 분리효율이 증대되고 있으며, 이는 사이클론 분리기를 다중배열함으로써 미세입자로 갈수록 단일 사이클론보다 점차 우수한 성능의 분리효과를 기대할 수 있는 것으로 사료된다.^[7]

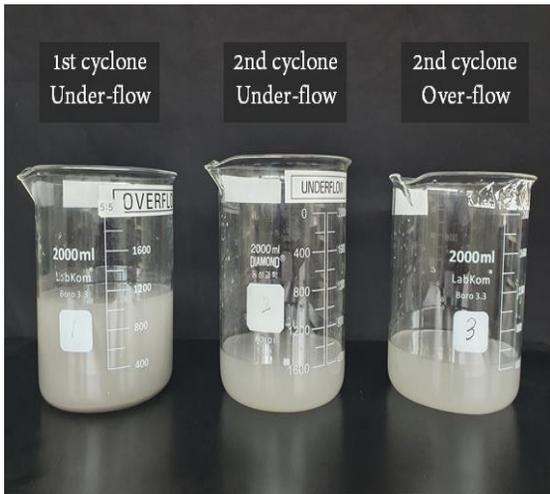


Fig. 8 Result of experiment

Table 5 Result of mass flow rate

Total volume	1st Under flow volume	2nd Under flow volume	2nd Over flow volume
2,000ml (100%)	1,020ml (51%)	500ml (25%)	480ml (24%)

Table 6 Result of separation efficiency 0.5 μm

1st Under flow sludge weight	2nd Under flow sludge weight	2nd Over flow sludge weight	Separation efficiency
42.8g (87.7%)	3.2g (6.6%)	2.8g	94.3%

Table 7 Result of separation efficiency 15 μm

1st Under flow sludge weight	2nd Under flow sludge weight	2nd Over flow sludge weight	Separation efficiency
44.8g (93.1%)	2g (4.2%)	1.3g	97.3%

Table 8 Result of separation efficiency 50 μm

1st Under flow sludge weight	2nd Under flow sludge weight	2nd Over flow sludge weight	Separation efficiency
46.2g (94.5%)	1.5g (3%)	1.2g	97.5%

5. 결 론

본 연구에서는 미니 하이드로 사이클론 분리기의 이중배열을 통해 설계된 사이클론의 적용 가능성과 분리효율 향상을 위해 수치해석을 수행하였다. 또한 3D 프린터를 활용하여 설계된 사이클론 분리를 제작하였으며, 실험 장치를 구성하여 중량측정법으로 유동비율과 입자 크기에 대한 분리효율 평가를 하여 다음과 같은 주요 결과를 얻었다.

이중배열 사이클론 분리기의 수치해석을 통해 성능지표로써 각 출구의 유동비율을 관찰하였다. Over flow에서 배출되는 유량이 해석에서는 전체의 22%, 실험에서는 전체의 24%로 약 2% 정도 차이가 있었다. 제작품의 정밀도를 비롯하여 오차에 대한 다양한 요인이 존재하지만 이중배열 사이클론의 복잡한 형상에도 수치해석으로 유량과 입자거동에 관한 예측이 가능함을 의미하였다.

3D 프린터로 제작된 이중배열 사이클론 분리기의 실험을 통하여 0.5 μm , 15 μm , 50 μm 입자의 1차 사이클론에서는 분리효율이 각각 87.7%, 93.1%, 94.5%임을 확인하였고, 2차 사이클론에서는 6.6%, 4.2%, 3%의 분리효율을 추가로 확보하여 전체적인

분리효율이 우수해짐을 알 수 있었다. 이는 사이클론의 이중배열로 SWAS 설비에서 요구하는 다양한 입자 크기에서 분리효율 90% 이상을 충족할 뿐만 아니라, 입자 크기가 작아질수록 2차 사이클론의 분리 효율이 증대됨을 의미하였다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. Yi, H. W., Kwon, J. Y., Lee, Y. U., Lee, M. W., Kang, M. C., "Analysis and Evaluation on Mass Flow and Separation Efficiency of Mini Hydro Cyclone Separator Manufactured by 3D Printing," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 20, No. 7, pp. 89-96, 2021.
2. Ko, H. W., Kim, H. S., "Theoretical Analysis and Experimental Evaluation of Small Cyclone Separator to Remove Fine Particulate Matter," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, A, Vol. 37, No. 1, pp. 77-82, 2013.
3. Kim, C. W., Seo, Y. J., "Design and Performance Prediction of Ultra-low Flow Hydrocyclone Using the Random Forest Method," Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 29, No. 2 pp. 83-88, 2020.
4. Mehdi, Azadi., Mohsen, Azadi., Ali, Mohebbi., "A CFD study of the effect of cyclone size on its performance parameters," Journal of Hazardous Materials, Vol. 182, pp. 835-841, 2010.
5. Robert, E., DeOtte, Jr., "A Model for the Prediction of the Collection Efficiency Characteristics of a Small, Cylindrical Aerosol Sampling Cyclone," Journal of Aerosol Science and Technology, Vol. 12, pp. 1055-1066, 1990.
6. Crane, R. I., Barbaris, L. N., Behrouzi, P., "Particulate Behavior in Cyclone Separators with Secondary Gas Extraction," Journal of Aerosol Science, Vol. 23, pp. 765-768, 1992.
7. Raffaello, D. Luciano., Barbara, L. Silva., Leonardo, M. Rosa., Henry, F. Meier., "Multi-objective optimization of cyclone separators in series based on computational fluid dynamics," Journal of Powder Technology, Vol. 325, pp. 452-466, 2018.
8. S, Venkatesh., M, Sakthivel., H, Saranav., N, Saravanan., M, Rathnakumar., K, Santhosh., "Performance investigation of the combined series and parallel arrangement cyclone separator using experimental and CFD approach," Journal of Powder Technology, Vol. 361, pp. 1070-1080, 2020.
9. Lee, H. W., "Study of improving performance of hydrocyclone for ultra-low flow rates," A Thesis for a Master degree, Kumoh National Institute University, Republic of Korea, 2020.
10. Tian, J., Ni, L., Song, T., Olson, J., & Zhao, J., "An overview of operating parameters and conditions in hydrocyclones for enhanced separations," Separation and Purification Technology, Vol. 206, pp. 268-285, 2018.
11. Yoshida, H., "Effect of apex cone shape and local fluid flow control method on fine particle classification of gas-cyclone," Chemical engineering science, Vol. 85, pp. 55-61, 2013.
12. Zhao, B., "Development of a New Method for Evaluating Cyclone Efficiency," Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, Vol. 44, pp. 447-451, 2005.