

Hydrocyclone Filter 장치를 이용한 강우유출수내 미세입자 제거특성 분석 Performance Evaluation of Hydrocyclone Filter for Treatment of Micro Particles in Storm Runoff

이준호 † · 방기웅* · 홍성철**
Jun-ho Lee † · Ki-woong Bang* · Sung-chul Hong**

충주대학교 환경공학부 · *한밭대학교 토목·환경·도시공학부 · 부산대학교 환경시스템공학과
Department of Environmental Engineering, Chungju National University

*Division of Civil, Environmental and Urban Engineering, Hanbat National University

** Department of Environmental System Engineering, Pusan National University

(2009년 10월 1일 접수, 2009년 10월 24일 채택)

ABSTRACT : Hydrocyclone is widely used in industry, because of its simplicity in design, high capacity, low maintenance and operational cost. The separation action of a hydrocyclone treating particulate slurry is a consequence of the swirling flow that produces a centrifugal force on the fluid and suspended particles. In spite of hydrocyclone have many advantage, the application for treatment of urban stormwater case study were rare. We conducted a laboratory scale study on treatable potential of micro particles using hydrocyclone filter (HCF) that was a combined modified hydrocyclone with perlite filter cartridge. Since it was not easy to use actual storm water in the scaled-down hydraulic model investigations, it was necessary to reproduce ranges of particles sizes with synthetic materials. The synthesized storm runoff was made with water and addition of particles; ion exchange resin, road sediment, commercial area manhole sediment, and silica gel particles. Experimental studies have been carried out about the particle separation performance of HCF-open system and HCF-closed system. The principal structural differences of these HCFs are underflow zone structure and vortex finder. HCF was made of acryl resin with 120 mm of diameter hydrocyclone and 250 mm of diameter filter chamber and overall height of 800 mm. To determine the removal efficiency for various influent concentrations of suspended solids (SS) and chemical oxygen demand (COD), tests were performed with different operational conditions. The operated maximum of surface loading rate was about 700 m³/m²/day for HCF-open system, and 1,200 m³/m²/day for HCF-closed system. It was found that particle removal efficiency for the HCF-closed system is better than the HCF-open system under same surface loading rate. Results showed that SS removal efficiency with the HCF-closed system improved by about 8~20% compared with HCF-open system. The average removal efficiency difference for HCF-closed system between measurement and CFD particle tracking simulation was about 4%.

Key words : Hydrocyclone, Hydrocyclone filter, Stormter runoff, Micro particle, CFD

요약 : Hydrocyclone은 높은 수면적부하율 운전이 가능하고, 구동부분이 없고, 운전 및 유지관리비가 적게 소요되어 미세입자물질 제거에 효과적인 장치로 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다. Hydrocyclone에 나선형 유입부를 통해 직각으로 유입되어 중력이 아닌 원심력에 의해 입자물질이 하부배출구로 분리되고 처리수는 vortex finder를 통해 배출된다. 입자분리에 hydrocyclone은 많은 장점을 가지고 있음에도 불구하고 도시지역 강우유출수 처리사례는 드문 실정이다. 본 연구에서는 변형된 hydrocyclone과 perlite 여재를 조합한 hydrocyclone filter (HCF)을 이용하여 강우유출수내 미세입자의 제거능을 분석하였다. 입자물질들은 인공입자들을 이용하여 강우유출수내 입자농도를 모의 실험하였다. 인공입자들을 물에 분산시켜 강우유출수를 재현하였는데 사용한 입자들은 이온교환수지, 도로측구 퇴적물질, 상업지역 맨홀퇴적물질, 그리고 실리카겔 등이다. 하부배출부와 vortex finder 구조를 달리하여 HCF-open system과 HCF-closed system으로 구분하여 처리능을 분석하였다. HCF장치는 아크릴 수지를 이용하였는데 hydrocyclone의 직경은 120 mm이고 여과조의 직경은 250 mm이고 전체적인 높이는 800 mm로 제작하였다. 운전조건별 유입수 농도와 입경을 다양하게 적용하였고 SS와 COD농도를 분석하여 처리효율을 산정하였다. HCF-open system의 경우 운전 가능한 최대 수면적부하율은 700 m³/m²/day이었고 HCF-closed system의 경우 수면적부하율 1,200 m³/m²/day까지이다. HCF-open system 운전결과 HCF-closed system에 비교하여 평균 수면적부하율은 2배 이상 높게 운전이 가능하며 처리효율도 8~20% 이상 향상되는 것으로 분석되었다. 또한 유입수 SS농도가 높을수록 처리효율이 증가하며, 입경이 클수록 수면적부하율의 변화에 대한 처리효율의 영향이 적은 것으로 분석되었다. HCF-closed system의 실험을 통한 수면적부하율 변화에 대한 실리카겔입자의 제거 효율과 CFD입자추적기법을 이용한 예측 처리효율을 비교한 결과 CFD에 예측효율이 실제실험결과와 비교하여 다소 높게 나타나지만 처리효율의 경향은 매우 유사하게 나타나 CFD추적기법을 이용한 HDS유형 처리장치 설계 시 유용한 도구로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주제어 : 하이드로사이클론, 하이드로사이클론 여과, 강우유출수, 미세입자, 전산유체역학

† Corresponding author : E-mail : jlee@cju.ac.kr Tel : 043-841-5723 Fax : 043-841-5351

1. 서론

원심력을 입자에 가해 침전속도를 가속시켜 입자를 분리시키는 hydrocyclone은 수리동력학적분리장치(hydrodynamic separator, HDS)중의 하나로 1891년 Bretney가 고안되어 다양한 분야에서 널리 이용되는 장치이다.^{1,2)} Hydrocyclone에 나선형 유입부를 통해 직각으로 유입되어 중력이 아닌 원심력에 의해 입자물질이 하부배출구(apex)로 분리되고 처리수는 vortex finder를 통해 배출된다. Hydrocyclone은 HDS유형 장치 중에서도 높은 수면적부하율 운전이 가능하고, 구동부분이 없고, 운전 및 유지관리비가 적게 소요되어 미세입자물질 제거에 효과적인 장치로 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다.^{3,4)} 또한, hydrocyclone의 단순한 구조, 낮은 운전비용, 작은 용적, 유지관리가 용이하므로 석유화학, 농축, 입경분리, 액·액분리, 가스제거, 광물질 선별, 광산, 제약 산업, 식품공학 분야에서 널리 이용되는 기술이다.^{5,6)} 현재까지 전 세계적으로 개발된 다양한 형태의 hydrocyclone이 있지만 기본적인 처리 원리는 고회전물질을 회전류(vortex)를 주어 고액 분리시킨다는 점에서 모두 유사한 특징을 가진다.⁷⁾ 많은 연구자들이 hydrocyclone 본체와 유입, 유출부, vortex finder 등 내부 구조의 변화에 따른 처리효율 특성분석을 위해 모형장치를 제작하여 수리실험을 통해 개선 및 개량을 시도하였다.^{8~10)}

강우유출수는 대표적인 비점오염원으로 불규칙한 발생, 많은 종류의 유해물질의 함유, 극단적인 유량 변동 폭 등으로 기존 하수처리공법으로는 처리가 불가능하다. 특히 도시 지역에서 초기강우(first flush) 시 부유물질의 농도는 건기 시 하수농도에 비교하여 5~100배 높은 것으로 보고되었다.^{11,12)} 강우유출수내 오염물질을 처리하기 위해 hydrocyclone을 이용한 사례는 국·내외에서 극히 미미한 실정이다. 이는 hydrocyclone에 유입 시 필요한 유속을 발생시키기 위해 펌프 등의 동력을 사용해야 하는 제한점과 회전류 발생을 위해서는 높은 수두가 요구되기 때문이다. 현재까지 hydrocyclone은 주로 산업용으로 10% 이상의 고농도 슬러리에서의 입자분리기술에 집중되었다.¹⁾ 입자물질의 분리를 위해 적용된 hydrocyclone 관련 연구사례로서, Zhao 등¹³⁾은 유입부 형상이 다른 3종의 hydrocyclone 장치를 이용하여 처리성능, 압력손실, 제거입경, 처리유량 등을 분석한 결과 spiral 유형의 유입부 형태가 압력손실이 증가함에 따라 처리효율이 증가한다고 하였다. Yoshida 등¹⁴⁾은 hydrocyclone성능 개선을 위하여 movable guide

plate를 이용하여 20 μm 입경의 입자들을 높은 제거효율로 처리하였다. Hydrocyclone상단에 모터를 부착한 블레이드를 부착하여 0~10,000 rpm으로 조정하였고 10.3 μm 순수 실리카 입자를 대상으로 한 결과 air core가 발생하지 않는다고 하였다. Wang 등²⁾은 난류모델인 Reynolds stress model을 이용하여 hydrocyclone내 air core형성을 다상모델(multiphase model)로 하여 유체흐름을 모의하였다. 유속장의 변화, 압력손실, 하부배출유량비, 입자궤적, 입자분리효율 등을 실측하여 CFD모의결과 비교분석하였다. Majumder 등¹⁵⁾은 hydrocyclone에서 유량이 증가함에 따라 미세입자의 제거율이 증가하는 fish hook현상을 critical, dip, end, depth point로 구분하여 입경별 제거특성을 제시하였다.

Bergstrom 등¹⁶⁾은 hydrocyclone 장치 내 유속장 변화에 처리효율에 관한 연구들을 종합적으로 분석하여 정리하였는데, Hydrocyclone내 radial 흐름은 vortex finder의 개구부에서 발생한다고 하였다. 또한, 유입유속이 낮을 경우 hydrocyclone내 고압력과 결합하여 단회로 흐름을 유발하며, 복잡한 유형의 유입부 구조일수록 단회로(short circuiting) 현상을 감소시켜 처리효율을 증가시킨다고 하였다. Zhao 등¹⁷⁾은 hydrocyclone이 석유화학, 광산업 및 기타 많은 산업에서 널리 이용되고 있는 장치이지만 아직까지 hydrocyclone 분리효율 원리에 대한 규명이 안 된 실정임을 강조하고, 레이놀드수가 1이하인 미세입자들에 제거 한계가 hydrocyclone 분리효율에 큰 문제라고 하였다. Vieira 등¹⁸⁾은 hydrocyclone 원주벽면에 여과벽을 설치하여 처리효율을 기존 hydrocyclone과 비교한 결과 여과벽을 설치한 경우 처리효율이 10% 이상 증가한다고 보고하였다.

Neru 등³⁾은 2개 유입부를 가진 hydrocyclone에서 유입유량비의 변화에 따른 처리특성을 분석하였는데 2차 유입부를 적용 시 추가된 유량에 의해 입자에 각속도를 증가시켜 제거효율이 증가한다고 보고하였다. Pandit 등⁶⁾은 침전조에서 제거되지 않는 미세입자물질이 수력발전소의 기계장치 및 부속품에 손상발생을 저감시키기 위한 방안으로 hydrocyclone을 적용하였다. Hydrocyclone 유입부에서 발생하는 단회로 현상을 줄이기 위해 유입부를 10° 경사지도록 하였다. 이외에도 전산유체역학(CFD)을 이용하여 hydrocyclone내 유체와 입자거동을 분석하려고 시도한 연구도 다수이지만^{4,19~21)} 강우유출수내 미세입자 오염물질 처리에 적용한 연구는 극히 미미한 실정이다.²²⁾

국내에서 연구한 사례로서, 정연규 등²³⁾은 직경이 7.5 cm인 hydrocyclone을 이용하여 토양입자 입경 d_{50} 을 110,

200, 270 μm 로 분류하여 0.3~3.0 kg/cm^2 의 범위에서 변화를 주어 처리효율을 분석하였다. 이준호 등²⁴⁾은 입경을 분류한 활성탄과 모래를 대상으로 한 인공시료와 합류식 하수관과 분류식 하수관 퇴적물질을 대상으로 vortex separator에서의 처리능을 분석하였다. 수면적부하율, 유입수 농도, 하부배출유량의 변동이 처리효율에 미치는 영향을 해석하였고, 유역면적에 따른 vortex separator의 직경을 도출하였다. 이성재 등²⁵⁾은 한강 준설 퇴적물을 골재로 활용하기 위해 hydrocyclone을 이용하여 0.074~0.5 mm 입径의 시료를 조제하여 유입압력변화에 따른 처리효율을 분석한 결과, 전체적인 분리효율은 86~94%이며, 유입수 최적압력은 1.5 kg/cm^2 이라고 제시하였다. 또한, 동일한 유입수 압력조건하에서 고형물 농도가 낮을수록 효율이 증가하고, 동일한 고형물 농도에서는 압력이 높을수록 분리효율은 증가한다고 하였다. 최상일 등²²⁾은 주차장 포장면에서 유출수내 미세입자 및 탁도 물질을 제거하기 위해 hydrocyclone과 침전조를 이용하여 중수도 활용가능성을 분석하였는데, 입径이 40~60 μm 인 입자를 50% 이상 제거할 수 있다고 하였다. 윤치호 등²⁶⁾은 망간단괴가 단괴간의 파쇄 등으로 인하여 해저면의 미세한 퇴적물질 형성 등 해양오염을 방지하기 위해 습식사이클론을 이용하여 처리능을 분석하였고 50% 제거입경을 제시하였다. 최근 개발되고 있는 HDS 장치는 스크린(screen)과 여재(media)의 조합을 통하여 미세입자의 제거효율을 높이고자 시도하고 있다.^{27~29)} HDS와 여재를 조합한 기술 중의 하나로서 Fluid

dynamic separation filter (FSF)²⁷⁾은 입자제거를 극대화하기 위해 하부는 원심력에 의한 입자제거를 유도하고 상단에서는 perlite와 같은 부상여재를 통하여 미세입자를 제거하는 기술이다.

본 연구에서는 hydrocyclone의 장점인 높은 수면적부하율 운전조건과 부상여재인 perlite를 조합한 hydrocyclone filter (이하 HCF) 장치를 이용하여 강우유출수내 함유된 미세입자의 제거특성을 분석하였다. Hydrocyclone의 구조를 변경하여 본체의 상단을 개방(open system)한 경우와 폐쇄(closed system)된 것으로 구분하였으며 하부배출부를 open system의 경우 underflow cone과 cone baffle로 구성하였고, closed system의 경우 underflow screen을 부착하여 처리특성을 비교 평가하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. Hydrocyclone Filter (HCF) 장치의 구성

Hydrocyclone 본체 상단을 개방한 경우(HCF-open system)와 폐쇄한 경우(HCF-closed system), 그리고 하부배출부에 underflow screen을 설치한 경우와 underflow cone baffle를 설치한 경우로 운전할 수 있도록 가변조립식으로 구성하였다. HCF장치의 구조는 Fig. 1과 같이 투명 아크릴로 제작하였으며 hydrocyclone은 외경이 12 cm, 내경이 11 cm이고 상단 높이는 30 cm, 하단에서 배출부까지는

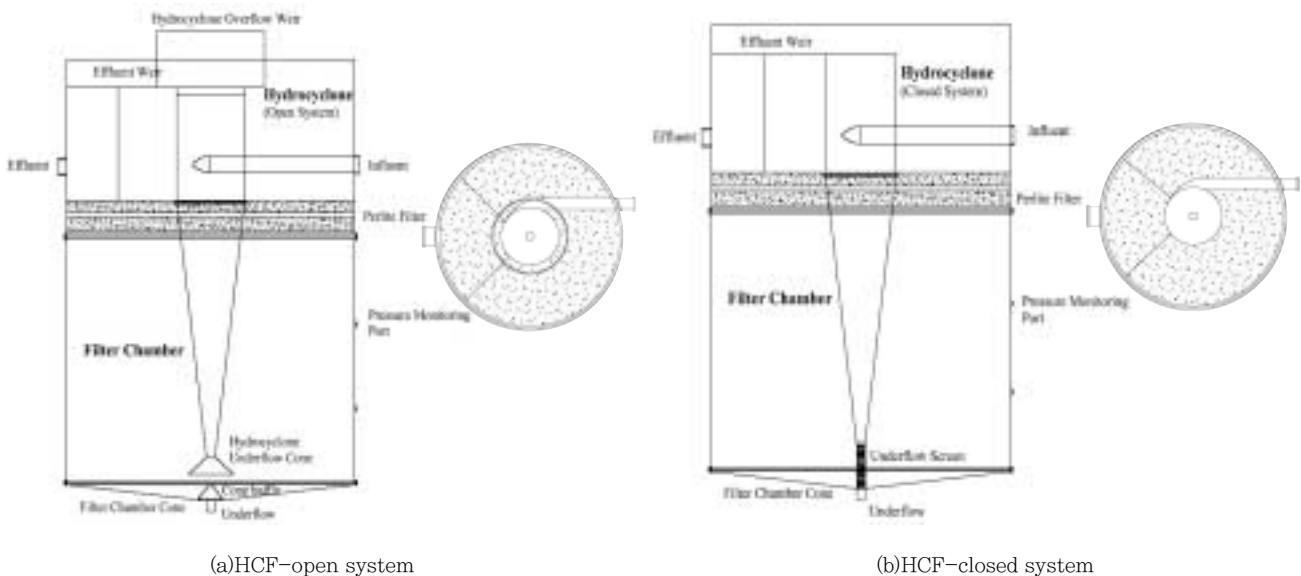


Fig. 1. The structure of hydrocyclone filter (HCF) device.

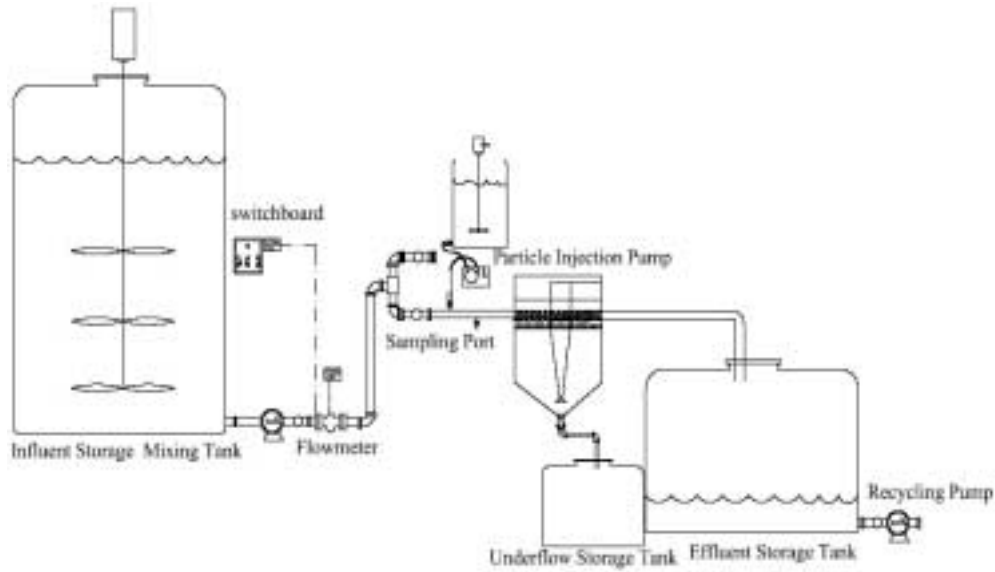


Fig. 2. Schematic diagram of the HCF operation system.

35 cm이다. 유입부는 폭 2 cm, 높이 3 cm의 직사각형 유입부가 hydrocyclone 측벽에 나선형으로 연결하여 회전류의 발생이 극대화되도록 하였다. 여과조(Filter chamber)는 외경 25 cm, 높이 80 cm이며 hydrocyclone 상층 높이가 3 cm인 2개의 perlite 여재 카트리지를 설치하였다.

Fig. 1a는 open system으로 hydrocyclone 상단에 높이 12 cm인 유출위어(effluent weir)를 설치하여 여재의 수면적부하율이 초과되는 유량이 발생 시에 위어를 통해 직접 유출되도록 하였다. 월류되는 경우에서 월류수가 여과조 상단에 일부는 저류되도록 하여 입자물질의 직접배출을 최소화 하였다. Hydrocyclone 하부배출부에는 높이 3 cm, 직경이 10 cm인 원형 콘(underflow cone)을 설치하였고, 여과조 하부에는 원형 콘(cone baffle)을 underflow cone과 대칭으로 설치하여 hydrocyclone에서 배출된 입자들의 재부상을 저감시키도록 하였다. Fig 1b는 closed system으로서 hydrocyclone상단은 폐쇄하였고 하부배출부에 3 cm 직경에 길이 12 cm이 원통형 아크릴에 공경이 5 mm로 타공한 underflow screen을 hydrocyclone 하부배출부와 여과조 배출부와 연결하였다. Hydrocyclone 하부에 농축된 입자들이 장치의 하부배출부로 직접배출되고 미세입자들은 underflow screen으로 배출되어 상향흐름으로 perlite여재를 통하여 미세입자들이 제거되고 유출되도록 하였다. 여과조 용적은 35 L이고 하부 바닥은 원추형으로 밸브를 부착하여 하부배출유량 (underflow, Q_u)을 조절할 수 있도록 하였다. Fig. 2는 HCF장치 운전을 위한 장치 구성도를 나타낸 것이며, Fig. 3은 설치된 장치의 모



Fig. 3. Installation of HCF system.

습을 나타낸 것이다. 장치는 유입수 2 m³ 용량의 유입수 저류조, 교반기, 유량조절 가변기를 장착한 유입수 3 hp 주입펌프, 유입수 바이패스 밸브, 초음파 관유량계, 입자저류조, 입자주입 정량펌프, 입자주입 저류조, HCF 본체, 그리고 유출유량과 하부배출유량 저류조, 유출유량 저류조 반송펌프, 배관, 밸브 등으로 구성하였다. 유입저류조의 물을 유입펌프에 의해 유입되면 25 mm PVC 관로에 연결된 관을 통해 입자물질들을 슬러리 상태로 교반시켜 정량펌프(MasterFlex)을 이용하여 8 mm관을 통해 주입하여 HCF 본체로 혼합되어 유입시켰다. HCF 본체에 유입되기 전에 유입관로 하단에 25 mm 밸브를 설치하여 유입수를 채수할 수 있도록 하였다.

Table 1. Physical characteristics of injected particles

Materials	Density (g/cm ³)	Range of particle size, d _p (μm)
Ion exchange resin	1.5	300 μm < d _p < 500 μm
Road sediment	2.2	d _p < 45 μm, 45 μm < d _p < 75 μm,
Commercial area manhole sediment	2.0~2.1	d _p < 45 μm, d _p < 125 μm, d _p < 250 μm
Silica gel	1.1	63 μm < d _p < 200 μm

2.2. 재료 및 실험방법

강우유출수내 미세입자물질의 모의하기 위하여 실험에 사용한 물질은 이온교환수지, 도로측구 퇴적물질, 상업밀집 지역 맨홀 퇴적물질, 그리고 실리카겔(SiO₂)입자 등이다. 도로와 맨홀 퇴적물질들은 건조기에서 90℃로 24시간 건조 후 입경을 45~250 μm 범위에서 5단계로 분류하여 사용하였다. 이온교환수지의 입경범위는 300~500 μm이며 비중은 약 1.5로서 (주)이디테크³⁰⁾에서 제조한 입자를 이용하였다. 실리카겔 입자는 독일 Merck사³¹⁾에서 제조한 칼럼 크로마토그래피의 흡습제로 이용되는데, 비중은 약 1.1이고 입경범위는 63~200 μm이다. 처리장치로 유입시키기 전에 20 L 용량의 교반조에 수돗물을 일정량 혼합하여 저 농도 슬러리 상태를 유지시켜 HCF장치에 주입하였다. 분석에 사용한 입자물질들의 입경범위, 밀도, 체 분리된 입경 등 물리적 특성을 Table 1에 나타내었다.

HCF 장치에 운전인자는 hydrocyclone 본체 상단의

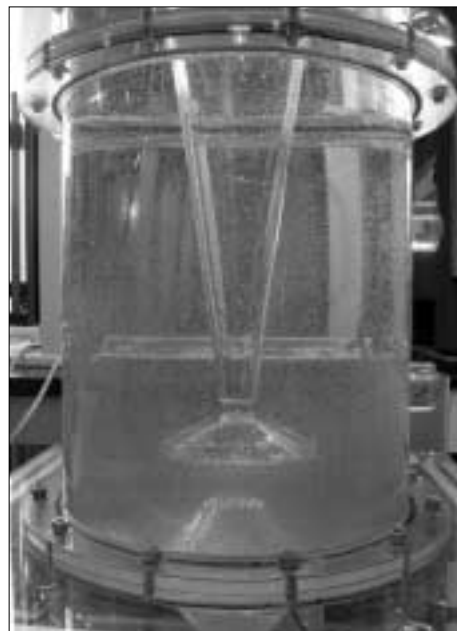
open, closed 조건별 수면적부하율(V₀)의 변화와 유출되는 월류 유량 (Q_o)에 대한 하부배출 유량 (Q_u)의 비율 [Q_u/(Q_u+Q_o)] 등이다. 시료의 채수는 유입유량의 변화를 주었을 때 처리장치 본체에서 약 2분 이상 경과한 후 안정된 상태에서 유입수와 유출수 시료를 동시에 채수하였다. 초음파 유량계를 이용하여 유입유량을 측정하고 하부배출유량과 유출유량은 시간-용량법을 이용하여 유량을 산정하였다. 채수한 시료에 대해 수질분석 항목은 GF/C여지에 의한 여과 후 건조 전·후 무게를 측정하여 SS를 분석하였고, 환류냉각 중 크롬산칼륨법에 의한 COD를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. HCF-open system에 의한 이온교환수지 입자 제거특성



(a) without underflow



(b) with underflow

Fig. 4. Particle accumulation in a region of underflow according to with and without underflow.

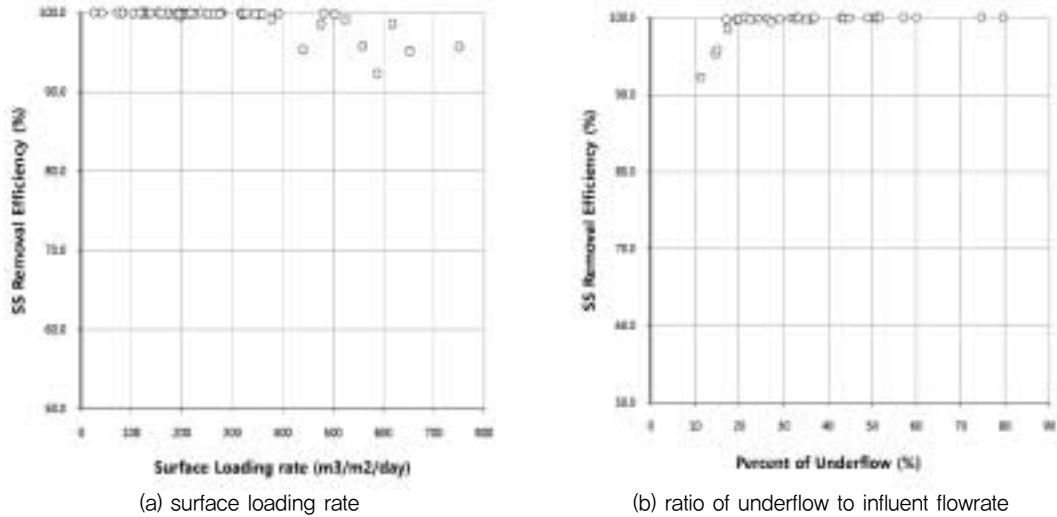


Fig. 5. The relationship between the SS removal efficiency and surface loading rate, the ratio of underflow to influent flowrate.

Table 2. Ion exchange resin removal efficiency ranges according to surface loading rate and the ratio of underflow to influent flowrate

Range	V_0 (m ³ /m ² /day)	SS _i (mg/L)	SS _o (mg/L)	$E_{(SS)}$ (%)	$Q_u/(Q_u+Q_0)$ (%)	SS _u (mg/L)
Min	25.9	161.5	0.0	92.3	11.3	8,853.0
Max	750.0	9,581.0	58.0	100.0	79.5	23,629.0
Mean	277.5	2,509.6	6.8	99.3	35.9	15,230.1

입경이 300~500 μ m 범위의 이온교환수지 입자들을 입자 주입펌프를 이용하여 HCF장치에 유입시켰다. 여재는 충전하지 않고 여재 카트리지만 장착하여 수면적부하율 변화와 하부배출유량비에 대한 처리특성을 분석하였다. Fig. 4는 운전 중인 HCF장치에 하부배출 유무에 따라 하부에 입자의 축적되는 모습을 나타낸 것으로 하부배출유량이 없을 경우 여과조 하단에 설치된 cone baffle의 하부에 축적되어 재부상을 억제기능이 있는 것을 보여준다. 하부배출을 할 경우 하부에 퇴적된 입자들은 하부배출에 의해 축적이 발생되지 않는 것을 보여준다. Table 2는 운전결과를 요약한 것으로 수면적부하율 25.9~750 m³/m²/day(평균 277.5 m³/m²/day)의 운전 범위에서 이온교환수지 제거율은 평균 99.3%를 나타내고 있다. HCF-open system에서 hydrocyclone의 상부를 개방한 경우 월류위어를 통해 유출부로 직접 배출되어 처리효율 및 처리용량도 감소하는 특성을 나타내었다. 이는 hydrocyclone유입수가 하부배출구를 통해 여과조로 이송되는 유량이 작아 발생하는 손실수두의 증가에 의한 것이다. 수면적부하율이 750 m³/m²/day을 초과하여 운전할 경우 상단유출위어를 통해 유입수가 유출부로 배출되어 운전범위를 초과하였다. 하부로 배출되는 입자의 평균농도는 15,230 mg/L로 유입수 평균농도보다 6배 이상 농축되었다.

Fig. 5a는 수면적부하율 변화에 대한 이온교환수지 입자 제거효율을 SS농도로 나타낸 것이며, Fig. 5b는 하부배출유량비의 변화에 따른 입자제거효율과의 관계를 나타낸 것이다. 수면적부하율이 800 m³/m²/day까지 증가하여도 95% 이상의 처리효율을 나타내고 있다. 하부배출유량이 20% 이상일 경우 처리효율은 99% 이상으로 하부배출량이 증가하면 입자제거효율이 높아지는 것으로 나타났다.

3.2. HCF-open system에 의한 도로퇴적물질 미세 입자 제거특성



Fig. 6. The effect of perlite filter for turbidity removal.

Table 3. SS removal efficiency for different range of particle size according to surface loading rate

Range	Sediment Size, $d_p < 45 \mu m$				Sediment Size, $45 \mu m < d_p < 75 \mu m$			
	V_o ($m^3/m^2/day$)	SS_i (mg/L)	SS_o (mg/L)	$E_{(SS)}$ (%)	V_o ($m^3/m^2/day$)	SS_i (mg/L)	SS_o (mg/L)	$E_{(SS)}$ (%)
Min	156.9	35.5	5.5	45.5	132.3	89.0	11.0	56.7
Max	450.8	61.0	21.0	90.6	610.2	235.5	38.5	91.3
Mean	291.4	49.6	13.8	68.4	345.3	157.7	25.2	76.0

도로퇴적물질입자를 체분리하여 45 μm 이하의 입자들과 45~75 μm 입자들을 대상으로 입경이 2 mm 이하의 perlite 여재를 충전하였다. 하부배출유량은 10%로 고정하고 입자 주입펌프로 유입수에 주입한 결과를 Table 3에 요약하였다. Fig. 6은 HCF장치 여과조에서 여재를 통과 전후의 입자 제거 효과를 나타내는 사진으로 여재를 통과할 경우 탁도가 감소되는 것을 보여준다. 입경이 15 μm 이하의 경우 수면적부하율 156.9~450.8 $m^3/m^2/day$ (평균 281.4 $m^3/m^2/day$)의 범위에서 SS제거효율은 45.5~90.6% (평균 68.4%)을 나타내었다. 45~75 μm 범위 입자들의 경우 수면적부하율 132.3~610.2 $m^3/m^2/day$ (평균 345.3 $m^3/m^2/day$)의 범위에서 SS제거효율은 56.7~91.3% (평균 76.0%)을 나타내었다. Fig. 6은 입경범위별 수면적부하율변화에 대한 SS제거효율 및 회귀선을 나타낸 것으로 상관계수 (r^2)는 0.97 이상으로 나타났다.

3.3. HCF-closed system에 의한 맨홀퇴적물질 미세입자 제거특성

상업밀집지역에 맨홀퇴적물질을 3단계 입경으로 분류하여 HCF-closed system으로 처리특성을 분석하였다. Hydrocyclone본체 하부에 Fig. 8과 같이 원통형 아크릴

수지에 5 mm로 타공하여 선회류에 의해 조대입자는 하부로 배출되고 미세입자는 통과하여 상향 여과되도록 하였다. 수면적부하율을 240.8~1,084.3 $m^3/m^2/day$ 의 범위로 운전하였고 하부배출유량비는 10% 이하로 운전하였다. 입경별 유입수 농도와 유출수 농도의 범위 및 처리효율을 Table 4에 요약하였다. 45 μm 미만 입경의 경우 유입수 평균농도는 SS 227.6 mg/L, COD 44.3 mg/L이며 평균 제거율은 SS 76.5%, COD 30.0%로 분석되었다. 125 μm 미만 입경의 경우 유입수 평균농도는 SS 470.5 mg/L, COD 53.3 mg/L이며 평균제거율은 SS 78.0%, COD 35.0%로 분석되었다. 250 μm 미만의 경우 유입수 평균농도를 SS 4,444.3 mg/L로 고농도의 조건으로 운전한 결과 SS 97.0%, COD 53.9%의 평균처리효율을 나타내었다. Fig. 9는 입경별 수면적부하율 변화에 대한 SS와 COD제거율을 나타낸 것으로 입경이 클수록 수면적부하율 증가에 따른 처리효율의 감소가 적은 것을 보여준다. 수면적부하율 800 $m^3/m^2/day$ 운전조건에서 250 μm , 125 μm ,

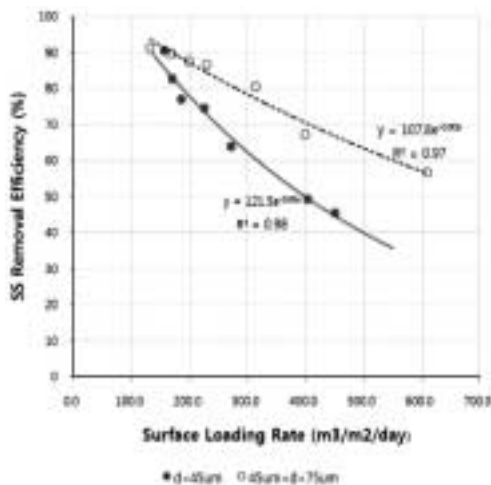


Fig. 7. The relationship between surface loading rate and removal efficiency for different particle size.



Fig. 8. Structure of HCF-closed system with underflow screen.

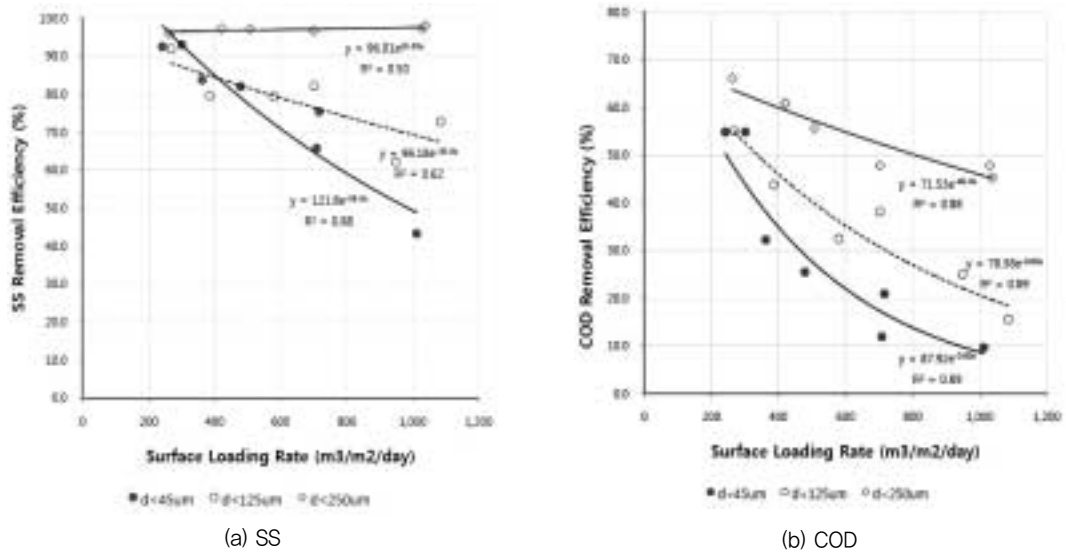


Fig. 9. The relationship between surface loading rate and removal efficiency for commercial area manhole sediment.

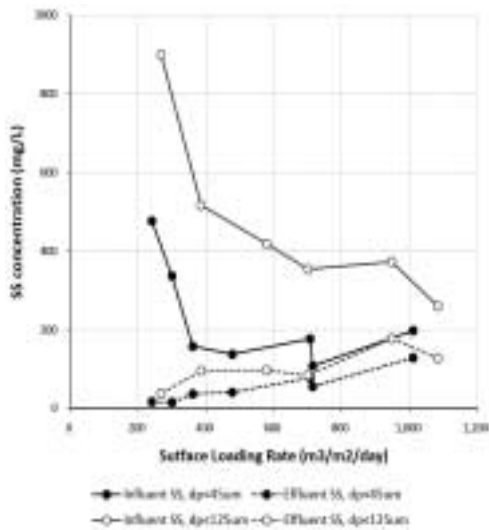


Fig. 10. The variation of influent and effluent SS concentration according to surface loading rate for commercial area manhole sediment.

45 μm 입경의 SS제거율은 각각 95%, 73%, 60%임을 보여주며, COD의 경우 입경별로 각각 50%, 27%, 14% 저감하는 것으로 나타났다. Fig. 10은 125 μm , 45 μm 입경을 대상으로 운전 시 수면적부하율 변화에 대한 유입수와 유출수 SS농도의 변화를 나타낸 것이다. 유입수의 농도는 수면적 부하율이 증가함에 따라 감소하지만 유출수의 농도는 증가하는 경향을 나타내었다. 유입수 SS농도가 높을수록 처리효율이 증가하는 경향을 나타내는데 이성재 등²²⁾이 제시한 동일한 유입압력조건에서 고형물질의 농도가 낮을수록 효율이 증가한다는 것과는 상이한 결과로 본 연구에서는 농도가 낮아지면 처리효율도 감소하는 특성을 보여주었다.

3.4. 실리카겔 입자 제거특성 및 입자추적기법에 의한 처리효율예측

처리장치의 사전설계기술을 위해 전산유체역학

Table 4. SS removal efficiency for different range of particle size according to surface loading rate

Sediment Size	Range	V_o ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{day}$)	SS_i (mg/L)	SS_o (mg/L)	COD_i (mg/L)	COD_o (mg/L)	$E_{\text{SS}}(\%)$	$E_{\text{COD}}(\%)$
$d_p < 45\mu\text{m}$	Min	240.8	108.0	16.0	30.0	20.0	43.3	9.7
	Max	1,011.6	477.0	129.0	70.0	40.0	93.0	54.8
	Mean	545.1	227.6	53.4	44.3	31.0	76.5	30.0
$d_p < 125\mu\text{m}$	Min	267.9	260.0	38.0	40.0	24.0	62.2	15.6
	Max	1,084.3	900.0	178.0	80.0	45.0	91.9	55.0
	Mean	661.1	470.5	103.5	53.3	34.7	78.0	35.0
$d_p < 250\mu\text{m}$	Min	261.9	207.5	88.0	30.0	26.0	95.9	45.2
	Max	1,037.4	19,294.0	181.0	150.0	42.0	98.0	66.1
	Mean	659.5	4,444.3	132.2	76.7	35.3	97.0	53.9

(computational fluid dynamics, CFD) 입자추적 (particle tracking) 기법을 적용하여 처리장치 실험결과와 입자추적에 의한 입자제거 예측효율을 비교 분석하였다. 비중이 약 1.1로 타 입자들과 비교하여 가벼운 입경범위 63~200 μm 인 실리카겔(silica gel)을 HCF-closed system에 적용하였다. Table 5에서와 같이 수면적부하율 306.5~1,165.6 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{day}$ (평균 725.4 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{day}$)의 운전조건에서 SS제거율은 57.5~96.1% (평균 75.2%)의 제거율을 나타내었다. 비중이 작은 입자임을 고려하면 제거효율은 높은 것으로 평가된다.

HCF장치내 유속장 및 입자추적을 통한 처리효율을 예측할 수 있도록 Fluent사의 Gambit 2.4.6로 3차원 격자화 (meshing)하였으며, 난류모델은 FLUENT 6.3.26 CFD $\kappa-\epsilon$ RNG swirl domain model을 적용하였다. HCF장치는 직경 25 cm, 높이 70 cm로 하였고 cell수는 286,400개, 체적은 35 L로 모의하였다. 유체는 물로 하였으며 밀도는 998.2 kg/m^3 , 점도는 0.001003 $\text{kg}/\text{m}/\text{sec}$ 이다. Residual

convergence 기준 값은 10^{-4} 로 설정하고 50회씩 iteration을 실시하였다. Iteration 후 유입과 유출유량과의 차이는 0.001 L/sec 이하로 산정하였다. 선회흐름 내에서의 입자 추적은 Lagrangian 함수를 이용하여 이산상 궤적(discrete phase trajectory)을 계산하는데, 관성, 수리동역학적 마찰력, 중력 등이 포함된다. 입자에 대한 운동량 방정식은 다음 식 (1)과 같다(Fluent 2008).

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u-u_p) + \frac{g_x(p_p-p)}{\rho_p} + F_x \quad (1)$$

여기서, u 는 유체 속도이고 u_p 는 입자속도, μ 는 유체의 점성계수, ρ 는 유체밀도, ρ_p 는 입자밀도이다. F_x 는 단위입자질량당 힘이며, $F_D(u-u_p)$ 은 단위입자질량당 마찰력이다. Fluent CFD모델에 입자를 hydrocyclone에 직각으로 유입부(surface)에 균일하게 주입하는 경계조건을 부여하여 입자의 거동을 예측하였다. 모의입자는 비중이 1.2이고 200 μm 입경을 가진 입자를 생성 하였다. CFD 입자추적을 통하여 처

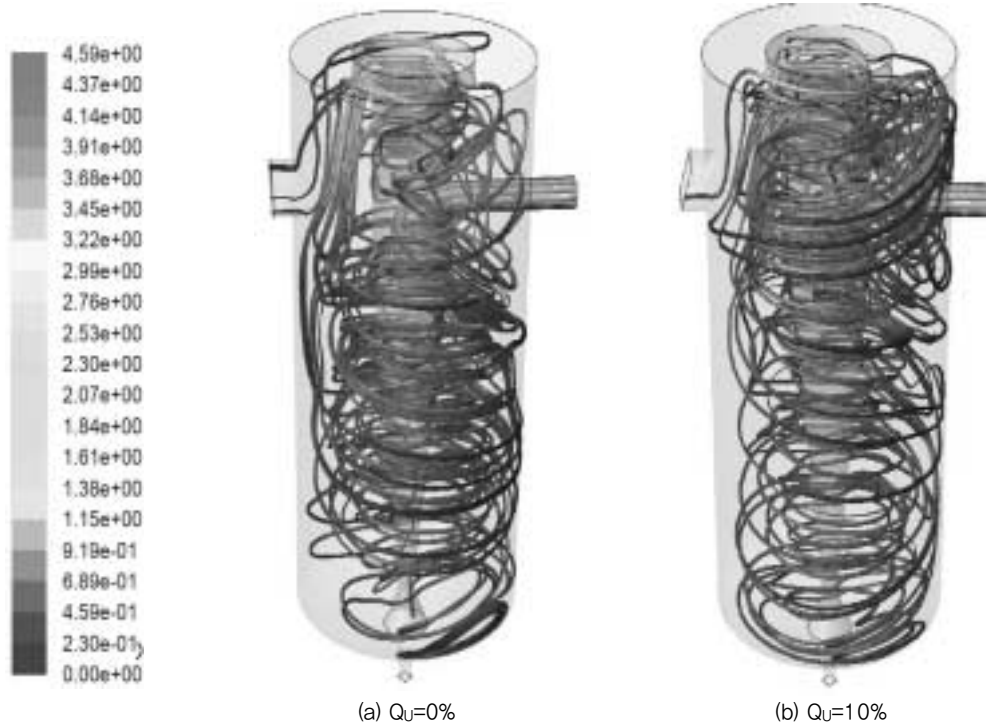


Fig. 11. Particle traces colored by underflow rate.

Table 5. Silical gel particle removal efficiency according to surface loading rate

Range	V_o ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{day}$)	SS_i (mg/L)	SS_o (mg/L)	$E_{(SS)}$ (%)
Min	306.6	648.0	56.5	96.1
Max	1,165.6	3,836.5	612.0	57.5
Mean	725.4	1,440.5	357.7	75.2

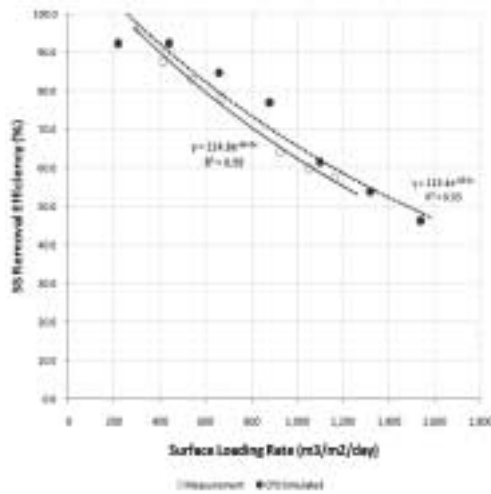


Fig. 12. The relationship between the surface loading rate and SS removal efficiency using CFD particle tracking for silica gel.

리효율은 다음 식 (2)를 이용하여 산정하였는데, hydrocyclone에 주입한 입자 수에 대한 하부배출에 의해 회수된 입자 수의 비율이다.

$$\text{Trap Efficiency} = \frac{\text{Number of Traped Particle}}{\text{Number of Injected Particle}} \quad (2)$$

하부배출유량비를 0%, 10%의 조건에서 CFD 입자추적 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 10%의 하부배출유량비가 적용 시 0% 경우보다 유출되는 입자가 적은 것을 보여준다. Fig. 12는 HCF-closed system의 실험을 통한 수면적부하율 변화에 대한 실리카겔입자의 제거 효율과 CFD 입자추적기법을 이용한 예측 처리효율을 나타낸 것이다. 수면적부하율 800 m³/m²/day 조건에서 실험에 의한 효율은 70%이고 CFD 입자추적에 의한 예측효율은 74%를 나타낸다. CFD에 예측효율이 실제실험결과와 비교하여 다소 높게 나타나지만 처리효율의 경향은 매우 근접한 것으로 평가된다.

3. 결론

Hydrocyclone은 높은 수면적부하율 운전이 가능하고, 구동부분이 없고, 운전 및 유지관리비가 적게 소요되어 미세입자물질 제거에 효과적인 장치임에도 불구하고, 강우유

출수내 오염물질을 처리에 적용한 사례는 극히 미미한 실정이다. 본 연구에서는 hydrocyclone의 장점인 높은 수면적부하율 운전조건과 부상여재를 조합한 hydrocyclone filter (HCF) 장치를 이용하여 강우유출수내 함유된 미세입자의 제거특성을 분석하였다. 또한 처리장치의 사전설계 기술을 위해 전산유체역학 입자추적(CFD particle tracking)기법을 적용하여 처리장치 실험결과와 입자추적에 의한 입자제거효율을 비교 분석하였다. 강우유출수내 미세입자물질을 저감하기 위한 방안으로 다양한 입경과 밀도를 가진 입자들을 대상으로 수면적부하율을 운전조건으로 하여 HCF-closed system과 HCF-open system장치에 적용한 실험 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다. HCF-open system에서 여과조 하단에 설치된 cone baffle의 하부에 축적되어 재부상을 억제하는 기능이 있으며 하부로 배출되는 입자의 평균농도는 유입수 평균농도보다 6배 이상 농축되었다. Hydrocyclone 유입수가 하부배출구를 통해 여과조로 이송되는 유량이 작아 발생하는 손실수두의 증가로 인하여 수면적부하율을 700 m³/m²/day 이하로 운전이 제한되었다. 수면적부하율을 높이고자 hydrocyclone 본체 하부에 원통형 아크릴수지에 5 mm로 타공한 스크린을 설치하여 운전한 결과 HCF-open system 운전결과가 HCF-closed system에 비교하여 평균 수면적부하율은 2배 이상 높게 운전이 가능하며 처리효율도 8~20% 이상 향상되는 것으로 분석되었다. 또한 유입수 SS농도가 높을수록 처리효율이 증가하며, 입경이 클수록 수면적부하율의 변화에 대한 처리효율의 영향이 적은 것으로 분석되었다. 비중이 가벼운 실리카겔(silica gel)을 HCF-closed system에 적용한 결과에서도 입자제거효과는 높게 나타나 유기물질입자과 같은 비중이 작은 입자에 대해서도 처리효과가 있는 것으로 분석되었다. HCF-closed system의 실험을 통한 수면적부하율 변화에 대한 실리카겔입자의 제거 효율과 CFD입자추적기법을 이용한 예측 처리효율을 비교한 결과 CFD에 예측효율이 실제실험결과와 비교하여 다소 높게 나타나지만 처리효율의 경향은 매우 유사하게 나타나 CFD추적기법을 이용한 HDS유형 처리장치 설계 시 유용한 도구로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

KSEE

사 사

본 연구는 한국연구재단 특정기초연구사업(R01-2007-000-10667-0)의 연구비로 수행되었습니다.

참고문헌

- Gupta, R., Kaulaskar, M. D., Kumar, V., Sripriya, R., Meikap, B. C., and Chakraborty., "Studies on the understanding mechanism of ait core and vortex formation in a hydrocyclone," *Chem. Eng. J.*, **144**,153~166(2008).
- Wang, B., Chu, K. W., and Yu, A. B., "Numerical study of particle-fluid flow in a hydrocycloen," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **46**, 4695~4705(2007).
- Neru, R. K. R., and Yoshida, H., "Comparison of separation performance between single and two inlets hydrocyclones," *Adv. Power Technol.*, in press(2008).
- Bergström, J., and Vomhoff, H., "Experimental hydrocyclone flow field studies," *Sep. Puri. Technol.*, **53**, 8~20 (2007).
- Dwari, R. K., Biswas, M. N., and Meikap, B. C., "Performance characteristics for particles of sand FCC and fly ash in a novel hydrocyclone," *Chem. Eng. Sci.*, **59**, 671~684(2004).
- Pandit, H. P., Shakya, N. M., Stole, H., and Garg, N. K., "Hydraulic and sediment removal performance of modified hydrocyclone," *Miner. Eng.*, **22**, 412~414(2009).
- Field, R., and O'Connor T. P., "Swirl technology : Enhancement of design, evaluation, and application," *J. Environ. Eng.*, **122**(8), 741~748(1996).
- Chu, L. Y., Chen, W. M., and Lee, X. Z., "Effect of structural modification on hydrocyclone performance," *Sepa. Puri. Technol.*, **21**, 71~86(2000).
- Evans, W. K., Suksangpanomrung, A., and Nowakowski, A. F., "The simulation of the flow within a hydrocyclone operating with an air core and with an inserted metal rod," *Chem. Eng. J.*, **143**, 51~61(2008)
- Martínez, L. F., Lavín, A. G., Mahamud, M. M. and Bueno, J. L., "Vortex finder optimum length in a hydrocyclone separation," *Chem. Eng. Process.*, **47**, 192~199(2008)
- Saget, A., Chebbo, C., and Bertrand, J. L., "The first flush in sewer systems," *Water Sci. Technol.*, **33**, 101~108 (1996).
- Lee, J. H., Bang, K. W., Ketchum, L. H., Choe, J. S., and Yu, M. J., "First flush analysis of urban storm runoff," *Sci. Total Environ.*, **293**, 163~175(2002).
- Zhao, B., Shen, H., and Kang, Y., "Development of a symmetrical spiral inlet to improve cyclone separator performance," *Powder Technol.*, **145**, 47~50(2004).
- Yoshida, H., Norimoto, U., and Fukui, K., "Effect of blade rotation on particle classification performance of hydrocyclones," *Powder Technol.*, **164**, 103~110(2006).
- Majumder, A. K., Shah, H., Shukla, P., and Barnwal, J. P., "Effect of operating variables on shape of "fish-hook" curves in cyclones," *Miner. Eng.*, **20**, 204~206(2007).
- Bergstrom, J., and Vomhoff, H., "Experimental hydrocyclone flow field studies," *Sep. Puri. Technol.*, **53**, 8~20 (2007).
- Zhao, L., Jiang, M., and Wang, Y., "Experimental study of hydrocyclone under cyclic flow conditions for fine particle separation," *Sep. Puri. Technol.*, **59**, 183~189(2008).
- Vieira, L. G. M., Silva, C. A., Damasceno, J. J. R., and Barrozo, M. A. S., "A study of the fluid dynamics behavior of filtering hydrocyclone," *Sep. Puri. Technol.*, **58**, 282~287(2007).
- Drumm, C., and Bart, H. J., "Hydrodynamics in a RDS extractor: Single and two-phase PIV measurements and CFD simulations," *Chem. Eng. Technol.*, **29**(11), 1297~1302 (2006).
- Narasimha, M., Sripriya, R., and Banerjee, P. K., "CFD modelling of hydrocyclone-Prediction of cut size," *J. Miner. Process.*, **75**, 53-68(2005).
- Puprasert, C., Hebrard, G., Lopez, L., and Aurelle, Y., "Potential of using hydrocyclone and hydrocyclone equipped with grit pot as a pre-treatment in runoff water treatment," *Chem. Eng. Process.*, **43**, 67-83(2004).
- 최상일, 박준형, 조장환, "Pilot 규모 실험을 통한 포장면 유출 빗물 처리에 관한 연구," *한국물환경학회지*, **19**(2), 233~237 (2003).
- 정연규, 박규홍, 배범한, 조경숙, 김용학, 김성훈, 최태영, "Hydrocyclone을 이용한 준설 퇴적물의 입자분리와 유기물의 거동," *대한환경공학회 2001 춘계학술연구발표회 논문집*, pp 25~25(2001).
- Lee J. H., Bang K. W., Choe J. S., and Joh S. J., "The hydrodynamic filter separator for removal of urban runoff," *Water Sci. Technol.*, **53**(7), 243~252(2006).
- 이성재, 배범한, 박규홍, 강성원, 황규대, 지재성, "준설퇴적물 분류 및 오염물질의 물리화학적 전처리," *대한환경공학회지*, **25**(1), 55-63(2003).
- 윤치호, 박용찬, 이동길, 권석기, "습식 사이클론을 이용한 망간

- 단괴 슬러리의 고액 분리,” 한국지구시스템공학회지, **41**(4), 327~332(2004).
27. Lee J. H., Bang K. W., Choe J. S., and Joh S. J., “The hydrodynamic filter separator for removal of urban runoff,” *Water Sci. Technol.*, **53**(7), 243~2526(2006).
28. StormFilter, www.stormwater360.com (2009)
29. Up-Flow Filter, www.hydrointernational.biz (2009)
30. (주)이디테크 www.edtech.co.kr (2009)
31. Merck www.merck.de (2009)
32. Fluent 6.3.26 user's manual, ANSYS Inc, www.ansys.com (2008)